

Avaliação do emprego de sistemas GNSS RTK nas reduções batimétricas em sondagens multifeixe**Evaluation of the use of GNSS RTK systems in bathymetric reductions in multibeam soundings**

DOI:10.34117/bjdv6n7-719

Recebimento dos originais: 20/06/2020

Aceitação para publicação: 27/07/2020

Walmor Pereira de Andrade Neto

Mestre em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia

Instituição: Instituto Militar de Engenharia

Endereço: Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha Rio de Janeiro - RJ - Brasil CEP: 22.290-270

E-mail: Walmor.neto@globomail.com

José Carlos Cesar Amorim

Doutor em Engenharia Hidráulica pelo INPG-França

Professor Titular no Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção

Instituição: Instituto Militar de Engenharia

Endereço: Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha Rio de Janeiro - RJ - Brasil CEP: 22.290-270

E-mail: jcamorim@ime.eb.br

Marcelo de Miranda Reis

Doutor em Engenharia Civil pela COPPE-UFRJ

Professor Adjunto no Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção

Instituição: Instituto Militar de Engenharia

Endereço: Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha Rio de Janeiro - RJ - Brasil CEP: 22.290-270

E-mail: marceloreis@ime.eb.br

Alan José Salomão Graça

Mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-UFRJ)

Professor Assistente na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Departamento de Eng. Cartografica (CARTO)

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Endereço: Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã Rio de Janeiro - RJ - Brasil CEP: 20.550-900

E-mail: Alan.salomão@eng.uerj.br

Ítalo Oliveira Ferreira

Doutor em Informações Espaciais pela UFV, com linha de pesquisa em Hidrografia e Geodésia

Professor Adjunto na Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, setor de Engenharia de Agrimensura e Cartografia

Instituição: Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Av. Peter Henry Rolfs. s/n - Campus Universitário, Departamento de Eng. Civil, Viçosa
– MG - Brasil CEP 36570-900
E-mail: ítalo.ferreira@ufv.br

RESUMO

O processo de coleta de dados geoespaciais para a Hidrografia, vem progressivamente sendo beneficiado pela viabilidade do uso de sistemas diferenciais de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em tempo real, sejam eles empregados juntamente com equipamentos robustos a bordo de embarcações tripuladas, ou mesmo embarcados em ASVs (*Autonomous Surface Vehicles*). Este artigo apresenta testes executados em uma área de estudos da Marinha do Brasil, para avaliar as diferenças entre a utilização do sistema topocêntrico dos marégrafos referenciado ao geoide e do sistema geocêntrico global empregado nas observações GNSS, por meio do método de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) em batimetria multifeixe. A coleta dos dados foi feita em duas áreas, uma próxima e outra mais afastada do marégrafo da Ponta da Armação na DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). Foram feitas comparações com os marégrafos da Ponta da Armação, Ilha Fiscal e Boqueirão sendo gerados modelos hidrodinâmicos com transferência e fixação do nível da água para o elipsoide. Na metodologia utilizada foram realizadas comparações entre todos os modelos em função dos levantamentos utilizando a aplicação dos marégrafos e da diferença de nível gerada pela altura geométrica da embarcação fornecida pelo receptor GNSS a bordo em relação à linha d'água. Esta pesquisa permitiu validar a técnica de levantamento RTK que pode potencialmente ser utilizada em áreas onde os dados locais não existem ou são difíceis de se obter.

Palavras-chave: Posicionamento RTK, Batimetria Multifeixe, Reduções Batimétricas, Altitude Elipsoidal, Hidrografia com GNSS.

ABSTRACT

The process of collecting geospatial data for hydrography has been progressively benefited by the feasibility of using differential positioning systems GNSS (*Global Navigation Satellite System*) in real time, whether they are used together with robust equipment on board manned vessels, or even embedded in ASCs (*Autonomous Surface Craft*). This article presents tests performed in a study area of the Brazilian Navy, to assess the differences between the use of the topocentric system of the tide gauges referenced to the geoid and the geocentric system applied in GNSS measurements, using the method of RTK (*Real Time Kinematic*) positioning in multibeam bathymetry. Data collection was carried out in two areas, one near and one further away from the tide of Ponta da Armação at DHN (Directorate of Hydrography and Navigation). Comparisons were made with the tide gauges of Ponta da Armação, Ilha Fiscal and Boqueirão and hydrodynamic models were generated with transfer and fixation of the water level to the ellipsoid. In the methodology used, comparisons were made between all models depending on the surveys using the application of the tide gauges and the difference in level generated by the geometric height of the vessel provided by the GNSS receiver on board in relation to the water line. This research allowed us to validate the RTK survey technique that can potentially be used in areas where local data do not exist or are difficult to obtain.

Keywords: RTK Positioning, Multibeam Bathymetry, Bathymetric Reductions, Ellipsoidal Altitude, Hydrography with GNSS.

1 INTRODUÇÃO

As observações das marés ou do nível do mar são necessárias para o processo de redução das sondagens batimétricas, partindo do pressuposto de que cada medição de profundidade deve ser

reduzida ao datum de referência mais próximo, ou seja, as observações precisam ser referenciadas a um nível de redução local. Segundo Miguens (2000), os mares e oceanos estão sujeitos as forças astronômicas, que ocasionam variações diárias e mensais do nível do mar.

Devido a estas variações, logicamente as profundidades coletadas em um Levantamento Hidrográfico (LH) precisam ser referenciadas a um Nível de Redução (NR), geralmente definido pelo nível médio das baixa-mares de sizígia (MLWS – *Mean Low Water Springs*). O NR é definido por um plano suficientemente abaixo do nível médio dos corpos d'água, de modo que represente as profundidades mínimas a serem encontradas na região, garantindo, assim, segurança durante a navegação. Deste modo, o NR é estabelecido em função das características locais da maré ou do regime de águas de um rio (IHO, 2005). Nível de Redução (NR), deve ser coerente com as características físicas de cada região, tendo como premissa principal garantir a segurança da navegação (RAMOS & KRUEGER, 2009).

O estabelecimento do NR é realizado por meio de observações maregráficas com pelo menos 32 dias de observação (mês lunar). Cabe ressaltar que o NR apresenta variações espaciais e temporais em relação ao Datum Vertical¹ “terrestre” (RAMOS & KRUEGER, 2009). Estas medições do nível do mar, quando devidamente processadas, fornecem uma estimativa matemática do nível médio do mar e da distância entre este nível e a posição do plano referente ao NR, quantidade conhecida como semiamplitude máxima da curva de maré (Z0). No Brasil, o Z0 das cartas náuticas é calculado com base no critério de Courtier (COURTIER, 1938; NORMAM-25, 2017), enquanto o NMM (Nível Médio do Mar) local, referência para as altitudes hidrográficas (altitudes dos pontos costeiros) é estimado empregando o filtro de Tompson ou Godin (COSTA, 2010).

Durante o LH, as variações do nível do mar precisam, portanto, serem monitoradas para que posteriormente as profundidades coletadas sejam reduzidas ao NR adotado para a área do levantamento. Quando na área pesquisada houver grande variação das condições hidrodinâmicas que afetem a curva de maré, deve-se recorrer a instalação de marégrafos de tal forma que não haja variações significativas de alturas de marés entre estas estações ou, alternativamente, realizar o zoneamento contínuo ou discreto de marés (NORMAM-25, 2017).

Os levantamentos hidrográficos, empregados atualmente, são realizados por sistemas acústicos como ecobatímetros monofeixe, multifeixe e sonares interferométricos (FERREIRA et al., 2019). A utilização de receptores GNSS de precisão nos levantamentos hidrográficos não é uma novidade. O método de posicionamento GNSS diferencial aplicando a técnica RTK (*Real Time Kinematic*), sofreu

¹ O *datum* vertical é definido como um nível a partir do qual as alturas ou profundidades são medidas. Para estabelecer um *datum* vertical, é necessária uma série temporal de dados maregráficos coletados em um medidor fixo. O comprimento da série varia dependendo dos requisitos de precisão, por exemplo, um a três meses de dados para engenharia projetos e 19 anos de observações de longo prazo para o estabelecimento de uma referência vertical estável (CHANG et al., 2004).

muitos avanços nos últimos tempos. O RTK é estabelecido como um método aceitável para derivar as marés GNSS, baseando-se em tempo real transmissão de observações da fase portadora de uma estação de referência local, capaz de produzir observações de alta precisão da altura do GNSS (MANN, 2007). O método é limitado em alcance e, portanto, é ideal pesquisas locais próximas à costa, como portos e abordagens portuárias, como é o caso do presente trabalho. Willgalis et al. (2002), afirmam que a precisão do posicionamento vertical, no modo cinético, é melhor que 1,5 cm. Desse modo, as altitudes geométricas obtidas com o posicionamento RTK podem ser empregadas para modelar as variações dinâmicas do nível médio do mar, possibilitando assim, a exclusão de apoio em terra para o monitoramento da variação de maré durante a execução do LH. Além do mais, a aplicação do sistema RTK para monitoramento da maré diminuem erros associados a determinação do NR para áreas afastadas das estações maregráficas.

Diante disso, esta pesquisa objetiva analisar e validar o uso da tecnologia RTK no processo de reduções batimétricas. Para isso, foram conduzidos dois levantamentos batimétricos multifeixe em duas áreas distintas onde as reduções batimétricas convencionais por meio de três estações maregráficas (Ponta da Armação, Ilha Fiscal e Boqueirão) e RTK foram realizadas e posteriormente comparadas.

2 REDUÇÕES BATIMÉTRICAS

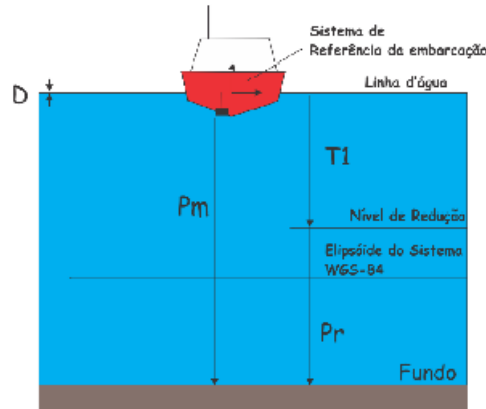
Tendo em vista que o processo de o processo de sondagem batimétrica corresponde a uma medida (geralmente adquirida por métodos acústicos) do valor da profundidade, devem ser acrescidas à sondagem correções instrumentais, de posição do transdutor, relativas a atitude da embarcação e das condições ambientais (RAMOS & KRUEGER, 2009; MEZINE et al., 2016) a fim de se obter a profundidade local com o menor erro possível, denominada profundidade reduzida.

2.1 MAREGRAFIA CONVENCIONAL

O princípio da redução de sondagens é simples, o que se busca é retirar o efeito das variações de maré durante a execução da sondagem, obtendo, assim, as profundidades reduzidas. Isto é, referenciadas ao NR.

Convencionalmente, estas reduções são realizadas por meio de observações do nível médio do mar tomadas a partir de uma estação maregráfica de referência (Figura 1).

Figura 1: Redução convencional.



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

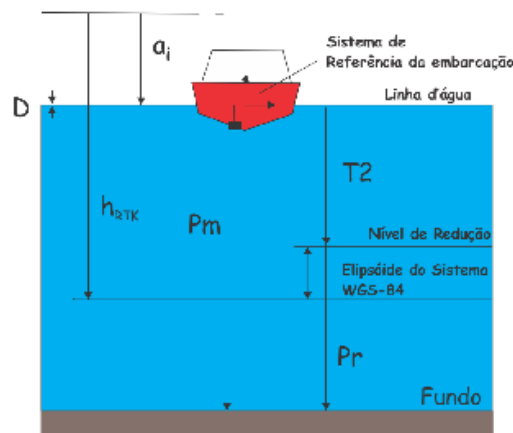
$$P_r = P_m(t) - T_1(t) + D$$

Segundo Freitas et al. (2007) a medição do nível médio do mar foi tradicionalmente feita com base nas leituras dos marégrafos, que são instrumentos que permitem medir a variação do nível das águas num determinado local. Excluindo as flutuações devidas às ondas, a fatores meteorológicos e às marés e outros fatores astronômicos, obtém-se uma leitura do nível médio do mar durante determinado período por referência ao *datum* utilizado.

2.2 MAREGRAFIA COM RTK

Tais reduções podem ser conduzidas de forma dinâmica por meio do emprego, por exemplo, de receptores RTK e RTG. A (Figura 2) ilustra a representação geométrica de reduções batimétricas obtidas a partir de correções de marés RTK (RAMOS & KRUEGER, 2009).

Figura 2: Redução utilizando RTK.



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

$$P_r = P_m(t) - T_2(t) + D$$

$$T_2(t) = h_{RTK}(t) - \beta - a_i + D$$

A técnica RTK de posicionamento diferencial tem sido utilizada desde 1985 em aplicações de alta precisão em tempo real. Embora utilize os mesmos fundamentos do DGPS (*Differential Global Positioning System*), difere deste pelo tipo de variável observada e em consequência pela precisão obtida (CHANG, 2004; MONICO, 2008). As correções diferenciais geradas da estação base, são aplicadas diretamente na fase observada da estação itinerante e são transmitidas em tempo real através de um protocolo de comunicação. A solução fixa das ambiguidades da fase da onda portadora dos receptores em movimento utiliza a inicialização automática *On the fly* (OTF) ou *On the way* (OTW) (MEZINE et al., 2016).

O RTK é um processo efetivado por um levantamento ou locação polar tridimensional baseado na determinação de linhas de base que visa à determinação das coordenadas de pontos geográficos (BAUER, 1997). Seu fundamento é o cálculo do vetor tridimensional (no sistema de coordenadas cartesianas relativas ao WGS 84) que une o ponto definido pela estação de referência ao ponto ocupado pela estação móvel (MONICO, 2008).

A estação de referência transmite informações da fase da portadora em um formato padrão por meio de um enlace à estação móvel a fim de que esta determine suas coordenadas precisas em tempo real. Estas informações são observações brutas de fase da portadora (medidas não corrigidas de quaisquer erros) ou correções diferenciais correspondentes a estas observáveis (MONICO, 2008). A transmissão dos dados para a estação móvel é de extrema importância e pode ser realizado via *link* de rádio, celular ou algum outro tipo de sistema de comunicação (KRUEGER, 1999).

Segundo Wilgalis et al. (2002), no passado o RTK limitava-se a linhas de base muito curtas (entre 5 e 10 km) em decorrência do alcance do enlace de comunicação das correções diferenciais e da utilização de apenas uma das portadoras para determinação das pseudodistâncias, ainda que a onda portadora L2 estivesse disponível para acelerar a resolução das ambiguidades. Atualmente, uma vez fixadas as ambiguidades corretamente aos seus valores inteiros, a um nível centimétrico, as soluções são obtidas em linhas de base longas com até 100km, em função da melhoria das comunicações via *link* externo de rádio, bem como por algoritmos de correções ionosféricas como discutido por Kashani et al. (2006).

Segundo Castro Júnior (2018), o campo de investigações da Geodésia Marinha estabelece uma base para diversas aplicações marítimas que dependem da determinação de posições ou medições precisas no ambiente marinho. Por sua vez, a Hidrografia tem na Geodésia sua principal ferramenta para a determinação das coordenadas geodésicas de feições náuticas (KRUEGER & SOUZA, 2014).

De forma geral, para áreas do conhecimento em Engenharias (Cartográfica e de Agrimensura, Transportes, Naval e Oceânica) as aplicações da Geodésia Marinha aliada a Hidrografia incluem

batimetria, maregrafia, gravidade marinha e geofísica, posicionamento, tectônica e sísmica, topografia da superfície do oceano, integração de referenciais topo-batimétricos.

Rose et al. (2013) mostraram que é possível interpolar a altitude elipsoidal do receptor GNSS para o nível zero definido pela maré vertical, com deslocamento centimétrico. Sato et al. (2008) desenvolveram um estudo monitorando as marés terrestres por gravidade e com a utilização de receptores GNSS empregando o método de processamento por ponto preciso (PPP), que é um serviço online gratuito para o pós-processamento de dados GNSS. Chegou-se à conclusão que o método PPP funciona muito bem para esse tipo de aplicação. A recuperação dos sinais de maré com a aferição dos dados GNSS aliados a medidores de pressão e dados de batimetria são fundamentais pela grande variação da velocidade das correntes de maré na área do mar na região de estudo.

Pfeffer e Allemand (2016) fizeram observações de 258 estações GNSS no mundo ao longo de vinte anos, possibilitando a realização de análises que melhoraram a interpretação de todos os dados disponíveis com melhoras de previsões futuras. Esse estudo mostrou o quanto é difundido o uso do GNSS para a definição de altitudes elipsoidais. O grau de importância se dá pelo número de estações definidas e estudadas em todo o mundo.

Avsar et al. (2017) constataram que para monitorar os movimentos terrestres ao longo das costas, as medições de estações GNSS são fundamentais para se ter uma precisão mais acurada. Esse estudo serviu para demonstrar o quanto é pertinente o uso da altimetria por satélites para a definição da variação de marés e que seria interessante a instalação de uma rede GNSS ao longo de toda a costa do Brasil.

Löfgren et al. (2014) observaram séries temporais para a realização da análise de marés oceânicas a partir de sinais de múltiplos caminhos oriundos de estações localizadas em diferentes partes do mundo. Esse trabalho demonstrou a importância do emprego de estações GNSS para a avaliação dos níveis de marés.

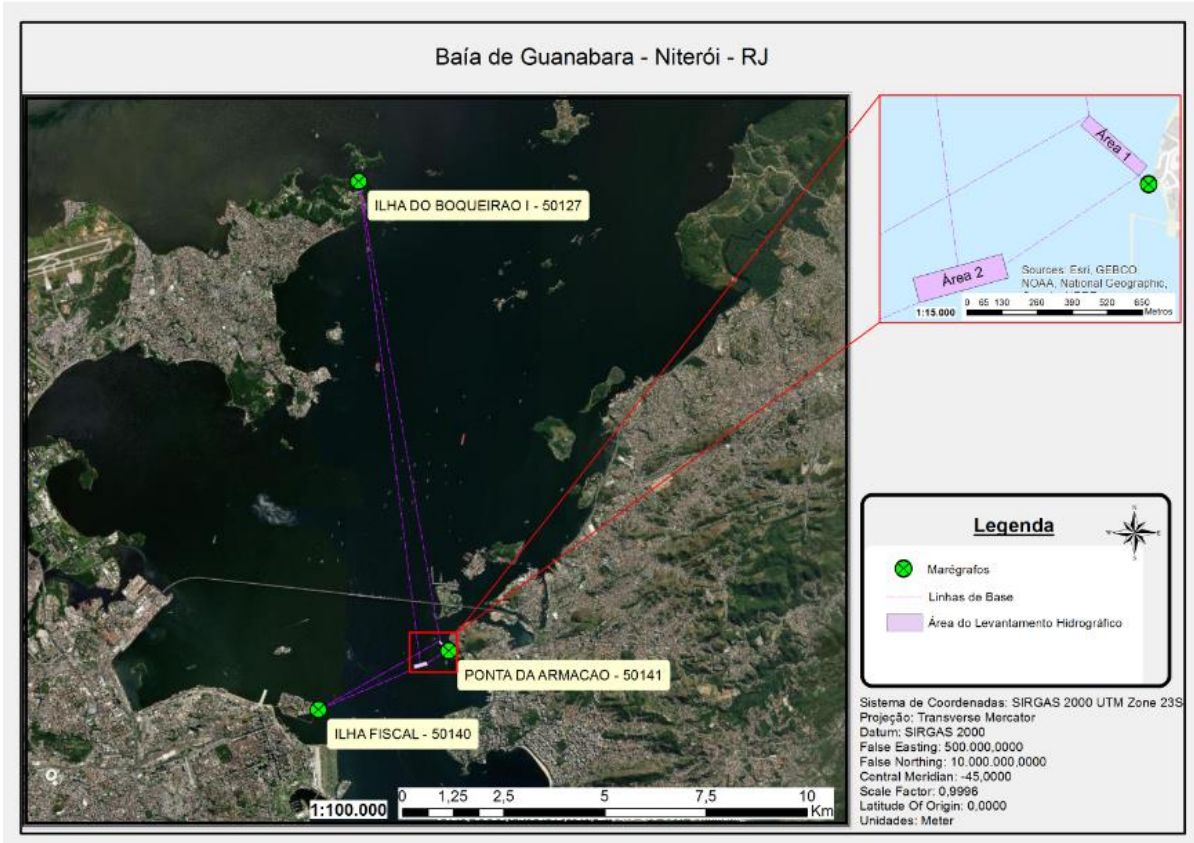
Yin et al. (2010) realizaram uma abordagem da utilização da tecnologia do sistema de posicionamento GNSS e chegaram à conclusão que é uma ferramenta útil para estudar os movimentos crustais e geodinâmicos ao longo dos anos. Foi constatado que a precisão de longo alcance das observações por GNSS é bem maior que as obtidas por métodos geodésicos tradicionais.

3 ÁREA DE ESTUDO

Para o desenvolvimento da pesquisa foi escolhida uma área teste na Baía de Guanabara nas proximidades do CHM (Centro de Hidrografia da Marinha), próximo ao marégrafo da Ponta da Armação em Niterói, Rio de Janeiro. Nesta mesma área foram selecionadas duas subáreas para a execução dos levantamentos batimétricos, ambas nas proximidades do marégrafo da Ponta da

Armação (Figura 3). As subáreas que correspondem aos polígonos de levantamentos hidrográficos, são também ilustradas na Figura 3, onde ainda, podem ser observadas as posições dos marégrafos da Ponta da Armação, da Ilha Fiscal e o de Boqueirão, empregados neste estudo.

Figura 3: Localização da área de estudos na carta náutica, contendo a localização das subáreas (A1 e A2) onde foram executados os levantamentos batimétricos



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

O PLH 01, possui uma área de aproximadamente 20000 m² e profundidade média de 3 m, enquanto o PLH 02, possui uma área de aproximadamente 30000 m² e profundidade média de 8 m.

4 METODOLOGIA

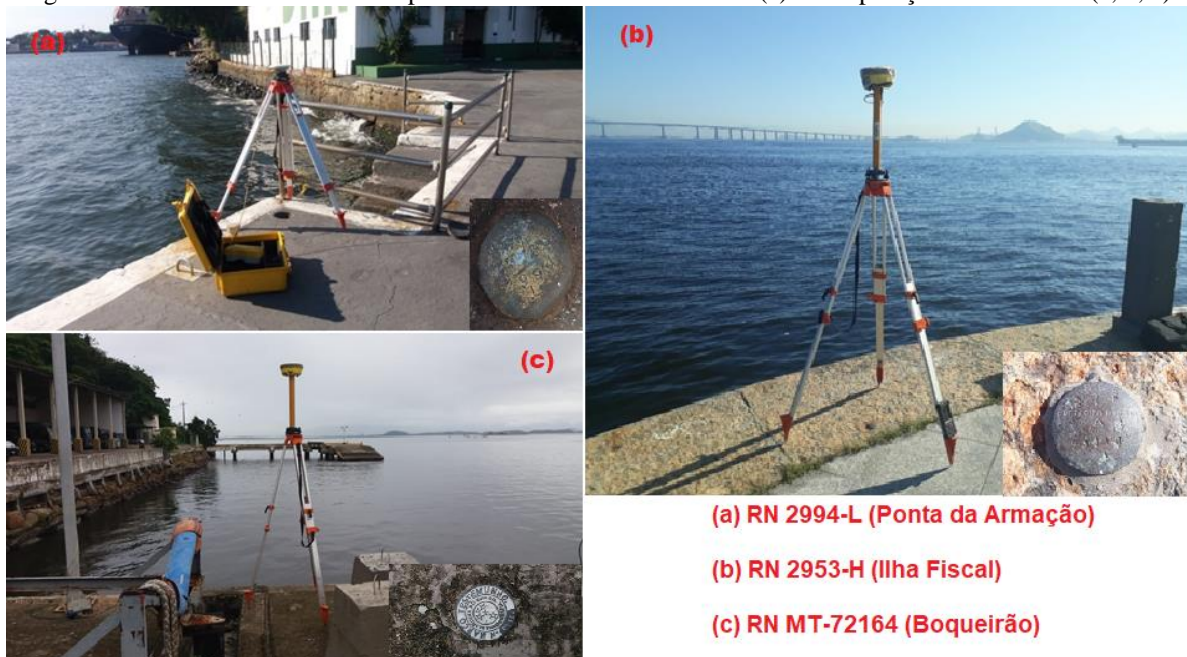
O presente trabalho, realizado na área descrita, foi desenvolvido no Instituto Militar de Engenharia (IME) no âmbito do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Engenharia de Transportes, Sistema de Transporte Aquaviário. Este estudo descreverá testes aplicando o desnível executado por ambos os métodos, a fim de se fazer uma comparação entre o uso do sistema tradicional dos marégrafos e da altura elipsoidal gerada pela embarcação no levantamento batimétrico RTK, mostrando todas as disparidades.

4.1 LEVANTAMENTO DO APOIO GEODÉSICO E MAREGRÁFICO

Após definidas as áreas de estudo, foi realizado todo o apoio geodésico. Num primeiro momento, foi realizado o transporte de coordenadas a partir de dois pontos da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo): estação RIOD, situada no IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no bairro carioca de Parada de Lucas e a estação OBSN do Observatório Nacional do Rio de Janeiro em São Cristóvão, possibilitando assim, estimar as coordenadas planialtimétricas das referências de nível do IBGE, RN 2994-L (Ponta da Armação), RN 2953-H (Ilha Fiscal) e RN MT-72164 (Boqueirão) adotadas como pontos de apoio geodésicos neste estudo. Estas RNs foram ocupadas com receptores GNSS L1L2 com posterior conversão das altitudes “Normais” em altitudes elipsoidais. A RN 2994-L foi usada como base geodésica para o posicionamento diferencial em tempo real (RTK) da plataforma de levantamento.

Para os transportes de coordenadas foram utilizados receptores GNSS ZENITH 25 L1L2 com precisão de $3,5 \text{ mm} + 0,4 \text{ ppm}$ e receptores GPS TRIMBLE 5700 L1L2, com precisão de $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$. A (Figura 4) ilustra a vista panorâmicas das ocupações das estações maregráficas.

Figura 4: RNs utilizadas como base para o levantamento batimétrico (a) e comparações altimétricas (a, b, c).



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

A (Tabela 1) resume as informações geodésicas das quantidades obtidas no transporte de coordenadas para as referências de níveis das estações maregráficas supracitadas.

Tabela 1: Resultado dos dados processados e ajustados.

Estação	Coordenadas	Valores	Ajuste	Precisão	Situação
MT-72164	Este	689089,811 m	0,000 m	0,006 m	
	Norte	7479830,006 m	-0,000 m	0,008 m	
	Altitude elipsoidal	-3,737 m	0,000 m	0,016 m	
ONRJ	Este	682133,191 m	0,000 m	-	Fixo
	Norte	7466927,821 m	0,000 m	-	Fixo
	Altitude elipsoidal	35,636 m	0,000 m	-	Fixo
RIOD	Este	673825,218 m	0,000 m	-	Fixo
	Norte	7475648,023 m	0,000 m	-	Fixo
	Altitude elipsoidal	8,630 m	0,000 m	-	Fixo
MT- 2994 L	Este	691343,739 m	0,000 m	0,006 m	
	Norte	7468204,750 m	-0,003 m	0,007 m	
	Altitude elipsoidal	-4,232 m	0,008 m	0,014 m	
93517 SAT	Este	688116,248 m	0,000 m	0,005 m	
	Norte	7466750,042 m	0,000 m	0,006 m	
	Altitude elipsoidal	-3,543 m	0,000 m	0,016 m	

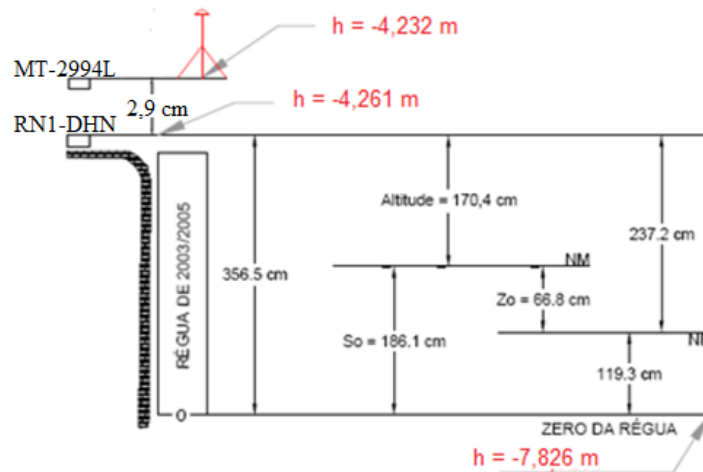
Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Em seguida são apresentados os diagramas das três estações maregráficas com as respectivas ocupações de referências de níveis e transferências de altitudes normais para elipsoidais.

A figura a seguir apresenta o croqui extraído da F-41, número 50141 mostrando os transportes de altitudes elipsoidais até chegar ao zero da régua a partir da altitude Normal da Referência de Nível MT-2994 L.

A ocupação foi feita em cima da referência de nível MT-2994L, conforme é demonstrado na (Figura 5).

Figura 5: Diagrama 50141 e ocupação estática GNSS.

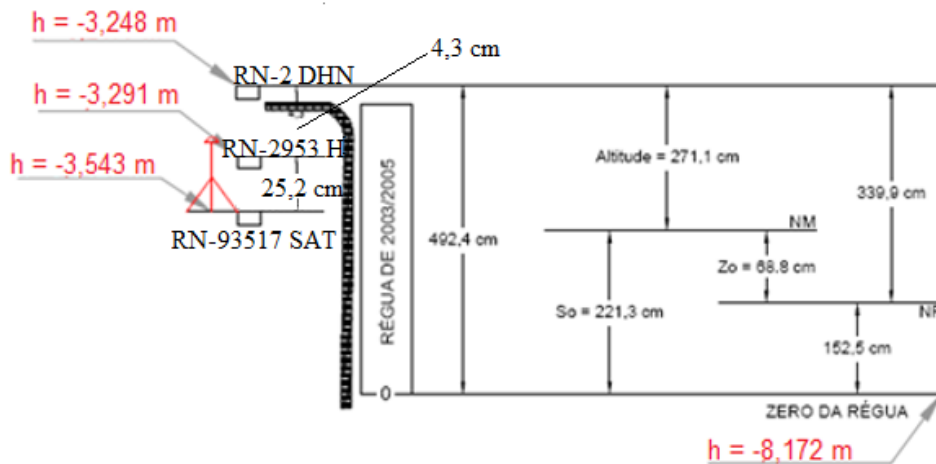


Fonte: CHM (2019) e inclusão dos valores elipsoidais pelos autores

A próxima figura apresenta o croqui extraído da F-41, número 50140 mostrando o transporte de altitudes normais para elipsoidais até chegar ao zero da régua a partir da altitude elipsoidal da Referência de Nível RN 93517 SAT.

A ocupação foi feita em cima da referência de nível RN2-DHN, conforme é demonstrado na (Figura 6).

Figura 6: Diagrama 50140 e ocupação estática GNSS.

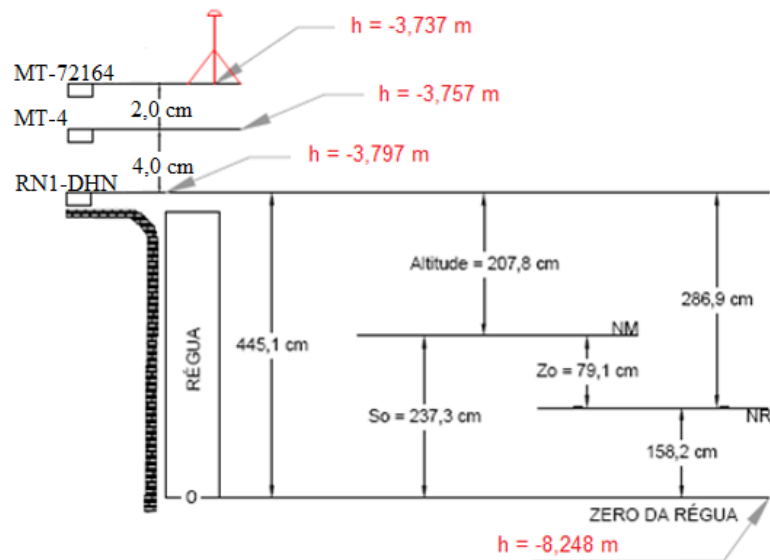


Fonte: CHM (2019) e inclusão dos valores elipsoidais pelos autores

E por fim a (Figura 7) apresenta o croqui extraído da F-41, número 50127 mostrando o transporte de altitudes normais para elipsoidais até chegar ao zero da régua a partir da altitude elipsoidal da Referência de Nível RN MT-72164.

A ocupação foi feita em cima da referência de nível MT-72164.

Figura 7: Diagrama 50127 e ocupação estática GNSS.



Fonte: CHM (2019) e inclusão dos valores elipsoidais pelos autores

4.2. LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO (LB)

No LB foi utilizado um sistema de sondagem foi composto por um ecobatímetro multifeixe (formador de feixes), um par de receptores GNSS RTK, um sensor de movimentos, além de perfiladores de velocidade do som. Os equipamentos foram mobilizados para a embarcação MS1 e a instalação contou com controle dimensional para determinação dos offsets lineares e angulares. Os resíduos angulares de montagem foram determinados com recurso ao Patch test.

O planejamento da campanha obedeceu as recomendações da NORMAM-25 (2017), em que foi observado um recobrimento de 200% entre as linhas regulares de sondagem adjacente, totalizando 7 linhas no PLH01 e 10 linhas no PLH02. No que concerne as linhas de verificação, foram definidas 2 linhas com espaçamento de 200 metros. Todas as etapas do LB, planejamento, coleta e processamento, foram conduzidas com recurso ao software hidrográfico Hypack.

Para efeito de comparação, em todos os marégrafos foi ocupada uma referência de nível do IBGE, pertencente a cada estação maregráfica com o transporte elipsoidal para o zero da régua, podendo assim definir o nível de redução com valores elipsoidais. Uma vez feito isso, todos os valores obtidos por cada marégrafo estavam relacionados a mesma referência, ou seja, tanto a embarcação como os marégrafos estavam registrando valores elipsoidais.

4.1.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS MULTIFEIXE

A aquisição dos dados foi realizada com a montagem de um sistema de bordo composto de um *notebook* e dois monitores de vídeo adicionais, sendo um deles para o timoneiro, sistema de aquisição

HYPACK, integrando o MBES *R2Sonic 2020* e aos demais sensores componentes do sistema. O equipamento possui frequência de 300Khz, abertura angular de 100 graus, 4,5knós.

Para o *path test* foram obtidos os valores de *Roll Offse: 0,35, Pitch Offset: -0,25 e Yaw Offset: 0,75*. A latência foi mantida em zero, devido ao seu valor muito próximo a zero, obtido pela utilização de sincronização dos equipamentos através da técnica 1 PPS.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitas comparações de altimetria entre as duas áreas levantadas com aplicação da altitude gerada pela embarcação e das estações maregráficas da Ponta da Armação, Ilha Fiscal e Boqueirão, definindo um modelo de discrepâncias entre as superfícies geradas pelos dois métodos em função de distanciamento entre as áreas levantadas e as estações.

5.1 ÁREA 1 E ÁREA 2 PARA PONTA DA ARMAÇÃO

Foi realizado todo o levantamento batimétrico da área 1 e por meio de análise estatística foi feita uma comparação entre os modelos gerados aplicando o desnível fornecido pelo marégrafo da Ponta da Armação (referência fixa) e pelo desnível fornecido pelo receptor GNSS da embarcação (altura geométrica). Constatou-se que o desvio padrão foi de 2 cm, que a média da diferença entre as superfícies geradas foi de 1 cm e que em 95% dos casos a precisão foi de 4 cm.

Também foi realizado todo o levantamento batimétrico da área 2 e por meio de análise estatística foi feita uma comparação entre os modelos gerados aplicando o desnível fornecido pelo marégrafo da Ponta da Armação (referência fixa) e pelo desnível fornecido pelo receptor GNSS da embarcação (altura geométrica). Constatou-se que o desvio padrão foi de 2 cm, que a média da diferença entre as superfícies geradas foi de 6 cm e que em 95% dos casos a precisão foi de 3 cm.

5.2 ÁREA 1 E ÁREA 2 PARA ILHA FISCAL

Foi realizado todo o levantamento batimétrico da área 1 e por meio de análise estatística foi feita uma comparação entre os modelos gerados aplicando o desnível fornecido pelo marégrafo da Ilha Fiscal (referência fixa) e pelo desnível fornecido pelo receptor GNSS da embarcação (altura geométrica). Constatou-se que o desvio padrão foi de 2 cm, que a média da diferença entre as superfícies geradas foi de 9 cm e que em 95% dos casos a precisão foi de 4 cm.

Também foi realizado todo o levantamento batimétrico da área 2 e por meio de análise estatística foi feita uma comparação entre os modelos gerados aplicando o desnível fornecido pelo marégrafo da Ilha Fiscal (referência fixa) e pelo desnível fornecido pelo receptor GNSS da

embarcação (altura geométrica). Constatou-se que o desvio padrão foi de 2 cm, que a média da diferença entre as superfícies geradas foi de 15 cm e que em 95% dos casos a precisão foi de 3 cm.

5.3 ÁREA 1 E ÁREA 2 PARA BOQUEIRÃO

Foi realizado todo o levantamento batimétrico da área 1 e por meio de análise estatística foi feita uma comparação entre os modelos gerados aplicando o desnível fornecido pelo marégrafo de Boqueirão (referência fixa) e pelo desnível fornecido pelo receptor GNSS da embarcação (altura geométrica). Constatou-se que o desvio padrão foi de 2 cm, que a média da diferença entre as superfícies geradas foi de 7 cm e que em 95% dos casos a precisão foi de 4 cm.

Também foi realizado todo o levantamento batimétrico da área 2 e por meio de análise estatística foi feita uma comparação entre os modelos gerados aplicando o desnível fornecido pelo marégrafo de Boqueirão (referência fixa) e pelo desnível fornecido pelo receptor GNSS da embarcação (altura geométrica). Constatou-se que o desvio padrão foi de 2 cm, que a média da diferença entre as superfícies geradas foi de 13 cm e que em 95% dos casos a precisão foi de 3 cm.

5.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS SUPERFÍCIES

Para a análise do comportamento das superfícies foi criada uma tabela com todos os valores referentes aos marégrafos analisados para as áreas, apresentando a diferença entre o geoide e o elipsoide.

Para o marégrafo da Ponta da Armação que estava ao lado da Área 1, atribuiu-se a distância zero e foi constatado estatisticamente que, tanto os dados obtidos pelo marégrafo como pelo DGPS, em uma localidade pontual (aproximadamente 100 metros), praticamente não existia diferença.

Abaixo, na (Tabela 2), constam todos os valores das distâncias e erros para os marégrafos e as áreas de levantamento.

Tabela 2: Distância das áreas para os marégrafos e diferença entre as superfícies.

Marégrafos	Distância(m)	Diferença entre as superfícies(cm)
A1/Ponta da Armação	0	-1
A2/Ponta da Armação	782,969	6
A1/Ilha Fiscal	3.465,278	9
A2/Ilha Fiscal	2.740,393	15
A1/Boqueirão	11.690,650	7
A2/Boqueirão	12.083,053	13

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Notou-se que, conforme se afasta cada marégrafo das áreas de levantamento, a diferença entre as altitudes elipsoidais dos referidos marégrafos em relação as altitudes elipsoidais do receptor GNSS da embarcação vão aumentando. Existe uma tendência para a diferença em função do aumento da distância para as áreas levantadas tendo em vista que a superfície elipsoidal tende a se afastar da superfície geoidal quando aumenta a distância. Houve uma contrariedade quando se refere ao marégrafo da Ilha Fiscal, com a necessidade de se realizar um estudo local para verificar o comportamento do geoide no local, apesar da alta precisão alcançada no levantamento, mostrando um comportamento anormal.

Apesar de existir um aumento da diferença em função do aumento da distância, houve um caso em que para distâncias maiores se obteve uma diferença menor do que para distâncias menores. Dessa forma, foi criada a (Tabela 3) para realizar a análise das diferenças.

Tabela 3: Distância das áreas para os marégrafos e diferença entre as superfícies.

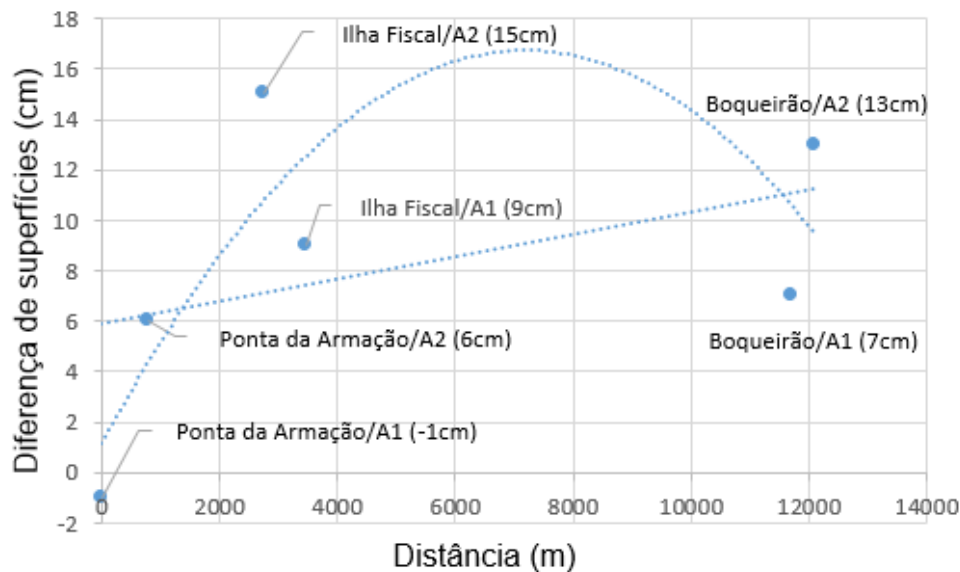
Marégrafos	Diferença entre superfície(cm)	Variação da superfície entre as áreas 1 e 2(cm)
A1/Ponta da Armação	-1	7
A2/Ponta da Armação	6	
A1/Ilha Fiscal	9	6
A2/Ilha Fiscal	15	
A1/Boqueirão	7	6
A2/Boqueirão	13	

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

A diferença entre os valores em todas as estações para as áreas 1 e 2 mantiveram praticamente os mesmos (6cm), mostrando a coerência dos dados e apresentando uma maior distorção em função da localidade das áreas escolhidas do que em função das distâncias para os marégrafos. Essa anomalia muito provavelmente deva ser em função da geologia local ou características gravimétricas distintas para toda região e afeta o comportamento do geoide no local.

Com o uso da (Figura 8), foi gerado um gráfico representativo de valores conforme pode ser visto.

Figura 8: Linha de tendência entre as superfícies marégrafos/área.



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Em função disso foram criadas duas linhas de tendência para toda a região, uma linear e outra polinomial. Essas linhas são meramente ilustrativas e apresentam uma visualização de disparidade em função da distância aplicada dos marégrafos.

Notou-se que a diferença entre as superfícies quando se aplica os marégrafos para a superfície gerada pela antena do receptor a bordo sempre aumenta em função da distância, mas esse aumento não é uniforme para essa região.

Existe a necessidade de fazer o levantamento de toda a área para poder gerar um modelo para a transferência do geóide para o elipsoide, pois o erro nessa região não é linear, sendo assim não é possível gerar uma fórmula de linha de tendência para a aplicação com respectivo resultado com inserção de novas distâncias.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa realizada no Instituto Militar de Engenharia permitiu validar as técnicas de levantamento batimétrico RTK multifeixe utilizando a altitude elipsoidal gerada pela embarcação para a determinação e aplicação do desnível de maré. Pesquisas como essa visam contribuir com a linha de estudos de controle vertical em levantamentos hidrográficos utilizando métodos de posicionamento GNSS, tomando como exemplo bons estudos acadêmicos que deram suporte para a implementação dessa metodologia como Krueger (1999), Ramos e Krueger (2009),

Duas superfícies batimétricas foram produzidas, uma utilizando marés tradicionais a partir de marégrafos e outra por meio de receptor GNSS da embarcação no método cinemático RTK.

Todas as precisões preconizadas para esse tipo de levantamento foram alcançadas com grau de confiabilidade de 95%, mostrando que o levantamento RTK multifeixe é eficiente para os padrões exigidos pela Marinha do Brasil e que enquanto a altitude elipsoidal é de definição imediata para todo o globo, a altitude Normal é complexa e necessita de um estudo elaborado para cada região pela variação das marés.

O estudo mostrou que tecnicamente esse tipo de levantamento é preciso e que potencialmente já pode ser utilizado isoladamente em obras de engenharia e dragagem. Para atualização e confecção de cartas náuticas seria possível utilizar essa metodologia com a necessidade de se criar um modelo local para saber o comportamento da superfície geoidal em relação a superfície elipsoidal, dessa forma, possibilita fazer a conversão de uma superfície para a outra, como é feito em diversos países do mundo – Japão, Estados Unidos da América, Canadá, Inglaterra, Holanda, (ELIAS, 2003; SIMÕES, 2007). Notou-se ainda que a diferença de uma superfície para outra mantém uma uniformidade para cada localidade. É possível criar uma linha de tendência, mas o trabalho mostrou que algumas áreas podem ter um comportamento atípico sem uniformidade das marés, causando um erro fora da expectativa para a distância. Áreas específicas com distâncias curtas, inferior a 100 metros, as diferenças entre as superfícies são constantes.

Recomenda-se o desenvolvimento de outros trabalhos científicos como forma de esgotar esse tema no Brasil, pois é pouco explorado. A Marinha do Brasil ainda não utiliza a altimetria GNSS como referência por não ter base de dados suficientes para comprovar a eficácia do sistema. Ainda como recomendação, deveria ser realizada a aplicação do uso da altimetria GNSS com mais frequência, gerando um maior número de modelos elipsoidais que poderiam assim ser comparados com os modelos geoidais existentes e os que virão a ser desenvolvidos.

Sendo assim, a tecnologia GNSS, que é muito utilizada hoje em dia em diversos segmentos da engenharia, torna-se de fundamental importância para o desenvolvimento hidrográfico no Brasil. Consequentemente, todo o sistema de transporte aquaviário ganha com o uso dessa ferramenta que já é amplamente utilizada em todo o mundo (ELIAS, 2003; SIMÕES, 2007).

REFERÊNCIAS

- ARONOFF, S. Remote Sensing for GIS Managers. Redlands: ESRI Press, 2005.
- AVSAR, N. B.; JIN, S.; KUTOGLU, S. H.; GURBUZ, G. Vertical land motion along the Black Sea coast from satellite altimetry, tide gauges and GPS. ScienceDirect, Advances in Space Research, n. 60, p. 2871-2881. 2017. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- BAUER, M. Vermessung und Ortung mit Satelliten: NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 4. ed. Aufl. Heidelberg: Wichmann, 1997.
- CASTRO JÚNIOR, C. A. C. e. Arcabouço gravimétrico brasileiro e o meio ambiente: possibilidades e perspectivas. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Pró-reitoria de pós-graduação programa de pós-graduação em ciências ambientais. UFG, Goiânia-GO, 2018.
- CHANG, C. C.; SUN, Y. D. Application of a GPS-Based Method to Tidal Datum Transfer. The Hydrographic Journal. N. 112, p. 15-20. 2004.
- COSTA, M.C. Influência das tensões do vento na variação do nível médio do mar da região costeira de Cananéia (SP): filtragem numérica e análise espectral. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, MG, 2010.
- COURTIER, A. Marées, Paris Service Hydrographique de la Marine, 1938.
- ELIAS, A. R. Assoreamento de represas: estimativa por meio da integração batimétrica, GPS. Cascavel: EDUNIOESTE, 2003.
- FERREIRA, I. O.; EMILIANO, P. C.; DOS SANTOS, A. DE P.; MEDEIROS, N. DAS G.; DE OLIVEIRA, J. C. Proposição de um Estimador Pontual para Incerteza Vertical de Levantamentos Hidrográficos. Revista Brasileira de Cartografia, v. 71, n. 1, p. 1-30, 2019.
- FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FAGGION, P. L. Modelagem do potencial anômalo no Datum Vertical Brasileiro visando a sua nova definição. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 13, n. 2., p. 395-419, 2007.
- IHO, International hydrographic organization, 1., 2005, Monaco. The International Hydrographic Bureau. May, 2005.
- KASHANI, I.; GREJNER-BRZEZINSKA, D.; WIELGOSZ, P. Toward Instantaneous Network-Based Real-Time Kinematic GPS over 100 km Distance. NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 52, No. 4, p. 239-245, 2006.
- KRUEGER, C. P. Integração do GPS e da Ecobatimetria. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 5, n. 1, p. 55-68, 1999.
- KRUEGER, C. P.; SOUZA, A. V. DE. The Geodesy in the Hydrography. Revista Brasileira de Cartografia, v. 66, n. 7, p. 1485-1493. 2014.
- LIMA, O. P. de. Localização geodésica da linha da preamar média de 1831 – LPM/1831, com vistas à demarcação dos terrenos de marinha e seus acrescidos. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2002.

LÖFGREN, Johan S.; HAAS, Rudiger; SCHERNECK, Hans-gerog. Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world. *Journal of Geodynamics*, v. 80, p. 66-80. 2014.

LUETTICH, R. A.; WESTERINK, J. J. A solution for the vertical variation of stress, rather than velocity, in a three-dimensional circulation model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 12, p. 911-928. 1991.

MANN, D. GPS Techniques in Tidal Modelling. *International Hydrographic Review*, V. 8, N. 2, p. 59-71 November, 2007.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos, 2ª Revisão, 2017.

MEZINE, W. A.; SOARES, M. A.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; Nadal, N. A. Avaliação de Métodos de Redução de Sondagens Batimétricas AO Nível D'água Instantâneo para Monitoramento de Assoreamento: Estudo de Caso do Reservatório da Usina Hidrelétrica Mauá. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n. 4, p.736 - 750, out - dez, 2016.

MIGUENS, A. P. Navegação: a Ciência e a Arte. Navegação Eletrônica e em Condições Especiais. v. 3. Rio de Janeiro: DHN, 2000. 1822p.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. Presidente Prudente: UNESP, 2008.

PFEFFER, J.; ALLEMAND, P. The key role of vertical land motions in coastal sea level variations: A global synthesis of multisatélite altimetry, tide gauge data and GPS measurements. *Earth and planetary science letters*, v. 439, p. 39-47. 2016.

RAMOS, A. M.; KRUEGER, C. P. Aplicação de Reduções Batimétricas GPS em Levantamentos Hidrográficos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 4, p. 615-635, out-dez. 2009.

ROSE, S.K.; SKOURUP, H.; FORSBERG, R. Arctic tides from GPS on sea-ice. *Journal of Grodynamics*, v. 63, p. 45-53. 2013.

SATO, T.; MUIRA, S.; OHTA, Y.; FUJIMOTO, H.; SUN, W.; LARSEN, C.F.; HEAVNER, M.; KAUFMAN, A.M.; FREYMUELLER, J.T. Earth tides observed by gravity and GPS in southeastern Alaska. *Journal of Grodynamics*, v. 46, p. 78-89. 2008.

SIMÕES, I. C. V. P. Aplicação da batimetria multifeixe para definição da morfologia detalhada do fundo marinho ao largo da Laguna de Araruama e Arraial do Cabo-RJ. 2007. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

WILGALIS, S.; SEEGER, G.; KRUEGER, C. P.; ROMÃO, V. M. C. A real time reference network for Recife, Brazil, enabling precise and reliable cadastral surveys. XXII International congress, Washington, D.C. USA, p. 1-14, 2002.

YIN, H.; LI, J.; MA, P.; ZHANG, S.; XU, D. Effect of solid-earth-tide on GPS time series. *Geodesy and Geodynamics*, v.1, n.1, p. 64-69. 2010. Disponível em: <www.jgg09.com>. Acesso em: 12 dez. 2018.