



**LUDMILA APARECIDA DE OLIVEIRA**

**POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO EM TEMPO REAL  
PARA RECEPTORES GPS DE SIMPLES FREQUÊNCIA:  
UM ESTUDO DE CASO SOBRE A AMÉRICA LATINA COM FOCO  
EM VEÍCULOS AGRÍCOLAS CONECTADOS**

**LAVRAS - MG**

**2024**

**LUDMILA APARECIDA DE OLIVEIRA**

**POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO EM TEMPO REAL PARA  
RECEPTORES GPS DE SIMPLES FREQUÊNCIA:  
UM ESTUDO DE CASO SOBRE A AMÉRICA LATINA COM FOCO EM VEÍCULOS  
AGRÍCOLAS CONECTADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação para obtenção do título de Mestra.

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva  
Orientador

Prof. Dr. Danilo Alves de Lima  
Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Ludmila Aparecida de.

Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real para  
Receptores GPS de Simples Frequência: Um Estudo de Caso sobre  
a América Latina com Foco em Veículos Agrícolas Conectados /  
Ludmila Aparecida de Oliveira. - 2024.

129 p. : il.

Orientador(a): Felipe Oliveira e Silva.

Coorientador(a): Danilo Alves de Lima.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. GNSS. 2. GPS. 3. RT-PPP. I. Silva, Felipe Oliveira e. II.  
Lima, Danilo Alves de. III. Título.


**LUDMILA APARECIDA DE OLIVEIRA**

**POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO EM TEMPO REAL PARA  
RECEPTORES GPS DE SIMPLES FREQUÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A  
AMÉRICA LATINA COM FOCO EM VEÍCULOS AGRÍCOLAS CONECTADOS  
PRECISE REAL-TIME POINT POSITIONING FOR SINGLE-FREQUENCY GPS  
RECEIVERS: A CASE STUDY ON LATIN AMERICA WITH A FOCUS ON CONNECTED  
AGRICULTURAL VEHICLES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação para obtenção do título de Mestra.

APROVADA em 30 de janeiro de 2024.

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva	UFLA
Prof. Dr. Marcelo Carvalho Tosin	UEL
Prof. Dr. Vinícius Manhães Gabriel de Brito Cavalcanti	IFF

Documento assinado digitalmente  
 **FELIPE OLIVEIRA E SILVA**  
Data: 05/04/2024 11:30:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Oliveira e Silva  
Orientador

Prof. Dr. Danilo Alves de Lima  
Co-Orientador

**LAVRAS - MG  
2024**

*Dedico este trabalho ao meu esposo e companheiro, Ítalo Eluezer, por todo amor, incentivo, apoio e compreensão. Aos meus pais, Alessandra e Luiz Carlos, e avós Jovita (in memoriam) e Sebastião, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida acadêmica.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que cuidou de cada detalhe, guiando meus passos e me dando forças para que fosse possível essa realização em minha vida.

Sou grata a minha família por todo cuidado, apoio e incentivo.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Felipe Oliveira e Silva e co-orientador Professor Doutor Danilo Alves de Lima, por todo empenho, paciência e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho e em todos aqueles que realizei durante o mestrado.

Agradeço a todos os meus colegas do mestrado, especialmente ao Álvaro Henrique Alves Maia e Izadora Aparecida Ramos, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

Agradeço a Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP - ROTA 2030), pela bolsa no âmbito do projeto 27192.02.02/2021.01.00.

Por último agradeço a Universidade Federal de Lavras e todo seu corpo docente pelo comprometimento com a qualidade e excelência do ensino.

*O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.*  
*(Cora Coralina)*

## RESUMO

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) podem ser utilizados em diversas áreas do conhecimento, tais como na localização de pessoas e veículos, agricultura de precisão ou até mesmo em sistemas de defesa e no controle de tráfego aéreo. Atualmente, existem diversas técnicas de posicionamento que podem ser aplicadas em tais sistemas, cada qual com sua particularidade e limitação. Logo, é relevante o estudo de técnicas alternativas que busquem melhorar a precisão no posicionamento, tal como a técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), a qual foi originalmente criada para aplicações pós-processadas (PP-PPP) baseadas em receptores de dupla frequência (DF), mas que, atualmente, já pode ser empregada em aplicações em tempo real (RT-PPP) baseadas em receptores de simples frequência (SF). A utilização de receptores SF reduz o custo de implementação com relação a soluções que utilizam receptores DF, porém essa técnica requer que correções sejam aplicadas às observáveis de um receptor GNSS de forma a mitigar individualmente os componentes dos chamados “erros de modo comum” (CME). Tais correções RT-PPP são fornecidas por agências especializadas, como por exemplo, o Serviço Internacional GNSS (IGS), a *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG)*, da *Universidad Nacional de La Plata (UNLP)*, o *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)*, entre outros. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é investigar o formato em que cada correção é gerada, bem como definir algoritmos adequados para implementação de uma solução de posicionamento submétrico via SF RT-PPP utilizando particularmente o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Para alcançar tal objetivo, este trabalho inicia-se com a revisão da literatura na área de GNSS compreendendo caracterização dos métodos de posicionamento, sendo seguida por uma análise dos aspectos relacionados à natureza das correções de RT-PPP fornecidas pelo IGS e FCAG-UNLP, bem como a necessidade de se aplicar correções adicionais à solução do RT-PPP. Em seguida, dados GPS estacionários em tempo real são coletados de receptores de alta qualidade, por meio do *software* BKG Ntrip Client (BNC), concebido pela BKG, bem como as correções RT-PPP do IGS. Em paralelo, correções ionosféricas disponibilizadas pelo servidor da FCAG-UNLP também são coletadas. Após a coleta de dados e simulações computacionais, testes experimentais são propostos a fim de avaliar o desempenho das técnicas de estimação investigadas em relação à/ao: (a) toda região de abrangência do atual serviço de correção ionosférica fornecido pela FCAG-UNLP, a saber, América Latina, com extensão ao Caribe e Península Antártica; (b) condições dinâmicas do receptor, coletadas a partir de ensaios com veículos urbanos e agrícolas em movimento; (c) diferentes modelos empíricos de compensação troposférica e diferentes ângulos de máscara para os satélites visíveis; e (d) cumprimento de diversos requisitos de posicionamento aplicáveis para veículos conectados. Como principal contribuição desta dissertação, mostra-se que a solução de RT-PPP com receptores GPS SF baseado nos produtos ionosféricos da FCAG-UNLP, modelo troposférico da *University of New Brunswick (UNB3)*, e ângulo de máscara de 16 graus, fornece melhor exatidão de posicionamento, especialmente no canal horizontal, quando comparada à solução correspondente baseada, exclusivamente, em produtos do IGS.

**Palavras-chave:** GNSS. GPS. RT-PPP. IGS. FCAG. UNLP.

## ABSTRACT

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can be used in various areas of knowledge, such as locating people and vehicles, precision agriculture or even defense systems and air traffic control. Currently, there are several positioning techniques that can be applied to such systems, each with its own particularities and limitations. Therefore, it is relevant to study alternative techniques that seek to improve positioning accuracy, such as the Precise Point Positioning (PPP) technique, which was originally created for post-processed applications (PP-PPP) based on dual receivers, frequency (DF), but which can currently be used in real-time applications (RT-PPP) based on single frequency (SF) receivers. The use of SF receivers reduces the implementation cost in relation to solutions that use DF receivers, however this technique requires that corrections be applied to the observables of a GNSS receiver in order to individually mitigate the components of the so-called “common mode errors” (CME). Such RT-PPP corrections are provided by specialized agencies, such as the International GNSS Service (IGS), the Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), of the Universidad Nacional de La Plata (UNLP), the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), among others. Therefore, the objective of the present work is to investigate the format in which each correction is generated, as well as to define suitable algorithms for implementing a submetric positioning solution via SF RT-PPP using particularly the Global Positioning System (GPS). To achieve this objective, this work begins with a review of the literature in the area of GNSS, comprising the characterization of positioning methods, followed by an analysis of aspects related to the nature of the RT-PPP corrections provided by IGS and FCAG-UNLP, as well as the need to apply additional corrections to the RT-PPP solution. Real-time stationary GPS data is then collected from high-quality receivers via the BKG Ntrip Client (BNC), designed by BKG, as well as IGS RT-PPP corrections. In parallel, ionospheric corrections made available by the FCAG-UNLP server are also collected. After data collection and computational simulations, experimental tests are proposed in order to evaluate the performance of the estimation techniques investigated in relation to: (a) the entire region covered by the current ionospheric correction service provided by FCAG-UNLP, the namely, Latin America, extending to the Caribbean and the Antarctic Peninsula; (b) dynamic conditions of the receiver, collected from tests with urban and agricultural vehicles in motion; (c) different empirical tropospheric compensation models and different mask angles for visible satellites; and (d) compliance with various positioning requirements applicable to connected vehicles. As the main contribution of this dissertation, it is shown that the RT-PPP solution with GPS SF receivers based on ionospheric products from FCAG-UNLP, tropospheric model from University of New Brunswick (UNB3), and mask angle of 16 degrees, provides better positioning accuracy, especially in the horizontal channel, when compared to the corresponding solution based exclusively on IGS products.

**Keywords:** GNSS. GPS. RT-PPP. IGS. FCAG. UNLP.

## INDICADORES DE IMPACTO

O trabalho em questão visa fomentar o desenvolvimento tecnológico por meio de sistemas de posicionamento de precisão em território brasileiro, bem como incentivar à expansão das atividades de Agricultura de Precisão (AP), em especial por parte de pequenos e médios agricultores, com conseqüente: a) aumento na produtividade dos cultivos, b) aumento na lucratividade dos empreendimentos agrícolas, c) geração de emprego e renda, d) aumento na qualidade dos alimentos, e) racionalização no uso de insumos/fertilizantes/defensivos, f) redução no dano/ degradação do solo, g) melhoria generalizada na qualidade de vida dos produtores rurais; incentivar à adesão, por parte da população, às tecnologias habilitadoras da solução proposta, em especial, o PPP-TR, para posicionamento pessoal. Visando à divulgação dos resultados obtidos foram realizadas publicação em eventos de natureza tecnológica. Além do fomento à transferência de tecnologia do setor público (UFLA) para o privado graças a existente colaboração do coordenador geral com a empresa MWF Mechatronics Ltda. (MWF Mechatronics), cujas ações de empreendedorismo inovador estão alinhadas com o projeto de pesquisa tecnológica proposto pelo trabalho em questão.

## IMPACT INDICATORS

The work in question aims to encourage technological development through precision positioning systems in Brazilian territory, as well as encourage the expansion of Precision Agriculture (AP) activities, especially by small and medium-sized farmers, with consequent: ) increase in crop productivity, b) increase in the profitability of agricultural enterprises, c) generation of employment and income, d) increase in food quality, e) rationalization in the use of inputs/fertilizers/defensive products, f) reduction in damage/ soil degradation, g) widespread improvement in the quality of life of rural producers; encourage the population to adhere to the technologies that enable the proposed solution, in particular, the PPP-TR, for personal positioning. Aiming to disseminate the results obtained, publications were carried out at events of a technological nature. In addition to promoting the transfer of technology from the public sector (UFLA) to the private sector thanks to the existing collaboration between the general coordinator and the company MWF Mechatronics Ltda. (MWF Mechatronics), whose innovative entrepreneurship actions are aligned with the technological research project proposed by the work in question.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Segmentos de um GNSS. . . . .	26
Figura 2.2 – <i>Loci</i> de posicionamento tridimensional com base em uma, duas e três medições de distância. . . . .	28
Figura 2.3 – Localização das estações do segmento de controle do GPS. . . . .	33
Figura 2.4 – Algumas fontes de erros do GNSS. . . . .	34
Figura 2.5 – Componentes do erro de efemérides transmitidas. . . . .	36
Figura 2.6 – Efeito Sagnac. . . . .	37
Figura 2.7 – Variação do centro de fase e ponto de referência da antena de um receptor. .	40
Figura 2.8 – Possibilidades de reflexão e difração de sinais de satélites GNSS que podem chegar à antena do receptor causando o efeito do multicaminho. . . . .	48
Figura 2.9 – Etapas do algoritmo do filtro de Kalman. . . . .	52
Figura 2.10 – Organograma dos métodos e técnicas de posicionamento pelo GNSS. . . .	55
Figura 2.11 – Posicionamento relativo. . . . .	55
Figura 2.12 – Exemplo de posicionamento diferencial de um trator agrícola. . . . .	56
Figura 2.13 – Mapas globais da ionosfera do centro de análise CODE do IGS. . . . .	63
Figura 2.14 – Fases do Posicionamento por Ponto Preciso. . . . .	66
Figura 2.15 – Visão geral do <i>software</i> BNC. . . . .	67
Figura 2.16 – Monitoramento TEC em tempo quase-real fornecido pelo MAGGIA. . . .	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características dos GNSS. . . . .	26
Tabela 2.2 – Gerações de satélites GPS e suas características. . . . .	32
Tabela 2.3 – Fontes de erros envolvidos nas observáveis GNSS. . . . .	34
Tabela 2.4 – Valores de <i>offset</i> . . . . .	41
Tabela 2.5 – <i>Offsets</i> dos centros de fase das antenas dos satélites GPS adotados pelo IGS. . . . .	41
Tabela 2.6 – Soluções de órbitas (efemérides) - IGS. . . . .	59
Tabela 2.7 – Soluções para o relógio dos satélites - IGS. . . . .	61
Tabela 2.8 – Arquivo IONEX - IGS. . . . .	63
Tabela 2.9 – Formato BSX - IGS. . . . .	65
Tabela 2.10 – Padrão de nomenclatura para produtos em tempo real do IGS. . . . .	68
Tabela 2.11 – Resumo das características do sistema de monitoramento de TEC ionosférico em tempo quase-real para a América do Sul. . . . .	70

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

*ACs Analysis Centers*

*ADS Automated Driving Systems*

*AP Agricultura de Precisão*

*ARP Antenna Reference Point*

*BDS BeiDou Navigation Satellite System*

*BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*

*C/A Coarse/Acquisition*

*CL Civil Long Code*

*CM Civil Moderate Code*

*CME Common Mode Errors*

*CNAV Civil Navigation Message*

*DF Dupla Frequência*

*DGNSS Differential GNSS*

*DOP Dilution of Precision*

*ECEF Earth-Centered Earth-Fixed*

*ECI Earth-Centered Inertial*

*EKF Extended Kalman Filter*

*EUA Estados Unidos da América*

*EUSPA European Union Agency for the Space Programme*

*FCAG Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas*

*FTP File Transfer Protocol*

*GIM Global Ionospheric Map*

*GLONASS Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*

*GNSS Global Navigation Satellite Systems*

*GPT Global Pressure and Temperature*

*HTTP Hypertext Transfer Protocol*

*I5 In-Phase Code*

*ICAO International Civil Aviation Organization*

*IGS International GNSS Service*

*IOD Issue of Data*

*IONEX IONosphere EXchange*

*IPP Ionosphere Pierce Point*

*ITRF International Terrestrial Reference Frame*

*IWLS Iterated Weighthed Least-Squares*

*MAGGIA Laboratorio de Meteorología Espacial, Atmósfera Terrestre, Geodesia, Geodinámica,  
Diseño de Instrumental y Astrometría*

*MEO Medium Earth Orbits*

*MNAV Military Navigation Message*

*NCME Non-Common Mode Errors*

*NED North-East-Down*

*OCS Operational Control Segment*

*P(Y) Precise Code*

*PCO Phase Center Offset*

*PNT Posicionamento, Navegação e Tempo*

*PP – PPP Post Processed PPP*

*PP* Posicionamento por Ponto

*PPP* *Precise Point Positioning*

*PPS* *Precise Position Service*

*PRN* *Pseudorandom Noise*

*PSD* *Power Spectral Density*

*Q5* *Quadrature Phase Code*

*RBMC* Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

*RGNSS* *Relative GNSS*

*RIBaC* Rede Inbra de Bases Comunitárias do GNSS

*RIM* Mapas Regionais da Ionosfera

*RT – PPP* *Real Time PPP*

*SA* *Selective Availability*

*SF* *Simple Frequency*

*SGNSS* *Standalone GNSS*

*SP3* *Extended Standard Product-3*

*SPS* *Standard Positioning Service*

*SV* *Space Vehicle*

*TEC* *Total Electron Content*

*TECU* *TEC Unit*

*TGD* *Timing Group Delay*

*UE* *European Union*

*USERE* *User-Equivalent Range Error*

*UNB* *University of New Brunswick*

*UNLP Universidad Nacional de La Plata*

*URSS União das Repúblicas Socialistas Soviéticas*

*UTC Universal Time Coordinated*

*VMF Vienna Mapping Functions*

*VTEC Vertical TEC*

*WADGNSS Wide-Area DGNS*

## LISTA DE SÍMBOLOS

+ denota atualização de medição.

— denota predição.

$C_3$  matriz de rotação em torno do eixo  $z$  da Terra.

$DCB_I^s$  *biases* instrumentais do sinal.

$L$  latitude.

$\Psi_E^s$  ângulo centrado na Terra.

$\delta$  pequeno incremento ou erro.

$\delta\rho_{I,a}^{s,l}$  erro de propagação ionosférica.

$\delta\rho_{M,a}^{s,l}$  erro de multicaminho.

$\delta\rho_{T,a}^{s,l}$  erro de propagação troposférica.

$\delta\rho_e^s$  erro de efeméride.

$\delta w_{\rho,a}^{s,l}$  ruídos aleatórios.

$\lambda$  longitude.

$\omega_{ie}$  magnitude da taxa de rotação da Terra..

$\rho_{a,C}^s$  pseudodistância corrigida.

$\rho_a^s$  pseudodistância.

$\sim$  denota valor medido.

$\tau$  tempo de propagação do sinal.

$C_e^I$  matriz de transformação que relaciona os sistemas de coordenadas ECI e ECEF.

$H_G^e$  matriz de medição.

$R$  matriz de rotação.

$r_{eS}^e$  coordenadas do centro de massa do Sol.

$\mathbf{r}_{ea}^e$  posição da antena do usuário.

$\mathbf{r}_{es}^e$  coordenadas do centro de massa do satélite.

$\mathbf{u}_{as}^e$  vetor linha de visada entre o receptor e satélite.

$\mathbf{v}_{es}^e$  vetor velocidade do satélite com relação ao ECEF.

$\wedge$  denota valor estimado.

$a$  denota triedro de coordenadas do corpo da antena/receptor.

$b_{a,l}$  atraso do sinal  $l$  sofrido no *hardware* do receptor.

$b_{s,l}$  atraso do sinal  $l$  sofrido no *hardware* do satélite.

$c$  velocidade de propagação de onda eletromagnética no vácuo ou velocidade da luz.

$l$  denota sinal/fase.

$r_{as}$  distância geométrica entre o satélite e receptor.

$s$  denota triedro de coordenadas do corpo do satélite.

$t_{oc}^s$  tempo de referência.

$t_{sa,a}^s$  tempo de chegada do sinal na antena receptora.

$t_{st,a}^s$  tempo de transmissão do sinal pelo satélite.

## SUMÁRIO

<b>I</b>	<b>Primeira Parte: Introdução e Revisão da Literatura</b>	<b>20</b>
1	INTRODUÇÃO . . . . .	21
1.1	Objetivos . . . . .	23
1.2	Estrutura do Trabalho e Contribuições . . . . .	24
2	SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE . . . . .	25
2.1	Sistema de Posicionamento Global (GPS) . . . . .	30
2.2	Fontes de Erros no GNSS . . . . .	33
2.2.1	Erro de Efemérides . . . . .	35
2.2.2	Erro do Relógio do Satélite . . . . .	36
2.2.3	Efeito Sagnac . . . . .	37
2.2.4	<i>Biases</i> Instrumentais . . . . .	38
2.2.5	Deslocamento de Fase da Antena . . . . .	39
2.2.6	Erro Ionosférico . . . . .	41
2.2.6.1	Receptores de Simple Frequência . . . . .	42
2.2.6.2	Receptores de Dupla Frequência . . . . .	43
2.2.7	Erro Troposférico . . . . .	44
2.2.7.1	VMF3/GPT3: . . . . .	45
2.2.8	Erro do Relógio do Receptor . . . . .	46
2.2.9	Erro de Multicaminho . . . . .	47
2.3	Métodos de Estimação para a Posição do Receptor GNSS . . . . .	49
2.3.1	Mínimos Quadrados Ponderados Iterados . . . . .	49
2.3.2	Filtro de Kalman Estendido . . . . .	51
2.4	Métodos de Posicionamento GNSS Avançados . . . . .	54
2.4.1	Posicionamento Relativo . . . . .	54
2.4.2	Posicionamento Diferencial . . . . .	55
2.4.3	Posicionamento por Ponto Preciso . . . . .	56
2.4.3.1	Posicionamento por Ponto Preciso Pós-processado . . . . .	57
2.4.3.1.1	Correções Pós-processadas . . . . .	58
2.4.3.2	Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real . . . . .	66
2.4.3.2.1	Correções em Tempo Real do IGS . . . . .	68

2.4.3.2.2	Correção Ionosférica da UNLP . . . . .	68
3	CONCLUSÃO . . . . .	71
	REFERÊNCIAS . . . . .	72
<b>II</b>	<b>Segunda Parte: Trabalhos Redigidos</b>	<b>76</b>
	Artigo 01: Comparative analysis between tropospheric models for GNSS positioning in Brazilian territory . . . . .	77
	Artigo 02: Performance Analysis of Code-based Single-Frequency Real- Time Precise Point Positioning over Latin America . . . . .	88
	Artigo 03: Influência do Ângulo de Máscara no Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real via GNSS . . . . .	119

# **Parte I**

## **Primeira Parte: Introdução e Revisão da Literatura**

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda por alimentos e energia, os produtores têm buscado fazer uso de técnicas que os auxiliem a atingir as metas de produção impostas pelo mercado consumidor dentre as quais, destaca-se Agricultura de Precisão (AP). A AP se iniciou nos Estados Unidos por volta de 1929, quando os agricultores Bauer e Linsley sugeriram amostragem de solo utilizando o processo sistematizado em malhas de 100 por 100 metros, para determinar, no campo, a necessidade de aplicação diferencial de calcário (COELHO, 2005). Desde então, graças a mecanização dos maquinários, o desenvolvimento de sistemas de posicionamento por satélites para uso civil, sistemas de informações geográficas e o início da era da computação, o manejo das culturas pode ser realizado de modo mais específico. Como menciona Zerbato, Corrêa e Furlani (2020) a AP passou a se difundir na América do Norte na década de 1980 e seu sucesso fez com que ela ganhasse notoriedade em outros países, como Alemanha, Argentina, Austrália e Inglaterra.

O surgimento dos Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS, do inglês *Global Navigation Satellite System*) deu origem a novas perspectivas para a agricultura e a indústria de máquinas. Há uma variedade de produtos e soluções associados à mecanização agrícola, os quais são invariavelmente lembrados sempre que se faz referência à AP. É o caso, por exemplo, dos Sistemas Automatizados de Condução (ADS, do inglês *Automated Driving Systems*), dos controladores de seções em pulverizadores e de linhas nas semeadoras, e da comunicação via telemetria. Os ADS surgiram para aumentar o ganho de produtividade e oferecer facilidades ao agricultor, o qual, com o auxílio de outras tecnologias, tais como a internet sem fio e telefonia móvel, trabalha em um ambiente virtualizado na cabine do trator (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). Um dos motivos pelo qual os GNSS, em particular o Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) não foram aplicados à AP desde o seu surgimento está ligado à Disponibilidade Seletiva (SA, do inglês *Selective Availability*). A SA consistia em uma degradação intencional imposta aos sinais dos satélites, realizada por meio da manipulação dos dados transmitidos aos usuários civis pelo departamento de defesa norte-americano (CONCEIÇÃO; COSTA, 2020).

Atualmente, quatro constelações GNSS estão em operação (IBGE, 2022a): o GPS, sistema mais antigo e robusto, desenvolvido pelos Estados Unidos da América (EUA), o qual encontra-se em plena capacidade de operação desde 1995 e que foi responsável pelo desenvolvimento dos mais diversos *softwares* que nos auxiliam nas aplicações cotidianas da vida moderna;

o GLONASS (do russo *Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*), um sistema de navegação militar desenvolvido pela extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) a partir de meados da década de 1970, paralelamente ao GPS; o *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS), que é um sistema global de navegação por satélite desenvolvido e operado independentemente pela China; e o Galileo, que consiste em uma iniciativa da atual Agência da União Europeia para o Programa Espacial (EUSPA, do inglês *European Union Agency for the Space Programme*) para desenvolver o GNSS da União Europeia (do inglês *European Union - UE*).

O posicionamento via GNSS pode ser obtido por meio de uma série de técnicas, dentre as quais pode-se citar o método Diferencial (DGNSS), o método Relativo (RGNSS) e o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP, do inglês *Precise Point Positioning*). Conforme descreve Seeber (2003), tais métodos possuem características operativas distintas, o que resulta em vantagens e desvantagens. O método DGNSS, por exemplo, consiste na utilização de, pelo menos uma estação de referência, ou base, que é uma instalação geralmente estacionária e equipada com receptor GNSS de alta qualidade, e um meio de comunicação. Devido à base GNSS ser estacionária com localização conhecida, tal estação de referência rastreia os dados de todos os satélites em vista e estima correções diferenciais, as quais são transmitidas via *links* de comunicação para o objeto de interesse, geralmente um veículo, também denominado *rover*, cuja posição deseja-se determinar. O *rover* tem, então, seus dados corrigidos, o que resulta em um aprimoramento significativo na sua estimativa de posição, quando comparado ao GNSS padrão, desde que seu receptor esteja a uma distância máxima de 1000 km da estação de referência e que as correções sejam recebidas em tempo hábil (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

O RGNSS, por outro lado, consiste na determinação da posição do usuário em relação a outro ponto de referência, ou seja, a abordagem RGNSS também precisa de uma estação de referência equipada com um receptor GNSS de alta qualidade, mas diferentemente do posicionamento via DGNSS, a estação de referência transmite ao *rover* medições brutas recebidas de todos os satélites em vista que são diferenciadas com as pseudo-ranges do usuário (GROVES, 2013).

Já o PPP, objeto de estudo deste trabalho, e sua variante em Tempo Real (RT-PPP, do inglês *Real Time PPP*), é uma técnica de posicionamento absoluto, proveniente, dos DGNSS de cobertura global (WADGNSS, do inglês *Wide-Area DGNSS*). Nessa técnica, a posição do *rover* é determinada a partir dos dados GNSS recebidos pelo seu próprio receptor, acrescidos

de correções precisas para as órbitas e relógios dos satélites rastreados (KRUEGER et al., 2020). Essas correções devem ser aplicadas às observáveis do receptor GNSS de forma a cancelar individualmente os componentes dos chamados "erros de modo comum"(CMEs, do inglês *Common Mode Errors*), que são erros correlacionados espacial e temporalmente, ou seja, experimentados por todos os receptores na mesma vizinhança e período de tempo. Tais correções RT-PPP são fornecidas por diversas agências especializadas, como exemplo, o *International GNSS Service* (IGS), a *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas* (FCAG), da *Universidad Nacional de La Plata* (UNLP), o *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG), que disponibilizam de forma gratuita e *on-line* os dados de correção.

Bem como o método RGNSS, as técnicas PPP são utilizadas para posicionamentos que requerem precisão superior à submétrica. Essas técnicas, ao menos teoricamente, podem ser utilizadas por usuários munidos de receptores GNSS SF, o que tem mostrado ser uma alternativa promissora para aplicações de baixo custo devido a suas facilidades em relação ao método DGNS e ao método RGNSS, pelo fato de não requerer dos usuários a utilização de nenhuma base de referência.

## 1.1 Objetivos

Como apontado por Erol et al. (2020), o RT-PPP é largamente utilizado em diferentes aplicações. Portanto, o presente trabalho visa investigar o formato em que cada correção supracitada é gerada, bem como propor algoritmos adequados para implementação de uma solução de posicionamento sub-métrico via RT-PPP em território brasileiro. Como objetivos específicos:

- Avaliar a aplicabilidade das correções RT-PPP, para a constelação GPS, associadas aos erros de efemérides, erros dos relógios dos satélites, *biases* instrumentais, atrasos ionosféricos e troposféricos;
- Avaliar o desempenho da técnica RT-PPP em função de: (a) diferentes produtos/correções; (b) cenários de teste, a saber, estáticos e dinâmicos; e (c) áreas de abrangência, i.e., toda a região atualmente coberta pelos produtos ionosféricos da FCAG-UNLP, a saber, América Latina, com extensão ao Caribe e Península Antártica;
- Avaliar o desempenho da técnica RT-PPP em função de diferentes modelos empíricos de compensação troposférica e ângulos de máscara para os satélites visíveis;

- Elaborar algoritmos para fins de posicionamento/navegação de veículos conectados, com especial foco no cumprimento de requisitos de posicionamento almejados para tais aplicações;
- Executar testes em campo, com auxílio de veículos urbanos e agrícolas conectados, para fins de validação da eficácia/relevância do sistema proposto, no âmbito da Agricultura de Precisão.

## **1.2 Estrutura do Trabalho e Contribuições**

O trabalho encontra-se dividido em duas partes. Na Parte I, além desta Introdução, encontra-se a revisão da literatura na área de GNSS, a qual é subdividida da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta conceitos fundamentais relacionados aos GNSS bem como seus principais erros e suas respectivas formas de mitigação. Ainda no Capítulo 2, são apresentados os métodos de estimação para a posição do receptor GNSS e métodos de posicionamento GNSS avançados. Por fim, no Capítulo 3, são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como sugestões de atividades futuras.

Já na Parte II deste trabalho são apresentados uma compilação de artigos científicos, que apresentam os principais resultados experimentais obtidos, com destaque para o já publicado Artigo I (OLIVEIRA et al., 2023), que apresenta um comparativo modelos empíricos de mitigação do erro troposférico no contexto brasileiro. Os Artigos II e III, ainda não publicados, em sequência, tratam respectivamente da análise de desempenho do RT-PPP SF baseado em código na América Latina; e da influência do ângulo de máscara no GNSS via RT-PPP.

## 2 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE

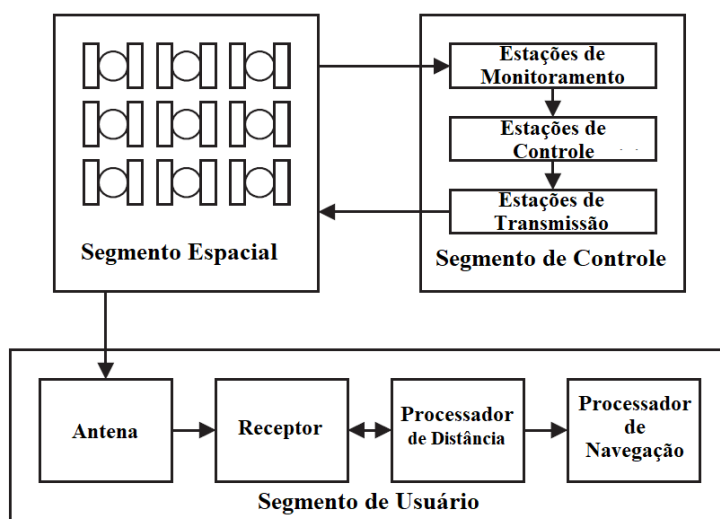
A navegação por satélite, é um processo autônomo de cálculo da posição geoespacial usando o tempo de propagação de sinais de rádio transmitidos ao longo da linha de visada entre satélites/transmissores em órbita e o receptor/usuário em um ponto cuja posição deve ser determinada. Um sistema de navegação por satélite com cobertura global é referido como GNSS, termo concebido na Décima Conferência de Navegação Aérea, em 1991, quando o *International Civil Aviation Organization* (ICAO) reconheceu que o futuro dos sistemas de navegação autônomos dependeria do GNSS. Um GNSS pode ser usado para fornecer informações precisas, globais e tridimensionais de posição curvilínea (latitude, longitude e altitude/elevação), velocidade e navegação a usuários munidos de equipamentos de recepção adequados. Além disso, ele transmite parâmetros temporais, alinhados ao *Universal Time Coordinated* (UTC), o que permite que os receptores atuem em todo o mundo como uma fonte de tempo sincronizada de alta precisão (CARVALHO, 2022).

Quando se trata de sistemas GNSS cada constelação possui seus próprios segmentos espacial e de controle, enquanto o segmento do usuário pode usar sinais de um ou mais GNSS. Segundo (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017), a arquitetura de um sistema de navegação consiste em três componentes:

- 1) Segmento espacial, o qual compreende uma constelação de satélites que orbitam a Terra e que transmitem sinais em pelo menos duas frequências na parte de micro-ondas do espectro de rádio. Esse segmento é composto por 24 ou mais satélites, colocados em órbitas terrestres médias (MEO, do inglês *Medium Earth Orbits*), dispostos entre 3 a 6 planos orbitais, com quatro ou mais satélites por plano. Tais configurações garantem que, em qualquer horário do dia, pelo menos quatro satélites estejam disponíveis a qualquer usuário sobre (ou próximo a) a superfície terrestre, em uma boa posição geométrica;
- 2) Segmento de controle, o qual é responsável por manter a integridade do sistema, monitorando os sinais de transmissão, computando e atualizando os dados de navegação necessários para os satélites. Consiste em um grupo de estações de monitoramento dispersas globalmente (ou localmente), antenas terrestres para comunicação com os satélites e uma estação de controle mestre com uma instalação de *backup* em um local diferente;
- 3) Segmento de usuários, composto pelos equipamentos de recepção GNSS civis e militares usados para as mais diversas funções.

Tal arquitetura é mostrada na Figura 2.1:

Figura 2.1 – Segmentos de um GNSS.



Fonte: Adaptada de Groves (2013)

Na Tabela 2.1 é possível observar algumas das características das quatro principais constelações GNSS citadas anteriormente, tais como seu desenvolvedor, número de satélites e planos orbitais, inclinação, altitude, período orbital e repetibilidade.

Tabela 2.1 – Principais características dos GNSS.

<i>Característica</i>	<i>GPS</i>	<i>GLONASS</i>	<i>Galileo</i>	<i>BDS</i>
<i>Desenvolvido por</i>	EUA	Rússia	União Europeia	China
<i>Constelação Nominal</i>	24	24+3	24+6	27
<i>Planos Orbitais</i>	6	3	3	3
<i>Inclinação</i>	55°	64,8°	56°	55°
<i>Altitude (km)</i>	20200	19100	23222	21500
<i>Período Orbital</i>	11h58min	11h15min	14h04min	12h53min
<i>Repetibilidade (dias orbitais)</i>	1	8	10	7

Fonte: Adaptada de Júnior et al. (2020)

Os sinais GNSS consistem em ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz e a partir das quais é possível se determinar o posicionamento de qualquer ponto da superfície terrestre. Eles são fornecidos em pelo menos duas frequências diferentes para compensar os atrasos ionosféricos em suas propagações. Uma característica comum a todos os sinais GNSS é a modulação da onda de rádio harmônica (denominada portadora) com um código

de ruído pseudoaleatório (PRN, do inglês *Pseudorandom Noise*) característico. Esse código PRN é essencialmente uma combinação binária de “uns” positivos e negativos, sem padrão ou regularidade (embora seja conhecida pelo receptor), a qual é transmitida a uma taxa tipicamente de 1 a 10 MHz, onde taxas mais altas implicam em um maior esforço de processamento, mas prometem medições mais precisas. Na maioria dos GNSSs, a sequência PRN também serve como uma impressão digital única, que permite ao receptor distinguir satélites individuais transmitindo na mesma frequência (GROVES, 2013; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

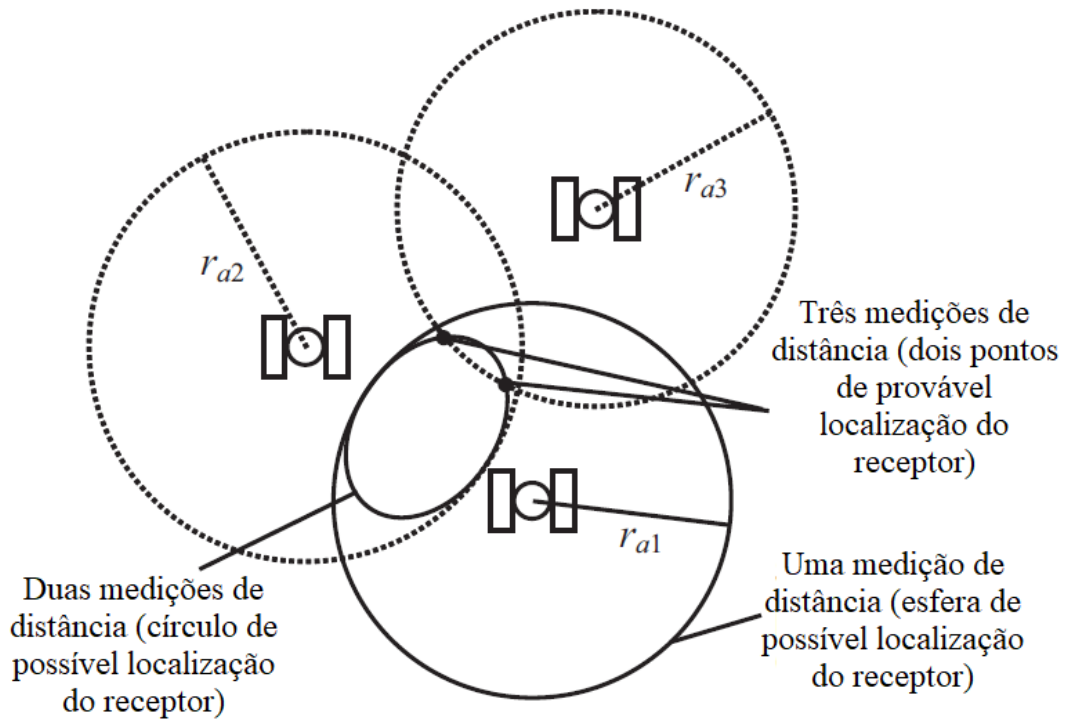
Em geral, os sinais GNSS permitem três tipos básicos de observáveis, a saber: observações de pseudodistância, fase da onda portadora e Doppler. Tais observações fornecem as medições básicas para o cálculo da posição e velocidade do receptor, bem como o deslocamento do relógio do mesmo em relação à escala de tempo do GNSS. A distância  $r_{as}$ , consiste em uma medida do tempo de propagação do sinal GNSS, desde sua transmissão pelo satélite, até sua aquisição pelo receptor, multiplicado pela velocidade de propagação de onda eletromagnética no vácuo ou velocidade da luz  $c$ . Assim, desconsiderando a existência de erros, uma medição de distância pode ser obtida como:

$$r_{as} = (t_{sa,a}^s - t_{st,a}^s)c, \quad (2.1)$$

onde  $t_{sa,a}^s$  é o tempo de chegada do sinal na antena receptora, e  $t_{st,a}^s$  é o tempo de transmissão do sinal pelo satélite  $s$ .

A Figura 2.2 apresenta os *loci* de posicionamento tridimensional com base em uma, duas e três medições de distância, respectivamente. Como pode-se observar, quando se tem apenas um satélite visível, forma-se uma casca esférica de raio  $r_{a1}$  onde o receptor pode estar localizado. Já quando se tem dois satélites disponíveis, a região formada pela interseção das duas cascas esféricas dá origem a um círculo de possível localização do receptor. Quando se avalia, por fim, os três satélites, tem-se que a interseção resultante define dois pontos de provável localização. Em teoria, medições de apenas três sinais GNSS são o suficiente para se determinar a posição de um usuário, uma vez que apenas um dos pontos prováveis de localização é viável na prática, podendo o outro estar no espaço, dentro da Terra, ou simplesmente fora da área de operação do usuário. Quando ambas as soluções são viáveis, uma medição de distância adicional pode ser usada para resolver a ambiguidade (GROVES, 2013). Na prática, portanto, são utilizados quatro satélites para se determinar uma solução de posicionamento.

Figura 2.2 – Loci de posicionamento tridimensional com base em uma, duas e três medições de distância.



Fonte: Adaptada de Groves (2013)

Nos GNSS, os relógios do receptor e do satélite não estão sincronizados com o tempo oficial do sistema. Logo as medições levam em conta, além da distância entre o satélite e o receptor, o erro de sincronização. Essas medições, são referidas como pseudodistâncias  $\rho_a^s$  e são modeladas como:

$$\rho_a^s = r_{as} + (\delta t_{sa,a}^s - \delta t_{st,a}^s)c, \quad (2.2)$$

onde  $\delta$  é um termo genérico usado para indicar erro na variável que o sucede.

Desconsiderando, momentaneamente, os demais erros que corrompem os sinais GNSS (a serem discutidos posteriormente neste Capítulo), a medição de pseudodistância, deve ser corrigida  $\rho_{a,C}^s$ , para o erro do relógio do satélite, podendo ser expressa em termos da posição do satélite,  $\mathbf{r}_{es}^e$ , no momento da transmissão do sinal, da posição da antena do usuário,  $\mathbf{r}_{ea}^e$ , no momento da recepção do sinal, e do erro do relógio do receptor como segue (GROVES, 2013):

$$\tilde{\rho}_{a,C}^s = \sqrt{[\mathbf{C}_e^I(t_{st,a}^s)\hat{\mathbf{r}}_{es}^e(t_{st,a}^s) - \hat{\mathbf{r}}_{ea}^e(t_{sa,a}^s)]^T [\mathbf{C}_e^I(t_{st,a}^s)\hat{\mathbf{r}}_{es}^e(t_{st,a}^s) - \hat{\mathbf{r}}_{ea}^e(t_{sa,a}^s)]} + \delta \hat{\rho}_c^a(t_{sa,a}^s), \quad (2.3)$$

onde  $\wedge$  denota o valor estimado,  $\sim$  denota o valor medido,  $\mathbf{C}_e^I$  é uma matriz de transformação, que relaciona os sistemas de coordenadas ECI (do inglês *Earth-Centered Inertial*) e ECEF (do inglês *Earth-Centered Earth-Fixed*) em função do tempo de propagação do sinal, a qual é dada por:

$$\mathbf{C}_e^I(t_{st,a}^s) \simeq \begin{pmatrix} 1 & \omega_{ie}r_{as}/c & 0 \\ -\omega_{ie}r_{as}/c & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

onde  $\omega_{ie}$  corresponde à magnitude da taxa de rotação da Terra.

Para a realização do posicionamento utilizando o GNSS, é necessário conhecer as coordenadas dos satélites, pois as mesmas servirão de referência para a determinação das coordenadas do receptor. Três conjuntos de dados são disponibilizados pelos GNSS para determinar os vetores de posição e velocidade dos satélites em um referencial terrestre em qualquer instante: dados de almanaque, efemérides transmitidas e efemérides precisas. Tais dados diferem em precisão e estão disponíveis em tempo real ou com algum atraso (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007; MONICO, 2008; GROVES, 2013; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). O objetivo dos dados de almanaque é auxiliar o receptor na aquisição/rastreio dos satélites em vista, bem como para tarefas de planejamento. Eles são atualizados regularmente e são transmitidos como parte da mensagem do satélite, a qual também contém parâmetros de correção para os erros de órbita e relógio de satélite para todos os satélites do respectivo GNSS.

Os dados de efemérides são semelhantes aos dados de almanaque, mas permitem uma determinação muito mais precisa da posição do satélite, a qual é necessária para converter o tempo de propagação do sinal em uma estimativa da posição do usuário. Os dados de efemérides são compostos de efemérides orbitais, que contêm detalhes sobre a posição dos satélites, e efemérides de relógio, que incluem detalhes sobre o erro dos respectivos relógios. De forma distinta dos dados de almanaque, os dados de efemérides para um determinado satélite são transmitidos apenas por esse satélite e normalmente são válidos por algumas horas (GREWAL; ANDREWS; BARTONE, 2013). As efemérides transmitidas são previstas para permitir seu uso imediato, e por isso, possuem erros superiores aos das efemérides precisas. Estas últimas são pós-processadas, bem como corrigidas dos efeitos de perturbação da órbita após a passagem dos satélites, ficando disponíveis aos usuários somente posteriormente. As efemérides precisas,

portanto, não são transmitidas pelos satélites mas sim disponibilizadas por centros de análise como o IGS. As efemérides precisas visam atender usuários que necessitam de posicionamento com maior precisão do que a oferecida pelas efemérides transmitidas (ABREU, 2007).

As mensagens de navegação GNSS são disponibilizados por diversos centro de dados como por exemplo a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e a Rede Incri de Bases Comunitárias do GNSS (RIBaC), no Brasil, sendo possível baixar as informações de forma gratuita nos seus respectivos sites, onde os dados estão separados por base (ou seja, local onde se encontra a antena) e data. Dentre as informações compreendidas nas mensagens de nevação, destacam-se:

- Dados de almanaque dos satélites, que contém os parâmetros aproximados das efemérides, calibração do relógio e integridade de toda a constelação de satélites;
- Dados de efemérides dos satélite, que permitem a determinação precisa da suas posições;
- Parâmetros de conversão e coeficientes de correção temporal, os quais são usados para estimação do atraso dos relógios dos satélites;
- Dados de atraso da ionosfera, que no caso particular do sistema GPS compreende oito coeficientes de correção para usuários SF, conforme modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987);
- Mensagem de saúde dos satélite, que indica o *status* atual dos sinais e mensagens de navegação, para auxiliar o receptor na identificação/exclusão de sinais corrompidos.

## 2.1 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O GPS é um GNSS de propriedade dos EUA que fornece aos usuários serviços de Posicionamento, Navegação e Tempo (PNT). Desde a sua criação, na década de 1970, o GPS tem evoluído continuamente, e seu desempenho melhorado em termos de precisão, disponibilidade e integridade. Isso é atribuído não apenas aos grandes aprimoramentos tecnológicos dos seus (já discutidos) três segmentos, mas também ao ganho de experiências pela comunidade operacional da Força Aérea dos EUA. O GPS fornece dois serviços principais: Serviço de Posicionamento Preciso (PPS, do inglês *Precise Position Service*) e Serviço de Posicionamento Padrão (SPS, do inglês *Standard Positioning Service*). Ambos os serviços fornecem sinais de navegação para usuários determinarem a posição, velocidade e UTC referenciados ao Observatório Naval

dos EUA (KAPLAN; HEGARTY, 2017). O PPS, em particular, consiste em um serviço de posicionamento e temporização fornecido por meio de acesso militar ou acesso autorizado a sinais GNSS transmitidos nas frequências L1 e L2 do GPS com alto nível de criptografia.

Diferentemente do PPS, o SPS é um serviço de posicionamento e tempo disponível para uso civil, comercial e científico. Conforme menciona GPS (2022), os sinais SPS são modulados o código C/A (do inglês *Coarse/Acquisition*), com mensagem de navegação, os código CM/CL (do inglês *Civil Moderate Code/Civil Long Code*) e código I5/Q5 (do inglês *In-Phase Code/Quadrature Phase*). O sinal com código C/A é transmitido por todos os satélites e compreende uma portadora L1 (1575,42 MHz) também modulada com uma mensagem de navegação tradicional (*legacy*). Os sinais de código CM e CL são transmitidos por alguns satélites e compreendem uma portadora L2 (1227,60 MHz) modulada com o código CM e uma mensagem de navegação civil (CNAV, do inglês *Civil Navigation Message*) e um sinal CL sem dados de navegação. Os sinais I5 e Q5, por fim, são transmitidos por alguns satélites e compreendem uma portadora L5 (1176,45 MHz) modulada por um sinal I5 com uma mensagem CNAV e um sinal Q5 sem dados de navegação. Cada satélite transmite um mínimo de dois códigos PRN, o código de precisão (P(Y), do inglês *Precise*), que é o PRN principal do PPS, e o código C/A que é usado para aquisição do código P(Y) (denotado P) e como sinal primário do SPS. Dependendo da configuração particular do satélite, os seguintes códigos PRN e mensagens de navegação adicionais também podem ser transmitidos pelos satélites: (a) os códigos militares (M) e as mensagens militares de navegação (MNAV, do inglês *Civil Navigation Message*) nas portadoras L1 e L2, (b) os segundos códigos civis (L2C) e mensagens CNAV na portadora L2 e (c) os terceiros códigos civis (L5) e mensagens CNAV na portadora L5.

A constelação GPS é uma mistura de satélites antigos e novos. Em 26 de junho de 2022, havia um total de 31 satélites operacionais na constelação GPS, sem incluir os sobressalentes em órbita, i.e., desativados (GPS, 2022). A Tabela 2.2 resume as características das gerações atuais e futuras de satélites GPS, onde II e III indicam a segunda e terceira geração, enquanto, A, R, M e F indicam, respectivamente, Avançado, Reabastecimento, Modernizado e *Follow-on*.

Tabela 2.2 – Gerações de satélites GPS e suas características.

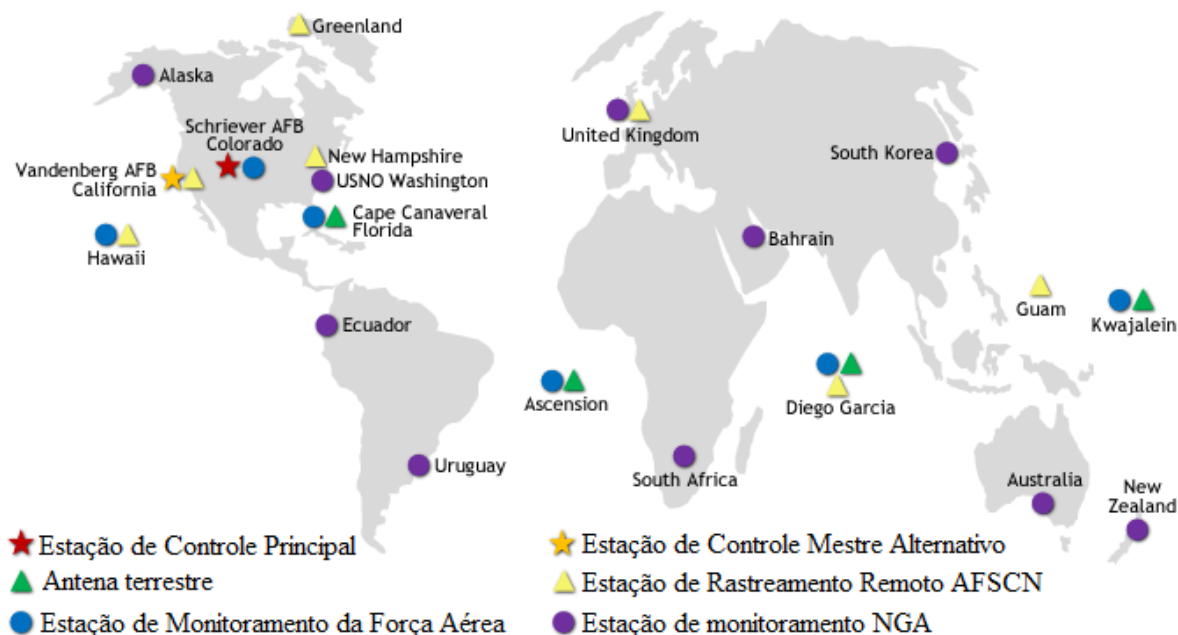
	<b>N° de satélites em operação</b>	<b>Características</b>
<b>Bloco IIA</b>	0	Código C/A na frequência L1 para usuários civis; Código P(Y) nas frequências L1 e L2 para militares; 7,5 anos de vida útil; Lançado entre 1990-1997; Último satélite desativado em 2019
<b>Bloco IIR</b>	7	Código C/A em L1; Código P(Y) em L1 e L2; Monitoramento de relógio a bordo; 7,5 anos de vida útil; Lançado entre 1997-2004
<b>Bloco IIR-M</b>	7	Todos os sinais tradicionais; 2° sinal civil em L2 (L2C); Novos sinais com código militar; Maiores níveis de potência; Vida útil do projeto de 7,5 anos; Lançado entre 2005-2009
<b>Bloco IIF</b>	12	Todos os sinais do Bloco IIR-M; 3° sinal civil na frequência L5; Relógios atômicos avançados; Precisão, intensidade de sinal e qualidade aprimorada; 12 anos de vida útil; Lançado entre 2010-2016
<b>Bloco III/IIIF</b>	5	Todos os sinais do Bloco IIF IIIF: refletores de laser, carga de busca e salvamento; 4° sinal civil em L1 (L1C); Confiabilidade, precisão e conhecimento de sinais aprimorados, sem SA; 15 anos de vida útil; Primeiro lançamento em 2018

Fonte: Adaptada de GPS (2022).

O segmento de controle do GPS consiste em uma rede global de instalações terrestres que rastreiam os satélites GPS, monitoram suas transmissões, realizam análises e enviam comandos e dados para a constelação. O atual Segmento de Controle Operacional (OCS, do inglês *Operational Control Segment*) inclui uma estação de controle mestre, uma estação de controle mestre alternativa, 11 antenas de comando e controle e 16 locais de monitoramento (GPS, 2022). As localizações dessas instalações são mostradas no mapa da Figura 2.3.

A tecnologia GPS pode ser encontrada atualmente em grande parte das aplicações contemporâneas, a exemplo de telefones celulares, relógios de pulso, até mesmo em tratores, contêineres e caixas eletrônicos. O GPS auxilia no aumento da produtividade em diversas áreas, incluindo agricultura, construção civil, mineração, pesquisa e gerenciamento da cadeia logística de suprimentos. As principais redes de comunicação, sistemas bancários, mercados financeiros e redes elétricas dependem do GPS para uma sincronização precisa do tempo, sendo que alguns serviços sem fio não podem operar sem ele. Embora as investigações e contribuições fornecidas por este trabalho sejam aplicáveis a qualquer um dos atuais quatro GNSS disponíveis, particular enfoque é dado ao GPS, dado a sua reconhecida robustez e confiabilidade (face aos demais).

Figura 2.3 – Localização das estações do segmento de controle do GPS.



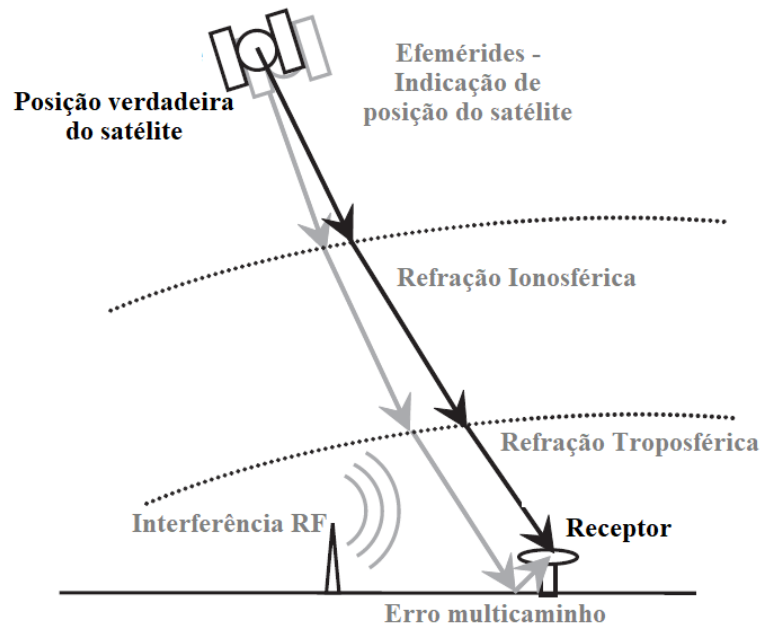
Fonte: Adaptada de GPS (2022).

## 2.2 Fontes de Erros no GNSS

De acordo com Monico (2008), as observáveis GNSS, assim como qualquer sinal de telemetria, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros; logo, para se obter resultados confiáveis, o modelo matemático estabelecido para as observáveis que se tenta descrever, e as fontes de erros envolvidas nos processos de medições devem ser bem conhecidas. Erros sistemáticos podem ser parametrizados, reduzidos ou até mesmo eliminados por técnicas apropriadas (calibração). Os erros aleatórios por outro lado, não apresentam qualquer correlação modelável com as medidas, sendo, em geral, flutuações remanescentes nas observações, as quais são consideradas inevitáveis. Já os erros grosseiros são geralmente erros introduzidos por falhas humanas na operação do instrumento e podem ser detectados ao se realizar várias coletas de dados para um mesmo ponto de interesse.

Cada fonte de erro em particular pode ser analisada pelos efeitos causados na determinação da distância entre satélite e receptor. A Figura 2.4 mostra os possíveis efeitos de alguns desses erros. Já na Tabela 2.3 são apresentados alguns dos diversos erros que corrompem os sinais GNSS, agrupados segundo as possíveis fontes e acompanhados de suas classificações em sistemáticos ou grosseiros.

Figura 2.4 – Algumas fontes de erros do GNSS.



Fonte: Adaptada de Groves (2013)

Tabela 2.3 – Fontes de erros envolvidos nas observáveis GNSS.

Fonte	Efeito	Tipo de Efeito
Satélite	Erro de órbita	Sistemático
	Erro de relógio	Sistemático
	Relatividade	Sistemático
	Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i>	Sistemático
Propagação do Sinal	Refração troposférica	Sistemático
	Refração ionosférica	Sistemático
	Perda de ciclos	Sistemático
	Rotação da Terra	Sistemático
Receptor	Erro de relógio	Sistemático
	Erro do <i>hardware</i>	Sistemático
	Erro entre os canais	Sistemático
	Centro de fase da antena	Sistemático
Estação	Erro nas coordenadas	Grosseiro
	Multicaminho	Sistemático
	Marés terrestres	Sistemático
	Tectônica de placas litosféricas	Sistemático
	Movimento do pólo	Sistemático
	Carga oceânica	Sistemático
	Carga atmosférica	Sistemático
	Identificação da estação	Grosseiro
Medição da altura da antena	Grosseiro	

Fonte: Adaptada de Abreu (2007).

Além da classificação dos erros em aleatórios, sistemáticos e grosseiros por exemplo, utilizada por Monico (2008) muitas literaturas dividem os parâmetros de depreciação dos sinais

GNSS em CME e NCME, como em Teunissen e Montenbruck (2017) e Farrell (2008). Os erros de modo comum são compostos principalmente pelo erro de efeméride, erro do relógio do satélite, *biases* instrumentais, e atrasos ionosféricos e troposféricos. Já os erros de modo não comum são compostos pelo erro do relógio do receptor, erro de multicaminho e ruídos aleatórios. Dessa forma, a pseudodistância grosseira ( $\rho_{a,R}^{s,l}$ ), medida entre o equipamento do usuário  $a$  e o satélite  $s$ , para o sinal  $l$  é dada por:

$$\rho_{a,R}^{s,l} = r_{as} + (\delta t_{sa,a}^s - \delta t_{st,a}^s)c + \delta \rho_e^s + \delta \rho_{I,a}^{s,l} + \delta \rho_{T,a}^s + \delta \rho_{M,a}^{s,l} + (b_{a,l} + b^{s,l})c + \delta w_{\rho,a}^{s,l}, \quad (2.5)$$

onde  $\delta \rho_e^s$  é o erro de efemérides,  $\delta \rho_{I,a}^{s,l}$  o erro de propagação ionosférica,  $\delta \rho_{T,a}^s$  o erro de propagação troposférica,  $\delta \rho_{M,a}^{s,l}$  o erro de multicaminho,  $b_{a,l}$  representa o atraso do sinal  $l$  sofrido no *hardware* do receptor,  $b_{s,l}$  é o atraso do mesmo sinal no *hardware* do satélite e  $\delta w_{\rho,a}^{s,l}$  consiste nos ruídos aleatórios. Esses são os erros que exercem maior influência no posicionamento GNSS baseado em observações de pseudodistância. Os erros do GNSS podem ser mitigados de várias formas, seja por meio de modelos matemáticos, produtos pós-processados ou em tempo real. A definição do método de correção depende majoritariamente do tipo de erro e disponibilidade de correções.

### 2.2.1 Erro de Efemérides

As efemérides transmitidas são elementos-chave dos GNSS, pois consistem nas informações de órbita que permitem ao receptor calcular a posição e a velocidade dos satélites na constelação. Informações orbitais podem ser obtidas a partir das efemérides transmitidas pelos satélites ou das pós-processadas, denominadas efemérides precisas. As coordenadas dos satélites calculadas a partir das efemérides são, em geral, consideradas fixas durante o processo de ajustamento dos dados dos satélites. Dessa forma, erros nas coordenadas do satélite se propagam para a posição do usuário.

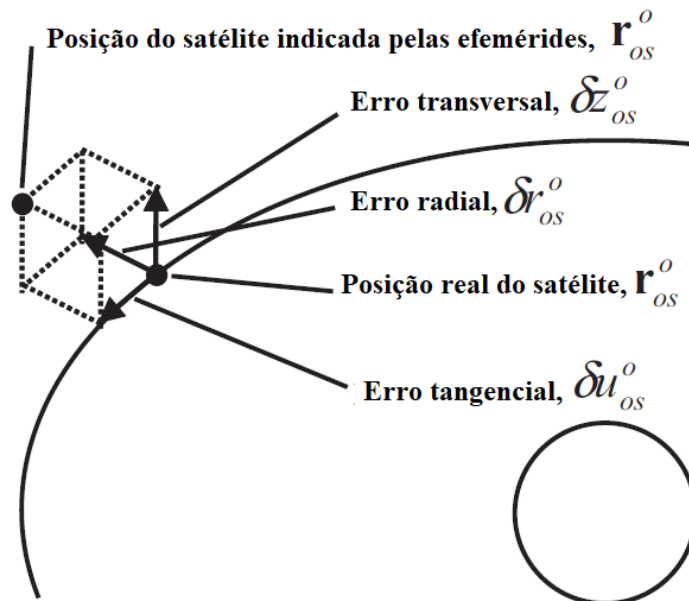
Para cada satélite, também chamado de veículo espacial (SV, do inglês *Space Vehicle*), o valor do erro de efemérides na Tabela de Correção de Mensagens de Navegação (NMCT, do inglês *Navigation Message Correction Table*) é um erro de pseudodistância estimado. Conforme descrito em Force (2021), cada valor do erro de efemérides é calculado pelo segmento de controle e representa o componente radial do erro de posição do satélite menos a velocidade

de propagação da onda eletromagnética no vácuo,  $c$ , vezes o erro do relógio do satélite. As efemérides dos satélites são calculadas subtraindo a transmissão das estimativas atuais, ou seja, o erro de previsão das efemérides é simplesmente o erro na previsão da posição do satélite, feita pelo segmento de controle. Portanto, o valor desse erro de efemérides pode ser usado para corrigir a pseudodistância medida pelo usuário. Seus componentes são expressos em coordenadas cilíndricas do sistema de coordenadas orbital,  $\delta r_{os}^o$ ,  $\delta u_{os}^o$ ,  $\delta z_{os}^o$ , de acordo com a Figura 2.5. Essas componentes são correlacionadas na ordem de uma hora e mudam cada vez que os dados de efemérides na mensagem de navegação são atualizados. O erro na pseudodistância devido ao erro de efemérides é (GROVES, 2013):

$$\delta \rho_e^s = \frac{\mathbf{r}_{es}^e}{|\mathbf{r}_{es}^e|} \mathbf{u}_{as}^e \delta \mathbf{r}_{os}^o + \frac{\mathbf{v}_{es}^e}{|\mathbf{v}_{es}^e|} \mathbf{u}_{as}^e \mathbf{r}_{os}^o \delta \mathbf{u}_{os}^o + \frac{\mathbf{r}_{es}^e \times \mathbf{v}_{es}^e}{|\mathbf{r}_{es}^e| |\mathbf{v}_{es}^e|} \mathbf{u}_{as}^e \delta \mathbf{z}_{os}^o, \quad (2.6)$$

onde  $\mathbf{v}_{es}^e$  é o vetor velocidade do satélite com relação ao ECEF, e  $\mathbf{u}_{as}^e$  é o vetor linha de visada entre o receptor  $a$  e satélite  $s$ .

Figura 2.5 – Componentes do erro de efemérides transmitidas.



Fonte: Adaptada de Groves (2013)

### 2.2.2 Erro do Relógio do Satélite

Em um *Standalone* GNSS (SGNSS), i.e., um GNSS padrão, o erro de relógio dos satélites é geralmente corrigido por meio de três coeficientes de calibração,  $a_{f0}^s$ ,  $a_{f1}^s$ ,  $a_{f2}^s$ , e um tempo de

referência,  $t_{oc}^s$ , transmitido na mensagem de navegação e comum a todos os sinais desse satélite. Além disso, uma correção relativística é aplicada para compensar a variação na velocidade do relógio do satélite com a velocidade e o potencial gravitacional sobre a órbita do satélite. A correção total do relógio do satélite para o sinal  $l$  é (GROVES, 2013):

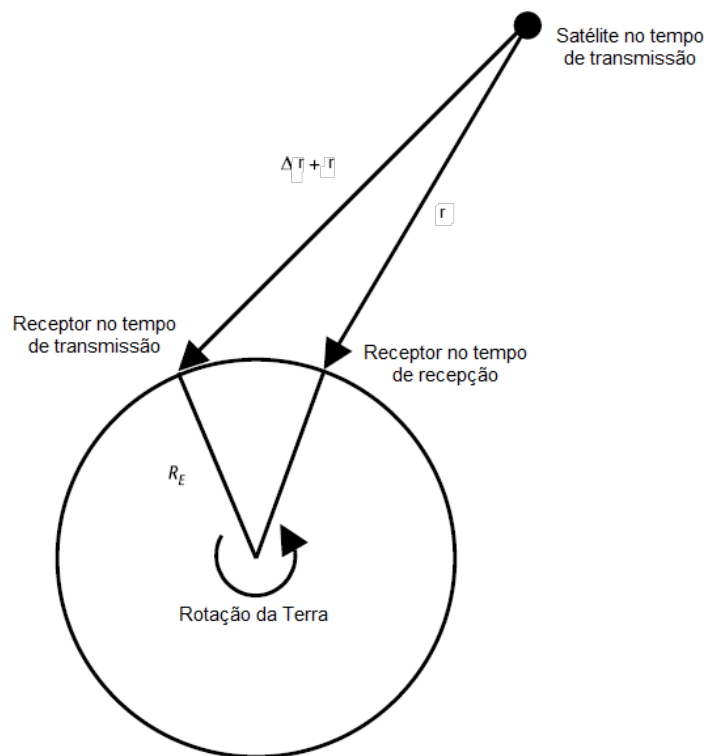
$$\delta\rho_c^{s,l} = \left[ a_{f0}^s + a_{f1}^s(t_{st,a}^{s,l} - t_{oc}^s) + a_{f2}^s(t_{st,a}^{s,l} - t_{oc}^s)^2 \right] c - 2 \frac{\mathbf{r}_{es}^e \cdot \mathbf{v}_{es}^e}{c}, \quad (2.7)$$

onde uma correção de  $\pm 604,800$  segundos é aplicada a  $t_{oc}^s$  onde  $t_{st,a}^{s,l} - t_{oc}^s > 302,400s$  para contabilizar os cruzamentos de semanas.

### 2.2.3 Efeito Sagnac

Um efeito relativístico que surge devido à rotação da Terra durante o tempo de transmissão do sinal GNSS é conhecido como efeito Sagnac e ocorre quando os cálculos das posições dos satélites são feitos no sistema de coordenadas ECEF (Figura 2.6). Caso não seja corrigido, o efeito Sagnac pode levar a erros de posição da ordem de até 40 metros para o GPS.

Figura 2.6 – Efeito Sagnac.



Fonte: Adaptado de (KAPLAN; HEGARTY, 2017)

Existem várias abordagens para corrigir o efeito Sagnac. A abordagem comum, conforme citada por Kaplan e Hegarty (2017), é evitá-lo trabalhando no sistema de coordenadas ECI para

cálculos de posição de satélite e usuário, uma vez que o efeito Sagnac não surge nesse sistema de referência. O ECI pode ser alternativamente, e convenientemente, obtido pelo congelamento do ECEF no instante em que as medições das observáveis são feitas para o conjunto de satélites visíveis. Dessa forma, cada posição de satélite pode ser calculada em termos de suas coordenadas no ECEF ( $x^{s'}$ ,  $y^{s'}$ ,  $z^{s'}$ ) no momento da transmissão usando os dados das efemérides transmitidas. Em seguida, cada posição de satélite pode ser transformada para o ECI usando a rotação:

$$\begin{bmatrix} x^s(t_t^{GPS}) \\ y^s(t_t^{GPS}) \\ z^s(t_t^{GPS}) \end{bmatrix} = C_3(\omega_{ie}\tau) \begin{bmatrix} x^{s'}(t_t^{GPS}) \\ y^{s'}(t_t^{GPS}) \\ z^{s'}(t_t^{GPS}) \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

onde  $C_3(\omega_{ie}\tau)$  é a matriz de rotação em torno do eixo  $z$  da Terra aplicada a um ângulo  $(\omega_{ie}\tau)$ , o qual representa a velocidade de rotação da Terra multiplicada pelo tempo de propagação do sinal  $\tau$ :

$$C_3(\omega_{ie}\tau) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{ie}\tau) & \text{sen}(\omega_{ie}\tau) & 0 \\ -\text{sen}(\omega_{ie}\tau) & \cos(\omega_{ie}\tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

#### 2.2.4 Biases Instrumentais

O atraso instrumental dos sinais GNSS, seja no satélite ou no receptor, é causado pela diferença entre os caminhos percorridos pelas portadoras (L1 e L2, do GPS, por exemplo) nos *front-ends* e filtros digitais dos respectivos *hardwares*. Esses atrasos não são acessíveis diretamente em sua forma absoluta, sendo obtidos apenas quando se realiza combinações entre as portadoras. Dessa maneira, os atrasos ou *biases* são denominados de DCBs (do inglês *Differential Code Biases*).

No caso do GPS, a combinação livre de ionosfera (IF, do inglês *Ionosphere-Free* dos sinais P(Y) em L1 e L2 é usada como referência para calcular a solução dos relógios de seus satélites/estações de controle/transmissão, e nenhum bias instrumental se faz necessário compensar. Se um usuário, por outro lado, processa observações de única frequência ou uma combinação diferente de observações, os *biases* correspondentes devem ser corrigidos. O parâmetro de correção TGD (do inglês, *Timing Group Delay*), o qual faz parte das mensagens de navegação tradicionais dos GNSS para cada satélite (MARQUES, 2012), permite a correção do *bias* instrumental entre a combinação linear IF dos sinais L1/L2-P(Y) e o sinal P(Y) transmitido

na frequência L1, i.e.,

$$b^{s,L1P(Y)} = T_{GD}^s. \quad (2.10)$$

Para usuários GPS do sinal P(Y) transmitido na frequência L2, e/ou de qualquer outro sinal  $l$ , as seguintes correções para os respectivos *biases* instrumentais devem ser computadas:

$$\begin{aligned} b^{s,L2P(Y)} &= (f_{ca}^{L1} / f_{ca}^{L2})^2 T_{GD}^s, \\ b^{s,l} &= T_{GD}^s - DCB_l^s, \end{aligned} \quad (2.11)$$

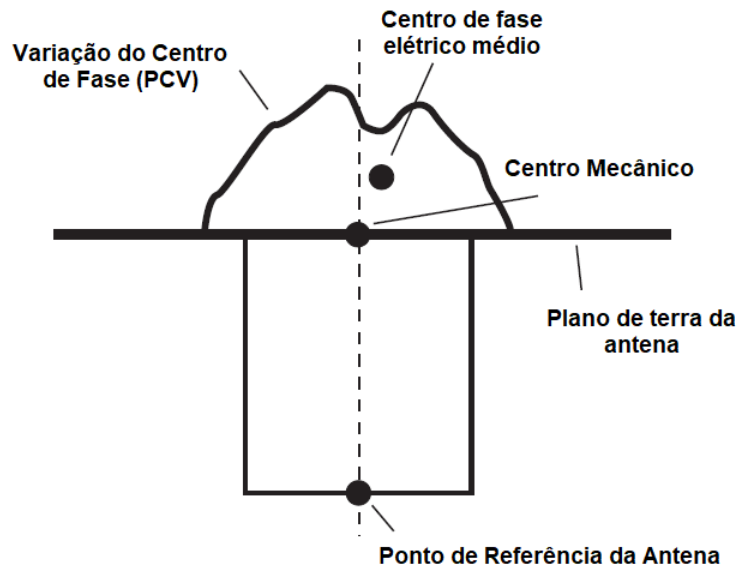
onde  $DCB_l^s$  são os *biases* instrumentais do sinal  $l$  com relação à combinação IF L1/L2-P(Y). É importante observar que esses DCBs são transmitidos apenas nas mensagens de navegação mais recentes, ou então disponibilizadas na forma de produtos RT-PPP. Portanto, usuários de equipamentos antigos e sem acesso às correções RT-PPP devem assumir que o código C/A está sincronizado com o código L1 P(Y) (GROVES, 2013).

### 2.2.5 Deslocamento de Fase da Antena

O centro de fase eletrônico das antenas dos GNSS não coincide com o centro mecânico das mesmas. Dessa forma, e para fins de estabelecimento de conversões adequadas, define-se o Ponto de Referência da Antena (ARP, do inglês *Antenna Reference Point*) como a interseção do eixo mecânico vertical com a parte mais baixa da antena como mostrado na Figura 2.7. Para a maioria dos tipos de antenas de receptores GNSS, a variação tridimensional (*offset*) do centro de fase eletrônico com relação ao ARP é dada pelos próprios fabricantes (SEEBER, 2003). Esses *offsets* são conhecidos como Deslocamentos do Centro de Fase (PCOs, do inglês *Phase Center Offsets*).

Os PCOs, para as antenas dos satélites, são dados no mesmo sistema de coordenadas fixo no satélite, o qual também é usado para expressar a pressão da radiação solar. A origem do sistema de coordenadas está no centro de massa do satélite; o eixo  $k$  aponta para o centro da Terra, o eixo  $j$  aponta ao longo do eixo do painel solar, e o eixo  $i$  completa o sistema de coordenadas dextrógiro baseado no plano Sol-satélite-Terra. Essa definição falha quando o Sol, o satélite e a Terra estão colineares, ou seja, quando o satélite está na sombra da Terra. Dessa forma, seja  $\mathbf{r}_{es}^e$  e  $\mathbf{r}_{eS}^e$  as coordenadas do centro de massa do satélite GNSS e as coordenadas do centro de massa do Sol, respectivamente, no sistema ECEF. O vetor  $\mathbf{r}_{es}^e$  é obtido a partir das efemérides do satélite e  $\mathbf{r}_{eS}^e$  é calculado a partir das efemérides planetárias. O vetor unitário que relaciona  $\mathbf{r}_{eS}^e$  e  $\mathbf{r}_{es}^e$  é dado por (WITCHAYANGKOON, 2000):

Figura 2.7 – Variação do centro de fase e ponto de referência da antena de um receptor.



Fonte: Adaptado de (SEEBER, 2003)

$$\mathbf{e} = \frac{\mathbf{r}_{eS}^e - \mathbf{r}_{es}^e}{|\mathbf{r}_{eS}^e - \mathbf{r}_{es}^e|}. \quad (2.12)$$

Já o vetor unitário do centro de massa do satélite para o centro da Terra é:

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{r}_{es}^e}{|\mathbf{r}_{es}^e|}. \quad (2.13)$$

Por fim, o vetor unitário ao longo do eixo do painel solar é:

$$\mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{e}. \quad (2.14)$$

A direção que completa o sistema de coordenadas dextrógiro fixado no satélite é,

$$\mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{k}. \quad (2.15)$$

Então  $\Delta \mathbf{r}_{es}^e$  é o deslocamento expresso no sistema de coordenadas ECEF,

$$\Delta \mathbf{r}_{es}^e = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{O}, \quad (2.16)$$

onde a matriz de rotação  $\mathbf{R}$  é:

$$\mathbf{R} = [\mathbf{i} \ \mathbf{j} \ \mathbf{k}]^T. \quad (2.17)$$

, com  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  definindo o sistema de coordenadas fixas do satélite e  $O$  denotando o PCO da antena expresso nesse sistema de coordenadas, cujos valores estão descritos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – *Offsets* dos centros de fase das antenas dos satélites GPS adotados pelo IGS.

Satélite	Offset		
	Posição $i$	Posição $j$	Posição $k$
Bloco II/IIA	0,279 m	0 m	1,023 m
Bloco IIR	0 m	0 m	0 m

Fonte: Adaptada de Witchayangkoon (2000)

Dessa forma, a posição do centro de fase da antena do satélite no ECEF,  $\mathbf{r}_{es'}^e$ , é dado pela soma das coordenadas do satélite obtidas via efemérides transmitidas com o deslocamento expresso no sistema de coordenadas ECEF:

$$\mathbf{r}_{es'}^e = \mathbf{r}_{es}^e + \Delta\mathbf{r}_{es}^e. \quad (2.18)$$

### 2.2.6 Erro Ionosférico

Como cita Júnior (2002), o atraso ionosférico depende da frequência e, no caso do sistema GPS, esse atraso pode ser da ordem de 1 m ou atingir até mais de 100 m. O erro associado à refração ionosférica depende do Conteúdo Total de Elétrons (TEC, do inglês *Total Electron Content*) contido na camada ionosférica, o qual por sua vez é influenciado por diversos fatores, tais como ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica e atividade geomagnética. A unidade do TEC é calcula a partir do número de elétrons em uma coluna vertical com um metro quadrado de seção transversal estendendo sobre todo o caminho do satélite GNSS até o receptor Klobuchar (1996). Uma Unidade de TEC (TECU, do inglês *TEC Unit*) é igual a  $10^{16}$  elétrons/ $m^2$ . Valores de de 1 a  $10^3$  TECU, ao longo do caminho de ondas de rádio, representam os extremos dos valores observados na ionosfera terrestre (MARQUES, 2012).

O erro ionosférico pode ser parcialmente corrigido por modelos matemáticos, tais como o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987) no caso do GPS, e o modelo NeQuick (RADI-CELLA, 2009) no caso do Galileo; por meio de correções pós-processadas, que consistem em Mapas Ionosféricos Globais (GIM, do inglês *Global Ionospheric Map*) disponibilizados pelo IGS; por mapas regionais em tempo quase-real disponibilizados pela FCAG-UNLP no formato IONEX (do inglês *IONosphere EXchange*); e também por mapas em tempo real obtidos via *software* BNC por Representação de Espaço de Estados (SSR, do inglês, *State Space Represen-*

tation). Esses mapas apresentam valores de TEC verticais (VTEC, do inglês *Vertical TEC*) em um *grid* com dimensões em latitude e longitude num intervalo de tempo.

### 2.2.6.1 Receptores de Simples Frequência

Em um receptor GPS SF, o atraso de propagação pela ionosfera,  $\delta\rho_{I,a}^{s,l}$  é estimado usando o modelo de Klobuchar. Esse modelo calcula o atraso em função da latitude ( $L$ ) e longitude ( $\lambda$ ) da antena do receptor; da elevação  $\theta_{nu}^{as}$  e azimute  $\psi_{nu}^{as}$  do satélite, do tempo GPS, e de coeficientes,  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$ , os quais são transmitidos na mensagem de navegação.

Os primeiros passos consistem em determinar o ângulo centrado na Terra,  $\Psi_E^s$ , e a latitude subionosférica,  $L_I^s$ :

$$\Psi_E^s = \frac{0,1352}{\theta_{nu}^{as} + 0,3456} - 0,06912, \quad (2.19)$$

$$L_I^s = L_a + \Psi_E^s \cos \psi_{nu}^{as}. \quad (2.20)$$

A latitude subionosférica é limitada ao intervalo  $-1,307 \leq L_I^s \leq 1,307$  rad, sendo usada para calcular a longitude subionosférica,  $\lambda_I^s$ , e latitude geomagnética,  $L_m^s$ :

$$\lambda_I^s = \lambda_a + \Psi_E^s \frac{\text{sen} \psi_{nu}^{as}}{\cos L_I^s}, \quad (2.21)$$

$$L_m^s = L_I^s + 0,2021 \cos(\lambda_I^s - 5,080). \quad (2.22)$$

O tempo no ponto subionosférico,  $t_{si}^s$ , é calculado por:

$$t_{si}^s = \Delta t'^s + 1,375 \times 10^4 \lambda_I^s, \quad (2.23)$$

onde  $\Delta t'^s$  é o tempo GPS,  $0 \leq \Delta t'^s \leq 86400$ s.

Logo, a estimativa do atraso de propagação ionosférica na frequência L1 do GPS é dada por:

$$\begin{aligned} \delta\widehat{\rho}_{I,a}^{s,L1} &= 5 \times 10^{-9} [1 + 0,516(1,67 - \theta_{nu}^{as})^3] c & |x_s| > 1,57 \\ \delta\widehat{\rho}_{I,a}^{s,L1} &= [5 \times 10^{-9} + (1 - \frac{x_s^2}{2} + \frac{x_s^4}{24}) \sum_{n=0}^3 \alpha_n (\frac{L_m^s}{\pi})] [1 + 0,516(1,67 - \theta_{nu}^{as})^3] c & |x_s| \leq 1,57 \end{aligned} \quad (2.24)$$

onde,

$$x_s = \frac{2\pi(t_{si}^s - 50,4)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n (L_m^s / \pi)^n}. \quad (2.25)$$

Alternativamente, a estimativa do atraso ionosférico para um sinal genérico,  $l$ , transmitida na frequência  $f_{ca}^i$  é dada por:

$$\delta \widehat{\rho}_{I,a}^{s,l} = \left( \frac{f_{ca}^{L1}}{f_{ca}^i} \right)^2 \times \delta \widehat{\rho}_{I,a}^{s,L1}. \quad (2.26)$$

### 2.2.6.2 Receptores de Dupla Frequência

A ionosfera é um meio dispersivo, o que significa que sinais transmitidos através dela apresentam diferentes atrasos em função de diferentes frequências. Logo, receptores DF levam vantagens no sentido em que permitem a combinação IF de observáveis para minimizar ou eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Os receptores GPS DF permitem que o efeito da refração ionosférica seja mais corretamente mitigado a partir de medidas realizadas com o código ou com a fase da portadora. Contudo a técnica utilizada no modelo de observações com fase da onda portadora, é mais precisa do que os modelos que se utilizam de observações do código para a determinação da pseudodistância. Tais modelos permitem que a precisão atinja os padrões para usos geodésicos. O inconveniente, todavia, reside no elevado custo de aquisição desse tipo de receptor (ALVES, 2021).

No caso dos receptores DF, os erros dos relógios do satélite e do receptor, o erro das efemérides e erro troposférico contaminam as medidas realizadas da mesma maneira em ambas as frequências, logo, pode-se reescrever (2.5) para as frequências genéricas  $f_1$  e  $f_2$  da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \rho_{a,R}^{s,f_1} &= r_{as} + (\delta t_{sa,a}^s - \delta t_{st,a}^s)c + \delta \rho_e^s + \delta \rho_{I,a}^{s,f_1} + \delta \rho_{T,a}^s + \delta \rho_{M,a}^{s,f_1} + (b_{a,f_1} + b^{s,f_1})c + \delta w_{\rho,a}^{s,f_1} \\ \rho_{a,R}^{s,f_2} &= r_{as} + (\delta t_{sa,a}^s - \delta t_{st,a}^s)c + \delta \rho_e^s + \delta \rho_{I,a}^{s,f_2} + \delta \rho_{T,a}^s + \delta \rho_{M,a}^{s,f_2} + (b_{a,f_2} + b^{s,f_2})c + \delta w_{\rho,a}^{s,f_2}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

O atraso ionosférico  $\delta \rho_{I,a}^{s,f_i}$  é proporcional ao TEC inclinado (STEC, do inglês *Slant TEC*) e é dado pela seguinte expressão (MARQUES, 2012):

$$\delta \rho_{I,a}^{s,f_i} = \frac{40,3 \text{STEC}}{f_i^2}. \quad (2.28)$$

Diferenciando-se as pseudodistâncias das frequências  $f_1$  e  $f_2$ , e desprezando-se a influência dos *biases* instrumentais, tem-se que:

$$\rho_{a,R}^{s,f_1} - \rho_{a,R}^{s,f_2} = (\delta\rho_{I,a}^{s,f_1} - \delta\rho_{I,a}^{s,f_2}) + (\delta\rho_{M,a}^{s,f_1} - \delta\rho_{M,a}^{s,f_2}) + (\delta w_{\rho,a}^{s,f_1} - \delta w_{\rho,a}^{s,f_2}). \quad (2.29)$$

Sabendo que:

$$\delta\rho_{I,a}^{s,f_1} - \delta\rho_{I,a}^{s,f_2} = 40,3\text{STEC} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} = \delta\rho_{I,a}^{s,f_1} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2}. \quad (2.30)$$

Logo, pode-se reescrever (2.29) como:

$$\rho_{a,R}^{s,f_1} - \rho_{a,R}^{s,f_2} = \delta\rho_{I,a}^{s,f_1} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} + \delta\rho_{M,a}^{s,f_1,2} + \delta w_{\rho,a}^{s,f_1,2}. \quad (2.31)$$

Com pelo menos duas observações em frequências diferentes, portanto, é possível determinar o atraso ionosférico e eliminá-lo das equações de observação, pelo menos os de primeira ordem (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). A equação de combinação de pseudodistância IF é dada por:

$$\rho_{a,R}^{s,IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \rho_{a,R}^{s,f_1} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \rho_{a,R}^{s,f_2}. \quad (2.32)$$

### 2.2.7 Erro Troposférico

A troposfera é a camada mais superficial da atmosfera, com espessura média de aproximadamente 12 km. Trata-se do local onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos (SAPUCCI, 2001). A troposfera é um meio eletricamente neutro e não dispersivo de propagação dos sinais GNSS, sendo que os efeitos provocados nos mesmos são a atenuação atmosférica, a cintilação troposférica e o atraso troposférico. Dentre estes, o efeito de maior impacto nos sinais GNSS é o atraso troposférico, o qual possui duas componentes principais, hidrostática e úmida (JR; MONICO; SAPUCCI, 2017).

Devido à atual inexistência de produtos troposféricos passíveis de uso no âmbito do RT-PPP, a redução/eliminação desses erros, na maioria das aplicações de navegação contemporâneas via GNSS, é feita via modelos matemáticos. Diversos autores têm elaborado modelos empíricos para mitigar esse erro, os quais, em geral, são funções de variáveis tais quais a altitude, ângulo de elevação, época do ano, etc. Dentre os modelos mais citados, destacam-se os propostos

pelo Acordo de Padronização da Organização do Tratado do Atlântico Norte (STANAG), *Wide Area Augmentation System* (WAAS), *University of New Brunswick* (UNB), entre outros autores (GROVES, 2013; FARRELL, 2008; JR et al., 1996; LEANDRO; SANTOS; LANGLEY, 2006; LANDSKRON; BÖHM, 2017). Mais detalhes sobre os modelos supracitados encontram-se no Artigo I (OLIVEIRA et al., 2023) presente nesse trabalho, à exceção do modelo *Vienna Mapping Functions 3* (VMF3) / *Global Pressure and Temperature 3* (GPT3) (BÖHM; WERL; SCHUH, 2006; LANDSKRON; BÖHM, 2017), o qual, por não ser descrito em detalhes no Artigo I, é apresentado na seção 2.2.7.1.

Por fim, pode-se dizer que uma das razões para existirem tantos modelos de correção troposférica para os sinais GNSS é a dificuldade de se modelar o vapor d'água. O simples uso de medições de superfície ainda não fornece a precisão necessária para que os chamados radiômetros de vapor d'água sejam largamente empregados em aplicações GNSS. Esses instrumentos, em geral, medem a temperatura do brilho do céu via observações e assim estimam o atraso troposférico do sinal GNSS devido ao vapor d'água (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007).

### 2.2.7.1 VMF3/GPT3:

A *Vienna Mapping Functions 3* (VMF3) consiste em uma função de mapeamento cujo objetivo é refinar sua versão precedente VMF1 (BÖHM; WERL; SCHUH, 2006). Já o *Global Pressure and Temperature 3* (GPT3) trata-se de um modelo empírico para o atraso troposférico, em escala global, o qual se baseia nos mesmos dados da VMF3. Seus principais componentes são os coeficientes hidrostático e úmido da função de mapeamento empírica derivados de técnicas especiais de média dos respectivos dados VMF3. Além disso, o GPT3 também contém um conjunto de grandezas meteorológicas que são adotadas de seu antecessor, GPT2 (BÖHM et al., 2012). Dessa forma, a função GPT3 representa um modelo de troposfera abrangente que pode ser usado para fins geodésicos, meteorológicos e climatológicos e é totalmente consistente com o VMF3 (LANDSKRON; BÖHM, 2017).

No modelo VMF3/GPT3, o atraso troposférico total  $\delta\hat{\rho}_T$  que as ondas de rádio experimentam quando viajam pela troposfera, é modelado como:

$$\delta\hat{\rho}_T = mf_d(\theta_{nu}^{as})\delta\hat{\rho}_{TZd} + mf_w(\theta_{nu}^{as})\delta\hat{\rho}_{TZw}. \quad (2.33)$$

Conforme já apresentado, a modelagem do atraso troposférico é dividida em uma parte hidrostática, que é causada principalmente pelos gases secos na atmosfera, e uma parte úmida que surge do vapor d'água e partículas de água na atmosfera, cada qual representada pela multiplicação do respectivo atraso na direção do zênite com uma função de mapeamento. Nessa relação,  $\delta\hat{\rho}_{TZd}$  e  $mf_d$  são respectivamente o atraso zenital e a função de mapeamento referente à parte seca e  $\delta\hat{\rho}_{TZw}$  e  $mf_w$  são respectivamente o atraso zenital e a função de mapeamento referente à parte úmida. As modelagens dos respectivos atrasos zenitais seco (DAVIS et al., 1985) e úmido (ASKNE; NORDIUS, 1987) são dadas por:

$$\delta\hat{\rho}_{TZd} = \frac{0,0022768p}{1 - 0,00266 \cos(2L_a) - 0,28 \times 10^{-6}h_a}. \quad (2.34)$$

$$\delta\hat{\rho}_{TZw} = 10^{-6} \left( k'_2 \frac{k_3}{T_m} \right) \frac{eR_d}{g_m(\lambda + 1)}. \quad (2.35)$$

onde  $p$  é a pressão ambiente,  $h_a$  a altitude do receptor,  $e$  é a pressão de vapor de água,  $k'_2$  e  $k_3$  são constante de refratividade empíricas,  $T_m$  é a temperatura média ponderada pela pressão de vapor de água,  $R_d$  é a constante universal dos gases (287,054 J/(Kg.K)),  $g_m$  é a gravidade média no Equador (9.80665 m/s<sup>2</sup>), e  $\lambda$  é a taxa de variação do vapor de água (LANDSKRON; BÖHM, 2017).

As funções de mapeamento modernas desenvolvidas até agora são construídas com base em três coeficientes empíricos  $a$ ,  $b$  e  $c$  da seguinte forma:

$$mf(\theta_{nu}^{as}) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\frac{1+c}{\text{sen}(\theta_{nu}^{as}) + \frac{a}{\text{sen}(\theta_{nu}^{as}) \frac{b}{\text{sen}(\theta_{nu}^{as}) + c}}}}, \quad (2.36)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  dependem de integrais de refratividade através da atmosfera, ou seja, as funções de mapeamento podem ser consideradas como uma medida da espessura da atmosfera neutra. Os cálculos detalhados referentes aos coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  podem ser consultados em (LANDSKRON; BÖHM, 2017).

### 2.2.8 Erro do Relógio do Receptor

Os receptores GNSS, em geral, são equipados com osciladores de quartzo, os quais possuem boa estabilidade interna e são de custo relativamente baixo. Logo, cada receptor possui sua própria escala de tempo, definida por seu oscilador interno, a qual difere ligeira e

continuamente da escala de tempo do sistema em questão (GPS, GLONASS, BeiDou ou Galileo). Alguns receptores possuem osciladores altamente estáveis, podendo também aceitar padrões externos de tempo. No entanto, estes são equipamentos de custo elevado, em geral usados em redes de alta precisão.

Na técnica de posicionamento conhecido como GNSS Relativo (RGNSS), os erros dos relógios são praticamente eliminados pela formação de observáveis duplamente diferenciadas, i.e., diferenciadas entre receptores e satélites. Tal técnica não exige, para a maioria das aplicações, padrões de tempo altamente estáveis. No entanto, um fator importante diz respeito à simultaneidade das observações no posicionamento relativo, onde para se obter resultados de alta precisão, o erro do relógio de cada receptor envolvido no posicionamento relativo deve ser conhecido ao nível microssegundo, e a diferença entre eles não deve exceder 1 milissegundo. Já no posicionamento por ponto, os erros dos relógios dos receptores são, em geral, estimados a cada época. Outra opção para não se ter que estimar os erros de relógio do receptor é formar observáveis simplesmente diferenciadas, i.e., entre cada satélite e um satélite de referência, referido como pivô (MONICO, 2008).

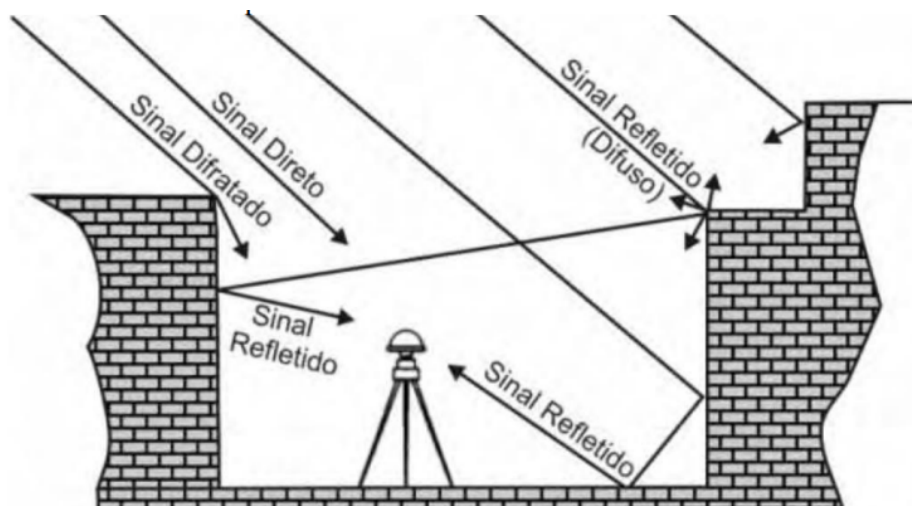
### **2.2.9 Erro de Multicaminho**

O multicaminho é um outro tipo de erro que afeta a qualidade do sinal durante sua propagação entre o satélite e a antena do receptor. Os sinais recebidos pela antena podem ser divididos em dois grupos: (a) os sinais recebidos diretamente dos satélites, e (b) aqueles que atingem primeiramente um corpo qualquer e, sofrendo uma reflexão, alcançam a antena do receptor. Esses sinais refletidos são chamados de multicaminho (PEREIRA; CAMARGO; TACHIBANA, 2016), e seus impactos devem ser caracterizados no contexto de um determinado ambiente e aplicação. Os erros de multicaminho, em termos de pseudodistância, podem atingir até 100 metros nas condições mais severas, enquanto os erros de multicaminho de fase portadora variam de milímetros a centímetros (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

O efeito provocado por multicaminhos é bem descrito pelo próprio nome: o sinal emitido pelo satélite pode chegar ao receptor, em algumas circunstâncias, por mais de um caminho, como mostrado na Figura 2.8. O multicaminho é causado principalmente por reflexões do sinal em superfícies próximas à antena do receptor, tais como construções, veículos, árvores, colinas, etc. Ele depende de vários fatores, dentre eles pode-se citar: o material do refletor, as características

da antena e do receptor GNSS, ângulo de elevação do satélite e a distância perpendicular entre a antena e o objeto refletor (SOUZA, 2008).

Figura 2.8 – Possibilidades de reflexão e difração de sinais de satélites GNSS que podem chegar à antena do receptor causando o efeito do multicaminho.



Fonte: (SOUZA, 2008)

Devido à magnitude dos erros causados pelo efeito de multicaminho, muitos estudos têm desenvolvido técnicas para minimizá-lo, a saber (LEANDRO, 2009):

- a) Planejamento das observações: Evitar refletores nas proximidades, usar a antena mais próxima do chão.
- b) Antena especial: Utilização de antenas *choke-ring* para minimizar os sinais secundários que chegam por baixo da antena, refletidos do chão.
- c) Coleta de dados por longo intervalo de tempo: A realização de observações por um longo período de tempo permite que haja mudança na geometria das reflexões secundárias, sendo possível determiná-las.
- d) Calibração da estação: Neste método, se desvincula o multicaminho por meio do movimento controlado de um robô. O robô opera perto da estação a ser calibrada, a qual está sujeita a todos os sinais com multicaminho. A estação móvel, por outro lado, elimina o multicaminho por meio de movimentos controlados. Essa técnica pode ser utilizada para caracterizar o multicaminho em um local fixo.

## 2.3 Métodos de Estimação para a Posição do Receptor GNSS

Conforme mencionado no início do Capítulo 2, para fornecer ao usuário sua posição tridimensional e o erro do relógio do receptor, é necessária a observação de, no mínimo, quatro satélites diferentes, ou seja, quatro medições distintas de pseudodistância, o que irá resultar em um sistema com quatro ou mais equações não lineares. Essas equações podem ser resolvidas empregando técnicas iterativas baseadas em linearização ou filtragem. Nesta Seção, dois métodos comumente usados para posicionamento GNSS são apresentados: o método baseado em Mínimos Quadrados Ponderados Iterados (IWLS, do inglês *Iterated Weighthed Least-Squares*) e o método baseado no Filtro de Kalman Estendido (EKF, do inglês *Extended Kalman Filter*).

### 2.3.1 Mínimos Quadrados Ponderados Iterados

A abordagem dos mínimos quadrados ponderados iterados pode ser usada para se estimar a posição do usuário e o erro do relógio do receptor, em situações onde as medições de pseudodistância provenientes dos satélites possuem diferentes incertezas, a saber:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_{ea}^{e+} \\ \hat{y}_{ea}^{e+} \\ \hat{z}_{ea}^{e+} \\ \delta \hat{\rho}_c^{a+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{ea}^{e-} \\ \hat{y}_{ea}^{e-} \\ \hat{z}_{ea}^{e-} \\ \delta \hat{\rho}_c^{a-} \end{pmatrix} + (\mathbf{H}_G^e T \mathbf{C}_\rho^{-1} \mathbf{H}_G^e)^{-1} \mathbf{H}_G^e T \mathbf{C}_\rho^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{\rho}_{a,C}^1 - \hat{\rho}_{a,C}^{1,-} \\ \tilde{\rho}_{a,C}^2 - \hat{\rho}_{a,C}^{2,-} \\ \vdots \\ \tilde{\rho}_{a,C}^m - \hat{\rho}_{a,C}^{m,-} \end{pmatrix}, \quad (2.37)$$

onde  $x_{ea}^e$ ,  $y_{ea}^e$ , e  $z_{ea}^e$  são as componentes da posição do receptor nos eixos do sistema de coordenadas ECEF,  $\mathbf{H}_G^e$  é a matriz de medição,

A  $\mathbf{H}_G^e$  é tal que:

$$\mathbf{H}_G^e = \begin{pmatrix} -u_{a1,x}^e & -u_{a1,y}^e & -u_{a1,z}^e & 1 \\ -u_{a2,x}^e & -u_{a2,y}^e & -u_{a2,z}^e & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -u_{am,x}^e & -u_{am,y}^e & -u_{am,z}^e & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.38)$$

onde seus termos são as componentes do vetor unitário  $\mathbf{u}_{as}^e$ , o qual descreve a direção a partir da qual o sinal do satélite chega à antena do usuário. Tal vetor, representado sobre os eixos do ECEF, é aproximado por:

$$\mathbf{u}_{as}^e \approx \frac{\mathbf{r}_{es}^e(t_{st,a}^s) - \mathbf{r}_{ea}^e(t_{sa,a}^s)}{|\mathbf{r}_{es}^e(t_{st,a}^s) - \mathbf{r}_{ea}^e(t_{sa,a}^s)|}. \quad (2.39)$$

Os elementos diagonais da matriz de covariância dos erros de medição,  $\mathbf{C}_\rho$ , são as variâncias previstas para cada pseudodistância, ao passo que os termos fora da diagonal levam em conta quaisquer correlações entre as mesmas. Quanto menores as variâncias das medições, maior a confiabilidade delas. Uma suposição simplificadora comumente adotada é que os componentes da matriz de covariância dos erros de medição são identicamente distribuídos e independentes, ou seja (GROVES, 2013):

$$\mathbf{C}_\rho \approx \begin{bmatrix} \sigma_{\rho 1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{\rho 2}^2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_{\rho m}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

A incerteza efetiva da medição da pseudodistância,  $\sigma_{\rho j}$ , também chamada de Erro de intervalo equivalente ao usuário (UERE, do inglês *User-Equivalent Range Error*), compreende a soma estatística das contribuições de cada uma das fontes de erro associadas à observável. A UERE varia de acordo com o ângulo de elevação do satélite, sendo que satélites com baixos ângulos de elevação apresentam maiores incertezas se comparados com satélites no zênite, pois os sinais dos primeiros percorrem uma distância maior através da ionosfera e da troposfera o que faz com que sejam corrompidos por maiores erros residuais. Logo, um modelo adequado para a UERE é:

$$\sigma_{\rho j} = \frac{\sigma_{\rho Z}}{\text{sen} \theta_{nu}^{aj}}, \quad (2.41)$$

onde  $\sigma_{\rho Z}$  é um valor empírico constante para a incerteza da pseudodistância quando o satélite está no zênite e  $\theta_{nu}^{aj}$  é o ângulo de elevação do satélite  $j$ .

A incerteza de posição do receptor GNSS, por fim, é afetada não só pela UERE, mas também pelo efeito da geometria dos satélites, a qual é quantificada pela Diluição da Precisão (DOP, do inglês *Dilution of Precision*) (FARRELL, 2008). Logo, a incerteza da solução posição/tempo determinada pelo GNSS é dada pela matriz de covariância  $\mathbf{P}$ , que é expressa como:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}_G^e \mathbf{H}_G^e)^{-1} \mathbf{C}_\rho, \quad (2.42)$$

onde  $(\mathbf{H}_G^e \mathbf{H}_G^e)^{-1}$  é a matriz que contém em sua diagonal os termos  $D_x^2$ ,  $D_y^2$ ,  $D_z^2$  e  $D_t^2$  que correspondem respectivamente às DOPs dos canais individuais de posição e de tempo.

### 2.3.2 Filtro de Kalman Estendido

Conforme expõe Groves (2013), as técnicas de estimação baseadas em filtro de Kalman consistem na utilização do conhecimento das propriedades determinísticas e estatísticas dos parâmetros e medições do sistema para fornecer estimativas ótimas a partir das informações disponíveis. Após o fornecimento de um conjunto inicial de estimativas, o algoritmo opera recursivamente, atualizando as estimativas dos estados como uma média ponderada dos seus valores anteriores e novos valores derivados dos dados de medição mais recentes. Para permitir uma ponderação ideal dos dados, um filtro de Kalman mantém um conjunto de incertezas e uma medida das correlações entre os erros nas suas estimativas. Isso é transportado de iteração para iteração junto com as estimativas dos parâmetros e as incertezas das medições devido a ruídos.

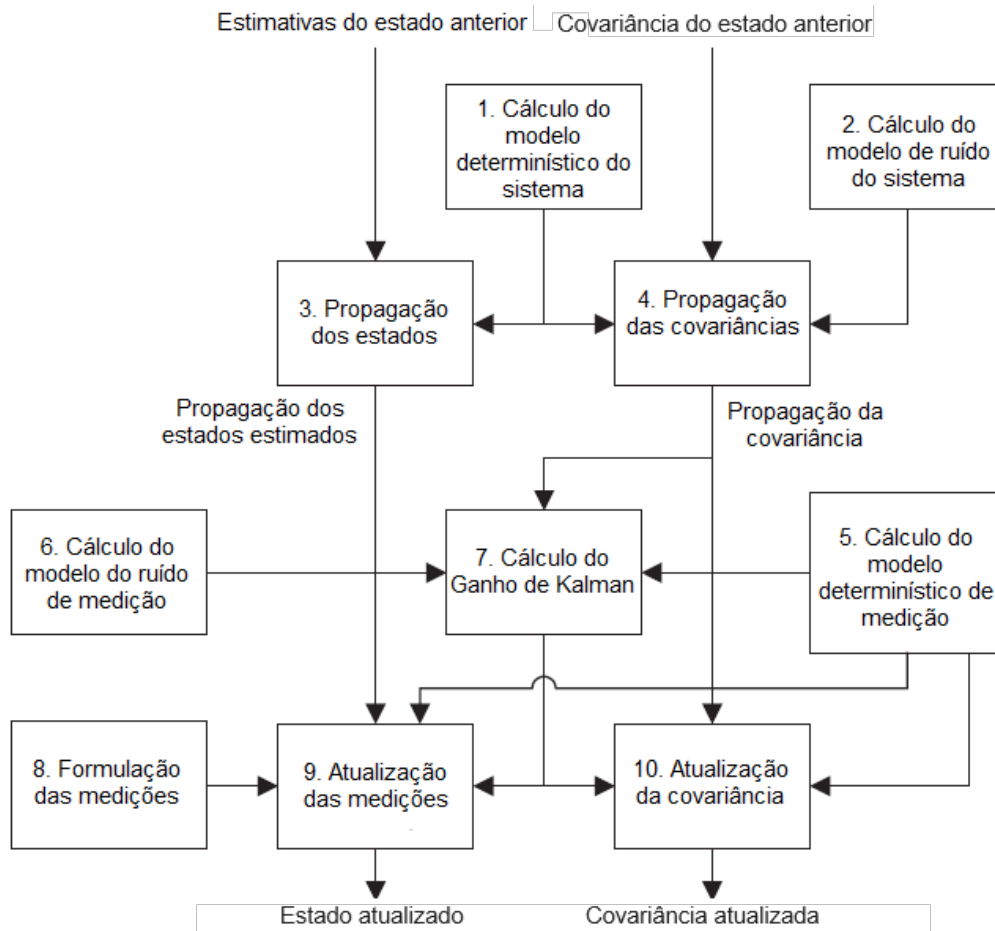
O algoritmo do filtro de Kalman consiste em 10 etapas por iteração (realizada em um determinado momento/época), as quais são divididas em duas fases, propagação e atualização. As etapas 1 a 4 formam a fase de propagação do sistema e as etapas 5 a 10 a fase de atualização de medição, como mostra a Figura 2.9.

Groves (2013) diz que o objetivo da fase de propagação do sistema é prever a estimativa do vetor de estados e a matriz de covariância dos erros dos estados desde o momento de validade do último conjunto de medições até o momento do conjunto atual de medições usando as propriedades conhecidas (determinísticas) do sistema. As duas primeiras etapas estipulam as partes determinísticas e o modelo de ruído do sistema. A terceira etapa usa informações das duas primeiras para atualizar a estimativa do vetor de estado. A quarta etapa, propagação de covariância, realiza a atualização correspondente na matriz de covariância dos erros dos estados, aumentando a incerteza para levar em conta o ruído do sistema.

Ainda segundo o mesmo autor, na fase de atualização de medição (+), a estimativa do vetor de estado e a covariância dos erros dos mesmos são atualizadas para incorporar as novas informações de medição. As etapas 5 e 6, respectivamente, calculam as partes determinísticas e o modelo de ruído de medição. A sétima etapa calcula a matriz de ganho de Kalman, enquanto a oitava formula o vetor de medição. A nona etapa atualiza as estimativas dos estados para incorporar os dados de medição ponderados com o ganho de Kalman. Finalmente, a décima etapa atualiza a matriz de covariância dos erros dos estados para levar em conta as novas informações que foram incorporadas na estimativa do vetor de estados a partir dos dados de medição.

Quando se implementa uma abordagem GNSS filtrada, o vetor de estados do filtro de Kalman consiste na solução de navegação desejada, sendo que sua definição pode variar de

Figura 2.9 – Etapas do algoritmo do filtro de Kalman.



Fonte: Adaptado de (GROVES, 2013)

acordo com a aplicação desejada. Em geral, em se tratando do posicionamento GNSS, existem oito estados básicos a serem estimados, sendo eles a posição do receptor  $\mathbf{r}_{ea}^e$ , sua velocidade  $\mathbf{v}_{ea}^e$ , o erro do relógio do receptor  $\delta\rho_c^a$  e a taxa de variação deste erro  $\delta\dot{\rho}_c^a$ . Logo, tem-se o seguinte vetor de estados:

$$\mathbf{x}^e \approx [(\mathbf{r}_{ea}^e)^T, (\mathbf{v}_{ea}^e)^T, \delta\rho_c^a, \delta\dot{\rho}_c^a]^T \in \mathbb{R}^8. \quad (2.43)$$

As principais fontes de aumento da incerteza nas estimativas dos estados estão relacionadas ao movimento do usuário, erros do tipo *random walk* na fase e frequência do relógio do receptor. A matriz de covariância dos ruídos do sistema, que representa as incertezas no modelo do sistema determinístico do filtro de Kalman, considerando pequenos intervalos de propagação, é dada por:

$$\mathbf{Q}_{k-1}^e = \begin{bmatrix} 0_{3,3} & 0_{3,3} & 0_{3,1} & 0_{3,1} \\ 0_{3,3} & \mathbf{S}_a^e \tau_s & 0_{3,1} & 0_{3,1} \\ 0_{1,3} & 0_{1,3} & S_{c\phi}^a \tau_s & 0 \\ 0_{1,3} & 0_{1,3} & 0 & S_{cf}^a \tau_s \end{bmatrix}, \quad (2.44)$$

onde  $\mathbf{S}_a^e$  é a matriz de Densidade Espectral de Potência (PSD, do inglês *Power Spectral Density*) de aceleração, a qual é composta pelos PSDs de aceleração horizontal ( $S_{aH}$ ) e vertical ( $S_{aV}$ ), conforme expresso em (2.45),  $S_{c\phi}^a$  e  $S_{cf}^a$  são os PSDs de fase e frequência do relógio, respectivamente, e  $\tau_s$  é o intervalo de propagação.

$$\mathbf{S}_a^e = (\mathbf{C}_e^n)^T \begin{pmatrix} S_{aH} & 0 & 0 \\ 0 & S_{aH} & 0 \\ 0 & 0 & S_{aV} \end{pmatrix}, \quad (2.45)$$

onde  $\mathbf{C}_e^n$  é a matriz de transformação do sistema de coordenadas ECEF para o Norte-Leste-Vertical (NED, do inglês *North-East-Down*) dada por:

$$\mathbf{C}_e^n = \begin{pmatrix} -\text{sen}L_a \cos \lambda_a & -\text{sen}L_a \text{sen} \lambda_a & \cos L_a \\ -\text{sen} \lambda_a & \cos \lambda_a & 0 \\ -\cos L_a \cos \lambda_a & -\cos L_a \text{sen} \lambda_a & -\text{sen} L_a \end{pmatrix}. \quad (2.46)$$

De acordo com Groves (2013), valores típicos para  $S_{aH}$  estão em torno de  $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  para um pedestre ou navio,  $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  para um carro e  $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  para uma aeronave militar. Valores típicos para osciladores de cristal com compensação de temperatura (um tipo comum de relógio usado em receptores GNSS) são  $S_{c\phi}^a \approx 0,04 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  e  $S_{cf}^a \approx 0,01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ .

Para a etapa de atualização (+), o vetor de medição  $\mathbf{z}_G$  compreende as observações de pseudodistâncias do GNSS. Dessa forma, considerando  $m$  satélites rastreados:

$$\mathbf{z}_G = [\tilde{\rho}_{a,C}^1, \tilde{\rho}_{a,C}^2, \dots, \tilde{\rho}_{a,C}^m]^T. \quad (2.47)$$

Como as medições de pseudodistância nos sistemas GNSS normalmente não são funções lineares dos estados, uma linearização é realizada visando tornar as inovações de medições funções lineares dos resíduos de estado. Logo o vetor de inovações de medição é definido por:

$$\delta \mathbf{z}_{G,k}^- \approx \mathbf{z}_{G,k} - h_g(\hat{\mathbf{x}}_k^-), \quad (2.48)$$

onde  $-$  denota fase de predição,  $k$  representa um instante de tempo discretizado,  $h_g$  é a estimativa não linear da pseudodistância, a qual é função dos estados preditos do vetor  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ , i.e.:

$$h_g(\hat{\mathbf{x}}_k^-) = [\hat{\rho}_{a,C}^{1-}, \hat{\rho}_{a,C}^{2-}, \dots, \hat{\rho}_{a,C}^{m-}]^T, \quad (2.49)$$

onde pseudodistância corrigida predita  $\hat{\rho}_{a,C}^{s-}$  é obtida como em (2.3).

A matriz de medição  $\mathbf{H}_G^e$ , nesse caso, é definida como:

$$\mathbf{H}_G^e \approx \begin{pmatrix} -u_{a1,x}^e & -u_{a1,y}^e & -u_{a1,z}^e & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -u_{a2,x}^e & -u_{a2,y}^e & -u_{a2,z}^e & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -u_{am,x}^e & -u_{am,y}^e & -u_{am,z}^e & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.50)$$

Já a matriz de covariância dos ruídos de medição, a qual é usada para ponderar as incertezas das pseudodistâncias, é expressa como em (2.40).

## 2.4 Métodos de Posicionamento GNSS Avançados

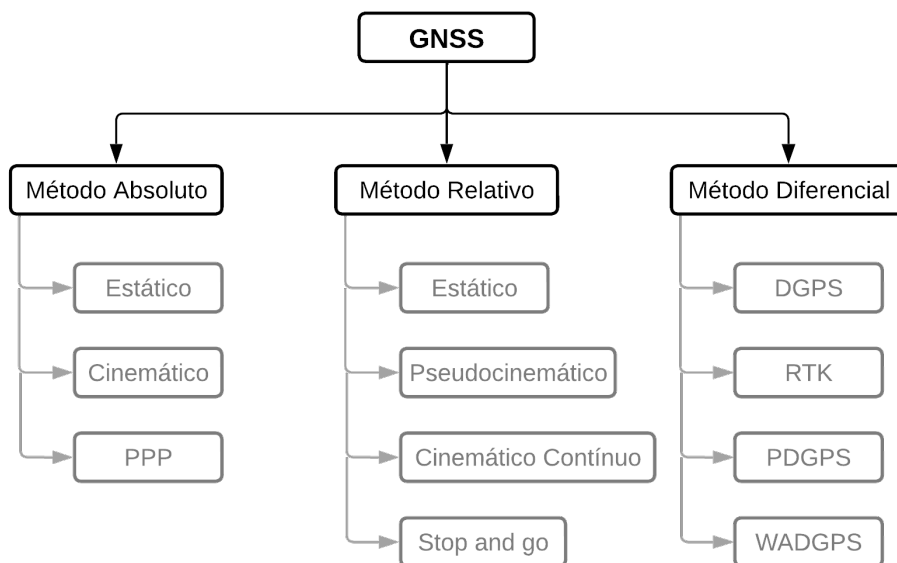
Conforme discutido em (MONICO, 2008), o posicionamento GNSS pode ser classificado em: posicionamento absoluto, se as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro da Terra; e posicionamento relativo, se as coordenadas são determinadas em relação a um referencial materializado por vértices de coordenadas conhecidas. A tecnologia GNSS permite ainda a realização de técnicas como o PP (Posicionamento por Ponto), PPP, DGNSS ou RGNSS, sendo que cada um desses métodos possuem características distintas, bem como vantagens e desvantagens (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). O organograma apresentado na Figura 2.10 mostra os diferentes métodos e técnicas de posicionamento pelo GNSS.

### 2.4.1 Posicionamento Relativo

No posicionamento relativo (RGNSS), as coordenadas do vértice de interesse são determinadas a partir de um ou mais vértices de coordenadas conhecidas (INCRA, 2013). Neste caso, é necessário que dois ou mais receptores GNSS colem dados simultaneamente, e ao menos um dos receptores ocupe um vértice de referência, como mostra a Figura 2.11.

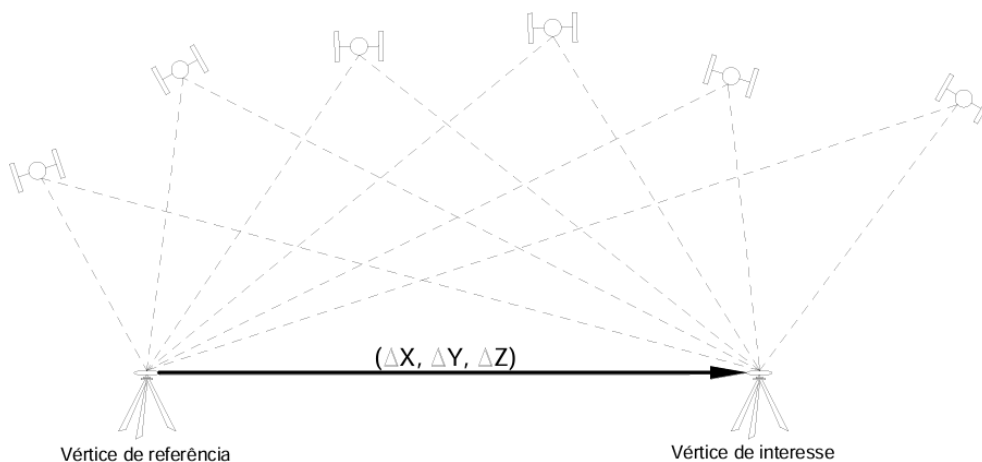
No posicionamento relativo pode-se usar fases da onda portadora, pseudodistâncias, ou as duas em conjunto. A fase da onda portadora proporciona melhor precisão e, por isso, é a

Figura 2.10 – Organograma dos métodos e técnicas de posicionamento pelo GNSS.



Fonte: Adaptada de Konzen (2022)

Figura 2.11 – Posicionamento relativo.



Fonte:(INCRA, 2013).

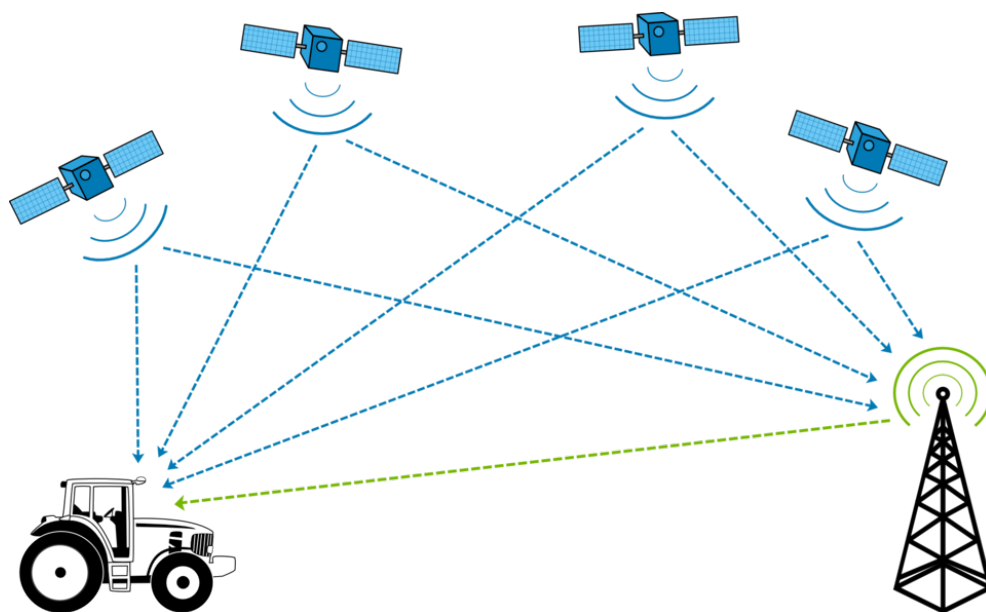
única observável aceita na determinação de coordenadas de vértices de apoio e vértices situados em limites artificiais. Já o posicionamento relativo utilizando a observável pseudodistância somente é permitido para a determinação de coordenadas de vértices situados em limites naturais (INCRA, 2013).

#### 2.4.2 Posicionamento Diferencial

O posicionamento diferencial (DGNSS) consiste na determinação de posição de uma estação móvel baseado nas correções diferenciais geradas em uma estação de referência e

enviadas à primeira em tempo real por meio de um sistema de comunicação, como exposto na Figura 2.12. As estações devem observar simultaneamente pelo menos quatro satélites, e as coordenadas precisas da estação de referência devem ser inicialmente conhecidas. Esse tipo de posicionamento permite a minimização dos erros de modo comum para linhas de base curtas.

Figura 2.12 – Exemplo de posicionamento diferencial de um trator agrícola.



Fonte:(GRATISPNG, 2022).

Para contornar a degradação da exatidão do posicionamento da estação móvel decorrente do aumento do comprimento da linha de base, tem-se como alternativa, o posicionamento diferencial em rede, que consiste em empregar diversas estações de referência de forma simultânea. Dessa forma, os erros são modelados e estimados na região de interesse, e as correções, geradas e enviadas posteriormente às estações móveis. Outro benefício da técnica supracitada está ligado ao aumento de confiabilidade e disponibilidade do serviço, já que contribuições de estações de referência que apresentam falhas podem ser eliminadas, sendo a solução gerada, dada somente pelas demais estações ativas (KRUEGER et al., 2020).

### 2.4.3 Posicionamento por Ponto Preciso

O desenvolvimento do método PPP tornou-se possível graças à disponibilização e facilidade de acesso, via internet, das correções para as órbitas e relógios dos satélites, e também de serviços de processamento que fazem com que esse método forneça soluções para diversos problemas geodésicos.

No PPP é necessário o uso de apenas um receptor e de, no mínimo, quatro satélites passíveis de serem rastreados na mesma época, já que, para se realizar o posicionamento há quatro incógnitas, três relativas às coordenadas da estação e uma relativa ao erro do relógio do receptor (FAUSTINO, 2006). Nesse método de posicionamento, as posições podem ser determinadas tanto em tempo real como de forma pós-processada, e se utiliza as observações de pseudodistância obtidas com receptores de simples ou dupla frequência junto com as efemérides precisas e correções para os relógios dos satélites produzidos por uma rede global de estações GNSS de alta qualidade, tal como o IGS, por exemplo. Geralmente, se utiliza um receptor DF, já que esses podem reduzir consideravelmente os efeitos da ionosfera a partir do uso da combinação linear IF.

#### **2.4.3.1 Posicionamento por Ponto Preciso Pós-processado**

O PP-PPP faz uso de produtos pós-processados visando corrigir erros que corrompem os sinais GNSS. Esses produtos são disponibilizados gratuitamente em redes GNSS, como o IGS, que coleta, arquiva e distribui conjuntos de dados de observação com precisão suficiente para satisfazer os objetivos de uma ampla gama de aplicações e experimentos. Esses conjuntos de dados são usados pelo IGS para gerar os produtos de dados que são disponibilizados aos usuários. Tais produtos compreendem soluções de órbitas precisas, relógio de satélites, mapas globais da ionosfera e DCBs. Os produtos disponibilizados pelo IGS apoiam a pesquisa científica em diversas iniciativas, como:

- Realização do Sistema de Coordenadas de Referência Terrestre Internacional (ITRF, do inglês *International Terrestrial Reference Frame*);
- Monitoramento da deformação da Terra sólida;
- Monitoramento da rotação da Terra;
- Monitoramento das variações da hidrosfera (nível do mar, camadas de gelo, etc.);
- Determinação científica das órbitas dos satélites;
- Monitoramento da ionosfera e troposfera terrestre;
- Transferência de tempo e frequência.

Os produtos pós-processados do IGS são separados em três grupos segundo sua qualidade, consistência e tempo de disponibilização. Os produtos ditos finais possuem a mais alta qualidade e consistência interna. Eles são disponibilizados semanalmente, todas as sextas-feiras, com um atraso de 13 dias (para o último dia da semana). Os produtos IGS finais são a base para o sistema de coordenadas de referência do IGS e destinam-se a aplicações que exigem alta consistência e qualidade. Os produtos IGS rápidos (IGR) têm uma qualidade quase comparável à dos produtos finais, sendo disponibilizados diariamente com um atraso de cerca de 17 horas após o final do dia de observação anterior; ou seja, os produtos IGR são lançados diariamente por volta das 17:00 UTC. Para grande parte das aplicações, o usuário dos produtos não notará diferença significativa entre os resultados obtidos usando os produtos IGS final e IGR.

Os produtos IGS Ultra-rápidos (IGU), por fim, estão disponíveis para uso em tempo quase-real, sendo liberados quatro vezes ao dia, às 03:00, 09:00, 15:00 e 21:00 UTC. Desta forma, a idade média das previsões é reduzida para 6 horas. Ao contrário de todos os outros produtos de órbita do IGS, os arquivos de órbita ultra-rápida contêm 48 horas de efemérides orbitais tabuladas e as épocas de início/parada mudam continuamente em 6 horas a cada atualização. Todos os outros produtos orbitais contêm estritamente as 24 horas do dia, das 00:00 às 23:45. As primeiras 24 horas de cada órbita ultra-rápida são baseadas nos dados observacionais dos GNSS mais recentes da rede de rastreamento. No momento do lançamento, as órbitas observadas têm uma latência inicial de 3 horas. As próximas 24 horas de cada arquivo são órbitas previstas, extrapoladas a partir das órbitas observadas. No arquivo de produtos ultra-rápidos, as órbitas são contínuas no limite entre as partes observadas e previstas. Normalmente, as órbitas previstas entre 3 e 9 horas na segunda metade de cada arquivo desse tipo são as mais relevantes para aplicações em tempo real (IGS, 2022).

#### **2.4.3.1.1 Correções Pós-processadas**

##### ***Efemérides***

Os centros de análise do IGS fornecem soluções de órbita dos satélites para o Sistema de informação de dados de dinâmica crustal (CDDIS, do inglês *Crustal Dynamics Data Information System*) usando horários pré-determinados, por exemplo, subdiários, diários ou semanais, a depender do produto. O coordenador do centro de análise do IGS recupera essas soluções e produz um produto combinado, que, por sua vez é arquivado no CDDIS. Essas soluções

combinadas são consideradas os produtos oficiais do IGS e estão disponíveis em três formas, ultra-rápida, rápida e final, conforme já introduzido e detalhado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Soluções de órbitas (efemérides) - IGS.

<b>Tipo</b>	<b>Precisão</b>	<b>Latência</b>	<b>Atualizações</b>	<b>Intervalo de amostragem</b>
Transmitidas	~100 cm	Tempo Real	—	diário
Ultra-Rápida (predita)	~5 cm	Tempo Real	às 03, 09, 15, 21 hr (UTC)	15 min
Ultra-Rápida (observada)	~3 cm	3 – 9 horas	às 03, 09, 15, 21 hr (UTC)	15 min
Rápida	~2,5 cm	17 – 41 horas	às 17 hr (UTC)	15 min
Final	~2,5 cm	12 – 18 dias	Toda quinta-feira	15 min

Fonte: Adaptada de IGS (2022)

Todos os arquivos de solução de órbita usam o formato *Extended Standard Product-3* (SP3c), o qual é amplamente utilizado para o fornecimento de órbitas precisas e dados de relógio de satélites GNSS. Junto com os dados de observação RINEX (do inglês *Receiver Independent Exchange Format*), as informações de órbita e relógio em formato SP3 formam a base das aplicações de PPP, podendo ser processados por todos os pacotes de *software* PPP comuns (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). Mais informações relacionadas ao formato SP3 podem ser encontradas em (IGS, 2022).

Os produtos de órbita em formato SP3, além de possuírem tamanho reduzido, garantem a consistência total das informações derivadas de velocidade e posição dos satélites, e evitam a transformação incômoda de dados de velocidade inercial para velocidade referenciada à Terra. Como seus dados são disponibilizados em intervalos de 15 minutos, várias formas de interpolação para os dados de efemérides GNSS foram propostas e estudadas na literatura, sendo que, a interpolação polinomial é, provavelmente, a mais utilizada. O método de Lagrange, por outro lado é mais adequado quando vários valores (tais como as coordenadas do vetor de posição) precisam ser interpolados temporalmente, sendo comumente recomendado para uso com produtos de órbita em formato SP3 (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

Dado um conjunto de  $n + 1$  épocas  $t_i$ , os polinômios elementares de Lagrange de ordem  $n$  são calculados como (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017):

$$l_i(t) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{(t - t_j)}{(t_i - t_j)}, \quad (2.51)$$

esses são projetados para desaparecer em todos, exceto um ponto de grade, i.e.,

$$l_i(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \text{para} \quad \begin{cases} i = j \\ i \neq j \end{cases}, \quad (2.52)$$

com esse resultado, o polinômio interpolador de ordem  $n$  pode ser convenientemente expresso como uma combinação linear,

$$\mathbf{r}_{ea}^e(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{r}_{ea,i}^e l_i(t), \quad (2.53)$$

onde  $\mathbf{r}_{ea,i}^e$  denota os valores dos vetores de posição nos pontos de grade dados. A velocidade no tempo  $t$  também pode ser obtido por meio da interpolação de Lagrange,

$$\mathbf{v}_{ea}^e(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{v}_{ea,i}^e l_i(t), \quad (2.54)$$

com base em valores conhecidos  $\mathbf{v}_{ea,i}^e$  nas épocas da grade. Alternativamente, o polinômio interpolador (2.53) pode ser diferenciado para obter a relação:

$$\mathbf{v}_{ea}^e(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{r}_{ea,i}^e l_i'(t), \quad (2.55)$$

onde

$$l_i'(t) = \sum_{k=0, k \neq i}^n \frac{1}{t - t_k} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{(t - t_j)}{t_i - t_j}, \quad (2.56)$$

denota a derivada temporal do polinômio de Lagrange de ordem  $n$ . Pode-se notar que as expressões acima também são aplicáveis para interpolação de valores não equidistantes. No entanto, um tamanho de passo constante (conforme implícito no formato SP3) simplifica o cálculo dos polinômios de Lagrange e contribui para uma distribuição uniforme dos erros de interpolação.

No espaçamento de 15 minutos, conforme adotado para a maioria dos produtos de órbita GNSS, um polinômio de nona ordem usando um número igual de pontos de grade em ambos os lados da época de interpolação oferece uma precisão de interpolação compatível com a resolução numérica dos produtos de órbita em formato SP3. No entanto, erros de interpolação maiores podem ser encontrados perto do início ou final do período das efemérides.

### *Clock*

O erro do relógio dos satélites surge devido ao efeito cumulativo do ruído do seus osciladores. Assim como ocorre no caso dos produtos de órbita, os centros de análise do IGS fornecem soluções de relógio para o CDDIS em horários pré-determinados, por exemplo, diário e semanal. O coordenador do centro de análise do IGS recupera essas soluções e produz um produto combinado, que, por sua vez, é arquivado no CDDIS. O IGS fornece resultados de relógio em dois produtos principais, os quais são atualizados, respectivamente, a cada 5 minutos e 30 segundos. Essas soluções combinadas são consideradas os produtos oficiais do IGS e são denominados produtos rápido e final como mostra a Tabela 2.7. Todos os arquivos de solução de relógio utilizam a extensão *Clock* RINEX. Mais informações relacionadas ao formato *Clock* RINEX podem ser encontradas em (IGS, 2022).

Tabela 2.7 – Soluções para o relógio dos satélites - IGS.

<b>Tipo</b>	<b>Precisão</b>	<b>Latência</b>	<b>Atualizações</b>	<b>Intervalo de amostragem</b>
Transmitidas	~5 ns RMS ~2,5 ns SDev	Tempo Real	—	diário
Ultra-Rápida (predito)	~3 ns RMS ~1,5 ns SDev	Tempo Real	às 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
Ultra-Rápida (observado)	~150 ps RMS ~50 ps SDev	3 – 9 horas	às 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
Rápida	~75 ps RMS ~25 ps SDev	17 – 41 horas	às 17 UTC do dia	5 min
Final	~75 ps RMS ~20 ps SDev	12 – 18 dias	Toda quinta-feira	30 sec

\*RMS: Valor Eficaz (*Root Mean Square*) \*\*SDev: Desvio Padrão (*Standard Deviation*)

Fonte: Adaptada de IGS (2022)

O cabeçalho do arquivo de dados de relógio dos satélites é composto de uma sequência de linhas de cabeçalho que fornecem informações auxiliares para a interpretação adequada dos dados. Os principais parâmetros fornecidos no cabeçalho compreendem um indicador do GNSS usado como referência de tempo, informações sobre o sinal ou combinação de sinais usado na determinação dos erros dos relógios para cada constelação GNSS, informações sobre a aplicação dos deslocamentos do centro de fase, variações do centro de fase e DCBs, e o tempo da estação que serve como referência para todos os erros de relógio informados. Além disso, são fornecidas listas de todas as estações e satélites usados no processo de estimativa dos erros dos relógios dos satélites. Posteriormente, são fornecidos valores de erros de relógio para cada uma dessas estações e receptores, época por época. As respectivas linhas são marcadas por um “AR” inicial (para dados de receptores) e “AS” (para dados de satélites) e contêm informações de época

explícitas. Os campos restantes especificam o número de itens de dados seguidos pelo erro do relógio e, opcionalmente, seu desvio padrão. Ambos os valores são fornecidos em unidades de segundos. Se desejado, a taxa de variação do erro do relógio, e sua derivada, bem como seu desvio padrão, também podem ser dados na continuação da linha (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

No que diz respeito à interpolação temporal dos produtos, uma interpolação de alta ordem não deve ser aplicada aos dados do relógio, os quais não são tão suavizados quanto as informações da órbita. Para os produtos de relógio dos satélites, recomenda-se uma interpolação linear ou, no máximo, cúbica (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

### ***Ionosfera***

Várias agências têm monitorado rotineiramente o VTEC usando dados GNSS. Os mapas assim concebidos estão disponíveis com diferentes latências (a saber, de minutos a dias), extensões de área (de local a global), resoluções de *grid* (em torno de 0,1 a 5 graus) e escalas de tempo (a saber, alguns minutos a horas). O monitoramento pós-processado é realizado pelo IGS que combina Mapas Ionosféricos Globais (GIMs) de diversas agências, os quais podem ser encontrados em seus servidores de Protocolos de transferência de arquivos (FTP, do inglês *File Transfer Protocol*) em arquivos de dados ASCII em formato IONEX (BERGEOT et al., 2014). Os mapas da ionosfera podem ser descritos como um conjunto de grades regulares com valores de VTEC, dados em TECU ( $10^{16} e/m^2$ ), espaçados em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Além disso, eles podem fornecer DCBs de satélite e receptor (PEREIRA; MACHADO; MARQUES, 2021).

Desde 1998, os Centros de análise (ACs, do inglês *Analysis Centers*) associados do IGS têm fornecido produtos contendo mapas de TEC e valores diários de DCBs de satélite derivados dos dados GNSS DF. Mapas diários de flutuação ionosférica também estão disponíveis. Esses produtos de ionosfera estão disponíveis em soluções rápidas, com latência inferior a 24 horas, soluções finais, com latência de aproximadamente 11 dias, e soluções previstas, disponíveis de um a dois dias antes da data desejada, todos disponibilizados em formato IONEX (IGS, 2022). Os mapas globais disponibilizados pelo IGS, em particular, fornecem valores de VTEC em uma grade com resolução espacial de  $5^\circ \times 2,5^\circ$  em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas (MATSUOKA; CAMARGO, 2007). Atualmente o IGS disponibiliza dois arquivos referentes às correções ionosféricas pós-processadas, os GIMs (YYYY/DDD/AA-

AgDDD#.YYi.Z) e o produto diário, que apresenta dados da taxa de variação do índice TEC (AAAA/DDD/rotiDDD0.AAf.Z). A Tabela 2.8 apresenta o significado das variáveis presentes nos nomes dos produtos ionosféricos fornecidos pelo IGS. Mais informações relacionadas ao formato IONEX podem ser encontradas em (IGS, 2022).

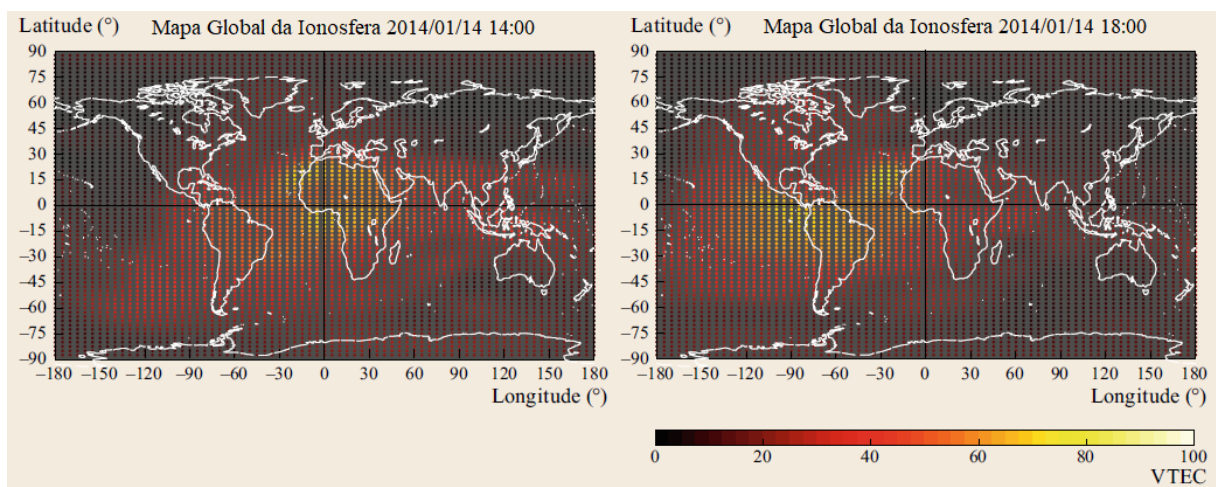
Tabela 2.8 – Arquivo IONEX - IGS.

Código	Significado
YYYY	4 dígitos - ano
DDD	3 dígitos - dia do ano
AAA	Nome do Centro de Análise
#	Número do arquivo para o dia, normalmente 0
YY	2 dígitos - ano
.Z	Arquivo compactado

Fonte: Adaptada de IGS (2022)

Os produtos GIM no formato IONEX são gerados por vários centros de análise do IGS e fornecem valores  $VTEC_{i,j,k}$  do conteúdo total de elétrons vertical em tempos discretos  $t_i$ , latitudes geocêntricas  $L_{a,j}$  e longitudes  $\lambda_{a,k}$ . A aplicação do modelo requer a interpolação desses valores para um determinado tempo  $t$  e localização ( $\lambda_a, L_a$ ) do ponto de perfuração ionosférico (ou seja, o ponto no qual o caminho do sinal intercepta a camada fina usada para representar a ionosfera), como mostra a Figura 2.13. Estes são usados em combinação com um modelo de camada única para calcular os atrasos do caminho ionosférico no processamento de observações de fase e pseudodistância (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

Figura 2.13 – Mapas globais da ionosfera do centro de análise CODE do IGS.



Fonte: Adaptada de Teunissen e Montenbruck (2017).

Para a interpolação para o local fornecido, uma interpolação do tipo bilinear é geralmente recomendada, i.e.:

$$\begin{aligned}
VTEC_i(\lambda_a, L_a) = & (1-p)(1-q)VTEC_{i,j,k} + \\
& (p)(1-q)VTEC_{i,j,k} + \\
& (1-p)(q)VTEC_{i,j,k} + \\
& (p)(q)VTEC_{i,j,k}
\end{aligned} \quad , \quad (2.57)$$

onde

$$\begin{aligned}
p &= (L_a - L_{a,j}) / (L_{a,j+1} - L_{a,j}) \\
q &= (\lambda_a - \lambda_{a,k}) / (\lambda_{a,k+1} - \lambda_{a,k})
\end{aligned} \quad (2.58)$$

é aplicado nos intervalos  $L_{a,j} \leq L_a \leq L_{a,j+1}$  e  $\lambda_{a,k} \leq \lambda_a \leq \lambda_{a,k+1}$ , limitado pelos pontos circundantes do *grid*.

Para interpolação no tempo, uma interpolação linear é geralmente suficiente:

$$\begin{aligned}
VTEC(t, \lambda_a, L_a) = & (1 - \tau)VTEC_i(\lambda_a, L_a) + \\
& \tau VTEC_{i+1}(\lambda_a, L_a)
\end{aligned} \quad , \quad (2.59)$$

com  $\tau = (t - t_i) / (t_{i+1} - t_i)$ , sendo que  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ .

Melhores resultados podem, no entanto, ser obtidos, levando em conta que a atividade ionosférica varia principalmente com o horário local e não com o UTC. Isso resulta em um aparente deslocamento para o oeste da distribuição média da densidade de elétrons a uma taxa de  $\omega_l = 15^\circ/\text{h}$ . Uma relação modificada para interpolação no tempo pode ser então descrita por (2.60), onde o segundo mapa é deslocado em longitude em relação ao primeiro para compensar a rotação da Terra entre as respectivas épocas:

$$\begin{aligned}
VTEC(t, \lambda_a, L_a) = & (1 - \tau)VTEC_i(\lambda_a, L_a) + \\
& \tau VTEC_{i+1}[\lambda_a - \omega_l(t_{i+1} - t_i), L_a]
\end{aligned} \quad . \quad (2.60)$$

### **Bias Instrumental**

Os DCBs são os erros sistemáticos entre duas observações de código GNSS na mesma frequência ou em frequências diferentes. O conhecimento adequado dos DCBs é crucial para muitas aplicações de navegação, mas também para aplicações não relacionados à navegação, como análise ionosférica e transferência de tempo. Diferente dos outros fluxos de dados, dois produtos DCBs diferentes são determinados por dois grupos de análise parceiros do IGS: o

*Institute of Geodesy and Geophysics (IGG) da Chinese Academy of Sciences (CAS) em Wuhan e o Deutsche Forschungsanstalt für Luftund Raumfahrt (DLR) na Alemanha (IGS, 2022).*

Os DCBs de satélite e estação calculados pelo CAS em Wuhan são gerados diariamente com uma latência de 2-3 dias e disponibilizados em arquivos *Bias SINEX (BSX)* diários. Já o produto do DLR é atualizado trimestralmente e compreende médias semanais dos DCBs dos satélites, sendo que um conjunto completo de DCBs diários de satélites e estações é fornecido para fins de referência e análises de tendências. Os DCBs fornecidos pelo DLR, também em formato BSX, são baseados em um novo esquema de nomenclatura, o qual é herdado da nova convenção de nomenclatura de arquivos RINEX3, sendo que a especificação completa é dada por: AA AVPPPTTT\_YYYYDDDHMM\_LEN\_SMP\_CNT.FMT[.?\*]. A Tabela 2.9 apresenta o significado dos códigos presentes na especificação completa do formato BSX.

Tabela 2.9 – Formato BSX - IGS.

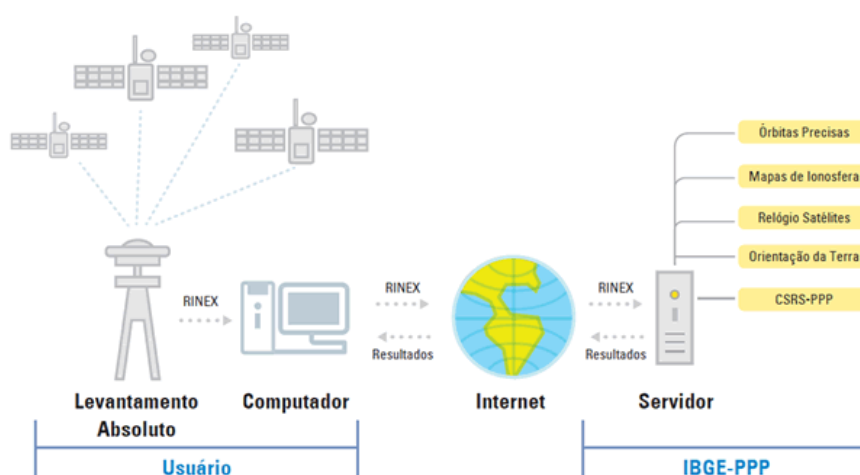
<b>Posição</b>	<b>Código</b>	
01-03	AAA	nome do AC com 3 caracteres: CAS ou DLR
04	V	identificador de versão, com 1 caractere
05-07	PPP	especificação de projeto, com 3 caracteres
08-10	TTT	especificação de tipo de produto, com 3 caracteres: RAP = rápido ou FIN = final
11	_	separador, com 1 caractere (sublinhado)
12-15	YYYY	ano da época de início, com 4 dígitos
16-18	DDD	dia do ano da época de início, com 3 dígitos
19-20	HH	hora da época de início, com 2 dígitos
21-22	MM	minuto da época de início, com 2 dígitos
23	_	separador, com 1 caractere (sublinhado)
24-26	LEN	período do produto, com 2 dígitos+1 caractere: 01D para 1 dia ou 01Y para 1 ano ??L para intervalo de cobertura em meses
27	_	separador, com 1 caractere (sublinhado)
28-30	SMP	intervalo de amostragem, com 2 dígitos+1 caractere: 01D = médias de 1 dia ou 07D = médias de 7 dias
31	_	separador, com 1 caractere (sublinhado)
32-34	CNT	tipo de conteúdo, com 3 caracteres: DCB
35	.	separador, com 1 caractere (ponto)
36-38	FMT	extensão de formato, com 3 caracteres: BSX
39 (opcional)	.	separador, com 1 caractere (sublinhado)
40-xx (opcional)	extensão	tipo de compressão do arquivo: gz

Fonte: Adaptada de IGS (2022)

### 2.4.3.2 Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real

O RT-PPP requer a disponibilização, em tempo real, de órbitas precisas e de correções para os relógios dos satélites, DCBs e atrasos ionosféricos com boa qualidade, para posicionamento com exatidão de ordem decimétrica (MOTTA; FORTES, 2017). Para o usuário GNSS, o método requer o uso de um receptor e conexão com a internet para o recebimento das correções, como mostra a Figura 2.14. Essas correções, no caso de usuários brasileiros, podem ser acessadas diretamente no servidor *caster* NTRIP disponibilizado pelo IBGE (IBGE, 2022b). O NTRIP é um protocolo de transmissão de dados GNSS pela internet, o qual é baseado em um Protocolo de Transferência de Hipertexto (HTTP, do inglês *Hypertext Transfer Protocol*) (BKG, 2022). Esses fluxos são, em geral, recebidos por *softwares* especializados, a exemplo do BKG *Ntrip Client* (BNC).

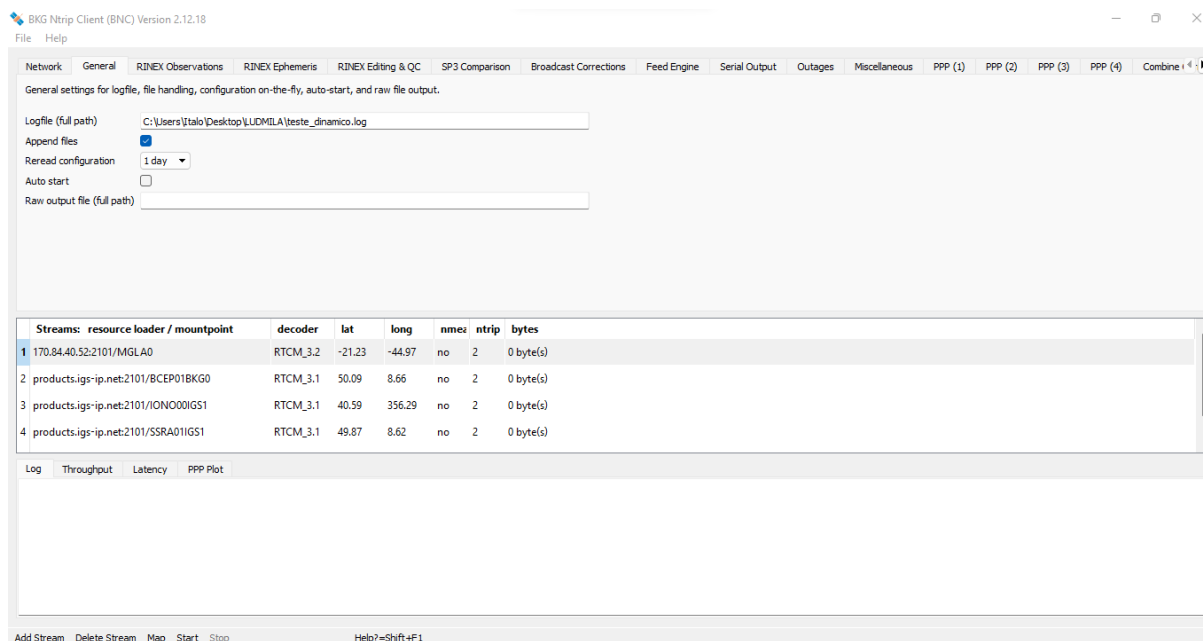
Figura 2.14 – Fases do Posicionamento por Ponto Preciso.



Fonte: (IBGE, 2022b)

O BNC é um programa criado para recuperar, decodificar, converter, processar e/ou analisar fluxos de dados GNSS, em tempo real, aplicando o protocolo NTRIP (Figura 2.15). Ele foi desenvolvido no âmbito da subcomissão do *International Association of Geodesy* (IAG) para a Europa (EUREF) e do IGS. Embora seja uma ferramenta em tempo real, ela possui algumas funcionalidades de pós-processamento (BKG, 2015).

As observações GNSS em tempo real, efemérides e correções podem ser recebidas de diversos operadores, sendo que, para se ter acesso a cada um, é necessário um tipo de cadastro em particular. As correções são disseminadas no formato RTCM-SSR que foi adotado pelo IGS e pode ser usado para PPP em tempo real. Mais informações sobre o formato SSR podem ser

Figura 2.15 – Visão geral do *software* BNC.

Fonte: Do autor.

encontradas em (IGS, 2022). Portanto, pode-se afirmar que, para fazer uso desse método de posicionamento GNSS, é necessário cumprir alguns requisitos, tais como:

- Possuir um receptor GNSS que envie suas observações no formato RTCM (2 ou 3) para um computador com um *software* de processamento PPP;
- Possuir acesso à internet para receber os fluxos de correção para as efemérides, relógios dos satélites, etc.;
- Possuir cadastro de acesso ao servidor NTRIP *caster* de interesse.

A convenção de nomenclatura para produtos em tempo real foi introduzida pelo grupo de trabalho IGS *Real-time*, de forma que os *mountpoints* possuem o padrão "TTTTXXAAAF", como mostra a Tabela 2.10. O tipo de fluxo (TTTT) pode ser: (a) SSRA, que é o fluxo de correção em espaço de estados (órbitas, relógios, etc.), com órbitas referentes ao APC; (b) SSRC, que é o fluxo de correção em espaço de estado (órbitas, relógios, etc. com órbitas referentes ao Centro de Massa (COM) da antena; (c) DCBS, que é o fluxo de correção em espaço de estado (somente DCBs); (d) IONO, que contém apenas correções ionosféricas; (e) TROP, que contém apenas correções troposféricas (ainda não disponível); e (f) BCEP, que é o fluxo de mensagens de navegação contendo as efemérides transmitidas. Vale ressaltar que SSRA e SSRC também podem conter DCBs, correções ionosféricas, troposféricas e *biases* instrumentais para a fase da onda portadora.

Tabela 2.10 – Padrão de nomenclatura para produtos em tempo real do IGS.

<b>TTTT</b>	Tipo de fluxo
<b>XX</b>	ID da solução de 2 dígitos
<b>AAA</b>	Código da agência de 3 letras
<b>F</b>	ID de formato de 1 dígito (0: RTCM3, 1: IGS-SSR, 2-9: reservado)

Fonte: Adaptada de BKG (2022)

#### 2.4.3.2.1 Correções em Tempo Real do IGS

A necessidade de padronização de um formato de dados de correção para o GNSS foi identificada há muitos anos, quando o IGS desenvolveu e analisou técnicas PPP. Por esse motivo foi criado formato SSR, o qual consiste na representação dos seguintes parâmetros básicos: erros da órbita do satélite; erros do relógio do satélite; *biases* instrumentais; atrasos e avanços da propagação ionosférica e atrasos troposféricos.

Geralmente, a cronologia contínua das mensagens pode ser usada para verificar sua consistência, mas em aplicações de tempo real, as mensagens podem ser perdidas ou atrasadas. Outro parâmetro de consistência é o *Issue of Data* (IOD) específico do GNSS, o qual é usado para fornecer consistência no cálculo da órbita SSR e correções de relógio. Existe um requisito semelhante para os outros parâmetros em espaço de estados fornecido nas demais mensagens SSR.

O Artigo II apresenta as formulações para cálculo da compensação dos erros relacionados a órbita, *clock*, ionosfera e *bias* instrumentais utilizando as mensagens de correção IGS SSR RT-PPP.

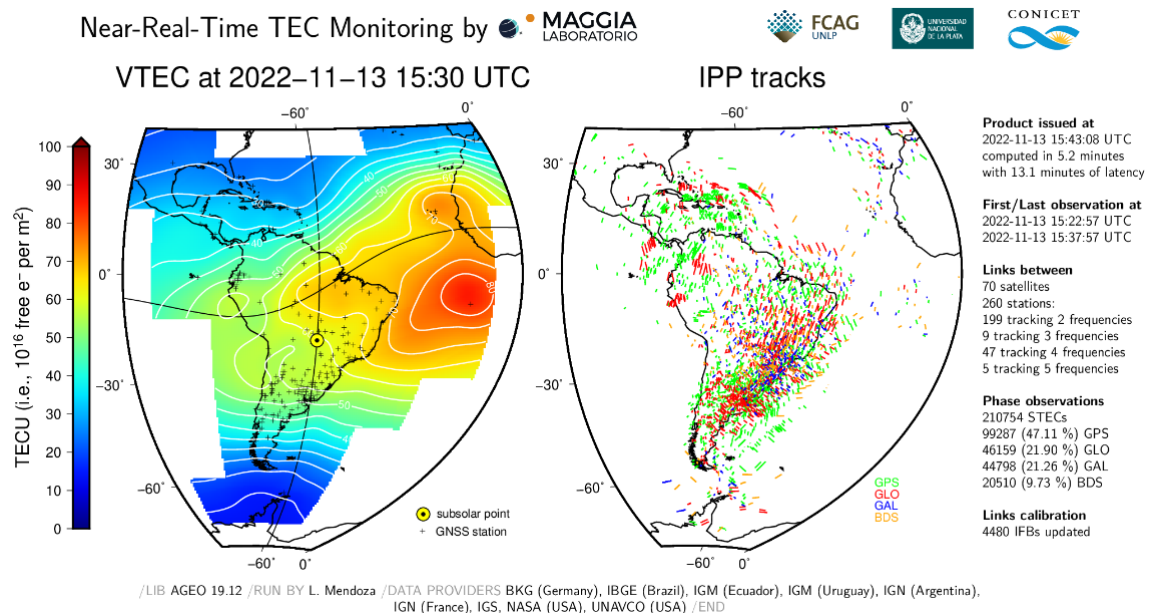
#### 2.4.3.2.2 Correção Ionosférica da UNLP

Disponível apenas para a América Latina (com extensão ao Caribe e Península Antártica), uma nova possibilidade de correção ionosférica são os Mapas Regionais da Ionosfera (RIM) em tempo quase real produzidos pelo *Laboratorio de Meteorología Espacial, Atmósfera Terrestre, Geodesia, Geodinámica, Diseño de Instrumental y Astrometría* (MAGGIA) da Universidade de La Plata (UNLP). Tais mapas estão sendo disponibilizados desde o final de 2018 e apresentam melhores resoluções espaciais e temporais, além de menor latência, em comparação ao GIM do IGS.

Em geral, os mapas TEC em tempo quase-real da UNLP estão disponíveis *online* menos de 3 minutos após a última observação GNSS ser adquirida, ou seja, cerca de 10 minutos

após a época observacional média do produto emitido. Um exemplo de mapa TEC da UNLP, disponibilizado para o dia 13 de novembro de 2022, bem como dos satélites empregados, as trajetórias dos IPPs juntamente com um resumo da análise, são mostrados na Figura 2.16. Esses mapas são atualizados a cada 15 minutos e podem ser acessados conforme orientações disponíveis em (MAGGIA, 2022). Além disso, versões legíveis e binárias dos mapas, nos formatos IONEX e NetCDF, podem ser prontamente recuperadas ([wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/magn/](http://wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/magn/)). Para isso, é necessário que o usuário se submeta a um processo de registro único e simples, para ter acesso ao produto TEC (MENDOZA; MEZA; PAZ, 2019). Na Tabela 2.11 tem-se o resumo das características do sistema de monitoramento de TEC ionosférico em tempo quase-real para a América do Sul fornecido pela UNLP.

Figura 2.16 – Monitoramento TEC em tempo quase-real fornecido pelo MAGGIA.



Fonte: (MAGGIA, 2022)

Tabela 2.11 – Resumo das características do sistema de monitoramento de TEC ionosférico em tempo quase-real para a América do Sul.

<b>Propriedade</b>	<b>Descrição</b>
Cobertura	América Central e do Sul, Caribe, Península Antártica
Modelagem	VTEC de camada única a uma altitude de 450 km
Parametrização	Função de Green para um <i>spline</i> esférico
Função de mapeamento	Modelo de camada única modificado
Satélites	GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou
Ângulo de corte	10°
Taxa de dados	15 s
Resolução espacial	0,5° × 0,5°
Taxa de amostragem	15 min
Pontualidade	< 3 min
Latência	~10 min
Formatos de arquivo de saída	IONEX and NetCDF
<i>Software</i>	AGEO <i>library</i> + GMT <i>package</i>

Fonte: Adaptada de Mendoza, Meza e Paz (2019).

### 3 CONCLUSÃO

Atualmente as informações relacionadas ao posicionamento e localização são de extrema importância no dia a dia, seja na determinação de rotas mais curtas e/ou rápidas entre dois pontos, ou ainda na determinação precisa da posição de um determinado objeto. Na Parte I desse trabalho, foram revisados os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), os quais permitem à usuários estimar sua própria posição em nível global. Foram apresentadas as características do Sistema de Posicionamento Global (GPS), que foi a constelação empregada nos testes, bem como seus segmentos, fontes de erros e os métodos de estimação para a posição do receptor. Definições sobre o Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real e seus produtos e/ou correções também foram fornecidas nessa primeira parte, sendo que foram priorizadas as disponibilizadas pelo Serviço Internacional GNSS (IGS) e pela *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas da Universidad Nacional de La Plata* na Argentina (FCAG-UNLP).

O foco principal da Parte I consistiu na elaboração de uma base teórica sólida capaz de auxiliar na avaliação: (a) da aplicabilidade e desempenho das correções RT-PPP, para a constelação GPS, associadas aos CMEs; (b) do desempenho da técnica RT-PPP em função de diferentes áreas de abrangência e cenários de teste (estáticos e dinâmicos); (c) do desempenho do RT-PPP em função de diferentes modelos empíricos de compensação troposférica; (d) do desempenho do RT-PPP em função de diferentes ângulos de máscara.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, M. A. d. **Análise da qualidade dos dados GPS: estudo de caso da estação de Canania**. 181 p. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- ALVES, I. d. S. L. Sistema gnss-rtk de baixo custo em veículos aéreos não tripulados para aplicações na agricultura. Universidade Federal de Viçosa, 2021.
- ASKNE, J.; NORDIUS, H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. **Radio science**, AGU, v. 22, n. 03, p. 379–386, 1987.
- BERGEOT, N. et al. Near real-time ionospheric monitoring over europe at the royal observatory of belgium using gnss data. **Journal of Space Weather and Space Climate**, EDP Sciences, v. 4, p. A31, 2014.
- BKG. **BKG Ntrip Client (BNC) User Manual Version 2.12.0**. Dissertação (Mestrado) — Federal Agency for Cartography and Geodesy, Frankfurt, Germany, 2015.
- BKG. **Real time GNSS**. 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <<https://igs.bkg.bund.de/ntrip/#>>.
- BÖHM, J. et al. Gpt2/gmf2: an improved empirical model for tropospheric delays. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 2012, p. G13C–05.
- BÖHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for gps and vlbi from ecmwf operational analysis data. **Journal of geophysical research**, v. 111, n. B2, p. B02406, 2006.
- CARVALHO, G. d. S. **Performance analysis of differential and relative global navigation satellite system position estimation**. 101 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2022.
- COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005., 2005.
- CONCEIÇÃO, R. S.; COSTA, V. C. **Cartografi a e geoprocessamento**. [S.l.]: Fundação Cecierj / Consórcio Cederj, 2020.
- DAVIS, J. et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. **Radio science**, Wiley Online Library, v. 20, n. 6, p. 1593–1607, 1985.
- EROL, S. et al. Performance analysis of real-time and post-mission kinematic precise point positioning in marine environments. **Geodesy and geodynamics**, Elsevier, v. 11, n. 6, p. 401–410, 2020.
- FARRELL, J. **Aided navigation: GPS with high rate sensors**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., 2008.
- FAUSTINO, R. C. **Posicionamento por ponto preciso estático e cinemático: implementação e análise**. 105 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente/SP, 2006.
- FORCE, U. A. Navstar gps space segment/navigation user interfaces. **ICD-GPS-200, IRN-200C-002, Rev. M**, 2021.

**GPS. GPS, The Global Positioning System. A global public service brought to you by the U.S. government.** 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <<https://www.gps.gov/>>.

**GRATISPNG. Sistemas de Navegação GPS Sistema de Posicionamento Global Diferencial GPS rastreamento GPS unidade - o analisador diferencial 958\*586.** 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <<https://www.gratispng.com/png-veh0fj/>>.

**GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P.; BARTONE, C. G. Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration.** 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

**GROVES, P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems.** 2. ed. [S.l.: s.n.], 2013.

**HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

**IBGE. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia Estatística.** 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <<https://atlascolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/sistema-global-de-navegac-a-o-por-sate-litess.html>>.

**IBGE. Serviços para posicionamento geodésico.** 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico.html>>.

**IGS. IGS, International GNSS Service.** 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <<https://www.igs.gov/>>.

**INCRA. Manual técnico de posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Brasília, 2013.

**JR, J. J. S. et al. Global positioning system: theory and applications, volume I.** [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.

**JR, P. S. O.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F.** Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico na qualidade do posicionamento gnss de alta acurácia. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/2, p. 303–313, 2017.

**JÚNIOR, E. F. O sistema GPS como ferramenta para a avaliação ionosférica no Brasil.** 2002. **176 p.** Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)—Departamento de Engenharia de Transportes, Escola . . . , 2002.

**JÚNIOR, P. d. T. S. et al.** Posicionamento multi-gnss. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1200–1224, dez. 2020.

**KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. Understanding GPS/GNSS: Principles and applications.** 3. ed. [S.l.]: Artech house, 2017.

**KLOBUCHAR, J. A.** Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency gps users. **IEEE Transactions on aerospace and electronic systems**, IEEE, n. 3, p. 325–331, 1987.

**KLOBUCHAR, J. A.** Ionospheric effects on gps. **Chapter 12 of Global Positioning System: Theory and Applications**, v. 1, p. 30, 1996.

KONZEN, D. M. Estudo comparativo de métodos e serviços públicos de posicionamento por gnss. Universidade Federal de Santa Maria, 2022.

KRUEGER, C. P. et al. Posicionamento gnss em tempo real: Evolução, aplicações práticas e perspectivas para o futuro. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1359–1379, 2020.

LANDSKRON, D.; BÖHM, J. Vmf3/gpt3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. **Journal of Geodesy**, Springer, v. 92, n. 4, p. 349–360, 2017.

LEANDRO, D. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LEANDRO, R.; SANTOS, M.; LANGLEY, R. Unb neutral atmosphere models: development and performance. In: **Proceedings of the 2006 national technical meeting of the institute of navigation**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 564–573.

MAGGIA. **Near Real Time TEC Monitoring by MAGGIA**. 2022. Acesso em: setembro de 2022. Disponível em: <wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/latest.png>.

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2012.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. de O. Correção ionosférica utilizando os mapas: Globais do tec do igs: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 253–270, 2007.

MENDOZA, L. P. O.; MEZA, A. M.; PAZ, J. M. A. A multi-gnss, multifrequency, and near-real-time ionospheric tec monitoring system for south america. **Space Weather**, Wiley Online Library, v. 17, n. 5, p. 654–661, 2019.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. **Agricultura de precisão**. [S.l.]: Oficina de textos, 2015.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. [S.l.]: Editora Unesp, 2008.

MOTTA, R. R. da; FORTES, L. P. S. Avaliação preliminar da técnica de ppp em tempo real usando efemérides igs. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/3, p. 463–472, 2017.

OLIVEIRA, L. A. et al. Comparative analysis between tropospheric models for GNSS positioning in brazilian territory. **DINAME 2023**, 2023.

PEREIRA, T. A.; MACHADO, W. C.; MARQUES, H. A. Assessing the quality of the near real-time regional vtec maps produced by la plata university in absolute gnss positioning over brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, SciELO Brasil, v. 27, 2021.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. de O.; TACHIBANA, V. M. Análise multivariada aplicada no estudo dos efeitos da ionosfera, troposfera e multicaminho nos sinais gnss. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/3, p. 567–580, 2016.

RADICELLA, S. M. The nequick model genesis, uses and evolution. **Annals of geophysics**, v. 52, n. 3-4, p. 417–422, 2009.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 193 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo, 2001.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2003.

SOUZA, E. M. d. **Análise de wavelets para detecção e correção do multicaminho no posicionamento relativo GNSS estático e cinemático**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008.

TEUNISSEN, P. J.; MONTENBRUCK, O. **Springer handbook of global navigation satellite systems**. [S.l.]: Springer, 2017. v. 10.

WITCHAYANGKOON, B. **Elements of GPS precise point positioning**. [S.l.]: the University of Maine, 2000.

ZERBATO, C.; CORRÊA, R. d. G.; FURLANI, C. E. A. **Agricultura de precisão : direcionamento automático de máquinas agrícolas**. [S.l.]: SENAR AR-PR, 2020.

## **Parte II**

### **Segunda Parte: Trabalhos Redigidos**

**ARTIGO I: COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN TROPOSPHERIC MODELS FOR GNSS POSITIONING IN BRAZILIAN TERRITORY**

Trabalho submetido, aprovado e apresentado no "*XIX International Symposium on Dynamic Problem of Mechanics - DINAME 2023*", em fevereiro de 2023.



## Comparative analysis between tropospheric models for GNSS positioning in Brazilian territory

Ludmila Aparecida de Oliveira<sup>1</sup>, Izadora Aparecida Ramos<sup>1</sup>, Felipe Oliveira e Silva<sup>1</sup>, Danilo Alves de Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras, Departamento de Automática.

*Abstract: Global Navigation Satellite Systems (GNSS) can be applied in several areas, such as precision agriculture, vehicular navigation, intelligent/autonomous systems and air traffic control. Despite being robust, there are many sources of error that corrupt the GNSS signals used for positioning. Evaluating, controlling and mainly eliminating such sources of errors become crucial activities for these systems to reach the level of precision required in the aforementioned applications. Among the most relevant sources of error corrupting GNSS signals, there is the delay imposed on its observables when the signal propagates through the tropospheric layer of the Earth. For real-time positioning applications, the approach traditionally used to mitigate such delays is the use of empirical models based on measurements and/or estimates of atmospheric parameters. Although several models have been proposed over the years, there are few works that present a comparative study of their performance, especially in the national territory. Therefore, this work presents as a contribution, a comparative analysis, in Brazilian territory, between eight models that aim to mitigate the propagation errors of GNSS signals through the troposphere. In order to verify the effectiveness of each of these models and to determine which one presents the best performance, experimental results are presented based on GNSS data collected from reference stations belonging to the Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC) of GNSS signals, which are evaluated for the Root Mean Square Errors (RMSE) of individual, horizontal and total positions. Among the models analyzed, one verifies that the one proposed by the University of Brunswick 3 (UNB3) is the one with the best performance.*

**Keywords:** GNSS, tropospheric models, RMSE, UNB3

### INTRODUCTION

The first Global Navigation Satellite Systems (GNSS) emerged in the 1970s, being composed of three segments: 1) space segment, characterized by satellites orbiting the Earth; 2) control segment, comprised of ground stations for monitoring and correcting satellite orbits and their internal (atomic) clocks; and 3) user segment, composed of receivers used for the most diverse functions. For Zhu et al. (2018), the integrity of GNSS is one of its most important performance parameters, which has attracted the interest of several sectors associated with transport systems, especially in urban areas. This is because GNSS-based urban applications have proven to be a large and attractive market, which is constantly growing. In addition to the urban area, important applications involving GNSS can also be found in agriculture and the aeronautical sector. The performance of these systems is generally analyzed according to the following criteria: accuracy, integrity, availability, and continuity.

Although GNSS are reliable and have good accuracy, there are several conditions that can cause the underlying signals to deteriorate and, consequently, cause the system to have its positioning performance impaired. The main sources of errors in GNSS, called “common mode errors”, are ephemeris prediction errors, satellite clock delay, ionospheric signal propagation delay, and troposphere signal propagation delay (Groves, 2013).

In order to ensure that the performance criteria of the application of interest are met, it is necessary to analyze the influence of these GNSS errors and, consequently, use correction models to mitigate them. Among the aforementioned common mode errors, the ones that better accommodate different compensation models are the errors related to the propagation of GNSS signals through the troposphere. As a point of convergence between most of the works dedicated to this subject, one notes that the investigations are restricted to regions close to where the GNSS receiver of interest is located and/or to the possible influence of the seasons on these errors.

Lima, Alves and Gouveia (2019), for example, evaluated the performance of Hopfield and Saastamoinen’s empirical tropospheric models in different regions of Brazil and for different atmospheric conditions, comparing them with models from the Numerical Weather Forecast. (PNT), the National Institute for Space Research (INPE) and the European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). As verified, the PNT/INPE model showed, on average, an improvement of 29.7% and 31.7% compared to PNT/ECMWF for dry and wet days, respectively. Chuerubim and Segantine (2016), on the other hand, selected some reference stations in different seasons and geographic locations, in order to investigate the impact of Hopfield and Saastamoinen’s empirical models on high-precision geodetic positioning. The results showed that there are no statistically significant differences in the performance of these two models, although the one proposed by Saastamoinen showed an improvement in planimetry during the summer season, while the one by Hopfield showed improvements in altimetry for the data analyzed in spring, autumn, and winter.

Although the aforementioned studies/models are relevant, several other tropospheric models have been proposed in recent years, whose performance evaluation, especially in Brazilian territory, still lacks investigation. This work, therefore, presents as its main contribution a study on the performance of eight other tropospheric models, in the mitigation of tropospheric delay signals in each of the twenty-six Brazilian states, plus the Federal District. Among the investigated models, those proposed by the Standardization Agreement of the North Atlantic Treaty Organization (STANAG), Wide Area Augmentation System (WAAS), University of New Brunswick (UNB3 and UNB3m), Hartman, Collins, Magnavox, UNB3m and VMF3/GPT3 (Groves, 2013; Parkinson et al., 1996; Farrell, 2008; Leandro, Santos and Langley, 2006; Landskron and Böhm, 2016). As a metric for a proposed comparison model, the Root Mean Square Errors (RMSE) of the position of each tested GNSS reference station is used, as processed by each tropospheric compensation model.

## GENERAL CONCEPTS

According to Monico (2008), the GNSS observables are subject to stochastic, systematic, and gross errors; therefore, in order to obtain reliable positioning results, the established mathematical model must be valid for the physical reality that is being described, and the sources of errors involved, well known. Systematic errors can be parameterized, reduced or even eliminated by appropriate techniques. Stochastic errors, on the other hand, do not present any deterministic relationship with the measurements and are, in general, subject to characterization only in terms of their statistical distributions. Table 1 shows some of the various GNSS errors, grouped by possible sources.

**Table 1 – Sources and effects of GNSS errors.**

Sources	Errors
Satélite	Orbit error
	Clock error
	Satellite antenna phase center
Signal propagation	Tropospheric refraction
	Ionospheric refraction
	Multipath
Receiver/Antenna	Clock error
	Error between channels
	Receiver antenna phase center
Season	Error in coordinates
	Earth tides
	Pole movement
	Atmospheric pressure

Adapted: Monico, 2008.

Each particular source of error can be analyzed for its effects on determining the distance between satellite and receiver. In this work, in particular, an analysis related to the error caused by the propagation delay of GNSS signals through the troposphere is presented. As explained by Farrell (2008), the troposphere is the lower part of the atmosphere, which nominally extends up to 50 km above the Earth's surface. It is essentially composed of electrically neutral particles and, for L-band signals (such as GNSS signals), it is non-dispersive. The troposphere is subject to climate-associated changes such as temperature, pressure, and humidity. As these variables affect the air mass density along the GNSS signal path and the refractive index is a function of the air mass density, they also modify the signal propagation time.

Hofmann (2008) states that one of the reasons for the existence of so many tropospheric correction models for GNSS signals is related to the difficulty of modeling water vapor. The simple use of surface measurements still does not provide the necessary precision for the so-called water vapor radiometers to be widely used in GNSS applications. These instruments, in general, measure the temperature of the sky glow via observations and thus estimate the tropospheric delay of the GNSS signal due to water vapor.

Currently, neither the GNSS control segments nor specialized institutions such as the International GNSS Service (IGS) provide real-time tropospheric delay corrections for users. Thus, it is still necessary to use mathematical models for most GNSS-based navigation applications. As a result, several authors have developed empirical models to mitigate this error, which, in general, are functions of variables such as altitude, elevation angle, time of year, etc.

### *Tropospheric error correction models*

The equations used to implement each of the tropospheric error correction models under investigation in this work are described below.

- STANAG

The NATO Standardization Agreement (STANAG) model represents tropospheric propagation delay as a function of the elevation angle ( $\theta_{nu}^{as}$ ) and the orthometric height ( $H_a$ ) of the user. The zenith delay ( $\delta\rho_{TZ}$ ) is calculated in different ways depending on the orthometric height, as follows:

$$\delta\rho_{TZ} = [2.464 - 3.248 \times 10^{-4}H_a + 2.2395 \times 10^{-8}H_a]m \quad H_a \leq 1,000m. \quad (1)$$

$$[2.284\exp(-0.1226[10^{-3}H_a - 1]) - 0.122]m \quad 1,000m \leq H_a \leq 9,000m. \quad (2)$$

$$0.7374\exp(1.2816 - 1.424 \times 10^{-4}H_a)m \quad 9,000m \leq H_a. \quad (3)$$

The estimated (hat symbol) slant troposphere delay ( $\delta\hat{\rho}_{T,a}^s$ ) for an individual signal is given by:

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = \frac{\delta\hat{\rho}_{TZ}}{\sin\theta_{nu}^{as} + \frac{0.00143}{\tan\theta_{nu}^{as} + 0.0455}} \quad (4)$$

- WAAS

In 1997, Collins and Langley proposed a hybrid neutral atmosphere model designed for Wide Area Augmentation System (WAAS) users. The WAAS model, in addition to considering the elevation angle and orthometric height, also takes into account variations in latitude ( $L_a$ ) and temperature (Groves, 2013). The troposphere propagation delay estimated by the WAAS model, as well as by the STANAG model, is given in different ways depending on the orthometric height, as follows:

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = \frac{2.506(1 + 1.25 \times 10^{-3}\delta N_S)}{\sin(\theta_{nu}^{as} + 6.11 \times 10^{-3}rad)}(1 - 1.264 \times 10^{-4}H_a)m, \quad H_a \leq 1,500m \quad (5)$$

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = \frac{2.484[1 + 1.5363 \times 10^{-3}\exp(-2.133 \times 10^{-4}H_a)\delta N_S]}{\sin(\theta_{nu}^{as} + 6.11 \times 10^{-3}rad)}\exp(-1.509 \times 10^{-4}H_a)m, \quad H_a \geq 1,500m \quad (6)$$

where, for the northern hemisphere we have:

$$\delta N_S = 3.61 \times 10^{-3}H_a\cos[2\pi(\frac{d-152}{365})] + 0.1\cos[2\pi\frac{d-213}{365}] - 0.8225|L_a| \quad (7)$$

and for the southern hemisphere:

$$\delta N_S = 3.61 \times 10^{-3}H_a\cos[2\pi(\frac{d-152}{365})] + 0.1\cos[2\pi\frac{d-30}{365}] - 0.8225|L_a| \quad (8)$$

where  $d$  is the day of the year.

- Hartman

The Hartman model, unlike the preceding models, has much simpler calculations for tropospheric delay, considering only satellite elevation data, receiver altitude, as shown in the equation below:

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = \frac{2.47}{0.121 + \sin\theta_{nu}}\exp\frac{-H_a}{7518.8} \quad (9)$$

- Collins

Very similar to Hartman's model, the tropospheric delay model proposed by Collins can be calculated as:

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = \frac{2.4225}{0.26 + \sin\theta_{nu}}\exp\frac{-H_a}{7492.8} \quad (10)$$

- Magnavox

Like Hartman and Collins' models, the tropospheric delay model proposed by Magnavox (Farrel, 2008) also has a simplified calculation, as shown in the following equation:

$$\delta\hat{p}_{T,a}^s = \frac{2.208}{\sin\theta_{nu}} \left( \exp^{\frac{-H_a}{6900}} - \exp^{\frac{-H_s}{6900}} \right) \quad (11)$$

- UNB3

In the troposphere delay model proposed by the University of New Brunswick (UNB3), the pressure,  $p$ , temperature,  $T$ , water vapor pressure,  $e$ , temperature lapse rate,  $\beta$ , and water vapor lapse rate,  $\lambda$ , are all predicted as a function of the latitude and day of the year,  $d$ , using:

$$\begin{aligned} p &= p_0(L_a) + p_\sigma(L_a)\cos[2\pi(d - d_{min})/365.25] \\ T &= T_0(L_a) + T_\sigma(L_a)\cos[2\pi(d - d_{min})/365.25] \\ e &= e_0(L_a) + e_\sigma(L_a)\cos[2\pi(d - d_{min})/365.25] \\ \beta &= \beta_0(L_a) + \beta_\sigma(L_a)\cos[2\pi(d - d_{min})/365.25] \\ \lambda &= \lambda_0(L_a) + \lambda_\sigma(L_a)\cos[2\pi(d - d_{min})/365.25] \end{aligned} \quad (12)$$

where the subscript 0 denotes the mean value, the subscript  $\sigma$  denotes the amplitude of seasonal variation, and  $d_{min}$  is 28 in the northern hemisphere and 211 in the southern hemisphere. The UNB3 model provides values for each parameter (mean values and amplitudes of seasonal variations) in pre-established latitudes as shown in Tables 2 and 3, respectively.

**Table 2 – UNB3 model: mean meteorological parameters.**

Latitude (°)	$p_0$ (bar)	$T_0$ (K)	$e_0$ (mbar)	$\beta_0$ (K/m)	$\lambda_0$
15	1,013.25	299.65	26.31	$6.30 \times 10^{-3}$	2.77
30	1,017.25	294.15	21.79	$6.05 \times 10^{-3}$	3.15
45	1,015.75	283.15	11.66	$5.58 \times 10^{-3}$	2.57
60	1,011.75	272.15	6.78	$5.39 \times 10^{-3}$	1.81
75	1,013.00	263.65	4.11	$4.53 \times 10^{-3}$	1.55

Adapted: Groves, 2013.

**Table 3 – UNB3 model: seasonal amplitudes of meteorological parameters.**

Latitude (°)	$p_0$ (bar)	$T_0$ (K)	$e_0$ (mbar)	$\beta_0$ (K/m)	$\lambda_0$
15	0.00	0.00	0.00	0.00	00
30	-3.75	7.00	8.85	$0.25 \times 10^{-3}$	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	$0.32 \times 10^{-3}$	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	$0.81 \times 10^{-3}$	0.74
75	-0.50	14.50	3.39	$0.62 \times 10^{-3}$	0.30

Adapted: Groves, 2013.

The aforementioned parameters (generically designated as  $x$  in the next equations) for the user in latitude are determined by interpolation parameter (mean values and amplitudes of seasonal variations) as follows:

$$\begin{aligned} x(L_a) &= x(15^\circ) & 180|L_a|/\pi \leq 15^\circ \\ (2 - 12|L_a|/\pi)x(15^\circ) + (12|L_a|/\pi - 1)x(30^\circ) & & 15^\circ \leq 180|L_a|/\pi \leq 30^\circ \\ (3 - 12|L_a|/\pi)x(30^\circ) + (12|L_a|/\pi - 2)x(45^\circ) & & 30^\circ \leq 180|L_a|/\pi \leq 45^\circ \\ (3 - 12|L_a|/\pi)x(45^\circ) + (12|L_a|/\pi - 3)x(60^\circ) & & 45^\circ \leq 180|L_a|/\pi \leq 60^\circ \\ (4 - 12|L_a|/\pi)x(60^\circ) + (12|L_a|/\pi - 3)x(75^\circ) & & 60^\circ \leq 180|L_a|/\pi \leq 75^\circ \\ x(75^\circ) & & 75^\circ \leq 180|L_a|/\pi \end{aligned} \quad (13)$$

The dry and wet (subscripts  $d$  and  $w$ , respectively) zenith delays are then calculated using:

$$\delta\hat{\rho}_{TZd} = \left(1 - \frac{\beta H_a}{T}\right)^{\frac{g}{R_d\beta}} \left(\frac{k_1 R_d P}{g_m}\right), \quad (14)$$

$$\delta\hat{\rho}_{TZw} = \left(1 - \frac{\beta H_a}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d\beta}} \left(\frac{k_2 R_d P e}{[g_m(\lambda+1) - \beta R_d] T}\right), \quad (15)$$

where,  $g = 9.80665 \text{ m/s}$ ,  $R_d = 287.054 \text{ J/(kgK)}$ ,  $k_1 = 7.7604105 \text{ K/mbar}$ ,  $g_m = 9.784 \text{ m}^2$  and  $k_2 = 0.382 \text{ K}^2/\text{mbar}$ .

Lastly, the slant tropospheric delay can be calculated as:

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = \frac{[\sin^3 \theta_{as}^{nu} + (b_d + c_d) \sin \theta_{as}^{nu}] (1 + a_d + b_d + c_d + a_d c_d)}{[\sin^4 \theta_{as}^{nu} + (a_d + b_d + c_d) \sin^2 \theta_{as}^{nu} + a_d c_d]} \delta\hat{\rho}_{TZd} + \frac{[\sin^3 \theta_{as}^{nu} + (b_w + c_w) \sin \theta_{as}^{nu}] (1 + a_w + b_w + c_d + a_w c_w)}{[\sin^4 \theta_{as}^{nu} + (a_w + b_w + c_w) \sin^2 \theta_{as}^{nu} + a_w c_w]} \delta\hat{\rho}_{TZw} \quad (16)$$

where

$$\begin{aligned} a_d &= 1.18972 \times 10^{-3} - 2.6855 \times 10^{-5} H_a + 1.0664 \times 10^{-4} \cos L_a \\ b_d &= 3.5716 \times 10^{-4} & c_d &= 8.2456 \times 10^{-2} \\ a_w &= 6.1120^{-4} - 3.5348 \times 10^{-5} H_a + 1.526 \times 10^{-5} \cos(L_a) \\ b_w &= 1.8576 \times 10^{-3} & c_w &= 6.2741 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (17)$$

- UNB3m

UNB3m is a neutral atmosphere-based tropospheric delay model developed by UNB. As UNB3, its algorithm is based on the prediction of meteorological parameter values for a given location, i.e., it depends on the latitude and altitude of the location, and day of the year. These parameters are used to calculate hydrostatic (dry) and non-hydrostatic (wet) zenith delays using Saastamoinen models. Slanted delays (and/or lag rates) are then determined using Niell mapping functions (or mapping function rates in the case of lag rates) (Leandro et al., 2006). UNB3m is actually a modified version of UNB3.

Then, dry and wet zenith tropospheric delays can be calculated according to:

$$\delta\hat{\rho}_{TZd} = \frac{10^{-6} k'_1 R_d}{g_m} P \left(1 - \frac{\beta H}{T}\right)^{\frac{g}{R_d\beta}}, \quad (18)$$

$$\delta\hat{\rho}_{TZw} = \frac{10^{-6} (T_m k'_2 + k_3) R_d e}{g_m \lambda' - \beta R_d} \frac{1}{T} \left(1 - \frac{\beta H}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d\beta} - 1} \quad (19)$$

where,  $k'_1$ ,  $k'_2$  and  $k_3$  are refraction constants with values of  $77.6 \text{ K mbar}^{-1}$ ,  $16.6 \text{ K mbar}^{-1}$  and  $377600 \text{ K mbar}^{-1}$  respectively, and:

$$g_m = 9.784(1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos(2L_a)) - 2.8 \times 10^{-7} \quad (20)$$

$$T_m = T \left(1 - \frac{\beta R_d}{g_m \times (\lambda + 1)}\right) \quad (21)$$

The total slant delay lastly, can be calculated according to:

$$\delta\hat{\rho}_{T,a}^s = m_d \times \delta\hat{\rho}_{TZd} + m_w \times \delta\hat{\rho}_{TZw} \quad (22)$$

where,  $m_d$  and  $m_w$  represent hydrostatic and non-hydrostatic mapping functions (Niell, 1996), which was developed to avoid UNB3's problematic relative humidity ( $RH$ ) values. Alternatively, UNB3m proposes tabulated values for the relative humidity, in replacement to UNB3's water vapor pressure estimates, as shown in Table 4.

**Table 4 – UNB3m: mean and seasonal amplitudes of relative humidity**

Latitude	Relative Humidity (%)	
	Average	Amplitude
15	75.0	0.0
30	80.0	0.0
45	76.0	-1.0
60	77.5	-2.5
75	82.5	2.5

Table 4 should replace the columns for water vapor pressure in the UNB3's Tables 2 and 3, where the final Tables 2 and 3 is then transformed into water vapor pressure. This conversion can be performed following International Earth Rotation and Reference Frame Services (IERS) conventions as follows:

$$e_0 = \frac{RH}{100} e_s f_w \quad (23)$$

where the saturation vapor pressure,  $e_s$ , can be calculated as:

$$e_s = 0.01 \exp(1.2378847 \times 10^{-5} T^2 - 1.9121316 \times 10^{-2} T + 33.93711047 - 6.343165 \times 10^3 T^{-1}) \quad (24)$$

and the enhancement factor,  $f_w$ , can be determined as follows:

$$f_w = 1.00062 + 3.14 \times 10^{-6} P + 5.6 \times 10^7 (T - 273.15)^2. \quad (25)$$

- VMF3/GPT3:

The Vienna Mapping Functions 3 (VMF3) are a new approach that aims to refine the discrete mapping function Vienna Mapping Functions 1 (VMF1) (Böhm et al., 2006). The Global Pressure and Temperature 3 (GPT3), in turn, is a new empirical model that works on a global grid, and that is usually based on the same data as VMF3. Its main components are wet and hydrostatic empirical mapping function coefficients derived from special averaging techniques of the respective VMF3 (discrete) data. In addition, GPT3 also contains a set of meteorological quantities that are adopted as-is from its predecessor, GPT2. Thus, GPT3 represents a very comprehensive troposphere model that can be used for a number of geodetic, meteorological and climatological purposes and is fully consistent with VMF3 (Landskron and Böhm, 2016).

Detailed description of VMF3/GPT3 implementation is not included in this work due to space constraints. The interested reader is invited to refer directly to (Landskron and Bohm, 2016) though.

## METHODOLOGY

In order to carry out a comprehensive analysis of the performance of the tropospheric delay models under investigation, GNSS data from receivers located in all Brazilian states plus the Federal District were selected. The observation and navigation GNSS data, in Receiver INdependent EXchange 2 (RINEX 2) format, were collected for the same day and time, from reference stations belonging to the Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC) of GNSS systems (Figure 1).

The RBMC consists of a set of geodetic stations, equipped with high performance GNSS receivers, which provide, once a day or in real time, observations for the determination of geographic coordinates. Each station has a geodesic receiver and antenna, an Internet connection and a constant supply of electrical power that enables the station's continuous operation. The coordinates of the RBMC stations are another important component in the composition of the final results of the surveys referenced to it. In this aspect, the great advantage of the RBMC is that all its stations are part of the SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas), reference network, whose final coordinates have an accuracy of the order of  $\pm 5$  mm, configuring itself as one of the most accurate networks in the world.

After collection, the data were post-processed (via GNSS positioning algorithms implemented by the authors), in a Matlab environment, in order to determine the Root Mean Square Errors (RMSE) of position in the North (N), East (E) and Down (D) axes, as well as in the horizontal and total directions. The mentioned process follows the steps as shown in the diagram in Figure 2. This approach was used for each set of data collected and the RMS values obtained were stored in order to perform the comparison between the tropospheric models.



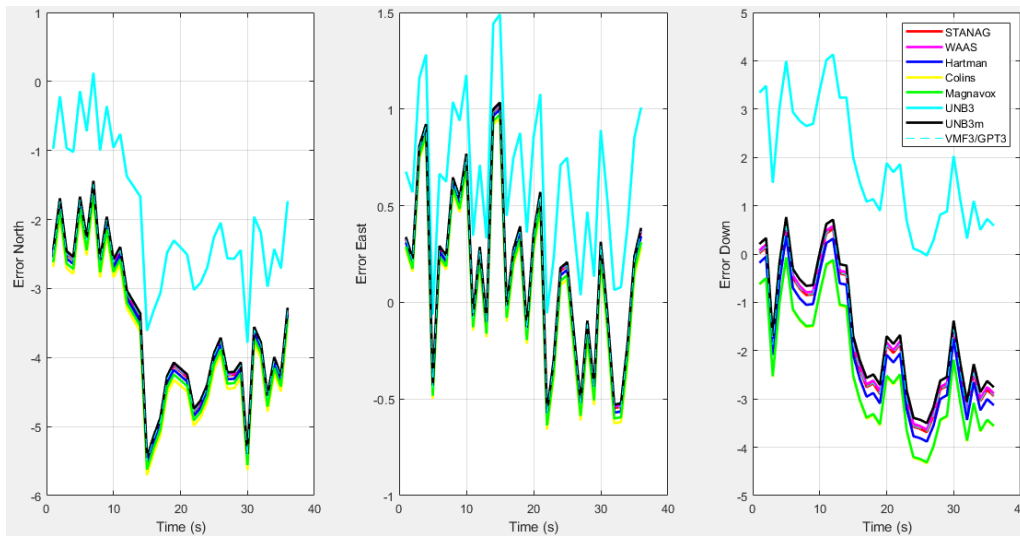


Figure 3 – Position errors for each NED axis.

Table 5 – RMSE values of position errors for the MGLA base (in meters).

MODEL	NORTH	EAST	DOWN	HORIZONTAL	TOTAL
STANAG	3,77	0,46	2,21	3,80	4,39
WAAS	3,75	0,47	2,16	3,78	4,36
Hartman	3,82	0,46	2,37	3,85	4,53
Collins	3,96	0,45	2,76	3,99	4,85
Magnavox	3,89	0,45	2,74	3,91	4,78
UNB3m	2,18	0,76	2,20	2,31	3,19
UNB3m	3,73	0,47	2,06	3,76	4,29
VMF3/GPT3	3,77	0,46	2,21	3,79	4,39

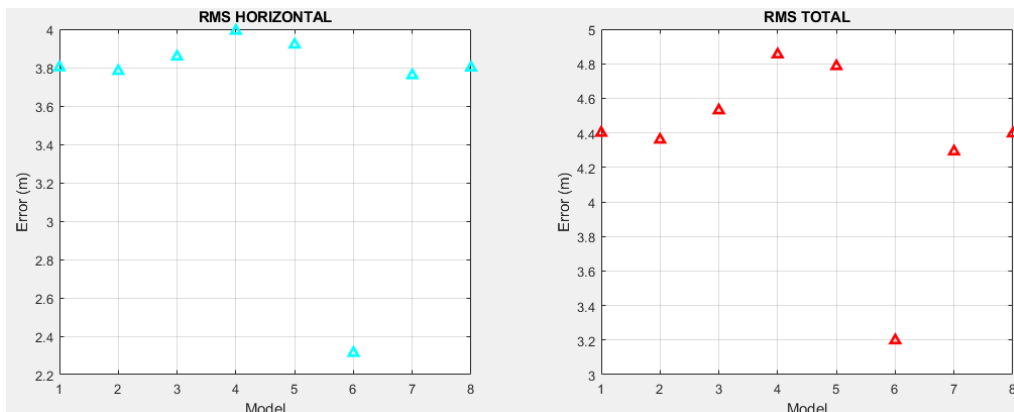


Figure 4 – Position errors for each NED axis.

UNB3 was the one that presented the best performance for most of the analyzed bases, having been followed by UNB3m and VMF3/GPT3, respectively. This can be explained by the fact that the UNB3, UNB3m and VMF3/GPT3 involve more complete calculations (in comparison to the remaining methods), being, hence, able to more accurately predict the tropospheric delays acting on GNSS signals. It is interesting to notice however, that UNB3m performed worse than UNB3, even though the former has been conceived to overcome limitations of the latter. If one consults the original work by Leandro et al. (2006), one verifies that the main drawback of UNB3 (that motivated the proposition of UNB3m) lied on the fact that UNB3 overestimates the relative humidity in locations close to the Earth poles. As Brazilian territory is far from the latter, that can explain why UNB3 performed better than UNB3m in the conducted experiments.

Table 6 – Classification of tropospheric models according to Horizontal and total position RMSE.

Base	Localization Municipality-State	Horizontal RMSE			Total RMSE		
		<i>Best Model</i>	<i>2° Best Model</i>	<i>3° Best Model</i>	<i>Best Model</i>	<i>2° Best Model</i>	<i>3° Best Model</i>
ALMA	Maceió-AL	Collins	Magnavox	Hartman	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
AMUA	Manaus-AM	UNB3	VMF3/ GPT3	UNB3m	Magnavox	Collins	Hartman
APMA	Macapá-AP	Collins	Magnavox	Hartman	Magnavox	Collins	Hartman
BELE	Belém-PA	Collins	Magnavox	Hartman	Magnavox	Hartman	Collins
BOAV	Boa Vista-RR	Collins	Magnavox	Hartman	Magnavox	Collins	Hartman
BRAZ	Brasília-DF	Collins	Magnavox	Hartman	UNB3m	VMF3/ GPT3	WAAS
CEFE	Vitória-ES	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
CEFT	Fortaleza-CE	UNB3	VMF3/ GPT3	UNB3m	UNB3	VMF3/GPT3	UNB3m
GOGY	Goiânia-GO	UNB3m	WAAS	VMF3/ GPT3	Magnavox	Collins	Hartman
MGBH	Belo Horizonte-MG	UNB3	UNB3m	WAAS	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
MSAQ	Aquidauana-MS	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
MTSC	Barão de Melgaço-MT	Collins	Magnavox	Hartman	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
ONRJ	Rio de Janeiro-RJ	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
PBJP	João Pessoa-PB	Collins	Hartman	STANAG	Magnavox	Hartman	Collins
PERC	Recife-PE	WAAS	UNB3	Magnavox	Magnavox	Hartman	Collins
PITN	Terezina-PI	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
POAL	Porto Alegre-RS	UNB3	UNB3m	WAAS	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
POVE	Porto Velho-RO	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	STANAG	WAAS	Hartman
RIOB	Rio Branco-AC	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3
RNNA	Natal-RN	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	Magnavox	Hartman	Collins
SALU	São Luiz-MA	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	UNB3m	VMF3/GPT3
SAVO	Salvador-BA	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	VMF3/ GPT3	UNB3m
SCFL	Florianópolis-SC	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	VMF3/ GPT3	UNB3m
SEAJ	Aracajú-SE	Magnavox	Collins	Hartman	Magnavox	Hartman	Collins
SPJA	Jaboticabal-SP	UNB3	UNB3m	WAAS	UNB3m	WAAS	VMF3/ GPT3
TOPL	Palmas-TO	UNB3	UNB3m	VMF3/ GPT3	UNB3	VMF3/ GPT3	UNB3m
UFPR	Curitiba-PR	UNB3	UNB3m	WAAS	UNB3	VMF3/ GPT3	WAAS

## CONCLUSION

This work investigated, in terms of position RMSE values, the performance for different empirical models of tropospheric delay compensation in GNSS signals. Among the investigated models, those proposed by STANAG, WAAS, Hartman, Collins, Magnavox, UNB3, UNB3m and VMF3/GPT3 stand out. Experimental results, carried out with GNSS

**Table 7 – Number of bases in which each of the models performed best (in terms of horizontal and total position RMSE values).**

MODELO	HORIZONTAL			TOTAL		
	<i>Best Model</i>	<i>2° Best Model</i>	<i>3° Best Model</i>	<i>Best Model</i>	<i>2° Best Model</i>	<i>3° Best Model</i>
STANAG	0	0	1	1	0	0
WAAS	1	1	4	0	2	2
Hartman	0	1	7	0	0	0
Collina	7	1	0	5	4	0
Magnavox	1	6	1	4	5	0
UNB3	17	1	0	15	0	10
UNB3m	1	15	2	2	13	2
VMF3/GPT3	0	2	12	0	3	13

data collected from stations belonging to the RBMC, and spread across each of the Brazilian states (including the Federal District) indicated the best performance of the UNB3 model for GNSS positioning purposes, followed by the UNB3m and VMF3/GPT3 models. As a possible future work, the authors intend to analyze the performance of each tropospheric model as a function of the time of day, and season of the year. Additionally, the use of the tropospheric models in the scope of Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) is also a topic worthy of investigation.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by the Research Development Foundation (FUNDEP - ROTA 2030), under grant/award number 27192.02.02/2021.01.00; in part by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), under grant/award number 313160/2019-8; in part by the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), under grant/award number 212-20/2018; and in part by the Minas Gerais Research Foundation (FAPEMIG), under grants/awards numbers APQ-01449-17 and APQ-04659-22.

The authors also thank the Graduate Program on Systems Engineering and Automation (PPGESISA) of the Federal University of Lavras (UFLA) for supporting the research.

## REFERENCES

- BOEHM, J.; BIRGI, W. and HARALD, S. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
- FARREL, J. A. *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- GROVES, P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. London: Artech House Remote Sensing Library, 2013.
- HOFMANN, W. B.; LICHTENEGGER, H. e WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer–Verlag Wien, 2008.
- HUERUBIM, M. K. and SEGANTINE, P. C. L. O IMPACTO DOS MODELOS TROPOSFÉRICOS NO POSICIONAMENTO GNSS DE ALTA PRECISÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS E ESTAÇÕES DO ANO. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, V. 8, No. 2, Ago/2016.
- LEANDRO, R.; SANTOS, M. and LANGLEY, R. B. UNB neutral atmosphere models: Development and performance. In *Proceedings of the ION NTM*, Monterey, CA, USA, 18–20 January 2006.
- LIMA, T. M. A.; ALVES, D. B. M. and GOUVEIA, T. A. F. *MODELAGEM TROPOSFÉRICA: ESTUDO E ANÁLISE DE DIFERENTES MODELOS*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Abril de 2019.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações*. São Paulo; Editora UNESP, 2008.
- NIELL, A.E. “Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, 1996.
- PARKINSON, B. W. et al. *J J. Global Positioning System: Theory and Applications*. [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- IBGE. Available in < [https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html? t = sobre](https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?t=sobre) > Access: June 2022.
- ZHU, Ni et al. GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, v. 19, n. 9, SEPTEMBER 2018.

**ARTIGO II: PERFORMANCE ANALYSIS OF CODE-BASED SINGLE-FREQUENCY  
REAL-TIME PRECISE POINT POSITIONING OVER LATIN AMERICA**

Trabalho submetido ao *Journal of Geodesy*, em janeiro de 2024.

# Performance Analysis of Code-based Single-Frequency Real-Time Precise Point Positioning over Latin America

Ludmila Aparecida de Oliveira<sup>1†</sup>, Felipe Oliveira e Silva<sup>1\*†</sup>,  
Danilo Alves de Lima<sup>1</sup>,  
Vinícius Manhães Gabriel de Brito Cavalcanti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Lavras, Department of Automatics, Trevo  
Rotatório Professor Edmir Sá Santos, Caixa Postal 3037, CEP  
37203-202, Lavras/MG, Brazil.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense,  
Diretoria de Ensino, Pesquisa e Extensão, Rua Izaura Pantoja, Nova  
Cidade, CEP 24804-162, Itaboraí/RJ, Brazil.

\*Corresponding author(s). E-mail(s): [felipe.oliveira@ufla.br](mailto:felipe.oliveira@ufla.br);

Contributing authors: [ludmila.oliveira@estudante.ufla.br](mailto:ludmila.oliveira@estudante.ufla.br);

[danilo.delima@ufla.br](mailto:danilo.delima@ufla.br); [vinicius.cavalcanti@gsuite.iff.edu.br](mailto:vinicius.cavalcanti@gsuite.iff.edu.br);

<sup>†</sup>These authors contributed equally to this work.

## Abstract

Satellite systems have become important for the development of society, whether for providing internet accessibility, positioning/location information, weather forecast, or remote sensing services. Global Navigation Satellite Systems (GNSS), in particular, are subject to errors that can significantly compromise their position solutions, amongst which stand out the so-called Common-Mode Errors (CMEs). The CMEs comprise the satellite orbit, clock and hardware bias errors, as well as ionospheric and tropospheric delays, and are relatively stable errors that affect receivers in the same vicinity almost similarly. Many techniques have been developed to mitigate the effect of CMEs, such as, Differential GNSS (DGNSS), Relative GNSS (RGNSS), and Precise Point Positioning (PPP). As technological innovations and commercial interest advance towards intelligent and connected applications, namely, smart cities, Connected Autonomous Vehicles (CAVs), Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Everything (V2X), precision agriculture, etc., new requirements start to become relevant for the latter, such

as, more accurate, low-latency, high-bandwidth, cost-effective positioning solutions with Real-Time (RT) capabilities. In this context, RT-PPP stands out as a promising technique, as it does not require the users to directly access reference stations for improving their accuracy. In Latin America, users connected to the internet currently benefit from two major RT-PPP ionospheric products, which, to the best of the author's knowledge, have not been sufficiently compared against each other yet, namely, the Global Ionospheric Models (GIMs) provided by the RT Service (RTS) of the International GNSS Service (IGS), and the regional Vertical Total Electron Content (VTEC) maps from the Faculty of Astronomical and Geophysical Sciences (FCAG) of the Argentine University of La Plata (UNLP), a.k.a., MAGN. This work, hence, builds upon previous preliminary works available in the literature, and presents a comprehensive comparative analysis between the performance of the aforementioned RT-PPP products. The focus here is on code-based Single-Frequency (SF) RT-PPP, which is of relevance for Latin American users interested in CAV applications, and that are equipped with low-cost GNSS equipment. As main contribution of this work, we show that MAGN-based RT-PPP outperforms IGS-based RT-PPP, by delivering the same levels of horizontal and total position solution accuracies, 67% and 21% more of the time, respectively. Results from extensive dynamic and static tests are presented, which are based on long (at least 12 hours) GNSS observation data collected throughout all the area currently covered by MAGN services.

**Keywords:** GNSS, RT-PPP, IGS; MAGN

## 1 Introduction

Over the years, satellite systems have become popular and essential for the structural development of modern societies, whether for providing positioning/location information of objects, meteorological data, or internet accessibility [1]. The Global Navigation Satellite Systems (GNSS) refer to the constellations of satellites that enable real-time positioning of objects and navigation on land, sea or airspace. Such systems are used in several areas, such as geodetic mapping, vehicle navigation, and precision agriculture, and their performance can be assessed w.r.t. accuracy, integrity, continuity, and availability [2].

There are currently four constellations that offer real-time positioning services on global scale: the American Global Positioning System (GPS), the Russian GLONASS, the Chinese BeiDou, and the European Galileo [3]. Moreover, there are also regional systems that provide operational services in specific regions, such as the Japanese Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) and the Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) [4, 5]. Each GNSS has its own space, control, and user segments, and allows three basic types of observables to be measured, namely, pseudoranges (codes), carrier phases, and Doppler shifts [6, 7]. These observations provide information to calculate the Earth-referenced position and velocity of receivers, as well as their clock offsets relative to the GNSS timescale.

Accurate position, in particular, can be obtained using several techniques that have different operational characteristics, such as Differential GNSS (DGNSS), Relative GNSS (RGNSS), and Precise Point Positioning (PPP) [8]. The main idea behind the latter is to compensate for errors, usually referred to as Common Mode Errors (CMEs), which have strong spatial and temporal correlation [3, 9]. Among the CMEs, one may cite the satellite ephemeris/orbit, clock, and hardware bias errors, as well as the ionospheric and tropospheric delays [10, 11]. Non-Common Mode Errors (NCMEs), in turn, are uncorrelated in time and between receivers and include the receiver clock error, multipath/non-line-of-sight error and receiver tracking noise [12].

As introduced for the first time by Anderle [13], PPP is an absolute positioning technique based on which the position of an object of interest is determined from the GNSS data received by its own antenna, e.g., dual-frequency observation data, along with accurate corrections for the orbits and clocks of the tracked satellites [14, 15]. Such corrections, frequently referred to as products, can be obtained freely from specialized agencies, such as the International GNSS Service (IGS), even though, originally, a delay of days/weeks was needed for suitably processing the latter and making them available over the internet [16]. In the last decade, several researchers have focused on static and kinematic Post-Processed PPP (PP-PPP) applications by assessing the performance of the different available products [17–22].

As it is straightforward to infer, traditional PP-PPP techniques, with multi-day latency for accurate satellite orbit and clock products, do not meet the Real-Time (RT) positioning requirements of Intelligent Transportation Systems (ITS), Connected Autonomous Vehicles (CAVs), Vehicle-to-Vehicle (V2V), and/or Vehicle-to-Everything (V2X) applications, which scientific and commercial interests have currently trending towards [23, 24]. According to Williams and Barth [23], for instance, horizontal accuracy for CAV navigation can be split up into four levels, namely: (a) none; (b) coarse, whose accuracy is of about 10 meters, at 95% of probability, i.e., sufficient to determine which segment of the road the vehicle is travelling on and its approximate location; (c) lane-level, wherein it is possible to determine which lane the vehicle is in (i.e., expected accuracy of 1 meter, at 95% of probability); and (d) where-in-lane, whose accuracy is of about 0.1 meter at 95% of probability, i.e., sufficient for collision avoidance applications. With respect to V2V applications, in turn, one may mention the requirements established by the J2945 standard of the Society of Automotive Engineering (SAE) [24], which alternatively defines maximum horizontal and vertical positioning errors of 1.5 and 3.0 meters, respectively, at 68% of probability.

Aiming at expanding PPP capabilities for RT applications, i.e., RT-PPP, in 2001, the IGS established the Real-Time Working Group (RTWG), and, in 2007, the Real-Time Pilot Project (RTPP), which now offers the Real Time Service (RTS) [25, 26]. The idea of IGS RTS is to broadcast over the internet, real-time PPP products encoded under a newly established format, namely, the State Space Representation (SSR). The proposed work plan consists of four main stages [27]:

- Stage 1: with provision of combined satellite orbit, clock and code bias messages to enable code-based RT-PPP for dual-frequency receivers;

- Stage 2: with provision of combined Vertical Total Electron Content (VTEC) ionospheric messages to enable code-based RT-PPP for single frequency receivers and satellite phase bias messages to enable phase-based RT-PPP;
- Stage 3: with provision of combined ionospheric Slant TEC (STEC) and tropospheric messages to enable PPP-Real-Time-Kinematics (RTK);
- Stage 4: with enhancements in data compression to reduce bandwidth.

Following the deployment of IGS RTS stage 1, the RT-PPP approach has been investigated in several works, either aimed at evaluating its accuracy under static and dynamic conditions, or at comparing the RT performance of combined products with that of individual ones from different Analysis Centers (ACs). In the study performed by Ouyang et al. [28], for example, the authors concluded that the RT-PPP products from the Centre National d'Études Spatiales (CNES) provided the most accurate orbit and clock estimates when compared with several ACs. On the other hand, Alcay and Turgut [29] tested the positioning performance of the RT-PPP method in terms of accuracy and repeatability on six IGS RT stations providing multi-GNSS data, and the overall results showed that the accuracy of this method is not sufficient for high accuracy geodetic applications. Li et al. [30] evaluated the SSR products from 10 IGS ACs under dynamic conditions (moving vehicle) by comparing them with the combined final products from IGS and showed that CNES and the University of Wuhan (WHU) were the ACs that provided the most complete products, with the best quality. Another example of RT-PPP study aimed at low-cost ground vehicle navigation (smartphone mounted on the dashboard of a car) was presented in [31], whose experimental results showed that such technique can achieve horizontal Root Mean Square (RMS) positioning accuracy of 1-1.5 meter, and better than 2.5 meters at the 95% of probability.

Since 2020, IGS RTS has been making available stage 2 RT-PPP products, which encompass, in addition to those from stage 1, VTEC ionospheric products in the form of Global Ionospheric Models (GIMs). Such products are particularly relevant as they allow users to employ low-cost, i.e., Single-Frequency (SF), GNSS receivers to obtain relatively high positioning accuracy. However, Barkker and Tiberius [32] argue that the performance of SF RT-PPP strongly depends on the number of available satellites, which limits the application of the technique to relatively open areas. Slightly before the provision of global-scale VTEC products by IGS, regional agencies have already made efforts towards the development of regional ionospheric maps for more accurate positioning, as it is known that the average accuracy of GIMs varies as a function of the number of regional GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORSs) employed in the product estimation, user location, among other factors [33]. One example is the USTEC service, managed by the USA National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), which provides RT VTEC maps for North American users since 2005 [34], and whose accuracy has been recently assessed by Rahman *et al.* [35]. In South America, in turn, where effects of ionospheric scintillation are recognizably high [36–39], a main effort has been led by the Faculty of Astronomical and Geophysical Sciences (FCAG) of the Argentine University of La Plata (UNLP), which has been disseminating, since 2018, free-of-cost “near” RT ionosphere products (referred to as

MAGN by the authors) for users over South America, with extension to Caribbean and Antarctic peninsula [40–42].

With respect to MAGN products, Pereira et al. [43] preliminary compared the latter with the CODE’s post-processed GIM in terms of absolute positioning performance. In their study, five stations belonging to the Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC) of GNSS were analyzed, and it was found that the performance presented by FCAG’s MAGN is slightly better than that presented by CODE’s post-processed GIM. In a more recent work, Silva et al. [44] evaluated the performance of FCAG’s MAGN and showed that the latter, when combined with orbit, clock and code bias products from IGS RTS, outperforms SF RT-PPP employing stage 2 products exclusively from IGS RTS. Despite presenting results that were based both on static and dynamic conditions, Silva et al. [44] employed relatively short datasets, and the tests were confined to a specific location in the southeast region of Brazil. Moreover, at that point, IGS RTS still did not disseminate combined RT-PPP products for code biases, so the authors resorted to individual products from the German Aerospace Center (DLR).

Given these open issues, this work aims at building upon the aforementioned literature by: (a) analyzing the positioning performance of the RT-PPP products currently available over Latin America, based on experimental tests conducted with static CORSSs, over the whole MAGN coverage area (i.e. all Latin America, with extension to Caribbean and Antarctic peninsula) and for longer data-sets (covering, at least, the average GPS orbiting period); and (b) test the performance of the code-based SF RT-PPP in moving platforms, e.g., CAVs, equipped with low-cost GNSS receiver equipment, in comparison with equivalent benchmark positioning strategies, such as code-based SF Standalone GPS (SGPS) and DGPS, and aiming at the fulfillment of the applicable positioning requirements [24, 45]. We do not use carrier phase measurements herein, as their greatest benefit is associated to the resolution of integer ambiguities, which is known to be unreliable for SF measurements [46]. As main contribution of this work, we show that MAGN-based SF RT-PPP outperforms its IGS’s RTS-only-based counterpart in terms of horizontal and total positioning, but in terms of vertical positioning accuracy, RT-PPP products exclusively from IGS-RTS leads to slightly better results. As an optimized positioning strategy for Latin American users equipped with SF GNSS receiver equipment then, one has the use of a combined MAGN and IGS RTS RT-PPP positioning strategy for the horizontal and vertical channels, respectively.

The rest of this work is organized as follows. Section 2 summarizes the code-based SF GNSS measurement model and the applicable RT-PPP correction models employed throughout the work. The methodology adopted for conducting the performance assessment of the RT-PPP products under investigation and results/discussions from the proposed experiments are presented in Section 3. Finally, Section 4 presents some concluding remarks and suggestions of future works.

## 2 Code-based SF RT-PPP

This Section introduces suitable measurement and correction models aiming at the assessment of the code-based SF RT-PPP approach/products under investigation.

### 2.1 GNSS SF Pseudorange Measurement Model

GNSS signals consist of electromagnetic waves that propagate at the speed of light, and from which it is possible to determine the position of any point on or above the Earth's surface [3, 12]. The range  $r_{as}$  between satellite  $s$  and receiver antenna  $a$  is ideally obtained by measuring the propagation time of the GNSS signal, from its transmission by the satellite to its acquisition by the receiver, multiplied by the speed of light  $c$ . As the receiver and satellite clocks are not synchronized with the official GNSS time, the measurements taken do not consist purely and simply of distances, being alternatively called pseudoranges. The raw (subscript  $R$ ) pseudorange  $\rho_{a,R}^{s,l}$  from satellite  $s$  to user antenna  $a$  for signal  $l$  can be modeled as [12, 47]:

$$\rho_{a,R}^{s,l} = r_{as} + (\delta t_{sa,a}^s - \delta t_{st,a}^s)c + \delta \rho_E^s + \delta \rho_{I,a}^{s,l} + \delta \rho_{T,a}^s + \delta \rho_{M,a}^{s,l} + (b_a^l + b^{s,l})c + \delta w_{\rho,a}^{s,l}, \quad (1)$$

where  $\delta t_{sa,a}^s$  is the receiver clock error,  $\delta t_{st,a}^s$  is the satellite clock error,  $\delta \rho_E^s$  is the ephemeris/orbit error,  $\delta \rho_{I,a}^{s,l}$  is the ionospheric error,  $\delta \rho_{T,a}^s$  is the tropospheric error,  $\delta \rho_{M,a}^{s,l}$  is the multipath error,  $b_a^l$  and  $b^{s,l}$  represent the code bias at the receiver and satellite hardwares, respectively, and  $\delta w_{\rho,a}^{s,l}$  is the code tracking noise.

Usually, for solving problems related to GNSS navigation, non-linear estimators, such as the Iterated Weighted Least Squares (IWLS) or the Extended Kalman Filter (EKF) are used to calculate the position (and velocity) of the receiver. For details, the interested reader is invited to refer to [3, 7, 9, 12].

### 2.2 RT-PPP Correction Models

Precise Point Positioning (PPP) approach, either in its Post-Processed (PP) or Real-Time (RT) variations, as well as other advanced GNSS positioning techniques, such as Differential GNSS (DGNSS) and Relative GNSS (RGNSS), aims at compensating for the Common-Mode Errors (CMEs) introduced in Section 1, which correspond to the  $\delta t_{st,a}^s$ ,  $\delta \rho_E^s$ ,  $\delta \rho_{I,a}^{s,l}$ ,  $\delta \rho_{T,a}^s$ , and  $b^{s,l}$  error terms defined in (1). The Real Time Service (RTS) of the International GNSS Service (IGS) is the main organization responsible for broadcasting free-of-cost real-time products that allow users to correct for such CMEs. The products are broadcast over the internet using the Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) using Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) messages in State Space Representation (SSR) format. So far, the sole CME for which no RT-PPP products have been broadcast is the tropospheric error (corrections for the latter are foreseen only in stage 3 of IGS Real-Time Service (RTS) deployment). Users interested in compensating for such error, therefore, still have to model them as additional states in their estimators [43, 48–50], or to resort to empirical models that take into account typical seasonal variations in atmospheric

parameters, such as temperature, pressure, and relative humidity as a function of location [11, 51–53]. For details on applicable tropospheric models and performance over Latin America, the interested reader is invited to refer to [54].

The naming convention for the RT-PPP products was introduced by the IGS Real-Time Working Group (RTWG), so that “mount points” have the pattern “TTT-TXXAAAF”, where the type of flow (TTTT) can be: (a) SSRA, which is the SSR correction flow (conveying orbits, clocks, etc.), with orbits referring to the satellite Antenna Phase Centers (APCs); (b) SSRC, which is the SSR correction stream with orbits referring to the satellite antenna Center of Mass (COM); (c) DCBS, which is the SSR correction stream conveying Differential Code Biases (DCBs) only; (d) IONO, which conveys ionospheric correction; (e) TROP, which conveys tropospheric correction; and (f) B CEP, which is the navigation data stream containing the broadcast ephemeris. It is worth noting that SSRA and SSRC may also contain DCBs, ionospheric, tropospheric, and phase bias corrections. Following the mount point pattern, XX is a two-digit solution identifier, AAA is a three-digit Analysis Center (AC) code, and F is a one-digit format identifier (1 for IGS SSR messages) [55].

### 2.2.1 IGS SSR Satellite Orbit Correction

The IGS SSR orbit correction message contains the parameters for orbit corrections  $\delta\mathbf{O}$  in radial ( $e_{radial}$ ), longitudinal ( $e_{along}$ ) e transverse ( $e_{cross}$ ) components. These orbit corrections are used to calculate a satellite position correction  $\delta\mathbf{X}$ , to be combined with the Earth-referenced satellite position  $\mathbf{X}$  calculated from the broadcast ephemeris. The corrected satellite position  $\mathbf{X}_{orb}$  is obtained as [27]:

$$\mathbf{X}_{orb} = \mathbf{X} - \delta\mathbf{X}, \quad (2)$$

The satellite position correction  $\delta\mathbf{X}$  is calculated according to:

$$\delta\mathbf{X} = [e_{radial} \quad e_{along} \quad e_{cross}] \delta\mathbf{O}, \quad (3)$$

with:

$$\begin{aligned} e_{along} &= \frac{\dot{\mathbf{X}}}{|\dot{\mathbf{X}}|}, \\ e_{cross} &= \frac{\mathbf{X} \times \dot{\mathbf{X}}}{|\mathbf{X} \times \dot{\mathbf{X}}|}, \\ e_{radial} &= e_{along} \times e_{cross}. \end{aligned}$$

where  $\dot{\mathbf{X}}$  is the Earth-referenced satellite velocity computed from the broadcast ephemeris, and  $\delta\mathbf{O}$  is the complete correction vector for the orbit, which is calculated from the individual correction terms and their rates as follows:

$$\delta\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \delta\mathbf{O}_{radial} \\ \delta\mathbf{O}_{along} \\ \delta\mathbf{O}_{cross} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta\dot{\mathbf{O}}_{radial} \\ \delta\dot{\mathbf{O}}_{along} \\ \delta\dot{\mathbf{O}}_{cross} \end{bmatrix} (t - t_0). \quad (4)$$

In (4),  $t$  is the current computation time and  $t_0$  is the GNSS reference time obtained from the SSR orbit correction message, which is broadcast to users typically every 5 seconds. After applying the IGS SSR satellite orbit correction, the ephemeris error ( $\delta\rho_E^s$ ) in (1) is to be considered negligible.

### 2.2.2 IGS SSR Satellite Clock Correction

The IGS SSR clock correction message contains the parameters to compute the clock correction  $\delta C$  to be applied to the broadcast satellite clock. The satellite transmission time corrected by the IGS SSR clock message,  $t_{sat}$ , is obtained as:

$$t_{sat} = t_{broad} + \frac{\delta C}{c}, \quad (5)$$

where  $t_{broad}$  is the satellite transmission time computed according to the GNSS Interface Control Document (ICD) from the broadcast clock parameters, identified by the GNSS Issue of Data (IOD) of the corresponding SSR clock correction message. The clock correction is formed by the following third-order polynomial:

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2, \quad (6)$$

where  $C_i$ ,  $i = 0, 1, 2$ , are the coefficients from the SSR clock correction message, which is broadcast to users typically every 5 seconds via NTRIP.

After applying the IGS SSR satellite clock corrections, the satellite clock error ( $\delta t_{st,a}^s$ ) in (1) may be considered insignificant.

### 2.2.3 IGS SSR Satellite Hardware Bias Correction

Hardware delays are caused by the difference between the paths taken by the carriers in the hardware of the GNSS equipment front-ends [3]. These delays are relatively stable over time and affect differently code and phase observables, as a function of the transmission frequencies (e.g., L1 and L2 for GPS). IGS has standardized the nomenclature of satellite hardware delays in terms of Observable-specific Signal Biases (OSB) [56], which are defined w.r.t. the ionosphere-free combination of signals that is used by each GNSS as a reference to calculate its clock solution ( $P(Y)$  signals at L1 and L2 in the case of GPS). For Single Frequency (SF) users of the Precise Positioning Service (PSS) of GNSS, the magnitude of this delay is determined during the satellite calibration process prior to launch and is known as the Timing Group Delay (TGD), whose values form part of the navigation messages broadcast by each satellite [57]. For user of the Standard Positioning Service (SPS) of GNSS, in turn, the observables have to be compensated for an additional hardware delay that is only transmitted in the newer GNSS navigation messages [12], and/or shall be obtained directly from RT-PPP services, such as IGS RTS. SPS GPS users, for instance, employing the traditional L1 Coarse Acquisition (C/A) code (that is the focus of this work), should correct for  $b^{l,s}$

in (1) by forming the following Differential Code Bias (DCB),

$$b^{s,C/A} = \frac{(OSB_{P1} - OSB_{C/A})}{c}, \quad (7)$$

where  $OSB_l$ ,  $l \in P1, C/A$  is the range-domain satellite OSBs suffered by signal  $l$  with respect to the  $P1/P2$  linear combination. These OSBs are broadcast by IGS RTS typically every 30 seconds in SSR format.

### 2.2.4 IGS SSR Ionosphere Correction

The IGS SSR ionospheric corrections consist of a Global Ionospheric Model (GIM) in the form of Vertical Total Electron Content (VTEC) information, with a temporal resolution of 20 minutes, which is combined by the Polytechnic University of Catalonia (UPC) from individual solutions provided by several real-time ionospheric Analysis Centers (ACs). The VTEC information is defined for TEC layers of infinitesimal thickness, and is encoded using spherical harmonics, in Total Electron Content Units (1 TECU =  $10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup>), as follows [27]:

$$VTEC(L_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^{\min(n,M)} [C_{nm} \cos(m\lambda_s) + S_{nm} \sin(m\lambda_s)] P_{nm} \sin L_{pp}, \quad (8)$$

where  $N$  and  $M$  are the degree and order of the spherical expansion, respectively;  $n, m$  are indices;  $C_{nm}$  and  $S_{nm}$  are the cosine and sine coefficients for the layers, also respectively (all broadcast, in SSR format, typically every 15 seconds);  $L_{pp}$  and  $\lambda_{pp}$  are the geocentric latitude and longitude of the Ionospheric Piercing Point (IPP) for the layer, respectively;  $\lambda_s$  is the mean sun-fixed and phase-shifted longitude of the IPP for the layer (modulo  $2\pi$ ); and  $P_{nm}$  is the fully normalized associated Legendre function.

The latitude  $L_{pp}$  and longitude  $\lambda_{pp}$  in (8) refer to the IPP at the altitude of the ionospheric layer, which is defined as the intersection of a straight line from the position of the receiver to the satellite and a sphere with the altitude of the ionospheric layer above the spherical Earth model [27]. The IPP latitude  $L_{pp}$ , in particular, can be calculated, in radians, as:

$$L_{pp} = \arcsin(\sin L_a \cos \psi_{pp} + \cos L_a \sin \psi_{pp} \cos A), \quad (9)$$

where  $L_a$  and  $\lambda_a$  are the geocentric latitude and longitude of the receiver, respectively;  $A$  is the azimuth of the satellite with respect to the receiver, on the spherical Earth model; and  $\psi_{pp}$  is the central angle between the position of the receiver and the projection of the IPP on the spherical surface of the Earth, which is calculated, in radians, as:

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R_e + h_r}{R_e + h_I} \cos E\right), \quad (10)$$

where  $E$  is the elevation angle of the satellite w.r.t. receiver on the spherical Earth model;  $R_e$  is the Earth's spherical radius of 6370 km; and  $h_a$  and  $h_I$  are the receiver and ionospheric layer altitudes above the spherical Earth model.

Provided the following conditions are met:

$$L_a \geq 0^\circ \quad \text{and} \quad \tan \psi_{pp} \cos A > \tan(\pi/2 - L_a),$$

or

$$L_a < 0^\circ \quad \text{and} \quad -\tan \psi_{pp} \cos A > \tan(\pi/2 + L_a),$$

the IPP longitude can be calculated, in radians, according to:

$$\lambda_{pp} = \lambda_a + \pi - \arcsin\left(\frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos L_{pp}}\right). \quad (11)$$

In all other cases, the IPP longitude is calculated, in radians, as:

$$\lambda_{pp} = \lambda_a + \arcsin\left(\frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos L_{pp}}\right). \quad (12)$$

The IPP longitude, shifted in 2 h to the maximum TEC (approximate 14:00 local time), lastly, is calculated as:

$$\lambda_s = \text{mod} \left[ \left( \lambda_{pp} + \frac{(t - 50400) \pi}{43200} \right), 2\pi \right], \quad (13)$$

where the function  $\text{mod}(\cdot, \cdot)$  returns the remainder of the division of the first term by the second.

After the VTEC values are calculated, they need to be mapped to Slant TEC (STEC) values based on the elevation of the satellites at the height of the corresponding ionospheric layer transmitted in the SSR VTEC message. This can be implemented as follows:

$$STEC = \frac{VTEC}{\sin(E + \psi_{pp})}. \quad (14)$$

The range-domain ionospheric delay  $\delta\rho_{I,a}^{s,l}$ , lastly, which is to be compensated for in (1), can be estimated as:

$$\delta\rho_{I,a}^{s,l} = \frac{40.3 \text{ STEC } 10^{16}}{f^2}. \quad (15)$$

where  $f$  is the GNSS carrier frequency.

### 2.2.5 MAGN Ionosphere Correction

To enable greater accuracy over South America, Caribbean, and the Antarctic Peninsula, the Faculty of Astronomical and Geophysical Sciences (FCAG) of the Argentine University of La Plata (UNLP) recently started to produce its own VTEC maps, based on a regional and denser network of GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORSS) [40, 41]. The ionospheric product, referred to by the authors by the

acronym MAGN, is provided with an update period of 15 minutes, in the IONosphere EXchange (IONEX) format regularly used by IGS to convey its final products [58].

MAGN is directly provided in terms of estimated  $VTEC_{j,k}$  values on an equidistant grid with 0.5 degrees of resolution, for geocentric latitude  $L_j$  and longitude  $\lambda_k$  of the IPP. Application of the single-layer, spherical Earth model, however, requires interpolation for the actual IPP position location  $(L_{pp}, \lambda_{pp})$ . As suggested in [3], a suitable interpolation technique is the bilinear one, according to which the VTEC value at the IPP coordinates is computed as:

$$VTEC(L_{pp}, \lambda_{pp}) = \frac{(1-p)(1-q)VTEC_{j,k} + (p)(1-q)VTEC_{j+1,k} + (1-p)(q)VTEC_{j,k+1} + (p)(q)VTEC_{j+1,k+1}}{(1-p)(1-q) + (p)(1-q) + (1-p)(q) + (p)(q)} \quad (16)$$

where

$$\begin{aligned} p &= \frac{L_{pp} - L_j}{L_{j+1} - L_j}, \\ q &= \frac{\lambda_{pp} - \lambda_k}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, \end{aligned} \quad (17)$$

is applied in the intervals  $L_j \leq L_{pp} \leq L_{j+1}$  and  $\lambda_k \leq \lambda_{pp} \leq \lambda_{k+1}$ , bounded by the surrounding grid points.

After VTEC is calculated, STEC and range-domain ionospheric delay computation follows the same procedure described in (14) and (15). As the deployment of MAGN ionospheric corrections is very recent, and its use is potentially important in the scope of Connected Autonomous Vehicles (CAV) applications in South America, its performance assessment (w.r.t. IGS SSR ionospheric products) for code-based SF RT-PPP users stands out as the main investigation topic of this work.

### 3 Methodology and Results

This Section presents the methodology and results of experimental tests aimed at evaluating the performance of the different RT-PPP products discussed so far. For the purpose of the experiments, only single-frequency code observation data (L1 C/A) from the Global Positioning System (GPS) have been considered, as: (a) the latter is known to be the most performing GNSS currently existing at global scale [29, 59–61]; and (b) it has already been demonstrated that multi-GNSS SF RT-PPP outperforms GPS-only SF RT-PPP only in the particular case of reduced sky visibility [32].

The results are divided into static and dynamic scenarios, and in both tests, the main idea was to compare the performance of the IGS SSR ionospheric product with that of FCAG-UNLP (MAGN). In addition to the two aforementioned ionospheric products, we also applied to the collected GPS observation data, the correction models recommended by the GPS ICD, as well as RT-PPP products from IGS RTS, aiming at compensating for the Satellite Vehicle (SV) orbits, clocks and code biases, as summarized in Table 1. As IGS RTS, in its current stage of deployment, still does not broadcast RT-PPP corrections for the tropospheric delays, in the RT-PPP tests herein performed, the latter has been mitigated via empirical models, namely the University of New Brunswick 3 (UNB3) model [51], as recommended by Oliveira *et al.* [54], for SF GNSS Latin American users.

**Table 1** RT-PPP product combinations and benchmark strategies used in the experiments.

Strategy	Ionosphere	SV Clock/Orbit/Code Bias	Troposphere
SGPS	Klobuchar	ICD	UNB3
IGS RT-PPP	IONO01IGS1	ICD + SSRA02IGS1	UNB3
MAGN RT-PPP	MAGN	ICD + SSRA02IGS1	UNB3
DGPS	Differential	Differential	Differential

For comparison purposes, the two code-based SF RT-PPP strategies under investigation have been benchmarked against: (a) the SPS code-based SF Standalone GPS (SGPS) solution, wherein the pseudorange ionospheric first-order errors were partially corrected by the use of Klobuchar’s model [62], the SV clock errors were corrected as suggested in the GPS ICD, the SV code biases were compensated uniquely for the TGD, and the tropospheric errors were mitigated via UNB3 model; and (b) the code-based SF Differential GPS (DGPS) solution, wherein all the aforementioned CMEs have been mitigated by forming Single-Differenced (SD) observables, from the GPS receiver under test and a nearby reference station (Table 1).

The performance of the tested strategies has been assessed based on the following metrics: (a) horizontal position error  $\delta p_H$ , defined in (18); (b) vertical position error  $\delta p_V$ , defined in (19); (c) the total position error  $\delta p_T$ , defined in (20); and (d) the probability of the position solution (horizontal, vertical or total) to be better than a pre-specified threshold  $\alpha$ , in meters ( $P(\leq \alpha)$ ). In this case, the employed thresholds were the ones established by the Society of Automotive Engineers (SAE) J2945 standard [24], and by Williams and Barth [45], which are relevant for Vehicle-to-Vehicle (V2V) and CAV applications, respectively.

$$\delta p_H = \sqrt{\delta p_N^2 + \delta p_E^2} \quad (18)$$

$$\delta p_V = \sqrt{\delta p_D^2} \quad (19)$$

$$\delta p_T = \sqrt{\delta p_N^2 + \delta p_E^2 + \delta p_D^2} \quad (20)$$

where  $\delta p_N$ ,  $\delta p_E$ , and  $\delta p_D$ , represent the position error in the North, East, and Down (NED) directions, respectively.

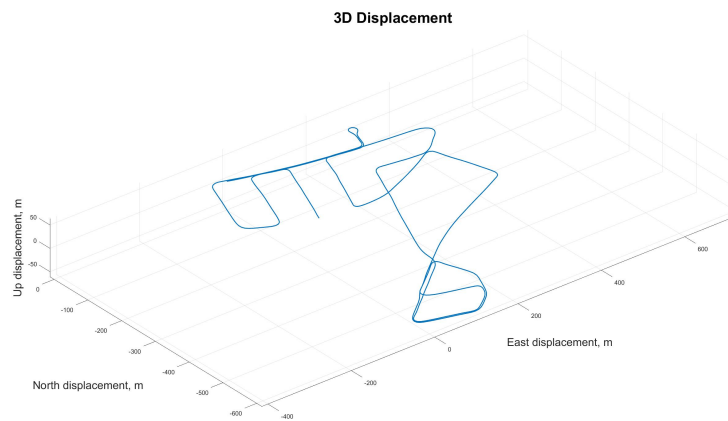
### 3.1 Dynamic Test

The dynamic test consisted of collecting L1 C/A GPS observation data from a u-blox C102-F9R receiver and a ANN-MB-01 antenna attached to a car on July 21, 2023, in Lavras-MG, Brazil (Fig. 1). The car was driven for a couple of minutes through the streets of a neighborhood close to the Federal University of Lavras (UFLA), executing all types of motion that are typical for urban scenarios, such as curves, accelerations, decelerations, climbs, descents, stops, etc. (Fig. 2). Along with the observation data, the BKG NTRIP Client (BNC) software was used to collect the SSR RT-PPP products from the IGS RTS, namely: (a) SSRA02IGS1, which is an IGS Kalman filter



**Fig. 1** Car used in the dynamic test.

combined solution that conveys satellite orbit, clock and hardware bias corrections; and (b) IONO01IGS1, which is a real-time VTEC GIM. The FCAG-UNLP RT VTEC products, i.e., MAGN, were collected directly from its File Transfer Protocol (FTP) server in the IONEX format [42]. For the purpose of deploying the comparative DGPS strategy, as well as a reliable ground-truth solution, the GPS observation data and



**Fig. 2** Ground-truth three-dimensional trajectory of the car in the dynamic test.



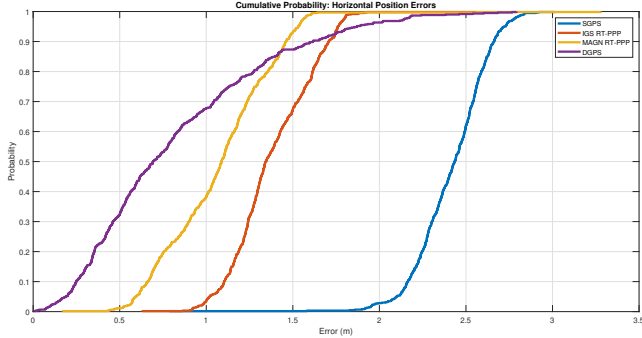


Fig. 4 Cumulative distribution of the horizontal position errors in the dynamic test.

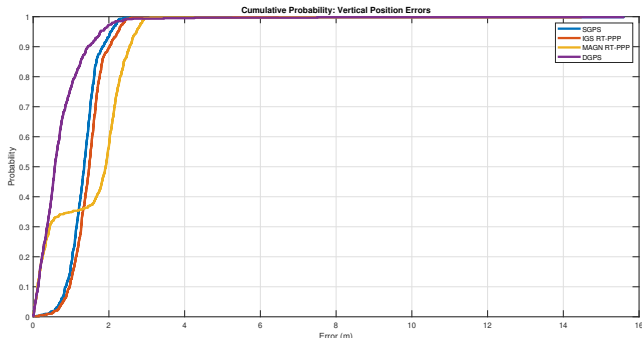


Fig. 5 Cumulative distribution of the vertical position errors in the dynamic test.

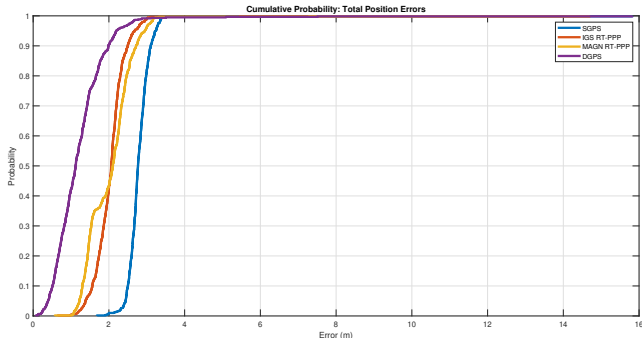


Fig. 6 Cumulative distribution of the total position errors in the dynamic test.

**Table 2** Horizontal position error statistics for the dynamic test

	SGPS	IGS RT-PPP	MAGN RT-PPP	DGPS
Mean (m)	2.41	1.39	1.07	<b>0.83</b>
STD (m)	<b>0.21</b>	0.23	0.31	0.54
$P(\leq 0.5 \text{ m})$	0.00	0.00	0.01	<b>0.32</b>
$P(\leq 1.0 \text{ m})$	0.00	0.04	0.38	<b>0.68</b>
$P(\leq 1.5 \text{ m})$	0.00	0.67	<b>0.93</b>	0.87

**Table 3** Vertical position error statistics for the dynamic test

	SGPS	IGS RT-PPP	MAGN RT-PPP	DGPS
Mean (m)	1.37	1.49	1.51	<b>0.74</b>
STD (m)	0.71	<b>0.69</b>	1.11	0.86
$P(\leq 1.0 \text{ m})$	0.18	0.12	0.35	<b>0.76</b>
$P(\leq 2.0 \text{ m})$	0.93	0.90	0.57	<b>0.97</b>
$P(\leq 3.0 \text{ m})$	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>

**Table 4** Total position error statistics for the dynamic test

	SGPS	IGS RT-PPP	MAGN RT-PPP	DGPS
Mean (m)	2.81	2.06	2.04	<b>1.22</b>
STD (m)	<b>0.60</b>	0.65	0.78	0.88
$P(\leq 1.0 \text{ m})$	0.00	0.01	0.00	<b>0.42</b>
$P(\leq 2.0 \text{ m})$	0.01	0.43	0.44	<b>0.90</b>
$P(\leq 3.0 \text{ m})$	0.82	<b>0.99</b>	0.96	<b>0.99</b>

MAGN RT-PPP is the best performing method (93% of probability), and only the latter and DGPS are able to comply with the aforementioned standard requirement; and (b) in terms of vertical position, all strategies are able to comply with SAE J2945 standard.

In terms of mean errors, the strategies that provided the best results, in decreasing order, were: (a) for the horizontal channel: DGPS, MAGN RT-PPP, IGS RT-PPP, and SGPS; (b) for the vertical channel: DGPS, SGPS, IGS RT-PPP, and MAGN RT-PPP; and (c) for the total channel: DGPS, IGS RT-PPP, MAGN RT-PPP, and SGPS. These outcomes are in agreement with the recent verifications by Silva *et al.* [44] who demonstrated, for similar dynamic conditions and RT-PPP products, the superior performance of MAGN w.r.t. IGS RTS VTEC for the horizontal channel, to the detriment of the vertical channel. Results from the IGS RT-PPP strategy, in particular, are also in agreement with previous results from Bakker and Tiberius [32], who obtained horizontal position accuracy better than 1.75 meter at 77.7% of probability with their GPS-only SF RT-PPP approach. Even though Bakker and Tiberius employed a different tropospheric model, a 1-day predicted IGS GIM product, and carrier phase observations to smooth the pseudoranges (all of which, in theory, might result in improved accuracy w.r.t. to our IGS RT-PPP strategy), here we were able to obtain horizontal position errors better than 1.75 meter at 93.7% of probability. In terms of vertical and total position accuracy, lastly, results from the IGS RT-PPP strategy also proved to be in agreement with the verifications made by Hu, Neupane and Farrell [47], who achieved similar accuracies for their virtual network DGNSS

approach (based on the same RT-PPP products from IGS RTS used in this work), namely, vertical and total position errors better than 3.0 meters at 100% of probability.

### 3.2 Static Tests

Even though the results from the dynamic test presented in Section 3.1 shed important light into the problem under investigation, namely, the comparative performances of IGS SSR and MAGN ionospheric products for code-based SF RT-PPP Latin American users, the latter are still limited in the sense they were based on GPS observation data: (a) with very short time duration (only a couple of minutes); and (b) that were confined to a specific location in Brazil. This limitations were also present in the recent works by Pereira, Machado, and Marques [43] and Silva *et al.* [44], and may mask the real achievable performance of the aforementioned RT-PPP products for Latin American users at different locations and at different hours of the day. As the execution of a dynamic test that encompasses several hours would be somewhat cumbersome, we repeated the RT-PPP products comparison that is of interest for a series of long-duration tests (of around 12 hours, in order to cover the full orbiting period of the GPS constellation), using static CORSs belonging to the most relevant GNSS networks inside the coverage area of MAGN service, i.e., Latin America with extension to Caribbean and Antarctica Peninsula. We chose the reference stations carefully so that each would have another reference station nearby (distanced at no more than 50 km), which could be used for DGPS evaluation purposes (Table 5 and Fig. 7).

The static CORS observation data were acquired on June 22, 2023, in RINEX format, directly from the corresponding GNSS network repositories. Even though the CORSs are equipped with high-quality multi-constellation multi-frequency GNSS receiver equipment, only L1 C/A observation data from the GPS was considered, as

**Table 5** Observation and reference bases employed in the static tests.

Observation Base	Reference Base	Country
ABCC	ABPD	Colombia
AMUA	NAUS	Brazil
APMA	APS1	Brazil
CEFT	BRFT	Brazil
CORD	UCOR	Argentina
IARC	CHYT	Chile
IGM1	AGGO	Argentina
MTV1	MTV2	Uruguay
MZAL	MZAC	Argentina
ONRJ	RJVA	Brazil
PARC	IRSC	Chile
POAL	RSSL	Brazil
POLI	EACH	Brazil
QUI3	QUI4	Ecuador
RIDC	UCRI	Costa Rica
SCFL	IFSC	Brazil
UNSJ	OAFA	Argentina



**Fig. 7** Observation bases employed in the static tests.

this is the signal Latin American users equipped with low-cost receivers (focus of this work) are most likely to track in its CAV, V2V and/or V2X applications. The acquisitions of the RT-PPP products under investigation followed the same procedure adopted in the dynamic test, namely, SSR RT-PPP products from the IGS RTS were acquired via BNC, and MAGN VTEC, directly from FCAG UNLP FTP server, in IONEX format. After collection, we processed the data offline using specialized algorithms developed by the authors in Matlab framework, now employing an Extended Kalman Filter (EKF) strategy to compute the position solutions. The EKF solution was preferred herein, in detriment to the IWLS used in the dynamic test, as for static receivers, the propagation/prediction dynamic model is very accurate, which provides smoothing to the position states [3, 9, 12]. Whenever available, GPS Doppler shift observations in L1 frequency from the CORSSs have also been used in the EKF for providing additional smoothing of the pseudoranges.

The position solutions from the investigated strategies were compared against the actual positions of the CORSSs, which are known to millimeter accuracy, as they are frequently surveyed by the responsible personnel. Figures 8 to 10 present the probability of the strategies to provide horizontal position solutions with accuracies better than 0.5, 1.0 and 1.5 meter, respectively (dotted lines highlight the probabilities of 68% and 95%). Table 6 summarizes the latter in terms of mean and STD values for all observation bases (once again, best results are highlighted in bold font).

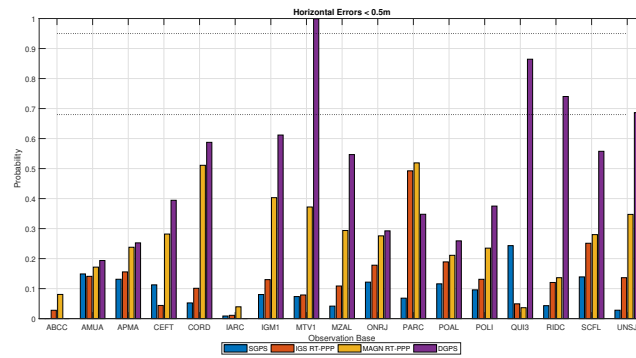


Fig. 8 Probability of the horizontal position errors to be better than 0.5 m in the static tests.

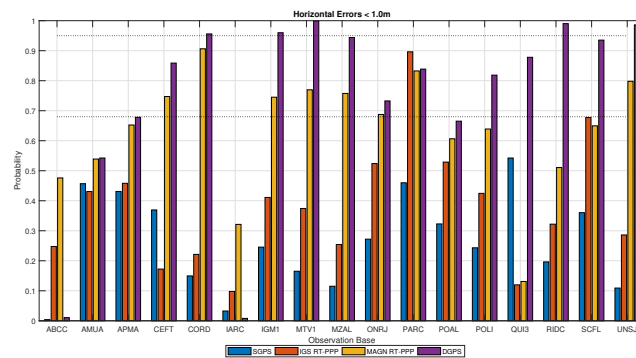


Fig. 9 Probability of the horizontal position errors to be better than 1.0 m in the static tests

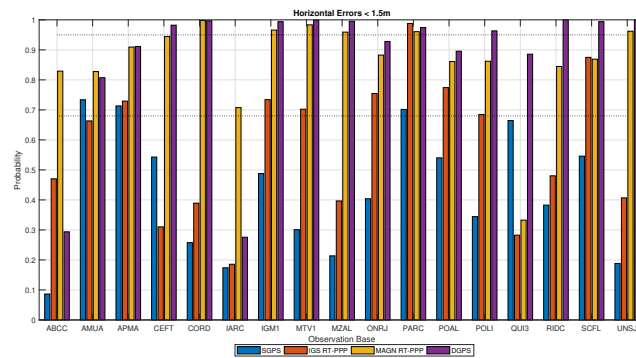


Fig. 10 Probability of the horizontal position errors to be better than 1.5 m in the static tests

**Table 6** Horizontal position error statistics for the static tests (mean  $\pm$  STD values)

	SGPS	IGS RT-PPP	MAGN RT-PPP	DGPS
$P(\leq 0.5 \text{ m})$	0.09 $\pm$ 0.06	0.14 $\pm$ 0.11	0.26 $\pm$ 0.14	<b>0.45 <math>\pm</math> 0.28</b>
$P(\leq 1.0 \text{ m})$	0.26 $\pm$ 0.16	0.38 $\pm$ 0.20	0.63 $\pm$ 0.19	<b>0.75 <math>\pm</math> 0.31</b>
$P(\leq 1.5 \text{ m})$	0.43 $\pm$ 0.21	0.58 $\pm$ 0.23	0.86 $\pm$ 0.16	<b>0.88 <math>\pm</math> 0.23</b>

As can be seen, if one seeks to meet the lane-level position accuracy constraints proposed by Williams and Barth [45], none of the tested strategies would be able to provide us with satisfactory results. DGPS, for instance, which was the strategy that performed best, only provided horizontal position accuracy better than 1.0 meter at 75% of probability, in average. The MAGN RT-PPP strategy, in sequence, which was the second best performing approach, delivered similar accuracy at 63% of the time, also in average. Then, IGS RT-PPP followed, by achieving sub-meter-level positioning at 38% of probability, and lastly, SGPS, with only 26% (all the latter, in average).

Considering, alternatively, the compliance of the strategies with the V2V position requirements defined by the SAE J2945 standard, one sees that both DGPS and MAGN RT-PPP provided sufficiently accurate performance: DGPS delivered horizontal position solutions that were, in average, accurate to 1.5 meter at 88% of time, while MAGN RT-PPP, at 86% of the time. IGS RT-PPP and SGPS, in turn, failed to meet SAE J2945 standard requirements, by delivering, in average, horizontal position solutions better than 1.5 meter at only 58% and 43% of probability, respectively.

Figures 11 to 13, in sequence, depict the probability of the strategies to provide vertical position solutions below 1.0, 2.0, and 3.0 meters, respectively (dotted lines highlight the probabilities of 68% and 95%). Table 7 summarizes the latter in terms of mean and STD values for all observation bases (best results are highlighted in bold font). As can be verified at a glance, DGPS once again stands out as the best performing strategy, by delivering solutions that were, in average, accurate to 3.0 meters at 95% of the time. IGS RT-PPP and MAGN RT-PPP, which were the second and third best performing strategies, delivered performances very close to each other, namely, vertical position solutions better than 3.0 meters at 79% and 75% of probability, respectively. SGPS, lastly, was the sole strategy that was not able to comply with SAE J2945 vertical position requirements, by delivering 3.0 meter-level position solutions at only 8% of the time.

Figures 14 to 16, lastly, present the probability of the strategies to provide position solutions with total errors below 1.0, 2.0, and 3.0 meters, respectively, while Table 8 summarizes the main results. As can be verified, DGPS was, as expected, the best performing strategy, being followed by MAGN RT-PPP, then IGS RT-PPP, and lastly, SGPS.

**Table 7** Vertical position error statistics for the static tests (mean  $\pm$  STD values)

	SGPS	IGS RT-PPP	MAGN RT-PPP	DGPS
$P(\leq 1.0 \text{ m})$	0.01 $\pm$ 0.01	0.37 $\pm$ 0.19	0.30 $\pm$ 0.16	<b>0.63 <math>\pm</math> 0.17</b>
$P(\leq 2.0 \text{ m})$	0.03 $\pm$ 0.04	0.64 $\pm$ 0.25	0.58 $\pm$ 0.25	<b>0.87 <math>\pm</math> 0.10</b>
$P(\leq 3.0 \text{ m})$	0.08 $\pm$ 0.09	0.79 $\pm$ 0.24	0.75 $\pm$ 0.26	<b>0.95 <math>\pm</math> 0.05</b>

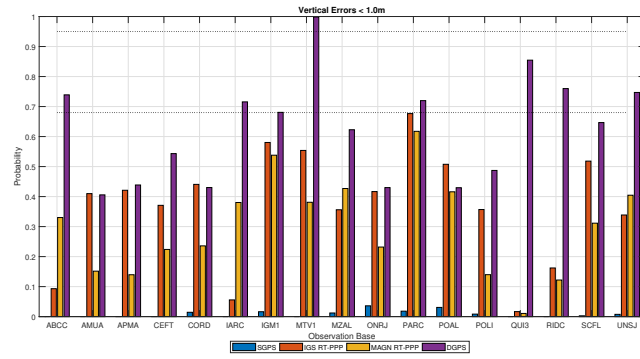


Fig. 11 Probability of the vertical position errors to be better than 1.0 m in the static tests.

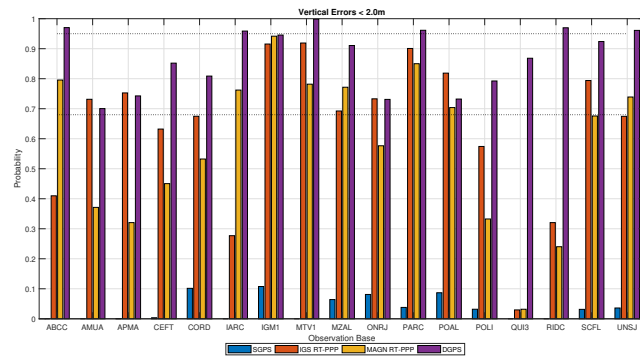


Fig. 12 Probability of the vertical position errors to be better than 2.0 m in the static tests.

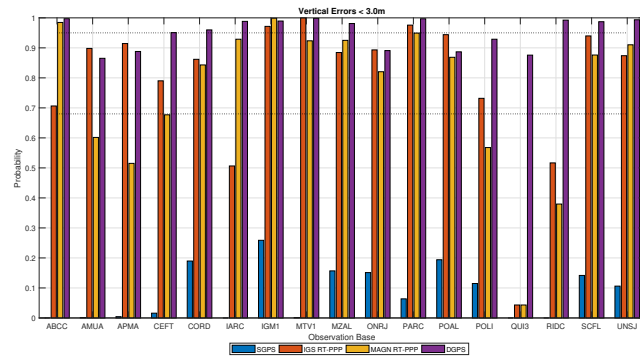


Fig. 13 Probability of the vertical position errors to be better than 3.0 m in the static tests.

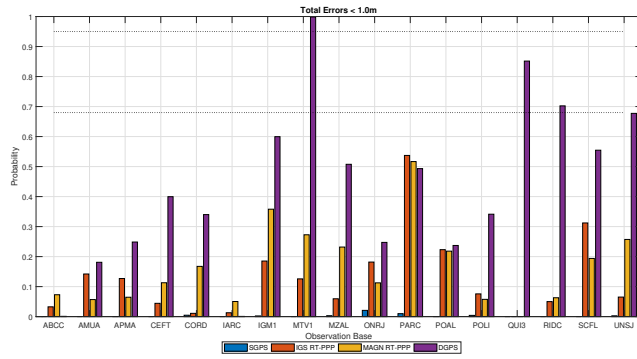


Fig. 14 Probability of the total position errors to be better than 1.0 m in the static tests.

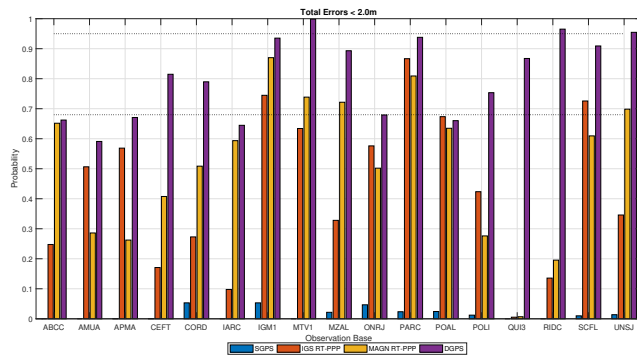


Fig. 15 Probability of the total position errors to be better than 2.0 m in the static tests.

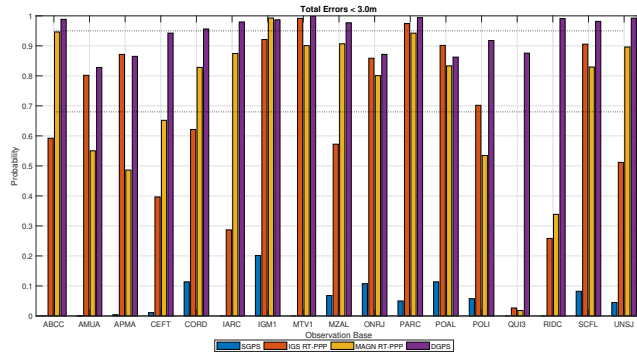


Fig. 16 Probability of the total position errors to be better than 3.0 m in the static tests.

**Table 8** Total position error statistics for the static tests (mean  $\pm$  STD values)

	SGPS	IGS RT-PPP	MAGN RT-PPP	DGPS
$P(\leq 1.0 \text{ m})$	$0.00 \pm 0.01$	$0.13 \pm 0.14$	$0.17 \pm 0.13$	<b><math>0.43 \pm 0.28</math></b>
$P(\leq 2.0 \text{ m})$	$0.02 \pm 0.02$	$0.43 \pm 0.26$	$0.52 \pm 0.24$	<b><math>0.81 \pm 0.14</math></b>
$P(\leq 3.0 \text{ m})$	$0.05 \pm 0.06$	$0.66 \pm 0.29$	$0.73 \pm 0.26$	<b><math>0.94 \pm 0.06</math></b>

To conclude the analysis, the following considerations are worthy of note: (a) in agreement to what we obtained in the dynamic test of Section 3.1, MAGN RT-PPP showed to perform significantly better than its IGS RT-PPP counterpart for the horizontal channel. In average, MAGN RT-PPP was able to deliver horizontal position solutions at the same accuracy of those by IGS RT-PPP, 67% more in terms of probability; (b) for the vertical channel, in turn, and also in agreement with the dynamic test, and with previous results by Silva *et al.* [9], IGS RT-PPP performed better than MAGN RT-PPP. Despite this, the difference in performances proved not to be as noticeable as for the horizontal channel, since here, in average, IGS RT-PPP was better than its MAGN RT-PPP counterpart only by 13% in terms of percentile; (c) as a natural result of the preceding verifications, MAGN RT-PPP proved to outperform IGS RT-PPP in terms of total position error, being able to deliver solutions at the same accuracy of those by IGS RT-PPP, 21% more in terms of probability. Moreover, jointly with DGPS, MAGN RT-PPP was the sole RT-PPP strategy able to fully comply with SAE J2945 position requirements; and (d) even though DGPS was the most performing strategy, one shall remember that its main encumbrance lies on the need for a nearby reference station. In a large sub-continent, as it is the case of Latin America, whose density of CORSs is still limited, such approach may lack versatility, unless a Virtual Reference Station (VRS) strategy is adopted [33, 37]. In this sense, and specially foreseeing the close deployment of IGS RTS stage 3 [27], wherein PPP-Real-Time-Kinematics (RTK) will be facilitated for users equipped with low-cost (i.e., SF) GNSS equipment (due to the provision of combined ionospheric Slant TEC (STEC) and tropospheric RT products), a virtual network DGNSS strategy based on RT-PPP products, as the one proposed by Hu, Neupane and Farrell [47], seems to be a very promising positioning alternative for meeting the requirements of CAV applications. The latter is seen to be especially true if such service is able to convey more accurate regional RT-PPP products, such as MAGN, or yet, a mixed approach that combines the latter with RT-PPP VTEC products from IGS RTS, aiming at optimizing horizontal and vertical position accuracies, respectively.

## 4 Conclusions and Future Works

This work presented a comprehensive performance evaluation of the two Real-Time (RT) Precise Point Positioning (PPP) Vertical Total Electron Content (VTEC) products currently available over Latin America (a sub-continental area recognized for the strong occurrence of ionospheric scintillation events), namely, the ones provided by: (a) the Real Time Service (RTS) of the International Global Navigation Satellite System (GNSS) Service (IGS), in State Space representation (SSR) format; and (b)

by the Faculty of Astronomical and Geophysical Sciences (FCAG) of the Argentine University of La Plata (UNLP), a.k.a., MAGN.

Results from extensive dynamic and static tests were conducted, considering long datasets (with, at least 12 hours of duration) of the Global Positioning System (GPS) constellation, which were acquired for several locations inside the coverage area of MAGN service, namely, Latin America with extension to Caribbean and Antarctica Peninsula. The RT-PPP strategies under investigation were benchmarked against traditional code-based Single Frequency (SF) positioning strategies, such as Standalone GPS (SGPS) and Differential GPS (DGPS), aiming at the fulfilment of recently stabilised accuracy metrics required for Connected Autonomous Vehicles (CAVs) and Vehicle-to-Vehicle (V2V) applications.

As we verified, even though MAGN-based RT-PPP strategy was not able to surpass DGPS in terms of accuracy, it outperformed IGS RT-PPP, by producing, in average, horizontal and total position solutions at the same levels of accuracies of those produced by the latter, 67% and 21% more, in terms of probability. Moreover, DGPS and MAGN RT-PPP strategies were the sole approaches able to fully comply with the Society of Automotive Engineers (SAE) standard J2945, aimed at V2V applications [24].

Regarding the tighter lane-level position accuracy requirement defined by Williams and Barth [45] for CAVs, namely, the provision of sub-meter horizontal position solutions at 95% of probability, none of the investigated strategies were able to comply with it. If one seeks to fulfill the latter, the use of integer ambiguity-fixed carrier phase observations imposes itself as mandatory. While the attainment of the latter is not easy/reliable for users equipped with low-cost, i.e., SF GNSS receivers [46], the close deployment of IGS RTS stage 3 is expected to bring additional perspectives to be explored, such as SF PPP-Real-Time-Kinematics (RTK) [64, 65]. In this meantime, an alternative solution, such as the virtual network DGNSS approach based on RT-PPP products, proposed by Hu, Neupane, and Farrell [47], adapted to convey MAGN products for Latin American users, seems to be a topic worthy of investigation.

**Acknowledgments.** The authors thanks the Asesoría Geodésica o Sugerencias, the Instituto Geográfico Agustín Codazzi, and Mr. Carlos Gómez Salazar for assisting in the process of accessing GNSS observation data from the Chilean, Colombian, and Costa Rican CORS, respectively. The authors also thank Dr. Luciano P. O. Mendoza, from the FCAG of UNLP, for providing the research team with access to MAGN products through its FTP server.

**Authors' contributions.** Conceptualization: FOS. Formal Analysis: LAO, FOS, DAL, VMGBC. Funding acquisition: FOS. Investigation: LAO, FOS. Methodology: LAO, FOS, DAL, VMGBC. Project administration: FOS. Resources: FOS. Writing—original draft: LAO. Writing—review and editing: FOS, DAL, VMGBC.

**Funding.** This study was financed in part by the Research Development Foundation (FUNDEP - ROTA 2030), under grant 27192.02.02/2021.01.00, in part by the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), under grant 212-20/2018, in part by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), under grants 313160/2019-8 and 312194/2022-6, and in part by the

Minas Gerais State Agency for Research and Development (FAPEMIG), under grants APQ-01449-17 and APQ-04659-22.

**Data availability.** The datasets generated during and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request

## Declarations

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no conflict of interest

## References

- [1] Graças Corrêa, F.: Sistemas de navegação por satélite e a guerra do futuro: uma abordagem prospectiva. Centro de Estudos Estratégicos do Exército: Análise Estratégica **19**(1), 51–75 (2021)
- [2] IBGE: Conceitos gerais: O que é a cartografia? GNSS. Accessed in February 2023. <https://atlascolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/sistema-global-de-navegac-a-o-por-sate-litess.html>
- [3] Teunissen, P.J., Montenbruck, O.: Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems vol. 10. Springer, - (2017)
- [4] University, S.: Multi-Constellation GNSS. Accessed in February 2023. <https://gps.stanford.edu/research/current-and-continuing-gpsnt-research/multi-constellation-gnss>
- [5] IGS: Multi GNSS. Accessed in February 2023. <https://igs.org/wg/multi-gnss/>
- [6] Spilker Jr, J.J., Axelrad, P., Parkinson, B.W., Enge, P.: Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I. American Institute of Aeronautics and Astronautics, - (1996)
- [7] Grewal, M.S., Andrews, A.P., Bartone, C.G.: Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 3rd edn. John Wiley & Sons, - (2013)
- [8] Seeber, G.: Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications. Walter de Gruyter, - (2003)
- [9] Farrell, J.: Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors. McGraw-Hill, Inc., - (2008)
- [10] Li, Z., Wang, N., Hernández-Pajares, M., Yuan, Y., Krankowski, A., Liu, A., Zha, J., García-Rigo, A., Roma-Dollase, D., Yang, H., *et al.*: IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling. *J. Geodesy* **94**, 1–16 (2020)
- [11] Landskron, D., Böhm, J.: VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *J. Geodesy* **92**(4), 349–360 (2017)

- [12] Groves, P.D.: Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd edn. (2013)
- [13] Anderle, R.J.: Point positioning concept using precise ephemeris. *Satell. Doppler Position.*, 47–75 (1976)
- [14] Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., Webb, F.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res. - Sol. Ea.* **102**(B3), 5005–5017 (1997)
- [15] Krueger, C.P., Oliveira Junior, P.S., Anjos Garnés, S.J., Alves, D., Euriques, J.: Posicionamento GNSS em tempo real: Evolução, aplicações práticas e perspectivas para o futuro. *Rev. Bras. Cart.* **72**, 1359–1379 (2020)
- [16] IGS: IGS, International GNSS Service. Accessed in September 2022 (2022). <https://www.igs.gov/>
- [17] Hefelbarth, A., Wanninger, L.: Performance of GNSS-PPP in Post-Processing Mode. Rostock-Warnemünde, Germany, 02–05 (2010)
- [18] Alkan, R.M., Öcalan, T.: Usability of the GPS precise point positioning technique in marine applications. *J. Navigation* **66**(4), 579–588 (2013)
- [19] Ocalan, T., Erdogan, B., Tunalioglu, N.: Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques. *B. Cienc. Geod.* **19**, 191–207 (2013)
- [20] TUSAT, E., OZYUKSEL, F.: Comparison of GPS satellite coordinates computed from broadcast and IGS final ephemerides. *Int. J. Eng. Geosci.* **3**(1), 12–19 (2018)
- [21] IGS: Technical Report 2018. Accessed in February 2023. [https://files.igs.org/pub/resource/pubs/2018\\_techreport.pdf](https://files.igs.org/pub/resource/pubs/2018_techreport.pdf)
- [22] Kiliszek, D., Szolucha, M., Kroszczyński, K.: Accuracy of precise point positioning (PPP) with the use of different international GNSS service (IGS) products and stochastic modelling. *Geod. Cartogr.* **67**(2), 207–238 (2018)
- [23] Williams, N., Barth, M.: A qualitative analysis of vehicle positioning requirements for connected vehicle applications. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* **13**(1), 225–242 (2021)
- [24] Committee, D.T., *et al.*: On-Board System Requirements for V2V Safety Communications. SAE International, - (2020)
- [25] Liu, T., Zhang, B., Yuan, Y., Li, M.: Real-time precise point positioning (RT-PPP) with raw observations and its application in real-time regional ionospheric VTEC modeling. *J. Geodesy* **92**(11), 1267–1283 (2018)

- [26] Di, M., Guo, B., Ren, J., Wu, X., Zhang, Z., Liu, Y., Liu, Q., Zhang, A.: GNSS real-time precise point positioning in arctic northeast passage. *J. Mar. Sci. Eng.* **10**(10), 1345 (2022)
- [27] IGS: IGS State Space Representation (SSR) Format - Version 1.00. Accessed in February 2023. [https://files.igs.org/pub/data/format/igs\\_ssr\\_v1.pdf](https://files.igs.org/pub/data/format/igs_ssr_v1.pdf)
- [28] Ouyang, C., Shi, J., Huang, Y., Guo, J., Xu, C.: Evaluation of BDS-2 real-time orbit and clock corrections from four IGS analysis centers. *Measurement* **168**, 108441 (2021)
- [29] Alcay, S., Turgut, M.: Evaluation of the positioning performance of multi-GNSS RT-PPP method. *Arab. J. Geosci.* **14**, 1–19 (2021)
- [30] Li, B., Ge, H., Bu, Y., Zheng, Y., Yuan, L.: Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers. *Satellite Navigation* **3**(1), 12 (2022)
- [31] Li, Z., Wang, L., Wang, N., Li, R., Liu, A.: Real-time GNSS precise point positioning with smartphones for vehicle navigation. *Satellite Navigation* **3**(1), 19 (2022)
- [32] Bakker, P.F., Tiberius, C.C.J.M.: Real-time multi-GNSS single-frequency precise point positioning. *GPS Solut.* **21**, 1791–1803 (2017)
- [33] Caldeira, M.C.O., Caldeira, C.R.T., Alves, D.B.M., Aguiar, C.R.: Análise da performance dos mapas globais e regionais da ionosfera para geração de estação de referência virtual. *Anu. Instit. Geoci.* **43**(4), 413–425
- [34] Fuller-Rowell, T.: USTEC: a new product from the space environment center characterizing the ionospheric total electron content. *GPS Solut.* **9**(3), 236–239 (2005)
- [35] Rahman, F., Silva, F.O., Jiang, Z., Farrell, J.A.: Low-cost real-time PPP GNSS aided INS for CAV applications. *IEEE T. Intel. Transp. Sys.* **23**, 25018–25032 (2022)
- [36] Rocha, G.D.d.C., Marques, H.A., Galera, J.F.M.: Acurácia do posicionamento absoluto GPS com correção da ionosfera advinda de mapas ionosféricos globais e regionais. *Bol. Cienc. Geod.* **21**(3), 498–514 (2015)
- [37] Silva, H.d.R., Monico, J.F.G., Alves, D.B.M.: Análise do desempenho do RTK em rede no Brasil sob efeito da cintilação ionosférica. *Rev. Bras. Cart.* **68**(10) (2016)
- [38] Vadakke Veettil, S., Aquino, M., Marques, H.A., Moraes, A.: Mitigation of ionospheric scintillation effects on GNSS precise point positioning (PPP) at low latitudes. *J. Geodesy* **94**(2), 15 (2020)

- [39] Yang, Z., Morton, Y.T.J.: Low-latitude GNSS ionospheric scintillation dependence on magnetic field orientation and impacts on positioning. *J. Geodesy* **94**(6) (2020)
- [40] Mendoza, L.P.O., Meza, A.M., Paz, J.M.A.: Technical note on the multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America (2019)
- [41] Mendoza, L.P.O., Meza, A.M., Aragón Paz, J.M.: A multi-GNSS, multifrequency, and near-real-time ionospheric TEC monitoring system for South America. *Adv. Space Res.* **17**(5), 654–661 (2019)
- [42] MAGGIA: Index of /ion/magn/. Accessed in September 2022 (2022). <https://wilken.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/magn/>
- [43] Pereira, T.A., Machado, W.C., Marques, H.A.: Assessing the quality of the near real-time regional VTEC maps produced by La Plata University in absolute GNSS positioning over Brazil. *Bol. Cienc. Geod.* **27** (2021)
- [44] Silva, F.O., Hu, W., Farrell, J.A.: Real-Time Single-Frequency Precise Point Positioning for Connected Autonomous Vehicles: A Case Study over Brazilian Territory. In: *Proc. of the IFAC World Congress* (2023)
- [45] Williams, N., Barth, M.: A qualitative analysis of vehicle positioning requirements for connected vehicle applications. *IEEE Intel. Transp. Sys.* **13**(1), 225–242 (2020)
- [46] Verhagen, S., Teunissen, P.J.G., Odijk, D.: The future of single-frequency integer ambiguity resolution. *VII Hotine-Marussi Symp. on Mathematical Geodesy, International Association of Geodesy Symposia* 137 (2012)
- [47] Hu, W., Neupane, A., Farrell, J.A.: Using PPP information to implement a global real-time virtual network DGNSS approach. *IEEE T. Veh. Technol.* **71**, 10337–10349 (2022)
- [48] Askne, J., Nordius, H.: Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Sci.* **22**(03), 379–386 (1987)
- [49] Sapucci, L.F.: Estimativa do vapor d’água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS. Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo (2001)
- [50] Oliveira Jr, P.S., Monico, J.F.G., Sapucci, L.F.: Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico na qualidade do posicionamento GNSS de alta acurácia. *Rev. Bras. Cart.* (69/2), 303–313 (2017)

- [51] Leandro, R., Santos, M., Langley, R.: UNB neutral atmosphere models: development and performance. In: Proc. of the 2006 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp. 564–573 (2006)
- [52] Böhm, J., Werl, B., Schuh, H.: Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational models analysis data. *J. Geophys. Res.* **111**(B2), 02406 (2006)
- [53] Böhm, J., Lagler, K., Schindelegger, M., Krásná, H.: GPT2/GMF2: an improved empirical model for tropospheric delays. In: AGU Fall Meeting Abstracts, vol. 2012, pp. 13–05 (2012)
- [54] Oliveira, L.A., Ramos, I.A., Silva, F.O., Lima, D.A.: Comparative analysis between tropospheric models for GNSS positioning in Brazilian territory. In: Proc. of the Intern. Symp. on Dynamic Problems of Mechanics (2023)
- [55] BKG: Real time GNSS. Accessed in September 2022 (2022). <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/#>
- [56] Schaer, S.: SINEX BIAS—Solution (Software/technique) independent exchange format for GNSS biases version 1.00. In: Proc. of the IGS Workshop on GNSS Biases (2016)
- [57] Marques, H.A.: PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS. PhD thesis, Universidade Estadual Paulista (Unesp) (2012)
- [58] Schaer, S., Gurtner, W., Feltens, J.: IONEX: The IONosphere map EXchange format version 1. Accessed in February 2023. <https://files.igs.org/pub/data/format/ionex1.pdf>
- [59] Wang, L., Li, Z., Ge, M., Neitzel, F., Wang, Z., Yuan, H.: Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service. *Remote Sens.* **10**(2), 337 (2018)
- [60] Setti Júnior, P.d.T., Silva, C.M., Oliveira Júnior, P.S.d., Alves, D.B.M., Monico, J.F.G.: Posicionamento multi-GNSS. *Rev. Bras. Cart.* **72**, 1200–1224 (2020) <https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56580>
- [61] Alkan, R.M., Erol, S., Mutlu, B.: Real-time multi-GNSS Precise Point Positioning using IGS-RTS products in Antarctic region. *Polar Sci.* **32**, 100844 (2022)
- [62] Klobuchar, J.A.: Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* (3), 325–331 (1987)
- [63] Takasu, T., Nubo, N., Yasuda, A.: Development, Evaluation and Application of RTKLIB: A program library for RTK-GPS. In: Proc. of the GPS/GNSS Symposium (2007)

- [64] Odijk, D., Teunissen, P.J.G., Khodabandeh, A.: Single-Frequency PPP-RTK: Theory and Experimental Results. *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. International Association of Geodesy Symposia* **139**(1), 571–578 (2014)
- [65] Li, X., Huang, J., Li, X., Shen, Z., Han, J., Li, L., Wang, B.: Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities. *Satellite Navigation* **3**(28), 1–22 (2022)

**ARTIGO III: INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE MÁSCARA NO POSICIONAMENTO  
POR PONTO PRECISO EM TEMPO REAL VIA GNSS**

Trabalho submetido no Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), em janeiro de 2024.



XII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DE 29/07 A 02/08 DE 2024, NATAL-RN, BRASIL

## CONEM2024-1706

# INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE MÁSCARA NO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO EM TEMPO REAL VIA GNSS

Ludmila Aparecida de Oliveira, ludmila.oliveira@estudante.ufla.br<sup>1</sup>

Felipe Oliveira e Silva, felipe.oliveira@ufla.br<sup>1</sup>

Danilo Alves de Lima, danilo.delima@ufla.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos, Caixa Postal 3037, CEP 37203-202, Lavras/MG, Brasil

**Resumo:** Os Sistemas Globais de Navegação via Satélite (GNSS) são amplamente utilizados em aplicações como Agricultura de Precisão (AP), serviços topográficos e de posicionamento geodésico. Em se tratando do uso do GNSS para o fornecimento de informações de posição, sabe-se que esses sistemas estão sujeitos a erros que podem comprometer significativamente sua solução. Esses erros são geralmente divididos em Erros de Modo Comum (CMEs), que apresentam a mesma influência em receptores situados na mesma vizinhança, e durante períodos de tempo da ordem de minutos, e Erros de Modo Não-Comum (NCMEs), os quais não apresentam qualquer correlação temporal ou espacial. Ao longo dos anos diversas técnicas têm sido desenvolvidas visando mitigar os CMEs; dentre esses métodos, um dos mais promissores é o Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real (PPP-TR). Essa técnica se baseia no uso de produtos disponibilizados por agências especializadas, como, por exemplo: (a) o International GNSS Service (IGS), que fornece correções para os relógios, órbitas, vieses instrumentais dos satélites e atrasos ionosféricos, para todo Globo; e (b) o Laboratorio de Meteorología Espacial, Atmósfera Terrestre, Geodesia, Geodinámica, Diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA), que fornece Mapas Ionosféricos Regionais (RIM) apenas para a América Latina (com extensão ao Caribe e Península Antártica). Como se sabe, o posicionamento GNSS depende de inúmeros parâmetros, dentre os quais destaca-se o ângulo de máscara, também conhecido como ângulo de corte. Sua função é filtrar quais sinais devem ou não participar dos cálculos posicionais dependendo da elevação em que se encontra o satélite que está os emitindo. Poucos estudos relacionados à influência do ângulo de máscara no posicionamento GNSS estão disponíveis na literatura atual. Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma análise da influência supracitada no posicionamento GNSS via PPP-TR no município de Lavras-MG, utilizando dados experimentais coletados por aproximadamente 12 horas, e correções ionosféricas do IGS e MAGGIA. Para fins de análise, o ângulo de máscara é variado de 5° a 25°, e os resultados são apresentados na forma de valores médios e desvios padrões dos erros de posição horizontal, vertical e total. Como principal contribuição do trabalho, mostra-se que o ângulo de máscara de 16° é o que apresenta os menores erros de posição horizontal e total para o PPP-TR utilizando produtos do MAGGIA e os menores erros de posição vertical e total utilizando produtos do IGS. Já o menor erro de posição vertical utilizando produtos do MAGGIA é encontrado com o ângulo de máscara de 18°, e o menor erro de posição horizontal utilizando produtos do IGS, com o ângulo de 25°.

**Palavras-chave:** GNSS, PPP-TR, IGS, MAGGIA, ângulo de máscara

## 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Globais de Navegação via Satélite (GNSS) são amplamente utilizados em diversas aplicações como, por exemplo, na Agricultura de Precisão (AP). A AP foi desenvolvida graças à disponibilização do GNSS para uso civil, informações geográficas e o início da era da computação. Essa técnica passou a ser difundida na América do Norte durante a década de 1980 e seu sucesso fez com que ela ganhasse notoriedade em outros países, como Alemanha, Argentina, Austrália e Inglaterra (Zerbato *et al.*, 2020). Além da AP, serviços topográficos e de posicionamento geodésico também são exemplos de atividades que foram significativamente beneficiadas com o surgimento do GNSS.

Atualmente existem quatro principais constelações GNSS que fornecem informações para todo Globo: o Sistema de Posicionamento Global (GPS), que foi desenvolvido pelos Estados Unidos da América e que é o mais antigo e robusto GNSS atualmente existente; o GLONASS (do russo *Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*), que é um sistema de navegação militar desenvolvido pela extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS); o *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS), desenvolvido e operado independentemente pela China; e o Galileo, que consiste em uma iniciativa da Agência da União Européia para o Programa Espacial (EUSPA) para desenvolver o GNSS da União

Européia.

Assim como qualquer tipo de sistema, os GNSS estão sujeitos a erros que podem comprometer significativamente sua solução de posição. Algumas literaturas dividem essas fontes de erro com base em suas correlações espacial e temporal, denominando-as de Erros de Modo Comum (CMEs, do inglês *Common Mode Errors*) e Erros de Modo Não-Comum (NCMEs, do inglês *Non-Common Mode Errors*) (Farrell, 2008; Teunissen and Montenbruck, 2017). Os CMEs apresentam aproximadamente a mesma influência em todos os receptores na mesma vizinhança e período de tempo, sendo compostos principalmente pelos erros de efemérides/órbitas, relógios e vieses instrumentais dos satélites, bem como os atrasos ionosféricos e troposféricos (Landskron and Böhm, 2017; Li *et al.*, 2020). Já os NCMEs não são correlacionados no tempo ou entre receptores, e incluem o erro do relógio do receptor, o erro de multicaminho e ruído de rastreamento do receptor (Groves, 2013).

O posicionamento via GNSS, bem como a mitigação dos CMEs, pode ser obtido por meio de uma série de técnicas, dentre as quais podem-se citar o GNSS *Standalone* (SGNSS), Diferencial (DGNSS), Relativo (RGNSS) e o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) (Seeber, 2003). O PPP possui duas variantes, o PPP Pós-Processado (PPP-PP) e o PPP em Tempo Real (PPP-TR). O PPP-PP vem sendo investigado nas últimas décadas por meio de comparações quanto ao desempenho dos diferentes produtos disponíveis (Heßelbarth and Wanninger, 2010; Alkan and Öcalan, 2013; Tusat and Ozyuksel, 2018). Já o PPP-TR surgiu com o objetivo de expandir as capacidades de PPP para aplicações em tempo real, sendo que, em 2001, o *International GNSS Service* (IGS) estabeleceu o Grupo de Trabalho em Tempo Real (RTWG), que agora oferece o Serviço em Tempo Real (RTS) (Liu *et al.*, 2018; Di *et al.*, 2022). O intuito do IGS-RTS é transmitir produtos PPP-TR pela internet, os quais são codificados no novo formato *State Space Representation* (SSR).

O PPP-TR baseia-se no uso de produtos disponibilizados por agências internacionais especializadas, tais como o IGS, que fornece correções para os relógios, órbitas, vieses instrumentais dos satélites e atrasos ionosféricos, para todo o Globo, mas também em produtos disponibilizados por organismos regionais, a exemplo do *Laboratorio de Meteorología Espacial, Atmósfera Terrestre, Geodesia, Geodinámica, Diseño de Instrumental y Astrometría* (MAGGIA), vinculado à *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas* (FCAG), da *Universidad Nacional de La Plata* (UNLP), que tem fornecido seus Mapas Ionosféricos Regionais (RIM) para a América Latina (com extensão ao Caribe e Península Antártica) desde 2018, no formato *IONosphere EXchange* (IONEX).

O desempenho do posicionamento GNSS depende de inúmeros fatores/parâmetros, dentre os quais destaca-se o ângulo de máscara, também referido como ângulo de corte. O ângulo de máscara é um parâmetro usado na configuração do receptor cuja função é filtrar os sinais abaixo de um determinado ângulo de elevação fazendo com que esses não participem dos cálculos posicionais ou de velocidade (Dyukov, 2016). Poucos estudos relacionados à influência do ângulo de máscara no posicionamento GNSS estão disponíveis na literatura atual, especialmente no âmbito do PPP-TR. No trabalho de Heng *et al.* (2014), por exemplo, é realizado um estudo com o objetivo de determinar o ângulo de máscara que maximiza a supressão de interferências, mas mantém o desempenho de uma única constelação GNSS com uma antena com baixo ângulo de máscara. Já Altuntas and Tunalioglu (2023), propõem uma nova abordagem empírica capaz de determinar ângulos de máscara, azimute e elevação ótimos para aplicação no método *Interferometric Reflectometry* GNSS (GNSS-IR), o qual permite recuperar características da superfície de reflexão por meio da análise da interferência entre os sinais diretos transmitidos pelos satélites e os refletidos de forma coerente.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma análise da influência do ângulo de máscara no posicionamento GNSS via PPP-TR, na base geodésica MGLA, instalada no Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Essa base pertence à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) e conta com um receptor TRIMBLE NETR9 e antena ZEPHYR 3 GEODETIC (TRM115000.00). A análise é realizada utilizando dados experimentais coletados por aproximadamente 12 horas, e correções ionosféricas do IGS e MAGGIA para os ângulos de máscara de 5° a 25°, com variação de 1° em 1°. Os resultados são apresentados na forma de erros médios de posição horizontal, vertical e total, e como principal contribuição, mostra-se quais ângulos de máscara devem ser utilizados com vistas ao aumento de desempenho da técnica PPP-TR baseada em produtos do IGS e MAGGIA, respectivamente.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 resume os modelos de medição e correção PPP-TR empregados ao longo do estudo. A metodologia adotada para conduzir a avaliação de desempenho dos produtos PPP-TR sob diferentes ângulos de máscara é apresentada na Seção 3. Já os resultados e discussões dos experimentos propostos são sumarizados na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 apresenta as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

## 2. MODELOS DE MEDIÇÃO E CORREÇÃO PPP-TR

Sabe-se que os sinais GNSS consistem em ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz. A partir dessas ondas é possível determinar a posição de qualquer ponto na superfície da Terra ou acima dela (Groves, 2013; Teunissen and Montenbruck, 2017). A distância entre o satélite e o receptor é obtida, idealmente, medindo-se o tempo de propagação do sinal GNSS, desde sua transmissão até sua recepção e multiplicado-o pela velocidade de luz. Como os relógios do receptor e do satélite não estão sincronizados com o horário oficial do GNSS, e os sinais sofrem atrasos ao se propagarem pela atmosfera, as medições realizadas não consistem puramente em distâncias, sendo alternativamente chamadas de pseudodistâncias. A pseudodistância bruta do satélite para a antena do usuário, considerando o sinal  $l$ , pode

ser modelada como (Groves, 2013; Hu *et al.*, 2022):

$$\rho_{a,R}^{s,l} = r_{as} + (\delta t_{sa,a}^s - \delta t_{st,a}^s)c + \delta \rho_E^s + \delta \rho_{I,a}^{s,l} + \delta \rho_{T,a}^s + (b_a^l + b^{s,l})c + \delta \rho_{M,a}^{s,l} + \delta w_{\rho,a}^{s,l}, \quad (1)$$

onde  $r_{as}$  é a distância verdadeira entre o satélite  $s$  e a antena receptora  $a$ ,  $\delta t_{sa,a}^s$  é o erro do relógio do receptor,  $\delta t_{st,a}^s$  é o erro do relógio do satélite,  $c$  é a velocidade de luz,  $\delta \rho_E^s$  é o erro de efeméride/órbita,  $\delta \rho_{I,a}^{s,l}$  é o erro ionosférico,  $\delta \rho_{T,a}^s$  é o erro troposférico,  $b_a^l$  representa o viés instrumental da pseudodistância no *hardware/software* do receptor, e  $b^{s,l}$  é o respectivo viés instrumental no *hardware/software* do satélite,  $\delta \rho_{M,a}^{s,l}$  é o erro de multicaminho e  $\delta w_{\rho,a}^{s,l}$  é o ruído de rastreamento de código.

Como introduzido na Seção 1, o PPP possui duas variantes sendo que ambas visam mitigar os CMEs (representados por  $\delta t_{st,a}^s$ ,  $\delta \rho_E^s$ ,  $\delta \rho_{I,a}^{s,l}$ ,  $\delta \rho_{T,a}^s$  e  $b^{s,l}$  em eq:pseudorealdistance). O RTS do IGS é a principal organização responsável pela transmissão de produtos PPP-TR, os quais são disponibilizados de forma gratuita pela internet, no formato SSR, e que permitem aos usuários corrigir a maior parte dos CMEs. Até o momento, o único CME para o qual nenhum produto PPP-TR tem sido disponibilizado é o erro troposférico, embora os mesmos estejam previstos para a fase 3 de implantação do IGS-RTS. Logo, os usuários PPP-TR interessados em mitigar o erro troposférico ainda precisam modelá-lo como estados adicionais em seus estimadores (Askne and Nordius, 1987; Sapucci, 2001; Oliveira Jr *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2021), ou então, recorrer a modelos empíricos (Böhm *et al.*, 2006, 2012; Landskron and Böhm, 2017). Para o leitor interessado, Oliveira *et al.* (2023) trás detalhes sobre alguns modelos troposéricos aplicáveis na América Latina e seus respectivos desempenhos.

## 2.1 Correção da Órbita do Satélite - IGS

A mensagem de correção de órbita dos satélites do IGS, em formato SSR, contém as componentes radial ( $e_{radial}$ ), longitudinal ( $e_{along}$ ) e transversal ( $e_{cross}$ ) necessárias à aplicação da correção de posição,  $\delta \mathbf{X}$ . Essa correção deve ser combinada com a posição do satélite referenciada à Terra,  $\mathbf{X}$ , calculada a partir das efemérides de transmissão, de forma a resultar em uma posição do satélite corrigida,  $\mathbf{X}_{orb}$  (IGS, 2020):

$$\mathbf{X}_{orb} = \mathbf{X} - \delta \mathbf{X}, \quad (2)$$

A correção da posição do satélite  $\delta \mathbf{X}$  é calculada de acordo com:

$$\delta \mathbf{X} = [e_{radial} \quad e_{along} \quad e_{cross}] \delta \mathbf{O}, \quad (3)$$

onde:

$$e_{along} = \frac{\dot{\mathbf{X}}}{|\dot{\mathbf{X}}|}, \quad (4)$$

$$e_{cross} = \frac{\mathbf{X} \times \dot{\mathbf{X}}}{|\mathbf{X} \times \dot{\mathbf{X}}|}, \quad (5)$$

$$e_{radial} = e_{along} \times e_{cross}. \quad (6)$$

onde  $\dot{\mathbf{X}}$  é a velocidade do satélite referenciada à Terra calculada a partir das efemérides de transmissão, e  $\delta \mathbf{O}$  é o vetor de correção para a órbita, o qual é calculado a partir dos termos de correção individuais transmitidos na mensagem SSR e suas taxas de variação:

$$\delta \mathbf{O} = \delta \mathbf{O}_{radial} \quad \delta \mathbf{O}_{along} \quad \delta \mathbf{O}_{cross} + \delta \dot{\mathbf{O}}_{radial} \quad \delta \dot{\mathbf{O}}_{along} \quad \delta \dot{\mathbf{O}}_{cross}(t - t_0). \quad (7)$$

onde,  $t$  é o tempo GNSS atual e  $t_0$  é o tempo GNSS de referência, também obtido da mensagem de correção de órbita SSR. Depois de se aplicar a correção da órbita do satélite, o erro de efemérides,  $\delta \rho_E^s$  em eq:pseudorealdistance, pode ser considerado desprezíveis.

## 2.2 Correção do Relógio do Satélite - IGS

A mensagem de correção do relógio dos satélites do IGS, em formato SSR, contém os parâmetros para calcular a correção  $\delta C$  a ser aplicada ao tempo de transmissão do respectivo sinal GNSS pelo satélite,  $t_{broad}$ . O tempo de transmissão do satélite corrigido pela mensagem do relógio do IGS,  $t_{sat}$ , é obtido como:

$$t_{sat} = t_{broad} + \frac{\delta C}{c}, \quad (8)$$

A correção do relógio é dada por:

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2, \quad (9)$$

onde  $C_i$  são os coeficientes da mensagem de correção do relógio transmitidos na mensagem SSR, com  $i = 0, 1, 2$ .

Após a implementação da correção supracitada, o erro do relógio do satélite pode ser considerado insignificante.

### 2.3 Correção do Viés Instrumental do Satélite - IGS

O vieses instrumentais sofridos no *hardware* dos satélites são ocasionados pela diferença entre os caminhos percorridos pelas portadoras (por exemplo,  $L1$  e  $L2$  do GPS) nos *front-ends* dos mesmos. Esses atrasos não são diretamente acessíveis na sua forma absoluta, pois são obtidos por meio da combinação das ondas portadoras; por esse motivo, eles são alternativamente referidos como Viéses de Código Diferenciais (DCBs).

Para o GPS, a combinação livre de ionosfera dos sinais  $P(Y)$  transmitidos em  $L1$  e  $L2$ , i.e.,  $P1/P2$ , é usada como referência para se calcular a solução de relógio do sistema. Usuários GPS que fazem uso de tal combinação não precisam, por definição, compensar nenhum viés instrumental. Por outro lado, caso o usuário processe uma combinação diferente de observações, ou observações de simples frequência, os vieses instrumentais correspondentes devem ser corrigidos. Os usuários GPS que empregam medições do código  $P(Y)$  obtidos na frequência  $L1$ , por exemplo, devem aplicar a correção conhecida como *Timing Group Delay* (TGD), a qual é definida como sendo o DCB entre o sinal  $P1$  e a combinação linear de  $P1/P2$  livre de ionosfera. O parâmetro TGD é transmitido como parte da mensagem de navegação padrão do GPS, e é normalmente levado em consideração no cálculo de  $t_{broad}$  em (8).

Como os usuários do Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) do GPS não têm acesso às medições de código baseadas em  $P1$ , eles devem aplicar um DCB adicional em relação a  $P1$  (Silva *et al.*, 2023). Usuários que empregam, por exemplo, o tradicional código *Coarse Acquisition* (C/A) disponibilizado na frequência  $L1$ , que é o foco deste trabalho, devem corrigir  $b^{s,l}$  em (1) subtraindo,

$$b^{s,C/A} = \frac{(TGD - DCB_{C/A})}{c}, \quad (10)$$

onde  $DCB_{C/A}$  é o viés de código diferencial do satélite, no domínio da distância, sofrido pelo sinal  $C/A$  em relação à combinação linear  $P1/P2$ . Esse (e outros) DCBs são transmitidos pelo RTS do IGS a cada 30 segundos no formato SSR. Após aplicar as correções dos vieses instrumentais dos satélites,  $b^{s,l}$  em (1) pode ser considerado irrisório.

### 2.4 Correção Ionosférica - IGS

As correções ionosféricas do IGS, em formato SSR, consistem em um Modelo Ionosférico Global (GIM) que é combinado, em tempo real, em termos de Conteúdo Vertical Total de Elétrons (VTEC). Sua resolução temporal é de 20 minutos e ele é elaborado pela Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) a partir de soluções fornecidas, em tempo real, por diversos Centros de Análise (ACs) ionosféricos do IGS.

A correção ionosférica do IGS é definida para camadas de VTEC de espessura infinitesimal e é codificada na forma de funções harmônicas esféricas. As correções devem, em seguida, ser mapeadas para valores de *Slant TEC* (STEC), usando a elevação dos satélites na altitude da camada ionosférica correspondente, transmitida na mensagem SSR.

A contribuição VTEC de cada GIM é calculada em Unidades de TEC (1 TECU =  $10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>) como (IGS, 2022):

$$VTEC(L_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^{\min(n,M)} [C_{nm} \cos(m\lambda_s) + S_{nm} \sin(m\lambda_s)] P_{nm} \sin L_{pp}, \quad (11)$$

onde  $N$  é o grau de expansão esférica;  $M$  é a ordem da mesma;  $n, m$  são índices;  $C_{nm}$  são os coeficientes do cosseno;  $S_{nm}$  são os coeficientes do seno;  $L_{pp}$  é a latitude geocêntrica do Ponto de Perfuração Ionosférico (IPP) para a camada;  $P_{nm}$  é a função de Legendre normalizada associada; e  $\lambda_s$  é longitude do IPP defasada em 2 horas para o máximo TEC (aproximadamente 14:00, hora local) para a camada (módulo  $2\pi$  rad), a qual é calculada como:

$$\lambda_s = \text{mod} \left[ \left( \lambda_{pp} + (t - 50400) \times \frac{\pi}{43200} \right), 2\pi \right], \quad (12)$$

onde  $t$  é tempo do GNSS (módulo 86400 s) e a função  $\text{mod}(\cdot, \cdot)$  retorna o resto da divisão do primeiro termo pelo segundo.

A latitude  $L_{pp}$  e longitude  $\lambda_{pp}$  referem-se ao IPP na altitude da camada ionosférica. O IPP é a interseção de uma linha reta (definida entre as posições do receptor e do satélite) com uma esfera com a altitude da camada ionosférica acima do modelo esférico da Terra (IGS, 2022). A latitude do IPP no modelo esférico da Terra é calculada, em radianos, como:

$$L_{pp} = \arcsin(\sin L_a \cos \psi_{pp} + \cos L_a \sin \psi_{pp} \cos A), \quad (13)$$

onde  $L_a$  é a latitude geocêntrica da receptor;  $\lambda_a$  é a longitude do receptor;  $A$  é o azimute do satélite em relação ao receptor, no modelo esférico da Terra; e  $\psi_{pp}$  é o ângulo central (também considerando a Terra esférica) entre a posição do receptor e a projeção do IPP na superfície da Terra, o qual é calculado, em radianos, como:

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin \left( \frac{R_e + h_r}{R_e + h_I} \cos E \right). \quad (14)$$

onde  $E$  é o ângulo de elevação do satélite em relação ao receptor no modelo esférico da Terra;  $R_e$  é o raio esférico da Terra, de 6.370 km;  $h_r$  é a altitude da camada ionosférica acima do modelo esférico da Terra; e  $h_I$  é a altitude do receptor acima do modelo esférico da Terra.

Se as seguintes condições:

$$L_a \geq 0^\circ \quad e \quad \tan \psi_{pp} \cos A > \tan(\pi/2 - L_a), \quad (15)$$

ou

$$L_a < 0^\circ \quad e \quad -\tan \psi_{pp} \cos A > \tan(\pi/2 + L_a), \quad (16)$$

são atendidas, a longitude do IPP pode ser calculada, em radianos, como:

$$\lambda_{pp} = \lambda_a + \pi - \left( \frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos L_{pp}} \right). \quad (17)$$

Em todos os outros casos, a longitude IPP é calculada, em radianos, por:

$$\lambda_{pp} = \lambda_a + \left( \frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos L_{pp}} \right). \quad (18)$$

A contribuição STEC, por fim, é calculada em TECU como:

$$STEC = \frac{VTEC}{\sin(E + \psi_{pp})}. \quad (19)$$

Dessa forma, tem-se que o erro ionosférico pode ser calculado e compensado em eq;pseudorealdistance, como:

$$\delta\rho_{I,a}^{s,l} = \frac{40,3 \text{ STEC} \times 10^{16}}{l}. \quad (20)$$

## 2.5 Correção Ionosférica - MAGGIA

À semelhança do IGS, o MAGGIA começou, recentemente, a produzir seus próprios mapas de VTEC, com base em uma rede regional de estações de referência GNSS, objetivando fornecer produtos ionosféricos de maior precisão para a América do Sul, Caribe e Península Antártica (Mendoza *et al.*, 2019a,b). Os Mapas Ionosféricos Regionais (RIM) do MAGGIA são fornecidos com um período de atualização de 15 minutos no formato *IONosphere EXchange* (IONEX), o mesmo usado regularmente pelo IGS para transmitir seus produtos finais pós-processados.

O RIM do MAGGIA veicula valores estimados de  $VTEC_{j,k}$  em uma grade equidistante com resolução de  $0,5^\circ$  para latitude geocêntrica  $L_j$  e longitude  $\lambda_k$ . A aplicação do modelo, entretanto, requer interpolação para a localização do IPP ( $\lambda_{pp}, L_{pp}$ ). Conforme sugerido por Teunissen and Montenbruck (2017), a técnica de interpolação bilinear se mostra adequada para tal aplicação, onde o valor do VTEC nas coordenadas do IPP é calculado como:

$$VTEC(\lambda_{pp}, L_{pp}) = (1-p)(1-q)VTEC_{j,k} + (p)(1-q)VTEC_{j,k} + (1-p)(q)VTEC_{j,k} + (p)(q)VTEC_{j,k}, \quad (21)$$

onde

$$p = (L_{pp} - L_j)/(L_{j+1} - L_j) \quad e \quad q = (\lambda_{pp} - \lambda_k)/(\lambda_{k+1} - \lambda_k), \quad (22)$$

são aplicados nos intervalos  $L_j \leq L_{pp} \leq L_{j+1}$  e  $\lambda_k \leq \lambda_{pp} \leq \lambda_{k+1}$ , delimitado pelos pontos circundantes da grade.

Uma vez interpolado o VTEC para as coordenadas do IPP, o mesmo deve ser convertido para STEC e corresponde ao erro ionosférico via  $\text{stec}$  e  $\text{deltarhoI}$ , respectivamente.

## 3. METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia proposta para determinação dos ângulos de máscara que conduzem ao melhor desempenho do PPP-TR via produtos ionosféricos do IGS e MAGGIA, respectivamente. Para fins de simplificação da etapa de coleta e processamento dos dados, apenas pseudodistâncias obtidas via código C/A, na frequência  $L1$  do GPS foram considerados neste trabalho. Inicialmente, foi realizada a coleta de aproximadamente 12 horas de dados brutos da base estática MGLA da RBMC, situada na UFLA, no formato *Receiver INdependent EXchange* (RINEX), em sua versão 2. Em paralelo, foram coletados os fluxos de correção SSRA02IGS1 e IONO01IGS1 do IGS, via *software BKG Ntrip Client* (BNC), em formato SSR, e os RIMs do MAGGIA, diretamente via seu servidor de *File Transfer Protocol* (FTP), em formato IONEX. Dentre os vários modelos troposféricos descritos na literatura, o proposto pela Universidade de New Brunswick (UNB3) foi o escolhido para mitigar o atraso troposférico, uma vez que já foi evidenciado que o mesmo apresenta melhor desempenho em território brasileiro quando comparado aos demais (Oliveira *et al.*, 2023).

Após aquisição e análise dos dados, esses foram processados de forma *offline* por meio de algoritmos MATLAB especializados desenvolvidos pelos autores. Tais algoritmos fizeram uso do Filtro de Kalman Extendido (EKF) para calcular as soluções posicionais do receptor (Groves, 2013), e foram executados diversas vezes, valendo-se em, todas elas, dos mesmos parâmetros e correções PPP-TR, mas modificando o ângulo de máscara, o qual excursionou de  $5^\circ$  a  $25^\circ$ , com incrementos de  $1^\circ$ . A Figura 1 ilustra os arquivos de entrada utilizados para a realização do teste e suas saídas.

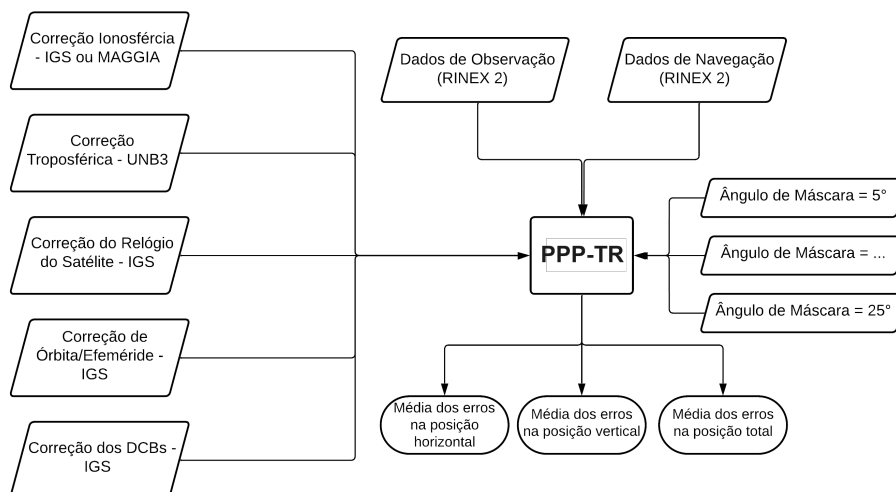


Figura 1: Diagrama representando o fluxo de informações no teste.

O desempenho dos algoritmos testados foram avaliados utilizando como métrica as médias e desvios padrões dos erros de posição horizontal,  $\delta p_H$ , definido em hor; vertical  $\delta p_V$ , definido em ver; e total  $\delta p_T$ , definido em tot:

$$\delta p_H = \sqrt{\delta p_N^2 + \delta p_E^2}, \quad (23)$$

$$\delta p_V = \sqrt{\delta p_D^2}, \quad (24)$$

$$\delta p_T = \sqrt{\delta p_N^2 + \delta p_E^2 + \delta p_D^2}, \quad (25)$$

onde  $\delta p_N$ ,  $\delta p_E$  e  $\delta p_D$  são os erros de posição nas direções Norte, Leste e vertical (NED), respectivamente.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam o comportamento das médias dos erros de posição horizontal, vertical e total, respectivamente, para o PPP-TR utilizando: (a) correções exclusivamente do IGS; e (b) correções de órbita, relógio e viés instrumental dos satélites do IGS, e correção ionosférica do MAGGIA. Já os respectivos desvios padrões dos erros de posição horizontal, vertical e total supracitados podem ser visualizados nas Figuras 5, 6 e 7.

Como pode-se observar, o ângulo de máscara de  $16^\circ$  foi o que apresentou os menores erros médios de posição horizontal e total para o PPP-TR utilizando o produto ionosférico do MAGGIA, a saber, de 0,87 m e 3,55 m, respectivamente, bem como os menores erros médios de posição vertical e total para o PPP-TR utilizando exclusivamente produtos do IGS, quais sejam, de 2,23 m e 2,91 m, respectivamente. Já o menor erro médio de posição vertical utilizando produtos do MAGGIA, a saber de 3,38 m, foi encontrado para o ângulo de máscara de  $18^\circ$ , e o menor erro médio de posição horizontal utilizando produtos exclusivamente do IGS, a saber de 1,30 m, com o ângulo máscara de  $25^\circ$ . Essa diferença de desempenho de posição dos produtos do MAGGIA e do IGS para os canais horizontal e vertical já havia sido previamente identificada na literatura, e está de acordo com os recentes resultados de Silva *et al.* (2023).

Ao se analisar o comportamento dos desvios padrões dos erros de posição, é possível perceber que, o ângulo de máscara de  $16^\circ$  foi o que apresentou os melhores resultados nos canais vertical e total para o PPP-TR com produto ionosférico do MAGGIA (incertezas de  $\pm 1,56$  m e  $\pm 1,54$  m respectivamente), bem como o melhor resultado no canal horizontal para o PPP-TR utilizando produtos exclusivamente do IGS (incerteza de  $\pm 0,81$  m). Já o menor desvio padrão para o erro de posição horizontal utilizando o RIM do MAGGIA foi obtido para o ângulo de máscara de  $14^\circ$  (incerteza de  $\pm 0,56$  m), e o menor desvio padrão para os erros de posição vertical e total utilizando produtos exclusivamente do IGS foram obtidos com o ângulo de  $15^\circ$  (incertezas de  $\pm 2,50$  m e  $\pm 1,39$  m, respectivamente).

#### 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise da influência do ângulo de máscara no desempenho do posicionamento de Sistemas de Navegação Global via Satélite (GNSS), em especial o Sistema de Posicionamento Global (GPS), via técnica de Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real (PPP-TR). Como se sabe, a inclusão de satélites com ângulos de elevação muito baixos nos cálculos posicionais pode interferir no desempenho do mesmo, na medida em que permite que observáveis mais severamente corrompidas pelos atrasos ionosféricos e troposféricos sejam contabilizadas. Por outro

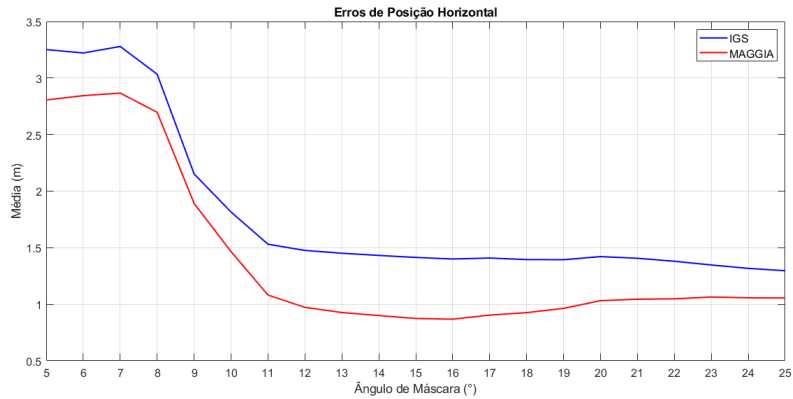


Figura 2: Médias dos erros de posição horizontal.

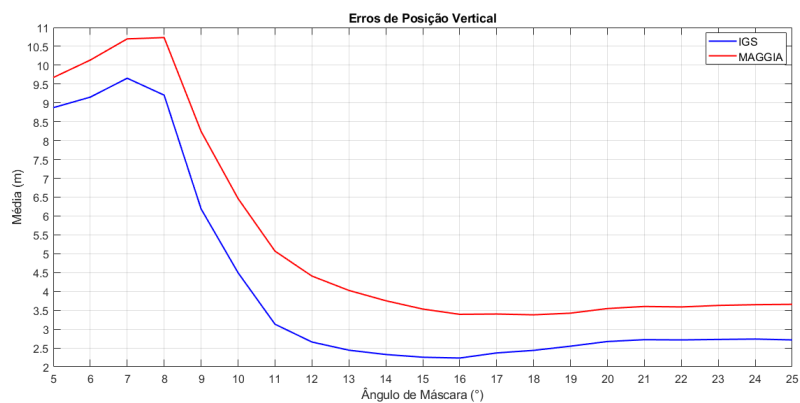


Figura 3: Médias dos erros de posição vertical.

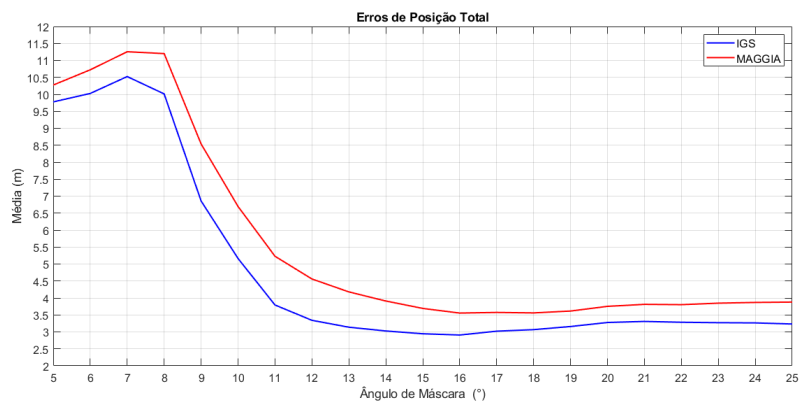


Figura 4: Médias dos erros de posição total.

lado, o aumento do ângulo de máscara pode remover indiscriminadamente satélites dos cálculos posicionais, e assim comprometer a Diluição de Precisão (DOP) da solução geométrica.

Conforme pôde-se verificar, via ensaios experimentais conduzidos com longas massas de dados coletadas de um receptor GPS de alta qualidade pertencente à base de referência MGLA, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), o ângulo de máscara de 16° foi, de forma geral, o que resultou nos menores valores médios e desvios padrões para os erros de posição da técnica PPP-TR empregando produtos do IGS, e do MAGGIA.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP - ROTA 2030), proc. no. 27192.02.02/2021.01.00, à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), proc. no. 212-20/2018, ao Conselho Nacional

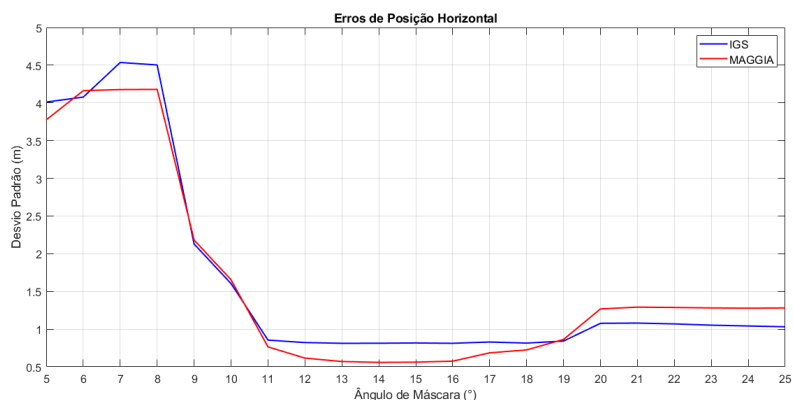


Figura 5: Desvios padrões dos erros de posição horizontal.

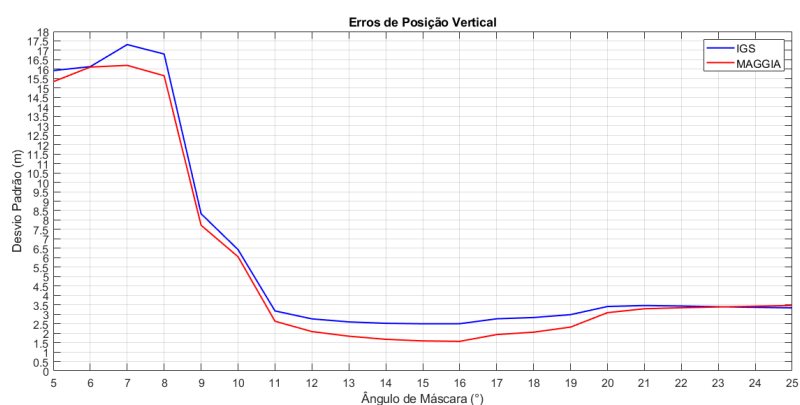


Figura 6: Desvios padrões dos erros de posição vertical.

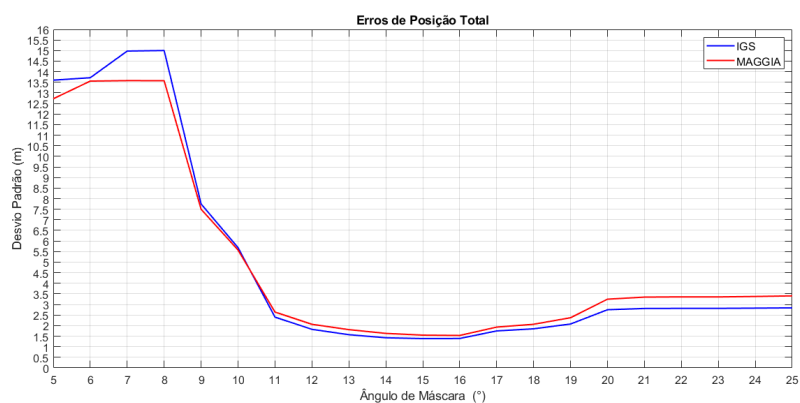


Figura 7: Desvios padrões dos erros de posição total.

de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), proc. no. 313160/2019-8 e 312194/2022-6, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), proc. no. APQ-01449-17 e APQ-04659-22.

## 7. REFERÊNCIAS

- Alkan, R.M. and Öcalan, T., 2013. "Usability of the GPS precise point positioning technique in marine applications". *The Journal of Navigation*, Vol. 66, No. 4, pp. 579–588.
- Altuntas, C. and Tunalioglu, N., 2023. "A systematic approach for identifying optimal azimuth and elevation angle masks in GNSS-IR: validation through a sea level experiment". *GPS Solutions*, Vol. 27, No. 4, p. 198.
- Askne, J. and Nordius, H., 1987. "Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data". *Radio science*, Vol. 22, No. 03, pp. 379–386.

- Böhm, J., Lagler, K., Schindelegger, M. and Krásná, H., 2012. "GPT2/GMF2: an improved empirical model for tropospheric delays". In *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2012, pp. G13C–05.
- Böhm, J., Werl, B. and Schuh, H., 2006. "Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, No. B2, p. B02406.
- Di, M., Guo, B., Ren, J., Wu, X., Zhang, Z., Liu, Y., Liu, Q. and Zhang, A., 2022. "GNSS real-time precise point positioning in arctic northeast passage". *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 10, No. 10, p. 1345. ISSN 2077-1312.
- Dyukov, A., 2016. "Mask angle effects on GNSS speed validity in multipath and tree foliage environments". *Asian Journal of Applied Sciences*, Vol. 4, No. 2.
- Farrell, J., 2008. *Aided Navigation: GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill, Inc., -.
- Groves, P.D., 2013. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd edition.
- Heng, L., Walter, T., Enge, P. and Gao, G.X., 2014. "GNSS multipath and jamming mitigation using high-mask-angle antennas and multiple constellations". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 2, pp. 741–750.
- Heßelbarth, A. and Wanninger, L., 2010. "Performance of GNSS-PPP in Post-Processing Mode". *Rostock-Warnemünde, Germany*, pp. 02–05.
- Hu, W., Neupane, A. and Farrell, J.A., 2022. "Using PPP information to implement a global real-time virtual network DGNSS approach". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, pp. 10337–10349.
- IGS, 2020. "IGS State Space Representation (SSR) Format - Version 1.00". URL <https://files.igs.org/pub/data/format/>. Accessed in February 2020.
- IGS, 2022. "IGS, International GNSS Service". URL <https://www.igs.gov/>. Accessed in September 2022.
- Landskron, D. and Böhm, J., 2017. "VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions". *Journal of Geodesy*, Vol. 92, No. 4, pp. 349–360.
- Li, Z., Wang, N., Hernández-Pajares, M., Yuan, Y., Krankowski, A., Liu, A., Zha, J., García-Rigo, A., Roma-Dollase, D., Yang, H. *et al.*, 2020. "IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling". *Journal of Geodesy*, Vol. 94, pp. 1–16.
- Liu, T., Zhang, B., Yuan, Y. and Li, M., 2018. "Real-time precise point positioning (RT-PPP) with raw observations and its application in real-time regional ionospheric VTEC modeling". *Journal of Geodesy*, Vol. 92, No. 11, pp. 1267–1283. ISSN 0949-7714.
- Mendoza, L.P.O., Meza, A.M. and Paz, J.M.A., 2019a. "Technical note on the multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America".
- Mendoza, L.P.O., Meza, A.M. and Aragón Paz, J.M., 2019b. "A multi-GNSS, multifrequency, and near-real-time ionospheric TEC monitoring system for South America". *Space Weather*, Vol. 17, No. 5, pp. 654–661.
- Oliveira, L.A., Ramos, I.A., e Silva, F.O. and de Lima, D.A., 2023. "Comparative analysis between tropospheric models for GNSS positioning in Brazilian territory". In *Proc. of the Intern. Symp. on Dynamic Problems of Mechanics*.
- Oliveira Jr, P.S., Monico, J.F.G. and Sapucci, L.F., 2017. "Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico na qualidade do posicionamento GNSS de alta acurácia". *Rev. Bras. Cart.*, , No. 69/2, pp. 303–313.
- Pereira, T.A., Machado, W.C. and Marques, H.A., 2021. "Assessing the quality of the near real-time regional VTEC maps produced by La Plata University in absolute GNSS positioning over Brazil". *Boletim de Ciências Geodésicas*, Vol. 27.
- Sapucci, L.F., 2001. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. Master's thesis, Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo.
- Seeber, G., 2003. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter, -.
- Silva, F.O., Hu, W. and Farrell, J.A., 2023. "Real-time single-frequency precise point positioning for connected autonomous vehicles: A case study over brazilian territory".
- Teunissen, P.J. and Montenbruck, O., 2017. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Vol. 10. Springer, -.
- Tusat, E. and Ozyuksel, F., 2018. "Comparison of GPS satellite coordinates computed from broadcast and IGS final ephemerides". *International Journal of Engineering and Geosciences*, Vol. 3, No. 1, pp. 12–19.
- Zerbato, C., Corrêa, R.d.G. and Furlani, C.E.A., 2020. *Agricultura de Precisão : Direcionamento Automático de Máquinas Agrícolas*. SENAR AR-PR, -.

## INFLUENCE OF THE MASK ANGLE ON REAL-TIME PRECISE POINT POSITIONING VIA GNSS

Ludmila Aparecida de Oliveira, ludmila.oliveira@estudante.ufla.br<sup>1</sup>

Felipe Oliveira e Silva, felipe.oliveira@ufla.br<sup>1</sup>

Danilo Alves de Lima, danilo.delima@ufla.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos, Caixa Postal 3037, CEP 37203-202, Lavras/MG, Brasil

**Abstract:** *Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are widely used in applications such as Precision Agriculture (PA), topographic and geodetic positioning services. When GNSS is used to provide position information, it is known that they are subject to errors that can significantly compromise their solution. These errors are generally divided into Common-Mode Errors (CMEs), which have the same influence on receivers located in the same vicinity, and during periods of time on the order of minutes, and Non-Common-Mode Errors (NCMEs), which do not present any temporal or spatial correlation. Over the years, several techniques have been developed to mitigate the CMEs. Among these methods, one of the most promising is the Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP). This technique uses products that are made available by specialized agencies, such as: (a) the International GNSS Service (IGS), which provides corrections for satellite clocks, orbits, and hardware biases, in addition to ionospheric delays, for the entire Globe; and (b) the Laboratorio de Meteorología Espacial, Atmósfera Terrestre, Geodesia, Geodinámica, Diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA), which provides Regional Ionospheric Maps (RIMs) only for Latin America (with extension to the Caribbean and Antarctic Peninsula). As we know, GNSS positioning depends on numerous parameters, among which stands out the mask angle, also known as cut angle. Its function is to filter which signals shall or shall not participate in the positional calculations as a function of the elevation of the satellite that is emitting them. Few studies related to the influence of the mask angle on GNSS positioning are available in the current literature. Therefore, the present work presents an analysis of the aforementioned influence on GNSS positioning via RT-PPP in the municipality of Lavras-MG, using experimental data collected for approximately 12 hours, and ionospheric corrections from IGS and MAGGIA. For analysis purposes, the mask angle is varied from 5° to 25°, and the results are presented in terms of average values and standard deviations of the horizontal, vertical, and total position errors. As the main contribution of the work, it is shown that the mask angle of 16° is the one that presents the smallest horizontal and total position errors for RT-PPP using MAGGIA products and the smallest vertical and total position errors using IGS products. The smallest vertical position error using MAGN products is found with a mask angle of 18°, and the smallest horizontal position error using IGS products, with an angle of 25°.*

**Key words:** GNSS, RT-PPP, IGS, MAGGIA, mask angle