



POSICIONAMENTO COM CORREÇÃO EM TEMPO REAL OU PÓS-PROCESSADO: QUAL O MELHOR CUSTO-BENEFÍCIO PARA REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GNSS?

Felipe Rodrigues Santana¹
Claudia Pereira Krueger
Érica Santos Matos Baluta
Elias de Castro Nadaf²

RESUMO

Uma das maiores fontes de incerteza vertical nos levantamentos batimétricos consiste no processo de redução de sondagem, pois a maré medida na costa não necessariamente será a mesma no local e instante onde se encontra a plataforma de sondagem. Uma das formas de reduzir consideravelmente tais incertezas consiste em utilizar a variação das altitudes elipsoidais da antena GNSS da lancha como representativa das oscilações do nível do mar e da atitude da embarcação. Tradicionalmente, a DHN utiliza para o posicionamento 3D (horizontal e vertical) de seus navios, um sistema de posicionamento com correção Global (GcDGNSS) pago, desenvolvido pela NASA, que utiliza o *software* RTG. Nesse artigo é feita a comparação desse método com outros pós-processados, tais como o PPP e o PPK, para um período de 12 horas, quando a lancha permaneceu atracada junto ao marégrafo do Clube Naval Charitas, na Baía de Guanabara. O RTG apresentou um RMS (95%) de 8,26

¹ Oficial do Corpo da Armada.

² Oficial do Corpo da Armada; M. Sc. em Meteorologia e Oceanografia Física pela *Naval Postgraduate School*, e encarregado da Divisão de Oceanografia Operacional do CHM.



cm, enquanto o PPP de 5 cm e o PPK de 3,3 cm. Dessa forma, nota-se que esses dois últimos métodos, além de serem gratuitos, possuem incertezas menores. Por fim, as vantagens e desvantagens desses métodos serão discutidos nesse artigo, a fim de subsidiar a decisão da DHN sobre a adequabilidade no emprego de recursos para contratação do serviço RTG. O uso de métodos pós-processados é útil para todas as áreas do posicionamento hidrográfico e oceanográfico.

Palavras-Chave: Hidrografia; maré; GNSS; posicionamento; incerteza.

ABSTRACT

One of the greatest sources of vertical inspiration in bathymetric surveys is the sounding reduction process, as the tide measured on the coast will not necessarily be the same at the place and time where the sounding platform is located. A way to considerably reduce such intermittence is to use the variation of the ellipsoidal height of the speedboat's GNSS antenna as a representative of the sea level oscillations and the attitude of the vessel. Traditionally, DHN uses a paid Global Positioning System (GcDGNSS) developed by NASA for the horizontal and vertical positioning of its ships, which uses the RTG software. This article compares this method with other post-processing methods, such as PPP and PPK, for a period of 12 hours when the boat is alongside next to the tide gauge at Clube Naval Charitas' wharf in Guanabara Bay. The RTG has shown

RMS (95%) of 8.26, while the PPP of 5 cm and the PPK of 3.3 cm; Therefore, it is clear that these last two methods, besides of being free, are more accurate. Finally, the pros and cons of those methods will be discussed in this article, in order to support DHN's decision whether it is worth continuing to expend financial resources for the RTG service. The use of post-processed methods is useful for all areas of hydrographic and oceanographic positioning.

Keywords: Hydrography; tide; GNSS; positioning; uncertainty.

1. INTRODUÇÃO

Em todo levantamento hidrográfico é necessário realizar a redução batimétrica, que consiste em descontar das profundidades medidas, as parcelas referentes à maré e aos movimentos de atitude da embarcação. Contudo, à medida que a lancha hidrográfica se afasta da estação maregráfica, a maré medida na costa não necessariamente será a mesma no local onde se encontra a embarcação, ocasionando erros, chamados de cotidais, que podem passar de 5m, dependendo da complexidade da área, como por exemplo, no Igarapé do Inferno (AP), onde a amplitude de maré pode passar a 10m (SILVA, 2015). Por outro lado, a Incerteza Vertical Máxima admitida em canais de navegação com 10m de profundidade para Levantamentos com Ordem Exclusiva, por exemplo, é de 17cm (OHI, 2020).

Uma solução para atingir esta precisão é utilizar a variação das altitudes

elipsoidais da embarcação, como representativas das oscilações de maré no local onde se encontra a plataforma de sondagem. Tradicionalmente, utiliza-se o termo maré-GNSS, mas na verdade com o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é possível realizar a medição, não só da maré, mas também dos movimentos de *heave*, calado dinâmico e carregamento da embarcação (Figura 1). Dessa forma, também os esforços logísticos dos levantamentos hidrográficos são reduzidos consideravelmente, uma vez que reduz a necessidade de manutenção de estações maregráficas na costa tornando os levantamentos mais rápidos, baratos e com menor incerteza nos dados (ZIEBART *et al.* 2007; RAMOS, 2007; MILLS e DODD, 2014). Contudo, resta ainda o fato de que os dados de maré estão relacionados ao NR (nível de redução), e os dados do GNSS, ao elipsoide. Portanto, torna-se necessário desenvolver um

modelo de separação (SEP¹) entre essas duas superfícies, de modo que cada ponto de latitude e longitude desse modelo tenha um valor de separação e permita referenciar os dados de altitudes elipsoidais ao NR.

Assumindo o conhecimento do SEP, esse trabalho terá como foco os diferentes métodos de posicionamento GNSS para medição do nível do mar, dentre os quais pode-se citar aqueles com solução tanto em tempo real, como RTK (*Real Time Kinematic*) e GcDGNSS (*Global Correction Differential GNSS*) (ex: RTG – *Real Time Gipsy*), os quais foram analisados por Ramos e Krueger (2008), quanto aqueles com solução pós-processada, como o PPP (*Precise Point Positioning*) e o PPK (*Post-processed Kinematic*), que foram analisados por Krueger, Silva e Vieira (2012) para a redução de sondagem.

Em relação ao RTG, desde 2007 a DHN (*Diretoria de Hidrografia e*

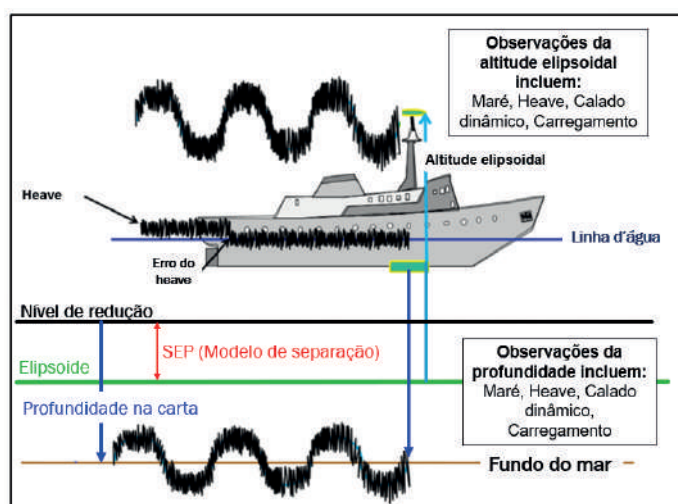


Figura 1 – esquema das componentes verticais envolvidas no levantamento hidrográfico. Fonte: Adaptada de Mills e Dodd (2014)

¹ Para uma revisão sobre várias formas de se determinar o SEP, pode-se consultar Santana *et. al* (2020)



Navegação) vem utilizando esse método para levantamentos hidrográficos em áreas *offshore*, que exigem ordem especial, porém, esse é um serviço pago, cuja licença é renovada anualmente para diversos navios hidrográficos no país. Porém, será que outros métodos de posicionamento, que são gratuitos, são capazes de proporcionar dados com menores incertezas e maior disponibilidade, isto é, sem perda de sinal tais como em ocasiões que a lancha de sondagem passa sob pontes e obstáculos? A resposta a essa pergunta será encontrada ao longo desse artigo.

Nesse sentido, o foco será dado para o posicionamento vertical, que tende a ter uma incerteza maior do que o horizontal, devido a um número menor de vetores para o ajustamento das observações, portanto, os resultados desse trabalho podem valer também para o posicionamento planimétrico da embarcação. Para o entendimento dessas questões, na próxima seção será descrita uma revisão sucinta sobre os principais métodos de posicionamento, seguidos dos materiais e a metodologia utilizada. Por fim, será realizada uma comparação entre os métodos de posicionamento em tempo real e pós-processado, assim como um resultado do GcDGNSS, em comparação com o PPK, quando a lancha passa sob uma ponte.

2. POSICIONAMENTOS GNSS

O conceito fundamental do posicionamento GNSS é baseado no tempo para realização de um trajeto unidirecional das ondas eletromagnéticas 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 do sinal 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).

Na próxima seção serão descritos alguns métodos para corrigir tais fontes de erros, tanto em tempo real, quanto no pós-processamento.

2.1. Posicionamento em tempo real

Enquanto os sensores de uma estação maregráfica podem medir o nível do mar com uma precisão milimétrica, as soluções fornecidas pelo receptor GNSS de uma lancha hidrográfica podem facilmente chegar a incertezas decimétricas devido aos diversos erros supracitados. Uma das formas de minimizá-los, pode ser utilizando o posicionamento da estação móvel através das correções diferenciais geradas em uma estação de referência enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação (rádio de transmissão, linha telefônica ou satélites de comunicação). Estas correções devem estar em um formato apropriado, definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service (RTCM)* (KRUEGER, 1996; SEEBER, 2003). Quanto ao comprimento da linha de base, segundo NOAA (2019), para se atingir incertezas no nível centimétrico, é recomendado utilizar uma máxima distância de 40 km entre a estação de referência ou base e a embarcação, dessa forma, aumenta a probabilidade dessa estação móvel estar sob a mesma influência atmosférica da estação base. A transmissão desses dados pode ser via rádio, porém, sua precisão está condicionada à distância entre a base e a estação móvel, bem como à existência de alguma obstrução no

trajeto do sinal. Uma forma de minimizar as incertezas dessa comunicação é realizar a transmissão via NTRIP (*Networked Transport of RTCM² via Internet Protocol*). Segundo Costa *et al.* (2008), no Brasil, essa modalidade de transmissão de dados foi iniciada em 2008 pelo IBGE através do serviço chamado de RBMC-IP.

Além de sistemas com correções locais, 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 independentemente da localização; contudo, destaca-se que esse é somente um dentre tantos outros serviços e sistemas existentes, os quais podem ser observados no Quadro 1, apresentado na sequência³.

² *Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)*

³ Mais detalhes podem ser encontrados em FIG (2019) e no manual de cada equipamento.



Quadro 1 – exemplos de sistemas de correção global em tempo real 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. FONTE: Adaptado de FIG (2019)

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 tercerizada
	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 ²	< 10	s/informação	G, R	Algoritmo StarFire
	C-Nav ¹	< 3	s/informação	G	Algoritmo StarFire
Veripos	Apex 5	< 5	s/informação	G,R,E,C,J	Rede de estação de referência própria e sua modelagem matemática
	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 sua modelagem matemática
TerraStar (Hexagon)	TerraStar-C PRO	< 3	< 18	G,R,E,C	Resolução fixa das ambiguidades
	TerraStar-C	< 5	30 – 45	G,R	
	TerraStar-L	< 50	< 5	G,R	Correção de pseudodistância
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	

2.2. 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 a partir das suas informações, 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 da fase da onda portadora (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 2, observam-se algumas descrições das efemérides disponibilizadas pelo IGS. Nota-se que, na comparação entre a efeméride rápida e final, não existe nenhuma diferença significativa em termos de acurácia⁴.

Quadro 2 – descrição da acurácia, latência, atualização e taxa de intervalo das efemérides do igs. Fonte: adaptado de igs (2021)

Tipo		Acurácia	Latência	Atualização	Taxa de intervalo
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 ~25 ps SDev			5 min
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

⁴ Mais detalhes sobre outros produtos podem ser consultados em CDDIS (2021).



Segundo NOAA (2019), as efemérides devem ser de qualidade adequada para obter o nível desejado de precisão da componente de controle vertical do GPS/GNSS. Para processamento PPK, que utilizam a fase da portadora, todos os produtos do IGS podem ser suficientes: transmitida, ultrarrápida, rápida e final, sendo recomendado utilizar as melhores órbitas e relógios disponíveis no momento destes processamentos. Nos métodos PPP, as efemérides ultrarrápidas, ou melhores, podem ser suficientes e não é aconselhável utilizar produtos de diferentes centros de análises. Assim, de posse de tais correções, o processamento PPP pode ser realizado por meio de diversos *softwares*, sendo alguns listados no Quadro 3:

Quadro 3 – pacotes de *softwares* disponíveis para processamento ppp. Fonte: adaptado de Abdallah (2016)

Software	Provedor
Bernese 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

Existem ainda serviços on-line que realizam o processamento de forma gratuita, 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 1, é apresentada uma análise, elaborada por Maciuk e Skroupa (2017), dos

resultados obtidos com os processamentos PPP no modo cinemático utilizando diferentes serviços.

Tabela 1 – desvios médios absolutos das coordenadas obtidas com as componentes horizontais (n e e) e verticais (u) e seus respectivos desvios padrões. FONTE: Adaptada de FIG 57 (2019).NOTA: CSRS (*Canadian Spatial Reference System*), APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), GAPS (*GPS Analysis and Positioning Software*)

Dia (DOY)	Serviço	N(cm)		E (cm)		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
	magic-GNSS	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
	magic-GNSS	1,3	1,7	1,1	1,7	1,3	1,5

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 antenas⁵.

Cabe destacar também os diferentes tamanhos de arquivo que cada serviço exige para o *upload*. Por exemplo, o IBGE permite o envio de dados de no máximo 30 mb, o que pode ser uma limitação, pois usualmente um arquivo de GNSS

⁵Mais informações podem ser consultadas no manual do serviço, disponível em IBGE (2021)

coletado durante 24 h, a uma taxa de 1s, pode gerar arquivos Rinex de mais de 200 mb, o que tornaria necessário a edição do Rinex, utilizando *softwares* como o GFZ. Uma alternativa de serviço poderia ser o NRCAN, que aceita arquivos de até 300 mb e apresenta resultados compatíveis com o do IBGE em uma escala centimétrica.

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 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*)⁶.

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 para os métodos PPK e RTK⁷, com linhas de base curtas.

Quadro 4 – erros que precisam ser corrigidos, ou levados em consideração para um ppp em relação ao DGNSS relativo. Fonte: adaptada de Rizos et al. (2012) e Abdallah (2016)

Tipo de correção	PPP	DGNSS
Erros dependentes dos satélites		
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
Erros específicos do receptor		
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
Modelos Geofísicos		
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
Modelos atmosféricos		
Atraso troposférico	Sim	Sim
Atraso ionosférico	Sim (somente para L1)	Não

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

⁷Para 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)



3. ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para a realização desse trabalho foi a Baía de Guanabara, onde lancha permaneceu atracada durante 4 dias no Clube Naval Charitas e em

Em relação aos dados coletados pelo GNSS, foi utilizado o sistema Seapath-130 da empresa Kongsberg, que combina receptores dupla-frequência GNSS, tecnologia inercial e algoritmos durante o processamento (KONGSBERG, 2013).

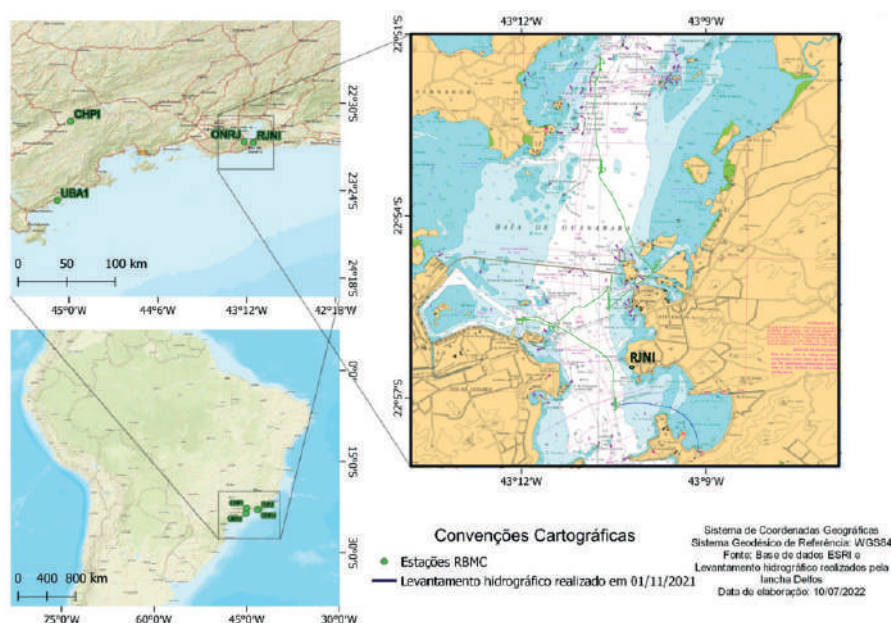


Figura 2 – Área de estudo. Fonte: Santana (2022)

outro dia realizou um trajeto passado sob a ponte Rio-Niterói, como pode ser observado na Figura 2. Além disso, observa-se também a localização da estação base RJNI, que está cerca de 4 km do Clube Naval Charitas.

4. MATERIAIS

Para a medição do nível do mar, foi instalado no Clube Naval Charitas um sensor de pressão Rugged Trolwl 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.

Todos os demais sensores foram cedidos pela empresa Delfos Marítima, juntamente com a lancha Delfos (Figura 3), a qual possui uma haste lateral retrátil, onde são instalados o transdutor, o posicionador e o sensor inercial.



Figura 3 – lancha hidrográfica “Delfos” atracada próximo ao marégrafo de Charitas. Fonte: Kongsberg (2021)

Quadro 5 – Equipamentos utilizados e suas finalidades Fonte: Os Autores (2023)

Equipamento	Finalidade
Receptor Stonex Multiconstelação (GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, SBAS e IRNSS)	RTK-NTRIP
Receptor 3710 DGNSS	GcGNSS (Serviço Seastar G2 da Fugro), PPP e PPK
Receptor Novatel-DL V3	Estação Base (DHN) taxa 1Hz
MRU 5	Atitude da embarcação (Roll, Pitch, Heave)
Sistema Seapath-130	Atitude da embarcação (Yaw)

No Quadro 5 pode-se observar o tipo de equipamento utilizado e a finalidade.

O sistema de posicionamento principal utiliza o receptor 3710 DGNSS, capaz de receber continuamente as correções globais do serviço de posicionamento DGNSS 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 para todo o mundo e a distância da estação mais próxima não afeta a performance (KONGSBERG, 2013).

Quanto à atitude da embarcação, no Quadro 6, observa-se a acurácia dos dados coletados pelo Sistema Seapath-130, bem como da medição dos *offsets*, oriundos de fábrica:

Quadro 6 – acurácia do sistema Seapath. Fonte: Kongsberg (2013)

Tipo de dado	Acurácia
<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
Acurácia horizontal dos offsets dos sensores	2 cm
Acurácia vertical dos offsets dos sensores	5 mm

Na Figura 4, à esquerda do sistema Seapath-130, observa-se o local de instalação do receptor STONEX para a solução RTK.



Figura 4 – localização do receptor Stonex e do sistema Seapath-130. Fonte: Santana (2022)



5. PROCESSAMENTO DE DADOS

Além de se utilizar o serviço online PPP-IBGE, para o pós-processamento relativo com o método PPK, foi utilizado o *software* gratuito RTKLIB, desenvolvido na *Tokyo University of Marine Science and Technology*, por Takasu (2009). Como a linha de base tem um comprimento curto, de 4 km, não foram necessários aplicar modelos de correção ionosférica e troposférica. Em relação aos dados, este *software* não é compatível com o formato RTCM, exportado pelo Seapath, dessa forma, foi necessário utilizar também o *software* Rinexconv, da Kongsberg a fim de realizar a conversão para Rinex. Para o processamento PPP do IBGE, além da conversão de RTCM para Rinex, foi necessária ainda a conversão de Rinex 3.0 para Rinex 2.0, pois o PPP-IBGE reconhece somente este último formato. Para isso foi utilizado o *software* GFZRNx, desenvolvido pelo *GFZ German Research Centre for Geosciences* GFZ (2016).

Uma vez realizado o processamento de todos os dados GNSS, o tratamento das séries temporais foi efetuado em três estágios:

1) Identificação e remoção de *outliers*, aplicando um filtro de Box-Plot que remove os dados que são maiores do que 3 sigmas e substitui por NaN, como pode ser observado na figura 5.

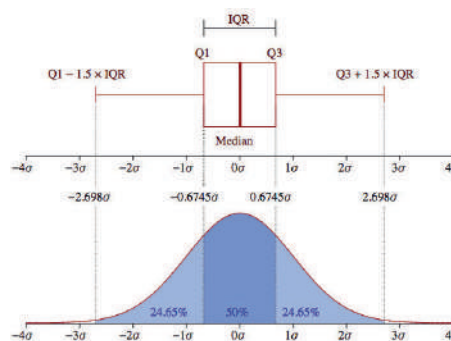


Figura 5 – Filtro de Boxplot, com os valores de seus quartis (Q1 e Q3), multiplicados por 1,5, de modo a se aproximar do valor de 3 sigma, que corresponde ao intervalo de confiança de 99%. Fonte: Zheng (2021)

2) Aplicação de um filtro de média móvel com o tamanho da janela que mais se adequa aos dados de maré;

3) Como pode ocorrer gaps na solução GNSS, foi utilizada a função *posixtime* do MatLab para selecionar os dados do GNSS mais próximos do instante de coleta dos dados de maré. Por exemplo, um dado de maré é coletado no instante 13h05min, e houve um gap na solução GNSS de 13h04min a 13h09min. O algoritmo irá selecionar o dado GNSS de 13h03min.

Após a filtragem dos dados, a avaliação foi feita em termos de RMS, calculado pela equação 1:

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

Onde:

- U_{Ref} : a coordenada vertical da solução de referência, e U_{Metodo} , a coordenada vertical do método a ser analisado;
- RMS_U^{1D} : a incerteza vertical 1D total do erro de posição Vertical.

6. RESULTADOS

Na Figura 6, observa-se todos os dados coletados pela lancha hidrográfico do dia 10/05 a 14/05. No período do dia 10 ao dia 12 a lancha permaneceu atracada ao lado da estação maregráfica do Clube Naval Charitas. Na primeira parte do dia 12, o sensor foi desligado (observa-se o gap de dados) e na segunda parte desse dia a lancha percorreu uma trajetória na Baía de Guanabara.

Por fim, do final do dia 12 ao dia 14, a lancha permaneceu atracada no Clube Naval Charitas.

A fim de avaliar os dados do GNSS em relação ao marégrafo, foi selecionado o período contínuo dos dados de 10 a 12 de maio. Para realizar essa comparação, as curvas foram subtraídas de suas respectivas médias. Na Figuras 7 observa-se os resultados em relação ao PPK e ao PPP.

Para analisar os dados em tempo real, em comparação com aqueles obtidos no pós-processamento, foi selecionado um período de aproximadamente 12 horas entre os dias 11 e 12, quando foram coletados os dados do RTK e Gc-DGNSS. O quadro 7 apresenta os valores de RMSE (95%), em relação aos valores da estação maregráfica.

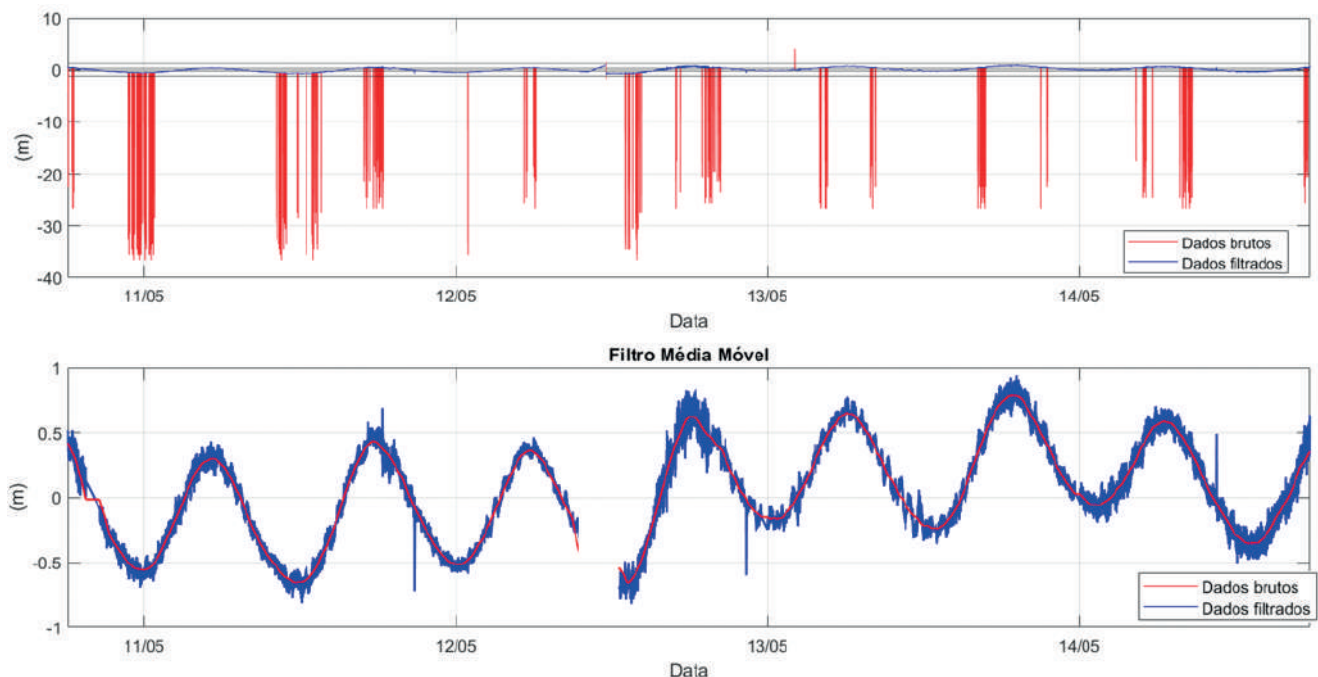


Figura 6 – Filtro de dados *boxplot* 1s e de média móvel do dia 10/05/2021 a 14/05/2021. Fonte: autores (2023)

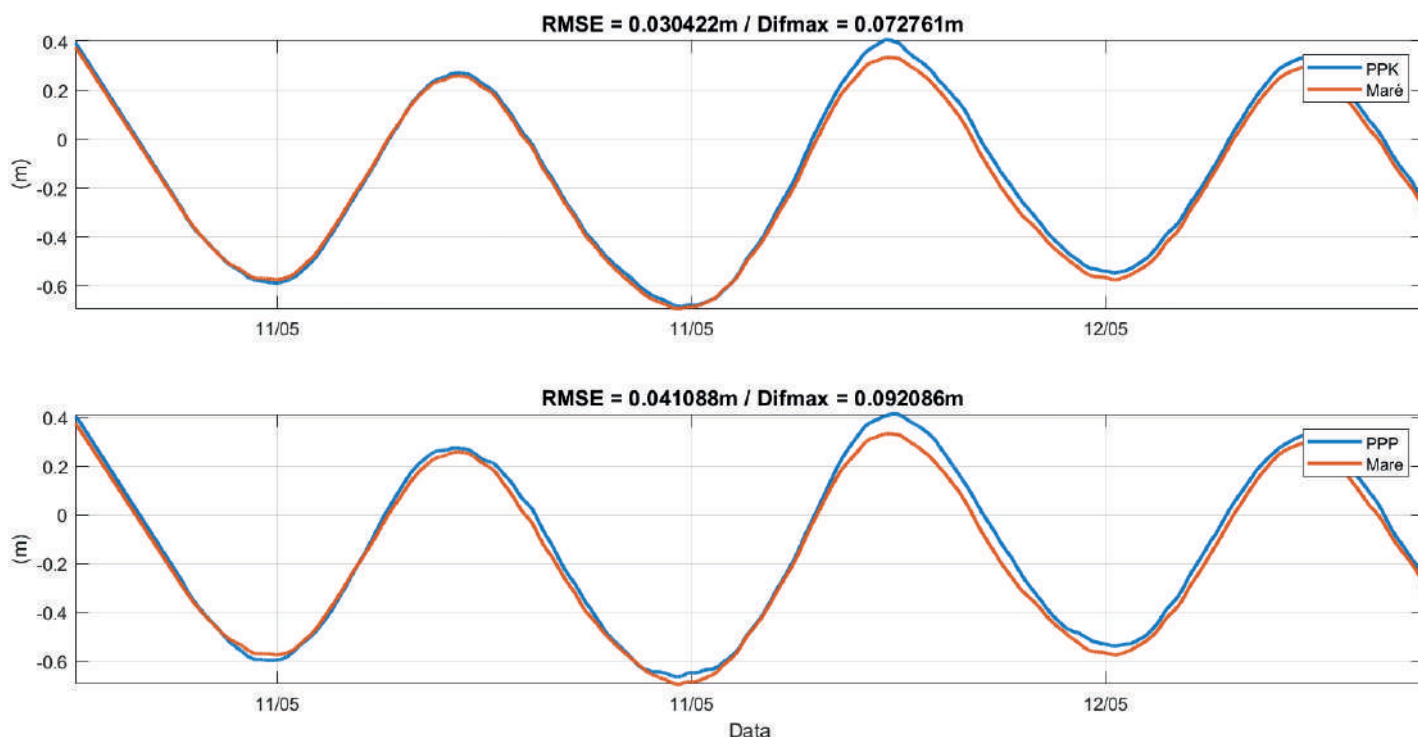


Figura 7 – Comparação entre a maré e o GNSS do dia 10/05/2021 a 12/05/2021. No gráfico de cima encontra-se a solução PPK e no de baixo a solução PPP. FONTE: Os Autores (2023)

Quadro 7 – Resultados (cm) dos métodos de processamento em relação ao marégrafo. Fonte: autores (2023)

	PPK	PPP	RTK	GcDGNSS
RMSE (95%)	0,0338	0,0506	0,0682	0,0826
Diferença máxima	3,9	4,8	10,6	13,9

Além disso, o resultado do método GcDGNSS também foi avaliado no instante em que a lancha passou sob a ponte Rio-Niterói, como pode ser observado na Figura 8, assim como a comparação entre os dados de altitudes elipsoidais do PPK e do GcDGNSS. Na Figura 9, apresenta-se uma análise estatística dos

dados filtrados do PPK e do GcDGNSS, subtraídos de suas respectivas médias, nota-se que a maioria das diferenças foi inferior a 5 cm, com um valor máximo superior a 20 cm no instante em que a lancha passou sob a ponte, além disso, observa-se ainda uma alta correlação entre as séries, no valor de 98,9 %.

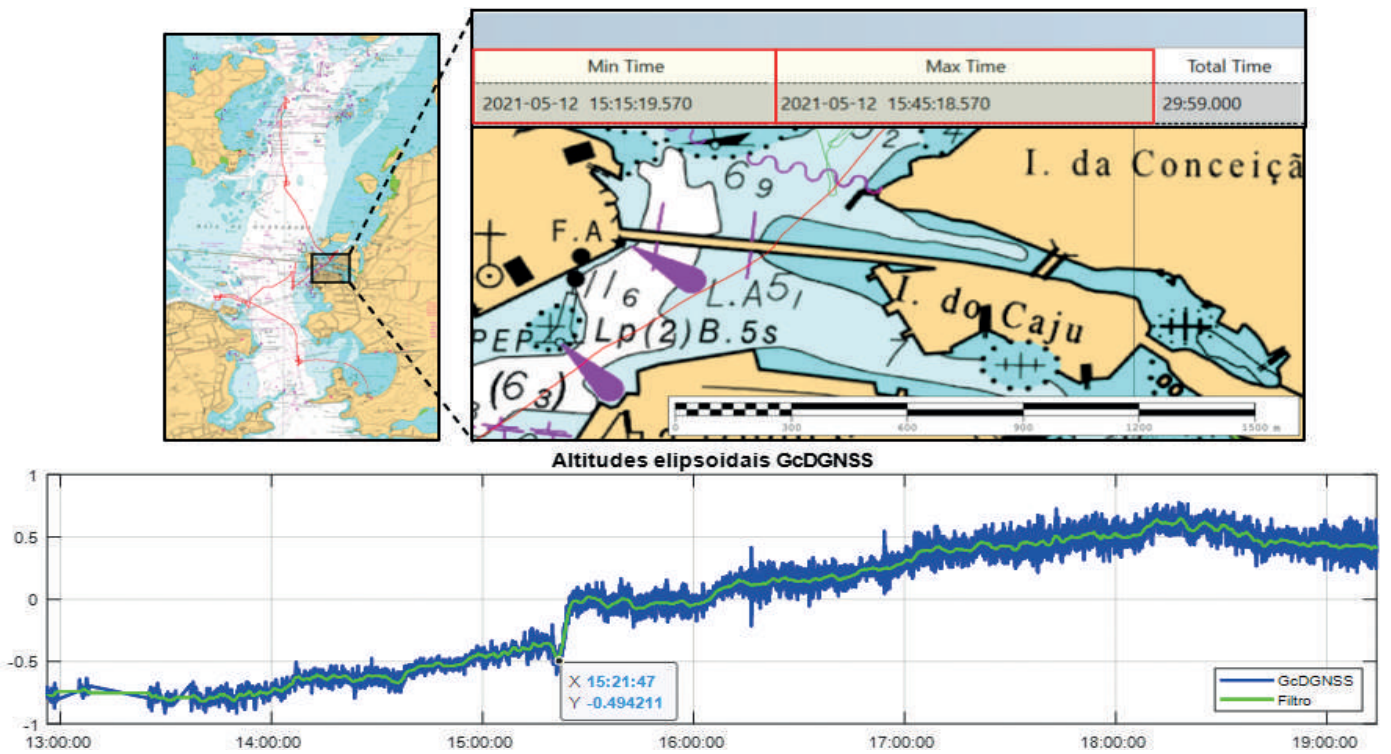


Figura 8 – comparação entre o GcDGNSS e PPK. FONTE: Os Autores (2023)

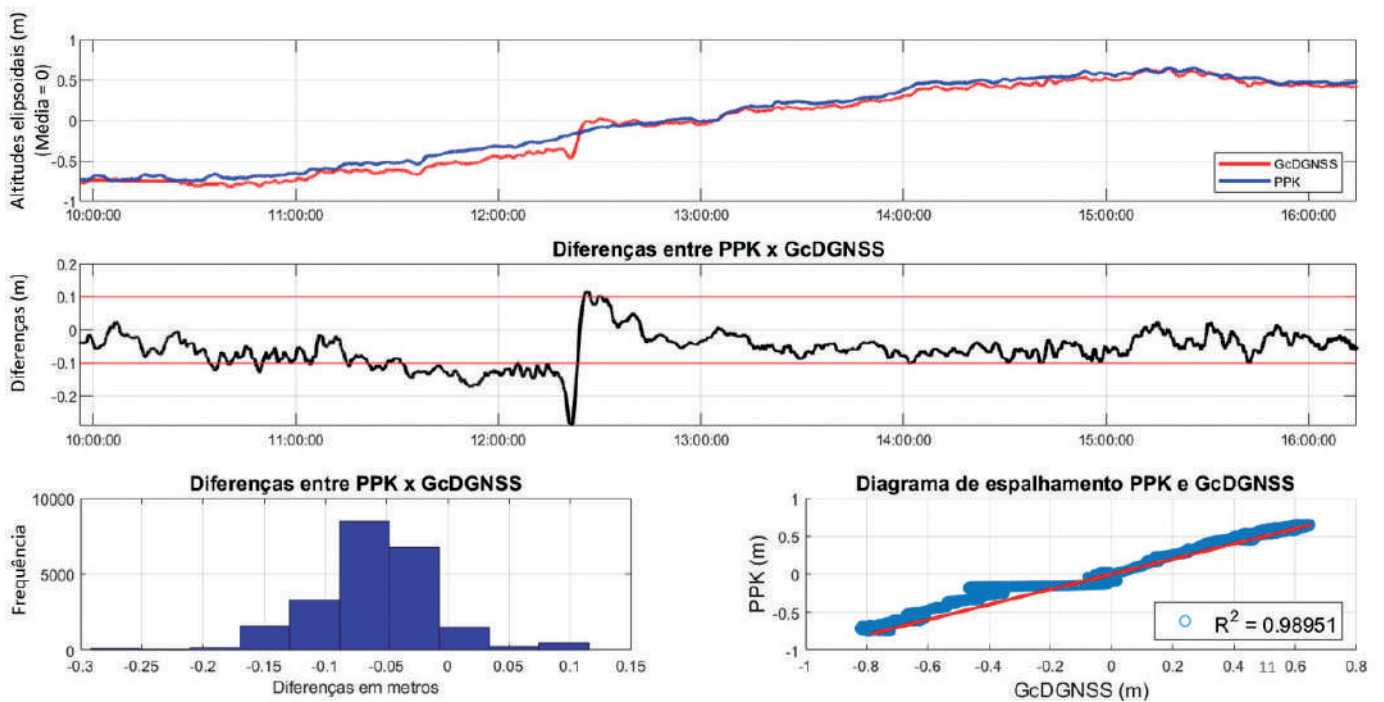


Figura 9. Fonte: os autores (2023)



7. DISCUSSÃO

A importância de aplicar um método para retirada de *outliers*, antes de realizar a suavização da curva pode ser visto na Figura 6, pois caso os dados espúrios não tivessem sido retirados com o filtro de *boxplot*, os mesmos poderiam contaminar o resultado final da média móvel. Na comparação com os dados da estação maregráfica do dia 10 ao dia 12 percebe-se que os métodos pós-processados (PPP e PPK) tiveram suas incertezas inferiores a 5 cm. Nesse contexto, para a publicação S-44 não existe um limite de incerteza a ser adotado para a medição do nível do mar de acordo com as ordens de Levantamento, porém o Serviço Hidrográfico Canadense, recomenda que nas Ordens Especial e Exclusiva, o nível do mar seja medido com uma incerteza abaixo de 5 cm. Tal valor foi demonstrado, para os períodos analisados, que os métodos pós-processados seriam capazes de atingir.

Por outro lado, os métodos baseados no posicionamento em tempo real (RTK e GcDGNSS) tiveram suas incertezas acima de 5 cm, como pode ser observado no quadro 7. Segundo, Mills e Dodd (2014), 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). Tal fato, traz uma grande versatilidade para os métodos de posicionamento, pois o PPP, assim como os métodos do tipo GcDGNSS, não exigem uma estação base para processamento, sendo ideal para levantamentos *offshore*, e a ainda possui a maior vantagem por ser um serviço gratuito, diferente do GcDGNSS, para o qual a DHN renova anualmente a licença para seus Navios.

É verdade que os métodos em tempo real facilitam o monitoramento do posicionamento da embarcação durante sondagem, e pode ser muito útil para determinadas atividades marítimas como dragagem e monitoramento da folga dinâmica abaixo da quilha de navios mercantes. Porém, como em todo levantamento hidrográfico, os dados de batimetria passam, necessariamente, por uma etapa de pós-processamento, quando, por exemplo, é possível analisar se a velocidade do som foi inserida de maneira correta. Tal prática também poderia ser adotada para os dados de posicionamento, pois, como pode ser observado na Figura 8 e Figura 9, apesar da alta correlação (99%) dos dados de GcDGNSS em relação ao PPK, podem existir trechos nos quais o processamento em tempo real não apresente total disponibilidade e confiabilidade.

Existe também uma desvantagem dos métodos de posicionamento pós-processados, pois as linhas de sondagem são visualizadas em tempo real utilizando um método de posicionamento sem correção, chamado absoluto, que pode ter incertezas da ordem de metros. De outra forma, para os métodos com correção global em

tempo real, as linhas são visualizadas com precisões decimétricas. Porém, a incerteza do método absoluto pode ser corrigida no pós-processamento, pois tanto para o monofeixe, quanto para o multifeixe, o *software Caris Hips and Sips* permite utilizar a ferramenta *Import Generic Data Parser*, que viabiliza a importação de dados de arquivos .txt como a solução GNSS pós-processada. Contudo, também exige uma licença paga, mas se a Instituição já possui esse acesso, não haverá um custo adicional.

Portanto, a pergunta final que poderia ser debatida pela comunidade hidrográfica é: até que ponto vale a pena a DHN manter todas as licenças do serviço do posicionamento em tempo real, enquanto os métodos de pós-processamento são gratuitos, com melhor qualidade e ainda viabilizam as reduções batimétricas GNSS com os requisitos exigidos para as Ordens Especial e Exclusiva?

8. CONCLUSÃO

Uma das maiores fontes de incerteza vertical nos levantamentos batimétricos consiste no processo de redução de sondagem, isso ocorre, pois, a maré

medida na costa não necessariamente será a mesma no local e instante onde se encontra a plataforma de sondagem. Uma das formas de reduzir consideravelmente tais incertezas consiste em utilizar a variação das altitudes elipsoidais da antena GNSS da lancha como representativa das oscilações do nível do mar e da atitude da embarcação. Tradicionalmente, a DHN utiliza para o posicionamento de navios, um sistema de posicionamento com correção Global (GcDGNSS) pago, desenvolvido pela NASA, que utiliza o *software RTG*. Todavia, nesse artigo foi apresentado que outros métodos de posicionamento pós-processados como o PPP e o PPK são capazes de apresentar resultados para o posicionamento vertical com graus de incerteza menores e com maior disponibilidade do que o RTG. Como a componente vertical é a mais afetada pelos erros do sinal GNSS, presume-se que também para a componente horizontal serão observados melhores resultados. Mais discussões precisam ser feitas a fim de identificar se as vantagens dos sistemas em tempo real, elencadas nesse artigo, compensam o seu custo para os levantamentos hidrográficos, em uma escala nacional.

9. 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.



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.

COSTA, S. M. A., LIMA, M. A. A., MOURA JUNIOR, N. J. de, ABREU, M. A., DA SILVA, A. L. e FORTES, L. P. S. RBMC em Tempo Real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, 2008.

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.

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

Nischan, Thomas. (2016). *GFZRNx - RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox (Version 1.05)*. 10.5880/GFZ.1.1.2016.002.

IGNS – *International GNSS Service*. Disponível em: <https://www.igs.org/products/#-real_time_comparison>. Acesso 13 de julho de 2021.

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.

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

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).

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

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.



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., SILVA N.G., SOUZA V. A., Utilização da boia GPS Hydrolevel na redução da sondagem. *Anais Hidrográficos*. Tomo LXIX. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/anais/ah_2012_0.pdf. Acesso em: 22 mai. 2023.

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>. Acesso em: 29 jul. 2020.

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.

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.

SANTANA, F. R Determinação e validação de modelos de separação de superfícies com referência ao elipsoide pelo gnss e gnss/ins. 2022. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

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.

T.Takasu, *RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS*, FOSS4G 2009 Tokyo, Japan, November 2, 2009.



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

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.

WELLS, D., 1987, *Guide to GPS positioning: Canadian GPS Associates, Fredericton, NB* ZHENG J. *WHAT IS BOX PLOT?* 2021. Disponível em: <https://jingwen-z.github.io/what-is-box-plot/>. Acesso em 03 ago 2021.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/96jb03860>. Acesso em 20 jun 2021

