



MARINHA DO BRASIL

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

ANÁLISE DA ACURÁCIA DE RECEPTOR GNSS DE BAIXO CUSTO EM  
POSICIONAMENTO ESTÁTICO E CINEMÁTICO

2º Ten. José Daniel ARRUDA Freitas

Niterói-RJ, Brasil

Outubro, 2025

José Daniel Arruda Freitas

ANÁLISE DA ACURÁCIA DE RECEPTOR GNSS DE BAIXO CUSTO EM  
POSICIONAMENTO ESTÁTICO E CINEMÁTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientador: Capitão-Tenente (EN) Edico Ramon de Melo

Niterói-RJ, Brasil

Outubro, 2025

Freitas, José Daniel Arruda

Análise da acurácia de receptor GNSS de baixo custo em posicionamento estático e cinemático / José Daniel Arruda Freitas.  
– Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2025.

x, 49 f.: il. Color.; 29,7 cm.

Orientador: Edico Ramon de Melo.

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 32-33.

1. GNSS. 2. Acurácia. 3. Baixo custo.

I. de Melo, Edico Ramon. II. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. III. Análise da acurácia de receptor GNSS de baixo custo em posicionamento estático e cinemático.

CDD: 526.982

ANÁLISE DA ACURÁCIA DE RECEPTOR GNSS DE BAIXO CUSTO EM  
POSICIONAMENTO ESTÁTICO E CINEMÁTICO

José Daniel Arruda Freitas

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE TÉCNICO DO CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA MARINHA DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

---

CT (EN) EDICO Ramon de Melo, M.Sc.

---

CT (QC-CA) Flávio ALVES da Cunha Silva, M.Sc.

---

1T (RM2-EN) MARCELLA Fernandes de Oliveira Melo, M.Sc.

NITERÓI, RJ – BRASIL  
OUTUBRO DE 2025



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela possibilidade de viver as inúmeras experiências que essa vida me proporciona, melhorando e aprendendo a cada dia mais.

Agradeço a meus pais por tudo que fizeram e fazem por mim até hoje, consolidando muito do que há de melhor em mim.

À Aline, minha namorada, agradeço por todo o apoio e incentivo que me deu durante esse ano desafiador, estando ao meu lado e servindo de exemplo de determinação e de superação de desafios.

Ao meu orientador, CT (EN) Edico, agradeço por cada ensinamento, pela paciência e pela disponibilidade em orientar-me com dedicação. A ele devo o crédito pela ideia original que deu origem a este trabalho e a todo o desenvolver dele.

Destaco também a participação do 1ºSG-HN Oliveira Silva e 2ºSG-HN Bryan, que gentilmente disponibilizaram seu tempo para viabilizar a coleta de dados em campo, tornando este projeto possível.

Aos meus irmãos e avós, agradeço pelo carinho e conselhos que sempre levei em consideração. Aos demais familiares e amigos agradeço pelos momentos descontraídos e pelas boas conversas.

Devo um agradecimento especial aos meus amigos da turma do CAHO 2025, por manterem um clima ameno, leve e favorável para o aprendizado e cooperação, sem esse apoio eu não teria vencido.

Aos mestres e instrutores do curso, agradeço por toda a paciência e por acreditarem no nosso potencial.

## RESUMO

O presente trabalho avalia a acurácia posicional de um receptor GNSS de baixo custo (U-blox F9P) em comparação com um receptor geodésico de referência (Emlid RS2), investigando sua viabilidade para aplicações em hidrografia. A metodologia consistiu na realização de levantamentos estático e cinemático nos modos *Post-Processed Kinematic* (PPK) e *Post-Processed Static* (PPS), utilizando o *software* RTKLib e dados de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE. Para a análise quantitativa, desenvolveu-se um *script* em linguagem Python para realizar a transformação de coordenadas do sistema geodésico para *Universal Transverse Mercator* (UTM), calcular as diferenças e computar as métricas de erro, em especial o *Root Mean Square Error* (RMSE). Os resultados do levantamento estático demonstraram acurácia centimétrica e, considerando um nível de confiança de 95%, as incertezas horizontal e vertical atenderam aos critérios da “Ordem Exclusiva” da norma S-44 da *International Hydrographic Organization* (IHO) para objetos fixos, ajudas/ auxílios e estruturas/ feições significativas para a navegação acima do Referencial Vertical. A análise do levantamento cinemático corroborou o resultado anterior, com alta concordância entre as trajetórias levantadas com o receptor de baixo custo e o receptor de referência. Conclui-se que o receptor de baixo custo constitui uma alternativa para suprir as demandas geodésicas da hidrografia, nas aplicações em que o pós-processamento é uma técnica adequada.

Palavras-chave: Acurácia. Custo-benefício. Levantamento geodésico.

## ABSTRACT

This study evaluates the positional accuracy of a low-cost GNSS receiver (U-blox F9P) in comparison to a geodetic-grade reference receiver (Emlid RS2), investigating its viability for applications in hydrography. The methodology consisted of static and kinematic surveys in Post-Processed Kinematic (PPK) and Post-Processed Static (PPS) modes, using the RTKLib software and data from stations of the IBGE's Brazilian Network for Continuous GNSS Monitoring (RBMC). For the quantitative analysis, a Python script was developed to perform coordinate transformation from the geodetic system to Universal Transverse Mercator (UTM), calculate the differences, and compute error metrics, especially the Root Mean Square Error (RMSE). The results from the static survey demonstrated centimetric accuracy and, considering a 95% confidence level, the horizontal and vertical uncertainties met the criteria of the International Hydrographic Organization (IHO) S-44 "Exclusive Order" standard regarding fixed objects, aids to navigation, and significant features for navigation above the Vertical Datum. The analysis of the kinematic survey corroborated the previous result, with high agreement between the trajectories surveyed with the low-cost receiver and the reference receiver. It is concluded that the low-cost receiver constitutes an alternative to meet the geodetic demands of hydrography in applications where post-processing is a suitable technique.

Keywords: Accuracy. Cost-effectiveness. Geodetic Surveying.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Receptor GNSS AFS 392 com NavController III Trimble .....	12
Figura 2 - Receptor Holybro H-RTK F9P Helical com o módulo U-blox F9P (OEM 12018) .....	12
Figura 3 - Segmentos espacial e de controle. (A) Constelação de satélites GPS e (B) Elementos de controle do sistema GPS .....	14
Figura 4 - Erros ionosféricos.....	18
Figura 5 - Rastreios estáticos. (A) Geodésico e (B) Baixo custo.....	20
Figura 6 - Localização da área de estudo e dos pontos do levantamento estático .....	23
Figura 7 - Diferença entre as medições.....	26
Figura 8 - Rastreio cinemático com receptor geodésico .....	27
Figura 9 - Rastreio cinemático com receptor de baixo custo.....	28
Figura 10 - Comparação entre os resultados.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de configurações dos levantamentos.....	19
Tabela 2 - Padrões mínimos para levantamentos envolvendo segurança da navegação.....	22
Tabela 3 - Resultados do receptor geodésico .....	24
Tabela 4 - Resultados do receptor de baixo custo .....	24
Tabela 5 - Diferenças entre os resultados .....	25
Tabela 6 - Valores de RMSE .....	25

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BOC	<i>Binary Offset Carrier</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CIAARA	Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IHO	<i>International Hydrographic Organization</i>
MB	Marinha do Brasil
MBOC	<i>Multiplexed Binary Offset Carrier</i>
PPK	<i>Post-Processed Kinematic</i>
PPS	<i>Post-Processed Static</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
THU	<i>Total Horizontal Uncertainty</i>
TVU	<i>Total Vertical Uncertainty</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1	COMPOSIÇÃO DO GNSS .....	13
2.2	FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS DO GNSS .....	14
2.3	OBSERVÁVEIS GNSS.....	16
2.4	ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GNSS .....	17
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>23</b>
5.1	RASTREIO ESTÁTICO .....	23
5.2	RASTREIO CINEMÁTICO.....	26
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
6.1	ANÁLISE DO RASTREIO ESTÁTICO .....	30
6.2	ANÁLISE DO RASTREIO CINEMÁTICO.....	30
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>
	<b>APÊNDICE A – SCRIPT PARA ANÁLISE DE DADOS GNSS EM PYTHON.....</b>	<b>35</b>
	<b>ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO CHIPSET U-BLOX F9P .....</b>	<b>38</b>
	<b>ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA ANTENA HX-CH6601A.....</b>	<b>40</b>
	<b>ANEXO C – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO EMLID RS2.....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução das tecnologias e equipamentos que envolvem o posicionamento baseado em sistemas de satélites influencia diretamente o *modus operandi* dos profissionais das áreas de geotecnologias. O aprimoramento das atividades que demandam localização precisa na superfície terrestre depende de uma constante atualização de conhecimentos técnicos sobre os aparelhos receptores de sinais desses satélites e sobre seu manuseio (Martins *et al.*, 2017).

Nesse contexto, destaca-se o *Global Navigation Satellite System* (GNSS), formado por múltiplas constelações de satélites artificiais, estações de controle e receptores em solo (Teunissen e Montenbruck, 2017). O GNSS permite determinar a posição tridimensional de um ponto em qualquer parte do planeta, sendo composto por sistemas como o GPS (EUA), GLONASS (Rússia), Galileo (União Europeia) e BeiDou (China) (Seeber, 2003; Monico, 2008).

Diante de tal dinâmica de modernização, é importante avaliar se a quantidade e o desempenho dos equipamentos utilizados em campo continuam sendo adequados para atender aos parâmetros exigidos pelos órgãos que regulamentam os padrões de qualidade dos produtos gerados pelos levantamentos. No caso da Marinha do Brasil (MB), existe uma necessidade premente de aquisição de novos equipamentos para suprir a demanda de utilização em apoio aos levantamentos hidrográficos. Segundo de Lima (2018), uma boa maneira de se manter a par da situação é focar em reduzir os custos no que tange à compra e utilização dos receptores dos sinais de satélites de terceiros, porém sem perder de vista os parâmetros mínimos de qualidade do dado obtido.

A utilização de receptores geodésicos convencionais requer um elevado gasto de aquisição e manutenção, o que tem levado os usuários desse tipo de tecnologia a procurar soluções alternativas diante das opções do mercado (Luz *et al.*, 2020). O preço atual desses receptores de alta precisão, comuns em trabalhos oficiais de levantamento, está na casa das dezenas de milhares de reais. Uma breve pesquisa de mercado exemplifica a diferença de custo entre os equipamentos: na Figura 1, apresenta-se o receptor GNSS AFS 392 com NavController III Trimble, com valor de R\$ 69.900,00<sup>1</sup>, enquanto na Figura 2 mostra-se o

---

<sup>1</sup>SUPREMA. **Receptor GNSS AFS 392 com NavController III Trimble**, [s.d]. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5211183194>. Acesso em: 21 abr. 2025.



receptor Holybro H-RTK F9P Helical equipado com o módulo U-blox F9P (OEM 12018), com valor de R\$ 7.399,00<sup>2</sup>.

Figura 1 - Receptor GNSS AFS 392 com NavController III Trimble



Fonte: SUPREMA (s. d.)

Figura 2 - Receptor Holybro H-RTK F9P Helical com o módulo U-blox F9P (OEM 12018)



Fonte: JANGÃO (s. d.)

Com o propósito de analisar a acurácia de receptores GNSS de baixo custo em posicionamento estático e cinemático, avaliou-se a empregabilidade desses receptores em apoio aos levantamentos hidrográficos, a fim de verificar se os resultados obtidos atenderam aos padrões das normas da *International Hydrographic Organization* (IHO). Para alcançar os objetivos propostos, utilizou-se um receptor GNSS de baixo custo, comparando-o com os

<sup>2</sup> JANGÃO. Holybro H-RTK F9P Helical, Posicionamento GNSS de Alta Precisão para Drones, Módulo UBLOX F9P, 12018. [s.d.]. Disponível em: <https://www.lojadojangao.com.br/produtos/holybro-h-rtk-f9p-helical>. Acesso em: 22 abr. 2025.

geodésicos de alta precisão utilizados pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Os levantamentos estático e cinemático foram realizados em ambientes costeiros, com pós-processamento pelos métodos *Post-Processed Kinematic* (PPK) e *Post-Processed Static* (PPS) nos *softwares* RTKLib<sup>3</sup>, Global Mapper<sup>4</sup> e QGIS<sup>5</sup> para a visualização espacial do resultado.

As análises envolveram comparação de coordenadas, erros absolutos e métricas estatísticas como o *Root Mean Square Error* (RMSE), processadas em um *script* elaborado na linguagem de programação Python e planilhas eletrônicas. Os resultados foram avaliados segundo os critérios da Tabela 2 da norma S-44 da IHO. Todas estas fases estão detalhadas no capítulo de metodologia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPOSIÇÃO DO GNSS

O sistema GNSS possui três segmentos principais: espacial, de controle e de usuários. O segmento espacial é composto pelos satélites que orbitam a Terra, sendo responsável por emitir sinais que permitem o posicionamento – a partir de, no mínimo, quatro satélites – a qualquer hora e local do globo terrestre. Já o segmento de controle envolve estações que monitoram e gerenciam a operação dos satélites, garantindo que eles estejam nas órbitas corretas e funcionando conforme esperado. Dentro disso, o segmento de controle fica responsável por determinar as efemérides satelitais, estimar os desvios dos relógios atômicos e realizar atualizações periódicas das mensagens de navegação transmitidas por cada equipamento. Por fim, o segmento de usuários captura os sinais emitidos pelos satélites através de dispositivos receptores. Cada um desses rastreadores GNSS deve possuir capacidades apropriadas de acordo com a atividade de propósito deles, seja para posicionamento em levantamentos topográficos, de navegação, entre outros (Monico, 2008).

---

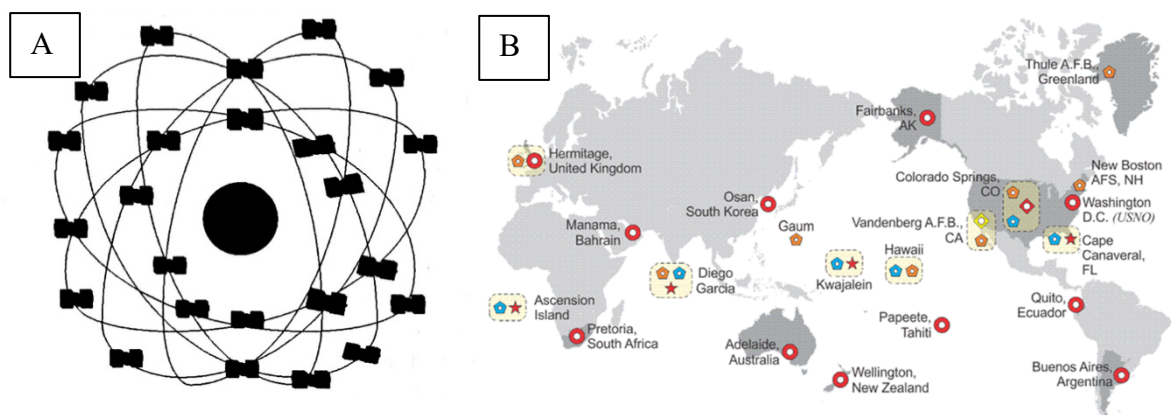
<sup>3</sup> TAKASU, T. **RTKLib: an open source program package for GNSS positioning**. [Software]. 2023. Disponível em: <https://www.rtklib.com>. Acesso em: 23 abr. 2025.

<sup>4</sup> BLUE MARBLE GEOGRAPHICS. **Global Mapper**. v23.1. Hallowell: Blue Marble Geographics, 2025. Software. Disponível em: <https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

<sup>5</sup> QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation, 2025. Software. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 3 out. 2025.

De acordo com Van Sickle (2015), a divisão do sistema GNSS em segmentos distintos permite uma abordagem estruturada e eficiente para o gerenciamento e o funcionamento contínuo do sistema. O segmento espacial inclui as constelações de satélites distribuídas em planos orbitais, enquanto o segmento terrestre (ou de controle) fica alocado na superfície do globo em forma de estações monitoras e de outros elementos de controle. Na Figura 3, adotou-se o sistema GPS como exemplo para ilustração dos segmentos.

Figura 3 - Segmentos espacial e de controle. (A) Constelação de satélites GPS e (B) Elementos de controle do sistema GPS



Fonte: (A) Monico (2008) e (B) Adaptado de Van Sickle (2015)

## 2.2 FREQUÊNCIAS FUNDAMENTAIS DO GNSS

Os sistemas GNSS operam em diferentes faixas de frequência, cada uma com características específicas que determinam sua aplicação e desempenho. As frequências fundamentais serão explicadas com base em três sistemas: GPS, GLONASS e Galileo. Os sinais são transmitidos por meio de ondas de rádio, utilizando bandas conhecidas como L, E e G, conforme o sistema em questão.

No sistema GPS as principais frequências são L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) e L5 (1176,45 MHz). A banda L1 é a mais utilizada, transportando tanto o código C/A para uso civil quanto o código P(Y) para aplicações militares e geodésicas. A frequência L2, originalmente destinada ao código P(Y), passou a incluir também o código civil L2C nos satélites modernizados, melhorando significativamente a precisão das medições. Já a L5, com seu código L5C, foi especialmente desenvolvida para aplicações críticas como a aviação, oferecendo maior robustez e confiabilidade (Monico, 2008).

O sistema GLONASS utiliza uma abordagem diferente na alocação de frequências. Cada satélite transmite em uma frequência única dentro das bandas L1 (1598,625-1604,25 MHz) e L2 (1242,9375-1247,75 MHz), utilizando a técnica *Frequency Division Multiple Access* (FDMA). A banda L1 transporta tanto o código C/A (civil) quanto o P (militar), enquanto a L2 é primariamente destinada ao código P, com o GLONASS apresentando uma arquitetura singular onde todos os satélites utilizam os mesmos códigos PRN, diferenciando-se apenas pelas frequências de transmissão atribuídas a cada um. Essa característica simplifica o processo de identificação dos satélites no receptor, embora exija um projeto mais complexo no *front-end* de RF para lidar com as múltiplas frequências (Monico, 2008). É importante notar que, em um esforço de modernização, as gerações mais recentes de satélites GLONASS (série GLONASS-K) passaram a transmitir também sinais em *Code Division Multiple Access* (CDMA) na banda L3, buscando maior interoperabilidade com os demais sistemas GNSS (Revnivkykh et al., 2017).

O Galileo, sistema europeu, introduziu uma arquitetura mais complexa com quatro portadoras principais: E1 (1575,42 MHz), E5A (1176,45 MHz), E5B (1207,14 MHz) e E6 (1278,75 MHz). A frequência E1, compatível com a L1 do GPS, foi projetada para serviços abertos (E1-B) e serviços públicos regulamentados (E1-C). As bandas E5A e E5B oferecem serviços combinados, enquanto a E6 é reservada para aplicações governamentais e comerciais restritas. O Galileo utiliza técnicas avançadas de modulação como *Binary Offset Carrier* (BOC) e *Multiplexed Binary Offset Carrier* (MBOC) para garantir interoperabilidade com outros sistemas GNSS (Monico, 2008).

A escolha das frequências em cada sistema leva em consideração diversos fatores, incluindo precisão requerida, resistência a interferências atmosféricas e capacidade de correção de erros. Enquanto o GPS e o Galileo adotam a técnica CDMA, o GLONASS emprega classicamente o FDMA (Monico, 2008), embora já incorpore sinais CDMA em seus satélites mais modernos (Revnivkykh et al., 2017), resultando em abordagens distintas para identificação e separação dos sinais dos diferentes satélites. O Quadro 1 sintetiza essas características, apresentando de forma comparativa as frequências operacionais, códigos e aplicações específicas de cada sistema.

Quadro 1 – Estrutura básica do sinal e suas aplicações

Sistema	Frequências (MHz)	Códigos/Sinais	Características Principais
GPS	L1: 1575,42	C/A, P(Y)	Principal frequência civil/militar
	L2: 1227,60	P(Y), L2C	Correção ionosférica, alta precisão
	L5: 1176,45	L5C	Aplicações críticas (aviação)
GLONASS	L1: 1598,625-1604,25	C/A, P	FDMA, frequência única por satélite
	L2: 1242,9375-1247,75	P	Sem degradação intencional de sinais
Galileo	E1: 1575,42	E1-B, E1-C	Serviços abertos e públicos regulamentados
	E5A: 1176,45	E5A-I, E5A-Q	Interoperabilidade com GPS L5
	E5B: 1207,14	E5B-I, E5B-Q	Serviço comercial combinado
	E6: 1278,75	E6-C, E6-B	Uso governamental e aplicações restritas

Fonte: Adaptado de Monico (2008)

### 2.3 OBSERVÁVEIS GNSS

Os dados primários que são coletados pelos receptores e utilizados para calcular posições, velocidade e tempo são chamados de Observáveis GNSS. Esses dados são de dois tipos principais: pseudodistância (*pseudorange*) e fase da onda portadora (*carrier phase*) (Seeber, 2003; Langley, 1996a).

A pseudodistância é a medida do sinal enviado pelos satélites até o receptor. Essa medição se baseia no código gerado no satélite e uma réplica do código gerada no receptor, que são enviados um ao outro, sendo o atraso dos sinais que chegam ao seu destino igual ao tempo de propagação dos sinais no trajeto. A equação básica da pseudodistância leva em

consideração a distância física entre o satélite e o receptor, mas também inclui vários componentes de erro, como o erro atmosférico, erro de relógio e erros de multicaminhamento (Monico, 2008). A Equação 1 representa, de maneira geral, a determinação da pseudodistância:

$$\text{Pseudodistância} = \text{Distância real} + \text{Erros diversos.} \quad (1)$$

A medição da distância baseada na fase da onda portadora é uma das técnicas mais precisas no GNSS, pois utiliza como referência cálculos envolvendo a fase do sinal da portadora, em vez da pseudodistância, para medir a distância entre o satélite e o receptor. A medição da fase da onda portadora nada mais é que a diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerado no mesmo receptor (ambas no instante de recepção). Esse método é muito preciso, mas demanda a utilização de técnicas avançadas de processamento de sinais e resolução de ambiguidades, que é um problema inerente a natureza da técnica (Monico, 2008).

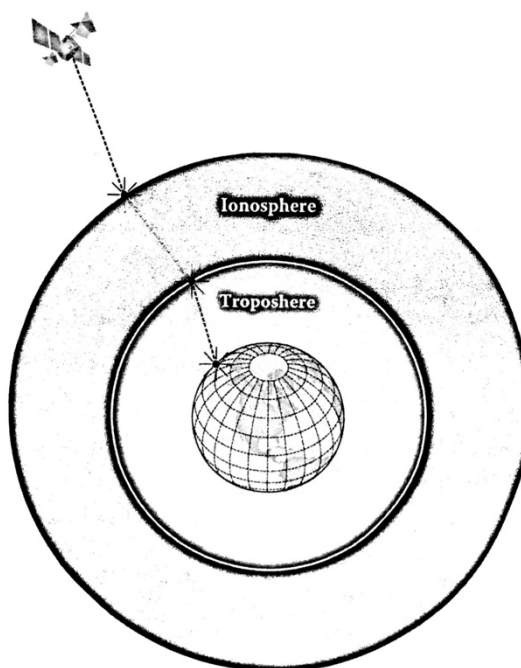
## 2.4 ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GNSS

Dentro dos cálculos para obtenção da posição existe a componente que representa os erros diversos. Esses fatores são compostos de erros mensuráveis e detectáveis, e estão presentes nos modelos matemáticos pois influenciam significativamente nos resultados da medição. Existem também os erros que são aleatórios, ou seja, são imprevisíveis e inevitáveis. Todas essas incertezas são classificadas e subdividas com base na origem delas, mas para o objetivo deste trabalho serão destacados apenas dois tipos de erro: o ionosférico e o de relógio.

O erro ionosférico é causado pelas condições atmosféricas que podem afetar a propagação do sinal do satélite até o receptor. A ionosfera é uma camada da atmosfera composta por partículas carregadas, e os sinais de rádio que atravessam essa camada podem sofrer interferências que causam um retardo no sinal. Esse atraso pode gerar erros significativos no cálculo de posição, especialmente em grandes distâncias. Segundo Van Sickle (2015), o erro ionosférico se destaca como sendo um dos mais significativos geradores

de imprecisão ao utilizar sistemas GNSS. Na Figura 4 é possível visualizar os efeitos refratários causados no sinal pela camada ionosférica, algo semelhante também ocorre na camada troposférica.

Figura 4 - Erros ionosféricos



Fonte: Adaptado de Van Sickle (2015)

De acordo com Van Sickle (2015), o erro de relógio ocorre quando há discrepâncias entre o tempo no receptor e o tempo nos satélites. A precisão do GNSS depende da medição exata do tempo que o sinal leva para viajar do satélite até o receptor, fato esse que faz com que o segmento de controle monitore constantemente os relógios de ambos os dispositivos. Pequenos erros nos relógios podem resultar em grandes imprecisões, já que o tempo é uma das principais variáveis para o cálculo da distância. Os produtores de receptores de baixo custo devem se atentar para a precisão dos relógios de seus dispositivos, pois isso afeta diretamente no cálculo da posição.

### 3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a acurácia dos dados GNSS obtidos com receptores de baixo custo, comparando-os com aqueles coletados por equipamentos

geodésicos convencionais, de maior custo e sofisticação. Para tanto, buscou-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a empregabilidade de receptores GNSS de baixo custo em apoio à hidrografia;
- e
- Analisar a precisão dos dados obtidos em relação às normas da Organização Hidrográfica Internacional.

#### 4 METODOLOGIA

Foi utilizado um receptor GNSS de baixo custo, equipado com chipset U-blox F9P e antena HX-CH6601A, cujas características técnicas estão detalhadamente documentadas nos ANEXOS A e B, respectivamente. Também foi empregado o receptor geodésico Emlid RS2 (ANEXO C), utilizado para levantamentos GNSS pelo CHM, conhecido por ser um equipamento de referência devido à sua alta acurácia. Além disso, foram utilizados acessórios de apoio para a coleta de dados, sendo eles: bastão, bipés, base nivelante e trena.

Os trabalhos de campo compreenderam levantamentos estáticos e cinemáticos com ambos os tipos de receptores GNSS: geodésicos convencionais e os de baixo custo (Figura 5).

O critério de seleção dos pontos para o posicionamento estático baseou-se nas fichas F-21 do CHM, por se tratarem de marcos geodésicos materializados de forma perene no solo. Para os levantamentos cinemáticos, foi definida uma área de estudo que apresentava feições próximas de ambientes costeiros, com construções humanas como píeres e cais. A Tabela 1 descreve os parâmetros utilizados na configuração dos equipamentos durante o levantamento (baixo custo e geodésico).

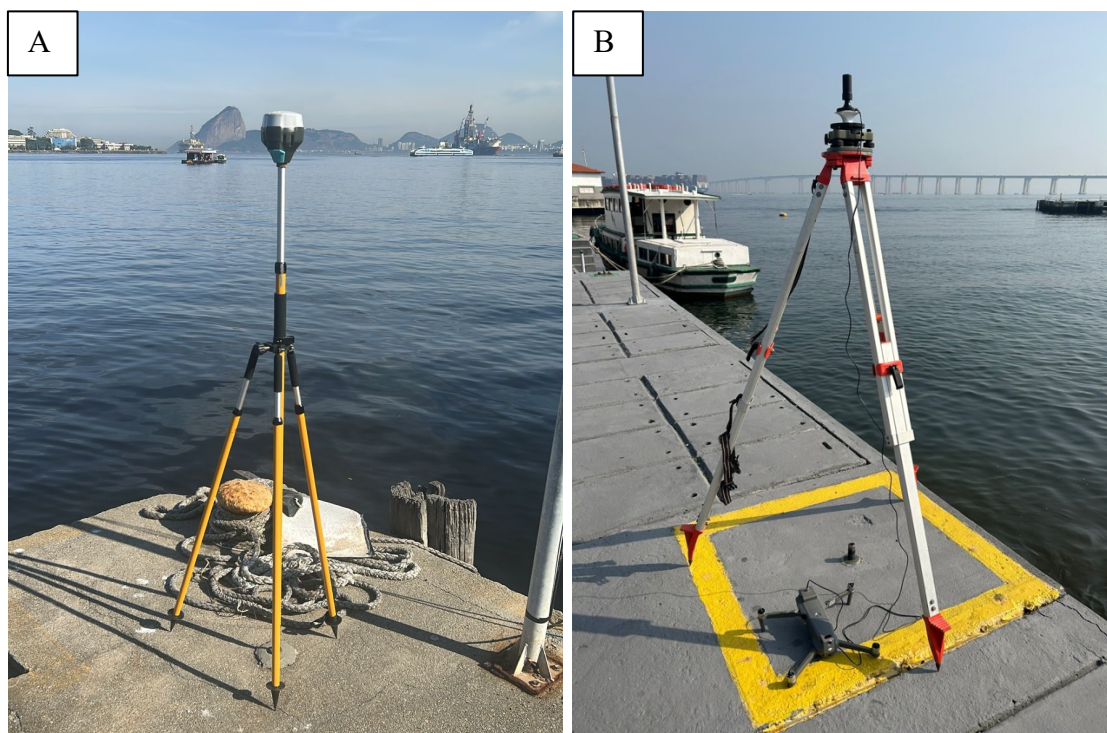
Tabela 1 - Parâmetros de configurações dos levantamentos

Parâmetros	Geodésico	Baixo custo
Tempo da sessão	20 min	20 min
Máscara de elevação	10°	7,5°
Taxa de aquisição	1 Hz	10 Hz

Fonte: O autor (2025)



Figura 5 - Rastreios estáticos. (A) Geodésico e (B) Baixo custo



Fonte: O autor (2025)

Para o pós-processamento dos dados GNSS (estáticos e cinemáticos), foram utilizados os métodos de processamento PPK e PPS, a partir do *software* RTKLib, gratuito e de ampla utilização por parte da comunidade geodésica nacional e internacional. Para a realização do processamento diferencial, foram empregadas as efemérides transmitidas pelos satélites e os dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), utilizando-se como base as estações ONRJ (Observatório Nacional) e RJNI (Niterói) (IBGE, 2025). Em etapa complementar, foram criados arquivos no formato KMZ, tipo de formato gerado para ser lido por plataformas como o Google Earth, Google Maps e Global Mapper, o que facilitou a análise visual ao final da pesquisa.

A análise quantitativa focou nas diferenças entre as coordenadas obtidas pelos diferentes receptores, expressas em termos de erros absolutos. Complementarmente, as análises estatísticas foram processadas a partir de um *script* desenvolvido em linguagem Python (APÊNDICE A), utilizando principalmente as bibliotecas Matplotlib (Hunter, 2007), NumPy (Harris et al., 2020), Pandas (The Pandas Development Team, 2020) e Pyproj (Proj Contributors, 2025) e executado no ambiente de programação Spyder.

Como pré-requisito para os cálculos em unidades métricas, o *script* realizou a transformação das coordenadas geodésicas (Latitude, Longitude) de ambos os levantamentos

para o sistema de projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM) (coordenadas Norte e Leste).

Para a análise de acurácia, os resultados das coordenadas obtidas pelo receptor Emlid Reach RS2 foram utilizados como valores de referência (REF), a partir dos quais se estabeleceu uma coordenada tridimensional média. Em comparação, as diferenças de cada ponto fornecido pelo receptor de baixo custo (U-blox F9P) foram calculados em relação a essa referência.

A partir dessas diferenças, o *script* calculou o RMSE, utilizando a metodologia descrita na Equação 2. Os valores foram separados tendo em vista a comparação com padrões de incerteza horizontal e vertical, sendo dispostos da seguinte forma:

- O RMSE Horizontal (RMSE<sub>H</sub>), que representa a incerteza planimétrica, foi calculado a partir da resultante euclidiana (Teorema de Pitágoras) dos erros nas coordenadas Norte (derivada da Latitude) e Leste (derivada da Longitude), conforme a Equação 3.
- O RMSE Vertical (RMSE<sub>V</sub>), que representa a incerteza altimétrica, foi calculado diretamente a partir dos erros na componente de altitude, conforme a Equação 4.

Estas duas métricas serviram como os principais parâmetros de análise estatística para a avaliação de desempenho do receptor de baixo custo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{F9P,i} - x_{REF,i})^2} \quad (2)$$

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\Delta E_i)^2 + (\Delta N_i)^2]} \quad (3)$$

$$RMSE_V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i)^2} \quad (4)$$

Por fim, a análise visual contou com o auxílio de *softwares* de geoprocessamento. O QGIS foi empregado na elaboração do mapa de localização da área de estudo, apresentado nos resultados. O GlobalMapper, por sua vez, foi utilizado para a visualização dos vetores

formados pelos pontos rastreados e para a sobreposição espacial das trajetórias, permitindo a identificação de padrões de erro.

A integração entre métodos quantitativos, estatísticos e geoespaciais proporcionou uma avaliação abrangente e multidimensional da performance dos receptores GNSS testados. A partir da conclusão das análises, foi feita a verificação em relação aos parâmetros mínimos exigidos pela Tabela 2 da S-44 da IHO, que versa sobre requisitos mínimos de qualidade para levantamentos hidrográficos, com foco na segurança da navegação (IHO, 2022).

Tabela 2 - Padrões mínimos para levantamentos envolvendo segurança da navegação

Reference	Criteria	Uncertainty Component	Order 2	Order 1b	Order 1a	Special Order	Exclusive Order	
<a href="#">Section 5.2</a>	Fixed Objects, Aids to Navigation, Features Above the Vertical Reference Significant to Navigation	<a href="#">THU</a> [m]	5 m *Pa4	2 m *Pa6	2 m *Pa6	2 m *Pa6	1 m *Pa7	
		<a href="#">TVU</a> [m]	2 m *Pb2	2 m *Pb2	1 m *Pb3	0.5 m *Pb4	0.25 m *Pb5	
<a href="#">Section 5.3</a>	Floating Objects and Aids to Navigation	<a href="#">THU</a> [m]	20 m *Pc2	10 m *Pc3	10 m *Pc3	10 m *Pc3	5 m *Pc4	
<a href="#">Section 5.4</a>	Coastline (high, low, MWL water lines, etc.)	<a href="#">THU</a> [m]	10 m *Pd2	10 m *Pd2	10 m *Pd2	10 m *Pd2	5 m *Pd3	
<a href="#">Section 5.5</a>	Features Above the Vertical Reference Less Significant to Navigation	<a href="#">THU</a> [m]	20 m *Pe2	20 m *Pe2	20 m *Pe2	10 m *Pe3	5 m *Pe4	
		<a href="#">TVU</a> [m]	3 m *Pf1	2 m *Pf2	1 m *Pf3	0.5 m *Pf4	0.3 m *Pf5	
<a href="#">Section 5.6</a>	Overhead Clearances	<a href="#">THU</a> [m]	10 m *Pg1	10 m *Pg1	5 m *Pg2	2 m *Pg3	1 m *Pg4	
		<a href="#">TVU</a> [m]	3 m *Ph1	2 m *Ph2	1 m *Ph3	0.5 m *Ph4	0.3 m *Ph5	
<a href="#">Section 5.7</a>	Angular Measurements	[degrees]	0.5 degrees					*Pi4
<a href="#">Section 4.4</a>	Water Flow Direction	[degrees]	10 degrees					*Wa1
<a href="#">Section 4.4</a>	Water Flow Speed	[knots]	0.1 knots					*Wb5

Fonte: IHO (2022)



Tabela 3 - Resultados do receptor geodésico

Ponto	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)
1	-43,13287915233380	-22,88229095398850	27,222
2	-43,13207734816300	-22,88487730091220	-3,824
3	-43,13395982903850	-22,88537057604630	-3,563
4	-43,13443545018870	-22,88176229611320	-3,731
5	-43,13543255594280	-22,88625124305050	-3,612
6	-43,13496096055000	-22,88332925711670	-3,839
7	-43,13073749137880	-22,88690629843820	-2,704
8	-43,13402561813080	-22,88310930041590	10,602
9	-43,13439257148950	-22,88298619341460	11,632
10	-43,13291599989680	-22,88478995602310	5,457
11	-43,13383583223380	-22,88454208770870	-3,324
12	-43,13280516621820	-22,88454917789140	10,669
13	-43,13425708136730	-22,88446338627100	-3,285

Fonte: O autor (2025)

Tabela 4 - Resultados do receptor de baixo custo

Ponto	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)
1	-43,13287935559020	-22,88229079978920	27,184
2	-43,13207724086100	-22,88487745943050	-3,769
3	-43,13396014914500	-22,88537097139860	-3,613
4	-43,13443557570490	-22,88176274275700	-3,750
5	-43,13543239958720	-22,88625150920490	-3,676
6	-43,13496117035190	-22,88332944031180	-3,924
7	-43,13073778700000	-22,88690657900000	-2,817
8	-43,13402564338930	-22,88310936874050	10,514
9	-43,13439269469400	-22,88298642090820	11,571
10	-43,13291607391300	-22,88479023682610	5,347
11	-43,13383589247950	-22,88454244823410	-3,445
12	-43,13280544064570	-22,88454917740000	10,706
13	-43,13425744886280	-22,88446314536780	-3,304

Fonte: O autor (2025)

A Tabela 5 apresenta as diferenças absolutas calculadas entre as coordenadas médias de ambos os receptores, assim como a média dessas diferenças, que representa a tendência ou *bias* sistemático entre os equipamentos.

Tabela 5 - Diferenças entre os resultados

<b>Diferenças</b>			
<b>Ponto</b>	<b>Longitude (m)</b>	<b>Latitude (m)</b>	<b>Altitude(m)</b>
1	-0,021	0,017	-0,038
2	0,011	-0,018	0,055
3	-0,036	-0,044	-0,050
4	-0,014	-0,050	-0,019
5	0,017	-0,030	-0,064
6	-0,023	-0,020	-0,085
7	-0,033	-0,031	-0,114
8	-0,003	-0,008	-0,089
9	-0,014	-0,025	-0,060
10	-0,008	-0,031	-0,110
11	-0,007	-0,040	-0,121
12	-0,031	0,000	0,038
13	-0,041	0,027	-0,019
<b>Média</b>	<b>-0,015</b>	<b>-0,019</b>	<b>-0,052</b>

Fonte: O autor (2025)

Adicionalmente, a análise de precisão do receptor de baixo custo em relação ao de referência resultou nos valores de RMSE apresentados na Tabela 6.

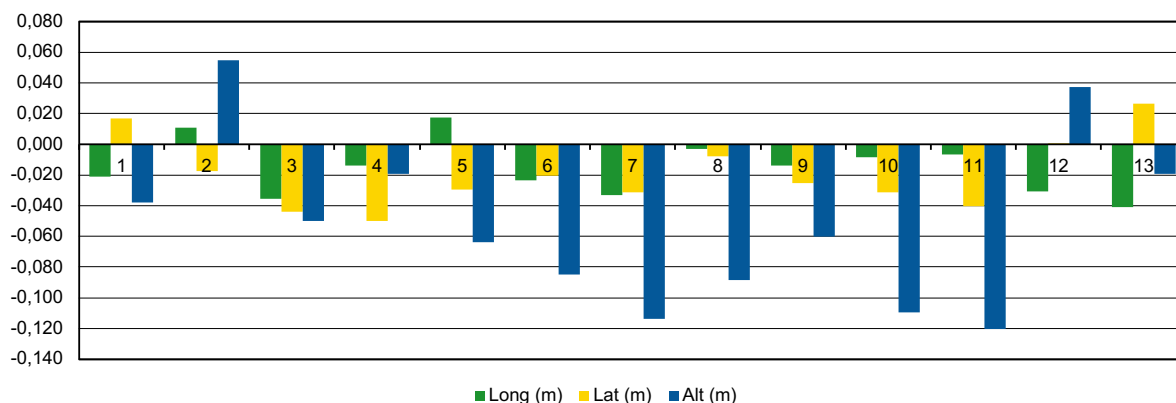
Tabela 6 - Valores de RMSE

<b>RMSE (m)</b>	
Horizontal	0,036
Vertical	0,074

Fonte: O autor (2025)

A representação visual da distribuição dos erros planimétricos e altimétricos é apresentada na Figura 7. O gráfico, elaborado com o auxílio de planilha eletrônica, ilustra a dispersão de cada ponto medido pelo receptor de baixo custo em torno da posição de referência, que está centralizada na origem (0,0,0).

Figura 7 - Diferença entre as medições



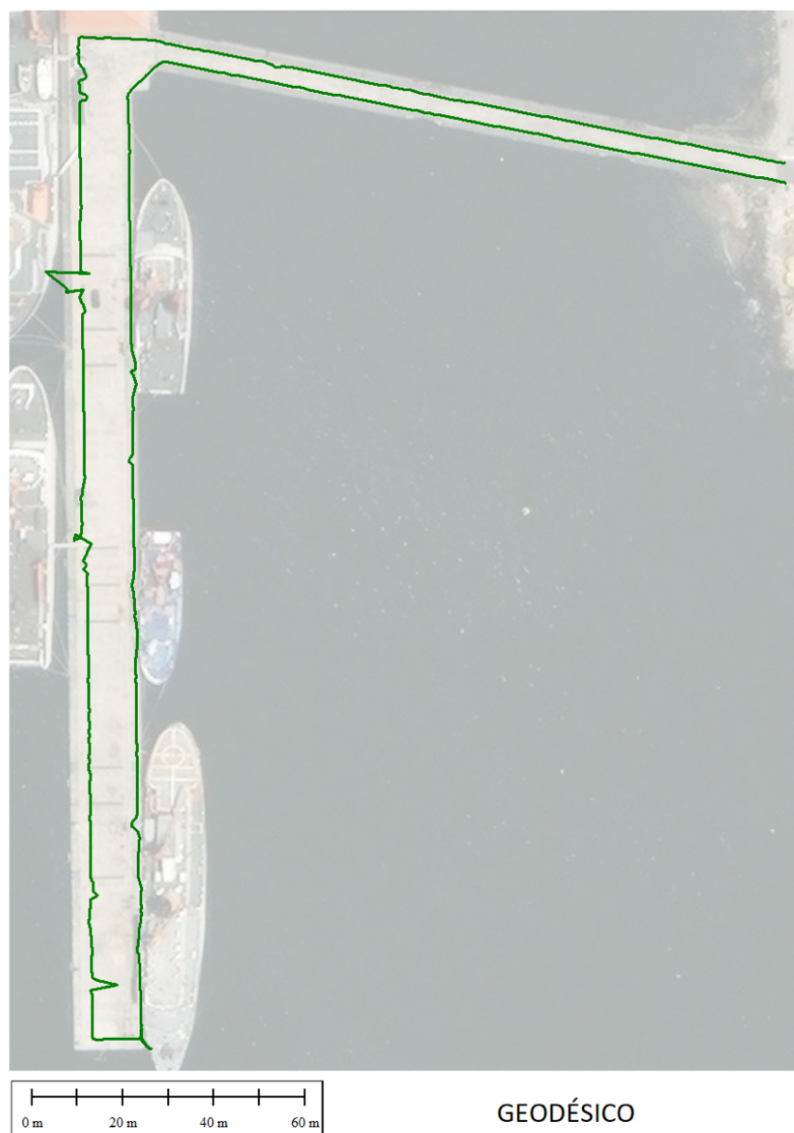
Fonte: O autor (2025)

## 5.2 RASTREIO CINEMÁTICO

Para o levantamento cinemático, a análise foi realizada de forma visual e comparativa, a partir das trajetórias registradas por cada um dos receptores. Os resultados são apresentados individualmente e, em seguida, de forma sobreposta para a análise de concordância.

A Figura 8 apresenta a trajetória registrada pelo receptor geodésico de referência. Neste caso, os dados foram coletados a uma taxa de 1 Hz, resultando em um traçado com características angulares, típico de uma menor frequência de aquisição de dados.

Figura 8 - Rastreo cinemático com receptor geodésico



Fonte: O autor (2025)

A Figura 9 exibe a trajetória registrada pelo receptor de baixo custo (U-blox F9P). O percurso foi gerado a partir de pontos coletados a uma taxa de 10 Hz, o que permitiu um registro mais detalhado e suave do percurso realizado, definindo as curvas e segmentos de reta com maior fidelidade.



Figura 9 - Rastreo cinemático com receptor de baixo custo



Fonte: O autor (2025)

Finalmente, a Figura 10 apresenta a sobreposição de ambas as trajetórias para a análise comparativa direta. Esta visualização permite avaliar a concordância entre os dois levantamentos.

Figura 10 - Comparação entre os resultados



Fonte: O autor (2025)

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo se dedica à interpretação e discussão dos resultados apresentados, contextualizando-os com as normas técnicas vigentes e as condições observadas durante a pesquisa.

## 6.1 ANÁLISE DO RASTREIO ESTÁTICO

Analisando as métricas de tendência, observou-se um erro médio (*bias*) de -0,019 metros na componente Leste (X) e de -0,015 metros na componente Norte (Y), além de -0,052 metros na componente de altitude (Z). Estes valores, embora pequenos, corroboram a tendência sistemática visualizada no gráfico de dispersão (Figura 7), indicando um leve deslocamento constante do receptor de baixo custo em relação à referência.

Quanto a análise dos dados da Tabela 6, observa-se que o receptor de baixo custo apresentou uma alta precisão, com um RMSE horizontal de 0,036 m e um RMSE Vertical de 0,074 m.

Para comparar estes resultados com os padrões da Norma S-44 da IHO, é necessário considerar os erros, com um nível de confiança de 95%, conforme exigido pela norma.

- Para a componente vertical, a incerteza é considerada multiplicando-se o  $RMSE_V$  pelo fator de 1,96, resultando no valor da *Total Vertical Uncertainty* (TVU) a 95% de confiança de 0,145 m.
- Para a componente horizontal, a consideração para um nível de confiança de 95% em uma distribuição de erro bidimensional é de aproximadamente 2,45. Este valor é aplicado ao  $RMSE_H$ , obtendo-se a *Total Horizontal Uncertainty* (THU) de 0,088 m.

A norma S-44, em sua “Ordem Exclusiva” (a mais rigorosa), estabelece uma TVU máxima de 0,25 m e uma THU máxima de 1,0 m. Confrontando os resultados obtidos, observa-se que a incerteza vertical calculada (0,145 m) e a incerteza horizontal calculada (0,088 m) atendem com folga aos rigorosos requisitos da norma, reforçando a viabilidade do uso do equipamento de baixo custo, com técnica de pós-processamento, para aplicações hidrográficas.

## 6.2 ANÁLISE DO RASTREIO CINEMÁTICO

A análise comparativa das trajetórias, apresentada de forma sobreposta na Figura 10, permite avaliar o impacto direto da frequência de observação na representação de um levantamento cinemático. Observa-se uma alta coerência visual entre os percursos, embora

existam pequenas discrepâncias pontuais, cuja natureza é explicitada pela análise individual de cada trajetória.

A Figura 9, gerada com o receptor de baixo custo operando a 10 Hz (10 observações por segundo), apresenta uma linha visivelmente mais suave e contínua. A maior densidade de pontos ao longo do percurso permite uma reconstituição muito mais fiel do movimento, detalhando as curvas e variações do caminho com maior precisão geométrica.

Em contraste, a Figura 8, proveniente do receptor geodésico com uma taxa de 1 Hz, exhibe um traçado notadamente angular. A longa distância entre os pontos sequenciais resulta em segmentos de reta que não acompanham a curvatura real do percurso, gerando uma representação de baixa resolução da trajetória.

É fundamental notar que a maior frequência de observação não implica, necessariamente, em uma maior acurácia para cada ponto isolado, mas sim em uma melhor resolução temporal e, conseqüentemente, maior fidelidade geométrica da trajetória registrada.

## **7 CONCLUSÃO**

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho de um receptor GNSS de baixo custo (U-blox F9P) em comparação com um receptor geodésico de referência (Emlid RS2), por meio de levantamentos estático e cinemático em modo pós-processado, visando validar sua empregabilidade em apoio aos levantamentos hidrográficos.

A análise dos resultados demonstrou que o receptor de baixo custo alcançou uma acurácia posicional centimétrica. Após a consideração dos erros para um nível de confiança de 95%, constatou-se que o equipamento atende aos padrões estabelecidos pela “Ordem Exclusiva” da norma S-44 da IHO, tanto para a incerteza horizontal quanto para a vertical. A avaliação do levantamento cinemático também corroborou o bom desempenho do equipamento em registrar trajetórias de forma consistente.

Conclui-se, portanto, que a utilização de receptores GNSS de baixo custo, quando submetidos a um método de pós-processamento diferencial, apresenta-se como uma alternativa viável e de custo-benefício. Este resultado apresenta uma alternativa aos trabalhos geodésicos hidrográficos realizados na MB. A validação do desempenho frente à norma S-44

demonstra que tais receptores são tecnicamente qualificados para serem integrados em apoio às operações demandadas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), representando uma economia potencial de até 90% no custo de aquisição de *hardware* em comparação com os sistemas geodésicos convencionais, sem comprometer a acurácia exigida.

Para além da aplicação na hidrografia, os resultados deste trabalho reforçam o potencial desses equipamentos para tornar acessível o acesso ao posicionamento de alta acurácia em diversas outras áreas da engenharia e geociências no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLUE MARBLE GEOGRAPHICS. **Global Mapper**. v23.1. Hallowell: Blue Marble Geographics, 2025. Software. Disponível em: <https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

DE LIMA, E. C. **Proposta de metodologia para melhora do posicionamento obtido através de receptores GPS de baixo custo**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI 10.11606/T.3.2018.tde-28082018-090652. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-28082018-090652/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

EMLID. **Reach RS2 Specifications**. Budapest, 2025. Disponível em: <https://docs.emlid.com/reachrs2/specifications/specs/>. Acesso em: 29 set. 2025.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, London, v. 585, p. 357–362, 2020.

HARXON. **HX-CH6601A UAV Helical Antenna**. Shenzhen, 2025. Disponível em: <https://en.harxon.com/product/detail/137.html>. Acesso em: 29 set. 2025.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html>. Acesso em: 23 abr. 2025.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **IHO S-44: Standards for Hydrographic Surveys**. Monaco: International Hydrographic Organization. 6.1.0 ed. 2022.

JANGÃO. **Holybro H-RTK F9P Helical, Posicionamento GNSS de Alta Precisão para Drones, Módulo UBLOX F9P, 12018**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.lojadojangao.com.br/produtos/holybro-h-rtk-f9p-helical>. Acesso em: 22 abr. 2025.

LANGLEY, R. B. Propagation of the GPS signals, *In*: KLEUSBERG, A and TEUNISSEN, P. **GPS for Geodesy**, Berlin: Verlag, p. 103-40, 1996a.

LUZ, R. T.; CORREIA, J. D.; PEREIRA, K. D.; PESSOA, L. M. C. Posicionamento com receptores GPS “amadores”: alguns resultados. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 48, p. 55–61, 2020. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/52375>. Acesso em: 21 abr. 2025.

MARTINS, R. N.; NETO, A. F. A.; ANTONIO, M.; VIANA, L. A.; DE QUEIROZ, D.M. Análise da precisão de diferentes receptores GNSS para coleta de dados. *In*: ENCONTRO

LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 21., 2017, São José dos Campos. **Anais [...]** São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2017. Disponível em: [https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2017/anais/arquivos/0678\\_0789\\_01.pdf](https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/anais/arquivos/0678_0789_01.pdf). Acesso em: 21 abr. 2025.

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

OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. **OpenStreetMap**. [S.l.]: OpenStreetMap Foundation, 2025. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org>. Acesso em: 3 out. 2025.

PROJ CONTRIBUTORS. **PROJ coordinate transformation software library**. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation, 2025. Disponível em: <https://proj.org/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**, version 3.11.10. Delaware, 2024. Disponível em: <https://www.python.org>. Acesso em: 25 ago. 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation, 2025. Software. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 3 out. 2025.

REVNIVYKH, S. et al. GLONASS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (ed.). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 219-246.

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

SUPREMA. **Receptor GNSS AFS 392 com NavController III Trimble** [s.d.]. Disponível em <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5211183194>. Acesso em: 21 abr. 2025.

TAKASU, T. **RTKLib: an open source program package for GNSS positioning**. [Software]. 2023. Disponível em: <https://www.rtklib.com> . Acesso em: 23 abr. 2025.

TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK O. **Global Navigation Satellite Systems: Springer Handbook**. Perth, Australia: Springer International Publishing, 2017. 1333 p. ISBN 978-3-319-42926-7.

THE PANDAS DEVELOPMENT TEAM. **pandas-dev/pandas**: Pandas. [S.l.]: Zenodo, 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3509134.

U-BLOX. **ZED-F9P High precision GNSS module**. Thalwil, 2024. Disponível em: <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>. Acesso em: 30 set. 2025.

VAN SICKLE, J. **GPS for Land Surveyors**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

## APÊNDICE A – SCRIPT PARA ANÁLISE DE DADOS GNSS EM PYTHON

(continua)

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  # =====
3  # TÍTULO: Script para Análise Comparativa de Dados Geodésicos
4  # AUTOR: José Daniel Arruda Freitas
5  # TRABALHO: Trabalho de Conclusão de Curso
6  #
7  #
8  # OBJETIVO:
9  # Realizar a análise de acurácia de um receptor GNSS de baixo custo em
10 # comparação com um receptor de referência, a partir de dados geodésicos.
11 # O script converte coordenadas, calcula erros, computa estatísticas (RMSE)
12 # e gera um gráfico de dispersão dos erros.
13 # =====
14
15
16 # Importa as bibliotecas para manipulação de dados, matemática e visualização.
17
18 import pandas as pd
19 import numpy as np
20 import matplotlib.pyplot as plt
21 from pyproj import Transformer
22
23
24 # Parâmetros de entrada para a execução da análise.
25
26 # Arquivo CSV de entrada com os dados brutos.
27 ARQUIVO_DADOS = 'dados_gnss.csv'
28
29 # Mapeamento dos nomes de coluna do CSV para seu significado geodésico.
30 COL_LON_REF = 'E_ref' # Coluna com a Longitude de referência.
31 COL_LAT_REF = 'N_ref' # Coluna com a Latitude de referência.
32 COL_ALT_REF = 'h_ref'
33
34 COL_LON_F9P = 'E_f9p' # Coluna com a Longitude do receptor em teste.
35 COL_LAT_F9P = 'N_f9p' # Coluna com a Latitude do receptor em teste.
36 COL_ALT_F9P = 'h_f9p'
37
38 # Códigos EPSG para a conversão de coordenadas
39 EPSG_ENTRADA = 'epsg:4326' # WGS84 (Entrada: Lat/Lon).
40 EPSG_SAIDA = 'epsg:31983' # SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (Saída: Metros).
41
42
43 try:
44     print("Iniciando a análise final...")
45
46     # Carrega o CSV usando o separador de vírgula.
47     df = pd.read_csv(ARQUIVO_DADOS, sep=',')
48     print("Arquivo de dados carregado com sucesso.")
49
50     # Converte todas as colunas para o formato numérico.
51     for col in df.columns:
52         df[col] = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce')
53     df.dropna(inplace=True)
54     print(f"Total de {len(df)} pontos válidos encontrados para análise.")
55
56     # Inicializa o transformador de coordenadas.
57     transformer = Transformer.from_crs(EPSG_ENTRADA, EPSG_SAIDA, always_xy=True)

```



```

58
59 # Converte as coordenadas do RECEPTOR DE REFERÊNCIA, usando o mapeamento correto.
60 df['Este_ref'], df['Norte_ref'] = transformer.transform(
61     df[COL_LON_REF].values, df[COL_LAT_REF].values
62 )
63
64 # Converte as coordenadas do RECEPTOR DE TESTE (F9P), usando o mapeamento correto.
65 df['Este_f9p'], df['Norte_f9p'] = transformer.transform(
66     df[COL_LON_F9P].values, df[COL_LAT_F9P].values
67 )
68 print("Conversão de coordenadas para UTM concluída.")
69
70 # Cálculo de Erros (PONTO A PONTO)
71 df['Erro_Este'] = df['Este_f9p'] - df['Este_ref']
72 df['Erro_Norte'] = df['Norte_f9p'] - df['Norte_ref']
73 df['Erro_Altitude'] = df[COL_ALT_F9P] - df[COL_ALT_REF]
74 print("Cálculo de erros individuais (ponto a ponto) concluído.")
75
76 # --- Cálculo das Estatísticas Finais ---
77 erro_2d = np.sqrt(df['Erro_Este']**2 + df['Erro_Norte']**2)
78 rmse_horizontal = np.sqrt(np.mean(erro_2d**2))
79 rmse_vertical = np.sqrt(np.mean(df['Erro_Altitude']**2))
80 erro_medio_este = df['Erro_Este'].mean()
81 erro_medio_norte = df['Erro_Norte'].mean()
82 erro_medio_altitude = df['Erro_Altitude'].mean()
83
84 # --- Impressão dos Resultados Finais ---
85 print("\n" + "="*50)
86 print("---- ANÁLISE ESTATÍSTICA FINAL DOS ERROS ----")
87 print("="*50)
88 print("\nMédia das Diferenças (Viés):")
89 print(f" - Erro Médio em Leste:      {erro_medio_este:.4f} m")
90 print(f" - Erro Médio em Norte:      {erro_medio_norte:.4f} m")
91 print(f" - Erro Médio em Altitude:    {erro_medio_altitude:.4f} m")
92 print("\nRMSE (Acurácia):")
93 print(f" - RMSE Horizontal (2D):      {rmse_horizontal:.4f} m")
94 print(f" - RMSE Vertical:            {rmse_vertical:.4f} m")
95 print("="*50)
96
97 # --- GERAÇÃO DO GRÁFICO (ESTILO CUSTOMIZADO) ---
98 print("\nGerando o gráfico de dispersão com o estilo final...")
99
100 # Cria a figura e os eixos
101 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 10))
102
103 # Define a cor de fundo do gráfico (cinza claro)
104 ax.set_facecolor('#EAEAF2')
105 fig.set_facecolor('#EAEAF2')
106
107 # Configura o grid para ser branco e mais visível
108 ax.grid(True, which='both', color='white', linestyle='-', linewidth=1.5)
109 ax.set_axisbelow(True) # Garante que o grid fique atrás dos pontos
110
111 # Plota os erros com o estilo customizado: azul ("cornflowerblue") com borda preta
112 ax.scatter(df['Erro_Este'], df['Erro_Norte'], alpha=0.9, s=100,
113           label='Erros dos Pontos (F9P)', facecolor='cornflowerblue',
114           edgecolor='black', linewidth=1.5)

```

(conclusão)

```

115
116 # Plota a posição de referência com borda preta para destaque
117 ax.plot(0, 0, 'r*', markersize=20, label='Posição de Referência', markeredgecolor='black')
118
119 # CORREÇÃO: Usa a variável rmse_horizontal que já foi calculada
120 circle = plt.Circle((0, 0), rmse_horizontal, color='red', fill=False,
121                     linestyle='--', linewidth=1.5, label=f'RMSE Horizontal = {rmse_horizontal:.3f} m')
122 ax.add_artist(circle)
123
124 # Adiciona os eixos X e Y em preto
125 ax.axhline(0, color='black', linewidth=1.0)
126 ax.axvline(0, color='black', linewidth=1.0)
127
128 # Configura os títulos e rótulos
129 ax.set_title('Dispersão dos Erros Horizontais (F9P vs. Referência)', fontsize=16)
130 ax.set_xlabel('Erro na Direção Leste (metros)', fontsize=12)
131 ax.set_ylabel('Erro na Direção Norte (metros)', fontsize=12)
132
133 # Garante que os eixos tenham a mesma escala para um círculo perfeito
134 ax.set_aspect('equal', adjustable='box')
135
136 # Adiciona a legenda com fundo branco
137 ax.legend(frameon=True, facecolor='white', framealpha=0.9, loc='best')
138
139 # Exibe o gráfico final
140 plt.show()
141
142 except Exception as e:
143     print(f"\nOcorreu um erro inesperado: {e}")

```

Fonte: Python (2025)

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO CHIPSET U-BLOX F9P

(continua)

### Product summary

# ZED-F9P series

## u-blox F9 high precision GNSS modules

### Multi-band receiver delivers centimeter-level accuracy in seconds

- Concurrent reception of GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou
- Multi-band RTK with fast convergence times and reliable performance
- Centimeter-level accuracy in a small and energy-efficient module
- Easy integration of RTK for fast time-to-market
- Native support for PointPerfect simplifies integration



Standard

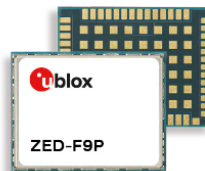


Professional



Automotive

17.0 × 22.0 × 2.4 mm



### Product description

The ZED-F9P positioning module integrates multi-band GNSS and real time kinematics (RTK) technology in a compact form factor, to deliver centimeter-level accuracies in seconds for the industrial navigation and robotics markets.

ZED-F9P concurrently uses signals from the GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, and NavIC GNSS constellations. GNSS signals from multiple frequency bands combined with RTK technology enables fast convergence times and reliable performance for scalable applications, including robotic lawnmowers, unmanned autonomous vehicles (UAV), and semi-automated or fully automated machinery.

With its high update rate and low power consumption levels, the ZED-F9P module is ideal for highly dynamic applications such as UAVs. ZED-F9P ensures the security of positioning and navigation information by using secure interfaces and advanced jamming and spoofing detection technologies, such as Galileo OSNMA. The receiver enables easy integration and helps product developers quickly bring their ideas to the market.

ZED-F9P offers support for a range of correction services allowing each application to optimize performance according to the application's unique set of needs. ZED-F9P comes with built-in support for standard RTCM corrections, supporting centimeter-level navigation from local base stations or from virtual reference stations (VRS) in a Network RTK setup. The module supports SPARTN format SSR-type correction services suitable for mass market applications.

u-blox modules are manufactured in ISO/TS 16949 certified sites and are fully tested on a system level. Qualification tests are performed as stipulated in the ISO16750 standard: "Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment".

	ZED-F9P-0xB	ZED-F9P-1xB
<b>Grade</b>		
Automotive		
Professional	•	•
Standard		
<b>GNSS</b>		
GPS + QZSS / SBAS	•	•
GLONASS	•	•
Galileo	•	•
BeiDou	•	•
Number of concurrent GNSS	4	4
Multi-band	L1/L2	L1/L5
<b>Compatible u-blox services</b>		
AssistNow™	•	•
PointPerfect	•	•
<b>Interfaces</b>		
UART	2	2
USB	1	1
SPI	1	1
DDC (I2C compliant)	1	1
<b>Features</b>		
Programmable (flash)	•	•
Data logging	•	•
Carrier phase output	•	•
Additional SAW	•	•
RTC crystal	•	•
Oscillator	T	T
RTK rover	•	•
RTK base station	•	•
Moving base	•	•
Survey-in and fixed mode	•	•
Timepulse	1	1
<b>Power supply</b>		
2.7 V – 3.6 V	•	•

T = TCXO

(conclusão)



ZED-F9P series

Features

Receiver type	184-channel u-blox F9 engine GPS L1C/A, GLO L1OF, GAL E1B/C, BDS B1I, QZSS L1C/A L1S L5, SBAS L1C/A <b>ZED-F9P-0xB:</b> GPS L2C, GLO L2OF, GAL E5b, BDS B2I, QZSS L2C <b>ZED-F9P-1xB:</b> GPS L5, GAL E5a, BDS B2a, NavIC L5	
Nav. update rate	RTK	up to 20 Hz <sup>1</sup>
Position accuracy <sup>2</sup>	RTK	0.01 m + 1 ppm CEP
Convergence time <sup>2</sup>	RTK	< 10 sec
Acquisition	Cold starts	24 s
	Aided starts	2 s
	Reacquisition	2 s
Sensitivity	Tracking & Nav.	-167 dBm
	Cold starts	-148 dBm
	Hot starts	-157 dBm
	Reacquisition	-160 dBm
Assistance	AssistNow Online OMA SUPL & 3GPP compliant	
Oscillator	TCXO	
RTC crystal	Built-in	
Anti-jamming	Active CW detection and removal Onboard band pass filter	
Anti-spoofing	Advanced anti-spoofing algorithms and OSNMA	
Memory	Flash	
Moving base <sup>3</sup>	For attitude sensing and heading applications	
Supported antennas	Active	

1 The highest navigation rate can limit the number of supported constellations  
2 Depends on atmospheric conditions, baseline length, GNSS antenna, multipath conditions, satellite visibility, and geometry  
3 Only for ZED-F9P-0xB product versions

Interfaces

Serial interfaces	2 UART 1 SPI 1 USB 1 DDC (I2C compliant)
Digital I/O	Configurable timepulse EXTINT input for wakeup RTK fix status GEOFENCE status
Timepulse	Configurable: 0.25 Hz to 10 MHz
Protocols	NMEA, UBX binary, RTCM v. 3.4, SPARTN v. 2.0.1

Package

54-pin LGA (land grid array), 17 x 22 x 2.4 mm

Environmental data, quality, and reliability

Operating temp.	-40 °C to +85 °C
Storage temp.	-40 °C to +85 °C
Vibration	MIL-STD-810G (Category 24, 7.7g RMS)
RoHS compliant (2015/863/EU)	
Green (halogen-free)	
EU Radio Equipment Directive compliant 2014/53/EU	
Qualification according to ISO 16750	
Manufactured and fully tested in ISO/TS 16949 certified production sites	

Electrical data

Supply voltage	2.7 V to 3.6 V
Power consumption	68 mA at 3.0 V (continuous)
Backup supply	1.65 V to 3.6 V

Compatible u-blox products and services

Products	NEO-D9S correction receiver NEO-D9C correction receiver
Location services	AssistNow A-GNSS service PointPerfect GNSS augmentation service

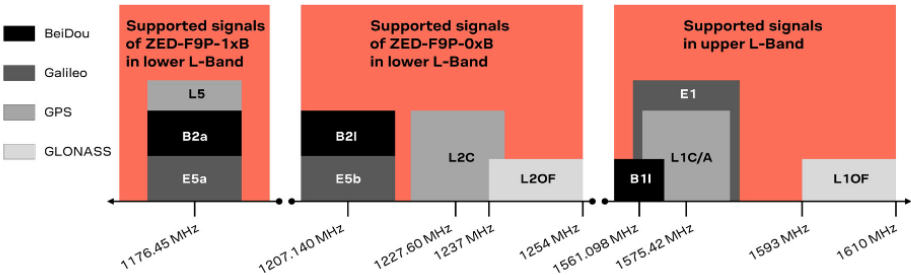
Support products

u-blox support products provide reference design, and allow efficient integration and evaluation of u-blox positioning technology.

EVK-F9P-01	ZED-F9P-0xB evaluation kit with ANN-MB multi-band antenna
EVK-F9P-16	ZED-F9P-1xB evaluation kit with ANN-MB1 multi-band antenna

Product variants

ZED-F9P-02B	High precision GNSS module with SBAS
ZED-F9P-04B	High precision GNSS module with SPARTN and CLAS
ZED-F9P-05B	High precision GNSS module with Galileo OSNMA
ZED-F9P-15B	High precision GNSS module with L1/L5



Further information

For contact information, see [www.u-blox.com/contact-u-blox](http://www.u-blox.com/contact-u-blox).  
For more product details and ordering information, see the product data sheet.

Legal Notice:

u-blox or third parties may hold intellectual property rights in the products, names, logos and designs included in this document. Copying, reproduction, or modification of this document or any part thereof is only permitted with the express written permission of u-blox. Disclosure to third parties is permitted for clearly public documents only.  
The information contained herein is provided "as is". No warranty of any kind, either express or implied, is made in relation to the accuracy, reliability, fitness for a particular purpose, or content of this document. This document may be revised by u-blox at any time. For most recent documents, please visit [www.u-blox.com](http://www.u-blox.com).

ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA ANTENA HX-CH6601A

Parâmetros

Desempenho		
	Sinal Recebido	GPS L1/L2 GLONASS L1/L2 GALILEU E1 BDS B1/B2 QZSS L1/L2 SBAS L1
	Impedância Nominal	50Ω
	Polarização	RHCP
	Relação Axial	≤3dB
	Ganho no Zênite (90°)	1217-1257MHz 2dBi (máximo) 1559-1610MHz 2,5dBi(máximo)
LNA		
	Ganho de LNA	33dB (típico)
	Figura de ruído	≤1,5 dB
	Saída VSWR	≤2,0
	Tensão de Operação	+3,3 a + 12VDC
	Corrente de Operação	55mA (máximo)
	Atraso no Grupo Ripple	<15ns
Mecânico		
	Dimensões	φ27,5*59mm
	Conector	SMA masculino
	Peso	≤25g
	Montagem	os clientes projetam sua própria instalação
Ambiental		
	Temperatura de operação	-40°C a +70°C
	Temperatura de armazenamento	-40°C a +70°C
	Umidade	95% não condensado
	Resistência à Água/Poeira	IP67
	Conformidade Regulatória	CE, RoHS, ALCANCE

Fonte: HARXON (2025)



## ANEXO C – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO EMLID RS2

(continua)

EMLID

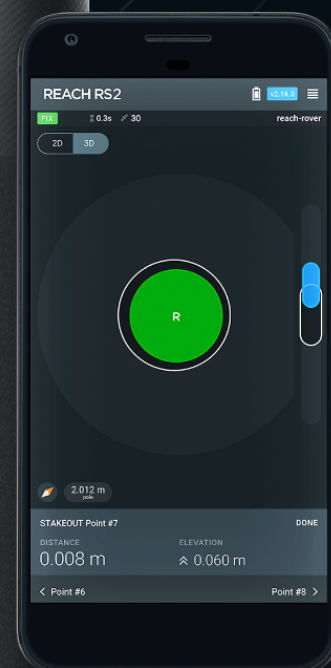
## REACH RS2

Datasheet



## Key features

- Tracks GPS/QZSS L1C/A, L2C GLONASS L1OF, L2OF BeiDou B1I, B2I Galileo E1-B/C, E5b
- Fast RTK convergence
- Multi-feed antenna with multipath rejection
- 868/915 MHz LoRa modem for up to 8 km connectivity
- Global 3.5G modem
- 22 hours on 1 charge
- NTRIP and VRS support, works with RTCM3
- Logs RINEX at update rate up to 10 Hz
- 16 GB of internal storage
- IP67, water- and dustproof



# REACH RS2

Technical specifications

## POSITIONING

Precision	Static	H: 4 mm+0.5 ppm V: 8mm+1 ppm
	PPK	H: 5 mm+0.5 ppm V: 10mm+1 ppm
	RTK	H: 7 mm+1 ppm V: 14 mm+1 ppm
Convergence time	~5 s typically	
Signal tracked	GPS/QZSS L1C/A, L2C, GLONASS L1OF, L2OF, BeiDou B1I, B2I, Galileo E1-B/C, E5b	
Number of channels	184	
Update rates	10Hz GPS / 5Hz GNSS	
IMU	9DOF	

## CONNECTIVITY

UHF LoRa radio	Frequency range	868/915 MHz
	Power	0.1 W
	Distance	Up to 8 km
3.5G modem	Regions	Global
	Bands	Quad-band, 850/1900, 900/1800 MHz
	SIM card	Nano-SIM
Wi-Fi	802.11 b/g/n	
Bluetooth	4.0/2.1 EDR	
Ports	RS-232, USB Type-C	
Data Protocols	NTRIP, VRS, RTCM3, position output in NMEA, LLH/XYZ	
Data logging	RINEX at update rate up to 10 Hz	
Internal storage	16 GB	

## MECHANICAL

Dimensions	126x126x142 mm
Weight	950 g
Temperature	-20...+65 °C
Ingress protection	IP67 water- and dustproof

## ELECTRICAL

Autonomy	16 hrs as 3.5G RTK rover, 22 hrs logging
Battery	LiFePO4 6400 mAh, 6.4 V
External power input	6–40 V
Charging	USB-C 5 V 2 A

Fonte: EMLID (2025)

(conclusão)

## COMMUNICATIONS AND DATA STORAGE

- 9PIN port: RS-232, PPS, Event
- USB OTG
- Internal Radio Modem:
  - LoRa technology
  - Reliable link on up to 8 km baseline
  - Transmit power up to 100mW
  - Configurable 862–1020 MHz carrier
- Internal 3.5G modem
  - Global
  - Quad-band, 850/1900, 900/1800 MHz
- Built-in short-range Wi-Fi 802.11 b/g/n, WEP, WPA, WPA2 encryption
- Built-in short-range Bluetooth 4.0/2.1 EDR
- Data storage 16 GB internal memory
- Raw logs in RINEX, UBX
- External Radio Modem connectivity over RS-232/USB OTG
- RTCM 3.x input and output over Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, USB, RS-232, NTRIP
- NMEA 0183, ERB output over Wi-Fi, Bluetooth, USB, RS-232
- ReachView app for iOS and Android for configuration and surveying



## YOUR LOCAL DEALER

