

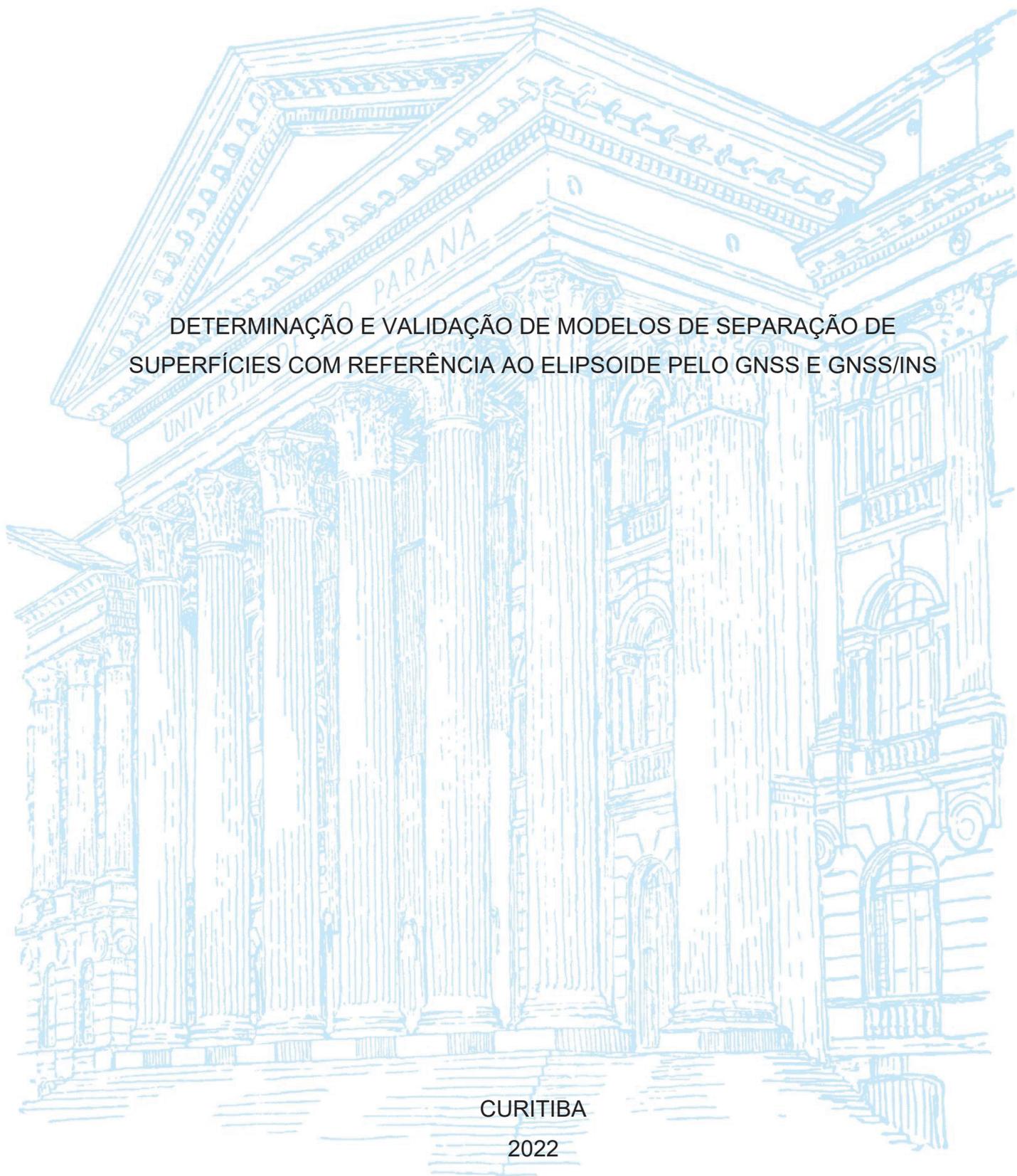
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE RODRIGUES SANTANA

DETERMINAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SEPARAÇÃO DE  
SUPERFÍCIES COM REFERÊNCIA AO ELIPSOIDE PELO GNSS E GNSS/INS

CURITIBA

2022



FELIPE RODRIGUES SANTANA

DETERMINAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SEPARAÇÃO DE  
SUPERFÍCIES COM REFERÊNCIA AO ELIPSOIDE PELO GNSS E GNSS/INS

Dissertação de mestrado 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. Claudia Pereira Krueger

Coorientadora: Profa. Dra. Érica Santos Matos Baluta

CURITIBA

2022

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

---

S232d Santana, Felipe Rodrigues

Determinação e validação de modelos de separação de superfícies com referência ao elipsoide pelo GNSS e GNSS/INS [recurso eletrônico] / Felipe Rodrigues Santana – Curitiba, 2022.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, 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. Cláudia Pereira Krueger

Coorientadora: Profa. Dra. Érica Santos Matos Baluta

1. Hidrografia. 2. Geodésia. I. Krueger, Cláudia Pereira. II. Baluta, Érica Santos Matos. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 551.40

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB-9/1563



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 CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELIPE RODRIGUES SANTANA** intitulada: **DETERMINAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS DE SEPARAÇÃO DE SUPERFÍCIES COM REFERÊNCIA AO ELIPSÓIDE PELO GNSS E GNSS/INS**, sob orientação da Profa. Dra. CLAUDIA PEREIRA KRUEGER, 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, 26 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica  
31/08/2022 12:14:24.0  
CLAUDIA PEREIRA KRUEGER  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
29/08/2022 10:06:52.0  
REGIANE DALAZOANA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
31/08/2022 11:36:27.0  
SILVIO JACKS DOS ANJOS GARNES  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica  
29/08/2022 10:34:54.0  
ÍTALO OLIVEIRA FERREIRA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA)

---

Centro Politécnico - Caixa Postal 19001 - CURITIBA - Paraná - Brasil  
CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3153 - E-mail: cpgcg@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.  
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 218611

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 218611**

Aos meus tios Milton Rodrigues e Mário Rodrigues (*in memoriam*), que despertaram em mim a paixão pelo mar e pela ciência, e a todos que trabalham com dados hidrográficos.

## AGRADECIMENTOS

Às minhas amigas e orientadoras, Profa. Dra. Claudia e Profa. Dra. Érica. O envolvimento delas com sugestões, críticas, respostas rápidas, flexibilidade, disponibilidade, presença (por vezes com encontros semanais), foram fundamentais para esta dissertação.

À banca, Professora Regiane e Professor Silvio, pelos valiosos comentários que fizeram na qualificação para tornar o trabalho mais rico e conciso. Suas experiências nas áreas de geodésia básica, referenciais verticais, marés e processamento GNSS foram fundamentais para obtenção de uma maior sinergia dessas ciências neste trabalho.

À Marinha do Brasil, por ter financiado este estudo por meio da Portaria nº 279 da Diretoria de Pessoal Militar da Marinha (DPMM). Ao Comte Nascimento, pela confiança depositada em mim ao me indicar ao mestrado e por ter escrito comigo o artigo sobre modelos de separação, além de ter me apoiado, juntamente com o SG-HN Edson, nos inúmeros rastreios estáticos realizados no Centro de Hidrografia da Marinha. Aos professores da disciplina de maré, Geraldo e Gregório, pelas orientações dadas. Ao Comte Leonardo Gomes, suas perguntas e comentários foram fundamentais para uma melhor assertividade no conceito das incertezas dos levantamentos hidrográficos. Ao meu amigo, CT Valder, mestrando na UNESP, com quem dividi alguns levantamentos hidrográficos, nivelamentos geométricos e rastreo GNSS desta pesquisa, além de infinitas discussões sobre a metodologia dos modelos de separação, muito obrigado pela ajuda!

Aos amigos que fiz nesse período, como o Túlio, com quem escrevi o artigo sobre modelos de separação, sua experiência muito me ajudou na organização das ideias. Também aos membros do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH): Jorge, Sérgio, Allan, Laís e Christian, os quais ouviram muitas vezes o tema deste estudo e seus comentários foram essenciais para que eu tivesse uma maior clareza na escrita. Não poderia deixar também de agradecer ao Leonardo e ao Kauê, por terem me acompanhado, pacientemente, nos primeiros passos no Matlab e me ensinado que na programação se passa mais tempo lendo a “documentação” do que escrevendo, efetivamente, um código.

Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), pelas dúvidas respondidas por e-mail, em especial ao Prof. Dr. Roberto Luz e ao meu amigo Everton dos Santos.

À empresa Delfos Marítima, na pessoa do Comte Aluizio, de quem desde o início do mestrado recebi todo o apoio e incentivo para o desenvolvimento de um modelo de separação para a Baía de Guanabara. Obrigado por ter me ajudado com o artigo no capítulo 2 e por todas as discussões sobre a metodologia. Agradeço também por ter colocado à minha disposição sua lancha hidrográfica, com equipamentos que refletem o estado da arte da hidrografia. Da mesma forma, agradeço aos funcionários da empresa, Pedro e Ítalo, por terem me acompanhado nos levantamentos de campo e pela paciência e disponibilidade que sempre tiveram no fornecimento dos dados. Agradeço também aos marinheiros, Rogério e Alex, que conduziram a lancha com presteza e segurança.

À Even Brøste e à Narve S. Kjørsvik, da empresa Terratec, na Noruega, por terem disponibilizado a licença do programa Terrapos, bem como por terem respondido às minhas dúvidas sobre o processamento GNSS com auxílio inercial. Agradeço também ao Aleksander Hammernes, da Kongsberg, por ter implementado no software Terrapos a workflow do Seapath, o que muito facilitou o processamento dos dados deste trabalho.

Aos professores de várias Universidades do mundo que me enviaram bibliografias, esclareceram dúvidas e me orientaram na escrita: Catherine Robin and Shannon Nudds (Natural Resources Canada); Jonathan Illife (University College London); Cornellis Slobbe (Delft University of Technology); David Dodd (IIC Technologies); Nikko Yumul (Ateneo de Manila University); Marcelo Benites (PPGCL/UENF); e Amanda Chofard (UFSC).

Aos meus pais, Alba e Santana, que me deram todo o apoio que sempre precisei. Ao meu irmão, Ângelo Santana, por ter ouvido o conteúdo do meu trabalho e me ajudado para que eu pudesse explicar de uma forma mais simples e objetiva. Ao meu outro irmão, Saulo Santana, pela ajuda que me deu na revisão do texto e nas sugestões de diagramação das imagens. À minha irmã, Mariana Santana, que, mesmo distante, esteve ao meu lado e me fortaleceu nos momentos quando me faltava inspiração.

Ao Focolare de Curitiba, onde vivi os dois anos do mestrado. Ali fiz verdadeiros irmãos, como o Márcio, o Sandro, o Ivanaldo, o Ricardo, o Cleyton e o

Thiago. A todos os membros, que não habitam ali, mas fazem parte desta comunidade. Se a pandemia me restringiu o contato com a Universidade, ela possibilitou uma verdadeira experiência de família com eles, que foi a base necessária para que eu pudesse estudar, escrever e crescer como pessoa.

A todos os profissionais que me acompanharam neste período e permitiram que minha saúde não fosse prejudicada, tais como Dr. Marcos Bessa, Dra. Liseane e ao meu amigo Adalto Quintolina.

Por fim, a Deus, por ter utilizado todas essas pessoas que citei como instrumentos da sua presença na minha vida. Obrigado pela companhia nos momentos de silêncio e oração. Pela sua presença nos lugares, onde ninguém poderia me ajudar; nos momentos, quando ninguém poderia me escutar; nas páginas da minha vida, nas quais só você sabia o que deveria ser escrito. Seu amor e fidelidade para comigo deixam-me a cada dia mais surpreso e eternamente grato.

*“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”*

*(Leonardo da Vinci)*

## RESUMO

Os avanços da tecnologia GNSS permitiram uma maior acurácia do posicionamento de levantamentos hidrográficos, de modo que a variação das altitudes elipsoidais de uma embarcação pudesse ser representativa da variação da maré local. Para este efeito, é necessário definir um modelo de separação (SEP) entre o Nível de Redução (NR) de marés e o elipsoide, o qual pode ser determinado combinando dados de nível do mar de uma estação maregráfica com dados de altitude elipsoidal de uma lancha hidrográfica. Neste trabalho, tal metodologia foi avaliada com diferentes métodos de posicionamento GNSS e modos acoplamento ao sensor inercial. Como critério de validação, adotou-se um RMSE (I.C 95%) de 1 m para a componente horizontal e de 5 cm para a componente vertical, as quais foram avaliadas por duas abordagens: a primeira, com a lancha atracada junto a um marégrafo e comparando, relativamente, a variação das altitudes elipsoidais da embarcação com a variação da maré observada na estação; e a segunda, com a lancha atracada e navegando, sendo adotado como referência o método mais preciso: *Inertial Aided Post Processed Kinematic – Tightly Coupled* (IAPPK (TC)) para avaliar as componentes verticais e horizontais dos demais métodos. Na primeira abordagem, os dados GNSS foram reamostrados à mesma taxa utilizando a função *Spline*. Os filtros Hampel e de média móvel foram utilizados para remoção, adaptação de *outliers* e suavização das curvas. Seus parâmetros foram definidos empiricamente, de modo a minimizar o RMSE. Nos quatro períodos analisados com a lancha atracada, os métodos baseados no PPK obtiveram um RMSE em relação ao marégrafo abaixo de 5 cm; os métodos baseados no RTK e no PPP, em três períodos; e o GcDGNSS, em nenhum período. Na segunda abordagem, para os 11 períodos analisados com linhas de base menor do que 15 km, os métodos baseados no PPK obtiveram incertezas verticais menores do que 5 cm. Com o método IAPPK (TC), isso ocorreu em oito períodos; com o IAPPK (*Loosely Coupled* - LC), em seis; e com os métodos PPP baseados somente no GNSS, em quatro. No que se refere às incertezas horizontais, em todos os dias e métodos observou-se um valor menor do que 30 cm. Após a validação dos métodos geodésicos, o SEP da estação maregráfica do Clube Naval Charitas foi calculado combinando dados de rastreamento de uma referência de nível com dados de nivelamento da ficha F-41 da estação. Posteriormente, tal resultado serviu para validação do SEP calculado pela lancha hidrográfica, atracada nas proximidades do marégrafo, utilizando o método IAPPK (TC). Na comparação com o SEP da estação maregráfica, foi encontrado um desvio padrão de 5,3 cm, com uma diferença média de 0,1 cm. Posto isso, verificou-se que os métodos baseados no PPK são os mais capazes de definir o SEP dentro do critério de incerteza vertical de 5 cm. Por fim, salienta-se que esta pesquisa é importante para a validação de superfícies com referência ao elipsoide (por exemplo: geoide, topografia do nível médio do mar) e todas as aplicações relacionadas ao posicionamento marítimo.

Palavras-chave: GNSS. INS. Hidrografia. Marés. Referenciais verticais.

## ABSTRACT

*Advances in GNSS technology allowed greater accuracy in the positioning of hydrographic surveys, so that the variation in ellipsoidal heights of a vessel could be representative of the variation in the local tide. For this purpose, it is necessary to define a separation model (SEP) between the Chart Datum (CD) and the ellipsoid, which can be determined by combining sea level data from a tide gauge station with ellipsoidal height data from a hydrographic boat. In this work, such methodology will be evaluated with different GNSS positioning methods and coupling modes to the inertial sensor. As a validation criterion, an RMSE (CI 95%) of 1 m was adopted for the horizontal component and 5 cm for the vertical component, which were evaluated by two approaches: the first, with the boat moored next to a tide gauge and comparing, relatively, the variation of the vessel's ellipsoidal heights with the variation of the tide observed at the station; and the second, with the boat moored and sailing, the most accurate method was adopted as a reference: Inertial Aided Post Processed Kinematic – Tightly Coupled (IAPPK (TC)) to evaluate the vertical and horizontal components of the other methods. In the first approach, the GNSS data were resampled at the same rate using the Spline function. Hampel and moving average filters were used for removal, adaptation of outliers and curve smoothing. Its parameters were empirically defined, in order to minimize the RMSE. In all the four periods analyzed with the boat moored, the methods based on the PPK obtained an RMSE in relation to the tide gauge below 5 cm; methods based on RTK and PPP, in three periods; and the GcDGNS, in any period. In the second approach, for the eleven periods analyzed with baselines smaller than 15 km, the methods based on PPK obtained vertical uncertainties smaller than 5 cm. With the IAPPK method (TC), this occurred in eight periods; with the IAPPK (Loosely Coupled - LC), in six; and with PPP methods based only on GNSS, in four. With regards to horizontal uncertainties, in all days and methods, a value lower than 30 cm was observed. After validating the geodetic methods, the SEP of the tide gauge station at Clube Naval Charitas was calculated by combining GNSS tracking data from a level reference with leveling data from the station's F-41 sheet. Subsequently, this result served to validate the SEP calculated by the hydrographic boat, moored close to the tide gauge, using the IAPPK (TC) method. In comparison with the SEP of the tide gauge station, a standard deviation of 5.3 cm was found, with a mean difference of 0.1 cm. That said, it was found that the methods based on the PPK are the most capable of defining the SEP within the vertical uncertainty criterion of 5 cm. Finally, it should be noted that this research is important for the validation of surfaces with reference to the ellipsoid (e.g geoid, mean sea level topography) and all applications related to maritime positioning.*

Keywords: GNSS. INS. Hydrography. Tides. Vertical References.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DA VARIAÇÃO DO NR CONFORME A EMBARCAÇÃO SE DISTANCIA DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA.....	23
FIGURA 2 – DIFERENTES FORMAS DE DETERMINAÇÃO DO SEP.....	25
FIGURA 3 – NAVIO UTILIZANDO UMA MARGEM DE SEGURANÇA CALCULADA EM TEMPO REAL (DINÂMICA).....	30
FIGURA 4 – ESQUEMA DAS COMPONENTES VERTICAIS ENVOLVIDAS NO LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO .....	31
FIGURA 5 – RELACIONAMENTO ENTRE O GEOIDE, O ELIPSOIDE E O DATUM DA CARTA NÁUTICA .....	33
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO HISTÓRICO-CIENTÍFICA DE MODELOS SEP NO MUNDO .....	39
FIGURA 7 – COMPARAÇÃO DA BATIMETRIA UTILIZANDO ESTAÇÃO MAREGRÁFICA (ESQUERDA) E UTILIZANDO O GPS E O VORF (DIREITA).....	41
FIGURA 8 – INCERTEZAS VERTICAIS DO VDATUM AO LONGO DA COSTA DOS ESTADOS UNIDOS .....	44
FIGURA 9 – À ESQUERDA SÃO APRESENTADAS AS REGIÕES HIDROGRÁFICAS COM CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS; À DIREITA AS SUPERFÍCIES HIDROGRÁFICAS DE SEPARAÇÃO VERTICAIS .....	45
FIGURA 10 – MODELO FINAL DE SEPARAÇÃO DCN-WGS84 (ESQUERDA); E INCERTEZA FINAL DO MODELO (DIREITA) .....	47
FIGURA 11 – SUPERFÍCIE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA VERTICAL PARA AS BAÍAS DE MÁLAGA E BUENAVENTURA .....	48
FIGURA 12 – DOMÍNIO DO MODELO HIDRODINÂMICO (ESQUERDA). COM OS VALORES DA SEPARAÇÃO GEOIDE-ELIPSOIDE (N) PARA CADA REFERÊNCIA DE NÍVEL FOI POSSÍVEL GERAR OS RESÍDUOS DO GEOIDE. (RESÍDUOS = HNML – N) (DIREITA).....	50
FIGURA 13 – Z_0: VARIAÇÕES DO DATUM DA CARTA NÁUTICA AO LONGO DA ÁREA DE SONDAGEM; N: ALTITUDES GEOIDAIS OBTIDAS PELO MAPGEO2010 (METROS); RESÍDUOS: NMML – GEOIDE	

MAPGEO2010 (METROS) RESULTADO DAS SEIS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS UTILIZADAS; SEP: MODELO DE SEPARAÇÃO (SEP) .....	51
FIGURA 14 – CÍRCULO VIRTUOSO SOBRE A IMPORTÂNCIA DE UMA INFRAESTRUTURA DE DADOS PARA MODERNIZAÇÃO DO PORTO E DESENVOLVIMENTO DA ECONOMIA DO PAÍS .....	56
FIGURA 15 – BANDAS DE FREQUÊNCIA DO GPS, GLONASS, GALILEO, COMPASS (BEIDOU), QZSS, IRNSS E SBAS. A BANDA S (2492,028 MHZ) NÃO ESTÁ PRESENTE NESTA ILUSTRAÇÃO .....	63
FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO .....	64
FIGURA 17 – SISTEMA DE REFERÊNCIA DA EMBARCAÇÃO .....	74
FIGURA 18 – RESUMO DOS MATERIAIS E MÉTODOS .....	77
FIGURA 19 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 2 DE MAIO .....	78
FIGURA 20 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 6 DE MAIO .....	79
FIGURA 21 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 14 DE MAIO .....	79
FIGURA 22 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 1 DE NOVEMBRO .....	80
FIGURA 23 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 2 DE NOVEMBRO .....	80
FIGURA 24 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 3 DE DEZEMBRO .....	81
FIGURA 25 – LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICO REALIZADOS DO DIA 2 DE MAIO À 3 DE DEZEMBRO DE 2021 .....	82
FIGURA 26 – DISTÂNCIA DA LANCHA HIDROGRÁFICA ÀS ESTAÇÕES GNSS DE REFERÊNCIA .....	84
FIGURA 27 – LANCHA HIDROGRÁFICA DELFOS ATRACADA PRÓXIMO AO MARÉGRAFO DE CHARITAS .....	85
FIGURA 28 – MEDIÇÃO DE <i>OFFSETS</i> DA LANCHA DELFOS MARÍTIMA .....	86
FIGURA 29 – LOCALIZAÇÃO DO RECEPTOR STONEX E DO SISTEMA SEAPATH-130 .....	87

FIGURA 30 – COMPARAÇÃO ENTRE A MARÉ OBSERVADA, A UMA TAXA DE 1 MINUTO, COM DIFERENTES FILTROS DE MÉDIA MÓVEL, VARIANDO DE 3 MINUTOS A 2 HORAS .....	92
FIGURA 31 – COMPARAÇÃO ENTRE AS VARIAÇÕES DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIS DO GNSS E A ALTURA DO NÍVEL DO MAR MEDIDO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA NO DIA 11 DE MAIO DE 2021, QUANTIFICADOS EM TERMOS DE RMSE (M) A UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% .....	96
FIGURA 32 – EVOLUÇÃO DAS INCERTEZAS VERTICAIS TEÓRICAS INCLUINDO O GCDGNSS .....	97
FIGURA 33 – EVOLUÇÃO DAS INCERTEZAS VERTICAIS, INCLUINDO O RTK...	98
FIGURA 34 – INCERTEZAS HORIZONTAIS TEÓRICAS.....	99
FIGURA 35 – INCERTEZAS VERTICAIS TEÓRICAS .....	100
FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DAS INCERTEZAS TEÓRICAS COM AS INCERTEZAS OBTIDAS DA COMPARAÇÃO COM A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA.....	101
FIGURA 37 – DIFERENÇAS DAS COMPONENTES NORTE ( $\Delta N$ ), ESTE ( $\Delta E$ ) E VERTICAL ( $\Delta V$ ) EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC) NO DIA 2/11/2021 .....	102
FIGURA 38 – INCERTEZA HORIZONTAL TOTAL (TOTAL HORIZONTAL UNCERTAINTY - THU) DOS MÉTODOS GNSS .....	103
FIGURA 39 – INCERTEZA VERTICAL TOTAL (TOTAL VERTICAL UNCERTAINTY - TVU) DOS MÉTODOS GNSS.....	104
FIGURA 40 – DIFERENÇAS (M) DE COORDENADAS N, E E H DO MÉTODO IAPPP(TC) EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC) .....	105
FIGURA 41 – DIFERENÇAS (M) DE COORDENADAS N, E E H DO MÉTODO IAPPP(LC), COM DUAS ANTENAS, EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC) .....	106
FIGURA 42 – DIFERENÇAS (M) DE COORDENADAS N, E E H DO MÉTODO PPP, COM DUAS ANTENAS, EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC).....	107
FIGURA 43 – NO QUADRO DE CIMA OBSERVA-SE UMA COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS ABORDAGENS DE ACORDO COM A ORDEM DE LEVANTAMENTO. NO QUADRO DE BAIXO, OBSERVA-SE A QUANTIDADE DE OCORRÊNCIAS PARA CADA ORDEM DE	

LEVANTAMENTO, DE ACORDO COM O MÉTODO E ABORDAGEM. A ABORDAGEM 1 ADOTA A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA COMO REFERÊNCIA E A ABORDAGEM 2, O IAPPK (TC).....	109
FIGURA 44 – RESULTADOS EM TERMOS DE RMSE (I.C 95%) DA PRIMEIRA E SEGUNDA ABORDAGEM .....	111
FIGURA 45 – COTAS ENTRE REFERÊNCIAS DE NÍVEL, RÉGUA E ELEMENTOS DE MARÉ (NM E NR) DA FICHA F-41 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DO CLUBE NAVAL CHARITAS.....	114
FIGURA 46 – COMPONENTES VERTICAIS ENVOLVIDAS NA DETERMINAÇÃO DO SEP CALCULADO PELA LANCHAS HIDROGRÁFICA E NA VALIDAÇÃO COM O SEP OBTIDO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA .....	116
FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DA MARÉ-GNSS (APÓS APLICAÇÃO DO SEP CALCULADO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA), COM A MARÉ MEDIDA NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA.....	118
FIGURA 48 – O HISTOGRAMA REFERE-SE À DISTRIBUIÇÃO DO SEP CALCULADO NA LANCHAS. AS LINHAS VERTICAIS EM PRETO INDICAM A MÉDIA E O DESVIO PADRÃO DESTA DISTRIBUIÇÃO. A LINHA TRACEJADA EM AZUL APRESENTA O SEP CALCULADO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA.....	119
FIGURA 49 – HISTOGRAMAS DOS ERROS E VALORES DE RMSE COM I.C DE 95%.....	146
FIGURA 50 – QQ PLOT DOS ERROS ('+') EM RELAÇÃO À SUA DISTRIBUIÇÃO NORMAL ('-').....	147
FIGURA 51 – FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS DIFERENÇAS ENCONTRADA E VALORES DE RMSE, COM UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%.....	148
FIGURA 52 – BOXPLOT DAS DIFERENÇAS ENCONTRADAS REFERENTE À COMPONENTE VERTICAL .....	149
FIGURA 53 – HISTOGRAMAS DAS DIFERENÇAS ENTRE OS MÉTODOS E OS VALORES DE RMSE COM I.C DE 95%.....	150
FIGURA 54 – QQ PLOT DOS ERROS ('+') EM RELAÇÃO À SUA DISTRIBUIÇÃO NORMAL ('-').....	151
FIGURA 55 – BOXPLOT DAS DIFERENÇAS ENCONTRADAS .....	152

FIGURA 56 – FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS DIFERENÇAS ENCONTRADA E VALORES DE RMSE, COM UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%.....	153
---	-----

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – TRABALHOS ANTERIORES RELACIONADOS AO PROCESSAMENTO GNSS PARA MEDIÇÃO DA MARÉ, DEFINIÇÃO DO NR E NAVEGAÇÃO, EM UMA ESCALA GLOBAL E TEMPORAL .....	21
QUADRO 2 – DIFERENÇAS (MM) ENTRE AS DIFERENTES REALIZAÇÕES DO ITRF .....	34
QUADRO 3 – EXEMPLOS DE SISTEMAS DE CORREÇÃO GLOBAL EM TEMPO REAL.....	67
QUADRO 4 – ERROS QUE PRECISAM SER CORRIGIDOS, OU LEVADOS EM CONSIDERAÇÃO PARA UM PPP EM RELAÇÃO AO DGNSS RELATIVO .....	69
QUADRO 5 – DESCRIÇÃO DA ACURÁCIA, LATÊNCIA, ATUALIZAÇÃO E TAXA DE INTERVALO DAS EFEMÉRIDES DO IGS.....	70
QUADRO 6 – PACOTES DE SOFTWARES DISPONÍVEIS PARA PROCESSAMENTO PPP .....	70
QUADRO 7 – CARACTERÍSTICAS DOS LEVANTAMENTOS.....	83
QUADRO 8 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E SUAS FINALIDADES .....	85
QUADRO 9 – ACURÁCIA DO SISTEMA SEAPATH .....	87
QUADRO 10 – ERROS RELACIONADOS AO SENSOR DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E COMO O TERRAPOS LIDA COM ELES .....	89
QUADRO 11 – ARQUIVOS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO.....	90
QUADRO 12 – <i>OFFSETS</i> , EM TERMOS ABSOLUTOS, UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DO SEP NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA E VALIDAÇÃO DO SEP CALCULADO PELA LANCHAS HIDROGRÁFICA .....	115

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PADRÕES MÍNIMOS DE INCERTEZA PARA UM LH A 10 M DE PROFUNDIDADE, A UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95% .....	29
TABELA 2 – ESTUDO DE CASO NAS BAÍAS DE CHESAPEAKE E DELAWARE COM MEDIÇÕES EM 117 ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS COMPARANDO OS DADOS OBSERVADOS COM OS DADOS DO MODELO. ERROS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO DE LAPLACE E DA INTERPOLAÇÃO ESTATÍSTICA .....	43
TABELA 3 – DESVIOS MÉDIOS ABSOLUTOS DAS COORDENADAS OBTIDAS COM AS COMPONENTES HORIZONTAIS (N E E) E VERTICAIS (U) E SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÕES .....	71
TABELA 4 – ACURÁCIA OBTIDA COM TERRAPOS .....	89
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS .....	119

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1	ESTADO DA ARTE .....	20
1.2	MOTIVAÇÃO .....	23
1.3	OBJETIVOS .....	26
1.3.1	Objetivo geral .....	26
1.3.2	Objetivos específicos.....	26
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>28</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	28
2.2	SUPERFÍCIES DE REFERÊNCIA VERTICAIS PARA O CÁLCULO DE MODELOS SEP.....	32
2.2.1	Superfície elipsoidal.....	34
2.2.2	Superfície geoidal .....	35
2.2.3	Superfícies a partir do NMM .....	35
2.2.4	Datum da carta náutica.....	37
2.3	EVOLUÇÃO HISTÓRICA QUANTO ÀS ESTRATÉGIAS PARA CÁLCULOS DE MODELOS SEP.....	38
2.3.1	Panorama internacional .....	39
2.3.1.1	Período de 1995 a 2010 .....	39
2.3.1.2	Período de 2010 a 2020 .....	42
2.3.2	Panorama nacional.....	48
2.3.2.1	Período de 2007 a 2010 .....	48
2.3.2.2	Período de 2010 a 2020 .....	51
2.4	PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA HIDROGRAFIA BRASILEIRA .....	53
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
2.6	MEIOS DE MEDIÇÃO DO NÍVEL DO MAR PARA DEFINIÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SEP .....	60
2.6.1	Posicionamento GNSS .....	60
2.6.2	O GNSS.....	62
2.6.3	Métodos de posicionamento GNSS.....	64
2.6.3.1	Posicionamento em tempo real .....	65
2.6.3.2	Posicionamento pós-processado.....	68

2.6.3.3	Atitude da embarcação.....	74
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>75</b>
3.1	ÁREAS DE ESTUDO.....	78
3.2	EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS.....	84
3.3	PROCESSAMENTO DE DADOS .....	88
3.4	CÁLCULO DAS INCERTEZAS HORIZONTAIS E VERTICAIS DO SEP E DOS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO .....	92
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DOS MÉTODOS GEODÉSICOS EM ESTUDO.....</b>	<b>95</b>
4.1	PRIMEIRA ABORDAGEM: COMPARAÇÃO COM A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA .....	95
4.2	SEGUNDA ABORDAGEM: COMPARAÇÃO COM IAPPK (TC).....	98
4.2.1	Avaliação das incertezas verticais teóricas dos métodos GNSS.....	98
4.2.2	Incetezas horizontais e verticais totais dos métodos GNSS.....	101
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS ABORDAGENS DE CÁLCULO DA INCERTEZA VERTICAL.....	108
<b>5</b>	<b>DETERMINAÇÃO DO SEP A PARTIR DE UMA LANCHA HIDROGRÁFICA .....</b>	<b>112</b>
5.1	SISTEMA DE MARÉS PERMANENTES .....	112
5.2	MEDIÇÃO DOS <i>OFFSETS</i> PARA DETERMINAÇÃO DO SEP.....	113
5.3	VALIDAÇÃO DO SEP MEDIDO PELA LANCHA HIDROGRÁFICA .....	116
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>120</b>
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
6.1.1	Processamento GNSS.....	122
6.1.2	Determinação do SEP .....	123
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE 1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIIS COLETADAS PELOS MÉTODOS GNSS COM A VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR MEDIDO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA, NO DIA 11/5/2021 .....</b>	<b>146</b>
	<b>APÊNDICE 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COMPARAÇÃO DO POSICIONAMENTO OBTIDO PELOS MÉTODOS GNSS EM COMPARAÇÃO COM MÉTODO IAPPK (TC), NO DIA 11/5/2021.....</b>	<b>150</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação descreve, pela primeira vez, as incertezas horizontais e verticais obtidas em levantamentos hidrográficos, utilizando diferentes formas de acoplamento do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) ao INS (*Inertial Navigation System*); diferentes métodos de posicionamento, tais como: RTK (*Real-Time Kinematic*), GcDGNS (Global Correction DGNS), PPK (*Post-Processed Kinematic*) e PPP (*Precise Point Positioning*); utilizando uma ou duas antenas GNSS para o pós-processamento dos dados; e comparando todas as soluções entre si, perfazendo um total de 12 soluções.

Os resultados são utilizados para determinar o nível instantâneo do mar, a partir da variação das altitudes elipsoidais de uma embarcação, bem como o SEP, que consiste no modelo de separação entre o elipsoide e o nível de redução de marés. Neste trabalho, o SEP é determinado por meio da combinação dos dados da embarcação (altitude elipsoidal, offsets entre sensores e altura da antena em relação à linha d'água) com os dados de uma estação maregráfica próxima. Tal metodologia permite ainda validar o SEP calculado por outros métodos geodésicos, tais como a altimetria por satélite e a gravimetria.

Vale ressaltar que, ao longo desta dissertação, o termo SEP faz referência ao modelo de separação entre o nível de redução de marés e o elipsoide. No entanto, outras superfícies com referência ao elipsoide serão determinadas, como o MSL (*Mean Sea Level*) e o MHWS (*Mean High Water Springs*).

Isso posto, este capítulo apresenta, inicialmente, o estado da arte, abordando alguns trabalhos relevantes na literatura; a motivação para a realização desta pesquisa; os objetivos estabelecidos; e o modo como a dissertação está estruturada.

### 1.1 ESTADO DA ARTE

Ao analisar o estado da arte em uma escala global e temporal, podem ser citados vários trabalhos que utilizaram o rastreamento cinemático em uma embarcação para medição da variação do nível do mar, do nível de redução de marés em relação ao elipsoide e do monitoramento da folga mínima abaixo da quilha dos navios. Citam-se, por exemplo, no Brasil, Ramos (2007), que analisou o uso do método diferencial preciso na sondagem monofeixe e desenvolveu o programa SIRBAT-GPS para

redução de sondagem utilizando a maré-GNSS; Oliveira *et al.* (2010), que processaram dados GNSS com uma lancha hidrográfica utilizando o referido software e compararam as reduções de sondagem utilizando os métodos PPP e PPK, com os dados de uma estação maregráfica; Neto (2020), que avaliou o uso do RTK na sondagem multifeixe; e, internacionalmente, Hocker (2010), que utilizou o método PPK para processar dados de boia GNSS e o método IAPPK para os dados de uma embarcação; além de Alkan e Öcalan (2013) e Abdallah (2016), que utilizaram o PPP para processar o posicionamento da embarcação durante um levantamento hidrográfico, os primeiros por meio do software Leica Geo-office e o segundo por meio do Bernese.

Para melhor entendimento acerca dos referidos estudos, dentre outros, o QUADRO 1 traz maiores detalhamentos sobre cada um deles. Ressalta-se que, na coluna “Resultados”, o termo SD, refere-se ao desvio padrão; RMS, à raiz do erro quadrático médio; LB (linha de base), à distância entre a estação de referência e o rover (estação móvel); e DifMax, à diferença máxima.

QUADRO 1 – TRABALHOS ANTERIORES RELACIONADOS AO PROCESSAMENTO GNSS PARA MEDIÇÃO DA MARÉ, DEFINIÇÃO DO NR E NAVEGAÇÃO, EM UMA ESCALA GLOBAL E TEMPORAL

(CONTINUA)

Referência	Finalidade	Software /Hardware	Plataforma	Métodos	Resultados
<b>Kato <i>et al.</i> (2000)</b>	Detecção de Tsunami	Não informado	Boia-GNSS	RTK	(não informado SD) concluído que é possível detectar tsunamis
<b>Kielland e Hagglund (1995)</b>	Medição do heave da embarcação	HPC/HPM e Ashtech's PNAV	Embarcação multifeixe	DGPS	Acurácia de $\pm 10$ cm para medição do heave
<b>Suarez <i>et al.</i> (2005)</b>	Definição do NR	Processador P&TB	Boia GNSS	GcDGPS	Diferença = 4cm (entre boia e marégrafo)
<b>Zhao <i>et al.</i> (2004)</b>	Redução de sondagem	Não informado	Embarcação Multifeixe	RTK e PPK	SD = 2,35cm (entre PPK e RTK)
<b>Bisnath <i>et al.</i> (2004)</b>	Determinação do NR por boia-GNSS	Não informado	Boia-GNSS	RTK	SD em relação à linha de base (LB): LB de 50m = 2cm LB de 10km = 4cm LB de 15km = 6cm
<b>Ramos (2007)</b>	Redução de sondagem	SIRBAT-GPS e GraphNav	Embarcação Monofeixe	DGPS, GcDGPS e RTK	2dRMS (RTK) = 21,03cm RMS (GcDGPS) = 64,27cm
<b>Gourlay e Cray (2009)</b>	Monitorament o da folga mínima abaixo da quilha	GPSKellClear	Navio mercante	RTK	Desenvolvimento do software para prever a folga mínima abaixo da quilha

QUADRO 1 – TRABALHOS ANTERIORES RELACIONADOS AO PROCESSAMENTO GNSS PARA MEDIÇÃO DA MARÉ, DEFINIÇÃO DO NR E NAVEGAÇÃO, EM UMA ESCALA GLOBAL E TEMPORAL (CONTINUAÇÃO)

Referência	Finalidade	Software /Hardware	Plataforma	Métodos	Resultado
<b>Oliveira et al. (2010)</b>	Redução de sondagem	SIRBAT-GPS e GraphNav	Embarcação Multifeixe	PPK, PPP, RTG	SD (PPP, maré) = 5,1cm DifMax (PPP, maré) = 5,9cm SD (PPK, maré) = 3,7 cm DifMax (PPK, maré) = 3,8cm
<b>Watson et al. (2010)</b>	Calibração de satélite altimétrico	GAMIT, GLOBK e TRACK	Boia-GNSS	PPP e PPK	Bias absoluto entre 40 e 45mm
<b>Hocker et al. (2010)</b>	Definição do NR	GrafNav e Applanix POSPAC MMS	Boia GNSS e embarcação multifeixe	PPK e IAPPK	Diferença média e SD do NR (GNSS, marégrafo) = 1,3cm e 4,4cm com $1\sigma$
<b>Chang, Lee e Tsui (2011)</b>	Redução de sondagem	Não informado	Embarcação monofeixe	RTK	Aumento da acurácia da batimetria em 26% quando usado maré-GNSS
<b>Alkan e Öcalan (2013)</b>	Redução de sondagem	Leica Geo Office (LGO)	Embarcação monofeixe	PPP	Diferença entre PPP e PPK = entre -20cm e +20cm
<b>Dean (2014)</b>	Redução de sondagem	Não informado	Embarcação multifeixe	PPP, RTK e GcDGPS	SD (PPP) < 7cm SD (RTG) = 5,5 cm
<b>Abdallah et al. (2016)</b>	Redução de sondagem e comparação do CODE/5 e CODE/30	TEQC e Bernese	Embarcação monofeixe	PPP	RMS (CODE/30) = 12,10cm RMS (CODE/5) = 6,77cm (componente vertical)
<b>Mezine et al. (2016)</b>	Redução de sondagem	Hypack	Embarcação monofeixe	RTK	SD = 39cm (entre linha regular e de verificação)
<b>Nakao e Krueger (2017)</b>	Redução de sondagem	Leica GPS900	Boia-GNSS e CTD	PPK	Precisão centimétrica entre Boia e CTD
<b>Yun et al. (2017)</b>	Redução de sondagem	RTKLIB e GraphNav	Embarcação monofeixe	PPP e PPK	Acurácia (PPP) = 16,1 cm Acurácia (PPK) = 22 cm
<b>Poerbandono et al., (2019)</b>	Validar altimetria satelital com Rastreo cinemático	RTX-ATLAS/RTX-Veripos e Veripos-ATLAS	Embarcação monofeixe	RT-PPP	SD = 20cm (Entre Altimetria e GNSS)
<b>Neto (2020)</b>	Redução de sondagem	Leica Geosystem	Embarcação Multifeixe	RTK	Diferença entre superfícies com redução de sondagem tradicional e GNSS = -1cm a 13cm
<b>Di et al. (2020)</b>	Validar Boia-GNSS com marégrafo	BKG NTRIP Client (BNC)	Boia-GNSS	RT-PPP	RMS = 0,9 a 0,19cm (entre marégrafo e boia-GNSS)

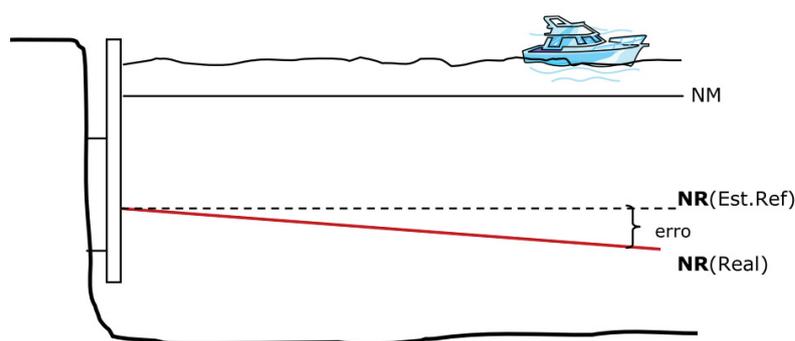
FONTE: O autor (2022).

Por fim, cabe mencionar que trabalhos anteriores, cujos métodos geodésicos utilizados para determinação do SEP, como modelos de maré, geoidais e de topografia do nível do mar, são outros, serão apresentados no capítulo 2.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Uma das principais fontes de incertezas em levantamentos hidrográficos é a variação do perfil de elevação da superfície da água ao longo da área de sondagem. Isso ocorre porque em toda batimetria deve ser realizada a redução de sondagem, que consiste em descontar do nível do mar medido a altura da maré e os movimentos verticais da embarcação, para que a batimetria esteja referenciada a um nível, que raramente o mar se encontrará abaixo dele, chamado de nível de redução. Porém, a altura da maré medida em uma estação maregráfica na costa sofre alterações devido às variações de amplitude e de fase da onda da maré, juntamente com outros efeitos hidrodinâmicos ou meteorológicos, os quais se tornam maiores na medida em que aumenta a distância da embarcação em relação à estação maregráfica (DHN, 2015), o que resultará também em uma variação do nível de redução de marés (NR) (FIGURA 1).

FIGURA 1 – EXEMPLO DA VARIAÇÃO DO NR CONFORME A EMBARCAÇÃO SE DISTANCIA DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA



FONTE: DHN (2015).

Essa diferença entre o nível do mar no local onde se encontra a estação maregráfica e no local da plataforma de sondagem é chamada na hidrografia de “erros cotidianos”, os quais podem variar de 30 a 60 cm em certos projetos, ou até a 3,48 m em projetos com grandes variações de marés (USACE, 2013). Por isso, a falta de

correção adequada para a diferença de fase e amplitude das marés é uma das grandes causas de reprovação e de divergências em projetos de dragagens e em contratos de levantamentos hidrográficos. Uma alternativa para solucionar este problema é utilizar o método do zoneamento de marés, que consiste na interpolação linear da variação das amplitudes de maré entre duas estações maregráficas nas extremidades da área a ser sondada, de modo a admitir uma incerteza máxima de 10 cm entre zonas (DHN, 2017).

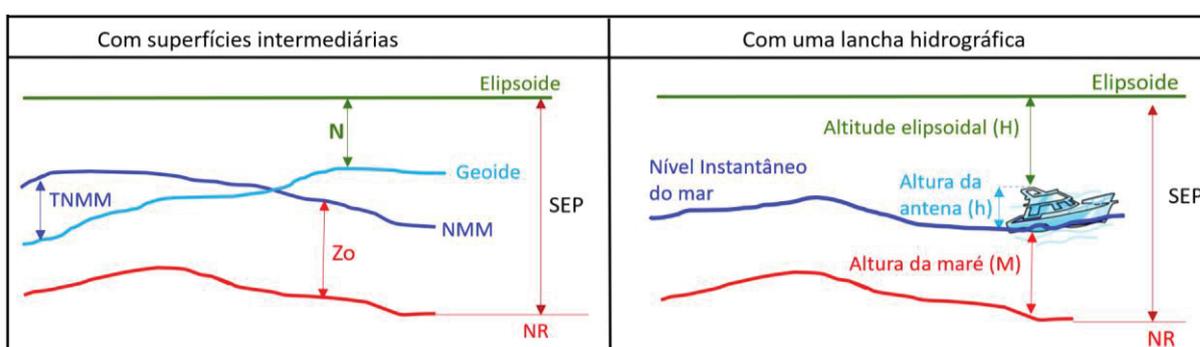
Entretanto, esse método pode não ser ideal em determinadas áreas com regimes de marés complexos. No estuário do Amazonas, por exemplo, Arentz (2008) encontrou uma diferença média de 1,3 m entre o NR obtido pelo zoneamento e o calculado por modelagem hidrodinâmica. Isso ocorre porque, em águas rasas, o nível do mar é significativamente alterado por fatores não lineares, que não necessariamente obedecem às leis matemáticas de interpolação, mas dependem de fatores físicos, como alteração das profundidades, fricções e reflexões com a linha de costa e com o fundo (SCHLUTER, 1993). Uma solução para este problema é o uso do elipsoide como referência vertical para os levantamentos hidrográficos, pois as variações das altitudes elipsoidais coletadas pela lancha passam a ser representativas das oscilações a que ela está sujeita como, por exemplo, as variações de maré.

Nesse sentido, a acurácia dos sensores de medição precisa ser levada em conta. Em uma estação maregráfica, o nível do mar pode ser medido com precisões, por vezes milimétricas, por meio de marégrafos de radar, de pressão ou de roldanas com um sistema de boia e contrapeso. Em contrapartida, no mar, o posicionamento GNSS está incutido de várias fontes de incertezas, que podem chegar a dezenas de metros, por exemplo, devido a uma reflexão indesejada do sinal eletromagnético na troposfera ou na ionosfera; à incorreta definição das órbitas dos satélites; ou a um erro de sincronismo entre seus relógios, dentre outros (RIZOS *et al.*, 2012). Sendo assim, uma das formas de realizar tais correções é por meio da integração GNSS/INS, a qual permite alcançar os requisitos mínimos exigidos em levantamentos hidrográficos em áreas rasas com maiores riscos de acidentes náuticos. Para exemplificar, o Serviço Hidrográfico Canadense exige uma incerteza máxima de 5 cm (com um intervalo de confiança - I.C - de 95%) para medição do nível do mar e dos níveis de referência hidrográficos, como o NR, em levantamentos em locais onde a folga abaixo da quilha é crítica (CHS, 2013). Ademais, outros autores, como Wells, Kleusberg e Vaniceck,

(1996) sugerem medidas mais restritivas para a definição do NR, com incertezas de até 3 cm (I.C de 95%) nesses locais.

Contudo, mesmo atingindo tais limites, restaria ainda o fato da compatibilização entre os diferentes referenciais verticais a que estão calculados os dados GNSS e os dados de maré, os primeiros em relação ao elipsoide e o segundo em relação ao NR. Para relacionar um ao outro, é necessário determinar um modelo de separação entre as superfícies de referência, de maneira que cada ponto do modelo represente a distância entre elas. Segundo Rice e Riley (2011), isso pode ser obtido por duas abordagens (FIGURA 2): a primeira, calculando a separação entre superfícies intermediárias, tais como o geoide e o nível médio do mar, denominada de topografia do nível médio do mar; e a segunda, pela combinação dos dados de altitude elipsoidal de uma lancha hidrográfica ( $H$ ), de seu sensor inercial, da altura da antena em relação à linha d'água ( $h$ ), e da altura da maré medida ( $M$ ) em uma estação maregráfica nas proximidades. Essa segunda abordagem, além de permitir a validação da primeira, viabiliza a determinação do SEP onde o geoide e a topografia do nível médio do mar não são definidos, com as incertezas mínimas exigidas, de acordo com a Ordem do Levantamento Hidrográfico a ser realizado.

FIGURA 2 – DIFERENTES FORMAS DE DETERMINAÇÃO DO SEP



FONTE: O autor (2022).

NOTA: Na figura da esquerda, para determinar o SEP, é necessário calcular a topografia do nível médio do mar (TNMM), que é a separação entre o nível médio do mar (NMM) e o geoide; em seguida, deve-se calcular a separação entre o NMM e o NR; e, por fim, a distância entre o geoide e o elipsoide ( $N$ ). Na figura da direita, o SEP é determinado pelo cálculo da separação entre a antena e o elipsoide (Altitude elipsoidal –  $H$ ), entre a altura da antena e a linha d'água ( $h$ ) e entre o NR e o nível instantâneo do mar (altura da maré –  $M$ ). Para simplificação da figura, as parcelas referentes à atitude da embarcação foram omitidas.

Sendo assim, como hipótese para esta pesquisa, baseado na literatura internacional, pode-se dizer que, se for possível medir o nível de redução de marés

em relação ao elipsoide de referência por meio de uma lancha hidrográfica, com uma incerteza menor do que 5 cm (I.C 95%); e medir a variação da maré a partir da variação das altitudes elipsoidais com uma incerteza menor do que 5 cm (I.C 95%), então, o método GNSS cumprirá os requisitos mínimos exigidos para levantamentos hidrográficos em áreas onde a folga abaixo da quilha é crítica, servindo ainda para validar outras formas de cálculo do SEP nessas áreas.

Para este estudo, portanto, foram utilizados dados coletados em levantamentos hidrográficos realizados ao longo do ano de 2021, nas Baías de Sepetiba e de Guanabara, no litoral do Rio de Janeiro, com uma lancha hidrográfica dotada de um sensor inercial e duas antenas GNSS, capazes de captar sinais das constelações GPS e GLONASS.

### 1.3 OBJETIVOS

A seguir, são apresentados os objetivos delineados para esta dissertação.

#### 1.3.1 Objetivo geral

Investigar diferentes métodos de posicionamento GNSS e GNSS/INS para validação do modelo de separação entre o elipsoide e o nível de redução da Estação Maregráfica do Clube Naval Charitas, utilizando uma lancha hidrográfica.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Avaliar, no ambiente marinho, as incertezas horizontais e verticais de diferentes métodos de posicionamento GNSS, tais como o uso de uma ou mais antenas para coleta de dados, o modo de acoplamento ao sensor inercial, o uso ou não de uma estação base como referência, e diferentes soluções tanto em tempo real, quanto pós-processadas;
2. Averiguar se as incertezas de tais métodos sofrem alteração quando a lancha está atracada ou navegando;
3. Verificar se as incertezas teóricas do pós-processamento correspondem às incertezas obtidas na comparação entre a variação da maré medida na estação maregráfica e a variação das altitudes elipsoidais obtidas

pela antena GNSS de uma embarcação atracada nas proximidades da estação maregráfica;

4. Determinar o SEP por meio de uma lancha hidrográfica atracada junto ao marégrafo, utilizando o método IA-PPK (TC) e verificar se tais incertezas são suficientes para cumprir os requisitos da Ordem Especial e Exclusiva da Organização Hidrográfica Internacional, de acordo com a literatura supracitada.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para uma melhor compreensão desta temática, o segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura com base, inicialmente, em um artigo científico publicado ao longo do desenvolvimento desta pesquisa intitulado *Cartas Náuticas com Modelos SEP: evolução histórica e perspectivas para hidrografia brasileira*. Posteriormente, é trazido um panorama geral sobre os métodos de posicionamento GNSS.

No terceiro capítulo, são descritos os materiais e os métodos empregados, tais como as áreas de estudo, os dados coletados, os softwares utilizados, os filtros empregados e a metodologia adotada para o cálculo das incertezas verticais e horizontais.

No quarto capítulo, é feita uma avaliação da performance dos diferentes métodos de posicionamento GNSS empregados, verificando quais teriam o potencial, ou não, de serem utilizados para medição da maré-GNSS e do SEP, em levantamentos onde a folga abaixo da quilha é crítica. Além disso, nesse capítulo, realiza-se a comparação das incertezas com a lancha atracada ou em movimento.

No quinto capítulo, a metodologia de determinação do SEP e da maré-GNSS em um levantamento hidrográfico é descrita com mais detalhes. Nele, também é apresentado um estudo de caso de um levantamento enquanto a lancha se encontrava atracada junto ao marégrafo do Clube Naval Charitas.

Por fim, no sexto e último capítulo, são tecidas as conclusões e apontadas e as recomendações para futuros trabalhos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A temática apresentada a seguir (seção 2.1 a 2.5) é baseado em Santana *et al.* (2020). O artigo retrata, inicialmente, uma evolução histórica sobre o desenvolvimento de modelos SEP no mundo por meio de sete países, a saber: Estados Unidos, Canadá, Holanda, Arábia Saudita, Colômbia, Inglaterra e Brasil. No âmbito nacional, é apresentado o Projeto Alt-Bat, que prevê a utilização do geóide como referência vertical para os modelos hidrodinâmicos. Em seguida, propõem perspectivas e desafios para a hidrografia brasileira sobre o uso do SEP. Em relação às perspectivas, é apresentado um ciclo virtuoso para o desenvolvimento portuário: o investimento em dados ambientais fornece uma maior acurácia de modelos SEP e menor incerteza dos levantamentos, propiciando maior calado, possibilidade do aumento no fluxo de cargas em portos e mais recursos para investimento. Quanto aos desafios a serem superados, sugere-se a determinação do nível de redução de marés para todo o país, com uma incerteza vertical menor do que 10 cm, em relação ao International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Pelo fato de o artigo ter sido publicado em inglês e em português, foi utilizado o termo Datum da Carta Náutica (tradução de Chart Datum) para se referir ao Nível de Redução de marés (NR).

### 2.1 INTRODUÇÃO

Em 2019, a ONU (Organização das Nações Unidas) considerou o período de 2021 a 2030 como a “Década dos Oceanos” para o desenvolvimento sustentável, tendo entre seus objetivos um oceano seguro, previsível, transparente e produtivo, onde os dados marinhos pudessem ser mapeados, previstos, divulgados e seus recursos explorados sustentavelmente. Neste contexto global da Economia Azul, com intuito de aumentar a segurança da navegação e reduzir a probabilidade de acidentes náuticos, a OHI (Organização Hidrográfica Internacional) passou a incluir a Ordem Exclusiva nas Especificações para Levantamentos Hidrográficos (S-44 6ª edição), com parâmetros de incertezas verticais mais rigorosos onde a Folga Abaixo da Quilha (FAQ) da embarcação é crítica. (IOC/UNESCO *et al.*, 2011; UNESCO, 2019; OHI; 2020a).

Alguns países já passaram a adotar tais critérios em suas especificações (TABELA 1). No Brasil, a NORMAM-25 interioriza os padrões internacionais, inclui até

a Ordem Especial, mas recomenda que sejam seguidas as exigências da versão mais recente da S-44 (DHN, 2017).

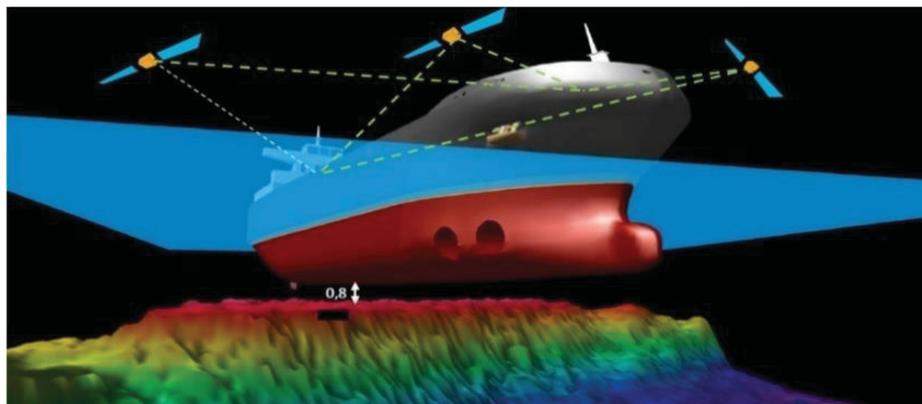
TABELA 1 – PADRÕES MÍNIMOS DE INCERTEZA PARA UM LH A 10 M DE PROFUNDIDADE, A UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 95%

<b>Critério (m)</b>	<b>Ordem 2</b>	<b>Ordem 1b</b>	<b>Ordem 1a</b>	<b>Ordem Especial</b>	<b>Ordem Exclusiva</b>
Incerteza Vertical Total	1,03	0,52	0,52	0,26	0,17
Incerteza Horizontal Total	21,00	5,25	5,25	2,00	1,00
Linha de costa	10	10	10	10	5

FONTE: Baseado em DHN (2017) e CHS (2013).

A redução das incertezas dos levantamentos se reveste de importância com o advento do Sistema de Informação e Exibição de Cartas Eletrônicas (ECDIS - *Electronic Chart Display and Information System*) e das cartas náuticas da classe S-10X, em que informações como tipo de fundo, maré, vento, corrente e ondas podem ser integradas em tempo real e a profundidade ser visualizada de maneira dinâmica. Tais dados ambientais, utilizados em conjunto com as técnicas do Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) de alta precisão, como GPS-RTK (OTF - *On The Fly*), permitem as embarcações navegarem de acordo com a FAQ de forma segura (FIGURA 3), avaliando continuamente o risco de contato do navio com o fundo, aumentando sua capacidade de carga, reduzindo custos da viagem e a poluição ao meio ambiente, o que já é uma realidade em portos como Rotterdam, na Holanda, e Santos, no Brasil. Entretanto, torna-se premente estabelecer o grau de incerteza dos sensores de monitoramento ambiental utilizados e dos dados batimétricos disponíveis, bem como a frequência dos levantamentos (WELLS; KLEUSBERG; VANÍČEK, 1996; KRUEGER, 1996; DPC, 2019; CONAPRA, 2020).

FIGURA 3 – NAVIO UTILIZANDO UMA MARGEM DE SEGURANÇA CALCULADA EM TEMPO REAL (DINÂMICA)



FONTE: Famos (2020).

NOTA: A margem de segurança devido ao tipo de fundo é obtida de forma confiável, a partir do conhecimento da medição da profundidade do mar, do nível zero da referência da profundidade medida, da previsão da maré e da posição vertical do navio.

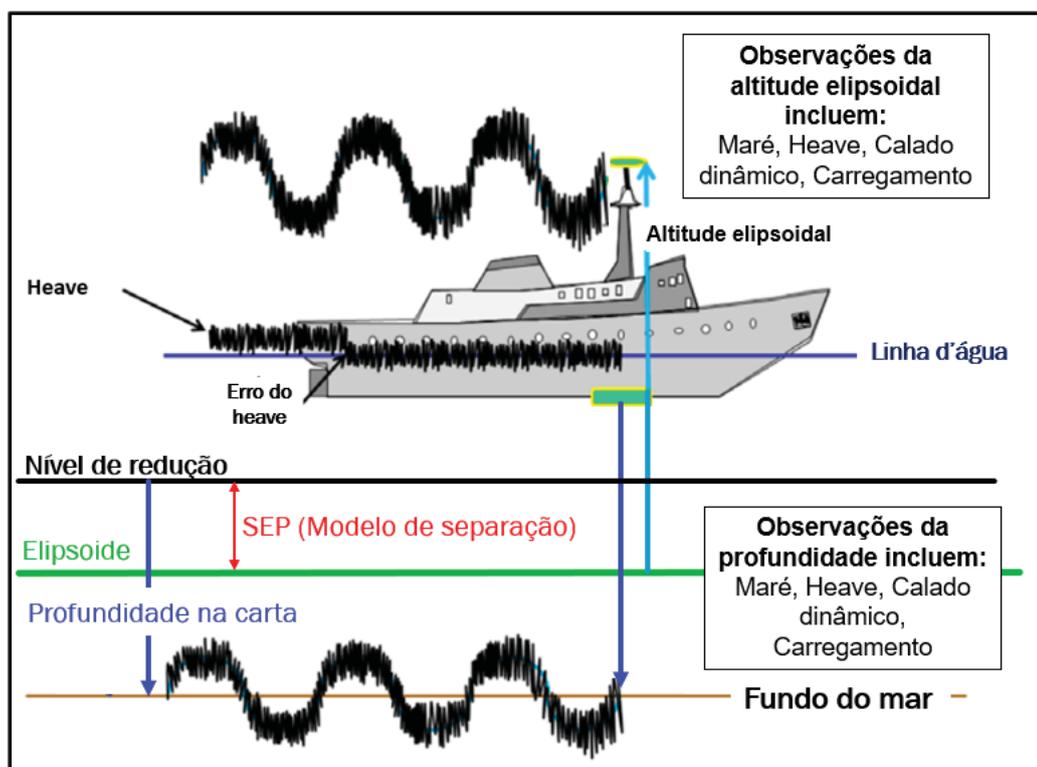
O uso de receptores GNSS de alta precisão permite reduzir as incertezas da batimetria, haja visto que as correções de heave, calado dinâmico e marés podem ser feitas a partir da variação das altitudes elipsoidais da embarcação (FIGURA 4), o que reduz os erros cotidianos. Estes erros consistem na diferença entre a variação da maré medida na estação maregráfica e no local onde se realiza a sondagem. Dessa forma, também os esforços logísticos dos levantamentos hidrográficos são reduzidos consideravelmente, uma vez que dispensa a necessidade de manutenção de estações maregráficas na costa. Com isto, os levantamentos se tornam mais rápidos, baratos e com menor incerteza nos dados. (ZIEBART *et al.* 2007; RAMOS, 2007; FIG, 2014).

Contudo, para efetuar a redução de sondagem, necessária em levantamentos hidrográficos, por meio de maré-GPS, é necessário o desenvolvimento de um modelo de separação (SEP) entre o Datum da Carta Náutica (DCN)<sup>1</sup> e o elipsoide de referência. Este elipsoide deve ser orientado e fixado para uma época particular em relação à Rede de Referência Terrestre Internacional (ITRF - *International Terrestrial Reference Frame*) (FIG, 2006). O que permite, por sua vez, obter os parâmetros para relacionar ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

---

<sup>1</sup> Em língua inglesa, o DCN é amplamente conhecido como *Chart Datum* (CD) e no Brasil como Nível de Redução (NR).

FIGURA 4 – ESQUEMA DAS COMPONENTES VERTICAIS ENVOLVIDAS NO LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO



FONTE: Adaptada de FIG (2014).

Além da hidrografia, o SEP também é útil para a integração dos referenciais verticais terrestres e marítimos. No Brasil, por exemplo, os dados de batimetria são referenciados ao Nível de Redução (NR) da carta náutica, correspondendo às médias das baixa-mares de sizígia; os dados de linha de costa coletados em relação às médias da preamar das marés de sizígia (DHN, 2017); os de topografia, aos Níveis Médios do Mar (NMMs), observados em Imbituba-SC e em Santana-AP, e materializados por todo país pela Rede Vertical de Referência do Brasil (RVRB) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (LUZ, 2016). Todos são referenciais de estações maregráficas, determinados em um ponto e período específico, variando de local para local, dificultando a integração dos dados em vastas áreas. Já a utilização do SEP na zona costeira permite a integração dos dados a um referencial único e estável, como o Sistema Geodésico de Referência de 1980 (GRS80 - *Geodetic Reference System* 1980), orientado e fixado a uma determinada época do ITRF (FIG, 2006).

A partir da definição de um SEP é possível estimar modelos digitais de elevação mais precisos, que servem para vários fins, como restauração de habitats,

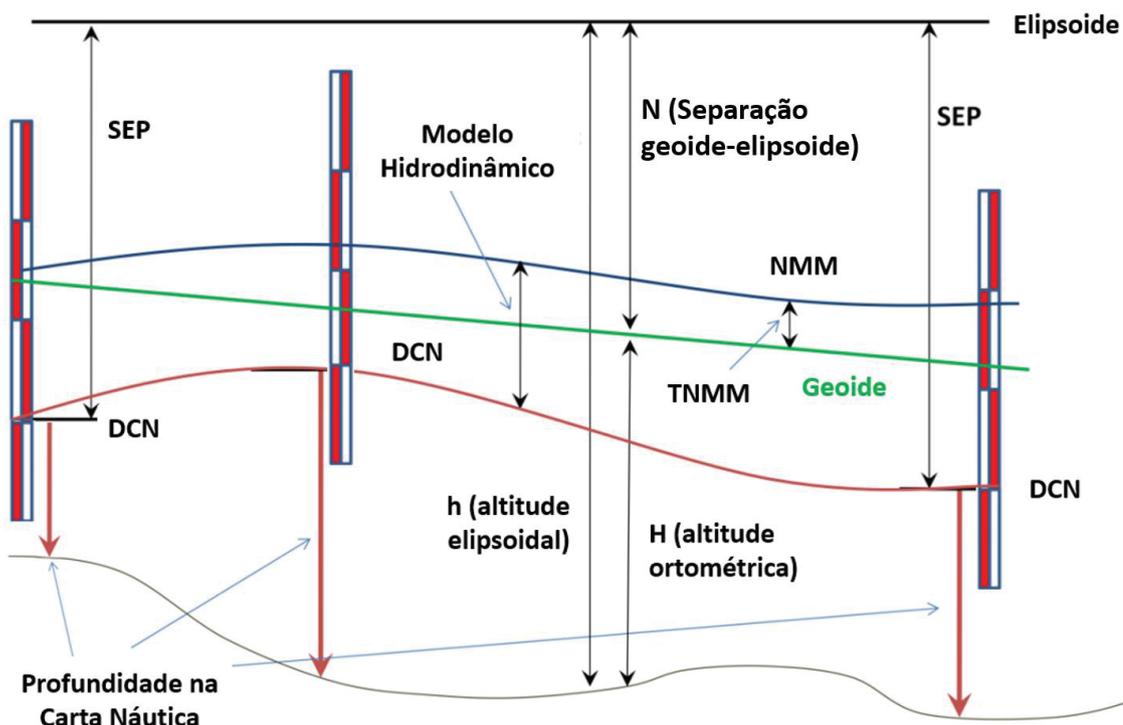
mapeamento de corais e do fundo marinho, estudos de erosão, construção civil, mensuração da elevação do nível do mar, modelagem do impacto de ondas e tempestades na costa, planos de enchentes e de evacuação. Cita-se ainda a mensuração da alteração da linha de costa e delimitação da fronteira marinha. Em regiões como Maricá-RJ, por exemplo, onde foi medida uma variação de 1,7 m em um ano, a acurácia de tal modelo torna-se essencial (PARKER, 2002; OSILIERI; SEOANE; DIAS, 2020). Quanto aos levantamentos hidrográficos, a redução das incertezas potencializa um círculo virtuoso para a economia do país, pois quanto mais segura for a navegação, maior o potencial de movimentação de cargas em um porto, o que pode contribuir ainda, com a modernização das infraestruturas portuárias. Neste cenário, os modelos SEP são essenciais para o desenvolvimento da economia azul de uma nação. Contudo, é necessário o investimento em uma infraestrutura que possibilite a obtenção de dados maregráficos, geodésicos e gravimétricos consistentes (MMA, 2018; SUPRG, 2018).

Para o aprofundamento destas temáticas será apresentada na seção 2.2 uma revisão sobre as superfícies de referências verticais necessárias para a definição do SEP. A seção 2.3, por sua vez, apresentará uma evolução histórico-científica ao longo de duas décadas com um panorama de modelos SEP desenvolvidos no mundo. Internacionalmente, serão explicadas as estratégias internacionais empregadas por alguns países para o cálculo das incertezas em relação ao ITRF. No âmbito nacional, será apresentado um trabalho pioneiro realizado em 2010 pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), a fim de calcular o SEP da Baía de Guanabara. Nesta pesquisa detectou-se a diferença de 2,5 cm entre a redução de sondagem tradicional e aquela obtida por maré-GPS. Além disto, é apresentado o projeto ALT-BAT, proposto pelo CICVTM (Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítimos), o qual prevê a adoção do geoide como referência vertical para modelos hidrodinâmicos, fornecendo assim, o SEP em nível nacional para os levantamentos hidrográficos. O presente artigo apresenta as perspectivas e desafios a serem superados pelo Brasil na seção 2.4. E na seção 2.5 tem-se as considerações finais acerca desta temática.

## 2.2 SUPERFÍCIES DE REFERÊNCIA VERTICAIS PARA O CÁLCULO DE MODELOS SEP

Em zonas costeiras diferentes superfícies de referências verticais podem ser empregadas para a determinação do SEP, elas podem ser matemáticas, como o elipsoide de revolução; ou físicas, oriundas da maré, ou do campo de gravidade terrestre. Na FIGURA 5, observa-se o relacionamento entre estas superfícies envolvendo a determinação da TNMM (Topografia do Nível Médio do Mar). O SEP refere-se à separação entre o DCN e o elipsoide nas estações maregráficas. A linha verde representa o geóide. As linhas onduladas representam o NMM e o DCN e pode-se verificar tendências semelhantes. Isso indica que apesar de estarem relacionados, a separação entre estas superfícies será diferente de um lugar para outro. O modelo hidrodinâmico representa esta diferença. Também está indicada nesta figura a separação entre o geóide e o NMM, denominada de TNMM (FIG, 2014).

FIGURA 5 – RELACIONAMENTO ENTRE O GEOIDE, O ELIPSOIDE E O DATUM DA CARTA NÁUTICA



FONTE: Adaptada de Dodd e Mills (2012).

NOTA: Para simplificação, o geóide foi representado com uma variação linear.

Alguns países do norte europeu, ao invés do NMM, utilizam o geóide como referência vertical dos modelos hidrodinâmicos (ELLMER; GOFFINET, 2006). O

Canadá (NUDDS; ROBIN; MACAULY, 2016) e o Reino Unido (ILIFFE *et al.*, 2013) utilizam dados de altimetria satelital e modelos oceânicos calculando a relação entre o referencial vertical oceânico, por exemplo LAT (*Lowest Astronomical Tide*), e o DCN. Demais métodos e outros detalhes serão vistos na seção 2.3.

### 2.2.1 Superfície elipsoidal

O Elipsoide de revolução é a superfície matemática, baseada em convenções, representações e cálculos que mais se aproxima da superfície terrestre, sem contar a topografia. E a partir desta superfície, são contadas as altitudes elipsoidais calculadas pelas observáveis transmitidas pelos satélites.

Para garantir uma maior acurácia, o elipsoide precisa estar orientado e fixado em uma determinada época do ITRF, o qual materializa a superfície terrestre a partir de uma série de observações efetuados por diversos sistemas como GNSS, SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) e outros (SIMON, 2013).

Quanto ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), sua precisão em relação ao ITRF2000, época 2000.4, está entre  $\pm 3$  e  $\pm 6$  mm (SIRGAS 2022b). Na QUADRO 3, observa-se o deslocamento da origem (em milímetros) entre as diversas realizações do ITRF

QUADRO 2 – DIFERENÇAS (MM) ENTRE AS DIFERENTES REALIZAÇÕES DO ITRF

Comparação	Época	Eixo X	Eixo X	Eixo X	Referência
ITRF2000- ITRF2005	2000.0	-0,5	-0,9	-4,7	Altamini, Collileux e Métivier (2011)
ITRF2005- ITRF2008	2005.0	0,1	0,8	5,8	Altamini <i>et al.</i> (2007)
ITRF2008- ITRF2014	2010.0	1,6	1,9	2,4	Altamini <i>et al.</i> (2017)

FONTE: O autor (2022).

Desse modo, as observações GNSS sobre estações maregráficas e referências de nível, promovem altitudes elipsoidais (h), as quais permitem as transformações entre os sistemas de referência terrestre e oceânicos (KEYSERS; QUADROS; COLLIER, 2015).

### 2.2.2 Superfície geoidal

Em uma definição atual, apresentada por Sánchez *et al.* (2016) e que se baseia nas definições clássicas de Gauss (1876) e Listing (1873), o geoide é dado por  $W_0$ , que é o valor do geopotencial em uma superfície de nível que melhor se aproxima à superfície do nível médio do mar global, quando este, se encontra totalmente calmo. O valor de  $W_0$  convencionado para a época 2010,0 e adotado em resolução pela IAG (*International Association of Geodesy*) 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). A modelagem do campo de gravidade é um tanto laboriosa e leva a uma investigação baseada em levantamentos *in situ* com gravímetros supercondutores, relativos e/ou absolutos.

Além das determinações *in situ*, podem ser feitas observações com gravímetros embarcados em aeronaves, navios e em plataformas orbitais (PLAG *et al.*, 2009). Nessa esfera, destacam-se principalmente as contribuições das missões CHAMP (*Challenging Mini-satellite Payload*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e GOCE (*Gravity Field and steady state Ocean Circulation Explorer*) (FLECHTNER; SCHUH; SNEEUW, 2014). 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 possibilitaram o cálculo de mais de centenas de modelos de Terra, ditos, MGGs (Modelos Globais do Geopotencial), que têm o geoide e o quase-geoide como uma das funcionais do campo da gravidade, como EGM2008 (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017).

### 2.2.3 Superfícies a partir do NMM

De acordo com Feng, Jin e Zhang (2012), mensurações do nível do mar são realizadas a partir de duas técnicas principais: observações em estações maregráficas e a altimetria por satélites. As estações maregráficas fixas à crosta terrestre medem o nível do mar de maneira pontual, cujas medidas sofrem influência da dinâmica da crosta terrestre, precisando de correções (FENG; JIN; ZHANG, 2012). Além disto, verifica-se uma baixa distribuição espacial de marégrafos, sendo necessário, por este motivo, referenciar os zeros dos marégrafos a pontos coordenados em terra.

Visando o monitoramento do nível do mar em regiões próximas à costa, em estuários ou baías, Pineau-Guillou e Dorst (2012) apresentam uma solução que

consiste no uso de boias ou navios dotados de receptores GNSS. Analogamente, a publicação FIG (2014) descreve a utilização de marégrafos de fundo, utilizando embarcações com receptores GNSS sob os marégrafos para referenciar suas medições ao elipsoide de referência.

Os produtos derivados de satélites altimétricos, por sua vez, são disponibilizados por diversos institutos de pesquisas. Com o lançamento da missão altimétrica Topex/Poseidon (T/P), em 1992, observações absolutas do nível do mar começaram a ser realizadas diretamente nos oceanos e relacionadas a um elipsoide de referência (SLOBBE; KLEES, 2012). Esta técnica, apesar de possuir perda de precisão na costa devido à interação oceano/continente, proporciona um recobrimento espacial sem precedentes nas observações do nível do mar. Por exemplo, o *The National Space Institute at the Technical University of Denmark* (DTU Space), instituto dinamarquês de pesquisas vinculado à Universidade Técnica da Dinamarca, gera diversos produtos como: Estimativas da alteração do Nível do Mar, Modelos Globais de Batimetria, Modelos Globais do Campo de Gravidade, Modelos Globais de Marés, Modelo da superfície LAT, Modelos Globais da Superfície Média do Mar e Modelos da Topografia Dinâmica do Mar (DTU, 2020).

Os modelos de superfície derivados de missões altimétricas possuem perda de precisão na costa, conforme citado anteriormente, todavia podem ser corrigidos por modelos hidrodinâmicos. Estes modelos descrevem a reação do corpo d'água introduzindo condições de contorno (batimetria e linha de costa) e forçantes externas (sistema Solar/Lunar e efeitos meteoceanográficos). Eles utilizam um conjunto de algoritmos baseados na dinâmica de fluidos, derivados das leis do movimento de Newton, porém necessitam ser calibrados por estações maregráficas e meteoceanográficas (FIG, 2014; MMA, 2018; DTU, 2020).

Assim, a TNMM, também chamada de SST (*Sea Surface Topography*), pode ser medida por meio da média do desvio entre a superfície dos oceanos em relação ao geoide, sendo influenciada por diversos fatores meteorológicos e oceanográficos. Pode ser determinada na costa por estações maregráficas onde o nível médio do mar foi observado e nivelado ao referencial altimétrico terrestre; ou nos oceanos, pelos satélites altimétricos, obtido pela diferença entre a Superfície Média do Mar (MSS – *Mean Sea Surface*) e o geoide, caso em que também é chamada de Topografia Dinâmica Oceânica Média (MDOT – *Mean Dynamic Ocean Topography* ou MDT – *Mean Dynamic Topography*) (FIG, 2014).

#### 2.2.4 Datum da carta náutica

De acordo com a publicação C-32, do Dicionário Internacional de Hidrografia, o *Datum* da Carta Náutica é uma superfície permanentemente estável, geralmente a baixa-mar, à qual estão referenciadas as sondagens ou alturas de maré, sendo também chamado de nível de referência ou plano de referência (OHI, 2020c).

Visando a segurança da navegação, a OHI recomenda que, em áreas oceânicas sob influência de maré, a Menor Maré Astronômica (LAT) ou um nível equivalente próximo, seja adotado como DCN para as profundidades. Define-se a LAT como a menor baixa mar prevista para ocorrer sob condições meteorológicas médias e sob qualquer condição astronômica (OHI, 2018). Simon (2013) ressalta que a LAT é um valor aproximado e não é possível calculá-lo de maneira acurada e estável, pois depende da qualidade e da duração dos dados observados, da correção dos efeitos meteorológicos e oceanográficos, do método de cálculo, do tipo e da amplitude das marés. Entretanto uma vez definido, pode ser utilizado como DCN.

Alguns países, como o Canadá, utilizam outros níveis de referência, baseados em critérios astronômicos, como a média em cada ano das menores baixa-mares previstas (LLWLT - *Lower Low Water, Large Tide*), em um ciclo de 19 anos (CHS, 2013). Já para os Estados Unidos e o Japão, ao invés de previsões de maré, o DCN é baseado na média das mais baixas marés (MLLW - *Mean Lower low Water*) observadas em um período chamado de Época Nacional dos Dados Maregráficos (NTDE - *National Tidal Datum Epoch*) (NOAA, 2020a; ROEBER, 2016). Nas cartas náuticas brasileiras, o DCN é conhecido como nível de redução e corresponde aproximadamente à Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS - *Mean Low Water Springs*) (MARINHA DO BRASIL, 2020).

Na definição do DCN pode ocorrer que o registro da variação da curva de maré em uma única estação não seja suficiente para representar toda a área de um levantamento hidrográfico. Uma alternativa seria realizar o zoneamento de marés, que consiste na interpolação, ou na extrapolação linear dos dados observados entre duas estações maregráficas situadas nos extremos da área, dividindo-a em zonas (DHN, 2017). Entretanto, “dependendo da região este método pode ser impreciso porque assume que as componentes que não são astronômicas, variam no espaço e no tempo da mesma forma que as componentes das marés” (HESS *et al.*, 1999, p.11).

Países estrangeiros utilizam outras técnicas, integrando estações maregráficas; modelos hidrodinâmicos e oceânicos globais; modelos geoidais locais e modelos globais do geopotencial para assim, definir o SEP.

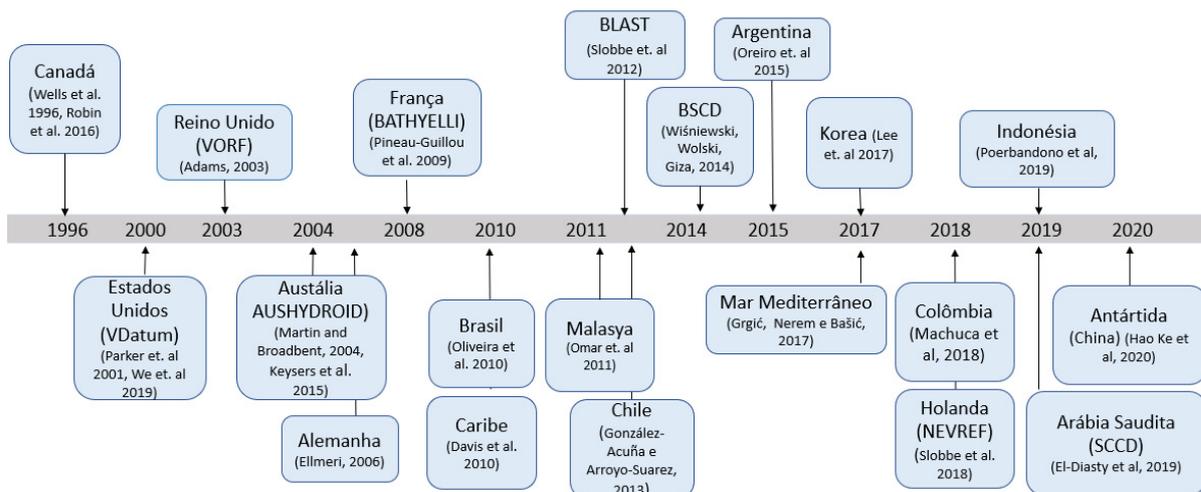
### 2.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA QUANTO ÀS ESTRATÉGIAS PARA CÁLCULOS DE MODELOS SEP

Constata-se que o cálculo do SEP teve seu início na década de 90, no Canadá, conforme Wells, Kleusberg e Vaniček (1996). Segundo esses autores, há uma busca na avaliação do uso de uma superfície de referência contínua para visualização, gerenciamento e aquisição de dados hidrográficos no ECDIS, de forma que o sistema possa informar as profundidades em tempo real ao navegante, ao invés da mais baixa situação de maré possível, bem como, as incertezas destas medidas. Outros autores destacam tanto a importância na determinação da TNMM, por meio de modelos hidrodinâmicos e satélites altimétricos, quanto à importância destes modelos para a gestão de processos na zona costeira (FIG, 2014; ODAMAKI, 2003). Verifica-se assim a necessidade de desenvolvimentos quanto ao SEP, visto que, em junho de 2020, a OHI publicou a *Guidelines for creating S-100 Product Specification - S-97*, sobre as cartas eletrônicas da classe S-10X, em que as profundidades podem ser informadas em tempo real, em relação a diferentes referenciais verticais (OHI, 2020b).

A evolução histórica, no que se refere às principais estratégias desenvolvidas na definição do SEP, pode ser agrupada em dois períodos distintos: um período de criação, compreendido de 1995 a 2010, e outro de consolidação, compreendido entre 2010 e 2020 (FIGURA 6).

Nestas duas décadas vários modelos foram desenvolvidos, como o AUSHYDROID, na Austrália (MARTIN; BROADBENT, 2004); o projeto Bathylli na França, (PINEAU-GUILLOU *et al.*, 2009); na Baía de Concepcion e Golfo de Arauco, no Chile (GONZÁLEZ ACUÑA; ARROYO SUAREZ, 2013); no Rio da Prata, na Argentina (OREIRO; D'ONOFRIO; FIORE, 2016); próximo à fronteira entre Singapura e Malásia (ABDULLAH; OMAR, 2011); no Mar Báltico (BSCD – *Baltic Sea Chart Datum*) (FAMOS, 2020); no Mar Mediterrâneo (GRGIĆ, NEREM, BAŠIĆ, 2017); ou até nas proximidades da Ilha Rei George, na Antártida (KE *et al.*, 2020).

FIGURA 6 – EVOLUÇÃO HISTÓRICO-CIENTÍFICA DE MODELOS SEP NO MUNDO



FONTE: Santana *et al.* (2020).

Na seção 2.3.1 serão apresentadas as estratégias adotadas pelo Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, países do norte europeu, Colômbia e Arábia Saudita e posteriormente a nível nacional na seção 2.3.2.

### 2.3.1 Panorama internacional

#### 2.3.1.1 Período de 1995 a 2010

O Canadá foi um dos pioneiros nas pesquisas relacionadas aos modelos de separação entre superfícies de referências verticais, iniciando em 1995, em *St. Lawrence*, os levantamentos hidrográficos utilizando a maré GPS. Nesta pesquisa foram estabelecidas ao longo do canal uma rede de estações para possibilitar o uso do posicionamento RTK, utilizado o software Hypack para navegação em tempo real e medição da maré GPS com as soluções RTK. Assim, foram efetuados levantamentos GNSS em cada estação maregráfica primária, e o SEP foi determinado por meio de uma interpolação linear entre estas estações maregráficas em relação ao *Datum Vertical Geodésico Canadense (CGVD28- Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928)*. A validação dos dados da maré GPS foi feita comparando com o modelo hidrodinâmico SPINE (LEFAIVRE *et al.*, 2010).

Nos Estados Unidos da América (EUA), o *software* VDatum, foi desenvolvido com o objetivo de permitir a conversão entre três tipos de referenciais verticais:

maregráficos, elipsoidais e ortométricos. Trata-se de um algoritmo de transformação de *Data*, considerado como *traversing minimum spanning tree*, no qual cada nó da grade representa um *Datum* individual. O projeto inicial se deu na Baía de Tampa, na Flórida, com o objetivo de integrar batimetria e topografia. Foi utilizado o modelo hidrodinâmico *Princeton Ocean Model* com uma série temporal de maré de 18,6 anos e uma grade variando de 100 a 1000 m. Foi alcançado um desvio padrão de 2,7 cm entre os dados previstos pelo modelo e os observados na região. Nos locais onde os modelos não eram disponíveis, ou totalmente calibrados, como um estudo conduzido na Baía de Delaware, utilizou-se a técnica Constituintes de Marés e Interpolação Residual (TCARI - *Tidal Constituent and Residual Interpolation*). Esta técnica consistiu na interpolação espacial das constantes de amplitude e fase das componentes harmônicas e dos resíduos provenientes de efeitos não relacionados com a maré, através da solução numérica da equação de Laplace (HESS, 2002; PARKER, 2002; PARKER *et al.*, 2003; NOAA, 2004; NOAA, 2020b).

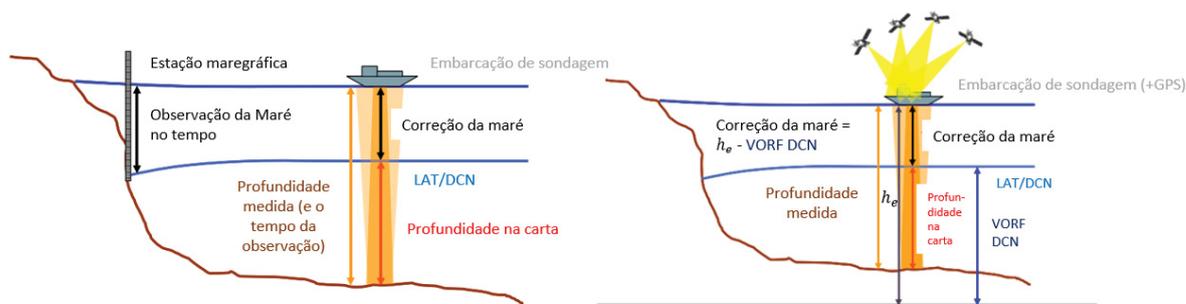
Após a aplicação do VDatum em projetos locais, como em *New York Bight*, *Puget Sound*, *Chesapeake Bay*, *New York Harbor*, foi investigada a criação de um banco de dados de batimetria e topografia integrados para todo o território nacional, chegando ao Alaska e o Havaí. Para tal, a estratégia consistia em quatro etapas: os dados de batimetria e linha de costa eram coletados, verificados e gerada uma grade de elementos finitos; aplicava-se as condições de contorno no Modelo Avançado de Circulação para Águas Oceânicas, Costeiras e Estuarinas (ADCIRC - *ADvanced CIRCulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters*) utilizando computadores do Departamento de Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*); os resultados eram refinados através de TCARI; os dados eram enviados ao serviço de Levantamento Geodésicos Nacional (NGS - *National Geodetic Survey*) para inclusão no software VDatum, com os algoritmos do elipsoide de referência, do resultado do modelo geoidal e da análise da TNMM (MYERS *et al.*, 2005; MYERS *et al.*, 2007; NOAA 2020b).

No norte europeu, em 2002, o Serviço Hidrográfico Alemão iniciou um projeto para determinar a superfície do DCN da costa do mar Báltico e referenciá-la ao elipsoide do Sistema de Referência Terrestre Europeu de 1989 (ETRF89 - *European Terrestrial Reference Frame 1989*). Foram efetuados rastreios GNSS em referências de nível na costa e em águas interiores sob influência de maré. O quase-geoide EGG97 foi utilizado como sistema de referência para determinação do nível do mar,

resultando em um modelo de elementos finitos com 32 mil nós. Foi determinado para cada nó o valor das amplitudes de maré, obtendo assim o SEP para cada ponto da grade do modelo (ELLMER; GOFFINET, 2006).

Em 2005, o Serviço Hidrográfico Britânico (*UK Hydrographic Office*) iniciou o projeto da Rede de Referência Vertical Oceânica (VORF - *Vertical Offshore Reference Frame*), com o objetivo de calcular modelos de separação entre o elipsoide GRS80, referenciado ao ETRF89 e superfícies de referência verticais na terra e no mar (ADAMS *et al.*, 2006). Segundo Iliffe, Ziebart e Turner (2007), a integração de dados de estações maregráficas e de satélites altimétricos foi realizada por meio da colocação por mínimos quadrados, utilizando como referência vertical o NMM calculado para a época 2000, e dados dos modelos geoidais OSGM02 e OSGM05, nivelamentos, rastreamento GNSS, e dados dos modelos hidrodinâmicos. De acordo com Ziebart *et al.* (2007), o VORF representou uma revolução na indústria naval, uma vez que os levantamentos hidrográficos afastados da costa (“*offshore*”) podiam ser reduzidos sem o auxílio de estações maregráficas, ou de cartas cotidais (FIGURA 7).

FIGURA 7 – COMPARAÇÃO DA BATIMETRIA UTILIZANDO ESTAÇÃO MAREGRÁFICA (ESQUERDA) E UTILIZANDO O GPS E O VORF (DIREITA)



FONTE: Adaptada de Ziebart *et al.* (2007).

Em 2009, um conjunto de 14 países deu início ao projeto Bring Land and Sea Together (BLAST), que teve como um de seus objetivos a harmonização do DCN no norte da Europa. Seguindo a metodologia da Alemanha, uma superfície equipotencial do campo de gravidade da terra foi utilizada como referência vertical para o modelo hidrodinâmico. Com isso, teve-se a vantagem de se dispensar as técnicas de interpolação, como utilizadas no VORF, para preencher a falta de dados entre as estações maregráficas e os satélites altimétricos (HUGHES; BINGHAM 2008; SLOBBE *et al.*, 2012, SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014; BOSCH 2016a).

### 2.3.1.2 Período de 2010 a 2020

A partir de 2010, a metodologia do VORF foi implementada combinando dados do modelo hidrodinâmico NISE10 e do Modelo Oceânico Global CSR4.0 com os dados de estações maregráficas na costa do norte da Europa e altimetria por satélite. A interpolação foi efetuada pelo algoritmo TPS (*Thin Plate Spline*), o que gerou uma melhora de 23% na modelagem dos erros (TURNER *et al.* 2010). Posteriormente, o uso de sete modelos oceânicos globais foi avaliado visando a determinação da LAT em relação ao nível do mar, comparando os dados de 7.389 estações maregráficas localizadas no Reino Unido (TURNER *et al.* 2013). Verificaram que a 30 km da costa existia degradação da acurácia dos dados, todavia, com o uso do algoritmo TPS, obteve-se o desvio-padrão de 0,23 m. No mesmo ano, Iliffe *et al.* (2013) apresentaram a base matemática (Equação 1) necessária para determinar a incerteza espacial do DCN, em relação ao elipsoide de referência no ETRF89 ( $\sigma_{h_{DCN}}^2$ ). Na Equação 1,  $k_c$  representa o termo de degradação calculado em função de  $c$ , em que  $c$  é a distância à linha de costa, e  $h$  equivale a altitude da variável representada, em relação ao ETRF89.

$$\sigma_{h_{DCN}}^2 = \sigma_{h_{LAT}}^2 + k_c^2 \sigma_{h_{DCN_0}}^2 + k_c^2 \sigma_{h_{LAT_0}}^2 - 2k_c^2 \sigma_{h_{LAT}}^2 \quad (1)$$

Nos EUA, o VDatum também se consolidou e evoluiu de uma extensão de 25 para 75MN da costa (NOAA, 2020b). Georgas, Wen e Zhao (2013), utilizaram, além do TCARI, a interpolação *Spline with Barriers* no rio Hudson. A NOAA desenvolveu um procedimento para realizar o Zoneamento de Maré Referenciado ao Elipsoide (ERZT - *Ellipsoidally Referenced Zoned Tides*) em que, a partir da aquisição de dados coletados durante levantamento hidrográfico, foi possível a criação de novos modelos SEP e a validação de outros já existentes (RICE; RILEY, 2011). Shi, Hess e Myers (2013) utilizaram na Baía de Chesapeake o método da interpolação espacial com equações harmônicas de ordens múltiplas para grades desestruturadas, o que permitiu representar no modelo hidrodinâmico regiões complexas como reentrâncias na costa e ilhas. Ainda, Shi e Myers (2016) apresentaram um método de interpolação estatística para determinar a variação espacial da incerteza que minimizou uma função de custo semelhante à assimilação de dados variacionais 3D (3DVAR) ou OI

(*Optimal Interpolation*). Essa função é amplamente utilizada em aplicações meteorológicas e oceanográficas para a integração de dados de modelos e observações. Estes mesmos autores aplicaram esta metodologia nas baías de Chesapeake e Delaware e encontraram resultados melhores em relação à interpolação quando utilizada a equação de Laplace (TABELA 2).

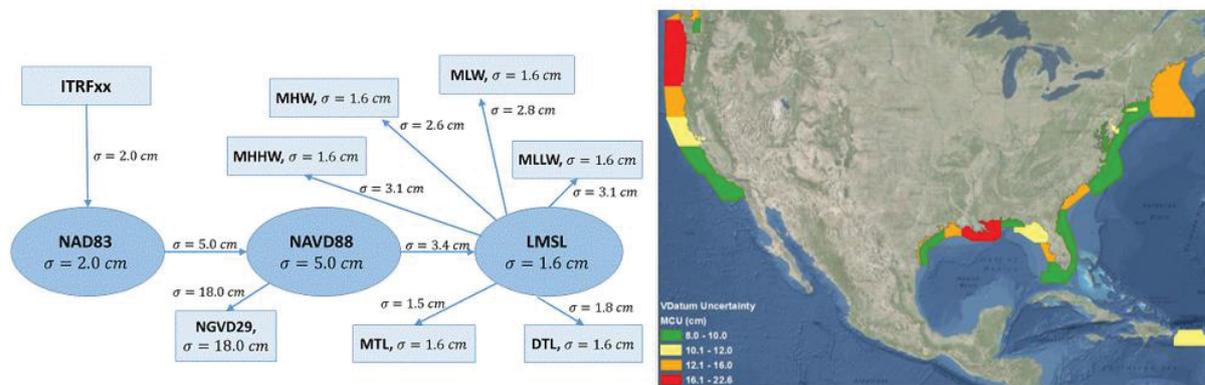
TABELA 2 – ESTUDO DE CASO NAS BAÍAS DE CHESAPEAKE E DELAWARE COM MEDIÇÕES EM 117 ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS COMPARANDO OS DADOS OBSERVADOS COM OS DADOS DO MODELO. ERROS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO DE LAPLACE E DA INTERPOLAÇÃO ESTATÍSTICA

<b>Resultado/erro</b>	<b>Erro máximo absoluto (cm)</b>	<b>Erro médio absoluto (cm)</b>	<b>RMSE (cm)</b>
Erro do modelo	28,35	4,98	7,0
C/ Interpolação de Laplace	12,76	2,19	3,02
C/ Interpolação Estatística	7,63	1,28	1,86

FONTE: Adaptada de MYERS (2018).

Na FIGURA 8, observa-se o cálculo da incerteza total propagada de cada *Datum* de maré em relação a uma determinada época do ITRF, calculados para a Baía de Chesapeake em 2016, bem como, a incerteza máxima propagada para cada região dos Estados Unidos (NOAA, 2020b).

FIGURA 8 – INCERTEZAS VERTICAIS DO VDATUM AO LONGO DA COSTA DOS ESTADOS UNIDOS



FONTE: Adaptada de Myers (2018).

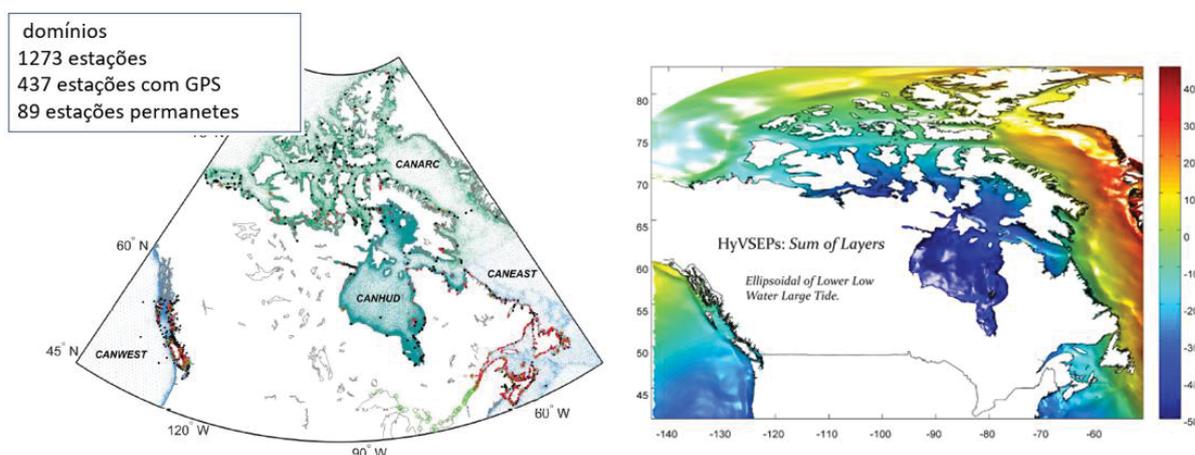
NOTA: No diagrama da esquerda, a incerteza total propagada (MCU - Maximum Cumulative Uncertainty) é apresentada. Ela é definida pela soma da raiz quadrada das incertezas individuais de cada Datum e entre cada transformação de Data, sendo ITRFxx, o elipsoide North American Datum 1983 (NAD83), o Datum ortométrico NAVD88, o Nível médio do mar local, NMM (LMSL - Local mean sea level) e cada Data de Maré (NMM, MHS e outros). À direita, encontra-se o MCU de cada região dos EUA.

Em 2010, Lefavre *et al.* (2010) apresentaram a metodologia do projeto *The Continuous Vertical Datum Canadian Waters Project* (Canadá). Neste projeto, foi realizado um planejamento de longo prazo, dividido em várias etapas: materialização de pontos de controle, coleta de dados de maré, de GNSS e base de dados para modelos hidrodinâmicos. O país foi dividido em regiões com aspectos hidrográficos específicos (Região Atlântica, Quebec, Ártica e Central, Pacífica). Iniciou-se com trabalhos regionais, como no Golfo de St Lawrence (ROBIN *et al.*, 2012) e Costa de British Columbia (DE LANGE BOOM *et al.*, 2012). Em 2014, foram geradas, para todas as regiões da costa canadense, Superfícies Hidrográficas de Separação Verticais (*Hydrographic Vertical Separation Surfaces – HyVSEPs*) entre o elipsoide, o DCN e outros sete níveis de maré. Foram combinados como camadas (*layers*): dados de altimetria por satélite, estações maregráficas, modelos dinâmicos oceânicos (*DOM – Dynamic Ocean Model*), modelo global oceânico Aviso e modelo geoidal – CGG2013 (com dados dos satélites GRACE e GOCE).

As metodologias do VDatum e do VORF foram conjugadas, utilizando-se um interpolador de Laplace nas grades desestruturadas com resolução de 30 a 100 m, além de um suavizador de elementos finitos (FE – *Finite Element Smoother*). Considerou-se também a variabilidade não linear na interpolação entre os dados de altimetria por satélites e das estações maregráficas. Uma nova metodologia para

ajustar o referencial vertical oceânico (LLWLT) aos DCN locais (LLWLT definido para uma época) foi implementada. As incertezas do modelo SEP foram baseadas na soma dos quadrados das incertezas individuais do geóide, do MDT e das medições maregráficas - com base nas formulações de Iliffe *et al.* (2013) e NOAA (2020b). Foram encontrados valores em relação ao ITRF iguais a 7,5 cm (CANEAST), 6,9 cm (CANWEST), 6,6 cm (CANNORTH) e 17,7 cm (CANHUD) para cada uma das regiões (FIGURA 9) (ROBIN *et al.*, 2014; ROBIN, 2016).

FIGURA 9 – À ESQUERDA SÃO APRESENTADAS AS REGIÕES HIDROGRÁFICAS COM CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS; À DIREITA AS SUPERFÍCIES HIDROGRÁFICAS DE SEPARAÇÃO VERTICAIS



FONTE: Baseado em Robin *et al.* (2014) e Robin *et al.* (2016).

No norte europeu, após o projeto BLAST, Holanda e Bélgica lançaram o projeto NEVREF, com o objetivo de calcular a LAT a uma acurácia de 10 cm em relação ao ITRF, utilizando o quase-geóide como superfície de referência vertical para o modelo hidrodinâmico. Neste projeto, a LAT e o quase-geóide foram calculados de forma consistente e independente. Consistente, pois para a realização de ambas as superfícies de referência foi utilizado o mesmo modelo hidrodinâmico regional e o mesmo campo de força (marés, vento, pressão do nível do mar, temperatura e salinidade). E independente, porque o modelo hidrodinâmico foi utilizado para determinar a separação entre o quase-geóide e a LAT e também para obter o quase-geóide a partir das medições por altimetria por satélite. Essa dificuldade de referenciar o modelo hidrodinâmico ao quase-geóide e a estimativa do quase-geóide, em si, foi resolvida da seguinte forma: utilizando os valores da LAT modelados nas estações

maregráficas e nos modelos hidrodinâmicos, bem como dados de gravimetria e radar altimétrico para aumentar a acurácia do geoide e das correções do MDT. Assim, as altitudes elipsoidais da LAT foram obtidas com a adição das altitudes quase-geoidais aos valores de LAT modelados. (SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014).

Comparando com as outras metodologias de interpolação e calibração de modelos utilizados, Slobbe *et al.* (2018a) afirmaram que as técnicas Thin Spline e Equações de Laplace, utilizadas por Turner *et al.* (2010) e Robin *et al.* (2016), respectivamente, não foram empregadas de maneira ideal. Segundo Slobbe *et al.* (2018a), a LAT em águas rasas é significativamente alterada por fatores não previsíveis (por exemplo: alteração da profundidade, fricção e reflexão com o fundo, com a linha de costa), assim, eles recomendam uma calibração em tempo real e que a validação da LAT, obtida pelo modelo hidrodinâmico, seja efetuada de acordo com Illiffe *et al.* (2013). Ao se comparar, em termos de RMSE, a variância da LAT obtida pelo modelo hidrodinâmico com as estações maregráficas, foi encontrado um valor total de 15,1 cm.

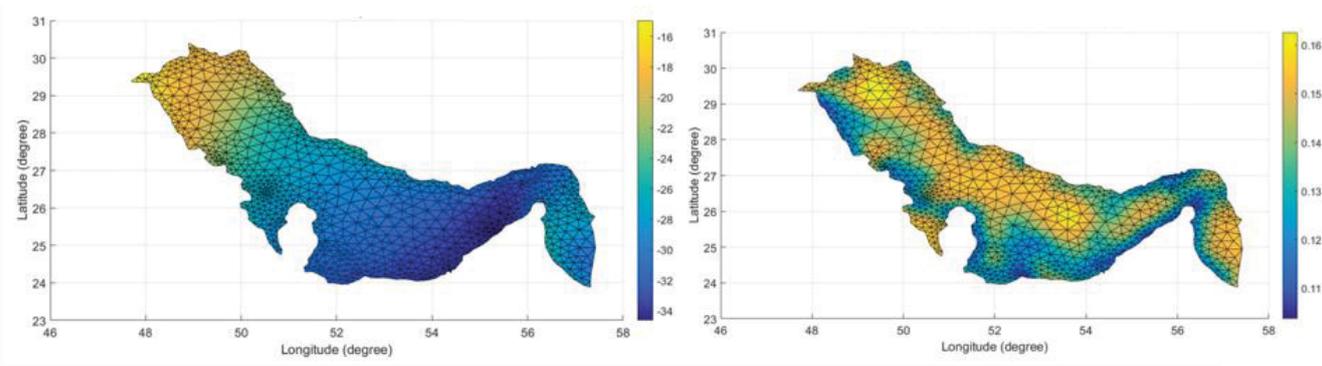
Além do quase-geoide como referência para o modelo hidrodinâmico, os autores sugerem a utilização do filtro Kalman para o cálculo da LAT, visto que esse filtro é um estimador robusto, cujos pesos são atualizados sequencialmente, sendo, portanto, ideal para longas séries de dados sujeitas a variações não totalmente previsíveis, como é o caso do nível do mar. Por exemplo, quando comparado com o método tradicional do cálculo da LAT, pela solução linear por Mínimos Quadrados, encontraram valores até 45% menores no Canal inglês, em termos de RMSE.

Devido ao alto custo para a realização de levantamentos gravimétricos marinhos em um curto prazo, os modelos hidrodinâmicos DNSC06MSS-ZUNOV4 também foram utilizados por Slobbe *et al.* (2018b) para unir os referenciais verticais entre as ilhas do Mar de Wadden e o continente europeu, com um grid de resolução de  $1/40^\circ$  (E-W) e  $1/60^\circ$  (N-S). Eles encontraram uma discrepância entre o previsto e o observado menor do que 1 cm para 30% dos marégrafos e menor do que 2 cm, para 60% dos marégrafos. Ressalta-se que todas as estações maregráficas tinham mais de 18,6 anos de dados.

Continuando a evolução do SEP, El-Diasty, Al-Harbi, Pagiatakis, (2019) desenvolveram o Datum da Carta Contínuo na Arábia Saudita (SCCD - "Saudi Continuous Chart Datum"). Eles, além da definição do DCN em relação ao ITRF, apresentaram também a incerteza espacial desta medida, o que não tinha sido

apresentado pela Holanda. Foi criado para o Golfo Pérsico com a resolução de 1/16 graus (até 75MN da costa) e 1/4 graus (além de 75MN da costa). Empregaram o modelo global oceânico de marés canadense WebTide TIN model, o modelo geoidal EGM08, Modelos da Topografia Dinâmica do Mar (MDT15DTU) e 114 marégrafos na costa, com no mínimo um ano de observação cada. A incerteza do modelo SEP foi medida pela soma das variâncias do geide, do MDT e do ajuste do LAT ao DCN, utilizando interpolação kriging. Encontraram valores finais entre 11 cm e 16 cm (FIGURA 10).

FIGURA 10 – MODELO FINAL DE SEPARAÇÃO DCN-WGS84 (ESQUERDA); E INCERTEZA FINAL DO MODELO (DIREITA)



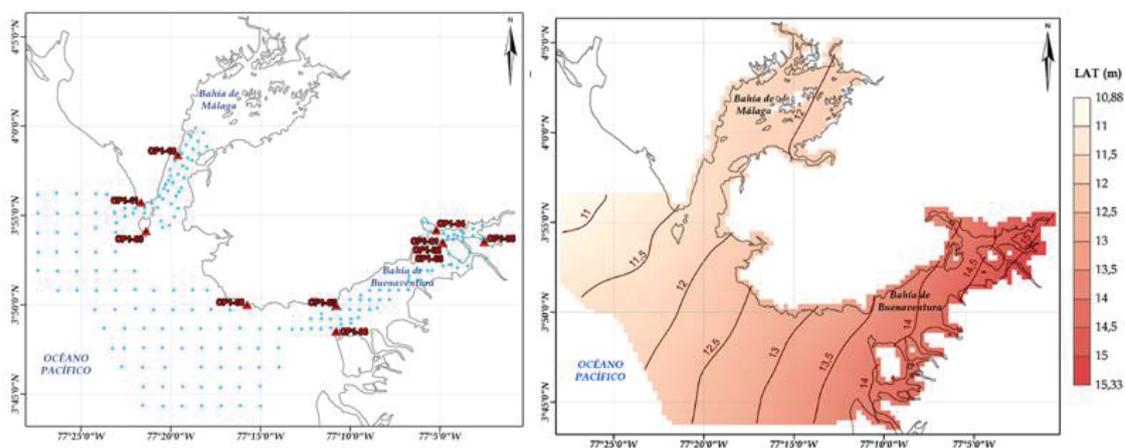
FONTE: Adaptada de El-Diasty, Al-Harbi e Pagiatakis (2019).

Além da utilização de modelos hidrodinâmicos e oceânicos globais, o SEP também pode ser determinado utilizando somente dados de estações maregráficas, rastreamento GNSS e modelos geoidais. Por exemplo, na Colômbia, nas Baías de Málaga e Buenaventura, com o objetivo de calcular uma superfície hidrográfica de referência vertical (SHRV) foi estabelecida uma rede geodésica de primeira ordem. Esta rede era composta de 11 pontos proporcionando apoio para o controle vertical dos dados do nível da água de cinco estações maregráficas. Com o emprego de embarcações, foram acrescentados outros 200 pontos por meio de observações GNSS-RTK, essas referenciadas ao zero da estação maregráfica mais próxima (FIGURA 11).

Para as áreas rasas onde o levantamento RTK não era viável, devido à dificuldade na medição dos níveis de água, novas alturas foram geradas com a medição da separação entre Datum de maré e o geide GEOCOL2004. Para o caso das Baías, os dados foram extrapolados e utilizada a mesma técnica de interpolação espacial por meio do geide para obter uma cobertura total da área. Com uma

resolução de 500 m, a incerteza vertical total da SHRV foi calculada por meio do somatório da grade de levantamentos das altitudes elipsoidais na superfície da água, da materialização da rede geodésica e do controle vertical do nivelamento trigonométrico, estimando um valor final de  $\pm 6$  cm. Ao comparar a altitude elipsoidal dos *Data* de nível do mar obtido por nivelamento trigonométrico e por GNSS-RTK, foi encontrada uma média das diferenças de 5 cm com variação entre -6 a 9 cm. (ALVAREZ MACHUCA *et al.*, 2018).

FIGURA 11 – SUPERFÍCIE HIDROGRÁFICA DE REFERÊNCIA VERTICAL PARA AS BAÍAS DE MÁLAGA E BUENAVENTURA



FONTE: Adaptada de Alvarez Machuca *et al.* (2018).

NOTA: Pontos do levantamento GNSS (azul), vértices rede geodésica de primeira ordem (vermelho) (figura esquerda); Modelo SEP da LAT em relação ao WGS-84 (figura direita).

## 2.3.2 Panorama nacional

### 2.3.2.1 Período de 2007 a 2010

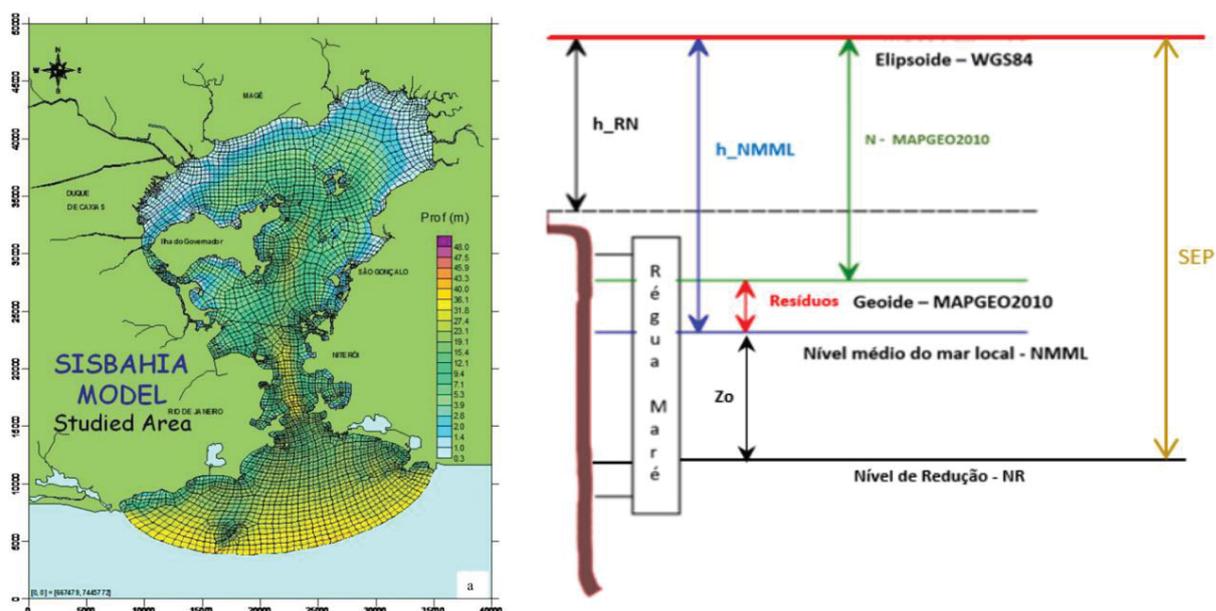
No Brasil, em 2007, foi realizado na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, um trabalho piloto com o objetivo de conduzir um levantamento hidrográfico com maré-GPS. A área compreendeu a região entre as estações maregráficas da Ponta da Armação e Ilha Fiscal, o que garantiu um bom conhecimento do NR e permitiu considerá-lo constante devido à diferença de 2,3 cm entre os valores de  $Z_0$  (separação entre o NMM local e o DCN) das estações maregráficas (RAMOS, 2007).

Arentz (2009) iniciou no estuário do Amazonas a avaliação do uso de modelos hidrodinâmicos como auxílio à navegação, fruto de um convênio entre a

Marinha do Brasil e a COPPE/UFRJ. Os resultados encontrados nos dados batimétricos reduzidos mostraram que nesta pequena área a LAT e o NR eram coincidentes. Ao efetuar a comparação do método do zoneamento de marés, visto em DHN (2017), com a modelagem realizada, foi encontrada uma diferença em termos absolutos de 1,3 m.

Em continuidade ao trabalho de Ramos (2007), Oliveira Junior *et al.* (2010) realizaram um outro levantamento hidrográfico na Baía de Guanabara, fruto de uma parceria entre a DHN e o Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO). Foi utilizado um SEP real para toda a Baía, gerado a partir do modelo hidrodinâmico SISBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), da Fundação Universidade Federal do Rio de Janeiro, e do MAPGEO 2010 (MATOS *et al.*, 2012). Nesta metodologia foi calculado em seis estações maregráficas a diferença entre o NMML (nível médio do mar local) e o geóide, chamada de resíduos ( $h_{NMML} - N$ ). Em seguida, uma grade de valores dos resíduos foi gerada utilizando uma interpolação polinomial de primeira ordem. Esta grade foi somada ao geóide e assim se obteve o NMML para a região. As altitudes elipsoidais ( $h_{RN}$ ) das estações maregráficas foram determinadas com o pós-processamento dos dados GPS coletados. A altitude elipsoidal do NMML ( $h_{NMML} - N$ ) foi calculada adicionando o valor de  $h_{RN}$  à distância de cada referência de nível ao NMM. As separações entre o geóide e o elipsoide ( $N$ ), para cada nó, foram fornecidas pelo MAPGEO2010 (FIGURA 12).

FIGURA 12 – DOMÍNIO DO MODELO HIDRODINÂMICO (ESQUERDA). COM OS VALORES DA SEPARAÇÃO GEOIDE-ELIPSOIDE (N) PARA CADA REFERÊNCIA DE NÍVEL FOI POSSÍVEL GERAR OS RESÍDUOS DO GEOIDE. (RESÍDUOS = HNMMML – N) (DIREITA)

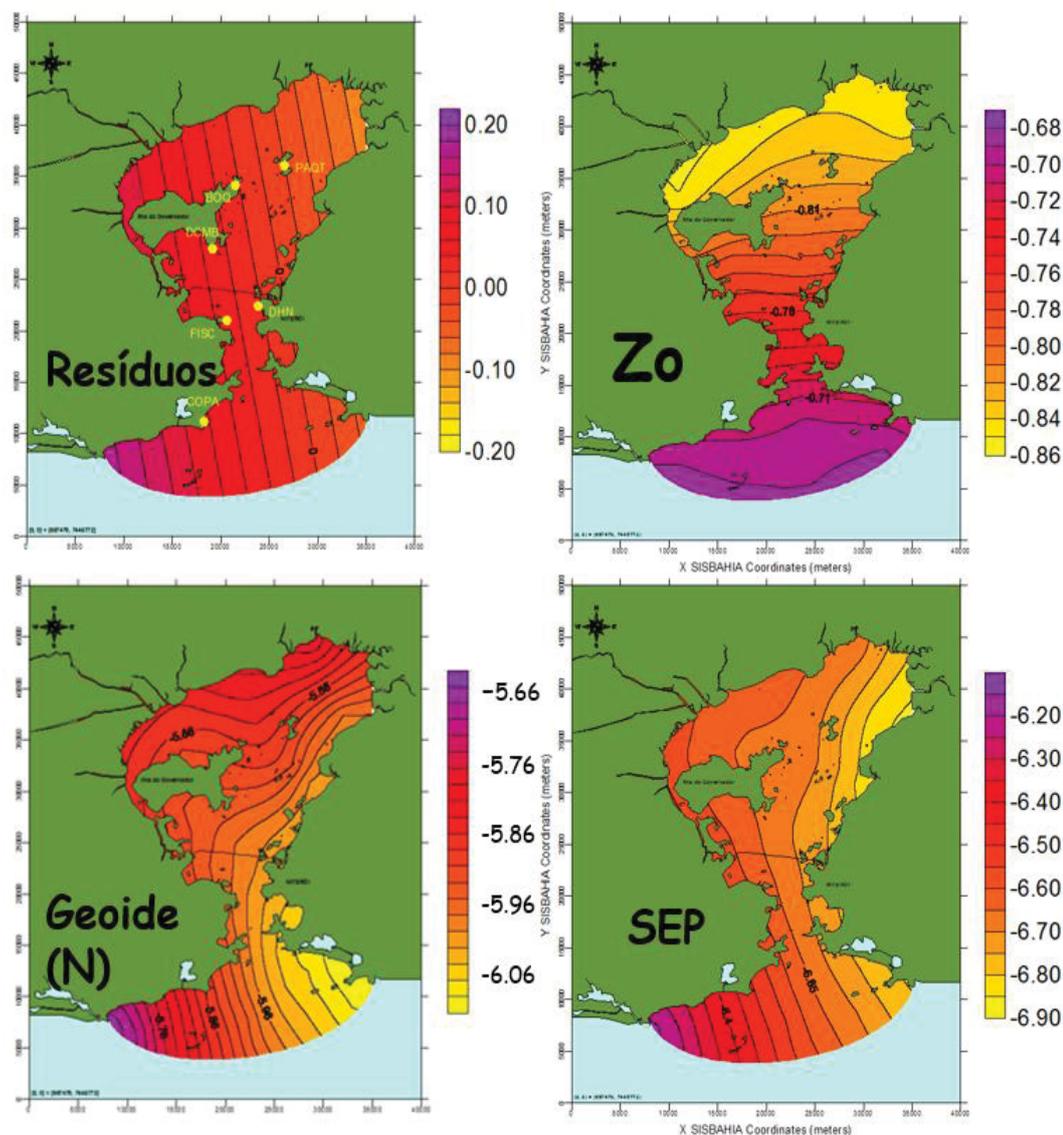


FONTE: Oliveira Junior *et al.* (2010).

O modelo final de separação (SEP) entre o elipsoide e o DCN foi produzido com uso da Equação 2. Em que  $Z_0$  representa a separação do NMML ao NR, obtido para cada estação maregráfica e cada nó da grade do modelo hidrodinâmico (FIGURA 13):

$$SEP = N + Z_0 + Resíduos \quad (2)$$

FIGURA 13 – Z\_0: VARIAÇÕES DO DATUM DA CARTA NÁUTICA AO LONGO DA ÁREA DE SONDAGEM; N: ALTITUDES GEOIDAIS OBTIDAS PELO MAPGEO2010 (METROS); RESÍDUOS: NMML – GEOIDE MAPGEO2010 (METROS) RESULTADO DAS SEIS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS UTILIZADAS; SEP: MODELO DE SEPARAÇÃO (SEP)



Fonte: Adaptada de Oliveira Junior *et al.* (2010).

Ao comparar as superfícies batimétricas, criadas utilizando o método tradicional de marés e maré-GPS (PPP), foi encontrada uma diferença média de 2,5 cm, com um desvio padrão de 5,1 cm. A comparação do modelo hidrodinâmico ADCIRC com o SISBAHIA resultou em diferenças menores do que 5 cm na região de estudo.

### 2.3.2.2 Período de 2010 a 2020

Em 2015 foi dado um primeiro passo para a comunicação de diferentes instituições na direção da vinculação entre setores de topografia e hidrografia, quanto aos referenciais verticais em zonas costeiras, com a criação do Comitê de Integração dos CICVTM (Componentes Verticais Terrestre e Marítima), pela CONCAR (Comissão Nacional de Cartografia). A realização de um ou dois estudos pilotos na costa brasileira também foi abordada, bem como, a necessidade de capacitação técnica para a condução dos trabalhos e a questão do financiamento dos projetos no âmbito da integração das componentes verticais (CONCAR, 2016).

Como conclusão dos trabalhos do CICVTM, duas propostas de unificação dos referencias verticais foram apresentadas por Bosch (2016c). A primeira adotando o NMM como referência para modelos hidrodinâmicos, utilizada no VORF; e a segunda, adotando uma superfície vertical estável, como o quase-geoide, utilizada no BLAST. A resposta se deu por meio do PROCOSTA (Programa Nacional para a Conservação da Linha de Costa), proposto pelo Ministério do Meio Ambiente, em 2018, tendo como um dos subprojetos o Alt-Bat, cujo objetivo é “a integração dos níveis de referência altimétricos e batimétricos e a determinação da cota de inundação como interseção entre o nível d’água máximo projetado e a superfície topográfica” e segue a linha dos projetos BLAST, utilizando o geoide como referência vertical para os modelos hidrodinâmicos (LUZ, 2018).

A metodologia indica a utilização de dados de gravimetria terrestre, marinha, aérea e dados de modelos geopotenciais globais, visando a realização de um processamento preliminar e cálculo de um geoide provisório. Em seguida, utilizam-se as informações de altimetria satelital para o refinamento do geoide (por meio do desvio da vertical). Os dados na costa serão corrigidos por meio de modelos hidrodinâmicos regionais referenciados ao geoide, com a vinculação das estações maregráficas às estações GNSS. Assim serão gerados produtos como um geoide refinado. Posteriormente, utilizam-se dados do NMM, do controle geodésico das estações maregráficas (CGEM), das altitudes das referências de nível (RRNN), e do geoide (N), visando calcular o NMM em relação ao elipsoide que, mediante análise harmônica, possibilitará o cálculo da LAT, bem como de outras superfícies (LUZ, 2018).

Ações preliminares do Alt-Bat foram tomadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), como a materialização de uma RGRC (Rede Geodésica de Referência Costeira), para preencher a lacuna de dados entre as referências de nível das estações maregráficas na costa entre as cidades de Macaé e Niterói, onde

foram instaladas 500 referências de nível, representando um importante início para a modelagem do SEP das cartas náuticas (SOARES *et al.*, 2019).

Outro estudo foi efetuado por Nascimento (2019), que comparou os dados de ALB (*Airborne LASER Bathymetry Lidar*) com a batimetria multifeixe na região de Fernando de Noronha. Utilizando os dados da altitude elipsoidal de somente uma referência de nível, encontrou um desvio padrão das diferenças de 0,289 m, com intervalo de confiança de 95%. Um dos motivos para tal incerteza foi atribuída à modelagem do SEP.

Um ano depois, Santana (2020) utilizou, de forma pioneira, modelos globais de LAT em relação ao elipsoide, derivado de altimetria satelital. Em estudo realizado em estações maregráficas de Fortaleza e Imituba, encontrou um valor 15,6 cm e 6 mm acima dos NR das estações maregráficas. Foi pontuado pelo Autor que o motivo de tais inconsistências em comparação com observações locais, foi devido à modelagem em áreas costeiras. Além disso, ressaltou a importância de uma maior densificação de estações maregráficas na costa com posições geocêntricas conhecidas para unificação dos referenciais terrestres e oceânicos.

## 2.4 PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA HIDROGRAFIA BRASILEIRA

No Brasil, a realização do projeto Alt-Bat terá como consequência um modelo SEP a nível nacional para levantamentos hidrográficos com maré-GNSS. Já no contexto global, observa-se uma tendência do crescimento do uso de inteligência artificial na hidrografia e na navegação. Os chamados MASS (Navios marinhos Autônomas de Superfície - *Marine Autonomous Surface Ships*) já são realidade em alguns países como a Noruega. Os primeiros testes foram realizados em 2019, descortinando um novo horizonte para a navegação, mais segura e sustentável, trazendo inúmeros benefícios, como a minimização de erros humanos e a redução de emissão de gases poluentes (LI; FUNG, 2019). Algoritmos como *machine* e *deep learning* permitem identificar as áreas de risco que devem ser evitadas pelos MASS, todavia, assim como um modelo matemático precisa ser validado, os algoritmos precisam ser treinados a partir de observações, fazendo com que os dados acurados de batimetria sejam cada vez mais necessários e valiosos. Além disso, o fato destes dados estarem referenciados ao elipsoide GRS80, orientado e fixado a uma

determinada época do ITRF, facilita a integração, tanto no espaço quanto no tempo (ADAMS, 2006; HAINS, 2019).

Esta pode ser uma perspectiva para a hidrografia brasileira, entretanto, um grande desafio nacional precisa ser superado: a carência de uma infraestrutura de dados maregráficos, geodésicos e gravimétricos consistentes para a calibração dos modelos em áreas críticas, onde são necessários o gerenciamento costeiro e a segurança da navegação (SANTANA; DALAZOANA, 2020). Bosch (2016b) apresenta um diagnóstico sobre a situação do Brasil e as medidas que podem ser tomadas para integração dos referenciais verticais terrestres e oceânicos a longo prazo, corroborando com os autores O'Reilly, Parsons e Langelier (1996) ao afirmarem que “superfícies de referências físicas sempre vão precisar de revisão e o inventário de dados hidrográficos irá crescer significativamente no futuro”. Assim, com modelos hidrodinâmicos calibrados, modelos geoidais acurados e superfície terrestre densamente monitorada, gera-se a base necessária para a criação de modelos SEP com um reduzido grau de incerteza, cujos benefícios vão muito além da navegação e da batimetria. Como afirmaram O'Reilly, Parsons e Langelier (1996):

Apesar do foco inicial dos modelos de separação de superfícies verticais ter sido direcionado às superfícies hidrográficas (preamar e baixamar), visando os levantamentos e a navegação com cartas eletrônicas que informam a profundidade em tempo real, outros serviços como construção civil, dragagem, gerenciamento costeiro, necessitarão eventualmente, de tais modelos. (O'REILLY; PARSONS; LANGELIER, 1996, p. 8, tradução nossa).

Por exemplo, o Ministério do Meio Ambiente lançou o PROCOSTA visando “à modelagem dos processos envolvidos na morfodinâmica costeira, à correta avaliação dos riscos de inundações costeiras e ao desenvolvimento das respectivas estratégias de adaptação e mitigação a tais eventos” (MMA, 2018). Contudo, o projeto Alt-Bat precisará de uma grande quantidade de investimentos para a aquisição de dados visando esta modelagem. Neste sentido, valem serem mencionadas algumas iniciativas de instituições que podem subsidiar tais perspectivas.

Em 2018, a COPPE/UFRJ apresentou o projeto Baías do Brasil, o qual disponibiliza de forma on-line uma base de dados do modelo SiSBAHIA para diferentes localidades, juntamente com seus relatórios descritivos, sendo já disponível para Baía de Guanabara (RJ), Baía de São Marcos (MA), Baía da Babitonga (SC), Baías de Ilha Grande e Sepetiba (RJ), Estuário do Rio Paraíba do Norte (PB), Sistema

Lagunar Maricá-Guarapina (RJ), Lagoa dos Patos (RS) e Porto do Açu (RJ). (COPPE, 2020).

No mesmo ano, por iniciativa do Centro de Estudo do Mar (CEM) da UFPR, foi implementado o BSO (*Brazilian Sea Observatory*) para as regiões de Santa Catarina e Paraná, com uma resolução variando de 120 m a  $1/12^\circ$ . O sistema utiliza o modelo hidrodinâmico MOHID, com código aberto e tem perspectivas para ser acoplado com outros modelos hidrodinâmicos locais, como no Estuário do Amazonas (FRANZ *et al.*, 2018).

Em 2019, o CHM (Centro de Hidrografia da Marinha) passou a utilizar os modelos SWAN para propagação de ondas em áreas costeiras e os modelos hidrodinâmicos ADCIRC, com uma resolução de 100 m a 4 km e transporte em duas e três dimensões, tendo já sido gerados modelos na Baía de Guanabara, Baías de Ilha Grande e Sepetiba, Canal de São Sebastião e Ilha Bela (SILVA, 2019).

Cita-se ainda a incorporação do Navio de Pesquisa Hidroceanográfico Vital de Oliveira à Marinha do Brasil, o qual possui o gravímetro dentre os 28 equipamentos científicos instalados a bordo, bem como o uso de VANTS, anunciado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), no suporte aos projetos voltados ao monitoramento de toda a costa brasileira e plataforma continental rasa adjacente para a definição da Linha de Costa (CPRM, 2020).

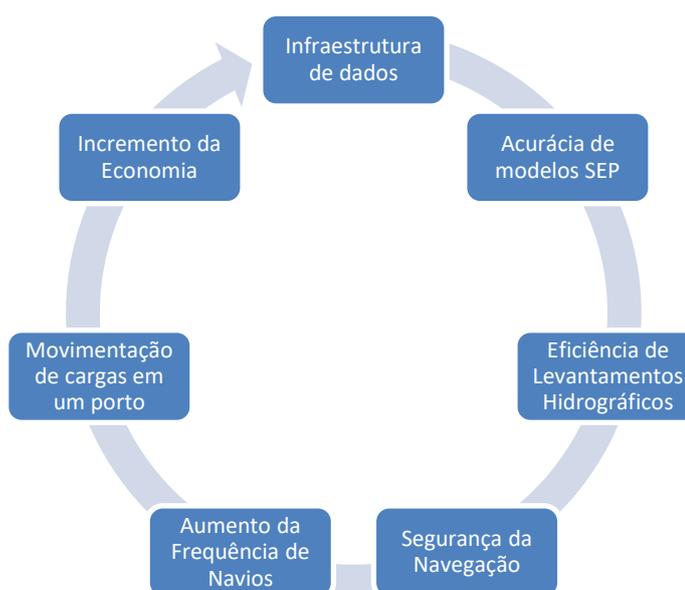
Quanto à aquisição de dados no ambiente costeiro, é de extrema importância avaliar o melhor método, que pode ser por Satélite SAR, levantamento Lidar, batimetrias monofeixe ou multifeixe. Neste sentido, vale citar EMOdnet (2016) e Colin (2016), que apresentam o algoritmo CMP (*Coastal Mapping Planner*), que emprega a lógica Fuzzy para determinar o levantamento mais adequado de acordo com a profundidade, a transparência da água e o equipamento a ser utilizado.

Na fase de planejamento, é necessário também analisar a modelagem do SEP antes da coleta dos dados referenciados ao ITRF, levando em consideração a incerteza espacial do modelo geoidal, da interpolação da maré, da determinação da TNMM e realizar as correções dos sistemas de maré permanente, dependendo da ordem do levantamento que se deseja atingir. Para o planejamento do SEP em nível nacional, sugere-se consultar Wells, Kleusberg e Vaníček (1996), que propõem os detalhes que devem ser levados em consideração para o seu desenvolvimento, como acurácia desejada, resolução do modelo, cobertura, recursos disponíveis, redes de

estações maregráficas e GNSS, armazenamento e atualização do banco de dados, dentre outros.

Assim, com uma infraestrutura de dados consistentes, a perspectiva é de um ciclo virtuoso para a economia do país, com uma maior acurácia dos modelos SEP e menor incerteza dos levantamentos (FIGURA 14). Essas etapas do ciclo se mostram essenciais em áreas onde a folga abaixo da quilha é medida em tempo real, elevando a movimentação de navios em áreas portuárias com mais segurança e eficiência, cita-se, por exemplo, o sistema ReDRAFT, criado pela Argonáutica em parceria com o Tanque de Provas Numéricos da Universidade de São Paulo (TPN-USP), e a Praticagem de Santos. O sistema avalia as condições ambientais de forma que o calado máximo considerado para as manobras dos navios não seja fixo, e sim possa variar de acordo com as características da embarcação, do tipo de manobra e das condições meteoceanográficas. Em Santos, onde foi implantado, o tempo de fechamento do porto por restrições do calado era de oito dias em 2013, já em 2017 foi reduzido para apenas dois dias e cresceu 24% o número de manobras com calado acima de 12 m. Maior calado representa maior movimentação de carga no porto, pois o aumento de 10 cm proporciona mais mil toneladas, ou 65 contêineres para o transporte (CONAPRA, 2020a; CONAPRA, 2020b; ARGONAUTICA, 2020).

FIGURA 14 – CÍRCULO VIRTUOSO SOBRE A IMPORTÂNCIA DE UMA INFRAESTRUTURA DE DADOS PARA MODERNIZAÇÃO DO PORTO E DESENVOLVIMENTO DA ECONOMIA DO PAÍS



FONTE: Baseado em Ziebart *et al.* (2007) e GERGS (2019).

A este ponto, percebe-se que o início do ciclo é uma infraestrutura sólida de dados ambientais, terrestres e oceânicos. Portanto, valem ser feitos alguns questionamentos para nortear futuros trabalhos visando a definição do DCN com uma acurácia de 10 cm em relação ao ITRF.

Desafios quanto aos dados maregráficos e modelagem:

- a) Iliffe *et al.* (2013) apresentou a base matemática para integrar dados de altimetria satelital e estações maregráficas, chegando a uma incerteza de 10 cm nas proximidades da costa. Em um curto prazo, tal metodologia poderia ser aplicada ao Brasil com tal acurácia? Se não, quanto seria preciso melhorar a infraestrutura de dados?
- b) El-Diasty (2019) utilizou modelos globais de marés, modelo geopotencial global para calcular o DCN em relação ao ITRF com uma acurácia de entre 0,11 e 0,16 cm. Em um curto prazo, tal metodologia poderia ser aplicada ao Brasil com tal acurácia? Se não, quanto seria preciso melhorar a infraestrutura de dados para validar estes modelos?
- c) No projeto NEVREF, Slobbe (2018) utilizou o quase-geoide como referência vertical para o modelo hidrodinâmico e cálculo da LAT, unindo os referências verticais entre ilhas com uma acurácia sub-centimétrica. Em um longo prazo, quais dados seriam necessários para aplicar tal metodologia no Brasil visando obter esta acurácia? Para mais detalhes sobre um roteiro a seguir, pode-se consultar Slobbe (2013b).
- d) No projeto VDatum, Shi e Myers (2016) aplicaram na Baía de Chesapeake a interpolação estatística da variação espacial da incerteza para a determinação do DCN. Foi obtido um RMSE de 1,86 cm entre o observado nas estações maregráficas e o previsto pelo modelo hidrodinâmico. Quantas novas estações maregráficas seriam necessárias para definir o SEP de todos os estuários do Brasil com esta acurácia?
- e) Quais recursos financeiros e humanos seriam necessários para instalação destas estações, mantê-las de forma permanente, realizar a manutenção necessária de acordo com IBGE (2017) e disponibilizar os dados de forma on-line para a comunidade?
- f) Qual seria o retorno socioeconômico deste investimento em dez anos? Para detalhes dos benefícios, pode ser consultado NOAA (2001).

- g) No Canadá foi feito um planejamento de longo prazo para a definição de modelos SEP, dividindo o país em regiões hidrográficas específicas. No Brasil, quais poderiam ser estas regiões? Quais áreas seriam prioritárias para a geração de uma base de dados?
- h) A OHI recomenda que a Menor Maré Astronômica (LAT), ou um nível equivalente próximo, seja adotado como DCN em áreas sujeitas a ações de maré. Slobbe (2013) encontrou profundidades mais baixas do que a LAT e do que o LLWLT no canal Inglês e sugere que seja adotado como DCN um valor percentual abaixo da LAT, definido a partir de observações em estações maregráficas durante 18,6 anos. Se o Brasil almejar alterar o tipo de DCN, qual deveria ser este percentual para as cartas náuticas brasileiras?
- i) De acordo com Slobbe *et al.* (2018a), a LAT em águas rasas é significativamente alterada por fatores não previsíveis. Como realizar uma calibração em tempo real de um modelo hidrodinâmico e gerar uma grade de incerteza espacial do DCN em relação ao ITRF sem utilizar técnicas de interpolação?

Desafios quanto aos dados geodésicos e gravimétricos:

- a) No projeto NEVREF, foram levantados os dados necessários para que se tenha um modelo geoidal com uma acurácia de 5 mm em terra (FARHANI, 2017). Qual deve ser a densificação dos dados gravimétricos para que no Brasil o referencial vertical terrestre, ao invés do NMM, seja uma superfície equipotencial com tal acurácia?
- b) As estações maregráficas estão sujeitas aos movimentos verticais da crosta terrestre. Dessa forma, pergunta-se: as estações GNSS da RBMC seriam suficientes para modelar tais movimentos com uma acurácia sub-centimétrica? Havendo uma resposta negativa, quais seriam os locais recomendados para instalação de novas estações de monitoramento contínuo?
- c) Quais recursos financeiros e humanos são necessários para que o posicionamento em tempo real no Brasil forneça uma acurácia centimétrica para plataformas flutuantes, via Network-RTK, ou SBAS (*Sattelite Based Augmentation System*)?

- d) Quais áreas seriam prioritárias para levantamentos gravimétricos e geodésicos?
- e) Qual seria o retorno socioeconômico destes investimentos em dez anos? Para detalhes dos benefícios pode-se consultar NGS (2001) e NGS (2013).

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cartas náuticas com SEP contribuem para a Década dos Oceanos para que eles sejam seguros, previsíveis, transparentes e produtivos, de forma que os dados do nível do mar permitam uma batimetria e topografia integrada; redução das incertezas dos levantamentos hidrográficos; e navegação com uma superfície contínua do DCN, facilitando a integração do banco de dados hidrográficos, tanto no espaço, quanto no tempo.

Países de dimensões continentais como Estados Unidos e Canadá iniciaram localmente até atingirem uma cobertura nacional e o resultado foi o cálculo da superfície do DCN em relação ao ITRF com incertezas próximas de 10 cm. Já no Brasil, para a definição do DCN, utiliza-se a técnica do zoneamento de marés, que prevê uma incerteza de até 10 cm entre zonas adjacentes, estando referido ao NMML e adequado somente para pequenas áreas. Entretanto, em 2010, foram realizadas iniciativas para o cálculo do SEP na Baía de Guanabara, que podem servir de subsídios para outros levantamentos. A partir do Alt-Bat se tem uma perspectiva da cobertura nacional que, por sua vez, nasceu com o objetivo de integrar os referenciais terrestre e marítimo, mas sua aplicação se estende à hidrografia e à segurança da navegação.

Na utilização do geóide como superfície de referência vertical para os modelos hidrodinâmicos, é necessária uma maior acurácia do modelo geoidal ou quase-geoidal adotado no país. Neste sentido, o Navio NPqHo Vital de Oliveira pode ser uma alternativa para a densificação de dados gravimétricos na região costeira, sendo necessário também o investimento em gravimetria aérea, terrestre e satelital, como um projeto de longo prazo.

Para a definição das superfícies médias do mar, MSS, foram citados o modelo global de marés canadense WebTideModel (seção 2.3.1.2), ou o modelo global oceânico CLS da Aviso+ (seção 2.3.1.2), ou DTU15MSS do DTU Space (seção

2.3.1.4). Estes dados sofrem deterioração nas proximidades da costa, mas podem ser ajustados por modelos hidrodinâmicos existentes.

Quanto ao DCN, sugere-se dividir o Brasil em regiões hidrográficas específicas e instalar uma rede de estações maregráficas com posições geocêntricas conhecidas em áreas onde a segurança navegação e o gerenciamento costeiro é crítico. Também é importante a definição de uma Época Nacional de Observação do Datum de Maré durante 18,6 anos. Além da realização de nivelamento geométrico das estações maregráficas durante esse período e bem como, a atualização dos equipamentos maregráficos, conforme preconizado em IBGE (2017). Ainda se recomenda a utilização da interpolação estatística dos *Data* de maré nos modelos hidrodinâmicos. Por fim, uma meta interessante a ser adotada seria o cálculo da incerteza espacial do DCN em relação ao ITRF, cujas incertezas deveriam ser melhores que 10 cm nas proximidades da costa.

## 2.6 MEIOS DE MEDIÇÃO DO NÍVEL DO MAR PARA DEFINIÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SEP

Na seção anterior, foram apresentadas, de forma sucinta, diferentes estratégias para determinação do SEP. Nesta seção, será aprofundada sua definição utilizando o posicionamento GNSS, durante um levantamento hidrográfico. Para uma revisão sobre conceitos relacionados à altimetria por satélites, Modelos Oceânicos Globais e outros, pode-se consultar Dalazoana (2006) e Santana (2020).

### 2.6.1 Posicionamento GNSS

Em 1957, Willian W. Guier (1926-2011) e George C. Weiffenbach (1921-2003), no Laboratório de Física Aplicada da Universidade Johns Hopkins, formularam as primeiras teorias do que então viria a ser o US Navy Transit GNSS. Em 1960, após seu lançamento, o sistema tinha uma acurácia de 200 m e funcionava em órbitas baixas de 1100 km, o que proporcionava uma estreita cobertura. Todavia, desde 1964 ele já era utilizado para navegação marítima (SEEBER, 1993). Obtendo êxito com essa tecnologia, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos lançou, em 1978, os primeiros satélites do GPS (*Global Positioning System*) (GREWAL, ANDREWS, BARTONE, 2021), atingindo o FOC (*Full Operational Capability*) em março de 1994,

quando 24 satélites dos blocos II/IIA estavam operacionais, porém o FOC só foi declarado em 17 de julho de 1995 (HOFMAMM-WELLENHOF *et al.*, 2008).

Uma das aplicações desse sistema é a medição do nível de redução em relação ao elipsoide, o qual foi abordado por diversos autores, como Leick *et al.* (1990), Hein *et al.* (1991), Rocken e Kelecy (1992), Lachapalle *et al.* (1993), além dos já citados no capítulo 1. No Brasil, constata-se que um dos grandes impulsionadores dessa tecnologia são os setores de navegação e hidrografia, haja vista os grandes benefícios para determinação de posição da embarcação em tempo real. Carvalho (1990) relata que a primeira experiência prática com o GPS nas águas brasileiras foi conduzida pelo Navio-Hidrográfico “Sirius”, em 21 de fevereiro de 1987, nas proximidades do Cabo de São Tomé. Nessa ocasião, foi utilizado um receptor “Magnavox 1107” – TRANSIT, adaptado para receber também os sinais do GPS. Seguidamente, em 1990, a DHN adquiriu o receptor GPS Trimble 4000SL, capaz de receber as informações L1/C/A, com cinco canais de aquisição independentes, sincronizados entre si, dentro de um intervalo de 1 milissegundo. Esse receptor permitia o posicionamento por ponto empregando medidas da pseudodistância e medidas Doppler, bem como armazenava dados da medida da fase da onda portadora L1 para que o pós-processamento fosse efetuado.

Krueger (1996) efetuou levantamentos geodésicos na costa paranaense e obteve, com o pós-processamento dos dados para as bases curtas, precisões melhores do que 10 cm. Para as bases longas (aproximadamente 235 km), também foram encontradas precisões centimétricas ao incluir o fator de correção troposférico. Em tempo real, a autora mostrou que o DGPS foi eficiente nos levantamentos hidrográficos, pois obteve uma precisão no posicionamento horizontal inferior a 5 m (DGPS com a fase do código suavizado pela portadora). Vale lembrar que, nessa época, a técnica de segurança Disponibilidade Seletiva estava ativada e proporcionava no método absoluto uma precisão no posicionamento horizontal de 100 m, a um nível de probabilidade de 95%. Posteriormente, diversas outras pesquisas no ambiente marinho foram desenvolvidas empregando, por exemplo, o GPS em tempo real, algumas das quais estão comentadas em Krueger *et al.* (2020).

Desde então, a disponibilidade, a integridade e a confiabilidade desse sistema foram muito aprimoradas com o acréscimo das constelações GLONASS e GALILEO, dando origem ao sistema conhecido como GNSS, cujo termo foi utilizado pela primeira vez em 1991 pela Associação Internacional de Aviação Civil (*International Civil*

*Aviation Organization* – ICAO). O objetivo era designar um sistema baseado em uma ou mais constelações de satélites, com abrangência mundial para determinação de posição, velocidade, tempo e deslocamento de aeronaves (SEEBER, 2003). Recentemente, foram incluídos ao GNSS mais três sistemas de posicionamento, a saber: BeiDou, da China; QZSS, do Japão; e IRNSS, da Índia (CDDIS, 2020).

## 2.6.2 O GNSS

De acordo com o Sistema de Informação de Dados Dinâmicos da Crosta (CDDIS – *Crustal Dynamic Data Information System*), o GNSS pode ser dividido em três segmentos: espacial, de controle e do usuário. O segmento espacial das constelações (por exemplo: GPS, GLONASS, GALILEO e BeiDou), que podem integrar o GNSS, são compostos por satélites em órbitas médias (*MEO – Medium Earth orbit*), com uma altura orbital média variando entre 19.100 e 23.300 km. Atualmente, satélites dessas constelações estão equipados com antenas retrorefletoras a laser para SLR (*Sattelite Laser Ranging*), contribuindo com a capacidade de navegação autônoma de tais satélites. Algumas dessas constelações podem ainda ter acrescentado ao seu segmento espacial satélites geostacionários (*GEO - Geostationary Earth Orbit*) com altura orbital média de 35.786 km, como é o caso da constelação BeiDou. Cabe ressaltar que alguns sistemas, como BeiDou, QZSS e IRNSS, ainda estão em fase de implementação (CDDIS, 2020).

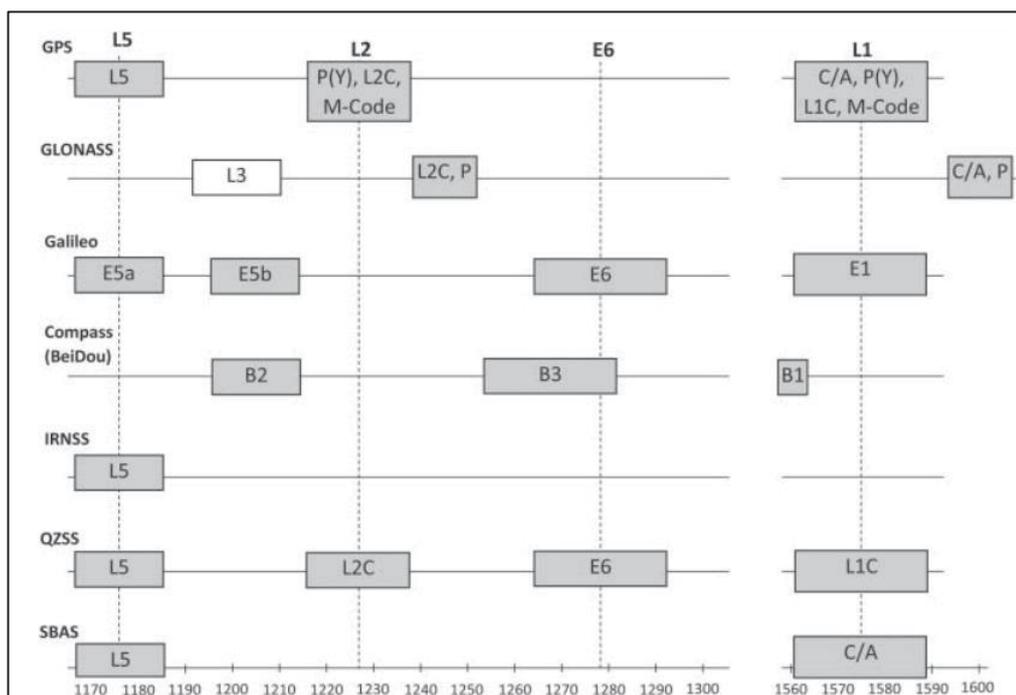
O segmento de controle é responsável pelo monitoramento contínuo dos satélites em vista e pelo controle de seu funcionamento como, por exemplo, orientação de painéis solares e determinação do sistema de tempo GPS, envio periódico das mensagens de navegação para cada satélite e manutenção de sua posição na órbita, o que é feito baseado em uma rede de estações globais, sendo que cada sistema tem seu próprio segmento de controle. Dentro de cada sistema existem ainda os pontos chamados de *Master Control Stations* (Estações Mestras de Controle), que agrupam as informações dessas e de outras estações para enviar aos satélites GNSS (HOFMANN-WELLENHOF, 2007).

Quanto ao segmento do usuário, ele engloba os receptores GNSS, que podem variar de acordo com o modelo e fabricante. Dessa forma, eles podem ser agrupados de acordo com a finalidade, tais como: navegação, emprego geodésico, SIG (Sistema de Informação Geográfica) e aquisição de tempo, porém um receptor

geodésico pode também ser utilizado para navegação, por isso, Monico (2016) recomenda a classificação de acordo com a frequência, como L1, L2 e L5 e outras.

Na FIGURA 15, apresentada na sequência, visualizam-se as diferentes frequências geradas pelos satélites das constelações anteriormente citadas.

FIGURA 15 – BANDAS DE FREQUÊNCIA DO GPS, GLONASS, GALILEO, COMPASS (BEIDOU), QZSS, IRNSS E SBAS. A BANDA S (2492,028 MHZ) NÃO ESTÁ PRESENTE NESTA ILUSTRAÇÃO



FONTE: Grewal; Andrews; Bartone (2021).

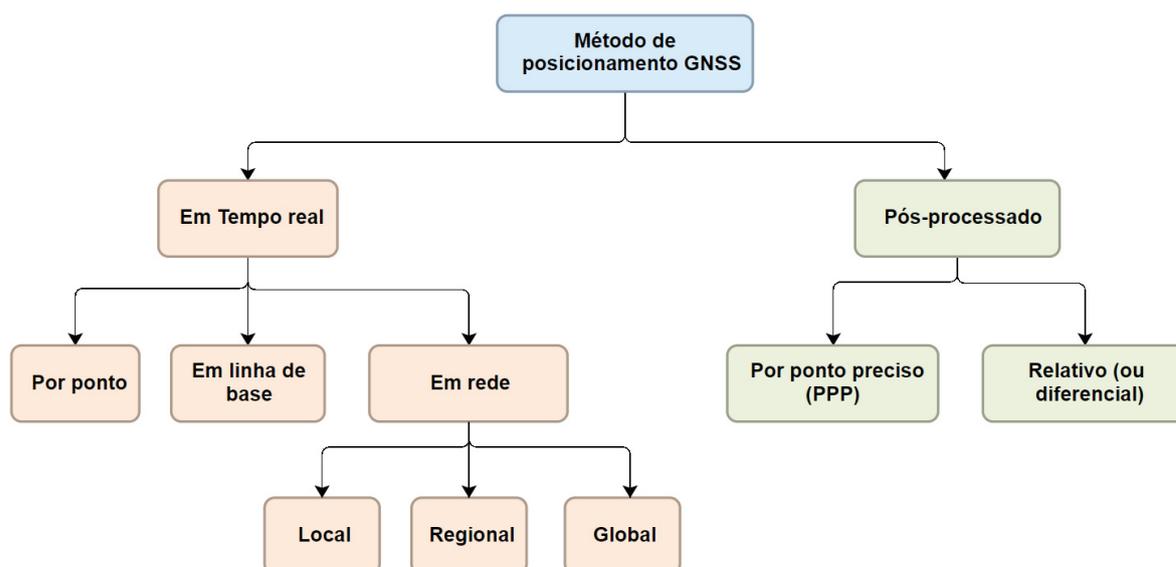
O conceito fundamental do posicionamento GNSS é baseado no tempo para realização de um trajeto unidirecional das ondas de rádio em diferentes frequências. Os receptores usam o conhecimento a priori do sinal gerado no satélite para duplicar o sinal internamente e o tempo que o sinal leva para percorrer do satélite ao receptor é calculado pelo deslocamento de fase medido entre o sinal gerado no receptor e o recebido do satélite. Desprezando os erros de propagação, é possível calcular a distância entre o receptor e o satélite por meio do produto entre o tempo de viagem e a velocidade da luz. Como essa distância é afetada por diversos erros, tais como: falta de sincronismo entre os relógios do satélite e do receptor, propagação do sinal na troposfera e na ionosfera, variações no centro de fase da antena e multicaminho, essa distância é chamada de pseudodistância. Geometricamente, pode-se dizer que o

ponto de interseção de três esferas de raio igual a pseudodistâncias para três satélites diferentes, fornece a posição do receptor (WELLS, 1987, WARDWELL, 2008).

### 2.6.3 Métodos de posicionamento GNSS

Para o posicionamento marítimo, a procura por essa tecnologia tem crescido cada vez mais face a duas vantagens principais: a alta acurácia e o baixo custo. Para que tais vantagens sejam alcançadas, o posicionamento GNSS pode ser feito em tempo real, ou pós-processado. Uma classificação para esses métodos é sugerida por Krueger *et al.* (2020) e está indicada na FIGURA 16, em que o posicionamento em tempo real pode ser por ponto, em linha de base (DGPS ou RTK), ou em rede, sendo que em rede pode ser local (por exemplo: Network-RTK); regional (por exemplo: WAAS), ou global (por exemplo: GcDGNSS). Já o posicionamento obtido por pós-processamento, pode ser PPP ou relativo, com a possibilidade de ser estático ou cinemático, sendo esse último chamado de PPK, ou Método de Posicionamento Relativo Cinemático (MPRC). Cabe ressaltar que algumas literaturas, como Terrapos (2018), chamam o pós-processamento de diferencial, pois são aplicadas correções diferenciais no sinal durante o processamento.

FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO



FONTE: Adaptado de Krueger *et al.* (2020).

### 2.6.3.1 Posicionamento em tempo real

Segundo Krueger (1996), o posicionamento em tempo real pode ser obtido utilizando observações GNSS no modo diferencial (DGNSS), que consiste no posicionamento em tempo real de uma estação móvel por meio das correções diferenciais geradas na estação de referência formando uma linha de base. Essas correções em tempo real podem ser enviadas por rádio de transmissão, linha telefônica ou satélites de comunicação, dentro de um formato apropriado, definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service* (RTCM), e podem ser classificadas quanto ao tipo de observável: do código, do código suavizado pela portadora ou pela fase da onda portadora. Salienta-se que, enquanto os dois primeiros são atribuídos ao DGPS, para o último utiliza-se a terminologia RTK, que pode alcançar precisões centimétricas, porém havendo uma degradação do sinal conforme aumenta a distância entre a estação móvel (*rover*) e a base, ou caso exista alguma obstrução no trajeto do sinal, se enviado via rádio (BRIONES, 1999; KRUEGER, 2020).

Uma forma de minimizar as incertezas na comunicação é realizar a transmissão via NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), que é um formato desenvolvido pela BKG no contexto do Projeto Piloto EUREF-IP. O objetivo desse projeto era a disponibilização em tempo real de dados GNSS da EUREF (Rede de Referência Européia) e uma estimativa dos produtos, tais como órbitas precisas, erro dos relógios e parâmetros ionosféricos e troposférico a nível regional (CHEN *et al.*, 2004). Segundo Costa *et al.* (2008), no Brasil, essa modalidade de transmissão de dados foi iniciada em 2008 pelo IBGE para os métodos de posicionamento RTK e DGPS. Na avaliação do desempenho dessa tecnologia, os autores utilizaram estações de referência distantes de 100 a 200 km e encontraram uma acurácia de 61 cm para a componente vertical e 33 cm para a componente horizontal.

A acurácia do método de posicionamento em tempo real por linha de base, pode ser influenciada por diversos fatores, como: o cálculo das correções diferenciais, a taxa de atualização e transferência de dados, a qualidade do sistema de comunicação e a distância entre a estação de referência e a móvel (KRUEGER *et al.*, 2020); incertezas essas que podem ser diminuídas utilizando uma rede de estações base, sendo conhecido como Network-RTK, ou simplesmente NRTK. Nesse sentido,

evidencia-se que um estudo realizado por Brzezinska *et al.* (2005) sobre NRTK, utilizando a comunicação via rádio, indicou acurácia entre 10 cm e 20 cm para as componentes horizontais e verticais com estações base entre 100 e 120 km.

Quanto ao DGPS, uma alternativa para grandes áreas é a utilização de sistemas aumentados baseados em satélites (*Satellite-Based Augmentation System* – SBAS), os quais utilizam satélites geoestacionários para transmitir informações de correção e integridade aos usuários. Dentre os sistemas existentes, pode-se citar: o WAAS (*Wide Area Augmentation System*), para a América do Norte; o EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), para a Europa; o GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Navigation*), para a Índia; o SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*) para a China; o MSAS (*MTSAT Satellite Augmentation System* (MSAS), para o Japão, a Coreia e a Oceania; e o AU/NZ SBAS (*New Zealand and Australia satellite-based augmentation system*), para a Austrália e a Nova Zelândia (GREWAL; ANDREWS; BARTONE, 2021).

Além de sistemas com correções regionais, existem também aqueles que oferecem uma correção a nível global. Essa técnica é chamada tanto de GcGPS (*Global Corrected GPS*), por Mann (2007), quanto de GDGPS (*Global Differential GPS*), por Arroyo-Suarez *et al.*, (2005), para este estudo será adotado o termo GcDGNSS. Nessa abordagem, uma rede global de estações de referência calcula os parâmetros e as fontes de erros dos satélites GNSS e enviam, via internet, para um centro de análise, o qual retransmite ao usuário, em tempo real, via satélite ou via internet, as correções de órbita do relógio. Ramos (2007) avaliou a performance do equipamento C-Nav/StarFire (*C/C Technologies, INC*), que emprega o algoritmo RTG (*Real Time Gipsy*), desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), com precisão nominal planimétrica de 10 cm; porém destaca-se que esse é somente um dentre tantos outros serviços e sistemas existentes, os quais podem ser observados no QUADRO 3, apresentado na sequência<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Mais detalhes podem ser encontrados em FIG (2019) e no manual de cada equipamento.

QUADRO 3 – EXEMPLOS DE SISTEMAS DE CORREÇÃO GLOBAL EM TEMPO REAL

Empresa	Serviço	Acurácia (hor. 95%), cm	Tempo de convergência (min)	GNSS	Comentário
Trimble	CenterPoint RTX Fast	< 2,5	<5	G,R,E,C,J	
	CenterPoint RTX Standard	< 2,5	<15	G,R,E,C,J	
	FieldPoint RTX	< 20	<15	G,R,E,C,J	
	RangePoint RTX	< 50	< 5	G,R,E,C,J	
	ViewPoint RTX	< 100	< 5	G,R,E,C,J	
Trimble (serviço fornecido pela Fugro)	OmniSTAR HP	< 10	< 45	G	
	OmniSTAR G2	< 10	< 20	G, R	
	OmniSTAR XP	< 10	< 45	G	
	OmniSTAR VBS	< 100	< 1	G	Correções de pseudodistância
Fugro	Starfix.G2+	< 3	s/ informação		Utiliza resolução de ambiguidade
	Starfix.G4	< 10	s/ informação	G,R	
	Starfix.G2	< 10	s/ informação	G,R,E,C	
	Starfix.XP2	< 10	s/ informação	G,R	Correção terceirizada
	Starfix.HP	< 10	s/ informação	G	
	Starfix.L1	< 100	s/ informação	G	Correções de código em uma frequência
NavCom	StarFire SF2	< 10	30 – 45	G, R	
	StarFire SF3	< 3	30	G, R	
C-Nav	C-Nav <sup>2</sup>	< 10	s/informação	G, R	Algoritmo StarFire
	C-Nav <sup>1</sup>	< 3	s/informação	G	Algoritmo StarFire
Veripos	Apex 5	< 5	s/informação	G,R,E,C,J	Rede de estação de referência própria e cálculo
	Apex 2	< 5	s/informação	G,R	
	Apex	< 5	s/informação	G	
	Ultra 2	< 10	s/informação	GR	Rede de estação de referência JPL e cálculo
TerraStar (Hexagon)	TerraStar-C PRO	< 3	< 18	G,R,E,C	Utiliza resolução de ambiguidade
	TerraStar-C	< 5	30 – 45	G,R	
	TerraStar-L	< 50	< 5	G,R	Correção de pseudo-distância
Leica Geosystems (Hexagon)	Leica SmartLink	< 3	30	s/informação	Correções TerraStar
Hemisphere	AtlasBasic	< 50	Instantâneas	G,R,C	
	Atlas H100	< 100	1 – 2	G,R,C	
	Atlas H30	< 30	1 – 5	G,R,C	
	Atlas H10	< 8	10 – 40	G,R,C	

FONTE: Adaptado de FIG (2019).

NOTA: Foram utilizadas as seguintes legendas na coluna GNSS: G - GPS, R - GLONASS, E - Galileo, C - BeiDou, J - QZSS. O suporte real das constelações GNSS pode depender da região.

Além desses sistemas, recentemente, foi lançado pelo JPL o serviço RTGx, que integra várias observações geodésicas, como GNSS, SLR (*Satellite Laser Ranging*), DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) e VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), utilizando o Filtro Kalman para estimar os parâmetros necessários para a correção do sinal, tais como: coordenadas e

velocidade da estação, órbitas e relógios do satélite e orientação da Terra e atrasos ionosféricos e troposféricos. De acordo com Bertiger *et al.* (2020), o erro que se espera, em termos de URE (*User Range Error*), é menor que 5 cm.

### 2.6.3.2 Posicionamento pós-processado

Apesar da alta precisão possível de se obter com os sistemas de posicionamento em tempo real com correção global, todos eles são pagos, o que pode ser um fator limitante para muitos usuários. Assim, outra abordagem possível é realizar o posicionamento pós-processado, que pode ser relativo ou Por Ponto Preciso (PPP).

O levantamento PPP foi estudado de forma pioneira por Zumberg *et al.* (1997), o qual, primeiramente, determinou as posições precisas dos satélites GPS e as correções dos relógios obtidas por uma rede de receptores GNSS distribuídos globalmente; em seguida, analisou os dados de uma rede local, estimando parâmetros específicos do receptor com dados específicos do receptor, e manteve os parâmetros dos satélites fixos em seus valores determinados na solução global.

Posto isso, observa-se que essa técnica possui a grande vantagem de não estar limitada à linha de base, contudo, é necessária a realização de mais correções relacionadas ao satélite, ao receptor, bem como à utilização de modelos atmosféricos e geofísicos (MONICO, 2008). Ademais, ressalta-se que, para serem atingidas acurácias centimétricas, é necessário utilizar um receptor de dupla-frequência e as medições na fase da onda portadora (ABDALLAH, 2016). No QUADRO 4, é possível visualizar as diferenças entre as correções que devem ser feitas utilizando PPP em comparação com o DGNSS. Aqui, cabe destacar que os autores atribuem o método DGNSS a toda correção diferencial aplicada, o que engloba os métodos PPK, RTK, DGNSS e GcDGNSS<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Para mais detalhes sobre tais erros, podem ser consultados Seeber (2003), Hofmann-Wellenhof (2003), Leick (2004), Monico (2008), Rizos *et al.* (2012), Abdallah (2016) e Euriques (2018).

QUADRO 4 – ERROS QUE PRECISAM SER CORRIGIDOS, OU LEVADOS EM CONSIDERAÇÃO PARA UM PPP EM RELAÇÃO AO DGNSS RELATIVO

Tipo de correção	PPP	DGNSS
<b>Erros dependentes dos satélites</b>		
Correções precisas do relógio do satélite	Sim	Não
Desvio do centro de fase da antena do satélite	Sim	Não
Variações do centro de fase da antena do satélite	Sim	Sim/Não
Erro de <i>phase wind-up</i> da antena do satélite	Sim	Não
<b>Erros específicos do receptor</b>		
Offset do centro da fase da antena do receptor	Sim	Sim
Variações do centro de fase da antena receptor	Sim	Sim
Erro de <i>phase wind-up</i> da antena do receptor	Sim	Não
<b>Modelos Geofísicos</b>		
Deslocamentos de maré terrestre sólida	Sim	Não
Carga da maré oceânica	Sim	Não
Carga da maré atmosférica	Sim	Não
Maré polar	Sim	Não
Movimento da placa tectônica	Sim	Não
<b>Modelos atmosféricos</b>		
Atraso troposférico	Sim	Sim
Atraso ionosférico	Sim (somente para L1)	Não

FONTE: Adaptada de Rizos *et al.* (2012) e Abdallah (2016).

As correções em questão podem ser feitas por meio dos produtos operacionais fornecidos por diversos centros de análise no mundo, tais como IGS, que inclui efemérides precisas dos satélites GNSS; cálculo das posições e das velocidades de estações na rede GNSS global; EOPs (movimento polar e taxas, duração do dia); e soluções de estação e relógio dos satélites, além de outros produtos derivados dos acervos de dados GNSS do CDDIS, que incluem estimativas do atraso zenital total (ZTD- *Zenith Total Delay*) (componentes secos e úmidos) e mapas globais da ionosfera.

No QUADRO 5, observam-se algumas descrições das efemérides disponibilizadas pelo IGS. Nota-se que, na comparação entre a efeméride rápida e final, não existe uma diferença significativa em termos de acurácia<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Mais detalhes sobre outros produtos podem ser consultados em CDDIS (2021).

QUADRO 5 – DESCRIÇÃO DA ACURÁCIA, LATÊNCIA, ATUALIZAÇÃO E TAXA DE INTERVALO DAS EFEMÉRIDES DO IGS

	<b>Tipo</b>	<b>Acurácia</b>	<b>Latência</b>	<b>Atualização</b>	<b>Taxa de intervalo</b>
Transmitida (Broadcast)	Órbitas	~100 cm	Tempo real	—	diário
	Relógio dos satélites	~5 ns RMS			
			~2.5 ns SDev		
Ultra-Rápida (metade prevista)	Órbitas	~5 cm	Tempo real	em 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Relógio dos satélites	~3 ns RMS			
			~1.5 ns SDev		
Ultra-Rápida (metade observada)	Órbitas	~3 cm	3 – 9 horas	em 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Relógio dos satélites	~150 ps RMS			
			~50 ps SDev		
Rápida	Órbitas	~2.5 cm	17 – 41 horas	em 17 UTC diariamente	15 min
	Relógio dos satélites e da estação	~75 ps RMS			5 min
			~25 ps SDev		
Final	Órbitas	~2.5 cm	12 – 18 dias	Toda quinta	15 min
	Relógio dos satélites e da estação	~75 ps RMS			Sat.: 30 s
			~20 ps SDev		Est.: 5 min

FONTE: Adaptado de IGS (2021).

Assim, de posse de tais correções, o processamento PPP pode ser realizado por meio de diversos softwares, listados no QUADRO 6:

QUADRO 6 – PACOTES DE SOFTWARES DISPONÍVEIS PARA PROCESSAMENTO PPP

<b>Software</b>	<b>Provedor</b>
Bernesse GNSS	Instituto Astronômico da Universidade de Berna (AIUB), Suíça
GIPSY-OASIS II	JPL (Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology), EUA
RTKLIB	Takasu na Tokyo University Marine Science e Tomoja Technology, Japão
TerraPos	TerraTec e o Serviço Hidrográfico Norueguês, Noruega
GPSTk	Laboratório de Geofísica e Espaço dentro dos Laboratórios de Pesquisa Aplicada da Universidade do Texas em Austin

FONTE: Adaptado de Abdallah (2016).

Existem ainda serviços on-line que realizam, de forma gratuita, o processamento, nos quais basta inserir os dados coletados no formato Rinex e as informações da antena empregada. Entretanto, nesses serviços, o usuário não pode escolher o tipo de correção ou de modelo a ser utilizado, uma vez que os dados são processados com a configuração padrão do serviço. Na TABELA 3, é apresentada

uma análise, elaborada por Maciuk e Skroupa (2017), dos resultados obtidos com os processamentos PPP no modo cinemático utilizando diferentes serviços.

TABELA 3 – DESVIOS MÉDIOS ABSOLUTOS DAS COORDENADAS OBTIDAS COM AS COMPONENTES HORIZONTAIS (N E E) E VERTICAIS (U) E SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÕES

Dia (DOY)	Serviço	N(cm)	$\sigma_N(cm)$	E (cm)	$\sigma_E(cm)$	U (cm)	$\sigma_U(cm)$
261	CSRS	1,6	2,0	1,6	2,0	3,3	3,6
	APPS	0,7	1,0	0,7	0,9	1,6	2,2
	GAPS	13,1	6,2	7,8	4,3	13,3	9,5
	magicGNSS	1,8	2,2	1,5	2,4	0,9	1,3
268	CSRS	1,5	1,5	0,8	0,9	2,3	2,4
	APPS	0,7	1,0	0,7	0,9	1,7	2,1
	GAPS	9,4	2,1	7,1	1,9	13,0	3,8
	magicGNSS	1,3	1,7	1,1	1,7	1,3	1,5

FONTE: Adaptada de FIG 57 (2019).

NOTA: CSRS (Canadian Spatial Reference System), APPS (Automatic Precise Positioning Service), GAPS (GPS Analysis and Positioning Software).

No Brasil, o IBGE disponibiliza o Serviço IBGE-PPP, de forma on-line e gratuita, que utiliza o programa CSRS-PPP, desenvolvido pelo NRCan (*Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*). Esse serviço permite aos usuários obterem coordenadas referenciadas ao Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS2000) e ao ITRF, utilizando receptores GPS e GLONASS. Nos cálculos, são empregados produtos disponibilizados pelo IGS, tais como: órbitas precisas, correções aos relógios dos satélites, modelos e mapas globais de ionosfera e modelos de correção do centro de fase das antenas. Para os arquivos de rastreamento com longo período de observações, é possível resolver as ambiguidades usando as observações de fase da portadora, proporcionando, assim, resultados mais precisos (precisão centimétrica). Para os arquivos de curta duração, as coordenadas são calculadas usando somente as observações de pseudodistância (precisão métrica)<sup>5</sup>.

Além do PPP, de acordo com Monico (2008), uma forma mais simples de realizar essas correções e que elimina a maioria dos erros citados é empregar uma ou mais estações base, com coordenadas conhecidas, as quais permanecem rastreando durante todo o levantamento. Assim, é possível calcular os vetores formados entre as estações base e móvel, de forma a determinar as coordenadas, por

<sup>5</sup> Mais informações podem ser consultadas no manual do serviço, disponível em IBGE (2021).

meio da simples, dupla ou tripla diferença de fase. No Brasil, Fortes (1993) chama essa abordagem de Método de Posicionamento Relativo Cinemático (MPRC), enquanto, mais recentemente, alguns autores internacionais, como Mann (2010), denominam de Pós-processamento Cinemático (PPK – *Pos-processed Kinematic*)<sup>6</sup>.

Outro método, que é o mais adequado para aplicações marinhas, é o IA-PPK (*Inertial Aided Pos-processed Kinematic*), ou IA-PPP (*Inertial Aided Precise Pos-processed*), que realiza a integração dos dados coletados com o GNSS e o sensor inercial durante o processamento. De acordo com VectorNav (2020), essa integração pode ser utilizada no modo fracamente acoplado (LC – *Loosely Coupled*), ou fortemente acoplado (TC – *Tightly Coupled*).

A arquitetura do sistema IA-PPK, no modo fracamente acoplado, é a abordagem de integração mais comum, é o tipo de integração que combina a solução de navegação GNSS, a qual consiste na posição, velocidade e tempo, com a solução Inertial Navigation System (INS) usando um filtro de Kalman estendido. Assim, o filtro usa as medidas do INS para prever a posição, a velocidade e a atitude do sistema combinado. Feito isso, as medições do GNSS são usadas para atualizar a previsão e estimar o *bias* do giroscópio e o *bias* do acelerômetro, no INS. Esses *biases* estimados são usados para compensar as medições brutas do giroscópio e do acelerômetro no INS e melhorar a posição da integração. Cabe mencionar ainda que, nessa abordagem, um receptor GNSS deve ter pelo menos quatro satélites em vista para calcular a posição e a velocidade do receptor para enviar ao filtro de Kalman estendido, uma vez que, se forem visualizados menos de quatro satélites, o sistema combinado terá uma interrupção do GNSS e seguirá o padrão do INS.

Quando utilizado no modo fortemente acoplado, o sistema não usa a solução de navegação completa computada pelo GNSS, mas utiliza as pseudodistâncias GNSS e as medições Doppler. Assim, as medidas brutas do GNSS são combinadas com a solução de navegação INS contendo as medidas integradas de posição, velocidade e atitude em um filtro Kalman estendido. Uma vez que essa abordagem usa as medições de pseudodistância e Doppler GNSS, ao invés da solução completa, um único satélite pode fornecer uma atualização GNSS útil para o sistema. Devido a isso, a abordagem fortemente acoplada é mais adequada em aplicações que tem uma

---

<sup>6</sup> Mais detalhes sobre os fundamentos desse método podem ser encontrados em Seeber (2003), Leick *et al.* (2004) e Monico (2008).

visão apenas parcial do céu, ou que são suscetíveis a erros de multicaminho, como embarcações no mar<sup>7</sup>.

Por fim, quanto à aplicabilidade de todos esses métodos em levantamentos hidrográficos, segundo Mills e Dodd (2014), qualquer forma de posicionamento cinemático com resolução de ambiguidade inteira de fase da onda portadora, com solução tanto em tempo real (por exemplo: RTK e GcGNSS), quanto pós-processado (por exemplo: PPK e PPP), pode ser adotada. Contudo, segundo os autores, o controle vertical pós-processado tem uma qualidade melhor, pois permite o processamento empregando o filtro *forward-backward*, que reduz a incerteza na solução de altitude, enquanto outros métodos, por exemplo, os baseados em tempo real, efetuam somente o processamento com o filtro *forward*, o que conduz a preferência do método PPK em relação ao RTK, bem como do método PPP pós-processado em relação ao GcGNSS (baseado no PPP). Para exemplificar, para o RTK, Moreira (2016) encontrou precisões para a componente vertical de 25 cm; já Abdallah (2016) demonstrou que, com o processamento PPP pós-processado em ambiente marítimo, é possível atingir precisões de 6,77 cm a 12,10 cm.

Em relação às efemérides a serem utilizadas no processamento, segundo NOAA (2019), devem ser de qualidade adequada para obter o nível desejado de precisão da componente de controle vertical do GPS/GNSS. Para processamento PPK ou PPP, que utilizam a fase da portadora (linha de base), todos os produtos do IGS podem ser suficientes: transmitida, ultrarrápida, rápida e final, sendo recomendado utilizar as melhores órbitas e relógios disponíveis no momento do processamento da linha de base. Nos métodos PPP, as efemérides ultrarrápidas, ou melhores, podem ser suficientes e não é aconselhável utilizar produtos de diferentes centros de análises. Quanto ao comprimento da linha de base, segundo NOAA (2019), para se atingir acurácias no nível centimétrico, é recomendado utilizar uma máxima distância de 40 km entre a estação e a embarcação. Para a taxa de aquisição, é recomendado que a estação de referência tenha a mesma taxa de aquisição da embarcação (1Hz). Contudo, se forem utilizados métodos de interpolação da fase da onda portadora no posicionamento GNSS/INS, são permitidas taxas de 30 segundos.

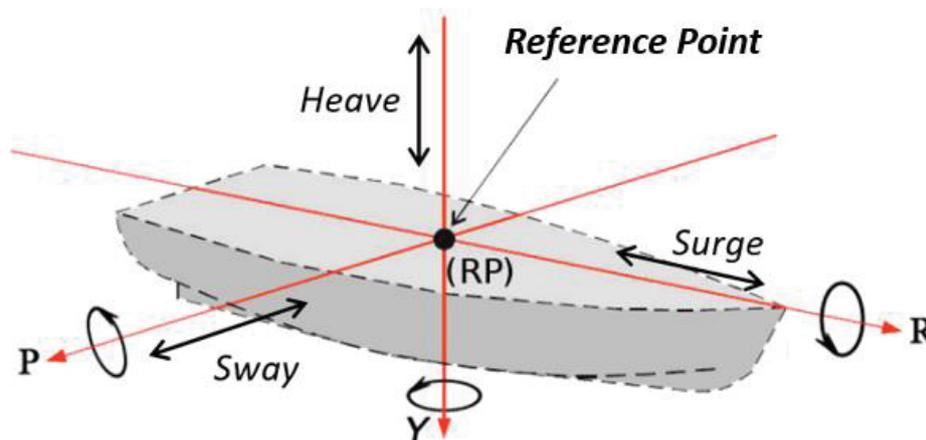
---

<sup>7</sup> Mais detalhes podem ser consultados em Lima (2005), VectorNav (2020) e Shi *et al.* (2021).

### 2.6.3.3 Atitude da embarcação

Como o posicionamento GNSS ocorre a bordo de uma plataforma não estabilizada, vale apresentar seu sistema de coordenadas e os movimentos a que está sujeita. Segundo Souza (2011), são três de rotação (*roll*, *pitch*, e *yaw*) e três de translação (*heave*, *sway* e *surge*) (FIGURA 17).

FIGURA 17 – SISTEMA DE REFERÊNCIA DA EMBARCAÇÃO



FONTE: Baseado em Souza (2011).

NOTA: No eixo R, ocorre os movimentos de *Roll* (rotação) e *Surge* (translação); no eixo Y, os movimentos de *Yaw* (rotação) e *Heave* (translação); e no eixo P, os movimentos de *Pitch* (rotação) e *Sway* (translação).

Além desses movimentos, existe ainda o calado dinâmico, que é a mudança na posição vertical da plataforma de sondagem na água (da superfície da água ao Reference Point - RP) devido à alteração da velocidade e à alteração da carga a bordo (FIG 62, 2014), bem como o assentamento, devido ao efeito de Bernoulli, que causa um rebaixamento da lancha e um conseqüente ângulo de pitch (OHI, 2011). Segundo Parker (1998), esses dois movimentos também são chamados “squat”.

De outra forma, quando se utiliza o elipsoide como referência vertical dos levantamentos hidrográficos, a maior parte desses movimentos são medidos também pela antena GNSS. Todavia, não substitui o sistema GNSS/INS, pois esse grava os dados de atitude e posição a um intervalo de 200 Hz, enquanto o GNSS a um intervalo de 1 Hz.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nesta pesquisa engloba três etapas: coleta de dados, processamento e definição do SEP, podendo ser visualizada, de modo geral, na FIGURA 18.

Na primeira etapa, foram utilizados dados da estação maregráfica do Clube Naval Charitas e dos levantamentos hidrográficos realizados nas Baías de Ilha Grande e de Guanabara, ao longo do ano de 2021, por uma lancha hidrográfica. Nesta etapa, foram coletados dados de posicionamento GNSS de duas antenas, as quais, juntamente com o sensor inercial (MRU), forneciam os dados de atitude da embarcação. Por meio dessas duas antenas também foram gravados os dados GNSS no formato RTCM, sendo que uma delas fornecia o posicionamento em tempo real, por meio das correções geradas por uma rede de estações globais do serviço *Seastar G2 da Fugro* (QUADRO 3), realizando o método GcDGNSS. Além dessas antenas, foi utilizada uma terceira antena para receber as observáveis GNSS via NTRIP, por meio do serviço RBMC-IP do IBGE, e, assim, realizar o posicionamento RTK.

Na etapa de processamento, os dados em formato RTCM foram convertidos para Rinex, visando a realização dos métodos PPP, PPK, IA-PPP (LC) e IA-PPK (LC), com uma e duas antenas; e os métodos IAPPK (TC), IA-PPP (TC), com duas antenas (ver seção 2.6.1.2). Para avaliar a integridade dos dados e de suas incertezas horizontais e verticais, todos os métodos pós-processados foram comparados com o mais preciso, o IAPPK (TC). Nos dias em que a embarcação permaneceu atracada junto ao marégrafo, também foi realizada a comparação entre a variação das altitudes elipsoidais da embarcação e a variação do nível do mar medido na estação maregráfica. Nesta etapa, também foram avaliados os métodos RTK e GcDGNSS.

Por último, na fase de definição e validação do SEP, foram combinados os dados de GNSS da lancha, afastamento entre os sensores e nível do mar medido na estação maregráfica. Os critérios escolhidos para validação de um método de posicionamento GNSS e do SEP são aqueles recomendados por CHS (2021), cujo limite de incerteza vertical ( $2\sigma$ ) para medição do nível do mar e dos níveis de referência hidrográficos é de 5 cm, para Ordem Especial ou Exclusiva, e de 10 cm, para as demais ordens. Todavia, neste trabalho, somente para as Ordens 1A e 1B o limite de 10 cm foi adotado; já para a ordem 2, foi considerado um limite de 15 cm,

pois possui uma tolerância de incerteza para o posicionamento vertical maior do que as Ordens 1A e 1B, segundo OHI (2020a).

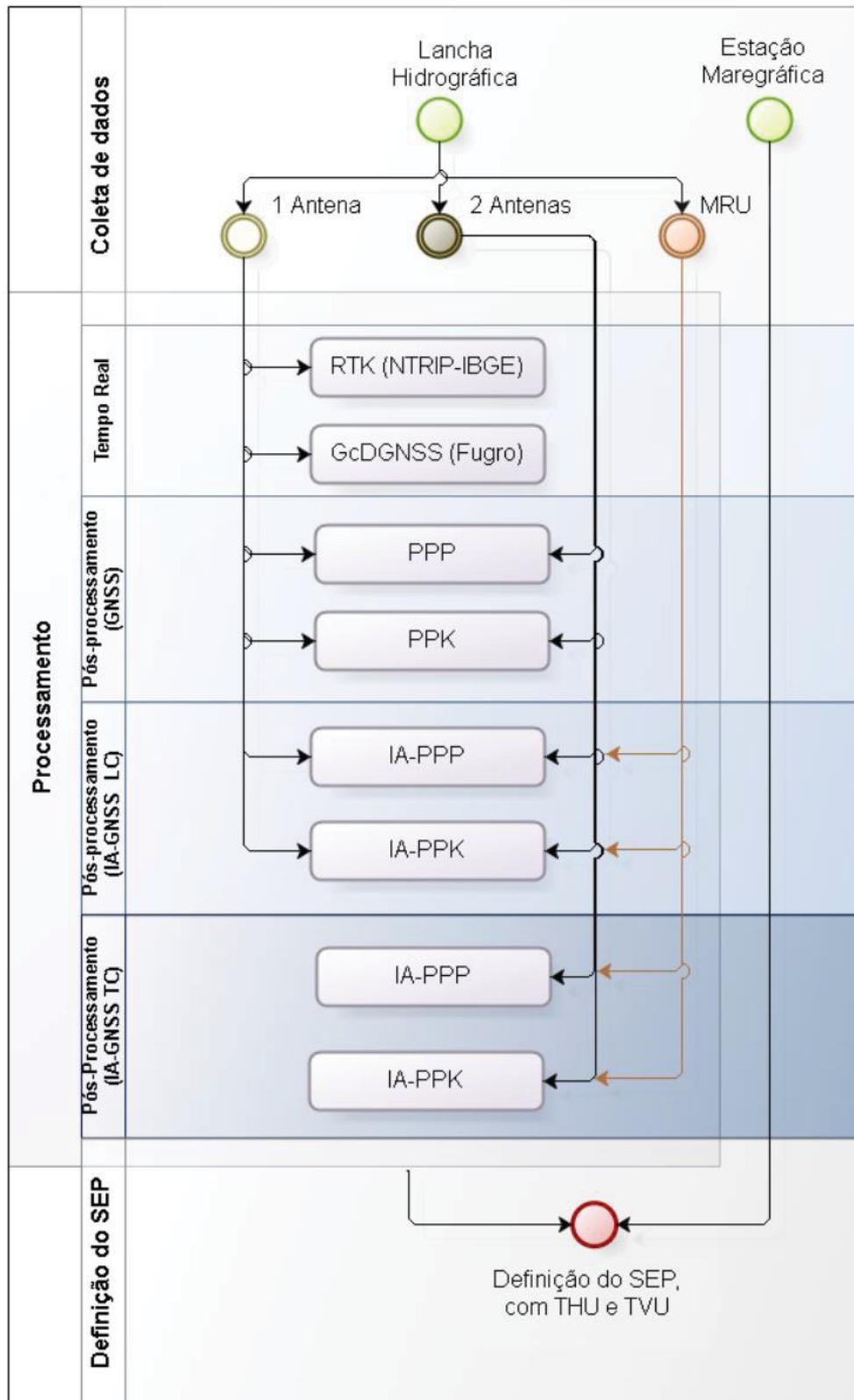
Ademais, cabe ressaltar que esses valores são apenas indicadores de que, caso sejam atingidos, o levantamento terá chances de cumprir os requisitos de incerteza vertical total específicos para cada ordem, conforme exigido por OHI (2020a), pois, ao final do levantamento, eles serão somente uma parcela de todas as incertezas verticais propagadas como, por exemplo, a velocidade do som na água, os *offsets* entre sensores, a atitude da embarcação etc.<sup>8</sup>.

Para simplificação dos resultados, o cálculo foi feito somente para o método mais preciso, IA-PPK (TC). Contudo, com a metodologia apresentada, o SEP e sua incerteza podem ser determinados por todos os demais métodos.

---

<sup>8</sup> Mais detalhes sobre estas incertezas podem ser consultados em Souza (2011).

FIGURA 18 – RESUMO DOS MATERIAIS E MÉTODOS



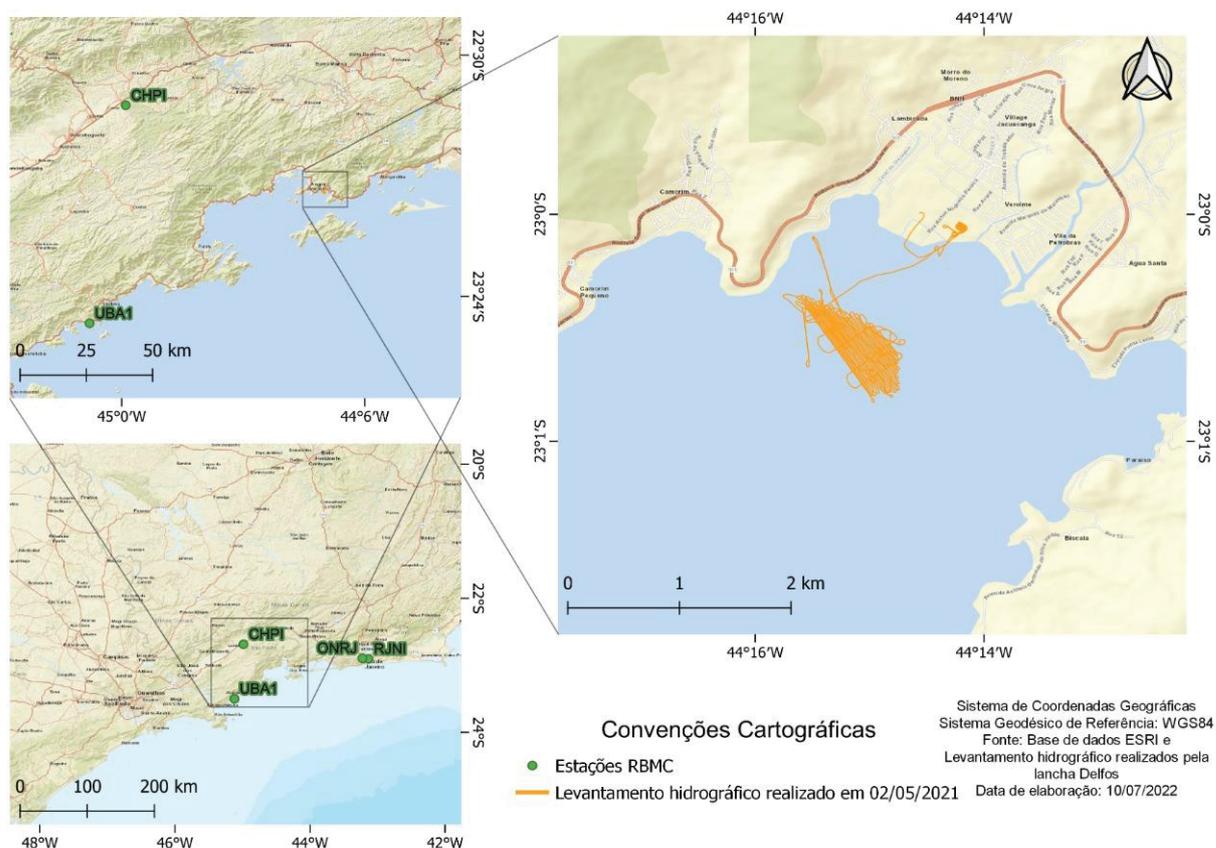
FONTE: O autor (2022).

A seguir, são apresentados: a caracterização das áreas de estudo, os dados coletados, os equipamentos e os softwares empregados e as metodologias utilizadas no processamento dos dados e no cálculo das incertezas.

### 3.1 ÁREAS DE ESTUDO

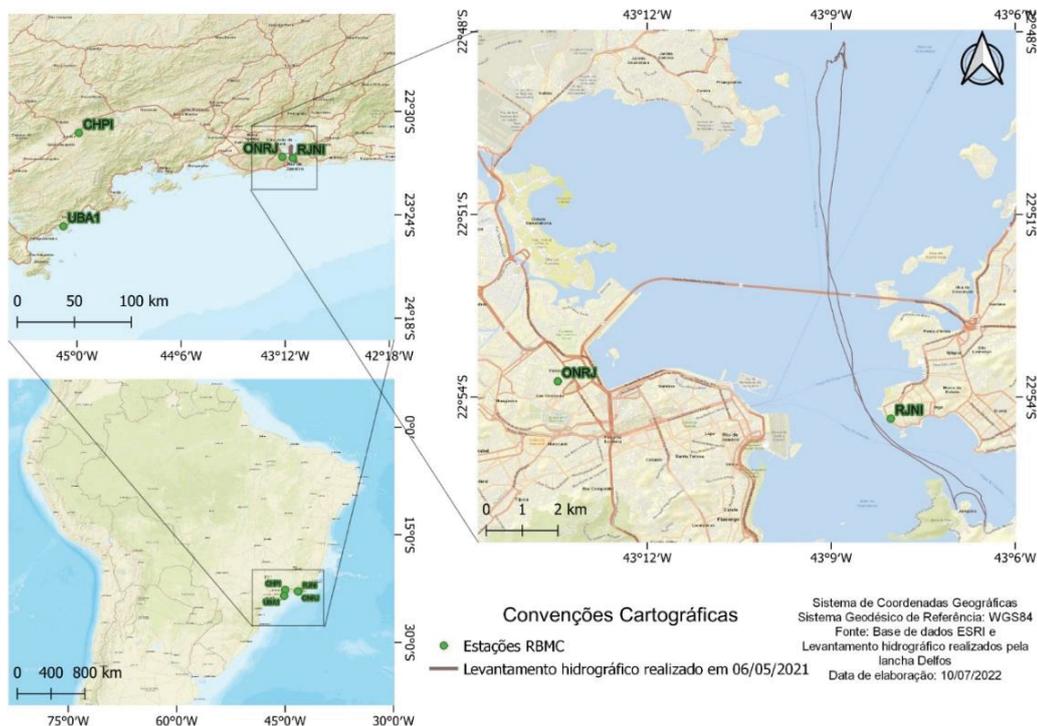
As áreas de estudo envolvem levantamentos hidrográficos realizados de maio a dezembro do ano de 2021, nas Baía de Ilha Grande e de Guanabara, no litoral do Rio Janeiro. Da FIGURA 19 à FIGURA 24, podem ser observados detalhes das trajetórias percorridas, da localização da estação maregráfica do Clube Naval Charitas (no dia 14 de maio) e das estações da RBMC envolvidas (ONRJ, RJNI, CHPI e UBA). Além disso, pode-se observar que foram percorridos diferentes tipos de trajetórias, tanto com a lancha atracada junto ao marógrafo (do dia 10 a 14 de maio) quanto se deslocando sob ou nas proximidades de uma ponte.

FIGURA 19 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 2 DE MAIO



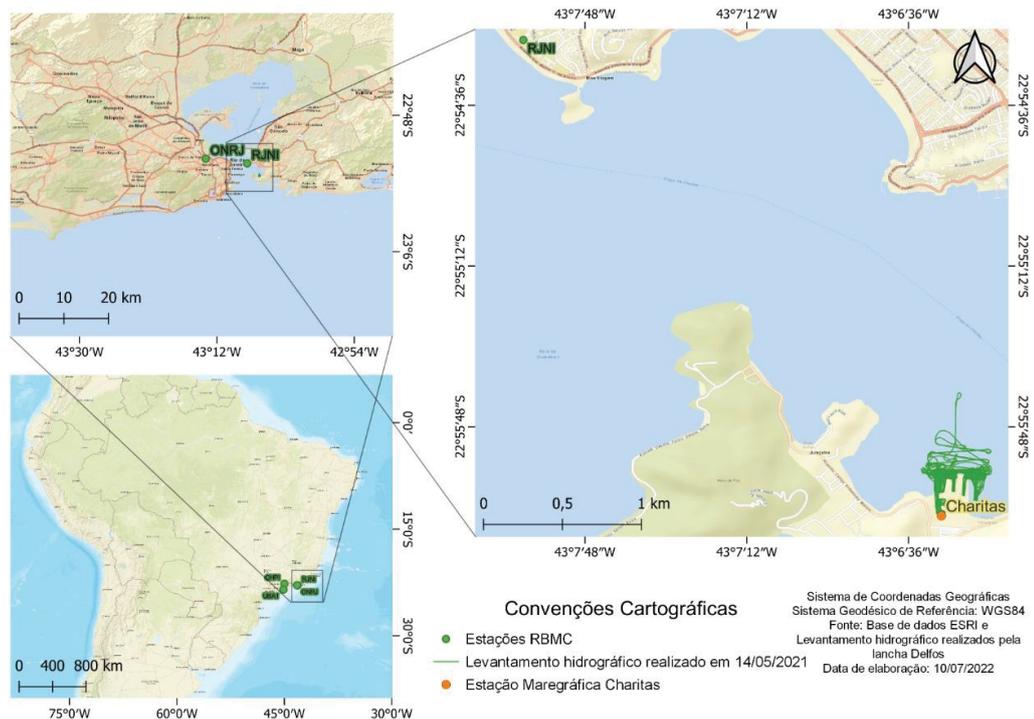
FONTE: Santana (2022).

FIGURA 20 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 6 DE MAIO



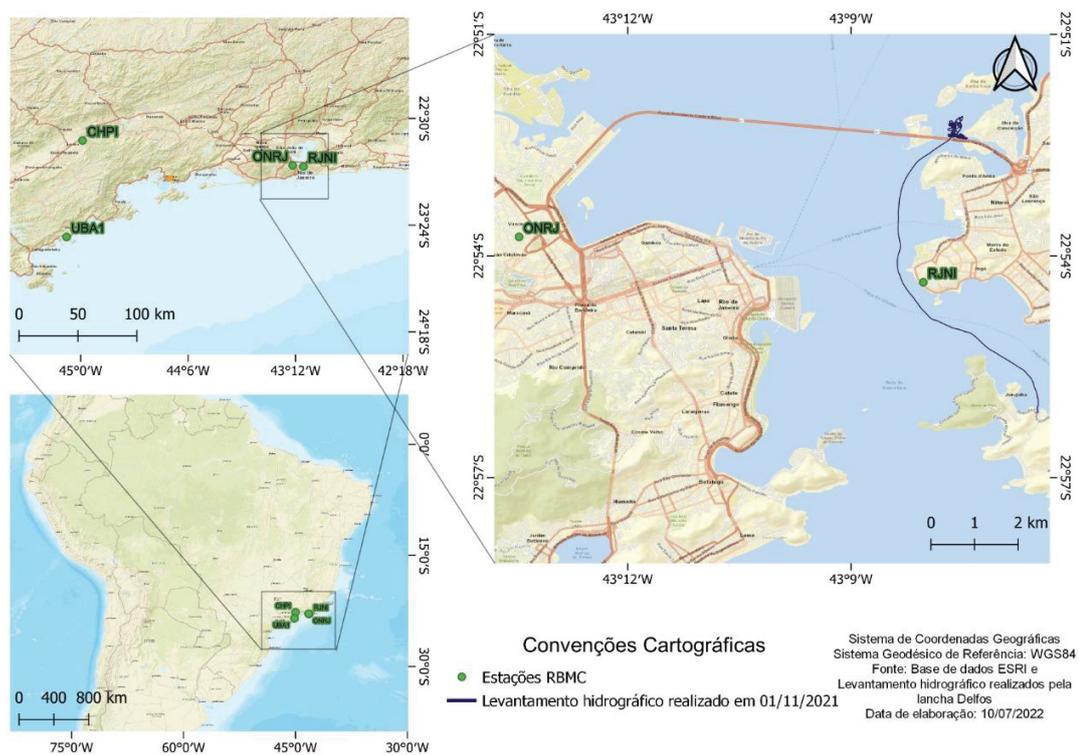
FONTE: Santana (2022).

FIGURA 21 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 14 DE MAIO



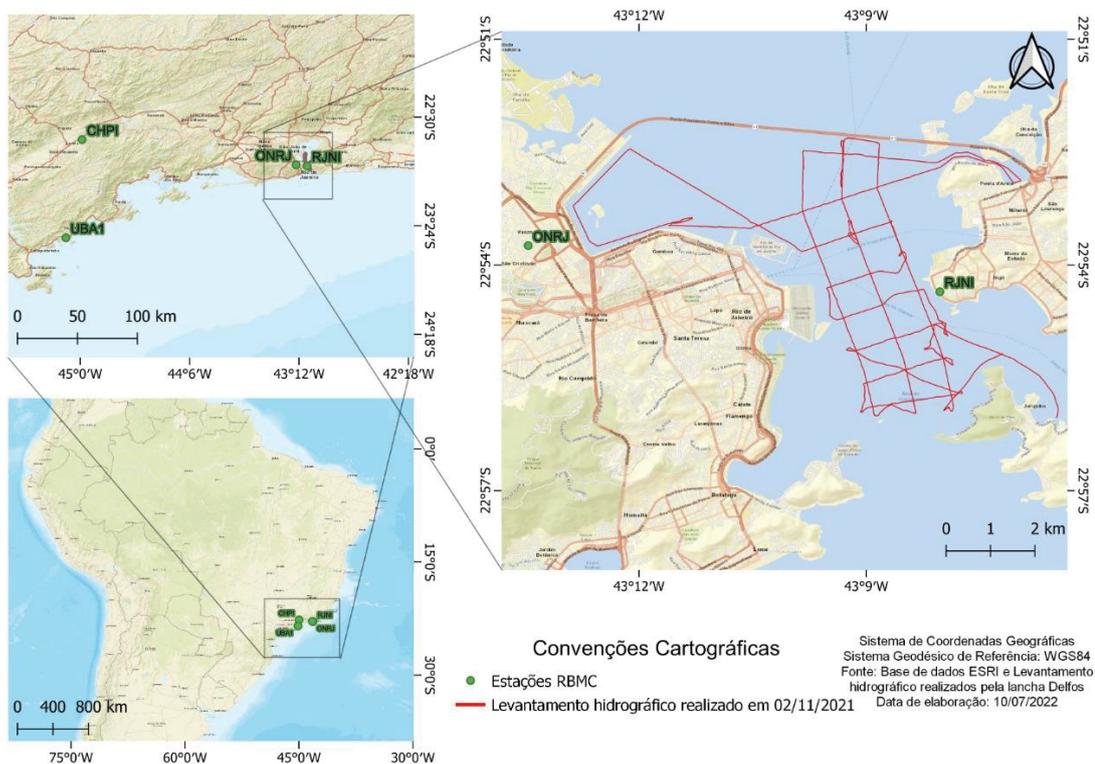
FONTE: Santana (2022).

FIGURA 22 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 1 DE NOVEMBRO



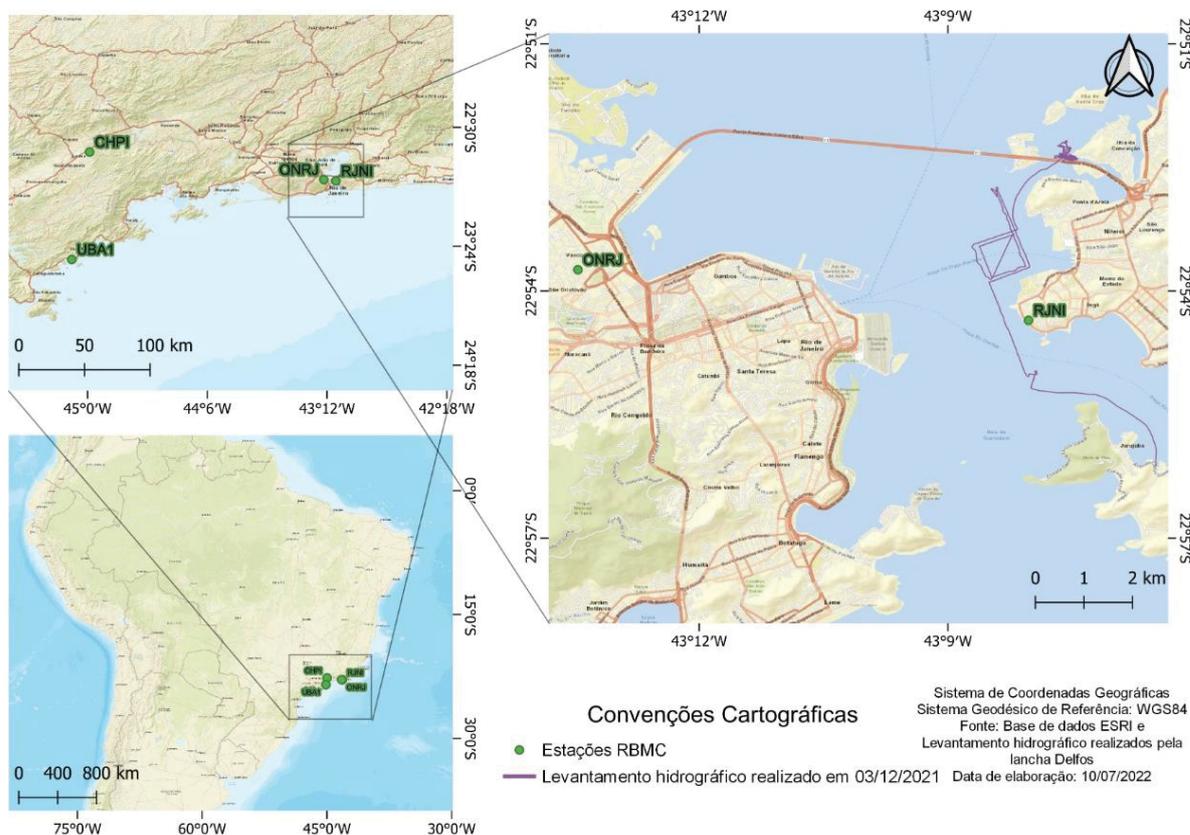
FONTE: Santana (2022).

FIGURA 23 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 2 DE NOVEMBRO



FONTE: Santana (2022).

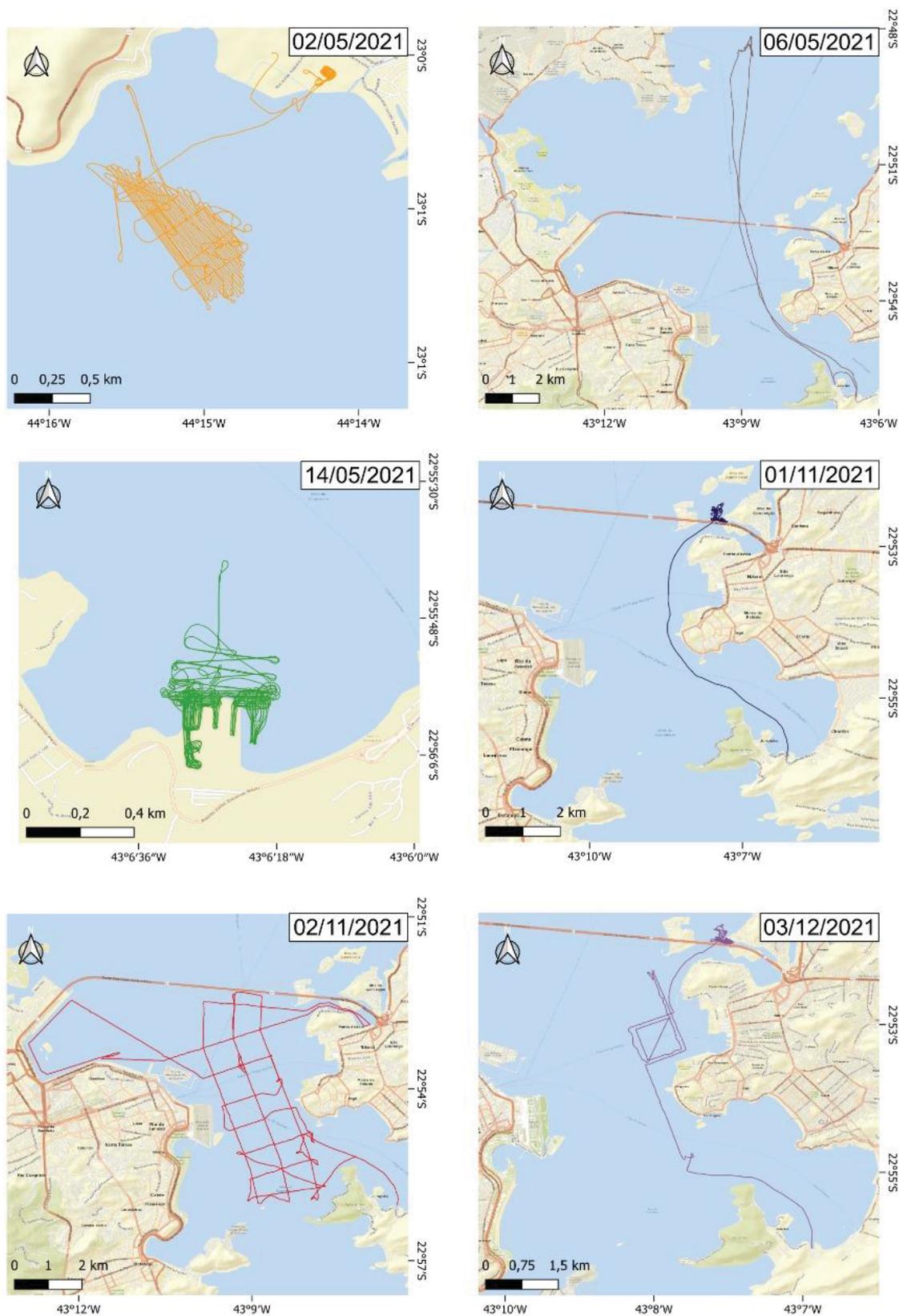
FIGURA 24 – LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO NO DIA 3 DE DEZEMBRO



FONTE: Santana (2022).

Na FIGURA 25, é apresentado um quadro comparativo de todas as trajetórias.

FIGURA 25 – LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICO REALIZADOS DO DIA 2 DE MAIO À 3 DE DEZEMBRO DE 2021



FONTE: Santana (2022).

No QUADRO 7, é apresentada a distância dos levantamentos à cada estação de referência da RBMC utilizada, a localização dos levantamentos e se a lancha se encontrava atracada junto ao marégrafo ou navegando. Os períodos foram divididos em dias, modos, ou quando havia um *gap* maior do que 10 minutos de dados. O dia 2 de maio, na Baía de Ilha Grande, foi o único em que foram utilizadas quatro estações de referência, com uma distância mínima de 83 km da mais próxima. Nos demais dias, os levantamentos foram feitos na Baía de Guanabara, utilizando somente as estações RJNI e ONRJ, de modo que todos se encontravam a menos de 15 km das linhas de sondagem.

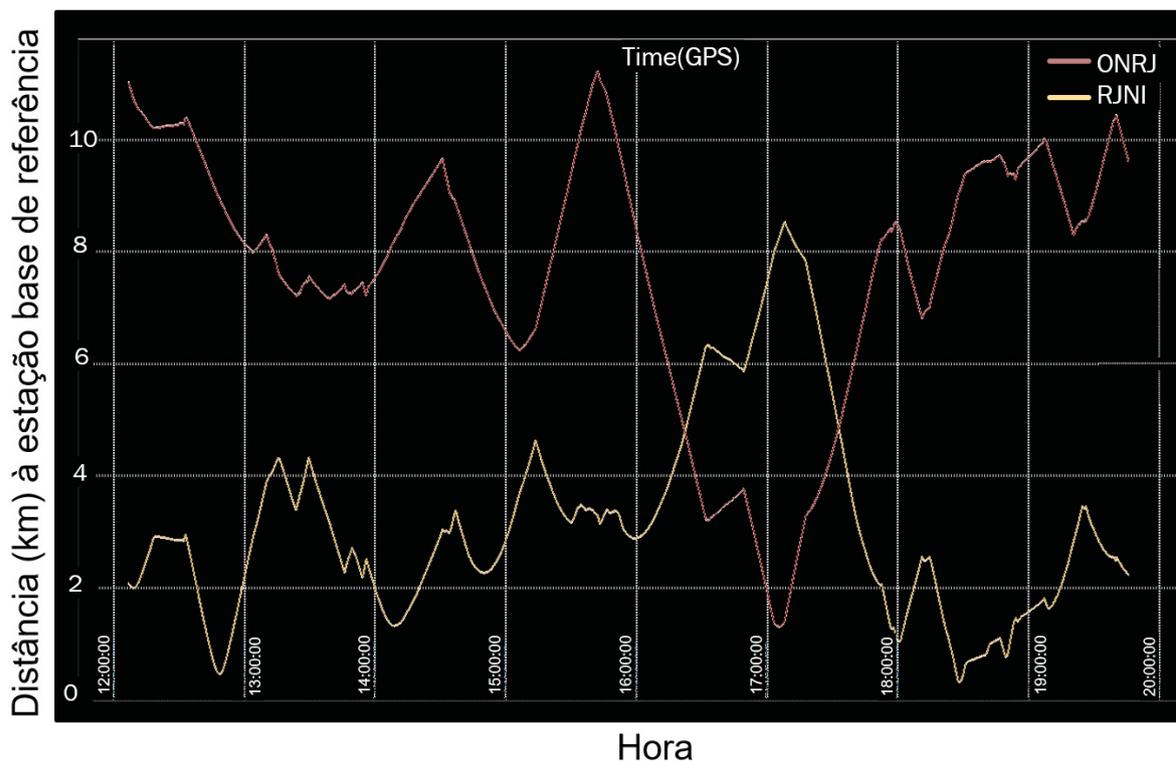
QUADRO 7 – CARACTERÍSTICAS DOS LEVANTAMENTOS

Dia	Duração (horas)	Distâncias à estação base (Km)								Localização (Baías - RJ)	Modo	
		ONRJ		RJNI		CHPI		UBA				
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min			
2/05/21	13h	107	105	116	114	84	83	105,5	103,7	Ilha Grande	Navegando	
6/05/21	6h	13	7,95	11,5	0,4					Guanabara	Navegando	
10/05/21	6h										Atracado	
11/05/21	24h											
12/05/21	11h											
13/05/21	12,5h	12,8	12,8	4,22	4,2							
13/05/21	12h					-	-	-	-			
14/05/21	11h											
14/05/21	6h											
1/11/21	5h	12,7	8,75	4,22	0,4							Navegando
2/11/21	8h	8,59	1,34	8,53	0,5							
3/12/21	5h	12,7	8,14	4,21	0,5							

FONTE: O autor (2022).

A importância de se utilizar mais de uma estação base como referência pode ser constatada no dia 2 de novembro, por exemplo, (FIGURA 26), pois em determinadas épocas a lancha se encontrava mais próxima de RJNI e em outras de ONRJ. Tais diferenças de distâncias podem representar menores incertezas na solução final pós-processadas, sobretudo em dias com intensa atividade ionosférica.

FIGURA 26 – DISTÂNCIA DA LANCHA HIDROGRÁFICA ÀS ESTAÇÕES GNSS DE REFERÊNCIA



FONTE: O autor (2022).

Quanto ao intervalo de aquisição dos dados das estações da RBMC, até o dia 14 de maio, foi de 15 s, e nos dias seguintes, de 1 s, quando o IBGE passou a disponibilizar nesse intervalo de aquisição. Em relação a esses dados, devido ao tamanho, foi feito o download por hora dos arquivos Rinex e concatenados utilizando o software GFZRNX.

### 3.2 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

Foram avaliadas 12 configurações de diferentes posicionamentos GNSS. Tal variedade e redundância permitiram a avaliação e a comparação dos dados obtidos entre os sensores, bem como o backup, caso algum viesse falhar. No QUADRO 8, pode-se observar o tipo de equipamento utilizado e a finalidade.

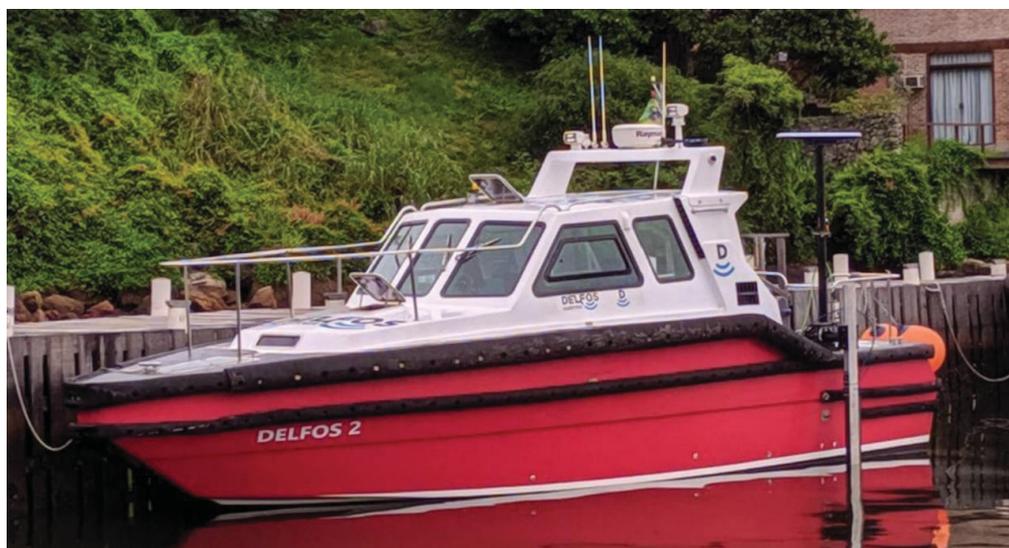
QUADRO 8 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E SUAS FINALIDADES

Equipamento	Finalidade
Receptor Stonex Multiconstelação (GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, SBAS e IRNSS)	RTK-NTRIP
Receptor 3710 DGNSS	GcGNSS (Serviço Seastar G2 da Fugro) e RTCM para o pós-processamento
Seapath-130 (duas antenas e MRU 5)	Atitude da embarcação (Roll, Pitch, Heave, Yaw)

FONTE: O autor (2022).

Para realizar a correção de atitude da embarcação, foi utilizado o sistema Seapath-130 da empresa Kongsberg, que combina receptores dupla-frequência GNSS, tecnologia inercial e algoritmos durante o processamento (KONGSBERG, 2021). Com exceção dos equipamentos das estações base, todos os demais sensores foram cedidos pela empresa Delfos Marítima, juntamente com a lancha Delfos, a qual possui uma haste lateral retrátil, onde são instalados o transdutor, o posicionador e o sensor inercial.

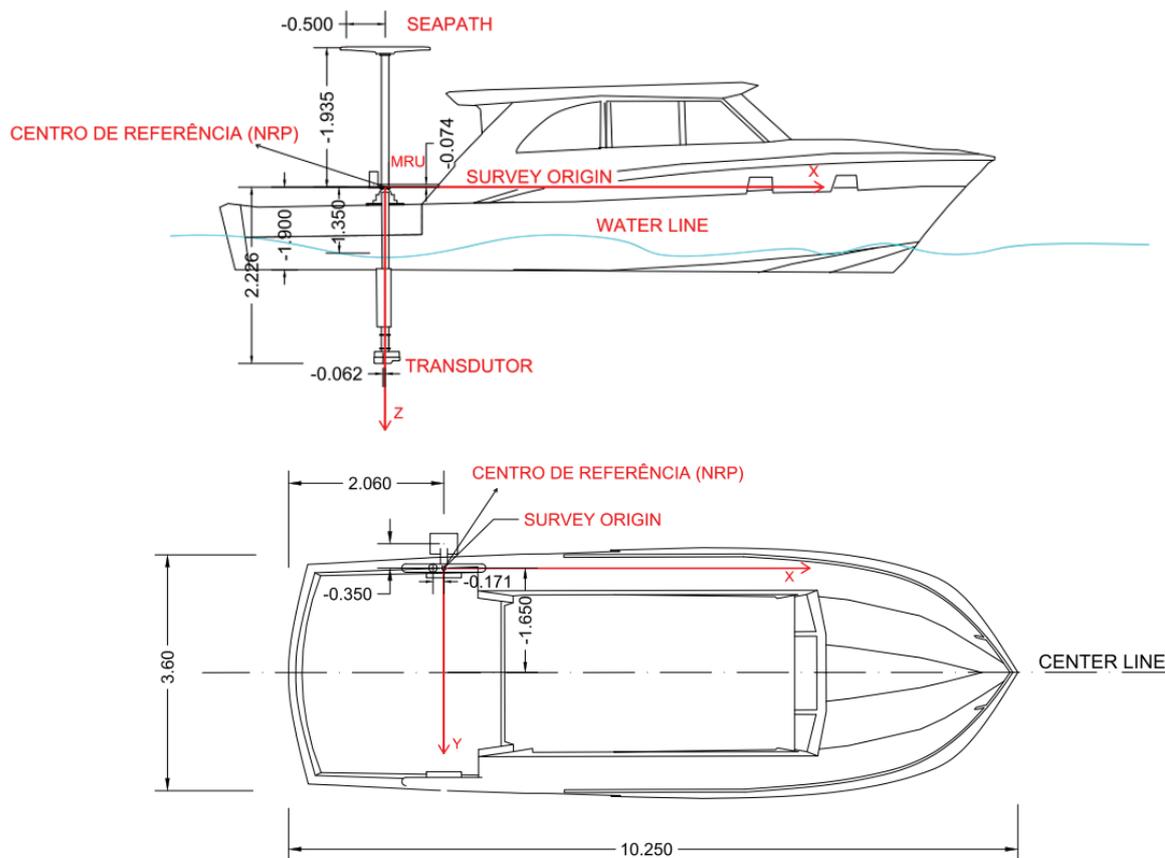
FIGURA 27 – LANCHA HIDROGRÁFICA DELFOS ATRACADA PRÓXIMO AO MARÉGRAFO DE CHARITAS



FONTE: Kongsberg (2021).

Na FIGURA 28, observa-se o diagrama de *offsets* da lancha empregada nesta pesquisa, com a localização dos sensores.

FIGURA 28 – MEDIÇÃO DE OFFSETS DA LANCHA DELFOS MARÍTIMA



FONTE: Delfos Marítima (2021).

O sistema de posicionamento principal utiliza o receptor 3710 DGNS, capaz de receber continuamente as correções globais do serviço de posicionamento DGNS da Fugro para as constelações GPS e GLONASS. O sinal de correção é decodificado, verificado e compilado em duas estações de controle centrais (*Networks Control Centers*), Houston e Perth, e, então, enviados, por meio de *uplink*, por dois satélites geoestacionários. O serviço Seastar G2 utiliza as frequências GPS L1 e L2 para compensar o atraso ionosférico. Os valores de correção de órbitas e relógio são calculados a partir de estações de referência em todo o globo, com uma acurácia maior do que as efemérides transmitidas. Assim, as correções são transmitidas em todo o mundo e a distância da estação mais próxima não afeta a performance (KONGSBERG, 2021).

Quanto à atitude da embarcação, no QUADRO 9, observa-se a acurácia dos dados coletados pelo Sistema Seapath-130, bem como da medição dos *offsets*, oriundos de fábrica:

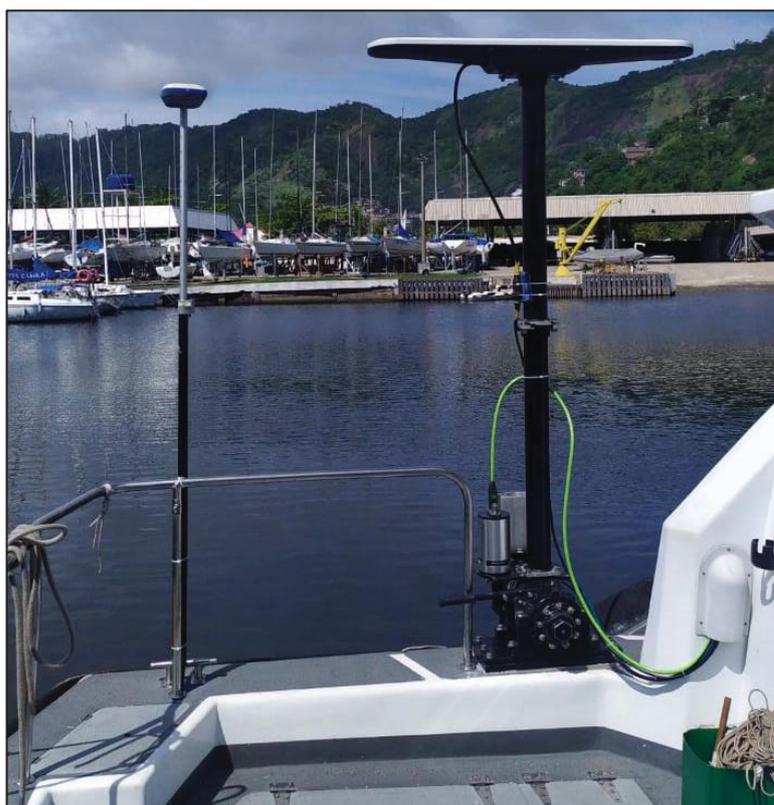
QUADRO 9 – ACURÁCIA DO SISTEMA SEAPATH

<b>Tipo de dado</b>	<b>Acurácia</b>
<i>Roll</i>	0,008°
<i>Pitch</i>	0,008°
Heave (em tempo real)	5 cm
<i>Delayed-heave</i> (sinal atrasado)	4 cm
Serviço Fugro G2	10 cm RMS
Pós-processamento INS/GNSS	2 a 5 cm
Acurácia horizontal dos offsets dos sensores	2 cm
Acurácia vertical dos offsets dos sensores	5 mm

FONTE: Kongsberg (2021).

Na FIGURA 29, à esquerda do sistema Seapath-130, observa-se o local de instalação do receptor STONEX para a solução RTK.

FIGURA 29 – LOCALIZAÇÃO DO RECEPTOR STONEX E DO SISTEMA SEAPATH-130



FONTE: O autor (2022).

### 3.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

Para o processamento de dados GNSS, foi utilizado o software TerraPos, que fornece uma solução de posicionamento cinemático, com suporte para diversos modos de processamento, como PPP, PPK, e integração entre diversos tipos de sensores com o receptor GNSS, tais como hodômetros/DMI (*Distance Measurement Instrument*) e múltiplas antenas GNSS. Utiliza ainda o Sistema de Navegação Inercial (INS – *Inertial Navigation System*) para a integração da posição, da velocidade e da atitude e, assim, realizar o processamento IAPPK e IAPPP (seção 2.6.3.2). Quanto ao processamento, o software utiliza algoritmos de modo a minimizar a necessidade de intervenção do usuário, sendo, portanto, ideal para processar grandes quantidades de dados, uma vez que, por exemplo, faz a conversão de forma automatizada dos dados de RTCM, da Kongsberg, para Rinex.

De acordo com o manual do Software, Terrapos (2021), para um processamento bem-sucedido são necessários os seguintes pré-requisitos:

- a) Receptores GNSS de alta qualidade, antenas de dupla frequência com observação do código e da fase de boa qualidade;
- b) Disponibilidade de efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, preferencialmente com um intervalo de 30 s para o processamento no modo cinemático;
- c) Uma ou mais estações de referência para a solução diferencial fixa de ambiguidade;
- d) Máscara de elevação de 10 graus.

Todos esses critérios foram atendidos. Na TABELA 4, visualiza-se a acurácia que se pode atingir no processamento utilizando as configurações padrão.

TABELA 4 – ACURÁCIA OBTIDA COM TERRAPOS

Modo	Duração(h)	RMS Hor.(m)	RMS Vert.(m)	RMS Vel.(m/s)
Estático PPP	24	0,01	0,02	
	6	0,02	0,04	
	1	0,05	0,10	
Cinemático PPP	24	0,03	0,04	0,001 – 0,05
	6	0,03	0,05	0,001 – 0,05
	1	0,15	0,20	0,001 – 0,05
Cinemático DGNSS (PPK)		0,01 – 0,02	0,02 – 0,05	0,001 – 0,05

FONTE: Terrapos (2021).

NOTA: Típicos RMS utilizando configuração fortemente acoplado. Na coluna “RMS Vel.(m/s)”, os menores números indicam a acurácia utilizando o processamento com o INS e os maiores valores representam o processamento para GNSS. Na linha “cinemático”, é assumida a resolução das ambiguidades com linhas de base de curta a média.

O manual do equipamento recomenda a adoção de uma máscara de elevação de 10 graus, porém, quando se utiliza plataformas em movimento, as observáveis dos satélites com baixo grau de elevação ainda estão sujeitas a mais ruídos e problemas de multicaminho, mesmo com adoção dessa máscara. Para tais observações, o software utiliza modelos estocásticos, levando em consideração diversas informações, tais como força do sinal, elevação, orientação da antena etc. (TERRAPOS, 2022). A edição dos dados é realizada em vários níveis, por exemplo, pré-processamento de *free-geometry*, razoabilidade por sensor, previsão dos resíduos pelo Filtro de Kalman, pós-ajuste dos resíduos, resolução das ambiguidades pelo algoritmo LAMBDA (*Least-Square Ambiguity Decorrelation Adjustment*), com uma taxa fixa de falha para máxima disponibilidade e confiabilidade (PARKER, TEUNISSEN, 1995; BROST, 2021a).

Em relação às fontes de erros da navegação inercial, no QUADRO 10, é apresentado como o software lida com tais erros.

QUADRO 10 – ERROS RELACIONADOS AO SENSOR DE NAVEGAÇÃO INERCIAL E COMO O TERRAPOS LIDA COM ELES

Efeito	Método
Desalinhamento da MRU	Estimativa utilizando medições como auxílio (exemplo: observações GNSS)
Erro de velocidade e posição da MRU	Estimativa utilizando medições como auxílio (exemplo: observações GNSS)
Erro sistemático ( <i>bias</i> ) da MRU	Estimativa de erros sistemáticos variáveis no tempo e fatores de escala. Aplicação de calibrações predeterminadas
Gravidade	Modelo de gravidade normal

FONTE: O autor (2022).

Para o processamento de dados, foram utilizados os seguintes arquivos:

QUADRO 11 – ARQUIVOS UTILIZADOS NO PROCESSAMENTO

<b>Tipo</b>	<b>Arquivos</b>
Arquivos de efemérides	CODE.EPH
Arquivos de relógio (30s)	CODE.CLK
Arquivos de Parâmetros de rotação da Terra	CODE.ERP
Arquivo de calibração de antena	IGS08.ATX
Código observável	Iono-Free (IF) Code LC
Fase da onda portadora observável	Iono-Free (IF) Phase LC
Estimação da troposfera	Hydrostatic Zenith Delay (nível do mar)
Frequência GPS	L1 / L2 / L5
Frequência GLONASS	G1 / G2 / G3

FONTE: O autor (2022).

Optou-se por utilizar os arquivos de correções de órbitas (.EPH), de relógio (.CLK) e de parâmetros de rotação da Terra (.ERP), do Centro de Análise para Determinação de Órbitas na Europa (*Center for Orbit Determination in Europe - CODE*), por serem correções para as constelações GPS e GLONASS.

Em relação às estações de referência da RBMC, como suas coordenadas são divulgadas na época 2000.4, também foi necessário atualizá-las para a época do levantamento, pois, de acordo com SIRGAS (2022b), quando se realiza o processamento de dados GNSS no modo relativo, é necessário que a posição das estações de referência esteja no mesmo sistema de referência e na mesma época das órbitas dos satélites. Para tanto, foram utilizadas as soluções semanais da Rede SIRGAS-CON, da qual estações da RBMC fazem parte e disponibilizam as coordenadas para a época dos levantamentos, em relação ao ITRF2014. Essas coordenadas são determinadas por meio de processamento relativo GNSS, realizado diariamente por diversos Centros de Processamento e combinados semanalmente pelos Centros de Combinação, gerando uma solução única e injuncionada a diversas estações pertencentes à rede IGS (IBGE, 2022). Tais dados foram acessados via FTP (*File Transfer Protocol*), no arquivo .crd, disponíveis em SIRGAS (2022b).

Em seguida, para realizar a comparação dos dados GNSS, com uma taxa de 5 Hz, com os dados de maré, com intervalo de 1 min, foi necessário reamostrar a série temporal dos dados de GNSS. Para isso, foi utilizada a função INTERP do Matlab, com o modelo “spline”, para realizar a interpolação ou extrapolação dos dados. Uma vez que todas as séries estão no mesmo intervalo de tempo, foram aplicados nos dados GNSS dois filtros: Hampel e média móvel.

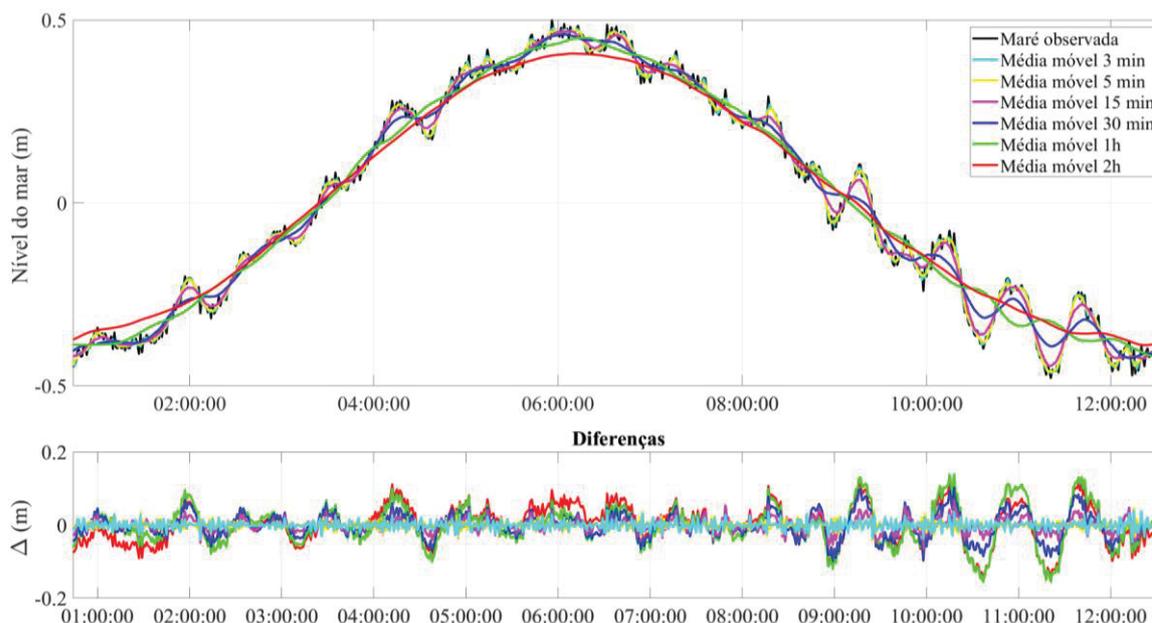
O primeiro serviu para detecção, identificação e remoção de *outliers*, por meio do cálculo da mediana de uma janela composta com “k” valores nas vizinhanças e a estimativa do desvio padrão de cada amostra em relação à mediana da janela, utilizando o desvio médio absoluto. Se uma amostra diferir da mediana por mais de “s” desvios padrões, ela é substituída pela mediana (HAMPEL, 1978).

O segundo filtro, de média móvel, foi utilizado para suavização dos dados, utilizando uma janela de comprimento “w”. Os valores de “k”, “s” e “w” foram diferentes para cada método e época de coleta dos dados, de modo a se obter o menor RMSE entre o método a ser analisado e a variação do nível do mar medido na estação maregráfica.

Quanto aos dados coletados na estação maregráfica do Clube Naval Charitas, foi utilizado um marégrafo de pressão da marca Rugged Troll 100, com taxa de aquisição de 1 minuto, do dia 10 a 14 de maio, com as medidas do marégrafo calibradas de acordo com a régua da estação maregráfica descrita na ficha F-41 50180 do Clube (CHM, 2022).

Segundo FIG (2014), nos dados de medição de nível do mar, deve-se passar um filtro passa-baixa, a fim de se extrair somente os dados relacionados à maré. Ao mesmo tempo, OHI (2011, p. 281) complementa afirmando que “[...] os intervalos de amostragem devem ser pequenos o suficiente para medir qualquer ação de seiches”, os quais são variações do nível do mar causados pelas oscilações das ondas. Desse modo, o nível do mar medido na estação maregráfica pode ser mais representativo do nível do mar encontrado pela lancha, na área de sondagem. Para esse fim, foram realizados testes em uma das séries temporais analisadas, utilizando filtros de média móvel com janelas variando de 3 minutos a 2 horas. Por meio de uma análise visual (FIGURA 30), percebe-se que o filtro de 2 horas atenua a amplitude do sinal e os filtros de 30 minutos a 2 horas distorcem sua forma, reduzindo a amplitude dos seiches (a partir das 10 horas). Observa-se ainda que os filtros mais fidedignos à realidade foram os de 3 minutos a 15 minutos. Portanto, para fins de padronização, foi utilizado o filtro de 5 minutos para todos os dados de nível do mar coletados na estação maregráfica.

FIGURA 30 – COMPARAÇÃO ENTRE A MARÉ OBSERVADA, A UMA TAXA DE 1 MINUTO, COM DIFERENTES FILTROS DE MÉDIA MÓVEL, VARIANDO DE 3 MINUTOS A 2 HORAS



FONTE: O autor (2022).

Além disso, também foi necessário realizar o nivelamento geométrico na estação maregráfica do Clube Naval Charitas, com objetivo de verificar se houve uma movimentação das referências de nível maior do que o tolerado pela NORMAM-25, cujo limite é de 2 mm entre referências de nível e de 5 mm entre referências de nível e régua. Caso tais limites fossem superados, ter-se-ia que observar a maré durante 32 dias para recalcular o NR e o NMM.

### 3.4 CÁLCULO DAS INCERTEZAS HORIZONTAIS E VERTICAIS DO SEP E DOS MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

A metodologia apresentada nesta pesquisa visa dar uma contribuição para a determinação da incerteza do SEP, para tanto, ela foi dividida em duas abordagens. Na primeira, foram coletados os dados com a lancha atracada junto ao marégrafo do Clube Naval Charitas, em um local abrigado de ondas, e se fez a comparação da variação das altitudes elipsoidais com a variação do nível do mar na estação maregráfica, nas quais foram aplicados os filtros descritos na seção anterior e, em seguida, foram subtraídos os valores médios das respectivas curvas, visando uma eliminação de erros sistemáticos.

Posteriormente, na segunda abordagem, foram analisados tanto os períodos com a lancha atracada quanto os períodos com a lancha em movimento, levando em consideração todas as suas trajetórias, como guinadas, alterações de velocidades e passagem sob pontes. Nesta etapa, como não se tinha uma estação maregráfica que representasse a variação do nível do mar de toda a trajetória, foi utilizada a metodologia descrita por El-Diasty (2020), na qual o método mais preciso, IA-PPK (TC), é adotado como referência para o cálculo da incerteza, em termos de RMS, por meio das equações 11 e 12. Para o cálculo do intervalo de confiança de 95%, foi utilizada uma função de distribuição acumulada, com um modelo empírico, o qual permite o cálculo do I.C independente dos dados possuírem, ou não, uma distribuição normal.

$$RMS^{2D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((N_{Ref} - N_{Metodo_x})_i^2 + (E_{Ref} - E_{Metodo_x})_i^2)}{n}} \quad (11)$$

$$RMS_U^{1D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{Ref} - U_{Metodo_x})_i^2}{n}} \quad (12)$$

Onde:

$N_{Ref}$ : a coordenada norte da solução de referência, e  $N_{Metodo_x}$  a coordenada Norte do método a ser analisado;

$E_{Ref}$ : a coordenada leste da solução de referência, e  $E_{Metodo_x}$  a coordenada Leste do método a ser analisado;

$U_{Ref}$ : a coordenada vertical da solução de referência, e  $U_{Metodo_x}$  a coordenada vertical do método a ser analisado;

$RMS^{2D}$ : a incerteza horizontal 2D total do erro de posição Norte e Leste;

$RMS_U^{1D}$ : a incerteza vertical 1D total do erro de posição Vertical.

Após o cálculo do RMS de cada método em relação ao mais preciso, o RMS total foi obtido conforme descrito na Equação 13, levando em consideração o RMS teórico do IAPPK (TC), calculado pelas matrizes de variância e covariância obtidas no pós-processamento:

$$RMS_{Metodo_x} = \sqrt{RMS_{Metodo_x - IAPPK(TC)}^2 + RMS_{IAPPK(TC)}^2} \quad (13)$$

Onde:

$RMS_{Método_x - IAPPK(TC)}^2$ : RMS (2D ou 1D) do método a ser analisado em relação ao IPPK (TC);

$RMS_{IAPPK(TC)}^2$ : RMS teórico do IAPPK (TC) (2D ou 1D), oriundo da matriz de variância e covariância obtida no pós-processamento;

$RMS_{Método_x}$ : RMS (2D ou 1D) total do método a ser analisado;

De acordo com Brost (2021b), todas as estimativas de precisão realizadas pelo software são baseadas em estatísticas formais, usando uma modelagem mais realista possível. O modo fortemente acoplado é o único que torna possível modelar as inúmeras fontes de erro “por satélite”, em vez de ser apenas em relação à solução geral. Assim, as estatísticas deste modo tendem a ser, em geral, mais realistas, em comparação a outras. Em alguns casos, o GNSS estará apenas “indisponível” (por exemplo, poucos satélites) e uma solução inercial ainda estará disponível, mas a precisão pode ser ruim.

Para avaliar a qualidade dessas incertezas teóricas, seus valores foram comparados com as incertezas obtidas na primeira etapa, ou seja, com a lancha atracada, pois o sensor da estação maregráfica possui uma incerteza menor do que GNSS para medição do nível do mar.

Também foi feita a comparação da solução final da segunda abordagem, entre dias quando a lancha esteve atracada ou navegando, a fim de verificar se as trajetórias da lancha influenciariam na incerteza do GNSS. A possível confirmação dessa hipótese iria de encontro à crítica que Rice e Riley (2011) fazem em relação ao somatório das incertezas individuais de cada componente necessário (Equação 10) para o cálculo da incerteza do SEP. Segundo os autores, tais incertezas individuais (do GNSS, do modelo de Maré, da altura da linha d’água), em geral, são estimadas de forma independente da época de aquisição dos dados e da posição da embarcação, o que faz delas, geralmente, quase constantes, podendo não descrever com precisão a verdadeira variação da incerteza no cálculo do SEP ao longo da trajetória da embarcação.

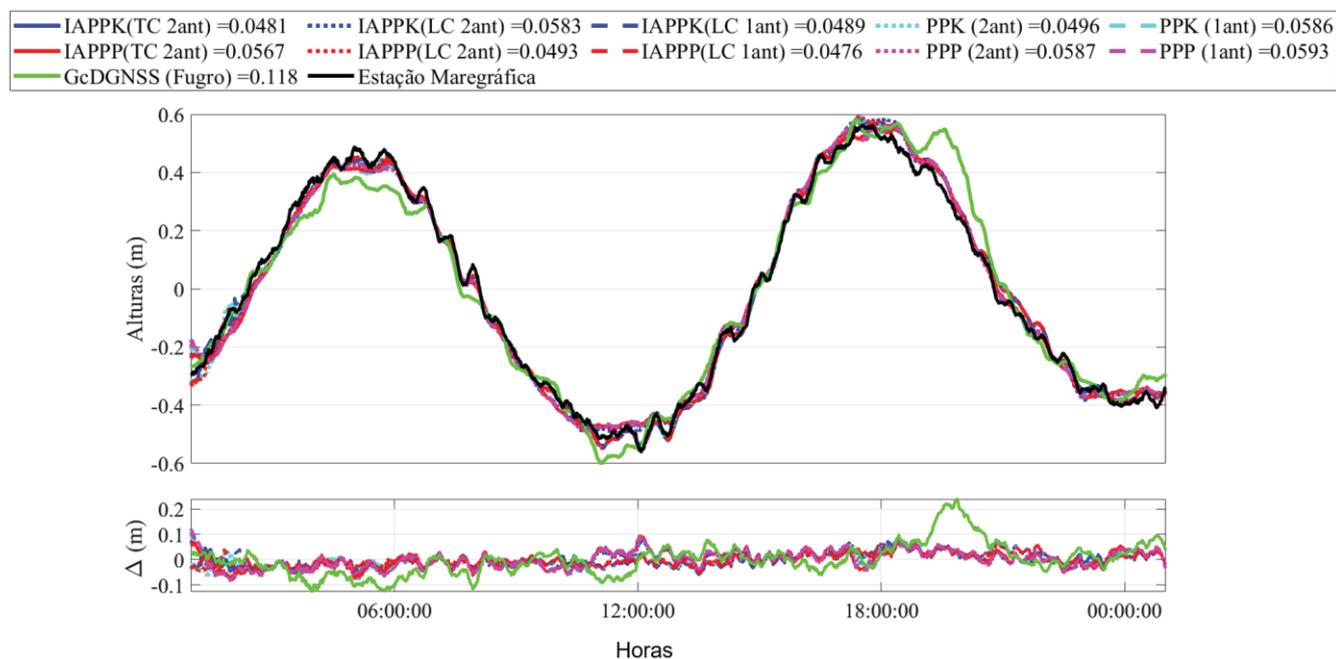
## 4 AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DOS MÉTODOS GEODÉSICOS EM ESTUDO

Duas abordagens serão apresentadas neste capítulo. A primeira, realiza a comparação do posicionamento vertical da lancha atracada, com a variação do nível do mar medido na estação maregráfica, cujo resultado será utilizado para avaliar as incertezas teóricas dos métodos (seção 4.1). A segunda, por sua vez, realiza a comparação do posicionamento das três componentes (E, N, U) da lancha, tanto atracada quanto em movimento, com o método mais preciso IAPPK (TC) (seção 4.2). Uma comparação quantitativa entre as abordagens é apresentada na seção 4.3 e, por fim, destaca-se que uma análise estatística das duas abordagens é apresentada nos Apêndices 1 e 2.

### 4.1 PRIMEIRA ABORDAGEM: COMPARAÇÃO COM A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA

Na FIGURA 31, é apresentada a comparação entre todas as soluções em um dos seis períodos do levantamento. Observa-se que as menores incertezas foram obtidas pelos métodos baseados no PPK, diferindo na casa do milímetro, seguida dos métodos PPP e, posteriormente, do GcDGNSS. Nas legendas da parte inferior, são apresentadas as incertezas em termos de RMSE (m) em relação à estação maregráfica, com um intervalo de confiança de 95%. A fim de facilitar o entendimento dos gráficos desta seção, as linhas em tons de azul representam os processamentos baseados no PPK, as em tons de vermelho com base no PPP e as em tons de verde com base no GcDGNSS e no RTK.

FIGURA 31 – COMPARAÇÃO ENTRE AS VARIAÇÕES DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIS DO GNSS E A ALTURA DO NÍVEL DO MAR MEDIDO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA NO DIA 11 DE MAIO DE 2021, QUANTIFICADOS EM TERMOS DE RMSE (M) A UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%

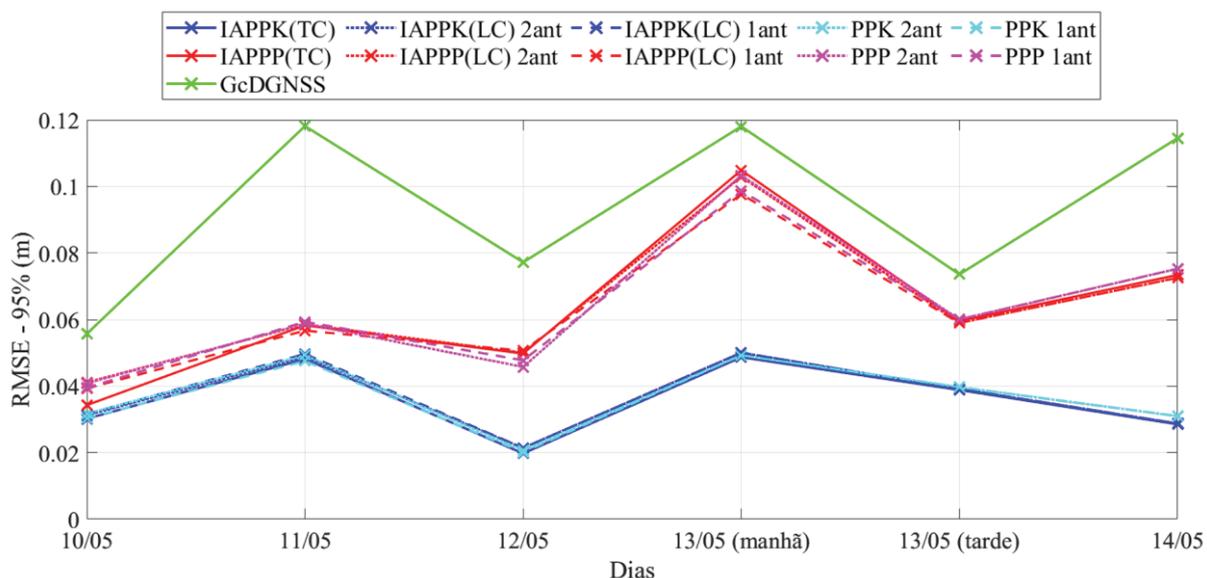


FONTE: O autor (2022).

NOTA: Todas as curvas tiveram as respectivas médias subtraídas para fins de comparação.

A seguir, na FIGURA 32, as incertezas para cada dia são plotadas como pontos em um gráfico, incluindo todo o período em que a lancha esteve atracada. Percebe-se uma nítida diferença entre os métodos baseados no PPP em relação ao PPK e que a variação do número de antenas e do modo de acoplamento não influenciaram significativamente nos resultados com a aplicação dos filtros. Em relação ao GcDGNSS, em todos os dias foram encontradas incertezas maiores do que a dos métodos baseados no PPP. Observa-se ainda que todos os métodos se enquadraram na ordem de levantamento 1A (CHS, 2008), ou seja, com incertezas abaixo de 10 cm, com exceção do GcDGNSS, nos dias 11, 13 (parte da manhã) e 14 de maio, sendo que somente os métodos baseados no PPK cumpriram os requisitos da Ordem Especial, ou exclusiva, em todos os dias desta análise, tendo uma incerteza menor do que 5 cm.

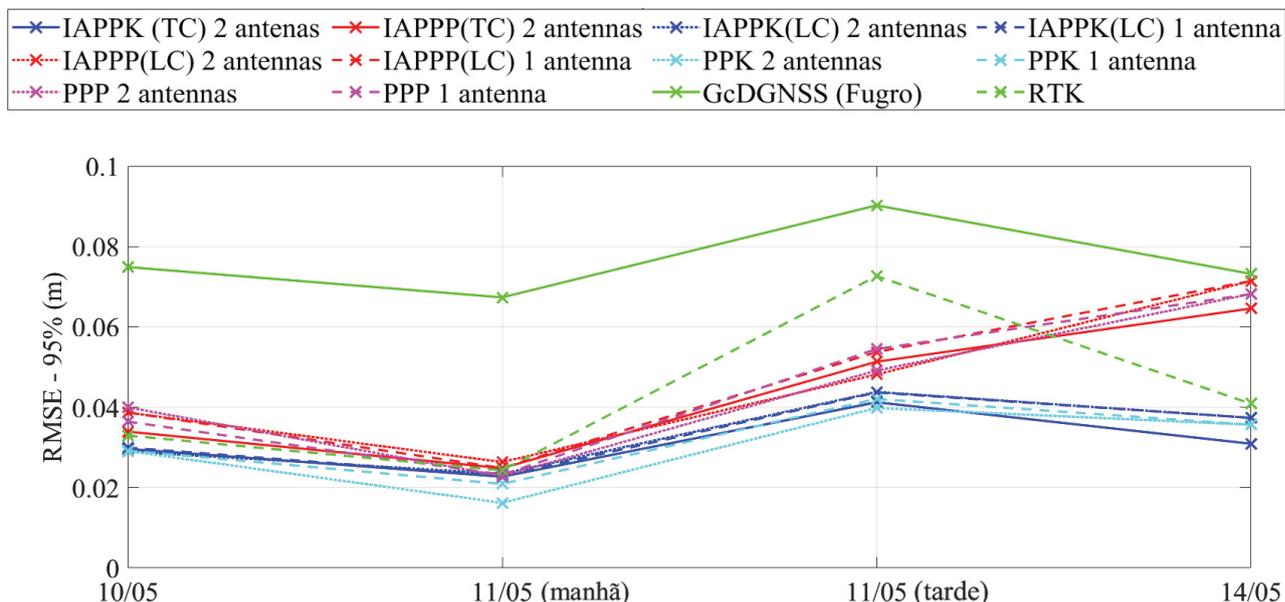
FIGURA 32 – EVOLUÇÃO DAS INCERTEZAS VERTICAIS TEÓRICAS INCLUINDO O GCDGNSS



FONTE: O autor (2022).

Ao incluir o RTK (FIGURA 33) nos períodos em que estava disponível, percebe-se que nos dias 10, 11 (período da manhã) e 14 de maio foi obtida uma incerteza menor do que os métodos PPP e, no dia 11 de maio (período da tarde), uma incerteza maior, o que corrobora com a sugestão de Mills e Dodd (2014), os quais afirmam que, nos levantamentos utilizando a maré-GNSS, é ideal coletar os dados tanto em tempo real quanto em um formato que seja possível o pós-processamento, assim, caso um método venha a falhar, o outro pode servir como backup.

FIGURA 33 – EVOLUÇÃO DAS INCERTEZAS VERTICAIS, INCLUINDO O RTK



FONTE: O autor (2022).

#### 4.2 SEGUNDA ABORDAGEM: COMPARAÇÃO COM IAPPK (TC)

Nesta abordagem, inicialmente, são apresentadas as incertezas teóricas, proveniente das matrizes de variância e covariância fornecidas no processamento pelo software Terrapos. Em seguida, elas são comparadas com as incertezas obtidas na primeira abordagem. Posteriormente, as diferenças de todos os métodos em relação ao IAPPK (TC) são calculadas para as três componentes (N, E, U). Mais adiante, essas incertezas são combinadas com a incerteza teórica do IAPPK (TC) para o cálculo das IVT (Incerteza Vertical Total) e das IHT (Incerteza Horizontal Total) de cada método (Equação 14). Por fim, é apresentada a evolução dessas incertezas para cada um dos dias de levantamentos.

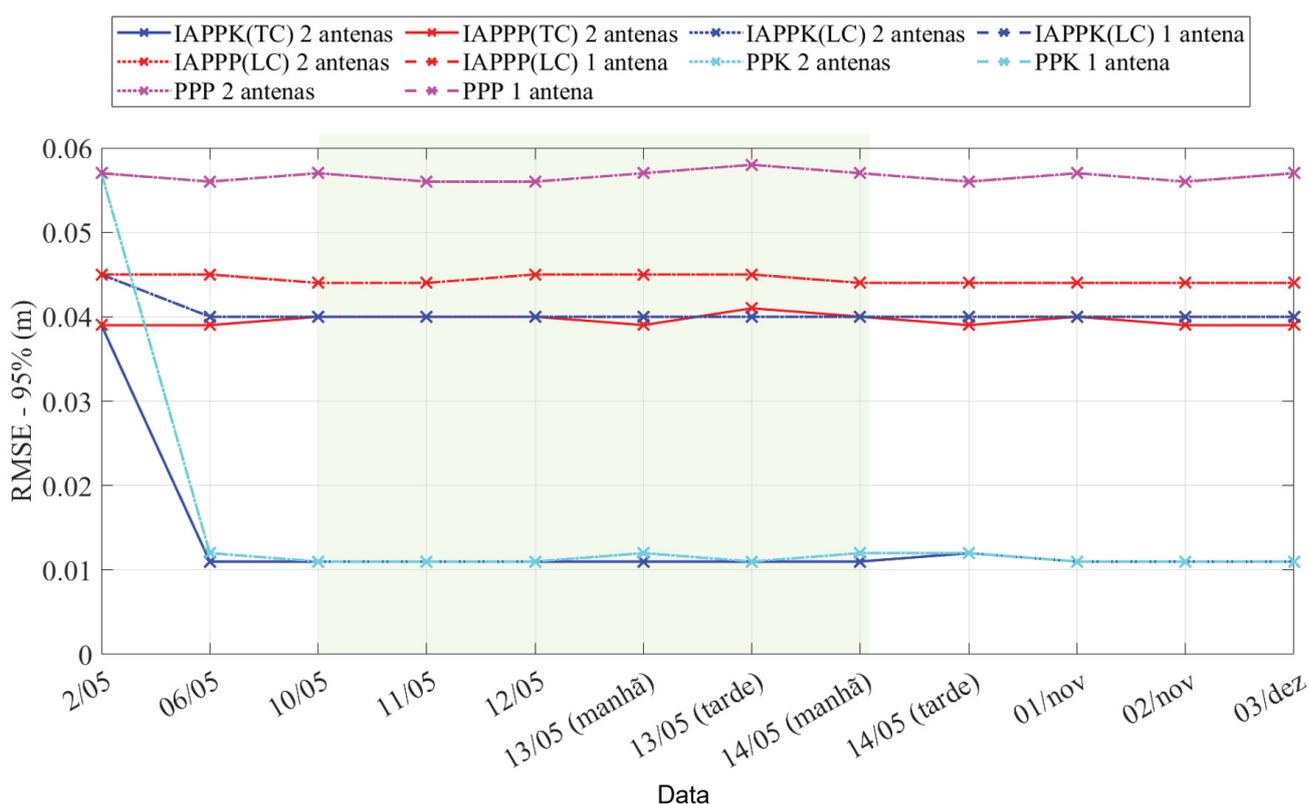
Além disso, a influência da época e do tipo de trajetória para o cálculo da IVT e da IHT também será avaliada por meio da comparação das diferenças para as três componentes (N, E, U) entre o IAPPK (TC) e os métodos baseados no PPP para todos os dias de levantamento.

##### 4.2.1 Avaliação das incertezas verticais teóricas dos métodos GNSS

Na FIGURA 34, são apresentadas as incertezas horizontais teóricas de todos os métodos. Com exceção do dia 2 de maio, a variação das incertezas foi menor do que 1 cm em todos os dias, sendo, portanto, independente da época (em termos diários) e do local da aquisição dos dados, conforme indicado por Rice e Riley (2011).

Verifica-se que as maiores incertezas são referentes aos métodos PPP, depois aos métodos IAPPP (LC) e IAPPP (TC) e, por último, aos IAPPK (LC), PPK e IAPPK (TC). Nota-se ainda que o dia 2 de maio foi o único em que a distância mínima entre as estações de referência da RBMC foi maior do que 80 km, sendo, portanto, o motivo pelo qual as incertezas do IAPPP e do IAPPK, fortemente acoplado, foram praticamente iguais.

FIGURA 34 – INCERTEZAS HORIZONTAIS TEÓRICAS



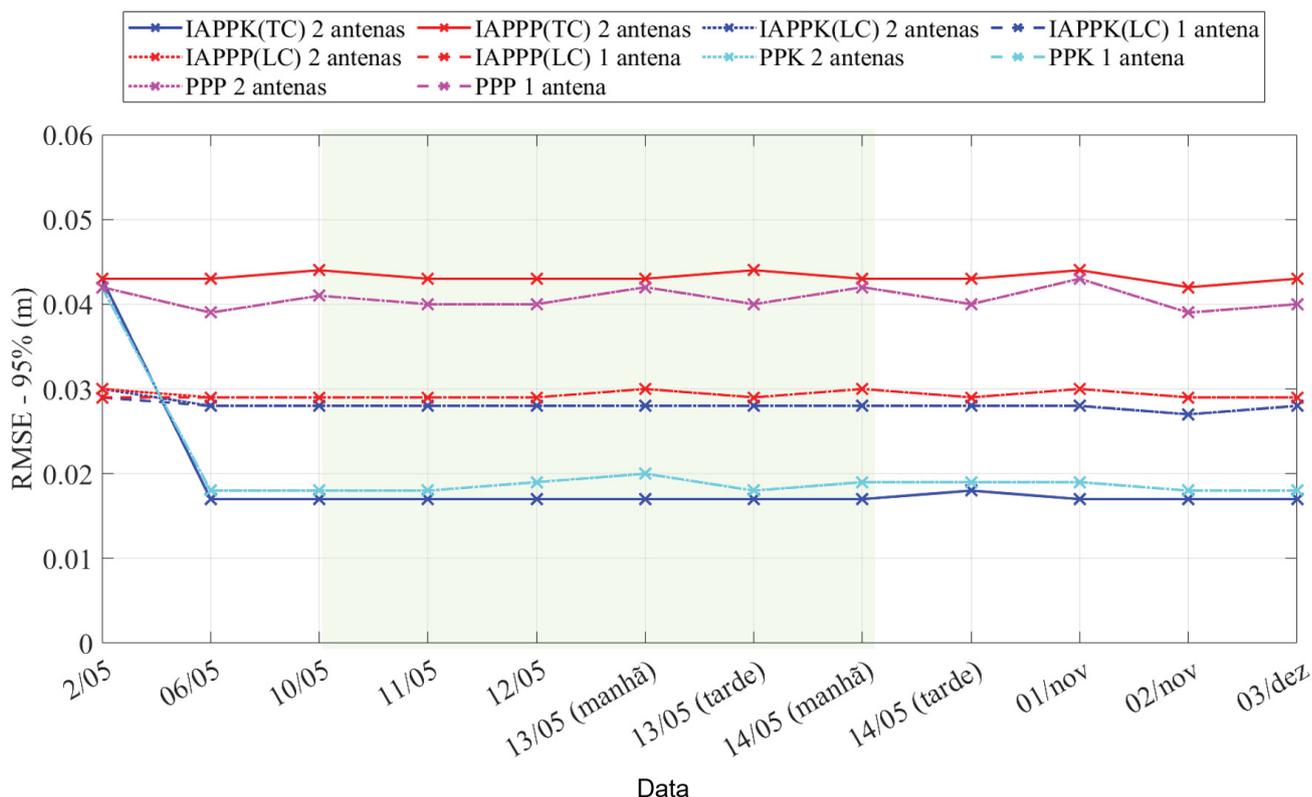
FONTE: O autor (2022).

NOTA: O retângulo verde indicado na figura representa o período em que a lancha permaneceu atracada.

De forma análoga, na FIGURA 35, é apresentada a incerteza vertical teórica de todos os métodos. Percebe-se que o IAPPP (TC) é o menos preciso, seguido do PPP, do IAPPP (LC) e do IAPPK (LC), e os métodos mais precisos são o PPK e o

IAPPK (TC). Uma possível justificativa para que o IAPPP (TC) tivesse uma maior incerteza pode ser o fato de que os modelos matemáticos adotados nos demais métodos correspondam de modo menos realístico às incertezas dos modelos no modo fortemente acoplado.

FIGURA 35 – INCERTEZAS VERTICAIS TEÓRICAS

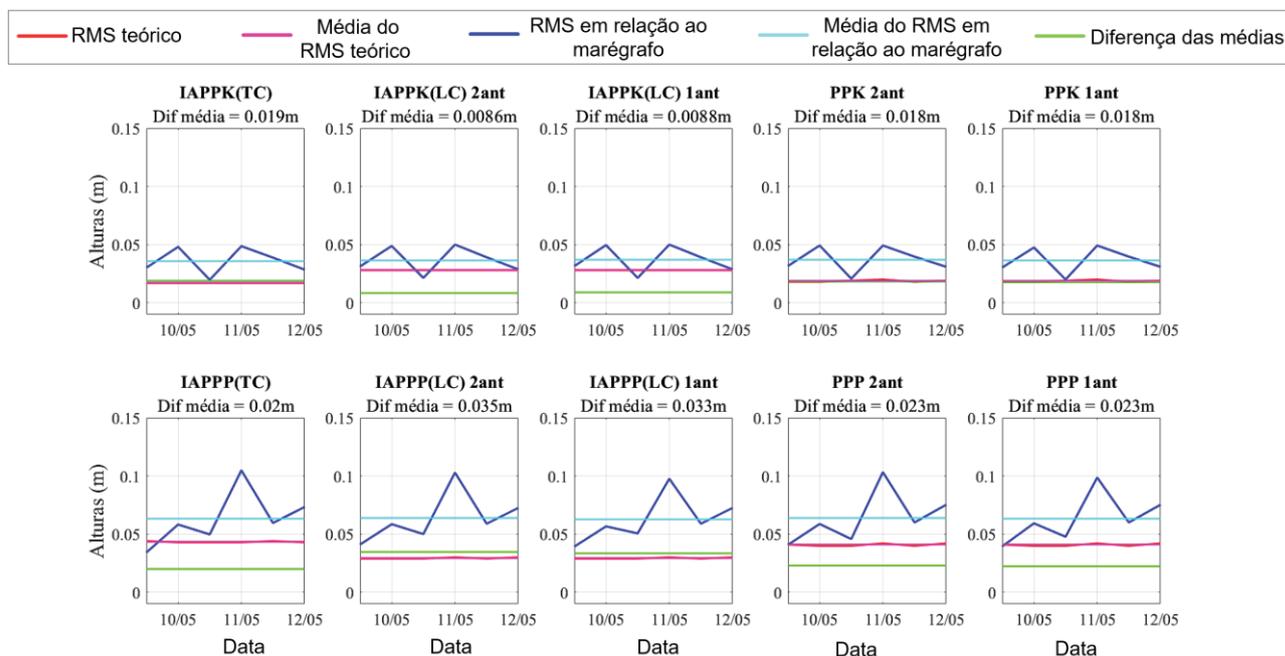


FONTE: O autor (2022).

Tanto para as incertezas horizontais quanto verticais, observa-se que o uso de uma ou de duas antenas foi indiferente para o resultado. No dia 2 de maio, as soluções IAPPK e IAPPP (LC) apresentaram uma solução melhor do que o PPP e o PPK, sendo, portanto, um método intermediário entre as soluções fortemente acopladas e as que utilizam somente o GNSS para locais com longas linhas de base.

Em seguida, foi feita a comparação (FIGURA 36) dessas incertezas verticais teóricas (FIGURA 35) com a incerteza obtida na primeira abordagem (FIGURA 32), ou seja, em relação à estação maregráfica. Dessa forma, constata-se que na maioria dos métodos as diferenças médias variaram de 1,8 cm a 3,5 cm, o que indica uma subestimação das incertezas teóricas em relação à estação maregráfica.

FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DAS INCERTEZAS TEÓRICAS COM AS INCERTEZAS OBTIDAS DA COMPARAÇÃO COM A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA



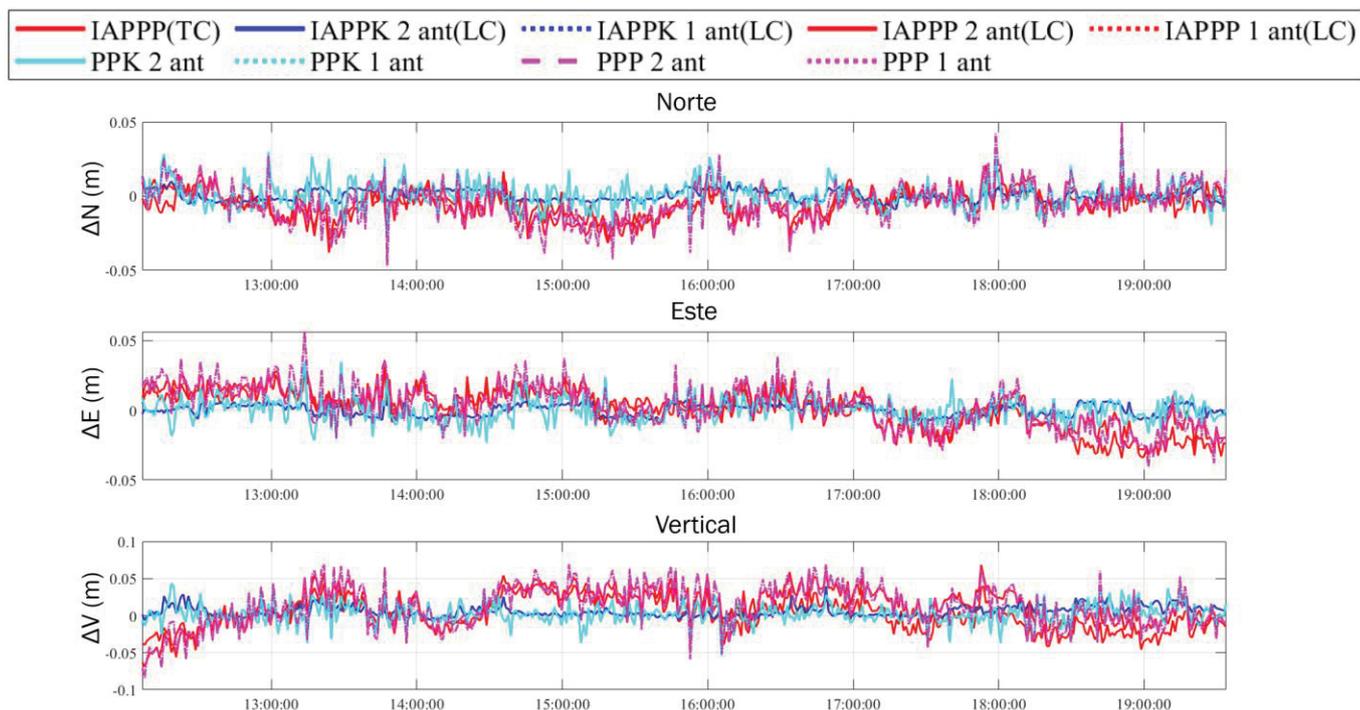
FONTE: O autor (2022).

NOTA: A linha vermelha representa as incertezas teóricas do GNSS. A linha rosa, a média das incertezas teóricas do GNSS. A linha azul, as incertezas da comparação do GNSS com a estação maregráfica. A linha preta, a média das incertezas do GNSS com a estação maregráfica. E a linha verde, a diferença entre a médias das incertezas teóricas e a média das incertezas do GNSS, obtidas em relação à estação maregráfica para cada dia.

#### 4.2.2 Incertezas horizontais e verticais totais dos métodos GNSS

Uma vez avaliadas as incertezas teóricas obtidas no processamento, a incerteza de cada método foi calculada para cada componente (N, E, U), em relação ao método mais preciso (IAPPK (TC)), a uma taxa de 1 Hz. Na FIGURA 37, é apresentado um exemplo dessa comparação, com os dados exportados na projeção UTM, fuso 23S. Percebe-se uma evidente diferença de incertezas entre os métodos PPK, tons em azul, e PPP, tons em vermelho.

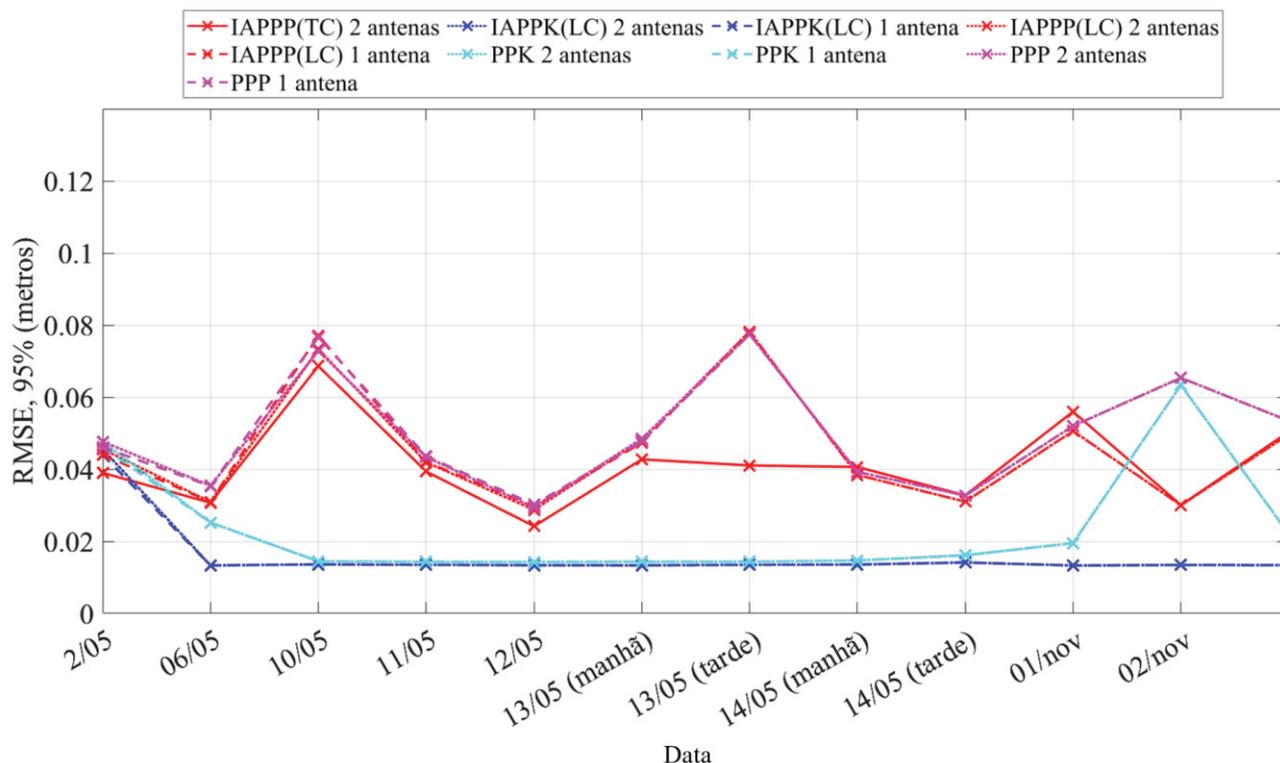
FIGURA 37 – DIFERENÇAS DAS COMPONENTES NORTE ( $\Delta N$ ), ESTE ( $\Delta E$ ) E VERTICAL ( $\Delta V$ ) EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC) NO DIA 2/11/2021



FONTE: O autor (2022).

Combinando tais incertezas com as teóricas do IAPPK (TC), foi possível calcular a IHT e a IVT de todos os métodos. Em relação à IHT, verifica-se que todas se encontram abaixo de 10 cm (FIGURA 38), fazendo com que seja possível atingir a Ordem Exclusiva, pois sua tolerância de IHT é de 1 m (OHI, 2020a).

FIGURA 38 – INCERTEZA HORIZONTAL TOTAL (TOTAL HORIZONTAL UNCERTAINTY - THU) DOS MÉTODOS GNSS



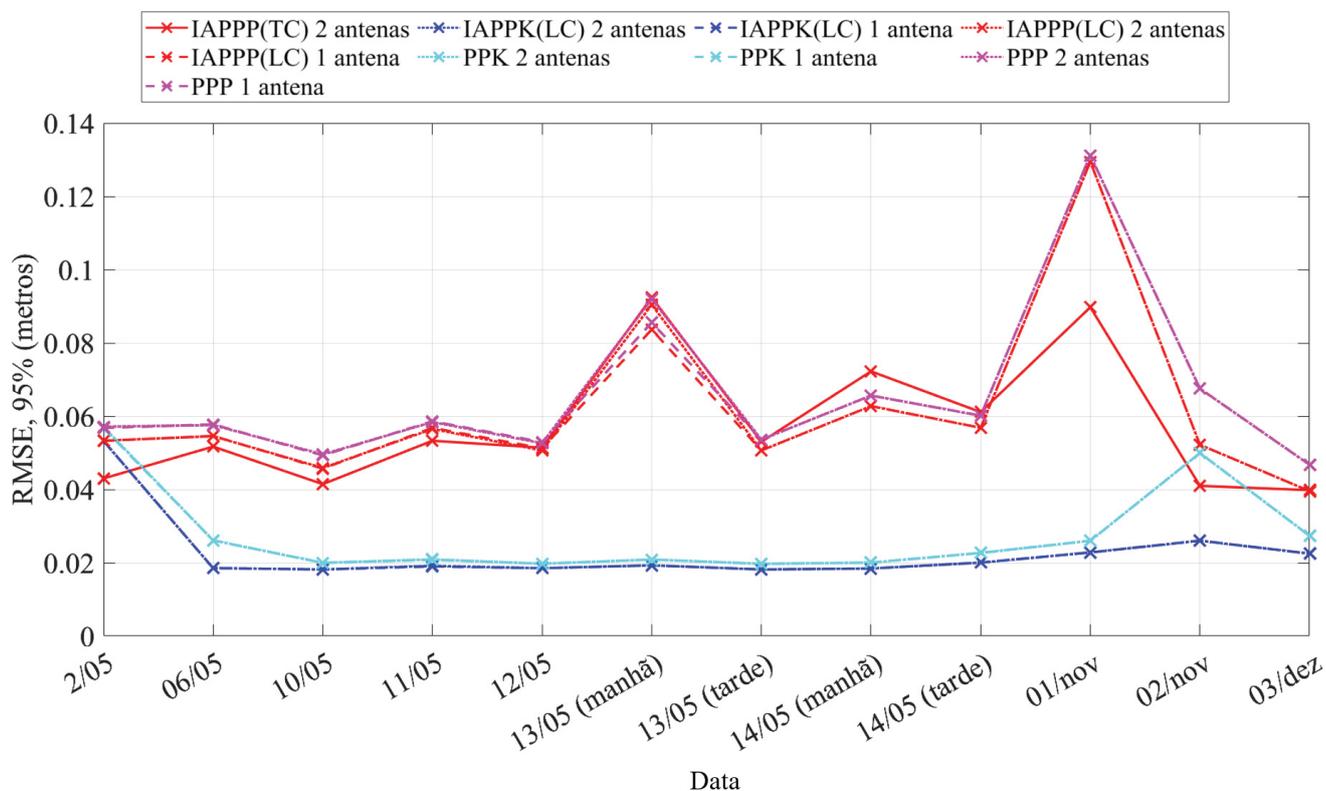
FONTE: O autor (2022).

Analisando as incertezas verticais (FIGURA 39), observa-se que só no dia 1 de novembro os métodos PPP, que não são fortemente acoplados, apresentaram incertezas maiores do que 10 cm, não se enquadrando na Ordem 1A CHS (2013)

Destaque pode ser dado para o método IA-PPP (TC), que apresentou uma incerteza abaixo ou igual a 5 cm nos dias 2, 6, 10, 11, 12, 13 de maio, 2 de novembro e 3 de dezembro, viabilizando, assim, o cumprimento da Ordem Exclusiva nesses dias. Isso posto, salienta-se que esse fato representa uma grande autonomia para os levantamentos com maré-GNSS, pois não há necessidade de ocupar estações de referência.

Por fim, percebe-se que os métodos baseados no PPK, a partir do dia 6 de maio, são os únicos cuja IVT mais se aproxima da incerteza teórica, com valores praticamente constantes, abaixo de 3 cm. Além disso, foi observado que o método IAPPK (LC) é o mais estável na comparação, tanto com a lancha atracada quanto em movimento.

FIGURA 39 – INCERTEZA VERTICAL TOTAL (TOTAL VERTICAL UNCERTAINTY - TVU) DOS MÉTODOS GNSS

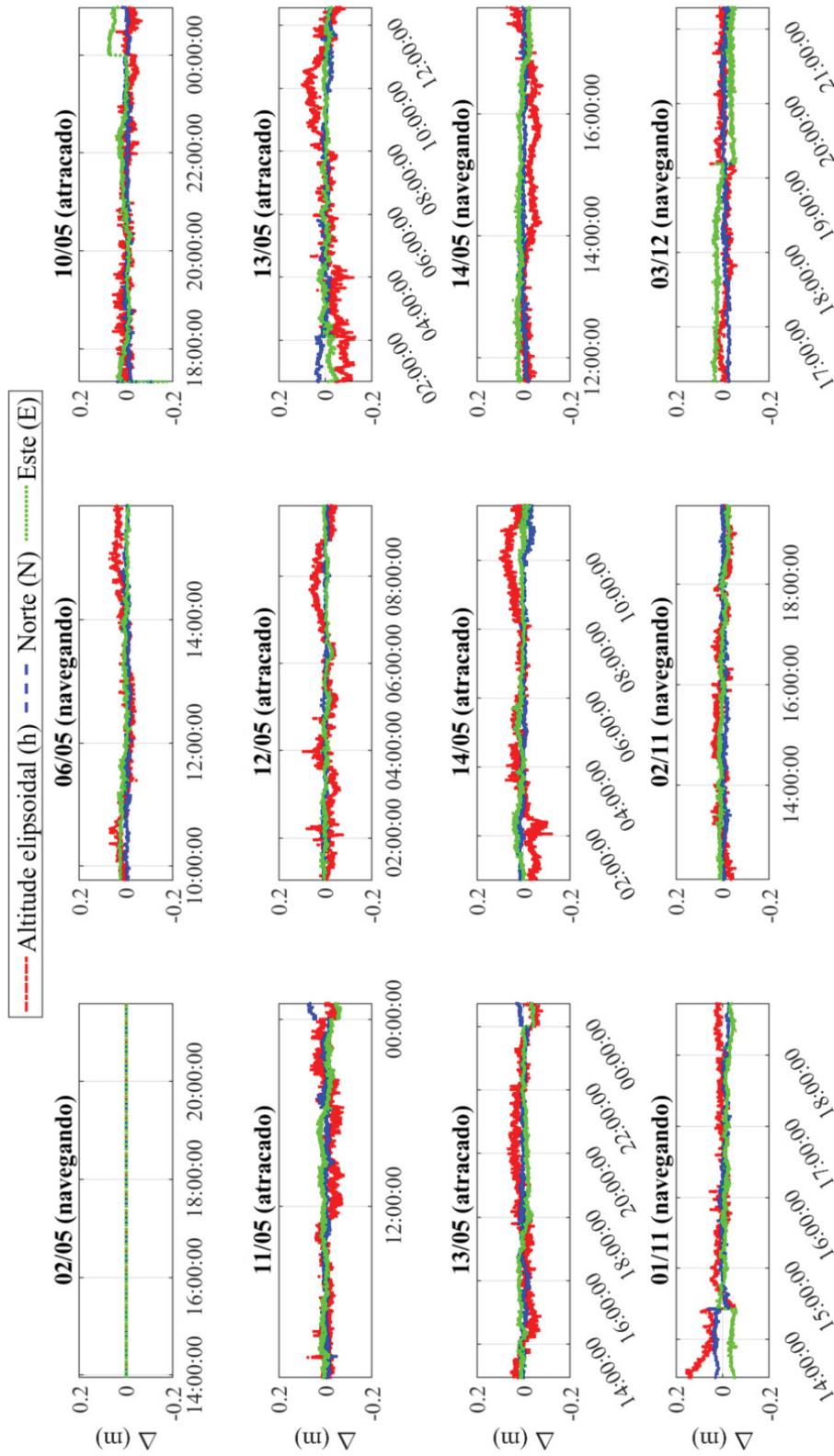


FONTE: O autor (2022).

Ainda assim, ressalta-se que resultados mais promissores poderiam ser obtidos após a exclusão daqueles dados com um desvio padrão acima de um limite a ser estabelecido, ou aplicando filtros para remoção de *outliers* e suavização das séries temporais. Nesse sentido, para verificar o impacto da trajetória da lancha na variação das incertezas, foi feita uma análise dos métodos baseados no PPP, calculando as diferenças das coordenadas Norte, Este e de Altitude elipsoidal, em relação ao método IAPPK (TC), para todos os dias.

Na FIGURA 40, percebe-se que, no método IAPPP (TC), as incertezas variaram com magnitude semelhantes ao longo de todos os dias, tanto com a lancha atracada quanto em movimento.

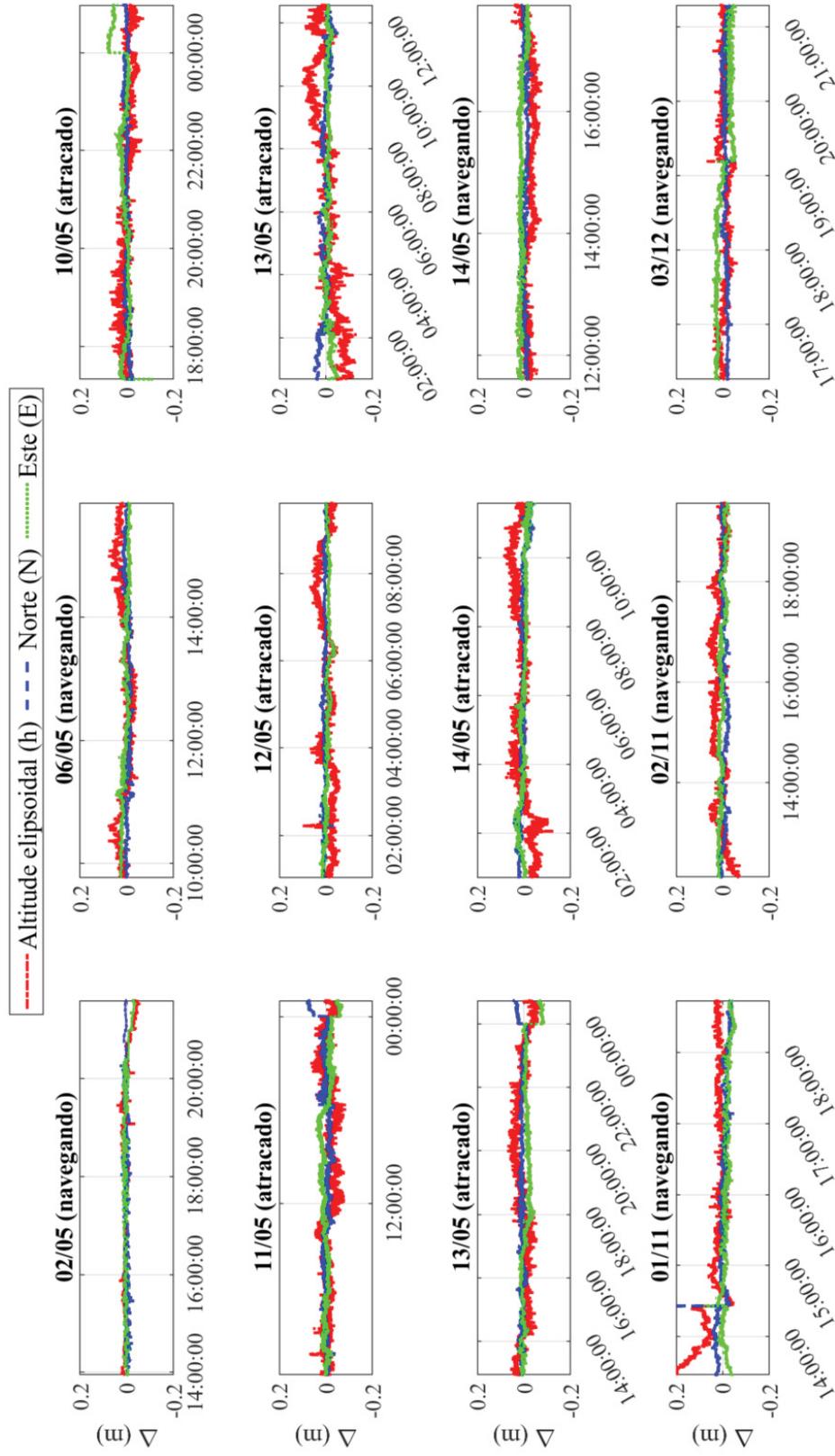
FIGURA 40 – DIFERENÇAS (M) DE COORDENADAS N, E E H DO MÉTODO IAPPP(TC) EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC)



FONTE: O autor (2022).

Já nos métodos IAPPP (LC), (FIGURA 41), os erros também apresentaram uma variação semelhante, porém com uma incerteza máxima maior. Cita-se, por exemplo, o dia 1 de novembro para a componente norte.

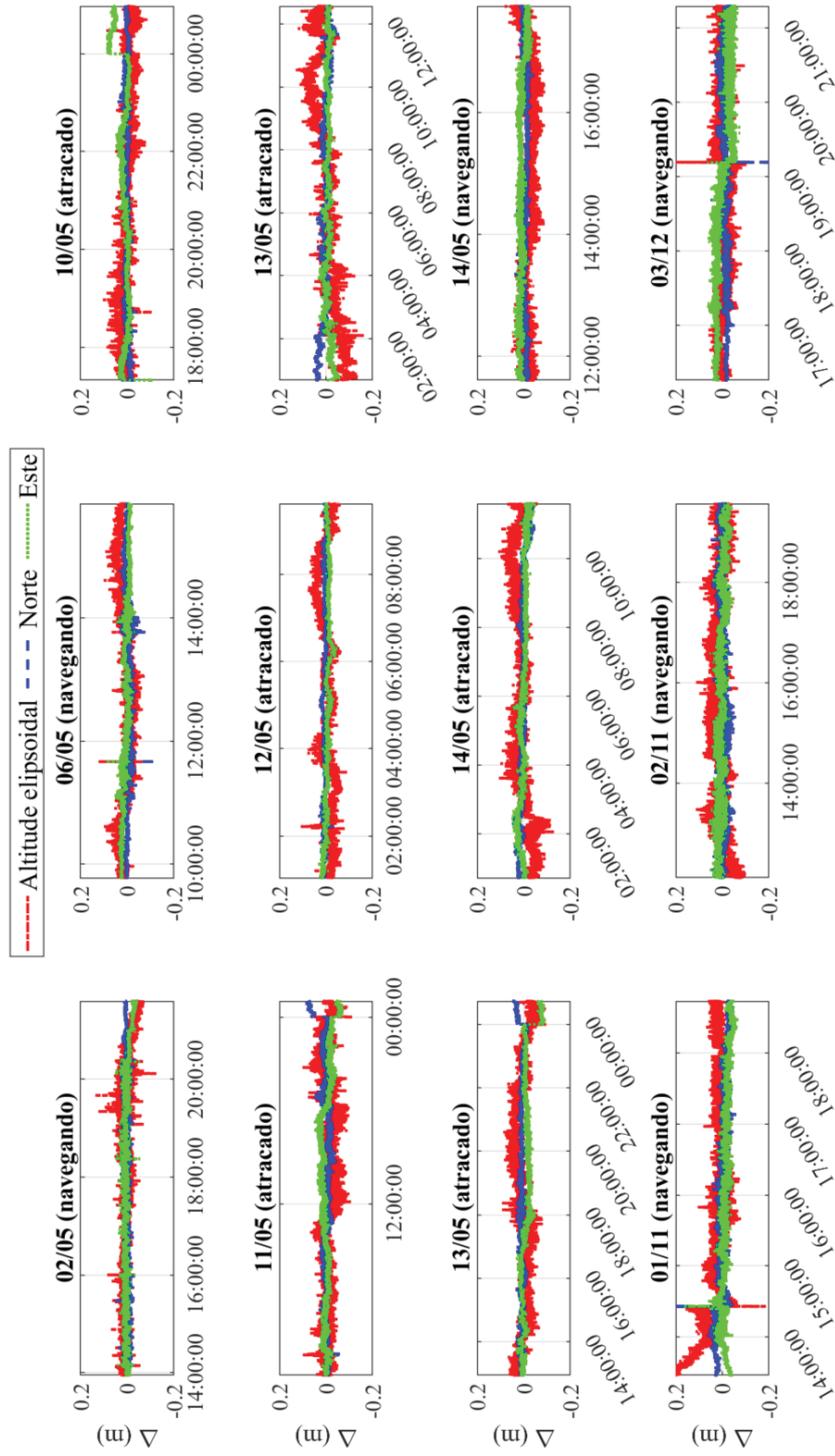
FIGURA 41 – DIFERENÇAS (M) DE COORDENADAS N, E E H DO MÉTODO IAPPP(LC), COM DUAS ANTENAS, EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC)



FONTE: O autor (2022).

O mesmo pode ser observado com as soluções que utilizavam somente o GNSS (FIGURA 42), com uma amplitude de erro ainda maior. Ressalta-se que, no dia 1 de novembro, foi observada uma incerteza de 44 cm na componente norte, que não pode ser visualizada no gráfico, pois os limites da escala vertical foram de 0,2 m e -0,2 m, para comparação com as FIGURAS 40 e 41.

FIGURA 42 – DIFERENÇAS (M) DE COORDENADAS N, E E H DO MÉTODO PPP, COM DUAS ANTENAS, EM RELAÇÃO AO IAPPK (TC)



FONTE: O autor (2022).

As três figuras apresentadas anteriormente fazem referências aos métodos baseados em PPP. Para as soluções baseadas no PPK, foram encontrados resultados semelhantes, com o mesmo padrão de dados, entre navegando e atracado, porém com uma menor magnitude de erros. Contudo, não foram encontradas variações abruptas, como as ocorridas no dia 6 de maio, 1 de novembro e 3 de dezembro, o que explica uma maior estabilidade desses métodos.

Uma comparação entre as incertezas verticais e horizontais serão apresentados na próxima seção.

#### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS ABORDAGENS DE CÁLCULO DA INCERTEZA VERTICAL

Na FIGURA 43, observa-se uma comparação qualitativa entre as incertezas dos métodos pós-processados, classificadas por cores, de acordo com os critérios de incertezas para cada ordem de levantamento. As datas em análise correspondem a todos os dias em que a lancha permaneceu atracada (de 10/5 a 14/5), nos horários em que a solução GcDGNSS estava disponível. Na referida figura, observa-se ainda uma comparação da quantidade de ocorrências de enquadramento para cada método de posicionamento e abordagem escolhida, sendo a primeira (1), adotando a estação maregráfica como referência, e a segunda (2), o método IAPPK (TC).

Na avaliação dos métodos na primeira abordagem, verifica-se que todos os baseados no PPK seriam capazes de atingir a Ordem Especial em todos os seis períodos analisados. De outra forma, as Ordens Especiais 1A e 2 foram atingidas em dois, três e um dia nos métodos baseados no PPP. No que tange à segunda abordagem, nota-se, nas células hachuradas, uma quantidade maior de ocorrências de incertezas para a Ordem Especial e menor para Ordens 1A, 1B e 2.

Nesse sentido, essa melhora nos resultados pode ser devido a uma subestimação da incerteza teórica do IAPPK (TC), (FIGURA 36), utilizada na Equação 14, para o cálculo da incerteza vertical de cada método, além do fato de que, nessa equação, a incerteza teórica não possui correlação com as incertezas dos demais métodos de acordo com a época de coleta dos dados, o que não é necessariamente verdade, pois, como visto no dia 2 de maio, quanto maior a distância da lancha à estação base, mais as soluções baseadas no PPK tendem a se aproximar das soluções baseadas no PPP. Infere-se, portanto, que tudo isso contribui para afirmar

que a primeira abordagem seria a mais adequada para esse tipo de avaliação, uma vez que, mesmo que não possa ser aplicada nos locais com a lancha afastada da estação maregráfica, ela poderia servir de calibração das incertezas dos métodos baseados no PPK com auxílio inercial, que tendem a possuir uma incerteza mais estável do que o PPP, tanto atracada quanto navegando (FIGURAS 40 a 42).

FIGURA 43 – NO QUADRO DE CIMA OBSERVA-SE UMA COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS ABORDAGENS DE ACORDO COM A ORDEM DE LEVANTAMENTO. NO QUADRO DE BAIXO, OBSERVA-SE A QUANTIDADE DE OCORRÊNCIAS PARA CADA ORDEM DE LEVANTAMENTO, DE ACORDO COM O MÉTODO E ABORDAGEM. A ABORDAGEM 1 ADOTA A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA COMO REFERÊNCIA E A ABORDAGEM 2, O IAPPK (TC)

Comparação qualitativa entre a primeira e a segunda abordagem																		
Data	Métodos																	
	TC/GNSS		LC/GNSS						Somente GNSS									
	IAPPK		IAPPK			IAPPK			PPK				PPP					
	2 antenas		2 antenas		1 antena	2 antenas		1 antena	2 antenas		1 antena		2 antenas		1 antena			
	Abordagem																	
1		2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
10/05																		
11/05																		
12/05																		
13/05																		
13/05																		
14/05																		

Quantidade de ocorrências para cada abordagem e método							Legenda				
Método	Abordagem						Especial	1A / 1B	Ordem 2		
	1		2		1					2	
	Especial		1A / 1B		Ordem 2						
IAPPK(TC) 2 antenas	2	4	3	2	1	0					
IAPPK (LC) 2 antenas	6	6	0	0	0	0					
IAPPK(LC) 1 antena	6	6	0	0	0	0					
IAPPK (LC) 2 antenas	2	3	3	3	1	0					
IAPPK(LC) 1 antena	2	3	3	3	1	0					
PPK 2 antenas	6	6	0	0	0	0					
PPK 1 antena	6	6	0	0	0	0					
PPP 2 antenas	2	3	3	3	1	0					
PPP 2 antena	2	3	3	3	1	0					

FONTE: O autor (2022).

Os resultados das incertezas em termos quantitativos são apresentados na FIGURA 44, além disso, são adicionadas as soluções referentes ao GcDGNSS e ao RTK, os quais, pelo fato de terem resultados em horários diferentes, foram representados em quadros distintos. Constata-se que, em todos os horários em que o GcDGNSS estava disponível, de 10 a 14 de maio, esse método atingiu a Ordem Especial em nem um dia, a Ordem 1A e 1B em três dias e a Ordem 2 em três dias. Já

para os horários em que RTK estava disponível, de 10 a 13 de maio, o GcDGNSS atingiu a Ordem 1A em todos os períodos, de outra forma, para o RTK a Ordem Especial foi atingida em três períodos e a Ordem 1A em somente um período. Isso ocorre, pois no RTK é necessário aplicar menos correções do que no GcDGNSS, que faz uso, por exemplo, de modelos globais da ionosfera e troposfera.

Ao analisar os 12 períodos para a segunda abordagem, verificou-se que os métodos PPK foram capazes de atingir a Ordem Especial em todos os períodos, com exceção do dia 2 de maio, quando a linha de base utilizada no processamento foi maior do que 80 km. Em relação ao PPP, isso ocorreu em oito dias no modo fortemente acoplado (TC), seis dias no modo fracamente acoplado (LC) e quatro dias no modo somente com o GNSS.

FIGURA 44 – RESULTADOS EM TERMOS DE RMSE (I.C 95%) DA PRIMEIRA E SEGUNDA ABORDAGEM

Horários disponíveis		Duas abordagens para avaliação do RMSE (m) da componente vertical dos métodos GNSS																							
		RMSE relação à estação maregráfica										RMSE em relação ao IAPPK(TC)													
		Métodos										Métodos													
Data	TC/GNSS		LC/GNSS				Somente GNSS				TC/GNSS		IAPPK		IAPPP		IAPPK		IAPPP		Somente GNSS				
	IAPPK	IAPPP	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas	1 antena	2 antenas		
02/05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
06/05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10/05	0.030	0.034	0.031	0.032	0.041	0.039	0.032	0.030	0.041	0.040	0.041	0.040	0.040	0.041	0.040	0.041	0.040	0.041	0.040	0.041	0.040	0.041	0.040	0.041	
11/05	0.048	0.058	0.049	0.050	0.059	0.057	0.049	0.048	0.059	0.059	0.059	0.118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12/05	0.020	0.050	0.021	0.021	0.050	0.051	0.021	0.020	0.046	0.048	0.077	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13/05	0.049	0.105	0.050	0.050	0.103	0.098	0.049	0.049	0.103	0.099	0.118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13/05	0.039	0.060	0.039	0.039	0.059	0.059	0.040	0.040	0.060	0.060	0.092	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14/05	0.029	0.073	0.029	0.029	0.072	0.072	0.031	0.031	0.072	0.072	0.114	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14/05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
01/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
02/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
03/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10/05	0.030	0.034	0.029	0.030	0.039	0.039	0.029	0.029	0.040	0.036	0.075	0.033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11/05	0.023	0.025	0.023	0.023	0.026	0.025	0.016	0.021	0.023	0.023	0.067	0.024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11/05	0.041	0.051	0.044	0.044	0.048	0.054	0.040	0.042	0.049	0.054	0.090	0.073	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13/05	0.031	0.065	0.037	0.037	0.071	0.071	0.036	0.036	0.068	0.068	0.073	0.041	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Do RTK																							Critérios de avaliação		
																							Ordem Especial / Exclusiva		< 5cm
																							Ordem 1A e 1B		> 5cm e < 10 cm
				Ordem 2																					

FONTE: O autor (2022).

NOTA: Dos métodos analisados na primeira abordagem, os períodos horários em que as soluções RTK e GcDGNS estavam disponíveis, foram diferentes a cada dia. Por esse motivo, as incertezas dos demais métodos também foram distintas ao se comparar os mesmos dias indicados na tabela.

## 5 DETERMINAÇÃO DO SEP A PARTIR DE UMA LANCHA HIDROGRÁFICA

No capítulo 2, foi visto que o uso do SEP é uma das formas de redução das incertezas de um levantamento hidrográfico, podendo ser determinado por vários métodos, tais como: altimetria por satélites, modelos hidrodinâmicos, modelos geoidais, geopotenciais, entre outros. Assim, neste capítulo, será apresentada uma aplicação para definição do SEP por meio de uma embarcação de sondagem, o qual serve ainda para validar outros modelos SEP já existentes, de acordo com os critérios de incerteza para cada ordem de levantamento, conforme visto na seção anterior.

Segundo Riley (2011), para determinação do SEP utilizando uma lancha hidrográfica, os dados de *offsets* da embarcação e do nível mar obtido na estação maregráfica, ao invés de serem aplicados nas profundidades medidas, são aplicados diretamente na série temporal das altitudes elipsoidais, criando uma estimativa do SEP ao longo do trajeto da embarcação. Para isso, é necessário levar em consideração as componentes verticais envolvidas do NR ao elipsoide e os diferentes sistemas de marés permanentes a que estão relacionados.

### 5.1 SISTEMA DE MARÉS PERMANENTES

Assim como a maré, também a crosta terrestre sofre atração gravitacional do sistema terra-lua-sol. De acordo com IAG (2015), existem diferentes abordagens sobre como considerar esse efeito, conforme o tipo de dado, por exemplo, para uma rede de nivelamento geométrico, é utilizado o sistema de Maré Média (mean tide), o qual considera o efeito médio da maré e os efeitos diretos e indiretos no potencial de deformação terrestre. De outra forma, para os dados coletados em relação ao ITRF (por exemplo: GNSS), é utilizado o sistema de Maré Livre (non-tidal ou tide-free), no qual os efeitos de maré terrestre são totalmente eliminados, desconsiderando a influência da Lua e do Sol (EKMAN, 1989; MAKINEN; IHDE, 2008). Isso implica que, ao somar as cotas entre referências de nível com a altitude elipsoidal de uma RN para definição do SEP, o efeito da maré terrestre precisa ser restaurado.

Segundo Tenzer *et al.* (2011), a diferença provocada pela falta de conversão dos sistemas marés livre e média, pode chegar até a 10 cm. A equação 14 apresenta como se realiza essa conversão:

$$h_{mean-tide} = h_{tide-free} - \{(1 + k - h) * [-0.198 * (\frac{3}{2} * \text{sen}^2\Psi - \frac{1}{2})]\} \quad (14)$$

Onde  $\Psi$  é a latitude geocêntrica e  $k = 0,3$  e  $h = 0,6$  são números de Love do potencial e deformação da Terra<sup>9</sup>.

## 5.2 MEDIÇÃO DOS *OFFSETS* PARA DETERMINAÇÃO DO SEP

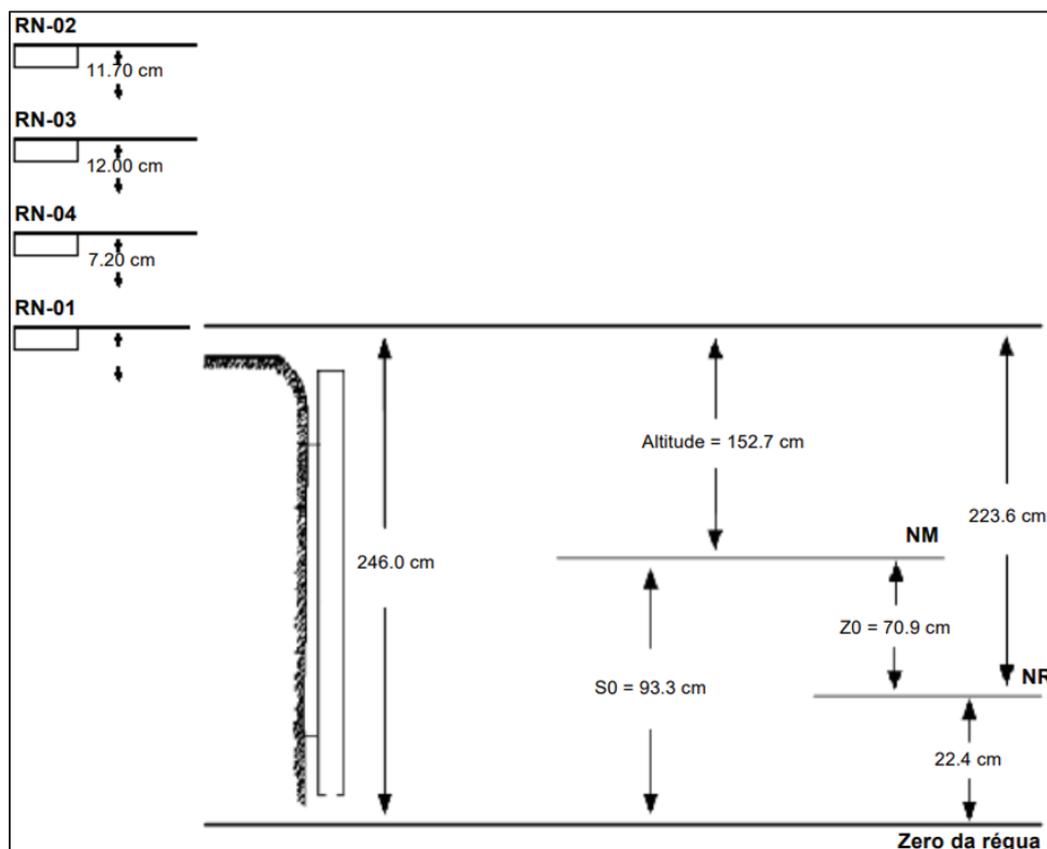
Para demonstrar um exemplo de aplicação de determinação do SEP por uma lancha hidrográfica, o método IAPPK (TC) foi escolhido para teste no dia 11 de maio, quando a lancha permaneceu atracada junto ao marégrafo pelo maior período contínuo, de 24 horas. Sua validação foi feita por meio do SEP determinado na estação maregráfica do Clube Naval Charitas, combinando dados de nivelamento, rastreio, *offset* do zero da régua ao NR e o fator de conversão do sistema de maré média para o sistema de maré livre.

Em relação às cotas do nivelamento, foram utilizadas as da própria Ficha F-41 da estação maregráfica (FIGURA 45), disponibilizada em DHN (2022), pois, ao se comparar com as cotas obtidas no nivelamento realizado durante a pesquisa, foram observadas diferenças menores do que 2 mm. Como é um valor abaixo do limite estabelecido por DHN (2015), não houve necessidade de atualização da ficha F-41.

---

<sup>9</sup> Mais detalhes sobre tais números podem ser consultados em Petit e Luzum (2010).

FIGURA 45 – COTAS ENTRE REFERÊNCIAS DE NÍVEL, RÉGUA E ELEMENTOS DE MARÉ (NM E NR) DA FICHA F-41 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DO CLUBE NAVAL CHARITAS



FONTE: DHN (2022).

O rastreamento na estação maregráfica serviu para determinar a cota entre o NR e o elipsoide, para isso, foi escolhida a RN1, pelo fato de ser a mais próxima da régua. A duração do rastreamento foi de uma hora, utilizando o receptor Stonex. O posicionamento foi determinado por meio de um processamento relativo estático, utilizando como base a estação RJNI, da RBMC, com a coordenada atualizada para época do levantamento. Após o processamento utilizando o Software Terrapos, foi encontrada uma altitude elipsoidal de -2,6483 m, com uma incerteza vertical de 0,002 m.

A distância do zero da régua ao NR foi extraída da própria ficha F-41 e o fator de conversão referente ao sistema de maré permanente foi obtido por meio da equação (14).

O resultado de todas essas medições encontra-se no QUADRO 12, e, na FIGURA 46, consta uma ilustração dessas cotas, na qual pode-se observar ainda a Equação (15), que representa uma versão simplificada da Equação (14) para correção

do sistema de maré permanente; a Equação (16), para o cálculo do SEP na estação maregráfica; e a Equação (17), para o cálculo do SEP com a lancha hidrográfica.

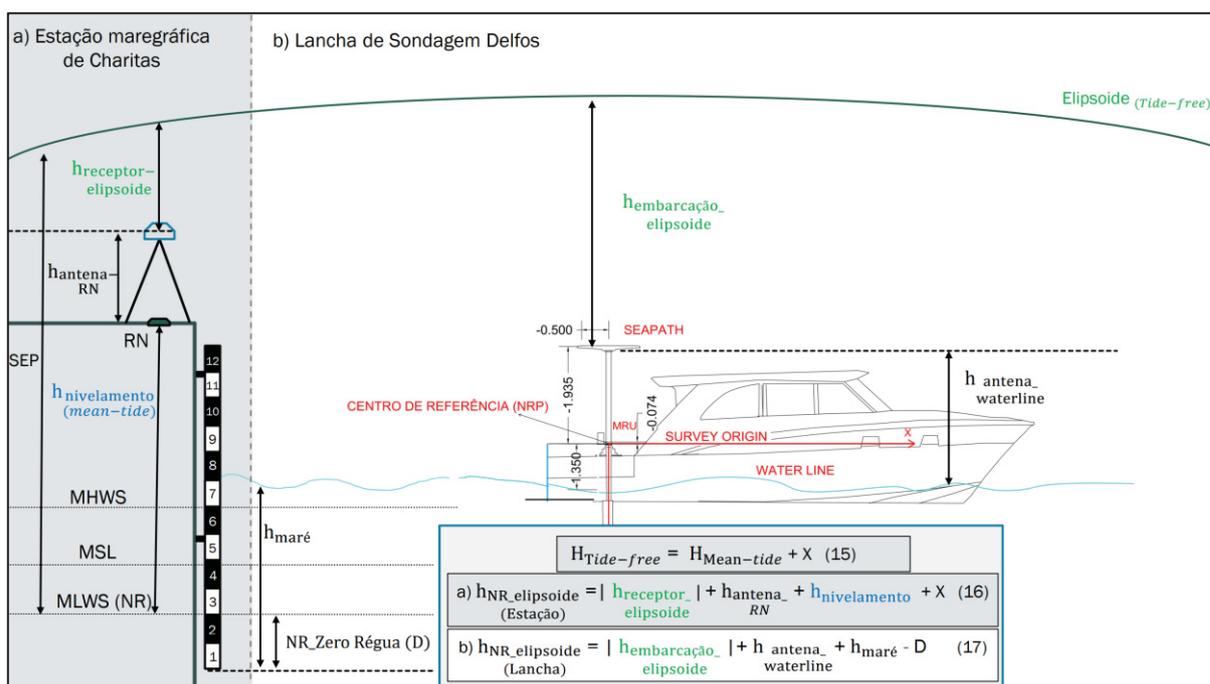
Na FIGURA 46, são ainda descritos o valor de  $h_{\text{maré}}$ , que representa a série temporal da maré medida na estação maregráfica, bem como o valor de  $h_{\text{embarcação, elipsoide}}$  que descreve a série temporal de altitude elipsoidal coletada pela antena GNSS da embarcação. Também são indicados outros níveis de referência hidrográficos, tais como o MHWS (*Mean High Water Spring*, Média das Preamares de Sizígia) e o MSL (*Mean Sea Level*, Nível médio do Mar), os quais podem ser determinados em relação ao elipsoide da mesma forma utilizando a lancha hidrográfica, sendo necessário somente alterar a cota entre o zero da régua e o nível de referência escolhido.

QUADRO 12 – *OFFSETS*, EM TERMOS ABSOLUTOS, UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DO SEP NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA E VALIDAÇÃO DO SEP CALCULADO PELA LANCHA HIDROGRÁFICA

Local	Cota	Representação	Valores (m)
Estação maregráfica	ARP da antena - Elipsoide	$h_{\text{receptor\_elipsoide}}$	2,6483
	ARP da antena - RN1	$h_{\text{antena\_RN}}$	1,7323
	RN1 - NR	$h_{\text{nivelamento (mean-tide)}}$	2,236
	NR - Elipsoide	SEP	6,6166
	NR - Zero da régua	NR_ Zero régua	0,224
	Fator de conversão referente ao sistema de maré permanente	X	0,0374
Lancha	ARP da antena da lancha – Linha d'água	$h_{\text{antena\_waterline}}$	3,285

FONTE: O autor (2022).

FIGURA 46 – COMPONENTES VERTICAIS ENVOLVIDAS NA DETERMINAÇÃO DO SEP CALCULADO PELA LANCHA HIDROGRÁFICA E NA VALIDAÇÃO COM O SEP OBTIDO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA



FONTE: Baseado em Delfos (2022); Tenzer *et al.* (2011); NOAA, (2022).

NOTA: Na estação maregráfica o SEP é calculado combinando dados de nivelamento, rastreamento estático e a correção do sistema de maré permanente. Na lancha hidrográfica, o SEP é calculado combinando dados de altitude elipsoidal da antena, da altura da antena em relação à linha d'água, à altura da maré e à distância do zero da régua ao NR.

### 5.3 VALIDAÇÃO DO SEP MEDIDO PELA LANCHA HIDROGRÁFICA

Segundo Mills e Dodd (2014), a primeira fonte de incerteza na definição do SEP é a medição incorreta das alturas das antenas na estação base e na embarcação. Os autores destacam que tais *offsets* podem ser calibrados utilizando os dados de uma lancha atracada ao lado de uma estação maregráfica, de modo a poder comparar a variação das altitudes elipsoidais coletadas pela lancha com a variação do nível do mar medido na estação. Porém, ao invés de subtrair das séries temporais suas respectivas médias, as seguintes correções (Equação (18) e FIGURA 46) são aplicadas nas altitudes elipsoidais coletadas pela lancha: os *offsets* referentes à altura da antena em relação à linha d'água; o SEP calculado na estação maregráfica; a correção do sistema de marés permanente; e a distância do zero da régua ao NR. Após esse processo, as altitudes elipsoidais passam a ser denominadas de  $h_{maré\_GNSS}$ .

$$h_{\text{maré\_GNSS}} = SEP + X + \text{NR\_Zero régua} - h_{\text{antena\_waterline}} + h_{\text{embarcação elipsoide}} \quad (18)$$

Na FIGURA 47, é apresentada a comparação entre o  $h_{\text{tide}}$  medido na estação maregráfica e o  $h_{\text{maré\_GNSS}}$ , calculado pela lancha, com a intervalo amostral de 1 minuto. Sem a aplicação dos filtros Hampel e de Média Móvel no dado GNSS, o erro médio foi de 2,72 cm, com um RMSE (95%) de 6,8 cm. Após a aplicação dos filtros de média, foi observada uma diferença média (*bias*) de 2,2 cm entre as curvas, com um RMSE (95%) de 5,6 cm.

Segundo Olsson<sup>10</sup> (2009), citado por Dodd e Mills, (2014), esse erro sistemático entre as séries temporais pode ser devido a três fatores:

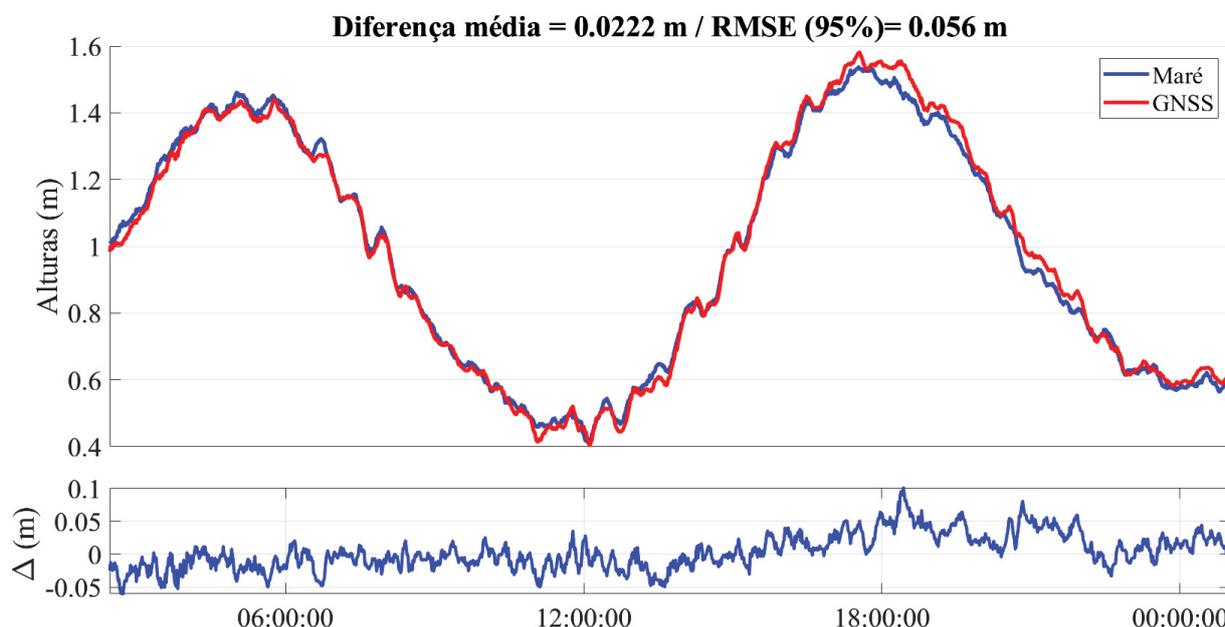
- a) Erro na altura da antena em relação à linha d'água;
- b) Erro no modelo de separação;
- c) Erro na altura da antena da estação base.

Contudo, uma vez identificado este *bias* com a lancha atracada, ele pode ser minimizado na realização de levantamentos hidrográficos nas proximidades da estação maregráfica. Essa minimização pode ser feita por meio da correção do *bias* medido entre os dados do GNSS e do marégrafo, o qual é adotado como referência.

---

<sup>10</sup> Olsson, U. (2009). Comunicação de e-mail, 31 de agosto, 2009

FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DA MARÉ-GNSS (APÓS APLICAÇÃO DO SEP CALCULADO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA), COM A MARÉ MEDIDA NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA



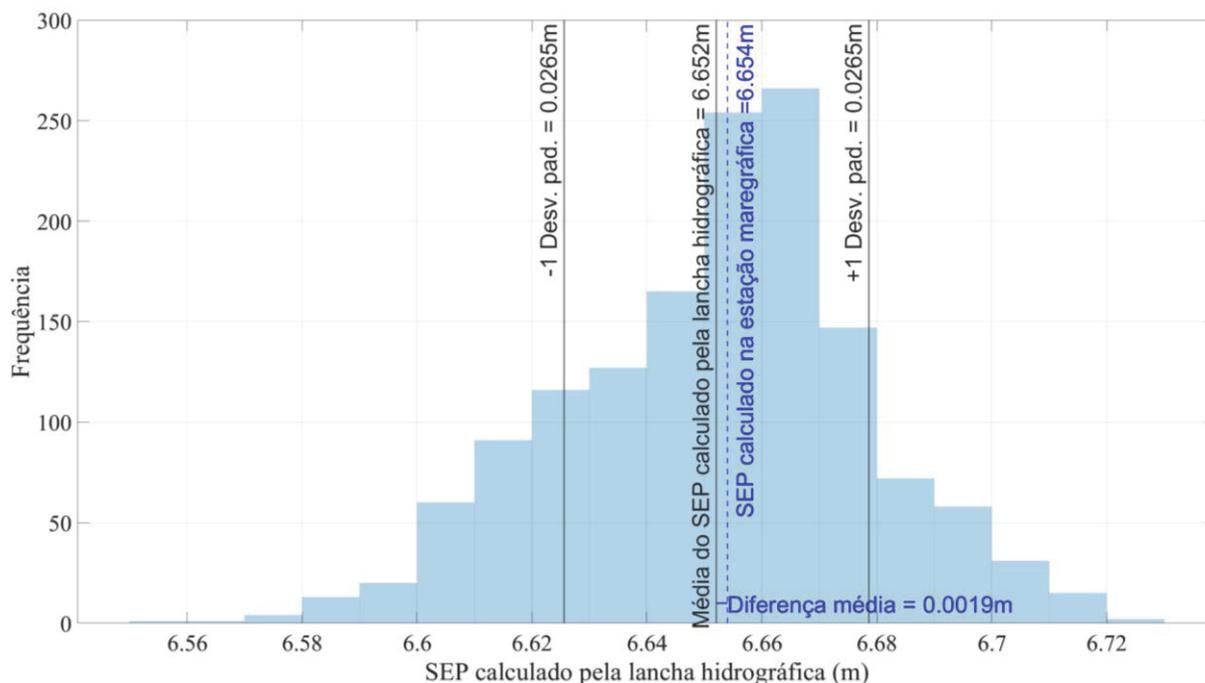
FONTE: O autor (2022).

NOTA: Os dados estão a uma taxa de um em um minuto.

Uma vez verificada a consistência das alturas das antenas, foi utilizado o SEP calculado na estação maregráfica (Equação (16)) para validar o SEP determinado pela lancha hidrográfica (Equação (17)), dessa vez combinando as séries temporais das altitudes elipsoidais da lancha com o nível do mar medido pela estação maregráfica. Os movimentos oriundos do heave e da variação do calado dinâmico foram desprezados pelo fato da lancha se encontrar atracada em um local abrigado.

O resultado da comparação entre o SEP calculado na estação maregráfica e o SEP determinado pela lancha pode ser observado na FIGURA 48. Inicialmente, foi encontrada uma diferença média de 0,5 cm, com um desvio padrão (95%) de 6,89 cm. Após a aplicação dos filtros Hampel e de média móvel, foi observada uma diferença média de 0,1 cm, com um desvio padrão 5,3 cm. Tal resultado indica que o SEP calculado pelo método IAPPK (TC) pode ser válido para levantamentos com Ordem Especial, ou Exclusiva, cujo limite de incerteza é de 5 cm (I.C 95%), conforme sugerido por CHS (2013).

FIGURA 48 – O HISTOGRAMA REFERE-SE À DISTRIBUIÇÃO DO SEP CALCULADO NA LANCHA. AS LINHAS VERTICAIS EM PRETO INDICAM A MÉDIA E O DESVIO PADRÃO DESTA DISTRIBUIÇÃO. A LINHA TRACEJADA EM AZUL APRESENTA O SEP CALCULADO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA



FONTE: O autor (2022).

Da mesma forma que a medida do NR em relação ao elipsoide foi calculada utilizando a lanca hidrográfica, outros níveis de referência hidrográficos, como o MSL e o MHWS, podem ser obtidos (TABELA 5) com a mesma metodologia, o que demonstra sua aplicabilidade para todas as aplicações relacionadas ao posicionamento vertical marítimo e costeiro.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS

Estatística do SEP (com filtro)					
Nível de referência	Estação maregráfica	Embarcação (média)	Diferença média(m)	Diferença máxima (m)	Desv. Pad. (95%) (m)
MLWS (NR)	6,654	6,652	0,0024	0,0361	5,3
MSL	5,945	5,943			
MWHS	5,236	5,234			

FONTE: O autor (2022).

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho cumpriu com os objetivos propostos de avaliar as incertezas horizontais e verticais de diferentes métodos geodésicos, no contexto da redução de sondagem por maré GNSS e do cálculo do SEP por uma lancha hidrográfica. Em todos os levantamentos a métrica utilizada foi o cálculo da incerteza vertical e horizontal para cada método. Os limites de incertezas verticais utilizados para validação, de acordo com a ordem de levantamento, foram aqueles exigidos por CHS (2013) no que se refere à medição do nível do mar e à determinação dos níveis de referência hidrográficos. Nesse sentido, foram conduzidas duas abordagens, indicadas pela literatura, para o cálculo das incertezas. Na primeira, avalia as altitudes elipsoidais dos métodos, adotando como referência a variação do nível do mar medido na estação maregráfica; enquanto na segunda, as componentes Norte, Este e Vertical de cada método são avaliadas, tendo como referência tais componentes do método do IAPPK (TC).

Na primeira abordagem, foi aplicado um filtro de média móvel de 5 minutos nos dados da estação maregráfica, pois com essa janela verificou-se que é possível realizar uma suavização da curva, preservando sua forma e variação da maré, incluindo os seiches. Em todos os períodos em que o GcDGNSS estava disponível, os métodos baseados no PPK atingiram a Ordem Especial em 100% dos levantamentos, no PPP pós-processado, em 33%, e no GcDGNSS, em 0%. Do período em que a solução RTK estava disponível, os métodos baseados no PPK atingiram a Ordem Especial em 100% dos levantamentos, no PPP com duas antenas, em 75%, e no RTK, em 75%.

Destaque pode ser dado para a solução PPP pós-processada, cujos resultados das incertezas verticais foram menores do que aqueles obtidos pelo GcDGNSS em todos os períodos analisados, o que proporciona boas perspectivas para os hidrógrafos, sendo essa solução uma alternativa mais eficaz, barata e precisa, uma vez que como em toda sondagem, os dados de batimetria exigem, necessariamente, um pós-processamento, ou seja, não é exigido um posicionamento em tempo real.

Mesmo que seja necessário um posicionamento em tempo real como, por exemplo, para um controle durante as sondagens, para obras de dragagem ou ainda para o monitoramento da folga dinâmica abaixo da quilha dos navios mercantes, foi

observado que as incertezas verticais obtidas pelo GcDGNSS foram maiores do que as do RTK em todos os dias. Apesar do RTK exigir um esforço logístico maior para se manter estações base de referência, ele pode ser minimizado ao utilizar o serviço RBMC-IP do IBGE, como foi apresentado neste estudo.

Dos resultados encontrados na segunda abordagem, os métodos baseados no PPK foram capazes de atingir a Ordem Especial para a medição do nível do mar em 100% dos levantamentos. Em relação ao PPP, isso ocorreu em oito dias no modo fortemente acoplado; em seis dias no modo fracamente acoplado; e em quatro dias utilizando somente a solução GNSS, o que corresponde a 66%, 50% e 33% dos levantamentos, respectivamente. Para as Ordens 1A e 1B, isso ocorreu em 100%, 91% e 91% dos levantamentos, respectivamente.

No que se refere às incertezas horizontais, foi observada uma incerteza menor do que 30 cm em todos os períodos, o que cumpre com a Ordem Exclusiva, cujo critério de incerteza horizontal é de 1 m. Em relação ao fato da lancha se encontrar atracada ou em movimento, foi verificado que, tanto para o IHT quanto para IVT, o método mais estável foi o IAPPK (LC ou TC), já os demais métodos, os quais utilizam somente o GNSS, são os que mais dependem da época de aquisição de dados e da posição da embarcação.

Uma vez verificado quais métodos de posicionamento seriam capazes de se enquadrar em determinada ordem de levantamento, o próximo passo foi determinar o SEP com uma lancha hidrográfica. Para tanto, foram utilizados os dados de maré, dos *offsets* da embarcação atracada junto ao marégrafo durante 24h, e das altitudes elipsoidais coletadas nesse período com o método mais preciso, o IA-PPK (TC).

Ao se comparar a média do SEP calculado pela lancha com o SEP calculado na estação maregráfica, foi encontrada uma diferença média de 0,5 cm, com um desvio padrão de 6,89 cm (95%). Ao aplicar os filtros Hampel e de média móvel, foi encontrada uma diferença média de 0,1 cm, com um desvio padrão (95%) de 5,3 cm, o que está dentro do estabelecido para Ordem Especial, de acordo com CHS (2013). Portanto, verificou-se que os métodos baseados no PPK foram os mais capazes de definir o SEP nos locais onde é exigida a Ordem de Levantamento Especial ou Exclusiva. Dessa forma, é possível validá-lo nas áreas onde tenha sido calculado utilizando modelos hidrodinâmicos e de topografia do nível médio do mar, sendo útil para todas as aplicações do posicionamento marítimo e costeiro.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, além das perguntas citadas no capítulo 2, as recomendações podem ser divididas em posicionamento GNSS e definição do SEP.

### 6.1.1 Processamento GNSS

- a) Realizar um levantamento hidrográfico nas proximidades de um marégrafo e comparar as incertezas teóricas do método geodésico em análise com as variações do nível do mar observadas na estação maregráfica, pois neste trabalho a comparação foi feita somente com a lancha atracada;
- b) Avaliar o uso de outros filtros para remoção de outliers e suavização dos dados, tais como: Vondrak, Wavelet, Savitz-Golay e outros, bem como investigar o uso de múltiplas interações para cada filtro, de modo a se buscar o menor RMSE entre os dados analisados;
- c) Avaliar, em relação ao IAPPK (TC), a incerteza dos métodos de posicionamento RTK e GcDGNSS com a lancha navegando, além de outros métodos, como PPP-AR, RT-PPP, Network RTK e o uso deles no modo fracamente acoplado ao sensor inercial;
- d) Avaliar o tempo de inicialização de cada método de posicionamento;
- e) Avaliar o tempo de indisponibilidade do sinal GNSS, que o sensor inercial consegue preencher, durante o pós-processamento;
- f) Avaliar o benefício de posicionadores multi-constelação, tanto no modo absoluto quando nos apresentados anteriormente, e verificar em qual ordem de levantamento se enquadrariam;
- g) Realizar o processamento GNSS utilizando outros sensores auxiliares, como hodômetros, ou mais de duas antenas GNSS, sobretudo em navios de grande porte;
- h) Avaliar o uso do arquivo .CLK com um intervalo de 5 s no processamento;
- i) Pesquisar limiares de incertezas mais adequados para filtragem de *outliers* com a lancha no modo cinemático, por exemplo, número mínimo

de satélites, número de ambiguidades fixadas, desvio padrão máximo, VDOP máximo etc.

### 6.1.2 Determinação do SEP

- a) Avaliar as componentes das incertezas relacionadas à medição do nível do mar no sensor da estação maregráfica por meio do Teste de Van de Castelle (LENNON, 1968);
- b) Avaliar a incerteza do NR entre várias metodologias de análise harmônica, por exemplo, utilizando os softwares PacMaré (Franco, 2008), T-Tide (Pawlowicz, Beardsley, e Lentz, 2002) e U-tide (Codiga, 2011);
- c) Como no Brasil o NR está relacionado ao Nível médio, pode-se avaliar sua incerteza mediante diferentes períodos de observação do nível do mar, tais como 32 dias, 1 ano, 2 anos, 5 anos, 10 anos e 19 anos. Tais variações alterariam tanto a determinação das constantes harmônicas quanto o NMM;
- d) Investigar o tipo de NR mais adequado para cada região do Brasil, por exemplo, em determinadas localidades da Região Sul do país a maré meteorológica predomina sobre a maré astronômica. Portanto, seria mais adequado o uso de outros tipos de NR que levam em consideração os efeitos meteorológicos, tais como LAT ou MLLW, ao invés do MLWS, que considera somente as principais componentes astronômicas;
- e) Calcular o SEP na forma de uma superfície contínua em uma área por meio de um modelo hidrodinâmico, geoidal (por exemplo: MAPGEO 2015) e de topografia do nível médio do mar. Comparar o SEP calculado por este modelo com o SEP determinado pela lancha hidrográfica;
- f) Uma vez realizado o grid do SEP com a lancha, sugere-se avaliar diferentes formas de interpolação kriging, variando os parâmetros de acordo com o semi-variograma dos dados;
- g) Um espaçamento entre as linhas percorridas pela lancha de 1 km é recomendado por NOAA (2019). Dessa forma, para trabalhos futuros, sugere-se investigar outros espaçamentos de linhas no cálculo do SEP e de sua incerteza.

## REFERÊNCIAS

ABDALLAH, A. T. M. Precise Point Positioning for Kinematic Applications to Improve Hydrographic Survey, 2016. Tese (Doctorate of Engineering Sciences) - Institute of Engineering Geodesy (IIGS), University of Stuttgart, 2016. Disponível em: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/9043>. Acesso em: 31 jul 2021.

ABDULLAH, M. A. B.; OMAR, A, H. Geoid Based Seamless Vertical Height Datum for Marine Cadastre Application. **Geoinformation Science Journal**, Malasya, 2011. Disponível em: [https://mafiadoc.com/queue/geoid-based-seamless-vertical-height-datum-for-\\_59e44c791723ddb515b761.html](https://mafiadoc.com/queue/geoid-based-seamless-vertical-height-datum-for-_59e44c791723ddb515b761.html). Acesso em: 24 jul. 2020.

ADAMS, R. (2003). “Seamless Digital Data and Vertical Datums.” **Proceedings of the FIG Working Week**, Paris, France, 13-17 April 2003.

ADAMS, R. The Development of a Vertical Reference Surface and Model for Hydrography – a Guide. In: XXIII INTERNATIONAL FIG CONFERENCE, 2006, Munich, Germany. **Proceedings of the FIG Working Week**, Munich, Germany: UK Hydrographic Office, 2006. p. 1-13.

ALKAN, R. M.; ÖCALAN, T. Usability of the GPS precise point positioning technique in marine applications. **Journal of Navigation**, v. 66, n. 4, p. 579–588, 2013.

ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, LEGRAND J, GARAYT B, BOUCHER C (2007) ITRF2005: a new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and earth orientation parameters 2007. **J Geophys Res** 112(B09401). doi:10.1029/ 2007JB004949

ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. **Analysis and results of ITRF2014**. 2017 (IERS Technical Note; 38) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 76 pp., ISBN 978-3-86482-088-5 (print version), 2017.

ALVAREZ MACHUCA, M. C. Á.; PULIDO NOSSA, D. A. P.; SOLANO TRULLO, L. J. S.; BARRERO OVIEDO, F. Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano. **Boletín Científico Cioh**, [s.l.], n. 36, p. 53-69, 12 dez. 2018. DOI.: 10.26640/22159045.438.

AMSYAR, M.; ABDULLAH, B.; OMAR, A. Geoid Based Seamless Vertical Height Datum for Marine Cadastre Application. **Geoinformation Science Journal**, April, p. 1–16, 2011.

ARENTZ, M. F. R. **A Modelagem Hidrodinâmica Como Auxílio à Navegação no Canal Norte do Estuário do Amazonas**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ARGONÁUTICA. **Redraft**: Sistema de Calado Dinâmico. 2020. Disponível em: <<https://argonautica.com.br/redraft/>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

ARROYO-SUAREZ, E. N.; HSIAO, V.; MABEY, D. L. Implementation of a positioning and telemetry buoy to determine chart datum for hydrographic survey applications. **Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, 2005**, v. 2005, p. 1726–1728, 2005.

BEN DEAN, C. T. U. L. (UK). Evaluation of GNSS-derived tidal information in hydrographic applications. **Hydro14**, n. October, 2014. Disponível em: [http://www.hydroconferences.org/documents/hydroconferences/downloads/5/final\\_programme.pdf](http://www.hydroconferences.org/documents/hydroconferences/downloads/5/final_programme.pdf). Acesso em: 01 mai 2021

BERTIGER, W., BAR-SEVER, Y., DORSEY, A., HAINES, B., HARVEY, N., HEMBERGER, D., HEFLIN, M., LU, W., MILLER, M., MOORE, A. W., MURPHY, D., RIES, P., ROMANS, L., SIBOIS, A., SIBTHORPE, A., SZILAGYI, B., VALLISNERI, M., & WILLIS, P. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. **Advances in Space Research**, 66(3), 469–489. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015>. Acesso em: 03 mai 2021

BISNATH, S.; WELLS, D.; HOWDEN, S.; et al. Development of an operational RTK GPS-equipped buoy for tidal datum determination. **International Hydrographic Review**, v. 5, n. 1, p. 54–63, 2004.

BOSCH, W. Analytical Report for Integrating Hydrodynamic and Elevation Models. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016a. 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. 2020.

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. 2016c. 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. Evaluating Technical Issues for Reconciling Continental Altimetry and

Ocean Bathymetry. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016b. Disponível em:<  
<https://www.concar.gov.br/temp/250@CLIM0009-EvaluationReport.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2020.

BRIONES, A. B. **Análise do posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS implantadas no litoral brasileiro**, 1999. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/43718/D%20-%20ALEXANDRE%20BORGES%20BRIONES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04 apr. 2021.

BROST, E. Technical Doubts About TerraPos. Mensagem recebida por even.broste@terratec.no. 19 maio 2021.

CANADIAN HYDROGRAPHIC SERVICE (CHS). **Standards for Hydrographic Surveys**. Survey Management Guidelines. 2013. Disponível em:<  
<https://ppa.gc.ca/sites/default/files/2018-09/CHS%20Standards%20for%20Hydrographic%20Surveys.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2020.

CARVALHO, R. F. **O GPS nos levantamentos Hidrográficos. 1990**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/36651/D%20-%20ROBERTO%20FIGUEIRA%20CARVALHO.pdf?sequence=1>. Acesso em: 02 fev. 2021.

CHANG, C. C.; LEE, H. W.; TSUI, I. F. Preliminary test of tide-independent measurement based on GPS. 2011 **Chung Cheng Institute of Technology**. , p. 1–13.

CODIGA, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp.  
<ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>.

COLIN, J. **Coastal Mapping Portal Demonstration**. 2020. Disponível em:<  
<http://www.searica.eu/documents/category/26-2017-02-07?download=173:170207-joseph-colin-worldline.>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). **Comitê de Integração**

**dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima**. 2016. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheEntidades.aspx?cod=25>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **CPRM debate utilização de novas tecnologias nos projetos de Geologia Marinha**. 2019. Disponível em: <<https://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/CPRM-debate-utilizacao-de-novas-tecnologias-nos-projetos-de-Geologia-Marinha-5806.html>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

CONSELHO NACIONAL DE PRATICAGEM (CONAPRA). **Novo DPC, Almirante Roberto visita Praticagem do RJ e conhece o ReDRAFT**. 2020. Disponível em: <<https://www.praticagemdobrasil.org.br/novo-dpc-almirante-roberto-visita-praticagem-do-rj-e-conhece-o-redraft/>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

CRUSTAL DYNAMICS DATA INFORMATION SYSTEM (CDDIS DAAC). 2020. Global Navigation Satellite System (GNSS) Overview. Disponível em: <[https://cddis.nasa.gov/Techniques/GNSS/GNSS\\_Overview.html](https://cddis.nasa.gov/Techniques/GNSS/GNSS_Overview.html)>. Acesso em: 29 jul. 2020.

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). **DTU Space**. 2020. 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: 20 jul. 2020.

DELFOZ MARÍTIMA, 2021, Offsets da Lancha Delfos. Disponibilizado pessoalmente para O Autor.

DE LANGE BOOM, B. Vertical Datum Separation Models for the British Columbia Coast. In: **CHC 2012 CONFERENCE**. Niagara Falls, Canada. 2012.

DI, M.; ZHANG, A.; GUO, B.; et al. Evaluation of real-time ppp-based tide measurement using igs real-time service. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 10, 2020.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. NORMAM-25/DHN 2º Revisão. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/266>>. Acesso em: 13 jul. 2020.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS (DPC). **Normas da autoridade marítima para implantação e operação de sistemas para determinação de folga dinâmica abaixo da quilha**. NORMAM-33/DPC. 2019. Disponível em: <[https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/NORMAM-33\\_DPC\\_0.pdf](https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/NORMAM-33_DPC_0.pdf)>.

DODD e MILSS, 2012. Ellipsoidally Referenced Surveys Separation Models. In: **FIG Working Week 2012 Rome, Italy, 6-10 May 2012**.

DODD, D.; MILLS, J. Ellipsoidally Referenced Surveys: Issues and Solutions. **The International Hydrographic Review**, v. November, n. 6, p. 19–29, 2011. Disponível em: <[http://www.iho.int/mtg\\_docs/IHReview/2011/IHR\\_Nov032011.pdf](http://www.iho.int/mtg_docs/IHReview/2011/IHR_Nov032011.pdf)>.

EL-DIASTY, M.; AL-HARBI, S.; PAGIATAKIS, S. Development of Saudi continuous chart datum: arabian gulf case study. **Geomatics, Natural Hazards And Risk**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 1738-1749, 1 jan. 2019. DOI.: 10.1080/19475705.2019.1614682.

EI-Diasty, M. (2010) Development of a MEMS-Based INS/GPS Vessel Navigation System for Marine Applications. PhD Dissertation, Publication Number NR64919, York University, Toronto.

EI-Diasty, M. (2020). Evaluation of KSACORS-based network GNSS-INS integrated system for Saudi coastal hydrographic surveys. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 11(1), 1426–1446. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1799081>

ELLMER, W.; GOFFINET, P. Tidal Correction Using GPS - Determination of the Chart Datum. In: **XXIII FIG CONGRESS**, 2006. Munich. **Proceedings...**, Munich: 2006, p. 1-14.

EKMAN, M. 1989. Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. *Bull. Geod.* 63: 281–296. doi: 10.1007/BF02520477.

EMODNET Coastal Mapping. European Marine Observation and Data Network, 2017, Final Report, Ver. 1. Disponível em: <[https://emodnet.ec.europa.eu/sites/emodnet.ec.europa.eu/files/public/final\\_report\\_emodnet\\_coastalmapping\\_1.1.pdf](https://emodnet.ec.europa.eu/sites/emodnet.ec.europa.eu/files/public/final_report_emodnet_coastalmapping_1.1.pdf)>. Acesso em: 22 jul. 2020.

EURIQUES, J. F. **Determinação da umidade do solo por meio da técnica de refletometria GNSS: primeiros resultados no Brasil**. 2018. 118 f. Dissertação

(Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

FARAHANI, H. H., Klees, R., & Slobbe, C. (2017). Data requirements for a 5-mm quasi-geoid in the Netherlands. **Studia Geophysica et Geodaetica**, 61(4), p.675–702. DOI.:10.1007/s11200-016-0171-7.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES GÉOMÈTRES (FIG). **Cost Effective Precise Positioning with GNSS**. N. 57. Copenhagen, Denmark. 2019. Disponível em: < <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub57/Figpub57.pdf> >. Acesso em: 20 jul. 2020.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES GÉOMÈTRES (FIG). **Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography**. N. 62. Copenhagen, Denmark. 2014. Disponível em: < <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub62/Figpub62.pdf> >. Acesso em: 20 jul. 2020.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES GÉOMÈTRES (FIG). **FIG Guide on the Development of a Vertical Reference Surface for Hydrography**. N. 37. Copenhagen, Denmark. 2006. Disponível em: <<https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub37/pub37.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2020.

FENG, G.; JIN, S.; ZHANG, T. Coastal sea level changes in Europe from GPS, tide gauge, satellite altimetry and GRACE, 1993–2011. **Advances In Space Research**, [s.l.], v. 51, n. 6, p. 1019-1028, mar. 2013. DOI. 10.1016/j.asr.2012.09.011.

FINALISING SURVEYS FOR THE BALTIC MOTORWAYS OF THE SEA (FAMOS). **Projeto FAMOS**. 2020. Disponível em:< <http://www.famosproject.eu/>>. Acesso em: 15 jul. 2020.

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. Especificações e normas gerais para levantamentos GPS. (versão preliminar) **Fator GIS – Revista do Geoprocessamento.**, n. 05, p. 31-34, 1994.

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

FRANZ, G.; LUERSEN, D.; BONATTO, B.; PALOSCHI, N.; ITALINI, D.; RODRIGO, P.; E NOERNBERG, M. Sistema Operacional de Modelagem Hidrodinâmica para a Plataforma Sudeste do Brasil Observatório do Mar. In: XIII **SIMPÓSIO SOBRE ONDAS, MARÉS, ENGENHARIA OCEÂNICA E OCEANOGRAFIA POR SATÉLITE**. Arraial do Cabo, Brazil. 2018.

GEORGAS, N.; WEN, B.; ZHAO, Y. **Calculation of vertical tidal datums for the tidal Hudson River north of Yonkers, New York**. Relatório Técnico Final. Stevens Institute of Technology. Disponível em: <  
[https://web.stevens.edu/ses/documents/fileadmin/documents/pdf/Final\\_Report\\_2013\\_1220.pdf](https://web.stevens.edu/ses/documents/fileadmin/documents/pdf/Final_Report_2013_1220.pdf)>. Acesso em: 30 jul. 2020.

GONZÁLEZ ACUÑA, J.; ARROYO SUAREZ, E. N. **Comparative methodologies for sounding reduction applied to a bathymetric survey referenced to the WGS84 ellipsoid , executed in Concepcion Bay and Gulf of Arauco, VIII region, Chile**. 2013. Disponível em:<  
[https://www.yumpu.com/en/document/view/15374601/comparative-methodologies-for-sounding-reduction-applied-to-a->](https://www.yumpu.com/en/document/view/15374601/comparative-methodologies-for-sounding-reduction-applied-to-a-). Acesso em: 24 jul. 2020.

GOURLAY, T. P.; CRAY, W. G. Ship under-keel clearance monitoring using RTK GPS. **19th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference 2009 and the 12th Australasian Port and Harbour Conference 2009, COASTS and PORTS 2009**, n. Agosto, p. 368–372, 2009.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (GERGS). Plano de Desenvolvimento e zoneamento. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <  
[http://antigo.infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento\\_portuario/pdz/pdz24.pdf](http://antigo.infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/pdz/pdz24.pdf)  
 >. Acesso em: 01 nov. 2020.

GREJNER-BRZEZINSKA, D. A., KASHANI, I., & WIELGOSZ, P. (2005). On accuracy and reliability of instantaneous network RTK as a function of network geometry, station separation, and data processing strategy. **GPS Solutions**, 9(3), 212–225. <https://doi.org/10.1007/s10291-005-0130-1>. Disponível em:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-005-0130-1>. Acesso em 15 ago 2021

GREWAL, ANDREWS, BARTONE, (2020). Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation and Integration. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA

GRGIĆ, M.; NEREM, R. S.; BAŁIĆ, T. Absolute Sea Level Surface Modeling for the Mediterranean from Satellite Altimeter and Tide Gauge Measurements. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 40, n. 4, p. 239-258, 22 jun. 2017. DOI:

10.1080/01490419.2017.1342726.

HAINS, D. Success Depends on the Quantity and Quality of All Available Data. Preparing for Hydrographic Artificial Intelligence Network and Systems. **Hydro international**. p. 16-17, july/august, 2019.

HEIN, G. W., H. LANDAU, H. BLOMENHOFER. (1991). "**Determination of Instantaneous Sea Surface, Wave Heights and Ocean Currents Using Satellite Observations of the Global Positioning System.**" Unpublished report of the Institute of Astronomical and Physical Geodesy, University of the Federal Armed Forces Munich, Neubiberg, Germany.

HESS, K. W. Spatial Interpolation of Tidal Data in Irregularly-shaped Coastal Regions by Numerical Solution of Laplace's Equation. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, [s.l.], v. 54, n. 2, p. 175-192, fev. 2002. DOI.: 10.1006/ecss.2001.0838.

HESS, K. W, SCHMALZ R., ZERVAS C, COLLIER W.. TIDAL CONSTITUENT AND RESIDUAL INTERPOLATION (TCARI): A New Method for the Tidal Correction of Bathymetric Data. **National Oceanic and Atmospheric Administration**.

HOCKER, B.; WARDWELL, N. Tidal datum determination and VDatum evaluation with a GNSS buoy. 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2010, ION GNSS 2010. **Anais...** . v. 3, p.2076–2086, 2010.

HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H., WASLE. E, 2007. GPS, GLONASS, Galileo and more. Austria: Springer Wien New York, 2007.

HUGHES, C. W.; BINGHAM, R. J. An Oceanographer's Guide to GOCE and the Geoid. **Ocean Science**, [s.l.], v. 4, n. 15, p.15-29, 2008.

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>. Acesso em: 27 dez. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos->

processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e. Acesso 06 de julho de 2021.

IGNS – International GNSS Service. Disponível em : <  
[https://www.igs.org/products/#real\\_time\\_comparison](https://www.igs.org/products/#real_time_comparison) >. Acesso 13 de julho de 2021.

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.

ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K; TURNER, J. F.; TALBOT, A. J.; LESSNOFF, A. P. Accuracy of vertical datum surfaces in coastal and offshore zones. **Survey Review**, [s. l.], v. 45, n. 331, p. 254-262, jul. 2013. DOI.: 10.1179/1752270613y.0000000040.

INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRAUDAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA (COPPE). Pesquisadores da Coppe apresentam Big Data das Baías do Brasil. 2018. Disponível em <https://coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/pesquisadores-da-coppe-apresentam-big-data-das-baias-do-brasil> Acesso em: 03 nov. 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://geofp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](ftp://geofp.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). GRID Interpolado do HgeoHnor/ RM. Mensagem recebida por raphael.morais@ibge.gov.br. 5 julho 2022.

INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION OF UNESCO (IOC/UNESCO); INTERNATIONAL MARITIME ORGANISATION (IMO); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (FAO); UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **A Blueprint for Ocean and Coastal Sustainability**. Paris. 2011. Disponível em: <  
[https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Water%20and%20Ocean%20Governance/interagency\\_blue\\_paper\\_ocean\\_rioPlus20.pdf](https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Water%20and%20Ocean%20Governance/interagency_blue_paper_ocean_rioPlus20.pdf)  
 >. Acesso em: 20 jul. 2020.

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>. Acesso em: 13 jul. 2020.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. (2011). Manual on Hydrography, (C-13), Monaco. Disponível em: <<https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/C-13.pdf> >. Acesso em 01 jun 2021.

ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame, J. Geod., 85(8), 457–473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.

KATO, T., TERADA, Y., KINOSHITA, M., KAKIMOTO, H., ISSHIKI, H., MATSUSHI, M., YOKOYAMA, A., & TANNO, T. (2000). Real-time observation of tsunami by RTK-GPS. **Earth, Planets and Space**, 52(10), 841–845. <https://doi.org/10.1186/BF03352292>

KE, H.; LI, F.; AI, S.; LEI, J.; WANG, Z.; ZHANG, S. Establishment of Chart Datum and Vertical Datum Transformation for Hydrography in the Chinese Great Wall Bay, Antarctic Peninsula. **Journal Of Surveying Engineering**, [s.l.], v. 146, n. 2, p. 1-12, maio 2020. DOI.: 10.1061/(asce)su.1943-5428.0000312.

KEYSERS, J.H.; QUADROS, N.D.; COLLIER, P.A. Vertical datum transformations across the Australian littoral zone. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 31, n. 1, p. 119-128, 2015.

KONGSBERG. Kongsberg 3710 receiver differential GNSS receiver instruction manual. 2013. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/manual/1422390/Kongsberg-3710.html>>. Acesso em 20 jun. 2021.

KRUEGER, C. P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. 1996. 288 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

KRUEGER, C. P., DE OLIVEIRA JUNIOR, P. S., DOS ANJOS GARNÉS, S. J., ALVES, D. B. M., & EURIQUES, J. F. (2020). Real-time GNSS positioning: Evolution, practical applications and perspectives for the future. **Revista Brasileira de Cartografia**, 72, 1359–1379. <https://doi.org/10.14393/RBCV72NESPECIAL50ANOS-56620>.

LACHAPPELLE, G., C. LIU, G. LU, Q. WEIGEN, R HARE. (1993B). "Water Level Profiling with GPS." **Proceedings of the Institute of Navigation GPS**. 1993, Salt

Lake City, Utah, U.S.A, The Institute of Navigation, Alexandria, Virginia, U.S.A, pp. 1581 - 1587.

LEE, W.; CHOI, Y.; HAN, K.; PARK, H. Construction of Tidal Datums Based on Ellipsoid Using Spatial Interpolation. In: **FIG WORKING WEEK 2017**. Helsinki, Finland. 2017.

LEFAIVRE, D.; GODIN, A.; DODD, D.; HERRON, T. The Continuous Vertical Datum Canadian Waters Project (Beginnings, Vision, Methods and Progress). In: **CHC 2010 CONFERENCE**. Quebec, QC, Canada. 2010.

LEICK, (2004): GPS Satellite Surveying, 3rd edition, Wiley, New Jersey, USA.

LEICK, A. Q. LIU, C. MUNDO. (1990). "Investigation of the use of the Global Positioning System (GPS) to Determine Tides and Water Level Heights." Final contract report prepared for the US Army Topographic Engineering Center, Alexandria, Virginia, U.S.A., November, 135 pp.

LENNON, G. W., 1968: The evaluation of tide gauge performance through the van de Castele test. *Cah. Oceanogr.*, 20, 867– 877.

LI, S.; FUNG, K.S. Maritime autonomous surface ships (MASS): implementation and legal issues. **Maritime Business Review**, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 330-339, 18 nov. 2019. DOI.: 10.1108/mabr-01-2019-0006.

LIMA, R.S.S (2005). **Integração Gps/Ins Utilizando Sensores Inerciais Baseados Em Sistemas Microeletromecânicos (Mems)**. Curitiba, 158 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná.

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. Vinculação entre os níveis de referência altimétricos e batimétricos para o posicionamento vertical onshore e offshore e o estudo dos impactos da elevação do NMM na zona costeira. In: VII **SIMGEO**. Recife, Brasil. 9 de novembro de 2018.

MACIUK, K.; SKORUPA, B. Test of GNSS online service PPP kinematic solutions. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 11, n. 3, p. 97, 2017.

MANN, D.; MANAGER, S. S.; GEOSURVEY, G. GPS Techniques in Tidal Modelling. **International Hydrographic Review**, v. 8, n. 2, p. 59–71, 2007.

MÄKINEN, J. and J. IHDE, 2008. The permanent tide in height systems. In eds. F. Sans`oand M. G. Sideris, Observing our changing earth, volume 133 of **International Association of Geodesy Symposia**, 81–87. Berlin Heidelberg: Springer.

MARINHA DO BRASIL. Centro de Hidrografia da Marinha. **Sondagem Batimétrica**. 2020. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

MARTIN, R. J.; BROADBENT, G. J. Chart Datum for Hydrography. **The Hydrographic Journal**, [s.l.], n. 112, p. 9-14, abril. 2004.

MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D.; GUIMARÃES, G. DO N.; LOBIANCO, M. C. B.; COSTA, S. M. A. Validação do MAPGEO2010 e comparação com modelos do geopotencial recentes. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 18, n. 1, p. 101–122, 2012. DOI.: 10.1590/s1982-21702012000100006.

MEZINE, W. A.; SOARES, M. A.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; NADAL, C. A. Evaluation methods of reducing bathymetric surveys to the water level instantaneous water for monitoring siltation: Case study of the hydroelectric power plant reservoir Mauá. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 4, p. 736–750, 2016.

MILLS, J.; DODD, D. Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography; FIG: Copenhagen, Denmark, 2014; Disponível on-line: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub62/Figpub62.pdf> (acessado em 23 de Novembro de 2021).

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa – PROCOSTA**. Brasília: MMA, 2018. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/publicacoes/gestao-territorial/category/197-gest%C3%A3o-costeira-procosta.html?download=1443:programa-nacional-para-conserva%C3%A7%C3%A3o-da-linha-de-costa>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

MONICO, 2016. GNSS: Conceitos Fundamentais. 76 slides Notas de Aulas - Graduação em Engenharia Cartográfica FCT/UNESP.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2 ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008

MOREIRA, L. A. **Análise da acurácia e da precisão de alguns métodos de posicionamento em tempo real**. 2016. 364 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MYERS, E. VDatum Development, Upgrades, and Future. In: ADCIRC USERS GROUP MEETING 2018. [s.l.]. Maio, 2018. Disponível em: < [https://cdr.lib.unc.edu/concern/scholarly\\_works/x920g2067](https://cdr.lib.unc.edu/concern/scholarly_works/x920g2067) >. Acesso em: 29 jul. 2020.

MYERS, E.; HESS, K.; YANG, Z.; XU, J.; WONG, A.; DOYLE, D.; WOOLARD, J.; WHITE, S.; LE, B.; GILL, S.; HOVIS, G. VDatum and strategies for national coverage. In: MARINE TECHNOLOGY SOCIETY/IEEE OCEANS CONFERENCE, 2007. Vancouver, British Columbia, Canada. **Proceedings...**, Vancouver, British Columbia, Canada, 2007, p. 1-8.

MYERS, E.P.; WONG, A.; HESS, K.; WHITE, S.; SPARGO, E.; FEYEN, J.; YANG, Z.; RICHARDSON, P.; AUER, C.; SELLARS, J. Development of a national VDatum, and its application to sea level rise in North Carolina. In: THE U. S. HYDROGRAPHIC CONFERENCE, 2005. San Diego, CA, USA. **Proceedings...**, San Diego, CA, USA, 2005, p. 29-31.

WARDWELL. **Offshore Vertical Datum Separations From Post-Processed Kinematic (Ppk) Heights Observed Along a Scheduled Ferry Route**, 2008. Tese (Master in Ocean Science in Earth Science: Ocean Mapping), University of New Hampshire. Disponível em: <http://ccom.unh.edu/publications/establishing-chart-datum-across-bay-fundy-using-virtual-tide-gauges>. Acesso em 31 jul 2021.

NAKAO, T. H.; KRUEGER, P. C; Verificação da variação do nível instantâneo da água utilizando diferentes medidores. XXII **SBRH**, Florianópolis/SC 2017. Disponível em: < <https://eventos.abrh.org.br/xxiisbrh/chamada-trabalhos.php> >. Acesso em: 31 julho 2021.

BROST, E. 2021a Technical Doubts About TerraPos. Mensagem recebida por even.broste@terratec.no. 19 may 2021.

BROST, E. 2021b Technical Doubt about the standard deviation in the different surveys using different methods. Mensagem recebida por even.broste@terratec.no. 14 jun 2021.

NASCIMENTO, G. A. G. **Verificação da Aplicabilidade de Dados Obtidos por Sistema Laser Batimétrico Aerotransportado à Cartografia Náutica**. 2019. 112 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2019.

NATIONAL GEODETIC SURVEY (NGS). **Ten years strategic plan 2013 – 2023.** Positioning America For the Future. 2013. Disponível em: <[https://www.ngs.noaa.gov/web/news/Ten\\_Year\\_Plan\\_2013-2023.pdf](https://www.ngs.noaa.gov/web/news/Ten_Year_Plan_2013-2023.pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2020.

NATIONAL GEODETIC SURVEY (NGS). **Socio-Economic Benefits Study: Scoping the Value of CORS and GRAV-D.** 2009. Disponível em <:[https://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/Socio-EconomicBenefitsOfCORSandGRAV-D](https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/Socio-EconomicBenefitsOfCORSandGRAV-D)>. Acesso em: 13 nov. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Documentation for VDatum (and the Datum Tutorial).** Vertical Datum Transformation Software Version 1.06. 2004. Disponível em: <[https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2002\\_milbert\\_VDatum106.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2002_milbert_VDatum106.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Tidal Datums and their applications.** NOAA Special Publication NOS CENTER FOR OPERATIONAL OCEANOGRAPHIC PRODUCTS AND SERVICES (CO-OPS): Silver Spring, MD, USA, 2001. Disponível em <[https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/tidal\\_datums\\_and\\_their\\_applications.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/tidal_datums_and_their_applications.pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables. 2019. Disponível em:< <https://nauticalcharts.noaa.gov/publications/docs/standards-and-requirements/specs/hssd-2019.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2021.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Mapping and Charting.** 2020a. Disponível em:< <https://tidesandcurrents.noaa.gov/mapping.html> >. Acesso em: 25 fev. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **V DATUM.** 2020b. Disponível em:< <https://vdatum.noaa.gov/> >. Acesso em: 15 jul. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **V DATUM: Webinar Séries.** 2018. Disponível em:< [https://geodesy.noaa.gov/web/science\\_edu/webinar\\_series/vdatum\\_01-11-](https://geodesy.noaa.gov/web/science_edu/webinar_series/vdatum_01-11-)

18.shtml>. Acesso em: 29 jul. 2020.

NETO, W. P. A. **Utilização do sistema GNSS RTK para o ajuste de marés em batimetria automatizada multifeixe**, 2019. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Setor de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

NUDDS, S.; ROBIN, C.; MACAULAY, P. Continuous vertical datum separations for Canadian Waters: Creating Canada's first hydrographic vertical separation surfaces. **Sea Technology**, v. 57, n. 9, p. 38–42, 2016.

O. Y.; ORTEGA, R. D. E. Gestão ambiental. In: OLIVEIRA, A. M. de; BRITO, S. N. A. de (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 499-508.

O'REILLY, C.; PARSONS, S.; LANGELIER. A Seamless Vertical Reference Surface for Hydrographic Data Acquisition and Information Management. In: **CANADIAN HYDROGRAPHIC CONFERENCE**. Jun. 1996. p. 26-33.

ODAMAKI, M.; NAKAMURA, H. **Proposal on Integrated Database of Sounding Depth, Height and Mean Sea Level on Reference Ellipsoid, and A Trial of Time Variable Depth Display on ECDIS**. Relatório Técnico. Disponível em: <<https://www.oceandocs.org/handle/1834/16587>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

OLIVEIRA JUNIOR, A. M.; ARROYO, E. N. S.; RAMOS, A. M.; ARENTZ, M. F. R. Seabed Mapping on an Earth Centered Earth Fixed (ECEF) Geocentric Reference Frame. Cooperative Validation with US Navy and Brazilian Navy in Guanabara Bay, Rio de Janeiro. In: **ION GNSS 2010 CONFERENCE**. Portland OR USA. September 21 - 24, 2010.

OREIRO, F.; D'ONOFRIO, E.; FIORE, M. Altimetric Reference Connection of Nautical Charts And WGS84 Ellipsoid For The Río de La Plata. **Geoacta**, Buenos Aires, v. 40, n. 2, p. 109--120, 2016.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). **IHO Guidelines for Creating S-100 Product Specifications**. Principauté de Monaco. 2020b. Disponível em:< <https://iho.int/en/s-100-based-product-specifications> >. Acesso em: 20 jul. 2020.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). **IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Principauté de Monaco. 2020a. Disponível em:< [https://iho.int/uploads/user/pubs/Drafts/S-44\\_Edition\\_6.0.0-Final.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/Drafts/S-44_Edition_6.0.0-Final.pdf) >. Acesso em:

29 jul. 2020.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). **IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Principauté de Monaco. 2018. Disponível em: <<https://iho.int/en/miscellaneous-publications> >. Acesso em: 27 jul. 2020.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). **S-32 IHO Hydrographic Dictionary**. Principauté de Monaco. 2020c. Disponível em: <[http://iho-ohi.net/S32/engView.php?quick\\_filter=tide+heights&quick\\_filter\\_operator=Contains](http://iho-ohi.net/S32/engView.php?quick_filter=tide+heights&quick_filter_operator=Contains)>. Acesso em: 6 ago. 2020.

OSILIERI, P. R. G.; SEOANE, J. C. S.; DIAS, F. F. Coastal Vulnerability Index revisited: a case study from maricá, rj, brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 72, n. 1, p. 81-99, 30 mar. 2020. DOI.: 10.14393/rbcv72n1-47025.

PARKER, B. B.; HUFF, L. C. Modern under-keel clearance management. **International Hydrographic Review**, v. 75, n. 2, p. 143–166, 1998.

PARKER, B. The Integration of Bathymetry, Topography and Shoreline and the Vertical Datum Transformations behind It. **International Hydrographic Review**, v. 3, n. 3. p. 14-26. 2002.

PARKER, B.; MILBERT, D.; HESS, K.; GILL, S. **National Vdatum - The Implementation of a National Vertical Datum Transformation Database**. National Ocean Service. 2003. Disponível em: <[https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2003\\_parker\\_USHydro\\_national\\_vdatum.pdf](https://vdatum.noaa.gov/download/publications/2003_parker_USHydro_national_vdatum.pdf)>. Acesso em: 20 jul. 2020.

PARKER. J. G. TEUNISSEN, The least-square ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation, **J. Geodesy**, vol.70, 1995.

PAWLOWICZ, R., B. BEARDSLEY, AND S. LENTZ, "Classical Tidal "Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE", Computers and Geosciences, 2002.

PETIT, G. & LUZUM, B. 2010, IERS Technical Note 36, 179 pp

PINEAU-GUILLOU, L. **Set-up of CD using spatial altimetry and GPS**. 2009. Disponível em: <

[https://legacy.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/IHOTC/TWLWG%201/France.pdf](https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/TWLWG%201/France.pdf) >. Acesso em: 24 jul. 2020.

PINEAU-GUILLOU, L.; DORST, L. Creation of Vertical Reference Surfaces at Sea Using Altimetry and GPS. In: ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X. **Reference Frames for Applications in Geosciences**. v. 138, 2012. p.229-235. DOI. 10.1007/978-3-642-32998-2.

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.

POERBANDONO; GUMILAR, I.; SIDIQ, T. P. Hydrographic datum and GNSS heighting in the SW Java Sea, Indonesia: Comparison between observed and models of Sea Surface. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...** . v. 389, 2019. Institute of Physics Publishing.

PUGH, D.T. *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge: Cambridge University Press. 265 páginas. 2004

RAMOS, A. M. **Aplicação, Investigação e Análise da Metodologia de Reduções Batimétricas Através do Método GPS Diferencial Preciso**. 2007. 227 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RICE, G.; RILEY, J. Measuring the Water Level Datum Relative to the Ellipsoid During Hydrographic Survey. In: U. S. HYDROGRAPHIC CONFERENCE, 2011. **Proceedings...** Tampa, Florida, 2011, p. 1-11.

RIZOS, C., JANSSEN, V., ROBERTS, C., GRINTER, T. (2012): Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End?. **FIG Work in Week**, 6-10 May, Rome, Italy

ROBIN, C.; GODIN, A.; MACAULAY, P.; DE LANGE BOOM, B.; LEFAIVRE, D.; HERRON, T.; SINNOTT, D.; BALLANTYNE, A.; MALTAIS, L.; VÉRONNEAU, M. The Canadian Hydrographic Continuous Vertical Datum: Methodology and Accuracy. In: **CHC 2012 CONFERENCE**. Niagara Falls, Canada. 2012.

ROBIN, C.; MACAULAY, P.; NUDDS, S.; GODIN, A.; DE LANGE BOOM, B.;

BARTLETT, J.; MALTAIS, L.; HERRON, T.; CRAYMER, M.; VÉRONNEAU, M.; FADAIE, K. Modeling tidal water levels for Canadian coastal and offshore waters: implications for coastal change and adaptation. In: **AGU FALL MEETING SAN FRANCISCO**, December 15-19, 2014. Paper NH53A-3876.

ROBIN, C.; NUDDS, S.; MACAULAY, P.; GODIN, A.; DE LANGE BOOM, B.; BARTLETT, J. Hydrographic Vertical Separation Surfaces (HyVSEPs) for the Tidal Waters of Canada. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 39, n. 2, p. 195-222, 3 mar. 2016. DOI.: 10.1080/01490419.2016.1160011.

ROCKEN, C., T.M. KELECY. (1992). "High Accuracy GPS Marine Positioning for Scientific Applications." **GPS World**, Vol. 3, No.6, Eugene, Oregon, U.S.A., pp. 42-47.

SALVIONI, G. I movimenti del suolo nell'Italia Centro-Settentrionale. Boll. **Geodesia E Scienze Aff.** 1957, 16, 325–366

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.

SANTANA, F. R.; KRUEGER, C. P.; SANTANA, T. A. .; NASCIMENTO , G. A. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A. M. . Cartas Náuticas com Modelos SEP: Evolução Histórica, e Perspectivas para Hidrografia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 72, p. 1299–1328, 2020. DOI: 10.14393/rbcv72nespecial50anos-56616.

Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56616>. Acesso em: 1 ago. 2022.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R.. Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: conceitos relacionados, projetos desenvolvidos e desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 72, n. 2, p. 345-364, 22 jun. 2020. DOI.: 10.14393/rbcv72n2-52611.

SANTANA, T. A. **Contribuições para os Estudos de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marinha ao Longo da Costa Brasileira**. 2020. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SANTANA, T. A. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Mapa de Levantamento Hidrográfico. Curitiba: UFPR. Escala 1:2.000; 1:100.000; 1:800.000. 2022

SEEBER, G. *Satellite Geodesy* Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications. 2 ed. Berlin. New York: Walter de Gruyter, 2003.

SHI, L.; HESS, K. W.; MYERS, E. P. Spatial Interpolation of Tidal Data Using a Multiple-Order Harmonic Equation for Unstructured Grids. **International Journal Of Geosciences**, [s.l.], v. 04, n. 10, p. 1425-1437, 2013. DOI.: 10.4236/ijg.2013.410140.

SHI, L.; MYERS, E. Statistical Interpolation of Tidal Datums and Computation of Its Associated Spatially Varying Uncertainty. **Journal Of Marine Science And Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 4, p. 64, 22 set. 2016. DOI.: 10.3390/jmse4040064.

SHI, B.; WANG, M.; WANG, Y.; et al. Effect analysis of GNSS/INS processing strategy for sufficient utilization of urban environment observations. **Sensors (Switzerland)**, v. 21, n. 2, p. 1–25, 2021.

SILVA, 2015, Marés 111 f. Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Disponibilizado pessoalmente para O Autor.

SILVA, D. Condições Meteorológicas e Ambientais. In: 7º ENCONTRO SOBRE NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS. Rio de Janeiro. 21 e 22 de novembro de 2019. Disponível em: < [https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2009/condicoes\\_meteorologicas\\_e\\_ambientais.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2009/condicoes_meteorologicas_e_ambientais.pdf) >. Acesso em: 25 jul. 2020.

SIRGAS (2022a). Realizações SIRGAS. Disponível em: < <https://sirgas.ipgh.org/red-gnss/coordenadas/coordenadas-semanales/?msckid=f2693357bb3c11ec9509f0d33-Ce8af20> >. Acesso em: 1 jul. 2022.

SIRGAS (2022b). Coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS-COM. Disponível em: < <https://sirgas.ipgh.org/red-gnss/coordenadas/coordenadas-semanales/?msckid=f2693357bb3c11ec9509f0d33ce8af20> >. Acesso em: 1 jul. 2022.

SIMON, B. **Coastal Tides**. Prince de Monaco: Institut océanographique, 2013. 413 p.

SLOBBE, D. C. **Roadmap to a mutually consistent set of offshore vertical reference frames**. Netherlands: Ncg, Nederlandse Commissie Voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission, Delft, The Netherlands, 2013. 263 p. Disponível em: <https://ncgeo.nl/downloads/82Slobbe.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2020.

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.; KLEES, R.; GUNTER, B. C. Realization of a consistent set of vertical reference surfaces in coastal areas. **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 88, n. 6, p. 601-615, 26 mar. 2014. DOI.: 10.1007/s00190-014-0709-9.

SLOBBE, D. C.; KLEES, R.; VERLAAN, M.; DORST, L. L.; GERRITSEN, H. Lowest Astronomical Tide in the North Sea Derived from a Vertically Referenced Shallow Water Model, and an Assessment of its Suggested Sense of Safety. **Marine Geodesy**, v. 36, n. 1, p.31–71, 2013. DOI.: 10.1080/01490419.2012.743493.

SLOBBE, D. C.; KLEES, R.; VERLAAN, M.; ZIJL, F.; ALBERTS, B.; FARAHANI, H. H. Height system connection between island and mainland using a hydrodynamic model: a case study connecting the dutch wadden islands to the amsterdam ordnance datum (nap). **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 92, n. 12, p. 1439-1456, 9 mar. 2018. DOI.: 10.1007/s00190-018-1133-3.

SLOBBE, D. C.; SUMIHAR, J.; FREDERIKSE, T.; VERLAAN, M.; KLEES, R.; ZIJL, F.; FARAHANI, H. H.; BROEKMAN, R. A Kalman Filter Approach to Realize the Lowest Astronomical Tide Surface. **Marine Geodesy**, v. 41, n. 1, p. 44–67. 2018. DOI. 10.1080/01490419.2017.1391900.

SOARES, S.; SANTOS, E. G.; SIQUEIRA, J. C. S.; LIMA, M. K.; LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira: Ações preliminares para integração de altitudes e profundidades. In: XIII SIMPÓSIO SOBRE ONDAS, MARÉS, ENGENHARIA OCEÂNICA E OCEANOGRAFIA POR SATÉLITE, 2009. **Anais...** Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira: Arraial do Cabo, RJ, 2009, p. 1-5.

SCHLUTER, C. 1993. Tidal modelling within a mangrove environment. 11th Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering: Coastal Engineering a Partnership with Nature. Australia: Institution

TERRAPOS (2021). USER'S MANUAL. Disponibilizado pessoalmente para O Autor.

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.

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.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANISATION (UNESCO). **A ciência que precisamos para o oceano que queremos**. Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030). 2019. Disponível em: <<http://ciencianomar.mctic.gov.br/wp-content/uploads/2020/06/265198por.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2020.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), EM 1110-2-1003 Engineering and Design Hydrographic Surveying. Department of the Army, Washington, 2013.

VALE. **Navio de pesquisa patrocinado pela Vale é entregue no Rio de Janeiro**. 2015. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/navio-pesquisa-patrocinado-vale-entregue-rio-janeiro.aspx>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

VARBLA, S., ELLMANN, A., MÄRDLA, S., & GRUNO, A. (2017). Assessment of marine geoid models by ship-borne GNSS profiles. **Geodesy and Cartography**, 43(2), 41–49. <https://doi.org/10.3846/20296991.2017.1330771>.

VECTORNAV. Inertial navigation primer. 2020. Disponível em: <https://www.vectornav.com/>> Acesso em 31 de julho de 2021.

**WARDWELL, N. C. Offshore Vertical Datum Separations From Post-Processed Kinematic (Ppk) Heights Observed Along a Scheduled Ferry Route**. 2008. Tese (Master in Ocean Science in Earth Science: Ocean Mapping), University of New Hampshire. Disponível em: <http://ccom.unh.edu/publications/establishing-chart-datum-across-bay-fundy-using-virtual-tide-gauges>. Acesso em 31 jul 2021.

WARRICK, R.A., LE PROVOST, C., MEIER, M.F., OERLEMANS, J. AND WOODWORTH, P.L. 1996. Lead authors of Chapter 7 (Changes in sea level) of Climate Change 1995. **The science of climate change**. Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change, eds. J.T.Houghton, L.G.Meira Filho, B.A.Callander, N.Harris, A.Kattenberg and K.Maskell. Cambridge: Cambridge University Press. 572pp.

WATSON, C.; COLEMAN, R.; WHITE, N.; CHURCH, J.; GOVIND, R. Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoys in bass strait, Australia. **Marine Geodesy**, v. 26, n. 3–4, p. 285–304, 2003.

WELLS, D. E.; KLEUSBERG, A.; VANÍČEK, P. **A Seamless Vertical-Reference Surface for Acquisition, Management and ECnorDIS Display of Hydrographic Data**. Canadá: University of New Brunswick, 1996. 74p. Relatório técnico.

WELLS, D., 1987, Guide to GPS positioning: Canadian GPS Associates, Fredericton, NB

WIŚNIEWSKI, B.; WOLSKI, T.; GIZA, A. Adjustment of the European Vertical Reference System for the representation of the Baltic Sea water surface topography. **Scientific Journals Maritime University of Szczecin**, [s.l.], v. 38, n. 110, p. 106-117, 2014.

YUN, S.; LEE, H.; CHOI, Y.; HAM, G. Potential Accuracy of GNSS PPP- and PPK-derived Heights for Ellipsoidally Referenced Hydrographic Surveys: Experimental Assessment and Results. **Journal of Positioning, Navigation, and Timing**, v. 6, n. 4, p. 211–221, 2017.

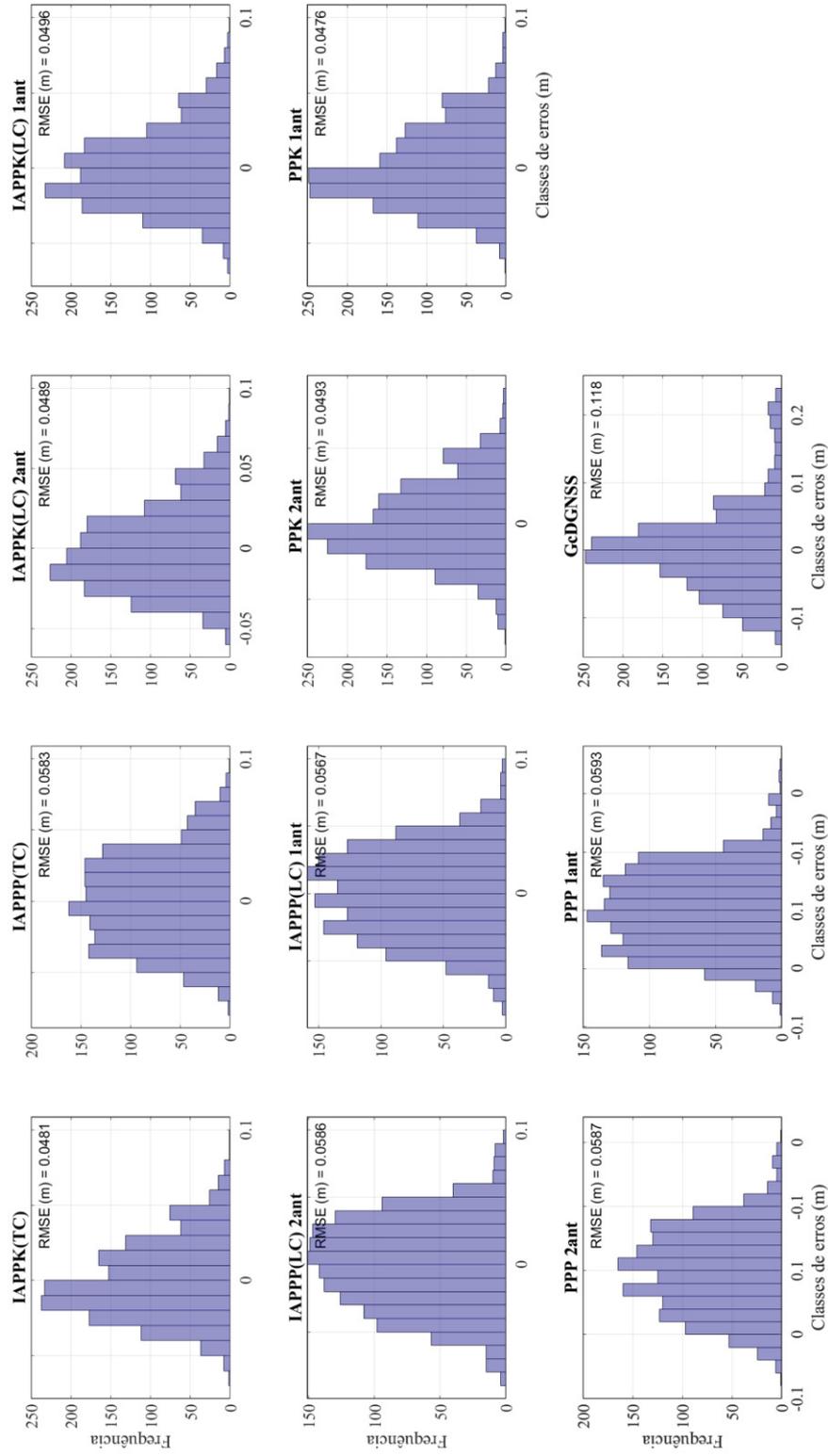
ZHAO, J.; HUGHES CLARKE, J. E.; DRUCKER, S.; DUFFY, G. On the fly GPS tide measurement along the Saint John River. **International Hydrographic Review**, v. 5, n. 3, p. 48–58, 2004.

ZIEBART, M.; ILIFFE, J.; TURNER, J.; OLIVEIRA, J.; ADAMS, R. VORF - The UK Vertical Offshore Reference Frame: Enabling Real-time Hydrographic Surveying The 20th International Technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2007). **Proceedings...** Fort Worth, TX, September 2007, pp. 1943-1949.

ZUMBERGE, J. F., HEFLIN, M. B., JEFFERSON, D. C., WATKINS, M. M., & WEBB, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 102(B3), 5005–5017. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>.

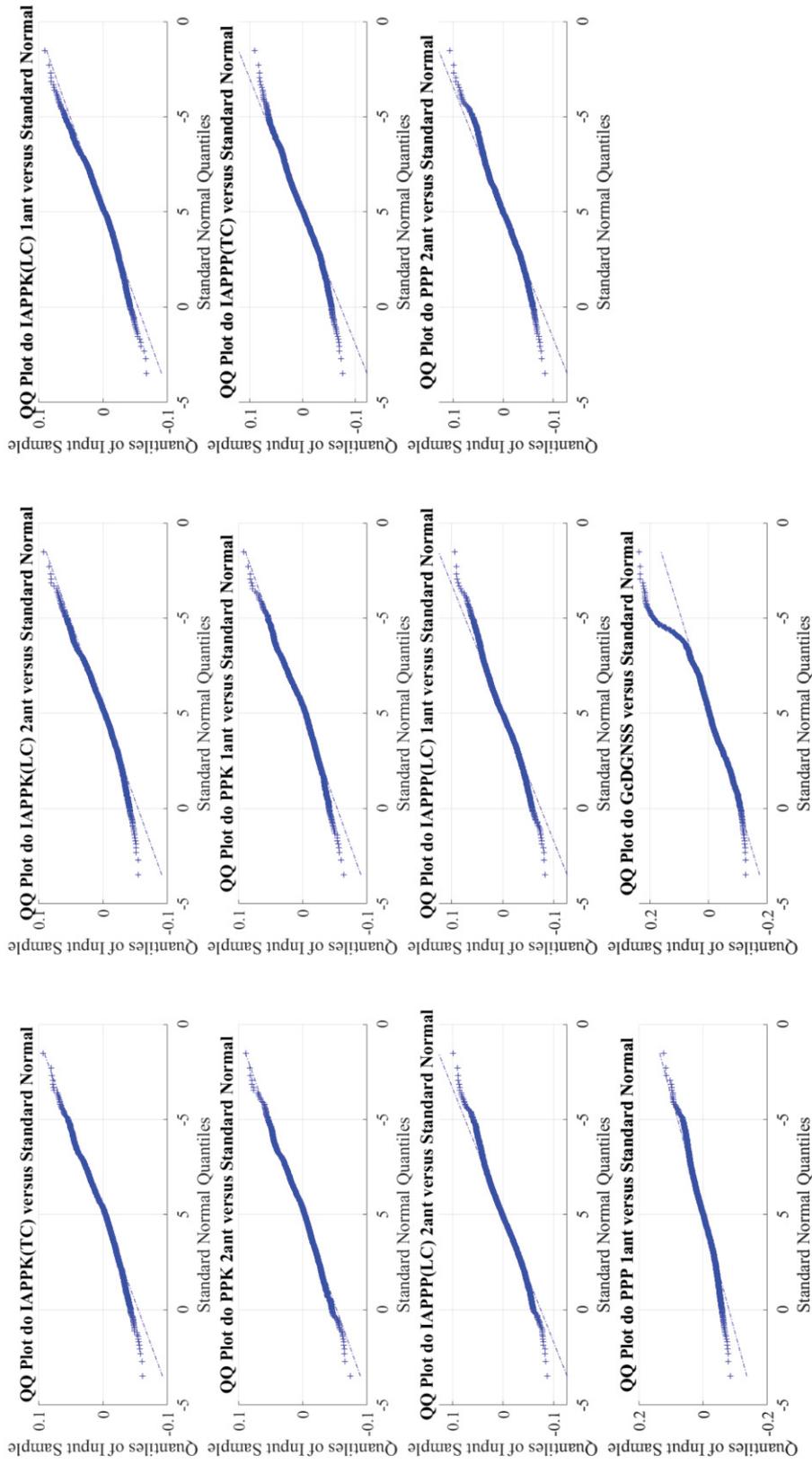
**APÊNDICE 1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ALTITUDE ELIPSOIDAL COLETADAS PELOS MÉTODOS GNSS COM A VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR MEDIDO NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA, NO DIA 11/5/2021**

FIGURA 49 – HISTOGRAMAS DOS ERROS E VALORES DE RMSE COM I.C DE 95%



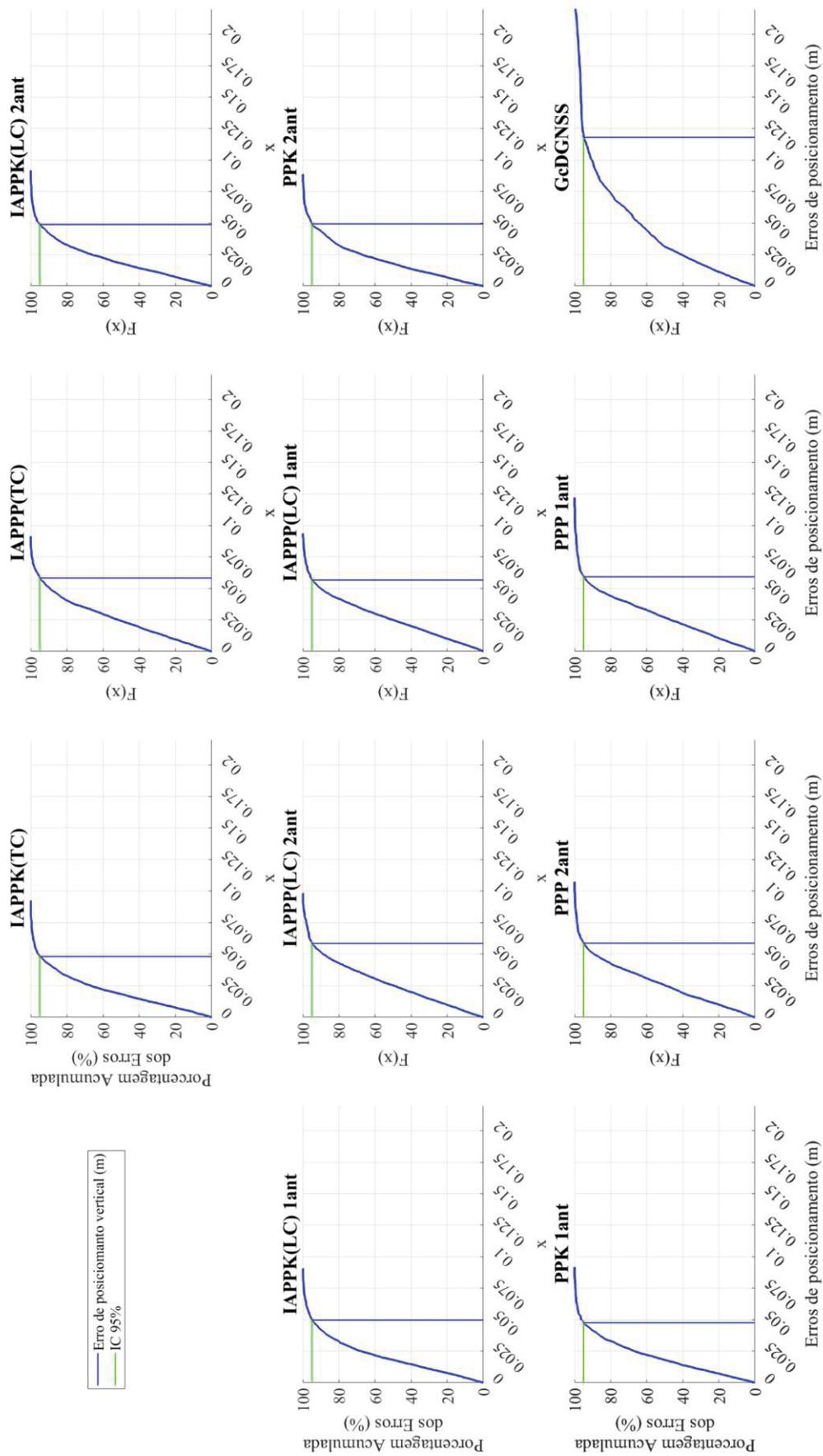
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 50 – QQ PLOT DOS ERROS ('+') EM RELAÇÃO À SUA DISTRIBUIÇÃO NORMAL ('-')



Fonte: O autor (2022).

FIGURA 51 – FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS DIFERENÇAS ENCONTRADA E VALORES DE RMSE, COM UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%

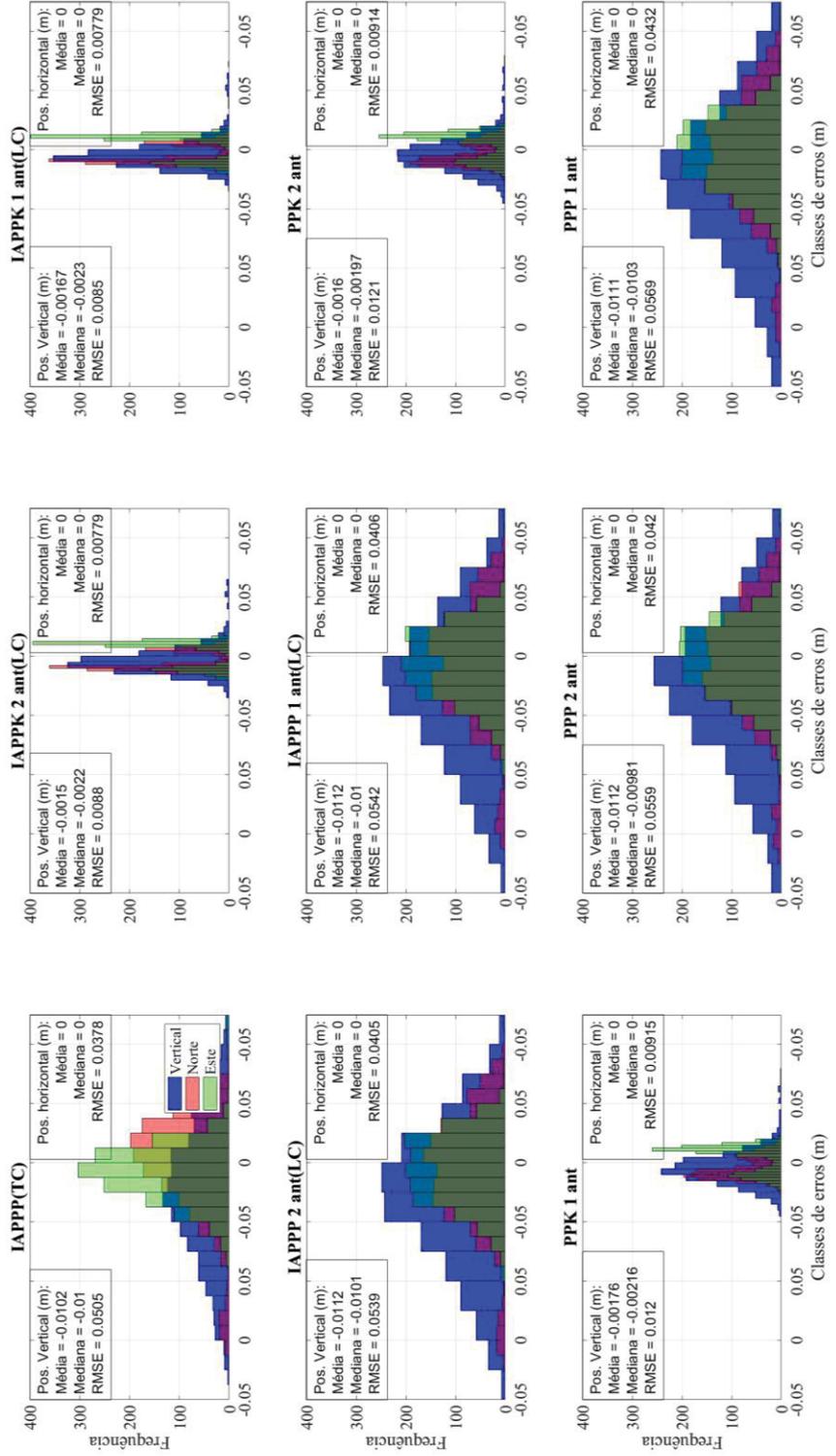


Fonte: O autor (2022).



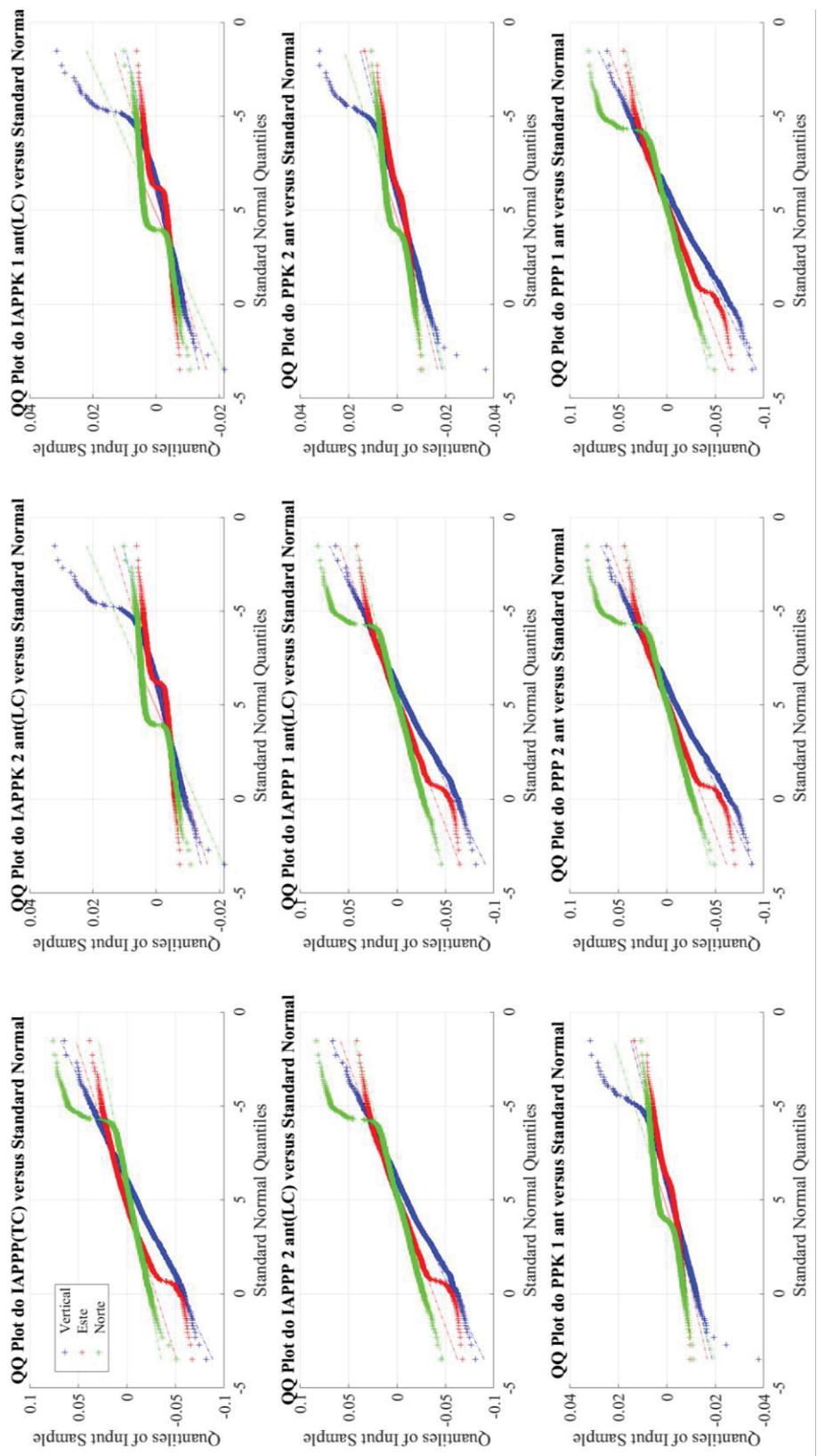
## APÊNDICE 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COMPARAÇÃO DO POSICIONAMENTO OBTIDO PELOS MÉTODOS GNSS EM COMPARAÇÃO COM MÉTODO IAPPK (TC), NO DIA 11/5/2021

FIGURA 53 – HISTOGRAMAS DAS DIFERENÇAS ENTRE OS MÉTODOS E OS VALORES DE RMSE COM I.C DE 95%



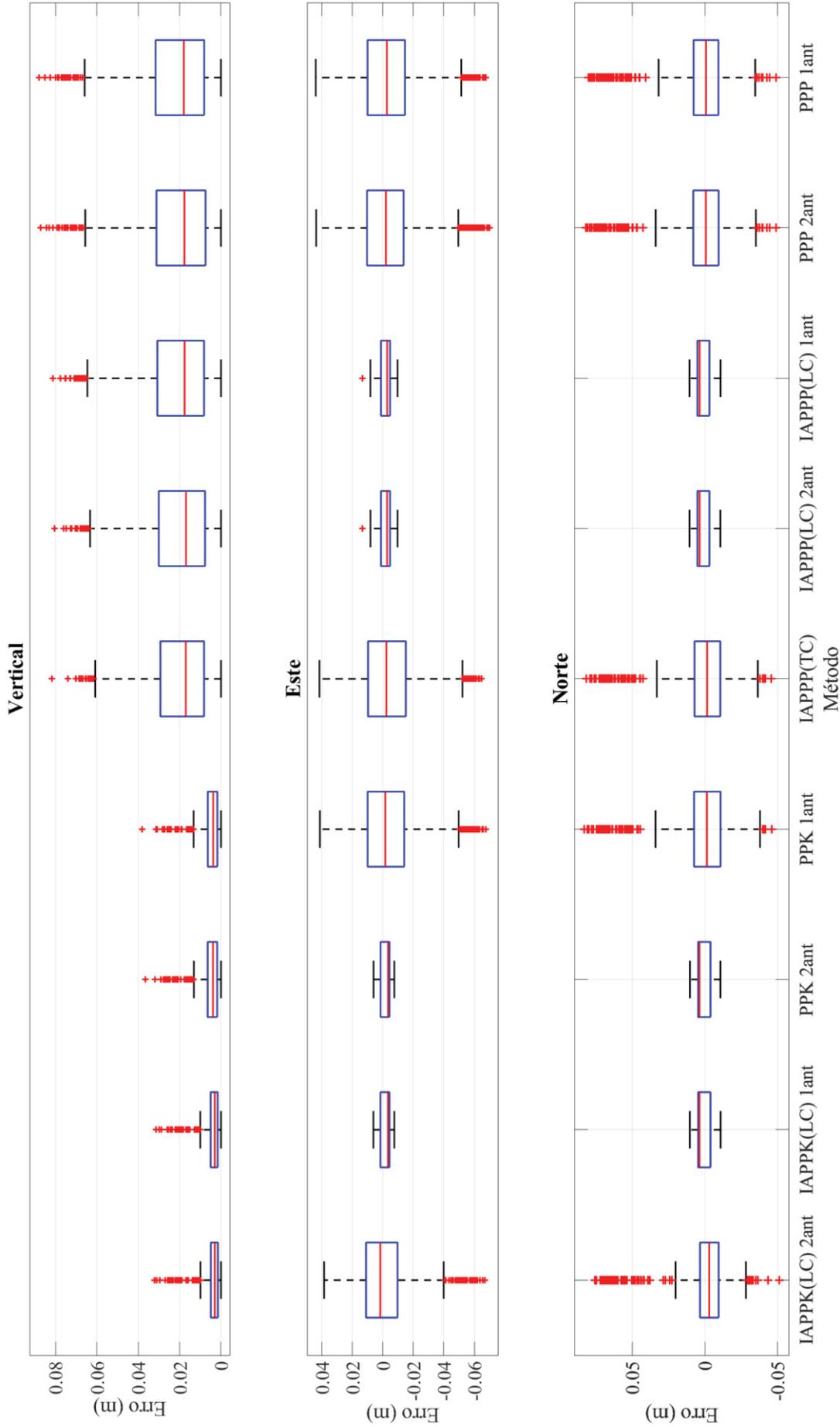
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 54 – QQ PLOT DOS ERROS ('+') EM RELAÇÃO À SUA DISTRIBUIÇÃO NORMAL ('-')



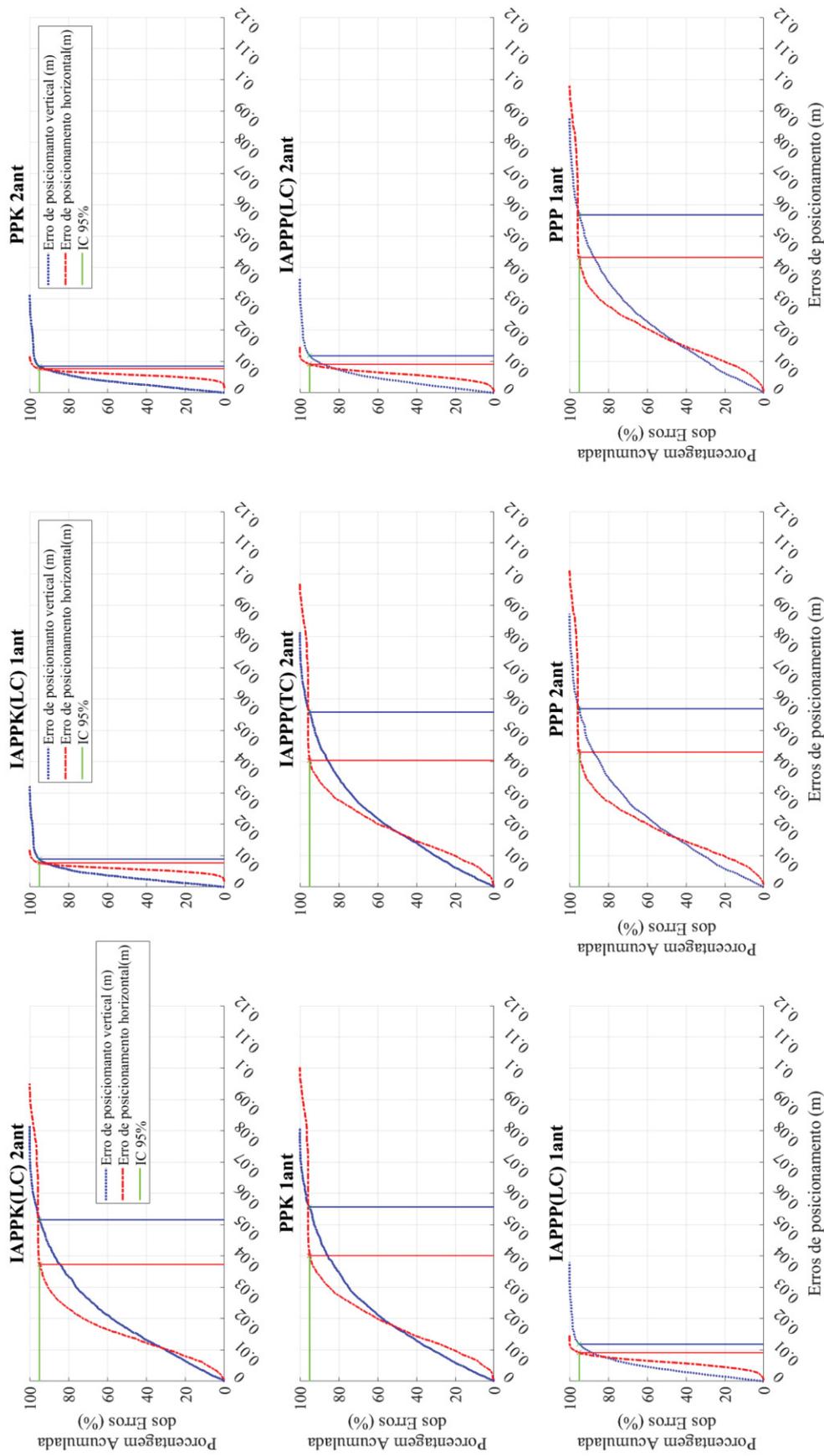
Fonte: O autor (2022).

FIGURA 55 – BOXPLOT DAS DIFERENÇAS ENCONTRADAS



Fonte: O autor (2022).

FIGURA 56 – FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS DIFERENÇAS ENCONTRADA E VALORES DE RMSE, COM UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%



Fonte: O autor (2022).