

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

GUSTAVO RODRIGUES COELHO
MARIANA SOARES BARREIRA ALVES

**O MÉTODO PPP DE POSICIONAMENTO GNSS: DESEMPENHO
E PERSPECTIVAS**

GOIÂNIA, GO
2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC – Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo das Autoras: Gustavo Rodrigues Coelho e Mariana Soares Barreira Alves

Matrícula: 20181011190380 e 20161011190210

Título do Trabalho: O Método PPP de Posicionamento GNSS: Desempenho e Perspectivas

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 12/01/2023.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais
Gustavo Rodrigues Coelho

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais
Mariana Soares Barreira Alves

GUSTAVO RODRIGUES COELHO
MARIANA SOARES BARREIRA ALVES

O MÉTODO PPP DE POSICIONAMENTO GNSS: DESEMPENHO E PERSPECTIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof. Dr. Valdeir Francisco de Paula

GOIÂNIA, GO

2022

C6506m Coelho, Gustavo Rodrigues.

O método PPP de posicionamento GNSS: desempenho e perspectivas / Gustavo Rodrigues Coelho, Mariana Soares Barreira Alves. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2022.
117 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Valdeir Francisco de Paula.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

Inclui apêndices.

1. Sistemas de Posicionamento. 2. Posicionamento por Ponto Preciso. 3. Motores de indução. I. Alves, Mariana Soares Barreira. II. Paula, Valdeir Francisco de (orientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 526.1

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

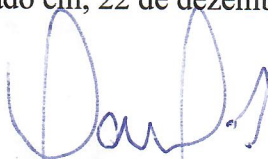
TERMO DE APROVAÇÃO

Gustavo Rodrigues Coelho
Mariana Soares Barreira Alves

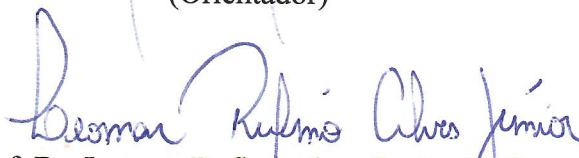
O MÉTODO PPP DE POSICIONAMENTO GNSS: DESEMPENHO E PERSPECTIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

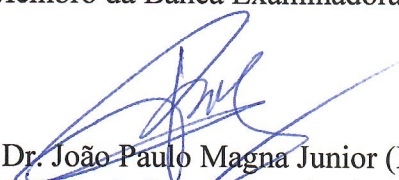
Aprovado em, 22 de dezembro de 2022.



Prof. Dr. Valdeir Francisco de Paula (IFG)
(Orientador)



Prof. Dr. Leomar Rufino Alves Junior (IFG)
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Dr. João Paulo Magna Junior (IFG)
(Membro da Banca Examinadora)

GOIÂNIA, GO

2022

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus por todas as graças que tem feito em nossas vidas, pela finalização desse trabalho e por nos dar a oportunidade em ter resiliência, força e determinação para quebrar todas as barreiras da vida.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr Valdeir Francisco de Paula por toda a orientação, correções, ensinamentos e paciência ao longo do trabalho, permitindo melhor desempenho para a sua conclusão. Tem todo o nosso respeito e admiração.

Agradecemos à Prof. Marina Alberti Macedo, por toda ajuda, broncas, conselhos e alegrias durante a elaboração do trabalho, foi uma das melhores experiencias em educação que já tivemos.

Ao Instituto Federal de Goiás (IFG) que foi essencial no nosso processo de formação, contribuindo para o crescimento profissional e pessoal.

Aos nossos pais Simião Alves Glória, Irenice Soares Barreira, Alcir de Freitas Coelho e Maria das Graças Rodrigues Pinto, por toda a minha criação, educação, apoio e investimentos. Por sempre acreditarem em nós e nos apoiarem nos momentos difíceis. São nossos verdadeiros anjos da guarda, sem eles tudo isso não seria possível.

Aos nossos irmãos Carlos Soares Barreira Alves, Rodrigo Soares Barreira Alves, Guilherme Rodrigues Coelho e Thamylla Rodrigues Coelho, por toda influência, admiração e incentivos. São pessoas pelas quais nos espelhamos durante as nossas vidas

A namorada Vitória Aguiar Vaz e sua família, por todo o incentivo, apoio e acolhimento. Com ela eu passei e passo os melhores dias da minha vida, onde eu posso desabafar, me sentir livre e capaz em seguir em frente. Minha felicidade é somada com a dela, tornando uma só. Obrigado por ser quem você é e por ter feito a diferença em minha vida e por me levantar nos momentos em que mais precisei.

Aos nossos amigos, por todas as conversas, descontrações, conselhos e momentos maravilhosos. Sabemos que podemos contar com cada um deles para a vida.

Ao jogo *The Last of Us*, por nos ensinar sobreviver nos piores momentos e por acreditar que haverá algo para qual vale a pena lutarmos.

*If somehow, the lord gave me a second chance at that
moment... I would do it all over again.*

The last of us

RESUMO

O avanço das tecnologias a partir de 1960 e a integração dos sistemas de posicionamento, na década de 2010, tem aumentado o interesse em realizar o posicionamento de feições terrestres com elevada acurácia. Nesse contexto, existem diversos métodos de realizar o processamento de dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que possibilitam atingir níveis de elevada precisão e acurácia, um deles é o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). É neste cenário, que o objetivo do trabalho de analisar comparativamente as diferentes soluções *online* e sistema *desktop* utilizando o método de PPP considerando as variáveis tempo de ocupação, diferentes taxas de gravação e multi-constelações, com a finalidade de verificar a influência dessas nos resultados estimados. Foram realizadas várias campanhas de processamento utilizando como referência as coordenadas da estação GOGY pertencente a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Foram realizados os processamentos em cada uma das plataformas empregando as variáveis propostas e seus resultados estimados foram compatibilizados com o sistema de referência e épocas da estação GOGY, com a finalidade de analisar a acurácia dos resultados estimados coerentemente. As plataformas *online* utilizadas foram: AUPOS, OPUS, CSRS – CANADÁ, IGN – PPP e IBGE - PPP e *desktop*: RTKLIB e WaSoft. Os principais resultados demonstraram que as variáveis tempo de ocupação, máscara de elevação e multiconstelações tiveram influência nos resultados. A taxa de gravação demonstrou não ter nenhuma influência na acurácia dos resultados. Por meio do tempo de ocupação, percebeu-se uma melhora nos resultados após 90 minutos de observação. O uso de máscara de elevação demonstrou diferenças milimétricas na acurácia dos resultados. O uso da integração de constelações potencializou a acurácia dos resultados e demonstrou ser promissor pela quantidade de cobertura de dados. O destaque das plataformas *online* foram o IBGE – PPP e o CSRS-CANADÁ, apresentando acurácias inferiores a 0,01 centímetros em pouco tempo de observação. O destaque das plataformas *desktop* foi pelo RTKLIB, por sua quantidade de possibilidades opcionais e manuseio de dados.

Palavras chaves: Posicionamento por Ponto Preciso. *Online*. *Desktop*. Acurácia.

ABSTRACT

The advance of technologies since 1960 and the integration of positioning systems in the 2010s have increased interest in positioning terrestrial features with high accuracy. In this context, there are several methods of performing the processing of GNSS (Global Navigation Satellite System) data that make it possible to achieve levels of high precision and accuracy, one of which is the Precise Point Positioning (PPP) method. It is in this scenario that the objective of the work of comparatively analyzing the different online solutions and desktop system using the PPP method considering the variables occupancy time, different recording rates and multi-constellations, in order to verify the influence of these on the estimated results. Several processing campaigns were carried out using as reference the coordinates of the GOGY station belonging to RBMC (Brazilian Continuous Monitoring Network). The processing was carried out in each of the platforms using the proposed variables and their estimated results were compatible with the reference system and times of the GOGY station, in order to analyze the accuracy of the results consistently estimated. The online platforms used were: AUPOS, OPUS, CSRS - CANADA, IGN - PPP and IBGE - PPP and desktop: RTKLIB and WaSoft. The main results showed that the variables time of occupation, elevation mask and multiconstellations influenced the results. The recording rate was shown to have no influence on the accuracy of the results. Through the time of occupation, there was an improvement in the results after 90 minutes of observation. The use of lifting mask showed millimetric differences in the accuracy of the results. The use of constellation integration enhanced the accuracy of the results and proved to be promising by the amount of data coverage. The highlight of the online platforms were IBGE - PPP and CSRS-CANADA, presenting accuracy slower than 0.01 centimeters in a short time of observation. The highlight of desktop platforms was by RTKLIB, for its amount of optional possibilities and data handling.

Keywords: Precise Point Positioning. Online. Desktop. Accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação GPS.	22
Figura 2 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação GLONASS.....	24
Figura 3 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação GALILEO.....	25
Figura 4 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação BEIDOU.....	26
Figura 5 - Representação da Pseudodistância.	29
Figura 6 - Representação da Fase da Onda Portadora.....	30
Figura 7 - Representação da Dupla Diferença.....	31
Figura 8 - Efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS.	34
Figura 9 - Representação dos sinais Refletidos ou Multicaminhamento.	35
Figura 10 - Simples diferença entre satélites.....	40
Figura 11 - Interpretação geométrica das ambiguidades.....	46
Figura 12 - Esquema de Solução de Ambiguidades.....	47
Figura 13 - Interface CSRS – PPP.....	59
Figura 14 - IBGE Posicionamento por Ponto Preciso.....	61
Figura 15 - Interface AUSPOS.....	64
Figura 16 - Interface OPUS.....	66
Figura 17 - Interface IGN.....	68
Figura 18 - Interface do Sistema RTKLIB – PPP.	70
Figura 19 - Janela para Pós processamento de Dados, em PPP.	71
Figura 20 - Janela para opções de parâmetros do Sistema RTKLIB - PPP.....	71
Figura 21 - Interface gráfica do <i>WaSoft</i> – WAPPP.....	73
Figura 22 - Localização da área de estudo – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.	75
Figura 23 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados no estudo.....	78
Figura 24 - Fluxograma - Processo de transformações de referencial realizadas para compatibilizar os sistemas de referência	82

Figura 25 - Comportamento das REQMs, obtidas nas diversas plataformas, de acordo com o tempo de ocupação e empregando apenas a constelação GPS.	87
Figura 26 - Comportamento das REQMs, obtidas por meio do sistema RTKLIB, de acordo com os diferentes graus de máscara de elevação (10° - 15°), empregando apenas a constelação GPS.	90
Figura 27 - Comportamento das REQMs, obtidas por meio do sistema RTKLIB, de acordo com os diferentes graus de máscara de elevação (10° - 15°), empregando apenas a constelação GPS.	90
Figura 28 - Comportamento das REQMs, obtida pela plataforma IBGE - PPP, empregando as constelações GPS e GPS + GLONASS.....	92
Figura 29 - Comportamento das REQMs, obtida pela plataforma RTKLIB - PPP, empregando as constelações GPS, GPS + GLONASS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.	93
Figura 30 - Comportamento das REQMs, obtida pela plataforma WASOFT - PPP, empregando as constelações GPS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.....	94
Figura 31 - Comportamento das REQMs, obtida pela plataforma - PPP, empregando as constelações GPS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.....	96
Figura 32 - Comportamento das REQMs, obtida pela plataforma - PPP, atribuindo o PPP-AR empregando as constelações GPS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação das características entre as constelações GPS, GLONASS, GALILEO E BEIDOU.	27
Quadro 2 - Tipos de Efemérides Precisas.	28
Quadro 3 - Características do SIRGAS2000.....	52
Quadro 4 - Parâmetros de transformação, de ITRF2014 para ITRF2000 época 2010,0.	55
Quadro 5 - Parâmetros técnicos da solução <i>online</i> CSRSC – PPP.	59
Quadro 6 - Parâmetros técnicos da solução <i>online</i> IBGE – PPP.	62
Quadro 7 - Parâmetros técnicos da solução <i>online</i> AUSPOS – PPP.	65
Quadro 8 - Parâmetros técnicos da solução <i>online</i> OPUS.	67
Quadro 9 - Parâmetros técnicos da solução <i>online</i> IGN – PPP.....	69
Quadro 10 - Parâmetros técnicos do sistema <i>desktop</i> RTKLIB – PPP.	72
Quadro 11 - Parâmetros técnicos do sistema <i>desktop</i> WaSoft – WAPPP.	74
Quadro 12 – Organização dos dados para o processamento pelo método PPP.....	80
Quadro 13 – Classificação das plataformas <i>online</i> e <i>desktop</i> empregando a utilização da constelação GPS.	99
Quadro 14 – Classificação das plataformas <i>online</i> e <i>desktop</i> empregando a utilização das constelações GPS +GLONASS.....	99
Quadro 15 – Classificação das plataformas <i>online</i> e <i>desktop</i> empregando a utilização das constelações GPS +GLONASS+GALILEO+BEIDOU.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxas de resolução de ambiguidades.....	98
---	----

LISTA DE NOMES ESTRANGEIROS E SIGLAS

APREF	<i>Asia-Pacific Reference Frame</i> (Quadro de Referência da Ásia-Pacífico)
AS	<i>Anti-Spoofing</i> (Antifalsificação)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código Padrão Americano para troca de informações)
AUSPOS	<i>Australian Processing Online Service</i> (Serviço Online de Processamento Australiano)
BDS	Beidou
C/A	<i>Standard Positioning Service</i> (Serviço de Posicionamento Padrão)
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por divisão de Código)
CIGNET	<i>Cooperative International GPS Network</i> (Rede GPS Cooperativa Internacional)
CNSA	<i>China National Space Administration</i> (Administração Espacial Nacional da China)
CODE	<i>Center for Orbit Determination IN Europe</i> (Centro de Determinação de Órbita na Europa)
CORS	<i>Continuously Operating Reference Station</i> (Estação de Referência de Operação Contínua)
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CS	<i>Commercial Service</i> (Serviço Comercial)
CSRS	<i>Online Global GPS Processing Service</i> (Serviço de Processamento GPS Online)
DCB	<i>Differential Code Bias</i> (Viés de Código Diferencial)
DD	Dupla Diferença
DOD	Departamento de defesa dos Estados Unidos
E	Easting (Este)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo)
EMQ	Erro Médio Quadrático

ESA	<i>European Space Agency</i> (Agência Espacial Europeia)
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Estadual Paulista – SP
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência)
GAPS	<i>GPS Analysis and Positioning Software</i> (Software de Análise e Posicionamento GPS)
GCS	<i>Ground Control Segment</i> (Segmento de Controle do Solo)
GDA94	<i>Geocentric Datum of Australia 1994</i> (Datum Geocêntrico da Austrália)
GE	<i>Research Group in Astronomy and Geomatics</i> (Grupo de Pesquisa em
GE	Astronomia e Geomática)
GFZRNX	<i>RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox</i> (Caixa de ferramentas de manipulação e conversão de dados RINEX GNSS)
GIM	<i>Global Ionospheric Map</i> (Mapa Global da Ionosférica)
GLAB	<i>GNSS- Lab Tool</i> (Ferramenta de Laboratório GNSS)
GMS	<i>Ground Mission Segment</i> (Segmento de Missão Terrestre)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GNU	<i>General Public License</i> (Licença Pública Geral)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
GPT	<i>Global Pressure and Temperature</i> (Pressão e Temperatura Globais)
GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i> (Quadro de Referência Terrestre Galileo)
h	Altitude geométrica ou elipsoidal
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferência de Hpertexto)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i> (Rotação da Terra Internacional e Serviço de Sistemas de Referência)
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
IGN	<i>Institut National de l'information Géographique et Forestière</i> (Instituto Nacional de Informação Geográfica e Florestal)

IGR	<i>IGS Rapid Product</i> (Efemérides Rápidas IGS)
IGS	<i>Internacional GNSS Service</i> (Serviço GNSS Internacional)
IGU	<i>IGS Ultra-rapid Products</i> (Efemérides Ultrarrápidas IGS)
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i> (Rede de Referência Terrestre Internacional)
L0	Combinação Linear Livre da Ionosfera
L1	Portadora L1
MBOC	<i>Multiplexed binary offset carrier</i> (Portadora offset binária multiplexada)
MGEX	<i>Multi-GNSS Experiment and Pilot Project</i> (Experimento Multi – GNSS e Projeto Piloto)
MHZ	<i>Mega Hertz</i>
MVC	Matriz variância e Covariância
N	(Norte)
NAD83	<i>North America Datum of 1983</i> (Datum Norte Americano de 1983)
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i> (Agência Nacional de Inteligência Geoespacial)
NGS	<i>National Geodetic Survey</i> (Pesquisa Geodésica Nacional)
NRCAN	<i>Natural Resources Canada</i> (Recursos Naturais do Canadá)
NSRS	<i>National Spatial Reference System</i> (Sistema Nacional de Referência Espacial)
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i> (Transporte em Rede do RTCM via Protocolo da Internet)
Nw	<i>Narrow-lane</i> (Faixa Estreita)
ODTS	<i>Orbit Determination and Time Synchronization</i> (Determinação de Órbita e sincronização de Tempo)
OPUS	<i>Online Positioning User Service</i> (Serviço de Usuário de Posicionamento Online)
PCV	<i>Phase Center Variation</i> (Variação do Centro de Fase)
PNT	Previsão Numérica do Tempo
PPP	<i>Precise Point Positioning</i> (Posicionamento por Ponto Preciso)
PPP-AR	<i>Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution</i> (Posicionamento por Ponto preciso com Solução de Ambiguidades)

PPS	(Serviço de Posicionamento Preciso)
PRIDE	<i>Positioning Racers to Image & Decipher the Earth</i> (Posicionando pilots para imaginar e decifrar a Terra)
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i> (Ruído Pseudo Aleatório)
PRS	<i>Public Regulated Service</i> (Serviço Público Regulado)
PZ-90	<i>Parametry Zemli 1990</i> (Parametria Zemli 1990)
QPSK	<i>Quadrature phase shift keying</i> (Chaveamento de mudança de fase em quadratura)
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i> (Formato de Troca Independente do Receptor)
RSGPS	<i>Rapid-Static GPS</i> (GPS Rápido-estático)
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime services</i> (Rádio Comissão Técnica de Serviços Marítimos)
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> (Posicionamento em Tempo Real)
SA	<i>Selective Availability</i> (Disponibilidade Seletiva)
SD	Simple Diferença
SO	Serviço Aberto
SPS	<i>Standard Positioning Service</i> (Serviço de Posicionamento Padrão)
TZW	Componente úmida da troposfera
UNB	Universidade de <i>New Brunswick</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UPC	<i>Universitat Politecnica de Catalunya</i> (Universidade Politécnica da Catalunha)
UPD	<i>Uncalibrated Phase Delays</i> (Atrasos de fase não Calibrados)
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> (Tempo Universal Coordenado)
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i> (Universal Transversa de Mercator)
VMF	<i>Vienna Mapping</i> (Mapa de Viena)
WGS84	<i>World Geodetic System</i> (Sistema Geodésico Mundial)
WL	<i>Wide-Lane</i> (Faixa Larga)
ZTD	<i>Zenital Tropospheric Delay</i> (Atraso Troposférico Zenital)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo geral	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3. REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 Posicionamento GNSS	21
3.1.2 GLONASS – Sistema Global de Navegação por Satélite	22
3.1.3 GALILEO – Sistema de Navegação por Satélite da União Europeia	24
3.1.4 BEIDOU - Sistema de Posicionamento Global por Satélite Chinês	25
3.1.5 IGS (<i>International GNSS Service</i>).....	27
3.1.5.1 MGEX (<i>The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project</i>)	28
3.1.6 Observáveis GNSS	29
3.1.7 Erros relacionados aos satélites	30
3.1.8 Erros relacionados a Propagação de Sinal	32
3.1.8.1 Refração Troposférica	32
3.1.8.2 Refração Ionosférica.....	33
3.1.8.3 Erros de Multicaminhos	34
3.1.8.4 Erros de Perda de Ciclo	35
3.1.8.5 Erros de Rotação da Terra	37
3.1.9 Erros relacionados com a antena e o receptor	37
3.1.10 Combinações lineares das observáveis GNSS.....	38
3.1.11 Simples diferença	40
3.1.12 Dupla diferença.....	42
3.3 Aprimoramentos do método - (PPP)	45
3.3.1 Posicionamento por Ponto Preciso com solução de ambiguidades (PPP-AR).....	45

3.3.2 Estratégias para a soluções de Ambiguidades	46
3.3.3 Estratégias para a soluções de ambiguidades com estimativa de UPD	47
3.3.4 Estratégia para a soluções de ambiguidades com dissociação dos relógios	48
3.3.5 Aperfeiçoamentos das estratégias para a soluções de Ambiguidades e algumas perspectivas	50
3.4 Sistemas de Referência Modernos.....	50
3.4.1 ITRF 2014	50
3.4.2 SIRGAS	51
3.4.3. Modelo de Velocidades	52
3.4.4 Parâmetros, Transformação e Atualização de Coordenadas	53
3.5 Serviços <i>online</i> e sistema <i>desktop</i> de processamento do PPP	56
3.5.1 Serviços <i>online</i> de Processamento PPP que foram avaliadas nesse trabalho	57
3.5.1.1 CSRS (<i>Canadian Spatial Reference System</i>) PPP	57
3.5.1.2 IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – PPP	60
3.5.1.3 AUSPOS (<i>Australian Processing Online Service</i>).....	63
3.5.1.4 OPUS – <i>Online Positioning User Service</i>	65
3.5.1.5 IGN (<i>Institut National de l'information Géographique et Forestière</i>) – PPP	67
3.5.2 Soluções <i>desktop</i> de Processamento PPP que foram avaliadas nesse trabalho	69
3.5.2.1 RTKLIB – PPP	69
3.5.2.2 WaSoft – WAPPP (<i>International Association of Geodesy: Positioning & Applications Sub – Commission</i>).....	72
4. METODOLOGIA.....	75
4.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo	75
4.2 Material.....	76
4.3 Procedimentos metodológicos.....	77
4.3.1 Definição das variáveis de posicionamento.....	79
4.3.2 Aquisição dos dados da estação GOGY - RBMC	79

4.3.3	Processamento pelo método PPP - soluções <i>online</i> e sistema <i>desktop</i>	80
4.3.4	Compatibilização de sistemas de referência	81
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1	Análise dos resultados com diferentes taxas de Gravação	85
5.2	Análise dos resultados com diferentes tempos de ocupação	85
5.3	Análise dos resultados com diferentes máscaras de elevação	89
5.4	Análise dos resultados com multi-constelações GNSS	Erro! Indicador não definido.
5.5	Análise dos resultados com a utilização do PPP-AR (solução de ambiguidades)....	91
5.6	Rankeamento das soluções <i>online</i> e sistemas <i>desktop</i>	98
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	100
6.1	Considerações Finais	100
6.2	Perspectivas	102
6.3	Recomendações para trabalhos futuros	102
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICES	111

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias a partir de 1960 e a integração dos sistemas de posicionamento, na década de 2010, tem aumentado o interesse em realizar o posicionamento de feições terrestres com elevada acurácia. Nesse contexto, a tecnologia espacial que vem sendo muito empregada - o GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) - tem revolucionado as atividades relacionadas com o posicionamento (ALVES *et al.*, 2013).

Com base nisso, existem diversos métodos de realizar o processamento de dados GNSS que possibilitam atingir níveis de elevada precisão e acurácia (CRUZ FERREIRA *et al.*, 2022). Um desses métodos que vem evoluindo e ganhando notoriedade, principalmente pela facilidade nos pós-processamentos de dados, é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

O PPP é um método de posicionamento absoluto, que utiliza apenas um receptor e proporciona um elevado nível de precisão, em um período de tempo considerado pequeno. A precisão e a acurácia desse método dependem da modelagem de alguns erros que estão relacionados a taxa de ocupação, a taxa de gravação, as constelações utilizadas, a cobertura de satélites e a presença de obstruções (BOLBOL *et al.*, 2017).

O PPP tem alcançado maior popularidade devido ao aprimoramento constante da técnica e aos resultados oferecidos pelos denominados serviços de PPP, nos modos *online* e sistema *desktop*. Alguns dos serviços disponibilizados para o cálculo do PPP, no modo *online* (via internet) são IBGE-PPP; OPUS; AUSPOS *online GPS Processing* e o GAPS e, no modo *desktop*, o *RTKlib* e *WaSoft* – WAPPP (TAKASU, 2009).

De acordo com Mendez Astudillo *et al.* (2018), o método PPP vem se destacando, na geodésia, em razão da sua praticidade no uso e em diversos estudos comparativos. Com o Posicionamento por Ponto Preciso pode-se obter a precisão ao nível milimétrico, com sessões de observação de 24 (vinte e quatro) horas. No entanto, não é usual utilizar esse tempo de duração em levantamentos topográficos durante a coleta dos dados (BULBUL *et al.*, 2020). Por isso, faz-se necessário realizar uma investigação, simulando levantamentos de diferentes intervalos de tempo, para identificar as variáveis que impactam na precisão e acurácia do resultado final.

Diversos estudos têm sido realizados procurando relacionar novas perspectivas tecnológicas ao método PPP. Tais estudos têm por intuito mostrar novas formas de

utilização do método PPP e respectivos avanços em precisão e acurácia, encontrados. Dentre estes estudos, pode-se citar, o método PPP-AR, que realiza a determinação das soluções de ambiguidade, presentes nas medições da fase da onda portadora, possibilitando que a precisão aumente no método PPP (GENG *et al.*, 2019).

Outro exemplo de estudo propõe alinhar o processamento do método PPP com diversas constelações podendo contribuir para uma geometria adequada entre satélites e resultar em estimativas superiores de posicionamento. Com base no cenário da existência de diversas constelações e, respectivamente, vários satélites operacionais, o IGS (*International GNSS Service*), ampliou suas pesquisas afim de coletar e analisar dados para determinar as órbitas precisas dessas constelações utilizando a plataforma MGEX (*Multi-GNSS Experiment*) (RAIANE, 2019).

Com base no exposto, verifica-se a importância de compreender essas novas perspectivas e avaliar as novas utilizações do método PPP, quanto ao que podem, ou não, oferecer ao usuário, como verificar a qualidade da aplicação dessas novas técnicas em relação aos resultados aferidos e viabilizar novas estratégias que possibilitem otimizar diversas atividades no âmbito da engenharia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar comparativamente as diferentes soluções *online* e sistema *desktop* utilizando o método de Posicionamento por Ponto Preciso considerando as variáveis tempo de ocupação, taxa de gravação e multi-constelações.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura quanto ao estado da arte do método de Posicionamento por Ponto Preciso;
- Examinar o resultado dos processamentos *online* e sistema *desktop* utilizando o método PPP sob diferentes tempos de ocupação, diferentes taxas de gravação e máscara de elevação;
- Examinar o resultado dos processamentos *online* e sistema *desktop* utilizando o método PPP considerando a combinação de diferentes constelações GNSS;
- Identificar as variáveis que mais influenciam na precisão utilizando o método PPP;
- Comparar o resultado dos processamentos *online* e sistema *desktop* utilizando o método PPP; e,
- Comparar o resultado dos processamentos *online* e sistema *desktop* utilizando o método PPP em relação ao método PPP-AR.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Posicionamento GNSS

As tecnologias espaciais e as atividades de posicionamento sofreram um avanço tecnológico com o desenvolvimento da Geodésia Espacial, propiciando que a posição de um objeto fosse capaz de ser determinada por meio de um sistema denominado GNSS - *Global Navigation Satellite System* (JÚNIOR *et al.*, 2016).

O sistema GNSS evoluiu para várias constelações de satélites artificiais vinculados a países e épocas distintas. A partir da década de 1970, os sistemas que deram início a essa evolução foram o Sistema de Posicionamento Global (GPS) e o *Globalnava Naigatsionnava Sputnikovava Sistema* (GLONASS), seguidos pelos sistemas Beidou (BDS), no ano 2000 e Galileo, no ano 2005. Todos estes sistemas foram incorporados constituindo o sistema GNSS (MONICO, 2008) que ainda se encontram em desenvolvimento constante. Há ainda sistemas que são utilizados para melhorar a performance do GNSS, como os Sistemas de Aumento Baseados em Satélites (SBAS)¹ e os Sistemas de Aumento Baseados no Solo (GBAS) (RAIANE, 2019).

3.1.1 GPS – (Sistema de Posicionamento Global)

O GPS é o sistema mais conhecido do mundo, por ter sido o primeiro a ser desenvolvido e pela facilidade e praticidade na forma de posicionamento. Este sistema de rádio navegação foi criado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD), para ser utilizado pelas Forças Armadas Norte Americanas, como principal sistema de navegação, aproveitando a ausência da necessidade de intervisibilidade entre as estações (LAGO *et al.*, 2002).

O princípio do sistema GPS baseia-se no conhecimento das coordenadas de três satélites, desde que não estejam no mesmo plano, e o conhecimento das distâncias com o receptor utilizado pelo usuário para se determinar as coordenadas. É fundamental a medida de um quarto satélite devido à dessincronização entre os relógios dos satélites e

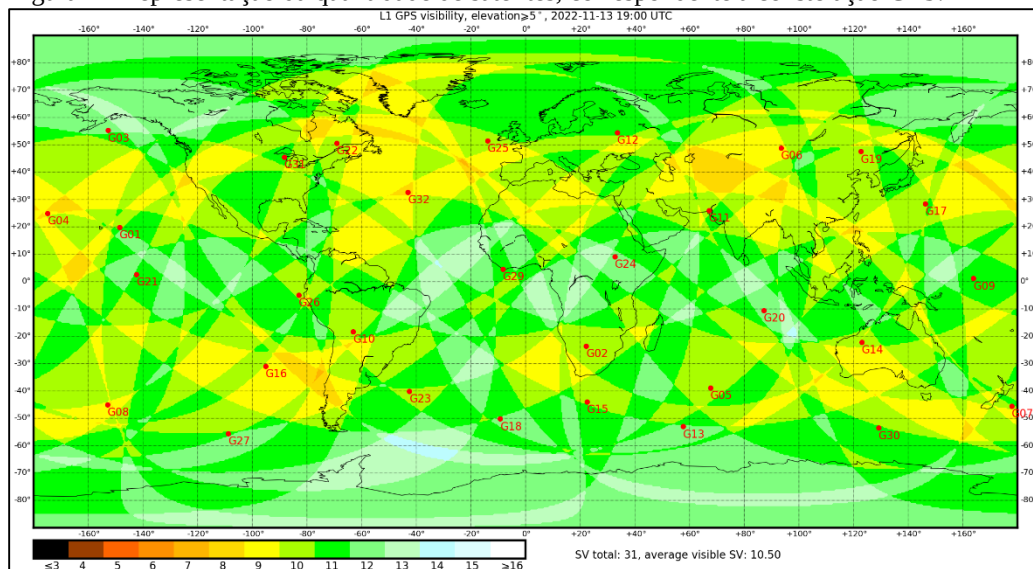
¹ São exemplos de SBAS, o WAAS (*Wide Area Augmentation System* – EUA), o EGNOS (*Geostationary Navigation Overlay Service Europeia*) e o GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation* – Índia) (RAIANE, 2019).

o do usuário. Consequentemente, são necessários pelo menos quatro satélites para determinar a posição da antena do usuário (SEEBER, 1993; MONICO, 2008).

O sistema proporciona diversos tipos de serviço, tais como o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) e o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS). O primeiro era o único disponibilizado para todos os usuários devido à sua maior limitação em relação ao segundo, que possuía os processos *Anti-Spoofing* (AS) e o *Selective Availability* (SA), cuja acurácia era limitada. Contudo, no ano 2000, as operações do SA foram desativadas. Em termos de sinal, o sistema consistia inicialmente das portadoras L1 e L2, e a partir de 2010, foi incorporada a portadora L5 (MONICO, 2008).

Nos dias atuais, a constelação do GPS possui um conjunto de 31(trinta e um) satélites operacionais (Figura 1), sendo 24 (vinte e quatro) principais e 7 (sete) extras. Eles estão organizados em seis planos orbitais, igualmente espaçados ao redor da Terra, com inclinação de 55° em relação ao equador. Cada plano contém quatro satélites em órbita quase circular, a uma altitude de aproximadamente 20.200 km, possuindo um período orbital de aproximadamente 12 (doze) horas siderais (GLONASS-IAC, 2022).

Figura 1 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação GPS.



Fonte: GLONASS-IAC (2022).

3.1.2 GLONASS – Sistema Global de Navegação por Satélite

O GLONASS foi criado pela União Soviética, na década de 1970, para fins militares, com o objetivo de obter dados de posicionamento global em tempo real, independentemente das condições climáticas. Com o passar do tempo, após vários anúncios do governo russo, o sistema foi estendido a todos os usuários, em nível mundial (MONICO, 2008).

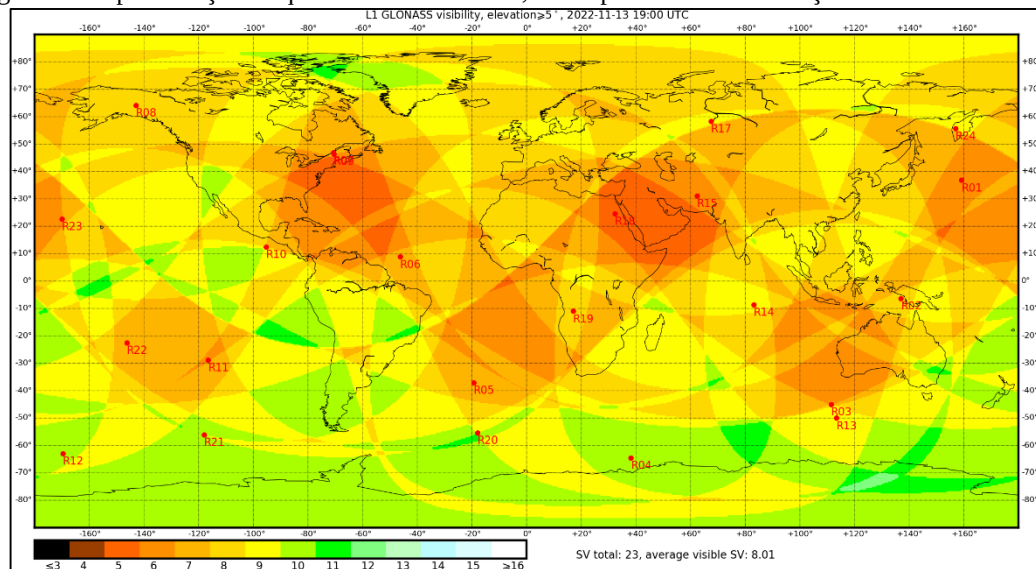
Este sistema possui uma inclinação maior, em relação ao Equador, do que o GPS, proporcionando melhor cobertura para altas latitudes, diferindo-o um pouco da cobertura global do sistema anterior, apresentando um serviço semelhante ao posicionamento simples no SPS do GPS. Em relação as frequências, este sistema utiliza a tecnologia *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), onde cada satélite opera em uma frequência diferente usando as portadoras L1 e L2, e alguns satélites, transmitem as portadoras L3, com base na tecnologia CDMA (SEEBER, 2003, MONICO, 2008 e SETTI, 2019).

As informações de posição e tempo dos satélites (causadas por perturbações gravitacionais do Sol e da Lua) são fornecidas pelas efemérides transmitidas - *Parametry Zemli* 1990 (PZ-90), estando estas informações contidas em intervalos de 30 minutos.

Segundo Setti (2019), em 1995, após esse sistema ter atingido todas as constelações, houve um período de declínio, quando apenas sete desses satélites ficaram ativos.

A constelação do GLONASS contém 25 (vinte e cinco) satélites, sendo 22 (vinte e dois) operacionais, 1 (hum) em fase de comissionamento e 2 (dois) em reserva orbital e fase de testes (Figura 1). Estes satélites estão dispostos em três planos orbitais, com órbita quase circular e altura de aproximadamente 19.100 km. Cada satélite do sistema tem um período de revolução de aproximadamente 11 (onze) horas e 15 (quinze) minutos siderais, e inclinação de 64,8° em relação ao equador (GLONASS-IAC, 2022).

Figura 1 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação GLONASS.



Fonte: GLONASS-IAC (2022).

3.1.3 GALILEO – Sistema de Navegação por Satélite da União Europeia

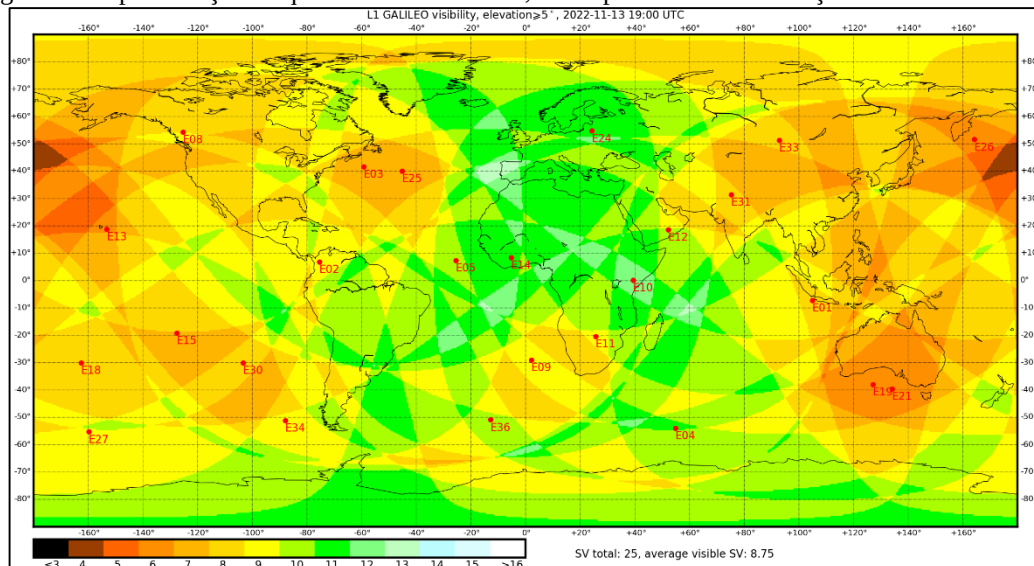
O sistema Galileo foi criado pela União Europeia, devido ao governo dos EUA, ter tomado por decisão, não permitir o acesso de outras nações para controlar as configurações do GPS. De fato, o Galileo foi iniciado em 2005, sendo um sistema de controle civil, aberto e global, compatível com o GPS (MONICO, 2008).

O Galileo oferece três tipos de serviços: *Open Service* (OS), acessível ao público em geral; *Public Regulated Service* (PRS), restrito a usuários autorizados pelo governo; e *Commercial Service* (CS), também criptografado. Além disso, o sistema dá suporte a um serviço de busca e resgate internacional, liderado pelos EUA, Rússia, Canadá e França (SETTI, 2019).

O segmento de controle deste sistema é composto pelo *Ground Control Segment* (GCS) — controle dos satélites, incluindo uma rede de estações que proporciona cobertura global — e pelo *Ground Mission Segment* (GMS) — que monitora os sinais do Galileo, gera as mensagens de navegação e as remete para os satélites. O GCS está localizado em *Oberpfaffenhofen*, na Alemanha, e o centro do GMS está em Fucino, na Itália (SETTI JÚNIOR, 2019). No presente momento, a constelação Galileo possui 28 (vinte e oito) satélites operantes, sendo 25 (vinte e seis) distribuídos em três planos orbitais (Figura 2), inclinados a 56° em relação ao equador e a uma altura de 23.222 km.

O período orbital é de aproximadamente 14 (quatorze) horas siderais (GLONASS-IAC, 2022).

Figura 2 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação GALILEO.



Fonte: GLONASS-IAC (2022).

3.1.4 BEIDOU - Sistema de Posicionamento Global por Satélite Chinês

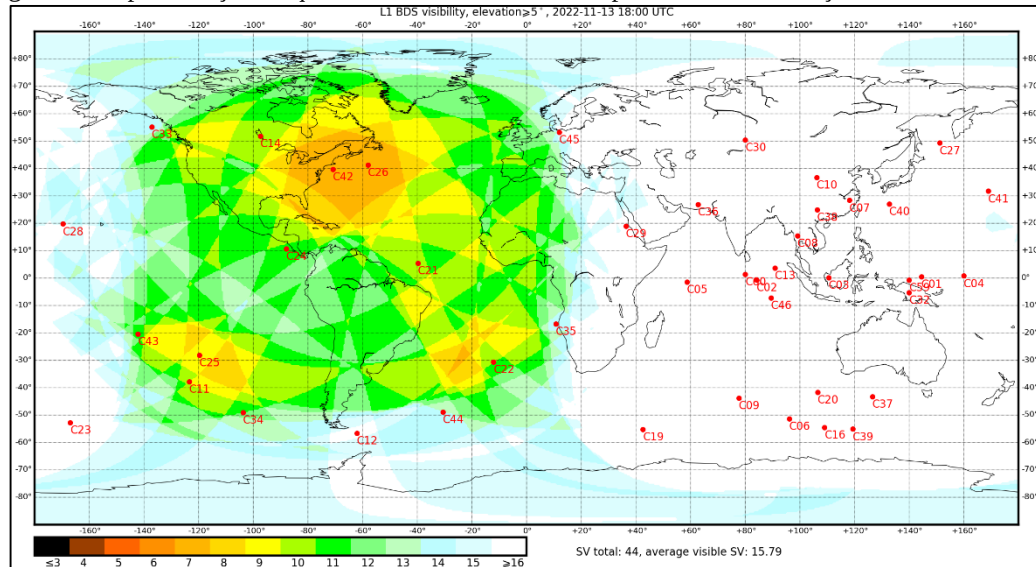
O Sistema BeiDou (*BeiDou Navigation Satellite System* - BDS) é um sistema de navegação e posicionamento por satélites chinês, com 44 (quarenta e quatro) satélites cobrindo a Terra. BeiDou foi introduzido pela primeira vez no início de 1980, e uma versão demo do sistema foi concluída em 2000, tornando-se o terceiro sistema de navegação operacional (ESA, 2022).

O sistema de navegação BeiDou-1 era uma constelação de quatro satélites com alcance de serviço de 70 ° a 140 ° de longitude leste e de 5 ° a 55 ° de latitude norte. O sistema oferecia serviços de posicionamento, cronometragem e mensagens instantâneas até sua desativação no final do ano 2012. A segunda fase, lançada em 2007, BeiDou-2 (BDS-2), possuía 16 (dezesesseis) satélites de navegação. Cinco dos 16 satélites foram colocados em órbita geoestacionária, cinco em órbita geossíncrona inclinada e os outros seis em órbita terrestre média. A constelação BDS-2 inclui, nos dias atuais, 16(dezesesseis) satélites (ESA,2022)

A CNSA (*China National Space Administration*) iniciou o desenvolvimento do mais recente sistema global de navegação por satélite, o Beidou-3 (BDS-3), em março de 2015, sendo colocado em órbita efetivamente em 23 de junho de 2020. Ele teve por intuito

para expandir seu escopo tornando-se compatível com os sistemas GPS , Glonass e Galileo. A constelação é composta por 49 (quarenta e nove) satélites, 44 (quarenta e quatro) dos quais estão em operação (Figura 3) para o propósito pretendido e 5 (cinco) usados para outras finalidades. A seguir, na Figura 3, a representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação BEIDOU.

Figura 3 - Representação da quantidade de satélites, correspondente a constelação BEIDOU.



Fonte: GLONASS-IAC (2022).

Um resumo da comparação das características entre as constelações GPS, GLONASS, GALILEO e BEIDOU é mostrado na figura seguinte.

Quadro 1- Comparação das características entre as constelações GPS, GLONASS, GALILEO E BEIDOU.

DESCRIÇÃO	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
País	EUA	Rússia	União Europeia	China
Número de Satélites usados para seu propósito	31	25	28	44
Plano Órbita	6	3	3	3
Inclinação da órbita	55°	64,8°	56°	55°
Altitude dos Satélites	20.200 Km	19.100 Km	23.222 Km	21.528 km
Período Orbital	11:58 hs	11:15 hs	14:04 hs	12:00 hs
Parâmetros do Elipsóide	a = 6.378.137,000	a = 6.378.136,000	a = 6.378.137,000	a = 6.378.137,000
	f = 1/298,2572	f = 1/298,25784	f = 1/298,25722	f = 1/298,25722
Sistema de Referência	WGS84	PZ-90	GTRF	CGCS2000
Sistema de Tempo	UTC (USNO)	UTC (CIS)	GST	UTC(NTSC)
Tipo de Sinal	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Frequência da portadora, MHz	L1: 1.575,42 MHz L2: 1.227,60 MHz L5: 1.176,45 MHz	L1: 1.602,00 MHz L2: 1.246,00 MHz L3: 1.202,00 MHz	E1: 1575,420 MHz E5: 1191,795 MHz E5a: 1176,45 MHz E5b: 1207,140 MHz E6: 1.238,75 MHz	B1 1.561,09 MHz B1 1.561,09 MHz

Fonte: Os autores (2022).

3.1.5 IGS (*International GNSS Service*)

É uma rede internacional que oferece serviços, dados e produtos GNSS. Por meio disso, para um posicionamento de melhor precisão, desenvolveu-se a produção de efemérides pós-processadas, conhecidas como efemérides precisas (CANTO *et al.*, 2019). Começou, então, o interesse em várias instituições civis para organizar uma rede civil (*Cooperative International GPS Network* — CIGNET), bem como o *International GNSS Service* (IGS), pois o *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) era o único a disponibilizar este tipo de serviço, inicialmente (MONICO, 2008).

O IGS entende-se como uma rede, constituída por centenas de estações distribuídas pelo mundo, que é incorporada também na rede CIGNET. A identificação das efemérides

precisas, arquivo que corresponde a 24 horas de observações, é dada pela sigla do centro que a produz, seguida da semana GPS, finalizando com o dia da semana (MONICO, 2008).

No momento atual, o IGS produz três tipos de efemérides e correções para o relógio dos satélites, conforme é mostrado na Quadro 2.

Quadro 2 - Tipos de Efemérides Precisas.

PRODUTOS		ACURÁCIA	LATÊNCIA	ATUALIZAÇÃO	INTERVALO
Transmitida	Órbita	~100 cm	Tempo real	-	10 seg.
	Relógio	~5 ns			
Ultrarrápida IGU Preditada	Órbita	~5 cm	Tempo real	03, 09, 15, 21 UTC	15 min.
	Relógio	~3 ns			
Ultrarrápida IGU Observada	Órbita	~3 cm	3 - 9 horas	03, 09, 15, 21 UTC	15 min.
	Relógio	~ 150 ps			
Rápida IGR	Órbita	~2,5 cm	17 - 41 horas	Diária (às 17 UTC)	15 min.
	Relógio	~75 ps			5 min.
Final IGS	Órbita	~2,5 cm	12 - 18 dias	Semanal (Quinta- feira)	15 min.
	Relógio	~75 ps			5 min./ 30 seg.

Fonte: IGS (2022).

3.1.5.1 MGEX (*The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project*)

Com a modernização do GNSS e o surgimento de novas constelações, o IGS ampliou as pesquisas de seus produtos e, em meados de 2011, criou-se um projeto experimental capaz de fornecer efemérides pós-processadas, voltada para as outras constelações, denominada MGEX (*Multi-GNSS Experiment*). Nos dias atuais, várias agências nacionais, universidades e outras instituições contribuem voluntariamente com pesquisas e melhorias para o MGEX.

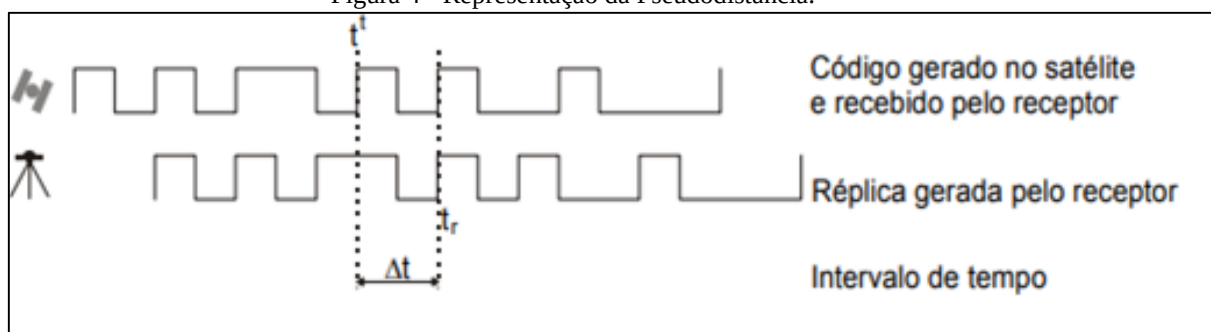
Por meio das observações da rede MGEX, são fornecidas a combinação e a validação de produtos de órbitas e relógios Multi-GNSS (*GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo QZSS e Navic*), a caracterização do segmento espacial GNSS (modelagem de parâmetros de orientação da Terra - EOPs, calibração de antenas, etc.), além da geração de produtos Multi-GNSS em tempo real (RAIANE 2019). Os produtos podem ser encontrados pelo o público por meio de um FTP (*File Transfer Protocol*) do centro CDDIS (*Crustal Dynamics Data Information System*), bem como em sites espelho, hospedados pela IGS, CODE e ENSG (*École Nationale des Sciences Géographiques*).

Os produtos disponibilizados são encontrados em versão 3 do RINEX por se tratar de uma versão consistente e criada especificadamente para suportar e distinguir as constelações com sinais diversos, permitindo a consideração das propriedades específicas dos sinais coletados e referenciados no mesmo sistema de referência, o IGS14 (Montenbruck et al. 2017).

3.1.6 Observáveis GNSS

Segundo Monico (2008), a posição, o tempo e a velocidade são determinadas por meio das observáveis básicas do GNSS, sendo elas a pseudodistância, a partir do código, e a fase da onda portadora. A primeira delas, conhecida como pseudodistância, corresponde a distância entre o satélite e o receptor, baseada nos códigos formados nos satélites e nos receptores. As observáveis não podem ser denominadas pela distância, pelo não sincronismo entre os relógios que geram os códigos no satélite e suas réplicas, que geram os códigos no receptor, sabendo-se que os osciladores (relógios) nos satélites dispõem de alta precisão, enquanto que os osciladores presentes nos receptores são, em geral, de menor qualidade (MONICO, 2008 *apud* MARQUES, 2012). A representação dessa diferença de ondas se encontra na Figura 5:

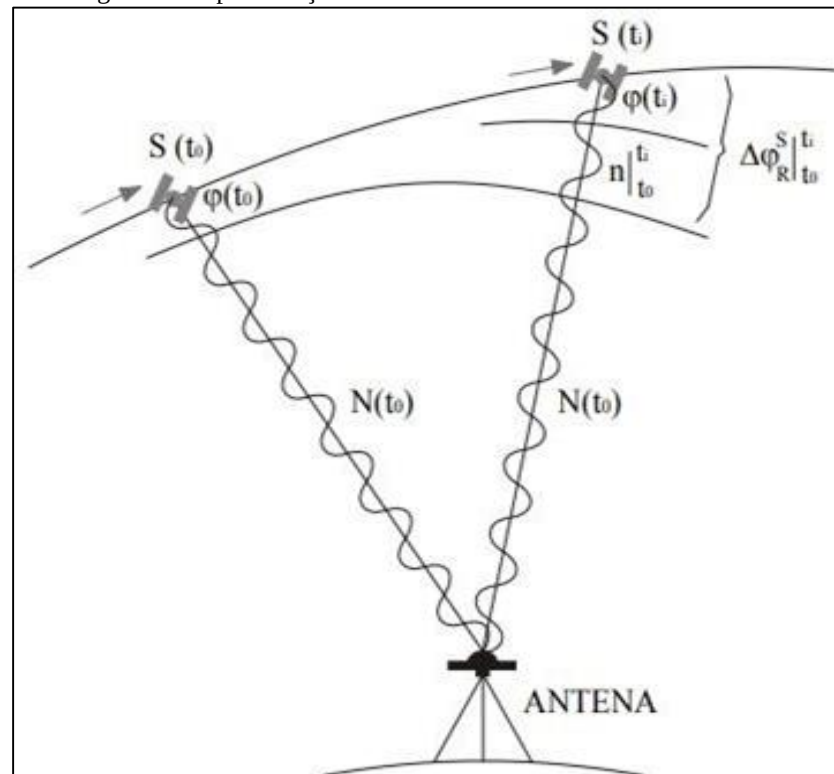
Figura 4 - Representação da Pseudodistância.



Fonte: Adaptado de Teunissen e Kleusberg (2012).

A fase da onda portadora estabelece melhor precisão do que a pseudodistância, sendo igual à diferença entre a fase do sinal gerada no satélite e recebida na estação e a fase do sinal gerado no receptor, ambos no instante de recepção, conforme é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Representação da Fase da Onda Portadora.



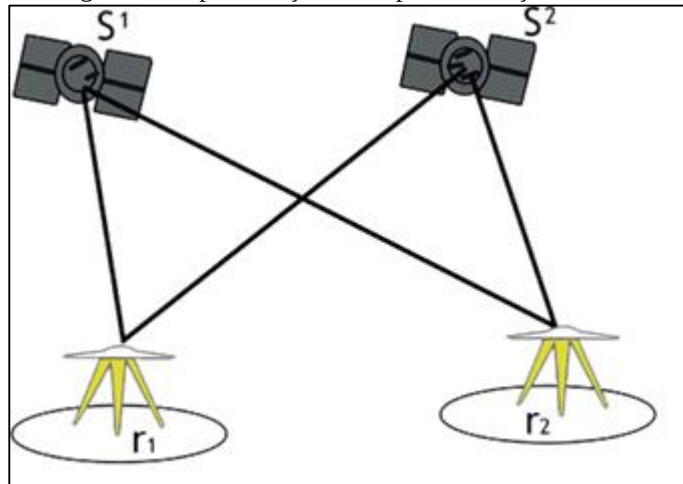
Fonte: Garnés (2001, apud SEJAS, 2005).

3.1.7 Erros relacionados aos satélites

De acordo com Monico (2008), as informações orbitais ou dados orbitais, são obtidos por meio das efemérides precisas, que são utilizadas para calcular as coordenadas dos satélites, consideradas constantes na realização do processo de correção e ajustamento dos dados. Portanto, ocorre a propagação dos erros orbitais, que estão presentes nas coordenadas, quase que diretamente para as coordenadas do usuário, se o posicionamento for feito por ponto, ou serão praticamente suprimidos no caso de se realizar o posicionamento relativo.

É importante ressaltar que, independentemente do posicionamento, pode existir a ocorrência de erros que diminuem a precisão à medida que o comprimento da linha de base aumente. Esse erro pode ser corrigido a partir da dupla diferença, por meio do posicionamento relativo (MONICO, 2008). A determinação da dupla diferença é realizada por meio da diferença de duas simples – sabendo-se que dois receptores diferentes rastreiam o mesmo satélite, faz-se a diferença das pseudodistâncias calculadas – conforme é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Representação da Dupla Diferença.



Fonte: Monico (2010).

Segundo Monico (2008), existem também os efeitos da relatividade, que consequentemente implica em uma aparente mudança na frequência dos relógios dos satélites em relação aos relógios terrestres, uma vez que se movem em velocidades diferentes e estão em campos gravitacionais distintos.

Vale lembrar que, o último erro relacionado ao satélite está diretamente alinhado ao de centro de fase da antena, em que as coordenadas estão referenciadas pelo centro de massa do satélite, enquanto que o ponto de referência da emissão dos sinais é o centro de fase da sua antena. Isso pode acarretar na redução da precisão na determinar das órbitas. Contudo, o IGS realiza o cálculo dos valores desses deslocamentos, por exemplo, em relação a várias antenas diferentes de receptores GNSS (MONICO, 2008).

3.1.8 Erros relacionados a Propagação de Sinal

3.1.8.1 Refração Troposférica

Os erros relacionados a propagação de sinal podem ser destacados como Refração Troposférica, Refração Ionosférica e erros de Multicaminho onde qualidade obtida no posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais sofre interferências, sendo o primeiro deles, em relação ao gradiente de concentração dos gases presentes na troposfera. Consequentemente gera um atraso no sinal, que ao ser projetado na direção zenital é denominado ZTD (*Zenital Tropospheric Delay* - Atraso Zenital Troposférico) (SAPUCCI, 2001).

Podemos definir, primeiramente, como refração troposférica, em que seus efeitos variam de poucos metros até 30 metros, dependendo do ângulo de elevação do satélite e da atmosfera, sendo uma oscilação na amplitude da onda eletromagnética (MATSUOKA, 2003). A propagação dessas ondas é influenciada pelo seu meio, e seus efeitos podem ser classificados em três.

O primeiro efeito está relacionado ao enfraquecimento da atmosfera, onde provoca uma diminuição da força das ondas eletromagnéticas, por meio das componentes da atmosfera, de modo que uma máscara de elevação abaixo de 15°, não é recomendada.

O segundo efeito está relacionado a cintilação troposférica que causa uma variação na amplitude da onda, nos primeiros quilômetros acima da Terra, devido o índice de refratividade atmosférica e suas irregularidades.

O último efeito está relacionado ao atraso troposférico, ocorre pela influência da atmosfera seca (hidrostática) – precisão lógica, alinhado com a variação da pressão atmosférica e a temperatura – e a úmida (vapor d'água atmosférica) – menor atraso, porém maior variação, portanto, precisão ruim (Mônico, 2008).

Portanto, é realizado um cálculo do atraso troposférico, onde se realizado uma aproximação da soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida, multiplicadas por suas respectivas funções de mapeamento. Sapucci (2001) demonstra de forma simplificada a Equação 1.

$$D_{TROPr}^s = D_{ZH} \cdot mh(E) + D_{ZW} \cdot mw(E) \quad (1)$$

Onde:

D_{TROPr}^s - Representa o atraso troposférico total para um ângulo de elevação (E) entre o satélite s e o receptor r;

D_{ZH} - Representa o atraso troposférico na direção zenital para a componente hidrostática;

D_{ZW} - Representa o atraso troposférico na direção zenital para a componente úmida;

$mh(E)$ - $mw(E)$ são as funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida, respectivamente, com o ângulo de elevação (E) do satélite.

Vários modelos definidos para as variáveis mencionadas, com finalidade de fazer as correções iniciais na refração troposférica e determinar a introdução de parâmetros no ajustamento, sendo estes parâmetros adicionais da troposfera.

3.1.8.2 Refração Ionosférica

O segundo erro relacionado a propagação de sinais, é denominado como refração ionosférica. A refração ionosférica depende da frequência e do índice de refração. O efeito é proporcional ao número total de elétrons no caminho do sinal entre o receptor e a antena. Entretanto, esse número de elétrons evolui de acordo com certas variáveis (Monico, 2008), que para a sua correção é usado receptores de dupla frequência, por meio de combinações entre variáveis coletadas em uma única estação, das equações da pseudodistância e da fase da onda portadora, as chamadas *ion-free* (*ionospheric free observable*).

A combinação linear da *ion-free* para a pseudodistância (PD_{IF}) e fase da onda portadora (ϕ_{IF}) pode ser dada por (SEEBER, 2003):

$$PD_{IFr}^s = m_1 PD_r^s + m_2 PD_r^s \quad (2)$$

$$\varphi_{IFr}^s = m_1 \varphi L1_r^s + m_2 \varphi L2_r^s \quad (3)$$

Onde:

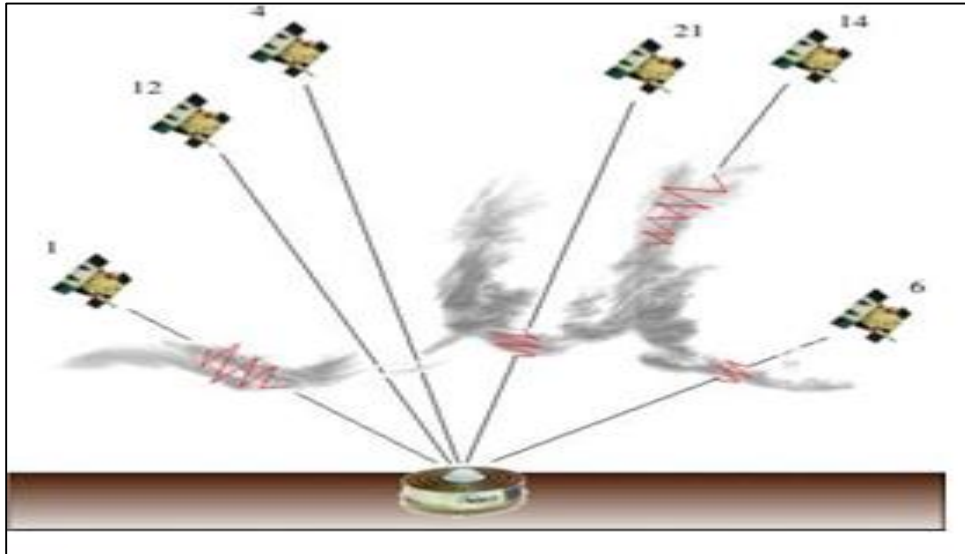
$$\text{Para } PD_{IFr}^s \rightarrow m_1 = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_1^2} \right) \text{ e } m_2 = - \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_1^2} \right);$$

$$\text{Para } \varphi_{IFr}^s \rightarrow m_1 = \left(\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_1^2} \right) \text{ e } m_2 = -(f_1 f_2 / (f_1^2 - f_1^2)).$$

Quando o sinal GNSS atravessa a região ionosférica com densidade irregular de elétrons, ele sofre variações de amplitude, fase, polarização e no ângulo. As variáveis relacionadas correspondem: ao tempo, espaço, densidade, movimento do plasma ao longo do geomagnetismo (linha) e por último a cintilação ionosférica (SEEBER, 2003).

Uma ilustração simplificada de como a cintilação ionosférica pode ter impacto no posicionamento GNSS, demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS.



Fonte: SBAS (2012).

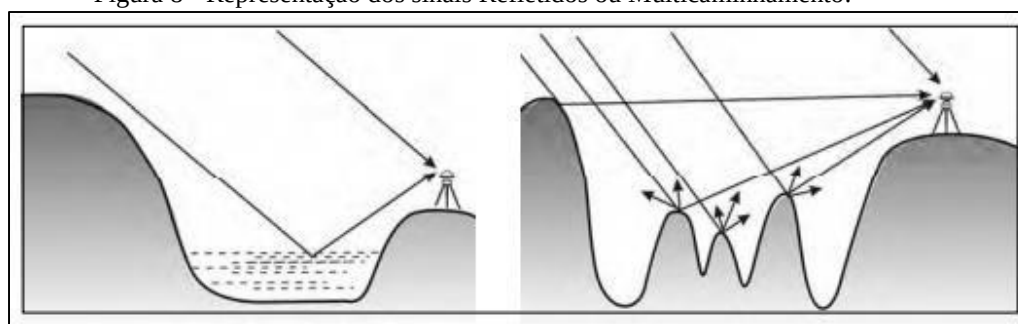
3.1.8.3 Erros de Multicaminhos

Os multicaminhos (sinais refletidos) são o terceiro erro nesta seção. Ocorre quando o rastreo por antena recebe sinais direta ou indiretamente do satélite. (desviados por outros alvos ao longo do caminho).

É difícil estabelecer um modelo para lidar com esse efeito devido às situações geométricas arbitrárias dos locais onde ele ocorre. Consequentemente, a qualidade do posicionamento é frequentemente afetada pela fase da onda portadora e pela pseudodistância (MONICO, 2008).

Conforme mostrado na Figura 8, a representação dos sinais refletidos ou multicaminhamento.

Figura 8 - Representação dos sinais Refletidos ou Multicaminhamento.



Fonte: Ribeiro (2004 *apud* Souza, 2008).

Segundo Monico (2008), na primeira observável, os impactos do erro produzido pelo multicaminho são: a fase da onda (sem o efeito da ionosfera) se comporta complexadamente a frequência do erro é função da altura do satélite e é inversamente proporcional ao comprimento de onda, com um erro máximo de cerca de um quarto do comprimento de onda. A segunda observável se comporta de maneira semelhante ao primeiro, porém com magnitude várias vezes maior.

Visto isso, recomenda-se evitar levantamentos em locais propícios ao multicaminhamento e a utilização de antenas especiais com o intuito de minimizar os sinais que chegam por baixo da antena.

3.1.8.4 Erros de Perda de Ciclo

Esse erro está diretamente ligado a perda de ciclo, por meio da obstrução do sinal de um ou mais satélites, dificultando que este chegue até a antena do receptor. Devido a isso, ocorre uma perda de na contagem do número inteiro de ciclos medidos no receptor, sendo chamada de perdas de ciclos (*cycle slips*). Esse bloqueio pode estar relacionado

a construções, árvores, montanhas, interferências de outras fontes de rádios, problemas no receptor e entre outros (MONICO, 2008).

A correção desse erro pode ser realizada por meio da identificação do momento de descontinuidade do sinal e corrigida a medição da fase portadora dos ciclos completos. No método relativo, essa perda de ciclos pode ser detectada pelas duplas diferenças ou tripla diferenças, o que não é possível no PPP. Contudo, as combinações lineares entre as observáveis podem realizar essa detecção.

Nesse contexto, é apresentado a estratégia de combinação *wide-lane* (WL), desenvolvida por Blewitt (1990), envolvendo a pseudodistância e a fase da onda portadora. A estratégia é baseada na combinação da *wide-lane* (WL) envolvendo a pseudodistância e a fase da onda portadora. Com isso, a ambiguidade da *wide-lane* (N_w) é estimada recursivamente e consequentemente a perda de ciclos é encontrada com base na combinação das ambiguidades da L1 e L2 (BLEWITT, 1990):

$$N_w = \varphi_w - \frac{1}{\lambda_w} \frac{f_1 PD_1 + f_2 PD_2}{(f_1 + f_2)} \quad (4)$$

Onde:

φ_w é a combinação linear *wide-lane*;

λ_w é o comprimento de onda da *wide-lane* $\cong 86,2\text{cm}$.

É realizado um cálculo recursivo (para cada época) da média entre as épocas, a fim de se analisar a ambiguidade da *wide-lane* de forma independentemente, verificando-se a perda de ciclos (BLEWITT, 1990):

$$\langle N_w \rangle_k = \langle N_w \rangle_{k-1} + \frac{1}{n} (N_{w,k} - \langle N_w \rangle_{k-1}) \quad (5)$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_{k-1}^2 + \frac{1}{n} \{ (N_{w,k} - \langle N_w \rangle_{k-1})^2 - \sigma_{k-1}^2 \} \quad (6)$$

onde,

$\langle N_w \rangle_k$ = média atual da ambiguidade de *wide-lane*; e,

σ_k^2 = desvio padrão atual da ambiguidade de *wide-lane*.

Um valor a priori para o desvio padrão pode ser adotado. O valor 0,5 ciclos tem sido uma boa opção na maioria dos casos (BLEWITT, 1990). Desta forma, os erros

grosseiros são identificados e a ocorrência de dois erros grosseiros seguidos dentro de 1 ciclo é o indicativo de perda de ciclos (BLEWITT, 1990).

3.1.8.5 Erros de Rotação da Terra

O erro relacionado à rotação da terra, está diretamente ligado ao momento da transmissão do sinal as coordenadas do satélite, essas coordenadas são modificadas quando as coordenadas do sistema terrestre rotacionam com o satélite e é necessário corrigir a rotação da terra (MONICO, 2008).

3.1.9 Erros relacionados com a antena e o receptor

Os principais erros que estão relacionados a antena e o receptor são: os ocasionados pelo relógio, atraso entre as duas portadoras no hardware da antena e o receptor, o centro de fase da antena do receptor e Fase *windup*.

O primeiro se trata do não sincronismo dos relógios dos receptores com relação ao sistema de tempo GNSS, por conta disso é necessário o rastreamento de no mínimo 4 satélites para que se possa solucionar, de forma simultânea, a posição da antena e o erro do relógio do receptor. No método de Posicionamento por Ponto Preciso o erro do relógio do receptor necessita ser estimado no ajustamento juntamente com as outras componentes da estação (LIMA, 2015).

O segundo erro se trata do centro de fase eletrônico da antena, onde as medidas dos sinais são referenciadas, mas geralmente não coincide com centro mecânico da antena. Por meio disso, o centro de fase sofre variações por ser dependente da intensidade e do ângulo de incidência dos sinais, ou seja, do azimute e ângulo de elevação dos satélites.

É por isso, que a calibração das antenas é de grande importância para levantamentos que requerem elevada precisão. A calibração das antenas pode ser definida como relativo ou absoluto, sendo o primeiro onde as antenas são calibradas com relação a uma única antena. Já o absoluto é necessário a calibração das antenas dos satélites, que se encontra por meio do IGS (LIMA, 2015).

O último erro é sobre a fase *wind-up*, relacionada diretamente com a orientação relativa entre as antenas receptoras e transmissoras do sinal, como também na direção de visada entre elas, de modo que, ocorrendo mudança na orientação da primeira antena, conseqüentemente muda-se a fase medida, e no caso da segunda antena, muda-se o campo elétrico da mesma e da receptora.

Para o posicionamento por ponto preciso (PPP) com alta precisão, este erro não pode ser ignorado.

3.1.10 Erros relacionados a estação

Entre esses erros estão as coordenadas da estação. Ainda, segundo Monico (2008), esse erro pode ser eliminado utilizando-se uma estação em uma rede habilitada para GPS, como a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), pois o erro está relacionado as diferenças das coordenadas obtidas em um posicionamento relativo, que não estão coincidentes ao sistema de referência. O objetivo chave para este erro é usar uma estação base. Pois conseqüentemente, suas coordenadas ajudam a obter coordenadas geodésicas obtidas.

O segundo erro nesta seção é sobre as marés da terra, que nada mais é, do que uma deformação da crosta terrestre causada pelas marés - o Sol e a lua - que só podem ser medidas pela gravitação e pela observação de um sistema de satélites. O posicionamento relativo tem esse erro como desprezível, enquanto no PPP deve ser levado em consideração.

Por fim, ocorrem os chamados efeitos da carga oceânica e da carga atmosférica – que devem ser levados em consideração em estudos de alta precisão – pois causam deslocamentos intermitentes na superfície terrestre. Sendo o primeiro efeito, dependente das posições da estação do sol e da lua e das propriedades elásticas da crosta, que tem o maior efeito perto da costa.

3.1.10 Combinações lineares das observáveis GNSS

Para combinações lineares, como já mencionado, existe uma escala grande de possibilidades para combinar as diferentes observáveis, formando as chamadas

observáveis derivadas, no contexto do posicionamento geodésico, apenas algumas combinações são significativas (SEEBER, 2003).

As ambiguidades de observações derivadas são menos complexas de se resolver, em alguns casos, do que para aquelas das observações originais. Porém, pode ocorrer o aumento do ruído e o uso de combinações lineares no processo de estimação de parâmetros, portanto, deve ser cuidadosamente estudado (SEEBER, 2003).

Para a detecção de perdas de ciclos e de erros grosseiros, o processamento envolvendo a *ion-free* e a combinação da *wide-lane* são úteis. Já a combinação *narrow-lane*, em todas as combinações lineares apresentadas, apresenta um ruído baixo, mas seu curto comprimento de onda dificulta o processo de solução de ambiguidades (LIMA, 2015).

As combinações lineares da *wide-lane* (φ_w) e *narrow-lane* (φ_n) são combinações que envolvem as medidas de fase da onda portadoras e são dadas por (SEEBER, 2003):

$$\varphi_w = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (7)$$

$$\varphi_n = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (8)$$

As ambiguidades das combinações φ_w e φ_n são dependentes e são dadas por:

$$N_w = N_1 - N_2 \quad (9)$$

$$N_n = N_1 + N_2 \quad (10)$$

Onde,

N_w - ambiguidade da *wide-lane*; e,

N_n - ambiguidade da *narrow-lane*.

A vantagem da combinação φ_w , em comparação com a observação original, é resolução da ambiguidade para um sinal com um comprimento de onda quatro vezes maior. A φ_n apresenta um menor nível de ruído de todas as combinações lineares e, portanto, têm-se os melhores resultados, mas sua ambiguidade é complexa de se resolver. A magnitude do efeito ionosférico na φ_w e na φ_n é igual, mas com um sinal oposto. Em função disso, a média da φ_w e da φ_n é o sinal livre da ionosfera (SEEBER, 2003):

$$L_0 = \frac{\varphi_w + \varphi_n}{2} \quad (11)$$

Onde,

L_0 = sinal livre da ionosfera, não possui característica de inteiro e o ruído dessa combinação é muito elevado.

O sinal ionosférico (L_1) é formado a partir da diferença entre a φ_w e φ_n . A partir dela, é concedido uma análise descritiva do comportamento da ionosfera, se tornando útil nas estratégias de solução de ambiguidades (SEEBER, 2003):

$$L_1 = \varphi_w - \varphi_n \quad (12)$$

Uma combinação linear envolvendo código e fase é denominada *Melbourne–Wübbena* (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985). A característica principal dessa combinação, é a eliminação dos efeitos da ionosfera, relógio, troposfera e geometria. Podendo ser útil na identificação de perdas de ciclos (MONICO, 2008). Outro fator importante sobre ela é que também pode ser usada na estimativa de ambiguidades da fase da onda portadora.

3.1.11 Simples diferença

A simples diferença (SD), pode ser composta de três formas diferentes: entre dois entre dois satélites, entre dois receptores ou entre duas épocas. Pode-se utilizar essa combinação em etapas de processos de solução de ambiguidades, como demonstrado na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Simples diferença entre satélites.



Fonte: GENG *et al.* (2012).

Para compreender melhor, se n o número de satélites, o número de SD possíveis é igual a $(n * (n - 1) / 2)$ e o número de SD independentes é igual a $(n - 1)$. Com isso podemos afirmar que, com 32 satélites existem 496 SD possíveis. Desse conjunto, 31 SD formam um conjunto independente. Então é entendido que as SD restantes são capazes de ser modeladas a partir de combinações lineares de conjuntos independentes.

Portanto, se as SD entre satélites são formadas, ou seja, as diferenças das observações de dois satélites gravadas de forma conjunta em uma única estação, o erro do relógio do receptor parte fracional dos componentes do atraso do *hardware*, podem ser cancelados (SEEBER, 2003; GE *et al.*, 2008). A equação de observação da Simple Diferença entre satélites para a pseudodistância é definida de forma simples por:

$$\Delta PD_r^{s,j} = \Delta \rho_r^{s,j} - \varepsilon_{PD} \quad (13)$$

Onde:

$\Delta PD_r^{s,j} = (PD_r^s - PD_r^j)$ – SD da pseudodistância;

$\Delta \rho_r^{s,j} = (\rho_r^s - \rho_r^j)$ – SD da distância geométrica; e,

ε_{PD} – erros sistemáticos não modelados e resíduos aleatórios da $\Delta PD_r^{s,j}$.

A equação de observação para a SD da fase da onda portadora é definida simplificada por:

$$\Delta \phi_r^{s,j} = \frac{f}{c} (\Delta PD_r^{s,j}) + \bar{N}_r^{s,j} + \varepsilon_\phi \quad (14)$$

Onde,

$\Delta\phi_r^{s,j} = (\phi_r^s - \phi_r^j) - \text{SD da fase da onda portadora};$

$\bar{N}_r^{s,j} = \bar{N}_r^s - \bar{N}_r^j - \text{ambiguidade da SD da fase da onda portadora}; \text{ e,}$

$\varepsilon_\phi - \text{erros sistemáticos não modelados e resíduos aleatórios da } \Delta\phi_r^{s,j}.$

Com a SD entre as duas épocas para o mesmo satélite a ambiguidade é dissolvido. Isso ocorre por meio da não mudança ao longo do tempo da ambiguidade em fase inicial, desde que haja perda de ciclos. (SEEBER, 2003)

3.1.12 Dupla diferença

A Dupla Diferença envolve o uso de dois receptores e dois satélites na mesma época, onde existem operações possíveis, que podem ser: duas simples diferenças entre receptores e entre satélites.

A Dupla Diferença entre o receptor e o satélite pode ser construída por duas SD entre receptores e a diferença entre dois satélites ou por duas SDs entre satélites e a diferença entre dois receptores. As DD por estarem livres dos erros dos relógios do satélite e do receptor, consequentemente os erros de propagação e órbita são reduzidos (SEEBER, 2003).

Se, por exemplo, uma quantidade de satélites é rastreada em conjunto por dois receptores, é possível calcular $n-1$ DD independentes para cada tipo de observação, pseudodistância e/ou fase, por um momento (MARQUES, 2008). Abaixo a equação de observação da DD para a pseudodistância é estabelecida por (MONICO, 2008):

$$\Delta PD_{r,l}^{s,j} = \Delta \rho_{r,l}^{s,j} - \varepsilon_{PD} \quad (15)$$

Onde,

$\Delta PD_{r,l}^{s,j} = (PD_r^s - PD_l^s) - (PD_r^j - PD_l^j) = \text{DD da pseudodistância};$

$\Delta \rho_{r,l}^{s,j} = (\rho_r^s - \rho_l^s) - (\rho_r^j - \rho_l^j) = \text{DD da distância geométrica}; \text{ e,}$

$\varepsilon_{PD} = \text{erros não modelados e resíduos aleatórios da } \Delta PD_{r,l}^{s,j}.$

A equação da observação para a DD da fase da onda portadora é definida com (MONICO, 2008):

$$\Delta\varphi_{r,l}^{s,j} = \frac{f}{c}(\Delta\rho_{r,l}^{s,j}) + \bar{N}_{r,l}^{s,j} + \varepsilon_{\varphi} \quad (16)$$

onde,

$\Delta\varphi_{r,l}^{s,j} = (\varphi_r^s - \varphi_l^s) - (\varphi_r^j - \varphi_l^j)$ = DD da fase portadora;

$\bar{N}_{r,l}^{s,j}$ = Ambiguidade da DD; e,

ε_{φ} = Erros não modelados e resíduos aleatórios da $\Delta\varphi_{r,l}^{s,j}$.

A equação da DD propicia uma melhor relação entre o ruído resultante da combinação linear e a eliminação de erros sistemáticos envolvidos nas observáveis de origem (MONICO, 2008).

3.2 Posicionamento por ponto preciso (PPP)

O posicionamento absoluto ou posicionamento por ponto é o método de posicionamento GNSS onde é possível obter as coordenadas de um ponto utilizando apenas um receptor. Para tal, o receptor coleta medidas da pseudodistância derivada do código C/A. Esse código é modulado na portadora L1. As órbitas e correções para os relógios dos satélites são obtidos a partir das efemérides transmitidas (NRCAN, 2022).

O Posicionamento por Ponto Preciso – PPP – é considerado uma evolução do processamento por ponto simples, sendo um método que se baseia em observações não diferenciadas, fazendo uso das efemérides precisas das orbitas dos satélites. (AZAMBUJA, 2015).

As efemérides precisas referem-se tanto às órbitas dos próprios satélites, quanto aos erros dos relógios dos satélites correspondentes. Estes produtos podem ser usados para realizar o processamento de observações de pseudodistâncias, fase da onda portadora, ou ambas, as quais podem ter sido coletadas por receptores de uma ou duas frequências (ou até mais) (AZAMBUJA & MATSUOKA, 2016), tendo como referencial

do ponto o ITRF (*Internacional Terrestrial Reference Frame* – rede de referência terrestre internacional) atual.

Portanto, o PPP elimina a importância de aquisição simultânea de dados de rastreamento das estações (base) e os problemas correspondentes a dependência das distâncias que envolvem as linhas de base (JÚNIOR et al, 2016)

Para isso, além do uso das efemérides precisas e correções para os relógios dos satélites, é necessário a realização da modelagem dos erros e efeitos que envolvem as observáveis GNSS. Segundo os estudos (LEICK, 2004 e HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 2007), atingir este nível de qualidade, requer o uso de um receptor de duas frequências, afim de que se possa realizar a combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*) para a fase da onda portadora e/ou código.

O motivo dessa degradação, está associado principalmente ao efeito resultante da ionosfera, devido à impossibilidade de formar a observável *ion-free* (DA SILVA, 2020).

A partir do modelo matemático a seguir, é demonstrado, a determinação da posição e do erro do relógio do receptor, a partir da técnica de PPP, utilizando as observações de pseudodistância, de fase com base na combinação *ion-free* equações de código e fase parametrizada com o atraso troposférico úmido na direção vertical, já mencionado:

$$PD_{IFr}^s = \rho_r^s + c (dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + m_f Zwd + \varepsilon_{PD_r}^s \quad (17)$$

$$\lambda_{IF} \phi_{IFr}^s = \rho^s + c (dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + \lambda_1 N_{IF} + m_f Zwd + \varepsilon_{\phi_{IFr}}^s \quad (18)$$

Onde,

PD_{IFr}^s = Pseudodistância da *ion-free* (metros);

$\lambda_{IF} \phi_{IFr}^s$ = Fase da *ion-free* (metros);

ρ_r^s = Distância geométrica entre receptor r e o satélite;

$dt_r(t_r)$ = Erro do relógio do receptor no instante de recepção t_r ;

$dt^s(t^t)$ = Erro do relógio do satélite no instante de transmissão t^t ;

N_{IF} = Ambiguidade da *ion-free*;

Zwd = Atraso troposférico úmido na direção do zênite; e,

m_f = Função de mapeamento do Zwd para a direção receptor-satélite.

Com a disponibilização de produtos pelo IGS, uma alternativa para minimizar os efeitos da ionosfera no PPP para usuário de receptor de simples frequência é o uso de algum modelo da ionosfera (exemplos: Modelo de Klobuchar; Modelo Global da Ionosfera do IGS).

3.3 Aprimoramentos do método - (PPP)

O método Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) tem sido alvo de diversas investigações, com o intuito de resolver problemas e intensificar a qualidade da precisão do método PPP. Um desses problemas que degradam a precisão do método PPP, está relacionado com as ambiguidades. (MARQUES, 2012 e DA MOTTA, 2017).

Com base neste cenário, os avanços sobre o método afunilaram para o surgimento de novas estratégias de se usá-lo, como por exemplo, por meio do PPP – AR (resolução de ambiguidades) (MARQUES, 2014; THEODORO, 2020; GENG *et al*, 2019).

3.3.1 Posicionamento por Ponto Preciso com solução de ambiguidades (PPP-AR)

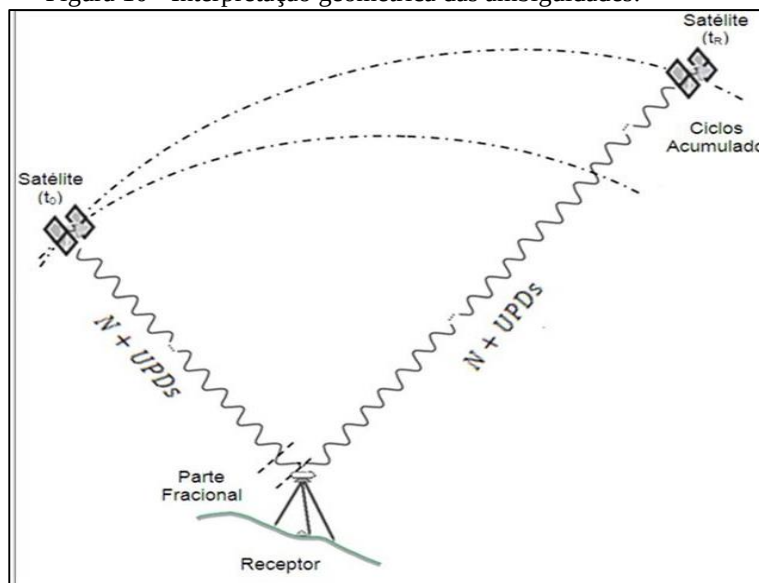
Conforme já mencionado, chama-se ambiguidade o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação. A problema principal envolvendo a solução de ambiguidades está diretamente relacionado ao início do posicionamento. Quando um receptor GNSS é iniciado, automaticamente é feito o cálculo da diferença entre a fase emitida pelo satélite e sua réplica gerada no receptor, o que resulta em uma parte fracionária e um contador de ciclos inteiros é inicializado. Durante o período de rastreo, o contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase fracionária muda de 2π para 0 (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 2007).

Em um determinado momento, a fase instantânea acumulada será a somatória da parte fracionária medida com o número inteiro de ciclos contados desde o início do rastreo. A problemática está do processo está nesse momento, pois o número de ciclos inteiros do instante da primeira observação é desconhecido (HOFMANN-WELLENHOF *et al*, 2001).

O PPP – AR tem sido desenvolvido com o objetivo de estimar as características inteiras das ambiguidades, que são destruídas pelas bias da fase de satélites e de receptores

(BLEWITT, 1989).). A interpretação geométrica da ambiguidade está ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Interpretação geométrica das ambiguidades.



Fonte: LIMA (2015).

As UPD (*uncalibrated phase delays*), podem ser definidos como erros sistemáticos ou bias (atrasos de hardware e outros) do satélite e do receptor. Com base nisso, as UPD são absorvidas pelos parâmetros de ambiguidades no processo de estimativa pelo método dos mínimos quadrados, o que resulta a perda da característica de número inteiro da ambiguidade.

É neste cenário que um novo objetivo foi introduzido, com a estratégia de estimar os (UPD) (LEANDRO e SANTOS, 2006).

3.3.2 Estratégias para a soluções de Ambiguidades

No ano de 2006, utilizando o contexto de uma rede de estações, foi formado a Dupla Diferença das ambiguidades e seguidamente fixadas. O método se baseou no princípio da eliminação dos UPD, a partir da Dupla Diferença das ambiguidades entre estações. O método foi aplicado para soluções de rede com dados de 24 horas (BLEWITT, 2006).

Anos seguintes, essa metodologia foi novamente testada, porém, realizando demonstrações de acurácia e tempo de processamento de dados para arquivos horários e

janelas de 20 a 50 minutos, foi constatado uma melhoria posicional com a solução de ambiguidades de conjuntos de dados de no mínimo 30 minutos (ALVES, 2010).

3.3.3 Estratégias para a soluções de ambiguidades com estimativa de UPD

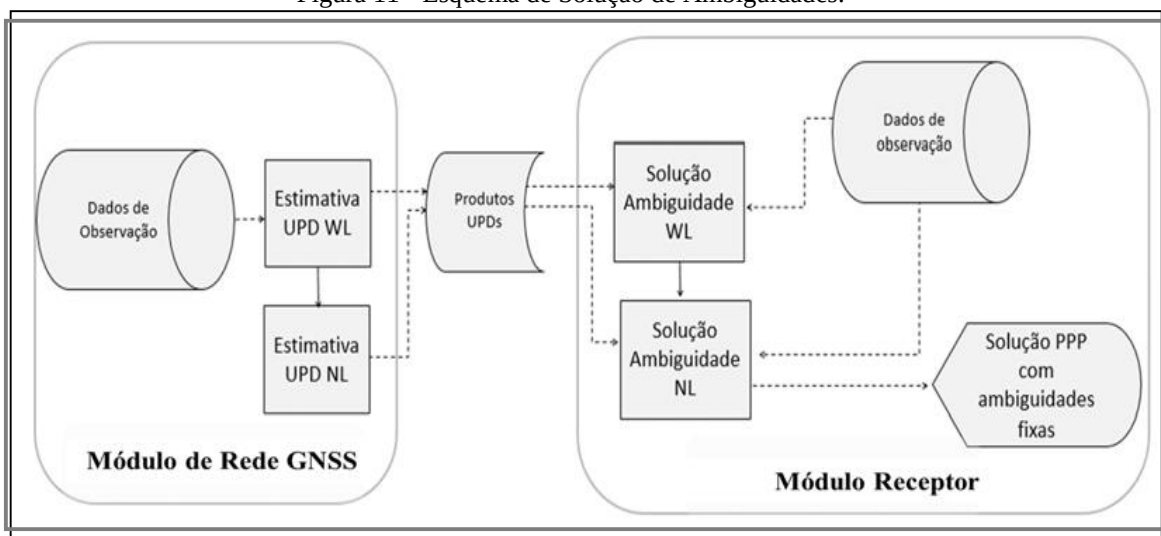
Diversos estudos têm sido embasados na estratégia de estimativas dos UPD, um deles foi apresentado por Ge et al. (2008) e aplicado para o PPP inicialmente para dados diários, e conseqüentemente, em 2010, foi testado para dados horários (GENG et al., 2010).

A ideia principal do estudo é utilizar as ambiguidades da combinação *ion-free*, serão decompostas em *Wide-Lane* e *Narrow-Lane* e aplica-se a simples diferença entre satélites para remover os UPD dependentes do receptor. Utilizando uma rede de estações de referência, foram determinados os UPD da WL (UPD_WL) por meio da combinação Melbourne–Wübbena. A partir das ambiguidades WL fixas, é feito o cálculo dos UPD da NL (UPD_NL) e seu respectivo desvio padrão com base na solução real da *ion-free* e o número inteiro de ambiguidades WL (GENG et al., 2009; GENG et al., 2011). Laurichesse *et al.* (2008) fixando as ambiguidades WL e NL diretamente para inteiro.

Contudo, os UPD_NL não foram estimados, mas assimilados nas estimativas dos relógios dos satélites. Com isso, foram fixadas as ambiguidades NL como inteiros, antes de se estimar os erros dos relógios dos satélites por meio da Rede de referência GNSS. Na

Figura 11 são mostrados os passos a passos do processo:

Figura 11 - Esquema de Solução de Ambiguidades.



3.3.4 Estratégia para a soluções de ambiguidades com dissociação dos relógios

Nesta estratégia, é levado em consideração os erros dos relógios dos satélites do código e da fase separadamente, o que ocorre contrariamente no modelo convencional do PPP, onde se utiliza o erro do relógio do satélite estimado a partir do código, tanto para as observações de fase quanto para o código. Essa estratégia foi proposta por Collins e Bisnath (2008), chamado de modelo dissociado do relógio (*decoupled clock model*). A seguir é apresentado as formulações adaptadas a partir de Collins e Bisnath (2008). Com base nisso, as equações da observável *ion-free*, em metros, da pseudodistância e fase da onda portadora, apresentadas nas equações (2) e (3), passam a ser da seguinte forma:

$$PD_{IFr}^S = \rho_r^S + c [dt_{r(PDIF)} - dt_{(PDIF)}^S] + T_r^S + \epsilon_{PDIFr}^S \quad (19)$$

$$\lambda_{IF} \phi_{IFr}^S = \rho_r^S + c [dt_{r(\phi IF)} - dt_{(\phi IF)}^S] + \lambda_{IF} N_{r IF}^S + T_r^S + \epsilon_{\phi IFr}^S \quad (20)$$

Onde,

$N_{r IF}^S$ = expressa em função das ambiguidades *WL* e *NL*;

$dt_{r(\phi IF)} = dt_r + \Delta\phi_{r(PDIF)}$ = erro do relógio do receptor acrescido do UPD do receptor da observável *ion-free* da pseudodistância;

$dt_{(PDIF)}^S = dt^S + \Delta\phi_{(PDIF)}^S$ = erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion-free* da pseudodistância;

$dt_{r(\phi IF)} = dt^S + \Delta\phi_{r(PDIF)}$ = erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion free* da fase; e,

$dt_{(\phi IF)}^S = dt^S + \Delta\phi_{(\phi IF)}^S$ = erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion free* da fase.

As ambiguidades *ion-free*, podem ser expressas como combinação linear das ambiguidades *WL* e *NL* (GE *et al.*, 2008). Dessa forma, é acrescentado as UPD referentes ao satélite e receptor, sendo dada por:

$$\bar{N}w_r^s = \bar{N}w_r^s + \Delta\phi_{wr} - \Delta\phi_w^s \quad (21)$$

A partir dessas informações, as equações compõem o modelo dissociado dos relógios, apresentando seus parâmetros como: $dt_{r(PDIF)}$, $dt_{r(\phi IF)}$, $\Delta\phi_{wr}$, $dt_{(PDIF)}^s$, $dt_{(\phi IF)}^s$ e $\Delta\phi_w^s$.

Entretanto, quando for realizado a estimativa devida dos parâmetros (coordenadas, termos dissociados dos relógios, atraso troposférico e as ambiguidades inteiras) a partir dessas equações anteriores, número total de parâmetros não conhecidos será maior do que o número de observações, chegando à conclusão que o sistema será indeterminado, não podendo estimar ou até mesmo eliminar os parâmetros dissociados dos relógios do receptor sem realizar a simples diferença entre satélites. Para resolver essa problemática, a solução encontrada foi fixar um número mínimo de parâmetros, chamados de parâmetro de referência. Para isso, são escolhidos os parâmetros dissociados dos relógios do receptor com base a um receptor de referência, posteriormente se define um Datum do relógio e atribuindo a zero esses parâmetros. Em seguida, para as ambiguidades de todos os satélites observados no receptor são arbitradas para valores inteiros.

A última etapa da estratégia se inicia com a adição de um receptor na rede (não o de referência), e escolhe-se um satélite para ser a referência deste receptor, com isso as ambiguidades N_n e N_w deste satélite vão ser determinadas como inteiros arbitrários, as outras ambiguidades são estimadas com base nessas ambiguidades do satélite de referência. Com isso se define os parâmetros de referência das ambiguidades para o receptor. É possível realizar a repetição dessa etapa para todos os outros receptores que não sejam o de referência, podendo ser diferente para os demais.

Finalizados os procedimentos acima para definir o Datum do relógio e da ambiguidade na rede, a resolução dos problemas referentes aos parâmetros dissociados do relógio do receptor e à singularidade nos sistemas das equações serão possíveis. Para a solução em rede, estima-se 3 coordenadas, os 3 parâmetros dissociados dos relógios dos satélites e o atraso troposférico. Será necessário, apenas disponibilização de uma rede GNSS que forneça parâmetros dissociados dos relógios dos satélites. Aplicando os parâmetros dissociados dos relógios dos satélites e definir-se o Datum da ambiguidade, a estimativa dos parâmetros desconhecidos pode ser possível.

3.3.5 Aperfeiçoamentos das estratégias para a soluções de Ambiguidades e algumas perspectivas

A partir de ano de 2011 e até os dias atuais, os trabalhos referentes à solução de ambiguidades inteiras no PPP estão sendo adaptados, apresentando melhorias e otimização das estratégias citadas. Geng e Bock (2013) realizaram um aperfeiçoamento das estimativas UPD utilizando tripla frequência de dados GPS para rápida solução de ambiguidades no PPP. Li et al. (2014) realizaram um estudo, onde sistema de estimativa do vapor de água atmosférico por GPS em tempo real utilizando o modo PPP, com órbitas e relógios dos satélites em tempo real, e correções de UPD para solução das ambiguidades inteiras.

Mais estudos estão sendo desenvolvidos, com o intuito de realizar o comparativo entre alguns dessas estratégias, como Geng *et al.* (2010b); Shi e Gao (2014) e Teunissen e Khodabandeh (2015) que apresentaram os princípios, comparativo e comentários sobre as estratégias de solução de ambiguidades inteiras no PPP.

3.4 Sistemas de Referência Modernos

O sistema de referência é essencial para as diversas utilizações que exigem a posição como elemento central, tais como obras de engenharia, cartografia, serviços topográficos e na própria vida cotidiana, em que a localização de lugares e objetos se faz cada vez mais essencial. Os sistemas de referência modernos, especialmente, após a evolução da geodesia espacial, tornaram-se ser globais e geocêntricos. Espera-se que esses sistemas estejam bem estabelecidos e materializados, permitindo que levantamentos utilizando, especialmente a tecnologia GNSS, possam ser referenciados a eles (CHAVES e MONICO, 2017).

3.4.1 ITRF 2014

O ITRS (*International Terrestrial Reference System*) é definido como sistema de referência espacial tridimensional internacional, considerado o referencial geodésico mais preciso, é realizado por meio do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Atualmente, o sistema conta com 13 realizações, nomeadas de acordo com o padrão

ITRF_{xxxx}, em que xxxx se refere ao ano mais recente do conjunto de dados utilizados, sendo as realizações: ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF95, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, o ITRF2008, ITRF2014 e o mais recentemente ITRF2020 (ALTAMIMI, et al., 2011; BLICK et al., 2014; ITRF, 2018a).

O ITRF2014, foi originado a partir de uma modelagem aprimorada na qual considera os movimentos não lineares que ocorrem na estação, incluindo movimentos sazonais (anuais e semestrais) e deformação pós-sísmica (PSD) causadas por grandes terremotos, em particular no Chile em 2010 e no Japão em 2011, isso tornou o sistema como o primeiro da história, a considerar tais variáveis para realizar a modelagem.

É importante ressaltar que parâmetros de orientação da terra (EOPs), junto com o histórico completo das posições das estações também foram considerados e fornecidos pelos Centros Técnicos do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*), com base nas soluções de quatro técnicas geodésicas espaciais, sendo elas: VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*); SLR (*Satellite Laser Ranging*); DORIS (*Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite*) e GNSS (ALTAMIMI et al., 2016).

3.4.2 SIRGAS

O SIRGAS é conhecido como o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, criado a partir da necessidade de adoção de um referencial geocêntrico para o Brasil, que atendesse aos padrões globais de posicionamento GNSS, garantindo uma qualidade de dados levantados em todo o território nacional. Por ser um referencial geocêntrico, tem sua definição idêntica ao ITRF e sua realização é uma densificação regional do ITRF para a América Latina e Caribe.

Semelhante ao ITRF, o SIRGAS fornece por meio de suas soluções, coordenadas e suas respectivas velocidades, levando em consideração uma série temporal de coordenadas ou considerando um modelo de velocidade contínua, com isso podemos citar o VEMOS (Modelo de Velocidades para a América do Sul e Caribe).

A rede SIRGAS-CON, é uma rede com cerca de 400 estações de monitoramento contínuo, distribuídas por toda a América Latina e Caribe. No presente momento, o Brasil colabora com 139 estações da RBMC. A rede proporciona produtos de soluções semanais de coordenadas; soluções multianual, de coordenadas e velocidades, visando aplicações

que requeiram transformações de épocas (variações temporais) (SIRGAS 2022). No dia 25/02/2005, foi estabelecido oficialmente que o SIRGAS seria o Sistema Geodésico Brasileiro SGB) e foi adotado a realização do ano 2000, em que suas coordenadas estão referenciadas a época 2000,4 (IBGE, 2005). O SIRGAS 2000 é uma realização do ITRF2000 para o continente americano. A seguir, no Quadro 3, um resumo detalhado das características do SIRGAS2000.

Quadro 3 - Características do SIRGAS2000

SIRGAS2000	
Elipsóide de referência	GRS - 80
a	6378137 m
b	6356752,3141 m
f	1/298,257222101
e ²	0,00669438
a-b	21384,6859 m

Fonte: Os autores (2022).

3.4.3. Modelo de Velocidades

Na atualidade, para que o processamento de dados GNSS sejam precisos, é de importância a realização da redução das coordenadas das estações de referência para a época do levantamento e que estejam associadas ao mesmo sistema de referência das órbitas dos satélites (SIRGAS, ORG).

O SIRGAS-CON, possui as coordenadas semanais, das estações, que possibilitam essas condições e, como consequência, recomenda-se utilizar estes pontos (com suas coordenadas semanais) como estações de referência nos levantamentos GNSS na região SIRGAS.

Pode ser uma possibilidade que a estação de referência de um levantamento não pertence à rede SIRGAS-CON (suas coordenadas semanais não estão disponíveis), sendo necessário reduzir as coordenadas de referência para a época da observação utilizando as denominadas velocidades. As velocidades podem ser obtidas através de levantamentos GNSS, contínuos ou repetitivos, realizados em um período de tempo mínimo (2anos). Caso não seja possível extrair as velocidades dessa maneira, é disponibilizado um modelo de velocidades contendo respectivamente, as velocidades e deformações. Por meio disso, um modelo de velocidades para o SIRGAS, chamado VEMOS, é constantemente

atualizado. As versões VEMOS são representações das médias anuais de movimentos horizontais da superfície terrestre, abrangendo um determinado período. Lembrando que, efeitos co-sísmicos são considerados.

Nos dias atuais, o IBGE adota o Modelo de Velocidades para a América do Sul e Caribe (VEMOS2009) nas soluções da rede (DREWES e HEIDBACH, 2012). Usuários do SGB realizam a prática de utilização do VEMOS2009 via aplicativo disponibilizado pelo SIRGAS, identificado por VMS2009, no qual fornece as componentes da velocidade para a estação desejada (RAIANE, 2019).

Com a posse das componentes da velocidade da estação, é realizada atualização as coordenadas obtidas na época de rastreio para a época de referência do SIRGAS2000 e assim referenciar os levantamentos geodésicos ao SGB. O IBGE, por exemplo, utiliza o VEMOS2009 no serviço *online* de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

Entretanto, atualmente se encontra disponível a versão mais recente do modelo de velocidade, denominada VEMOS2017, que foi derivado de velocidades pontuais inferidas em 515 estações geodésicas de 1 de janeiro de 2014 a 28 de janeiro de 2017 usando o método de colocação por mínimos quadrados com funções de covariância empiricamente determinadas. O VEMOS2017 descreve a atual deformação na América Latina e no Caribe (SIRGAS.ORG).

3.4.4 Parâmetros, Transformação e Atualização de Coordenadas

Com o surgimento de novas constelações é de se esperar que cada uma delas possuísse seu próprio sistema de referência para determinar as órbitas de seus satélites. Como já mencionado, o GPS, utiliza o sistema de referência WGS-84 (*World Geodetic System*) que se encontra na realização (G1762), o GLONASS faz uso do PZ-90 (*Parametry Zemli* 1990) estando nos dias atuais na sua quinta realização (PZ-90.11), enquanto o Galileo utiliza o GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*) atualmente na sua realização GTRF 16v01. Ambos os sistemas são geocêntricos, semelhantes e consistentes com o ITRF, mas há pequenas diferenças centimétricas em suas definições (LAGO *et al.*, 2002; HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2007). Com existência de diferenças, se faz necessário a consideração no momento de integração de sistemas, pois as coordenadas dos satélites são influenciadas pelos distintos sistemas de coordenadas. Portanto, é importante a realização das transformações das coordenadas dos satélites, para

um único sistema comum, antes de aplicar qualquer ajustamento. Após a realização de um referencial em comum, porém em épocas distintas, o processo é de atualização de coordenadas em função das deformações da crosta terrestre, fator que implica no deslocamento da estação no intervalo de tempo dado entre a época de determinação das coordenadas e a época de interesse. Com já mencionado, utilizam-se modelos de velocidade das placas litosféricas da região do levantamento, com o intuito de estimar as componentes da velocidade da estação. Existe atualmente os parâmetros de transformação entre os diferentes sistemas de coordenadas, calculados de acordo com a transformação de Helmert. Maiores detalhes podem ser encontrados, por exemplo, em Hofmann-Wellenhof *et al.* (2007).

A seguir, as etapas de transformação das coordenadas de referência, onde o início se dá na atualização dos parâmetros da época inicial t_0 para a época t , utilizando-se a Equação 21 (MONICO, 2008; ITRF, 2022):

$$P(t) = P_{t_0} + \dot{P}_{(t-t_0)} \rightarrow \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ S \\ e_X \\ e_Y \\ e_Z \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ S \\ \mathcal{E}_X \\ \mathcal{E}_Y \\ \mathcal{E}_Z \end{pmatrix}_{t_0} + \begin{pmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{S} \\ \dot{e}_X \\ \dot{e}_Y \\ \dot{e}_Z \end{pmatrix} (t - t_0) \quad (22)$$

Onde,

P = taxa de variação dos parâmetros;

T = vetor das translações em X, Y e Z entre os dois referenciais, dadas em metros;

S = fator de escala entre os dois referenciais, adimensional, dado em PPPM;

$\mathcal{E}$ = matriz das rotações diferenciais em torno dos eixos X, Y e Z, dadas em radianos; e,

$\dot{T}$, $\dot{S}$ e $\dot{e}$ = taxas de variações em translação, fator de escala e rotação no ITRF com relação ao tempo.

O próximo passo é feito a transformação entre diferentes realizações, com base na transformação de Helmert (ou similaridade), utilizando três translações, três rotações e um fator de escala. Para transformar as coordenadas no sistema referencial de origem (0) para o sistema de referência destino (d), estando estes dois sistemas na mesma época,

pode ser realizado por meio do modelo matemático, dado por meio da Equação 22 (ITRF, 2022):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S & -\varepsilon_Z & \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z & S & -\varepsilon_X \\ -\varepsilon_Y & -\varepsilon_X & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 \quad (23)$$

No Quadro 4 a seguir é mostrado os 14 parâmetros de transformação - de ITRF2014 para ITRF2000, época 2010,0.

Quadro 4 - Parâmetros de transformação, de ITRF2014 para ITRF2000 época 2010,0.

T_x (mm)	T_y (mm)	T_z (mm)	S(ppb)	□_x (mas)	□_y(mas)	□_z(mas)
Ṫ_x (mm/ano)	Ṫ_y (mm/ano)	Ṫ_z (mm/ano)	Ṡ (ppb/ano)	□_x (mas/ano)	□_y (mas/ano)	□_z (mas/ano)
0,70	1,20	-26,01	2,12	0,00	0,00	0,00
0,10	0,10	-1,90	0,11	0,00	0,00	0,00

Fonte: Os autores (2022).

Quando se for levado em consideração a variação espaço-temporal de coordenadas vinculadas a diferentes referenciais, efetivar a mudança de referencial da velocidade da estação se torna necessário. Sendo assim, a necessidade de conhecer os parâmetros que os relacionam e as velocidades das estações posicionadas na placa tectônica (WESTON e SOLER 2012; SIRGAS, 2014).

Importante ressaltar que o modelo de velocidade VEMOS2017 já está disponível e vinculado ao ITRF2014, desta forma pode ser necessário realizar a mudança de referencial de velocidade do ITRF2014 para o ITRF2000 utilizado, através do emprego da Equação seguinte:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S & -\dot{\varepsilon}_Z & \dot{\varepsilon}_Y \\ \dot{\varepsilon}_Z & S & -\dot{\varepsilon}_X \\ -\dot{\varepsilon}_Y & -\dot{\varepsilon}_X & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 \quad (24)$$

Por fim, a atualização das coordenadas das estações da época 2010,0 (t_0) para a época de interesse (t) 2000,4 pode ser realizada de acordo com as Equações seguintes (SIRGAS, 2020):

$$X_{(t)} = X_{(t_0)} + V_{X(t-t_0)} \quad (25)$$

$$Y_{(t)} = Y_{(t_0)} + V_{Y(t-t_0)} \quad (26)$$

$$Z_{(t)} = Z_{(t_0)} + V_{Z(t-t_0)} \quad (27)$$

Onde,

t = época de interesse para a determinação das coordenadas;

t_0 = época de origem das coordenadas cartesianas geocêntricas:

$X_{(t)}, Y_{(t)}, Z_{(t)}$ = coordenadas cartesianas geocêntricas de uma estação na época de destino; e,

$X_{(t_0)}, Y_{(t_0)}, Z_{(t_0)}$ = coordenadas cartesianas geocêntricas de uma estação na época de origem.

3.5 Serviços *online* e sistema *desktop* de processamento do PPP

Nos dias atuais, o setor de informações espaciais está utilizando a internet como uma ferramenta para ajudar as suas atividades devido ao alto custo para adquirir programas de processamento de dados GNSS num curto espaço de tempo, diversos estudos relacionados a processamento de dados de posicionamento, principalmente via método Posicionamento por Ponto Preciso, também estão desenvolvendo ferramentas *online* gratuitas (DE LIMA, 2011).

Com a disponibilização via internet dos serviços de processamento do PPP faz com que esse método, chegue ao alcance da comunidade em geral e possa fornecer ajuda com diversos problemas geodésicos. Atualmente, existem também diversos *softwares* de uso comercial com a mesma finalidade na solução de problemas, mas com um custo que pode não ser de uso de todos.

Os usuários do PPP obtêm a possibilidade de realizar o processamento de dados GNSS, a partir de uma única estação, obtendo posições com acurácia na ordem de poucos centímetros e com grande facilidade de acesso ao serviço. Dependendo do serviço utilizado, é necessário que o usuário forneça informações, como tipo e altura da antena, se o posicionamento é estático ou cinemático; isso se as mesmas não estiverem contidas no cabeçalho do arquivo de dados. Aplicação das correções de variação do centro de fase

da antena só ocorrerá se o tipo da antena for informado e se a mesma estiver identificada dentre as que possuem arquivos de calibração atualizados pelo IGS (ALVES, 2010).

Neste tipo de serviço, é necessário utilizar um arquivo de dados no formato *RINEX* (*Receiver Independent Exchange Format*) ou Hatanaka, usando uma compressão específica para arquivos em formato *RINEX* (DE LIMA, 2011).

Após os dados estarem em formato *RINEX*, é enviado para a solução *online* e quando o processamento é completado, os resultados são enviados para o usuário através do endereço eletrônico informado ou para baixar da própria página (ALVES, 2010).

Apresenta-se a seguir uma breve descrição de vários dos serviços disponíveis atualmente.

3.5.1 Serviços *online* de Processamento PPP que foram avaliadas nesse trabalho

Os serviços *online* utilizados para o processamento dos dados são:

- CSRS (*Canadian Spatial Reference System*) PPP;
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – PPP;
- AUSPOS (*Australian Processing Online Service*);
- OPUS (*online Positioning User Service*); e,
- IGN (*Institut National de l'Information Géographique et Forestière*).

3.5.1.1 CSRS (*Canadian Spatial Reference System*) PPP

Disponibilizado gratuitamente pelo *Natural Resources* Canadá NRCAN, para a que seja utilizado, faz-se necessário que seja realizado o cadastro de usuário junto ao *Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning* (CSRS- PPP). Ele é um aplicativo *online* para pós processamento de dados GNSS que possibilita a obtenção de coordenadas de alta precisão, por utilizar soluções globais, correções precisas de órbita de satélite, e a hora de relógio fornecida pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame* (IGS).

Para a realização dos processamentos pelo método PPP são necessários dados de observação no formato *Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2 ou 3 provenientes de receptores de frequência única ou dupla, que operam no modo estático ou cinemático e que utilizem apenas observáveis, fornecendo as coordenadas de

posicionamento no Datum norte-americano de 1983 do Sistema de referência espacial canadense (NAD83 (CSRS)) ou no (ITRF2014) (CSRS,2022).

No dia 20 de outubro de 2020, o serviço CSRS –PPP atualizou a versão 2 (para a versão 3) incluindo o PPP com resolução de ambiguidade (PPP-AR), para dados coletados em ou após 1 de janeiro de 2018. Os dados coletados antes dessa data continuarão a ser processados em modo flutuante usando os produtos do *International Terrestrial Reference Frame* (IGS) (CSRS,2022).

O PPP-AR transforma observações ambíguas de fase portadora em intervalos precisos. Nesse sentido, as precisões no nível do centímetro geralmente podem ser obtidas mais rapidamente; além de resultar em estimativas aprimoradas para a componente de longitude (leste) e gerar produtos com latências aprimoradas, tais como produtos ultrarrápidos de hora em hora disponíveis após o final de cada hora, produtos rápidos diários disponíveis cerca de 12 horas após o final de cada dia e produtos finais disponíveis cerca de 12 dias após o final de cada semana incluindo orbitas de satélites GPS do IGS finais do NRCAN e uma combinação de relógio final do NRCAN (CSRS,2022).

Por fim, também é disponibilizado aos usuários um relatório contendo informações detalhadas sobre o processamento realizado com as coordenadas cartesianas e elipsoidais estimadas e suas precisões (CSRS,2022).

Na Figura **12** é mostrada a interface do CSRS – PPP.

Figura 12 - Interface CSRS – PPP.

Precise Point Positioning

CSRS-PPP update – ITRF2020/IGS20 Reference Frame Adoption
Beginning with GNSS observations collected on **Sunday, 27 November 2022**, CSRS-PPP will output ITRF solutions in the IGS20 reference frame. This new frame is the International GNSS Service (IGS) realization of ITRF2020. To learn more about this change and what the impacts may be on your submissions, please visit the [CSRS-PPP modernization page](#).

CSRS-PPP service upgrade from version 2 to version 3
On **Tuesday, 20 October 2020 at 11:00 EDT**, the Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada updated the Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP) service. This CSRS-PPP modernization includes PPP with ambiguity resolution (PPP-AR) for **data collected on or after 1 January 2018**. Data collected prior to this date will continue to be processed with the IGS final products without ambiguity resolution. For more information, please visit the [CSRS-PPP modernization page](#) or download the [tutorial](#) describing the changes.

CSRS-PPP Files Processed (Last Updated: 2022-12-14 23:33:01 GMT)

Time Period	Files Processed
Last 1h	~100
1h Avg	~150
Last 24h	~4500
24h Avg	~3500

[Help for CSRS PPP \(Updated 2022-11-27\)](#) [Profile](#) [Sign out](#)

Email for results (required):

Processing mode

☒ Static ☐ Kinematic

☒ NAD83 ☐ ITRF

Epoch (Adopted):

Vertical datum:

[Contribute to passive control maintenance? \(What is this?\)](#)

Fonte: CRSC (2022).

No Quadro 5 é apresentado os parâmetros técnicos da solução *online* CSRSC para a abordagem do processamento PPP.

Quadro 5 - Parâmetros técnicos da solução *online* CSRSC – PPP.

Parâmetros	CSRS PPP - online
Arquivos de Observações	RINEX 3 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS14 final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS - ERP
Máscara de Elevação	10°
Variação do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2 - 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimute
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP - AR	Inclui PPP com resolução de Ambiguidade
Função de Mapeamento	<i>Vienna Mapping Functions Model 1 (VMF1)</i>
Maré Terrestre	<i>IERS Conventions, 2010</i>
Modelo de Carga Atmosférica	Extensão ATL
Maré Oceânica	FES2004
Sistema de Referência	ITRF2014
Constelações	GPS E GLONASS

Fonte: Os autores (2022).

3.5.1.2 IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – PPP

O IBGE – PPP (Posicionamento por Ponto Preciso ou Posicionamento Absoluto Preciso) é disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é um serviço consiste em uma adaptação do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System - PPP*) para uso no Brasil. É um serviço *online* gratuito para os pós processamento de dados GPS (*Global Positioning System*) (IBGE, 2022)

Esse sistema utiliza correções precisas de órbita de satélite, de relógio, de correção de centro de fase das antenas dos satélites e receptores de dupla frequência, de parâmetros de transformação ITRF/SIRGAS2000 e de modelo de Ondulação Geoidal – MAPGEO2004 fornecidos pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame* (IGS). No processamento são utilizados os produtos IGS mais precisos disponíveis no momento, que emprega o modelo de velocidade para o SIRGAS – VEMOS2009 na atualização das coordenadas da época da coleta dos dados para a época 2000,4 (IBGE, 2022).

Para ser realizado o processamento pelo método PPP são necessários dados de observação no *formato Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2, de receptores de dupla frequência, que operem no modo estático ou cinemático e dados GPS que tenham sido rastreados após 25 de fevereiro de 2005, período em que o Brasil adotou oficialmente o SIRGAS2000 (IBGE, 2022).

Após o processamento, esse sistema disponibiliza um relatório detalhado do resultado, com tabelas contendo as coordenadas cartesianas e elipsoidais, com suas precisões no Sistema de Referência SIRGAS2000 (IBGE, 2022).

Na Figura 13 é mostrada a interface do IBGE – PPP.

Figura 13 - IBGE Posicionamento por Ponto Preciso.

The image shows a web form for the IBGE PPP service. It includes sections for selecting processing mode (Static or Kinematic), uploading a RINEX file, and setting antenna parameters. There are also fields for email and a checkbox for terms of service. At the bottom, there are buttons for 'Processar' (Process) and 'Limpar Dados' (Clear Data).

Selecione o Modo de Processamento:
☒ Estático ☐ Cinemático

Selecione um arquivo RINEX: Só serão aceitos arquivos no formato .05o a .22o, .05O a .22O, .05d a .22d, .05D a .22D, .obs, .OBS, .zip, .ZIP, .tar, .TAR, .tgr, .TGZ, .gz, .GZ, .mx, .RNX, .crx, .CRX, .7z, .7Z
 Nenhum arquivo selecionado.

Os valores selecionados abaixo serão adotados para todos os RINEX que estejam comprimidos em um único arquivo:

Tipo de Antena:
Nao alterar RINEX

Altura da antena (m):
0.000

☐ A altura da antena somente será alterada se esta caixa estiver marcada.

E-mail válido do usuário. (não pode conter espaços ou tabs!):
E-mail

☒ Concordo que os resultados dos processamentos poderão ser utilizados pelo IBGE para a avaliação de produtos e informações cartográficas e geodésicas, bem como para a avaliação do próprio serviço IBGE-PPP

Nota: O processamento iniciará após a transferência do arquivo, o que pode demorar alguns minutos. Caso o resultado não comece a aparecer em 2 horas, por favor reprocesse.

Fonte: IBGE, (2022).

Na figura seguinte é apresentado os parâmetros técnicos da solução *online* IBGE - PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), para a abordagem do processamento PPP.

Quadro 6 - Parâmetros técnicos da solução *online* IBGE – PPP.

Parâmetros	IBGE PPP - <i>online</i>
Arquivos de Observações	RINEX 2 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS- ERP
Máscara de Elevação	10°
Variação do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2 - 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimuth
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP - AR	Não inclui
Função de Mapeamento	<i>Global Mapping Functions</i> (GMF)
Maré Terrestre	IERS Conventions, 2010
Modelo de Carga Atmosférica	Não aplicada
Maré Oceânica	FES2004
Sistema de Referência	SIRGAS2000
Constelações	GPS E GLONASS

Fonte: Os autores (2022).

3.5.1.3 AUSPOS (*Australian Processing Online Service*)

O AUSPOS – PPP é um serviço de processamento GPS *online* e gratuito fornecido pela *Geoscience Australia* (Governo da Austrália) que utiliza dados de qualidade geodésica de dupla frequência observados em modo estático para o sistema de processamento de dados GPS. Ele aproveita tanto a Rede de Estações IGS e a linha de produtos IGS: correções precisas de órbita de satélite, relógio, correção de centro de fase das antenas dos satélites fornecidos pelo *International Terrestrial Reference Frame* (IGS) (AUSPOS, 2022).

Para processamentos dos dados pelo método PPP são necessários dados de observação no formato *Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2 e 3 operando no modo estático, e utilizando apenas observáveis GPS. Após o envio do arquivo RINEX as 15 estações IGS e APREF mais próximas são utilizadas como estações de referência para o processamento, esses dados são recuperados do *GNSS Data Archive da Geoscience Australia*, uma solução precisa usando a técnica de dupla diferença que é calculado usando essas estações sendo restritas com 1 mm para horizontal e 2 mm para vertical (AUSPOS, 2022).

Todos os cálculos são realizados utilizando o *Bernese Software Sistem*, é um programa de determinação de parâmetros geodésicos e orbitais de alta precisão. Os efeitos das fontes de erro de observação, como relógios do receptor, troposfera e ionosfera são levados em consideração, seja por meio de modelagem ou estimativa de parâmetros relacionados (AUSPOS, 2022).

Após o processamento, esse sistema disponibiliza um relatório com todas as coordenadas no Sistema de Referência ITRF2014, já para os usuários australianos elas são fornecidas no *Datum of Australia* 2020 (GDA2020) e 1944 (GDA94) as coordenadas cartesianas e elipsoidais com suas precisões (AUSPOS, 2022).

Na Figura 14 é mostrada a interface do AUSPOS – PPP.

Figura 14 - Interface AUSPOS.

The screenshot shows the AUSPOS web interface. At the top, there is a header with the Australian Government Geoscience Australia logo on the left, the POSITIONING AUSTRALIA logo in the center, and the AUSPOS text on the right. Below the header is a dark navigation bar with a 'Home' link and a house icon. The main content area is titled 'Online GPS Processing Service'. It contains a form with two main sections. The first section is for uploading files, with the label 'Load RINEX Files*' and a button that says 'Choose upto 20 files'. To the right of this button is a 'Choose File(s)' button. The second section is for email, with the label 'Email Address*' and a text input field containing the placeholder 'e.g. name@company.com'. At the bottom of the form are two buttons: 'Clear' and 'Submit'.

Fonte: AUSPOS (2022).

No quadro a seguir, é apresentado os parâmetros técnicos da solução *online* AUSPOS – PPP (*Geoscience Australia*), para a abordagem do processamento PPP.

Quadro 7 - Parâmetros técnicos da solução *online* AUSPOS – PPP.

Parâmetros	AUSPOS PPP - <i>online</i>
Arquivos de Observações	RINEX 3 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS - ERP
Máscara de Elevação	10°
Varição do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2- 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimuth
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP – AR	Não inclui
Função de Mapeamento	<i>Global Mapping Functions</i> (GMF)
Maré Terrestre	TIDE2000
Modelo de Carga Atmosférica	Extensão ATL
Maré Oceânica	Não aplicada
Sistema de Referência	ITRF2014
Constelações	GPS

Fonte: Os autores (2022).

3.5.1.4 OPUS – *Online Positioning User Service*

É um serviço de usuário de Posicionamento *online* (OPUS) da NOAA gratuito, ele usa o mesmo *software* que computa coordenadas para as marcas de controle geodésico do país NOAA CORS Network (NCN). Esse serviço utiliza correções precisas de órbita de satélite, relógio, correção de centro de fase das antenas dos satélites fornecidos pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame* (IGS) e receptores de dupla frequência de fase portadora de comprimento de onda total, inclui apenas dados estáticos que fornece o intervalo das três linhas de base individuais (OPUS, 2022).

Para o processamento dos dados pelo método PPP são necessários dados de observação no formato *Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2 ou 3 sendo observáveis GPS que reduz todas as taxas de gravação para 30 segundos, permite todos os ângulos de máscara de elevação, mas apenas satélites com mais de 10° acima do horizonte são utilizados. Os arquivos com tempo de 2 a 48 horas são processados utilizando o *software* estático PAGES é um programa de ajuste de efemérides GPS que

Quadro 8 - Parâmetros técnicos da solução *online* OPUS.

Parâmetros	OPUS PPP - <i>online</i>
Arquivos de Observações	RINEX 2 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS - ERP
Máscara de Elevação	10°
Variação do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2 - 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimuth
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP – AR	Não inclui
Função de Mapeamento	<i>Niell Mapping Function</i> (NMF)
Maré Terrestre	IERS 2003
Modelo de Carga Atmosférica	Não aplicada
Maré Oceânica	Não aplicada
Sistema de Referência	ITRF14
Constelações	GPS

Fonte: Os autores (2022).

3.5.1.5 IGN (*Institut National de l'information Géographique et Forestière*) – PPP

É um serviço *online* e gratuito de Posicionamento GPS disponibilizado pelo (IGN) da França que utiliza correções precisas de órbita de satélite, relógio, correção de centro de fase das antenas dos satélites fornecidos pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame* (IGS), receptores de dupla frequência e tempo de observação no mínimo 30 minutos. Todas as épocas são processadas em medidas de pseudo alcance para obter valores aproximados (coordenadas e relógios) para cálculo de fase, nessa etapa, são eliminadas as medições com resíduos altos (IGN, 2022).

Para o processamento dos dados pelo método PPP são necessários dados de observação no formato *Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2 ou 3 utilizando observáveis GPS do tipo de observações estáticas ou cinemáticas. Para estações francesas RGP e algumas estações IGS, são usados coeficientes de carga oceânica que são interpolados usando os coeficiente das estações CORS, já para ponto no Brasil não há correção. Esse serviço *online* de Posicionamento Francês ainda está em desenvolvimento (IGN, 2022).

Após o processamento, esse sistema disponibiliza um relatório com todas as coordenadas cartesianas e elipsoidais com suas precisões no Sistema de Referência ITRF2014 (IGN, 2022).

Na Figura 16 é mostrada a interface do IGN – PPP.

Figura 16 – Interface IGN.

The screenshot shows the 'Calculs GNSS PPP en ligne' interface. At the top, a blue header contains the title. Below it, a white box with a blue border contains instructions in French. The instructions list file formats (Rinex 2, Hatanaka, Rinex 3), observation types (static or kinematic), observation duration (minimum 30 min), sampling rate (1s or 30s), and file naming rules. Below the instructions, there are three main sections: 1. 'Fichiers d'observation au format RINEX' with a 'RINEX:' label, a 'Procurer...' button, and a message 'Nenhum arquivo selecionado.' with a red 'Taille maximale : 50 Mo' warning. 2. 'Adresse Email, où vous sera envoyé le rapport de calcul' with an empty text input field. 3. A section with a blue header 'Afin d'éviter les demandes générées par des robots, merci de recopier les quatre lettres de la vignette ci-dessous'. It contains a CAPTCHA image with the letters 'bNR' and a blue double arrow icon. Below the CAPTCHA is a text input field labeled 'Entrez les quatre lettres :'. At the bottom left, there is a small logo with the letters 'bNR' and a blue double arrow icon.

Fonte: IGN, 2022.

No Quadro 9 a seguir, é apresentado os parâmetros técnicos da solução *online* IGN – PPP para a abordagem do processamento PPP.

Quadro 9 - Parâmetros técnicos da solução *online* IGN – PPP

Parâmetros	IGN - PPP
Arquivos de Observações	RINEX 3 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS - ERP
Máscara de Elevação	10°
Variação do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2 - 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimute
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP – AR	Não Inclui
Função de Mapeamento	<i>Niell Mapping Function</i> (NMF)
Maré Terrestre	IERS
Modelo de Carga Atmosférica	Não aplicada
Maré Oceânica	Não aplicada
Sistema de Referência	ITRF2014
Constelações	GPS

Fonte: Os autores (2022).

3.5.2 Soluções *desktop* de Processamento PPP que foram avaliadas nesse trabalho

Os serviços sistema *desktop* de Processamento disponíveis são:

- RTKLIB – PPP
- WaSoft – WAPPP

3.5.2.1 RTKLIB – PPP

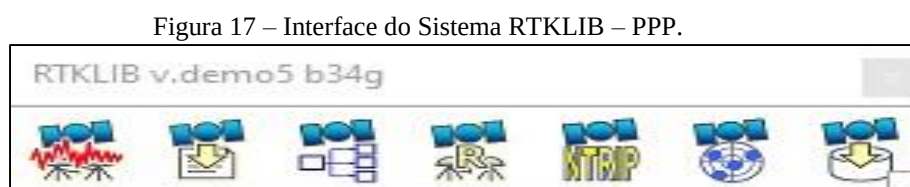
É um programa de código aberto para posicionamento padrão e preciso com GNSS para tempo real e pós processamento GNSS gratuito disponibilizado pelo Técnico *Tomoji Takasu* (JAPÃO). O RTKLIB é composto por vários *softwares* de aplicações e contém uma biblioteca que pode ser utilizada no desenvolvimento de programas para o processamento de dados GNSS, utilizando códigos na linguagem C/C++. Ele utiliza correções precisas de órbita de satélite, relógio, correção de centro de fase das antenas dos satélites fornecidos pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame* (IGS) (RTKLIB, 2022).

O RTKLIB suporta vários modos de posicionamento com GNSS operando em tempo real e pós processamento com receptores de dupla frequência sendo: simples, SGPS/DGNSS, cinemático, estático, linha de base móvel, fixo, PPP- Cinemático, PPP- Estático e PPP-Fixo e também suporta diversos formatos e protocolos para GNSS, mensagens proprietárias de vários receptores GNSS, comunicação externa via TCP/IP, NTRIP e possui diversas funções de biblioteca e APIs para processamento de dados como: AP *Launcher*, Posicionamento em tempo real , servidor de comunicação, análise de pós processamento, conversor RINEX, soluções de plotagem e dados de observação, *downloader* de dados GNSS e navegador *NTRIPName* (RTKLIB, 2022).

Para o processamento dos dados pelo método PPP são necessários dados no formato *Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2 ou 3. São suportados GPS, GLONASS, GALILEO E BEIDOU, inclui PPP-AR com resolução de ambiguidade, multicódigo em uma frequência é suportado, também é possível configurar com diversos parâmetros, como informações sobre a precisão das observáveis e qual máscara de elevação pretende utilizar.

Após o processamento, esse sistema disponibiliza um relatório com todas as coordenadas cartesianas e elipsoidais com suas precisões no Sistema de Referência ITRF 2014.

Na Figura 17 é apresentado a interface gráfica do Sistema RTKLIB - PPP.



Fonte: RTKLIB, 2022.

Na Figura 18 é apresentado a a janela para pós processamento de dados em PPP, onde se insere todos os dados do tipo RINEX, para dar início o processamento.

Figura 18 – Janela para Pós processamento de Dados, em PPP.

The screenshot shows the RTKPOST ver.demo5 b34g window. It features a top section with time and interval settings: Time Start (GPST) 2022/05/10 12:00:00, Time End (GPST) 2022/05/10 12:00:00, Interval 1 s, and Unit 24 H. Below this are sections for RINEX OBS (Base Station) and RINEX NAV/CLK, SP3, FCB, IONEX, SBS/EMS or RTCM. A Solution section has a checked 'Dir' checkbox. At the bottom, there are buttons for Plot..., View..., KML/GPX..., Options..., Execute, and Exit.

Fonte: RTKLIB, 2022.

Na Figura 19 é apresentado a janela de opções técnicas, para manusear o processamento pelo sistema, da maneira como o usuário desejar.

Figura 19 – Janela para opções de parâmetros do Sistema RTKLIB - PPP.

The screenshot shows the Options dialog box with tabs for Setting1, Setting2, Output, Statistics, Positions, Files, and Misc. The Setting1 tab is active, showing various configuration options: Positioning Mode (PPP Static), Frequencies (L1+L2/E5b), Filter Type (Forward), Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz) (15), Rec Dynamics / Earth Tides Correction (OFF), Iono/Tropo Correction (Iono-Free I), Satellite Ephemeris/Clock (Precise), checkboxes for Sat PCV, Rec PCV, PhWU, Rej Ed, RAIM FDE, and DBCorr, Excluded Satellites (+PRN: Included) (empty), and checkboxes for GPS, GLO, Galileo, QZSS, SBAS, BeiDou, and IRNSS. At the bottom are buttons for Load..., Save..., OK, and Cancel.

Fonte: RTKLIB, 2022.

No Quadro 10 a seguir é apresentado os parâmetros técnicos do sistema *desktop* RTKLIB – PPP, para a abordagem do processamento PPP.

Quadro 10 - Parâmetros técnicos do sistema *desktop* RTKLIB – PPP.

Parâmetros	RTKLIB PPP - <i>desktop</i>
Arquivos de Observações	RINEX 3 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS ERP
Máscara de Elevação	10° e 15°
Variação do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2 - 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimuth
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP – AR	Inclui PPP com resolução de Ambiguidade
Função de Mapeamento	<i>Niell Mapping Function</i> (NMF)
Maré Terrestre	DGNSS
Modelo de Carga Atmosférica	Não Aplicada
Maré Oceânica	FES2004
Sistema de Referência	WGS84
Constelações	GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou e SBAS

Fonte: Os autores (2022).

3.5.2.2 *WaSoft – WAPPP (International Association of Geodesy: Positioning & Applications Sub – Commission)*

É *WaSoft* é um programa para sistemas operacionais *Windows* disponibilizado pelo IAG WG (*Internacional Associations of Geodesy: Positioning & Aplicaions Sub-Commission*) ele é controlado por linha de comando e apropriado para o processamento em lote automatizado sem interação do usuário. O sistema *WaSoft* possui um mecanismo de processamento GNSS PPP chamado de WAPPP que calcula as coordenadas com base nas observações GNSS no formato RINEX para estações estáticas e cinemáticas, permitindo obter precisões de nível submétrico, decímetro e centimétrico (*WaSoft*, 2022)

Esse sistema *desktop* de processamento utiliza correções precisas de órbita de satélite, de relógio, de correção de centro de fase das antenas dos satélites fornecidos pelo *Internacional Terrestrial Reference Frame* (IGS) e dados de observações de dupla frequência ou frequência única. O WAPPP considera os diferentes tipos de observações: fase de código e portadora, vários GNSS de acordo com uma estimativa de componente

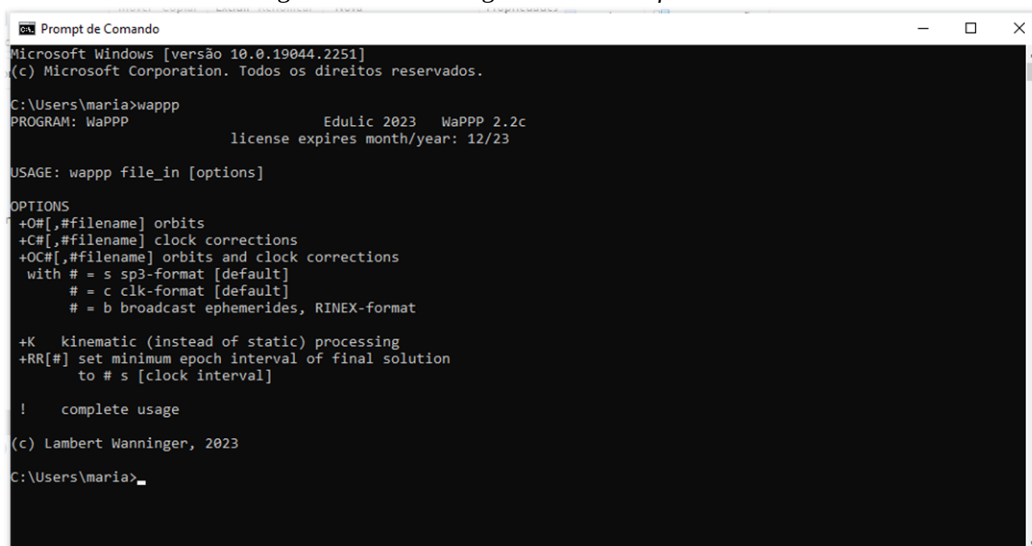
de variância. Os resultados de posição são obtidos utilizando um algoritmo de estimativa robusto (*WaSoft*, 2022).

Para o processamento dos dados pelo método PPP são necessários dados no formato *Receiver Independent Exchange* (RINEX) do tipo 2, 3 e 4. São suportados processamento de observação para GPS, GLONASS, GALILEO E BEIDOU e satélite (órbitas e correções de relógio) em formato SP3, CLK ou RINEX; correções de antena para antenas de satélite e antena receptora no formato ANTEX, modelo ionosférico no formato IONEX para processamento de frequência única (*WaSoft*, 2022).

Após o processamento dos dados, esse sistema disponibiliza um relatório do tipo txt com as coordenadas cartesianas e elipsoidais com suas precisões no sistema de Referência determinado pelos dados da órbita do satélite sendo o ITRF2014.

Na Figura 20 é apresentado a interface gráfica do *WaSoft* – WAPPP.

Figura 20 - Interface gráfica do *WaSoft* – WAPPP.



```
Prompt de Comando
Microsoft Windows [versão 10.0.19044.2251]
(c) Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\maria>wappp
PROGRAM: WaPPP                      EduLic 2023   WaPPP 2.2c
                                license expires month/year: 12/23

USAGE: wappp file_in [options]

OPTIONS
+O#[,#filename] orbits
+C#[,#filename] clock corrections
+OC#[,#filename] orbits and clock corrections
  with # = s sp3-format [default]
        # = c clk-format [default]
        # = b broadcast ephemerides, RINEX-format

+K kinematic (instead of static) processing
+RR[#] set minimum epoch interval of final solution
      to # s [clock interval]

! complete usage

(c) Lambert Wanninger, 2023

C:\Users\maria>
```

Fonte: *WaSoft*, 2022.

No quadro a seguir é apresentado os parâmetros técnicos do sistema *desktop WaSoft* – WAPPP para a abordagem do processamento PPP.

Quadro 11 - Parâmetros técnicos do sistema *desktop* WaSoft – WAPPP.

Parâmetros	WAPPP - <i>desktop</i>
Arquivos de Observações	RINEX 3 - Estação GOGY
Efemérides Precisas	IGS14 final (SP3)
Parâmetros de Orientação Terrestre	IGS - ERP
Máscara de Elevação	10°
Variação do Cento de Fase da Antena	Arquivo de Calibração do IGS - L1 e L2 - 0° e 90° na elevação - 0° a 360° no azimuth
Modelo Ionosférico	Combinação Linear Livre de ionosfera L1 e L2. Efeitos de 2° e 3° ordem (modelos CODE)
PPP – AR	Não Inclui
Função de Mapeamento	<i>Global Mapping Functions</i> (GMF)
Maré Terrestre	IERS
Modelo de Carga Atmosférica	Não aplicada
Maré Oceânica	Não Aplicada
Sistema de Referência	ITRF2014
Constelações	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou

Fonte: Os autores (2022).

4. METODOLOGIA

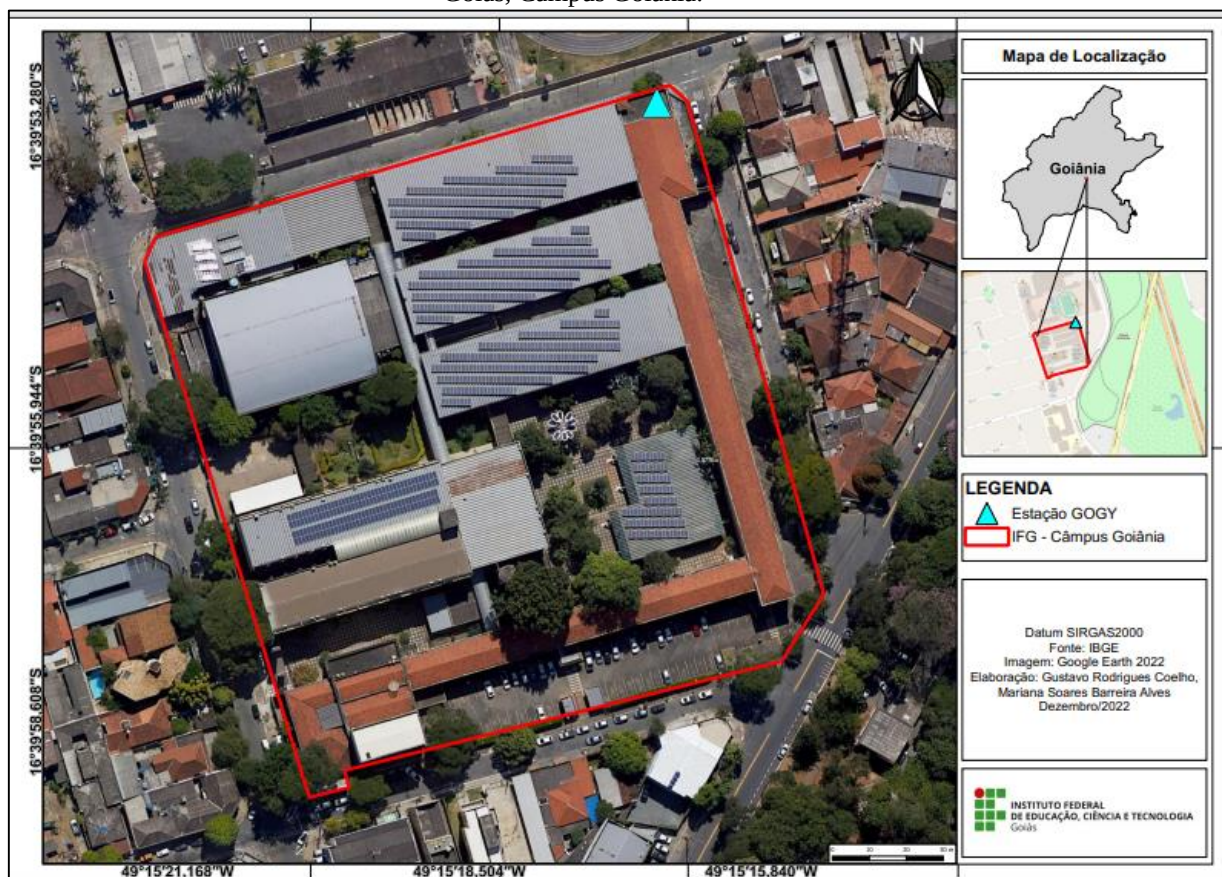
Nesta sessão serão apresentados os materiais utilizados para a produção do trabalho e os respectivos procedimentos metodológicos.

4.1 Localização e Caracterização da Área de Estudo

Todo o trabalho foi realizado utilizando dados da estação GOGY da RBMC, equipado com receptor multi-GNSS, localizada nas dependências do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Campus Goiânia, onde sua operação teve início no ano de 2013 e o tipo de receptor utilizado é da empresa Trimble, modelo Alloy.

Na Figura 21 é mostrada a localização da área de estudo IFG – Campus Goiânia.

Figura 21 – Localização da área de estudo – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



Fonte: Os autores (2022).

4.2 Material

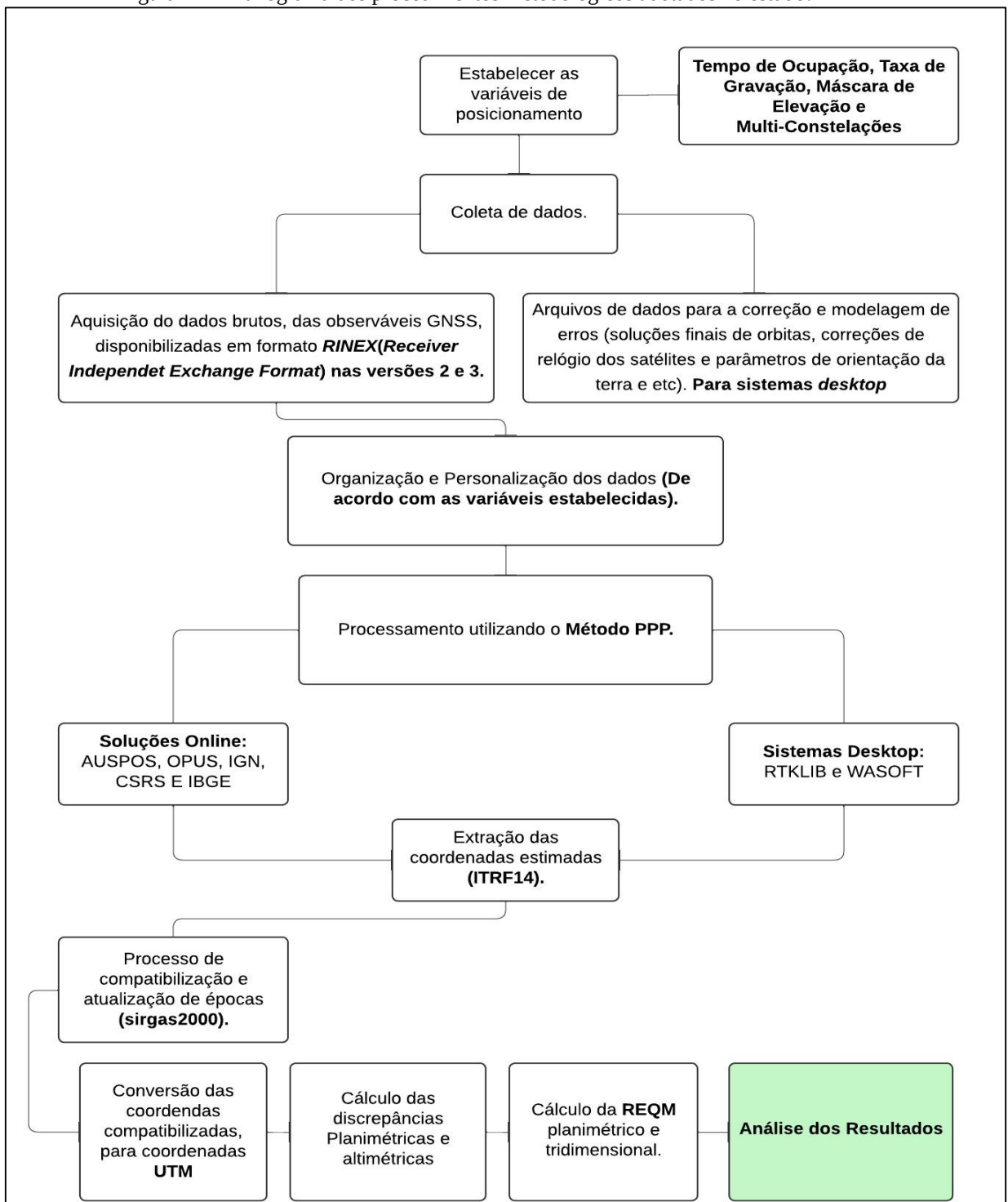
Para a realização desse estudo foi necessário a coleta dos seguintes materiais e *download* de programas:

- Dados brutos, das observáveis GNSS, disponibilizadas em formato *RINEX (Receiver Independent Exchange Format)* nas versões 2 e 3, oriundos da estação GOGY. Os dados estão disponibilizados no IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no site (www.ibge.gov.br);
- Arquivos de dados para a correção e modelagem de erros (soluções finais de orbitas, correções de relógio dos satélites e parâmetros de orientação da terra e etc), para processamento PPP no *software* do sistema *desktop*, obtidos por meio do projeto MGEX (*Multi-GNSS Extension*) do IGS, através do site ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE_MGEX/CODE;
- *Software* OCTAVE, versão 7.2, software livre sob licença pública geral GNU, fornecido por meio do site <https://octave.org>, foi empregado para realizar as transformações entre realizações do referencial e temporal de coordenadas;
- EXCEL do pacote Office, para a geração dos gráficos que compõem os resultados;
- Plataformas *online* (CSRS-PPP, IBGE-PPP, AUSPOS-PPP, OPUS-PPP e IGN-PPP), e sistema *desktop* (RTKLIB-PPP e WaSoft), para processamento e análise de dados GNSS;
- *Software* de transformação de coordenadas Geodésicas para UTM (*Universal Transverse Mercator*), disponibilizado no site <http://www.dpi.inpe.br/>.

4.3 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos foram iniciados com um levantamento bibliográfico para auxiliar nas etapas do projeto. De forma concomitante foram realizados a aquisição dos dados amostrais, a definição das possíveis variáveis a serem investigadas que impactavam no processamento dos dados (taxa de gravação, intervalo de tempo, máscara de elevação e utilização de multi-constelações), bem como no pós-processamento a utilização dos *softwares* de processamento PPP, *online* e sistema *desktop*. Os procedimentos metodológicos são mostrados no fluxograma da Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados no estudo.



Fonte: Os autores (2022).

4.3.1 Definição das variáveis de posicionamento

Para analisar detalhadamente a performance dos *softwares*, quanto a discrepância dos dados, foram definidas as seguintes variáveis:

- a) tempo de ocupação - um dado de 24 horas, personalizado pelo próprio site do IBGE/RBMC, em diferentes intervalos de tempo: 12:00 – 16:30 (60 minutos – 270 minutos) representando um período com menos atividade ionosférica;
- b) diferentes taxas de gravação – 1 segundo, 5 segundos e 15 segundos;
- c) o processamento multi-constelações - GPS, GLONASS, GALILEO e BEIDOU;
- d) diferentes máscaras de elevação de elevação – 10° e 15°.

Estas variáveis foram escolhidas deduzindo que possam impactar, de alguma forma, nas precisões dos posicionamentos via método PPP

4.3.2 Aquisição dos dados da estação GOGY - RBMC

Para a proposta do trabalho, os dados (observações) utilizados para aplicar o processamento do método PPP foram obtidos em formato *RINEX* 2 e 3, da estação GOGY, por meio da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), na data 10/05/2022.

A coleta de dados iniciou com a aquisição de arquivos com uma taxa de ocupação de 24 horas, com a personalização, em diferentes intervalos de tempo 12:00 – 13:00, 12:00 – 13:30, 12:00 – 14:00, 12:00 – 14:30, 12:00 – 15:00, 12:00 – 15:30, 12:00 – 16:00 e 12:00 – 16:30 (60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 e 270 minutos), no próprio site do IBGE, seção RBMC. Também foram configuradas as diferentes taxas de gravação (1s, 5s e 15s), admitindo também o uso de diferentes máscaras de elevação (10° e 15°) e a combinação de constelações GNSS. A seguir, ainda nessa etapa, foi feita a coleta dos arquivos de correção e de modelagem de erros compostos por:

- Soluções finais de órbitas e correções de relógio dos satélites, disponibilizados pela *Multi-constelação Extension* (MGEX) do IGS; e
- Mapas ionosféricos pela *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE).

4.3.3 Processamento pelo método PPP - soluções *online* e sistema *desktop*

O processamento dos dados foi realizado no modo estático, com o uso do método de posicionamento PPP, variando entre soluções *online* (CSRS-PPP, IBGE-PPP, AUPOS-PPP, OPUS-PPP E IGN-PPP) e sistema *desktop* (RTKLIB-PPP e WaSoft – WAPPP), sob diferentes taxas de gravação, sob diferentes intervalos de tempo de ocupação e empregando o GPS. O uso de diferentes máscaras de elevação foi empregado apenas pelo RTKLIB-PPP pela facilidade de manipulação dos dados para o processamento em diferentes máscaras de elevação. Foi realizado também o processamento GPS/GLONASS para o IBGE-PPP e o RTKLIB-PPP por serem as únicas plataformas capazes de se realizar esses processamentos.

Os processamentos utilizando os *softwares* RTKLIB-PPP e WASOFT-PP, por serem os únicos capazes de realizarem os processamentos multi-constelações, foi definido da seguinte forma: GPS e GPS/ GLONASS/ GALILEO/ BEIDOU. Para concluir, o processamento utilizando o método PPP foi organizado conforme é mostrado no Quadro 12:

Quadro 12 – Organização dos dados para o processamento pelo método PPP.

Processamento PPP	Tempo (min)	Sistema	Taxas de Gravação	Máscara de Elevação
AUPOS – PPP	60 – 270 min	GPS	1s, 5s, 15s	10°
CSRS – PPP	60 – 270 min	GPS	1s, 5s, 15s	10°
IBGE – PPP	60 – 270 min	GPS e GPS/GLONASS	1s, 5s, 15s	10°
IGN – PPP	60 – 270 min	GPS	1s, 5s, 15s	10°
OPUS -PPP	60 – 270 min	GPS	1s, 5s, 15s	10°
RTKLIB	60 – 270 min	GPS, GPS/GLONASS e Multi – Constelações	1s, 5s, 15s	10° e 15°
WaSoft	60 – 270 min	GPS e Multi – Constelações	1s, 5s, 15s	10°

Fonte: Os autores (2022).

4.3.4 Compatibilização de sistemas de referência

No posicionamento multi-constelações, quando se utiliza o método PPP, é primordial que as coordenadas das diferentes constelações GNSS estejam referenciadas ao mesmo sistema geodésico. Com base nisso, para o processamento dos dados foram utilizadas as efemérides precisas disponibilizadas pelo Projeto MGEX, para todas as soluções *online* e sistema *desktop*, por meio disso os resultados finais foram referenciados ao sistema ITRF2014, para época de levantamento. Após o processamento dos dados, as coordenadas estimadas pelo método PPP foram mantidas no mesmo referencial, ou seja, no ITRF14/IGS14.

Do mesmo modo, os erros dos relógios dos satélites GNSS também necessitavam estar numa mesma escala de tempo (*time scale*). Os produtos MGEX vêm referenciados ao sistema de tempo GPS, enquanto que os erros dos relógios MGEX dos satélites GLONASS e Galileo são referenciados ao sistema de tempo GPS. Caso similar ocorre com o uso dos satélites BeiDou.

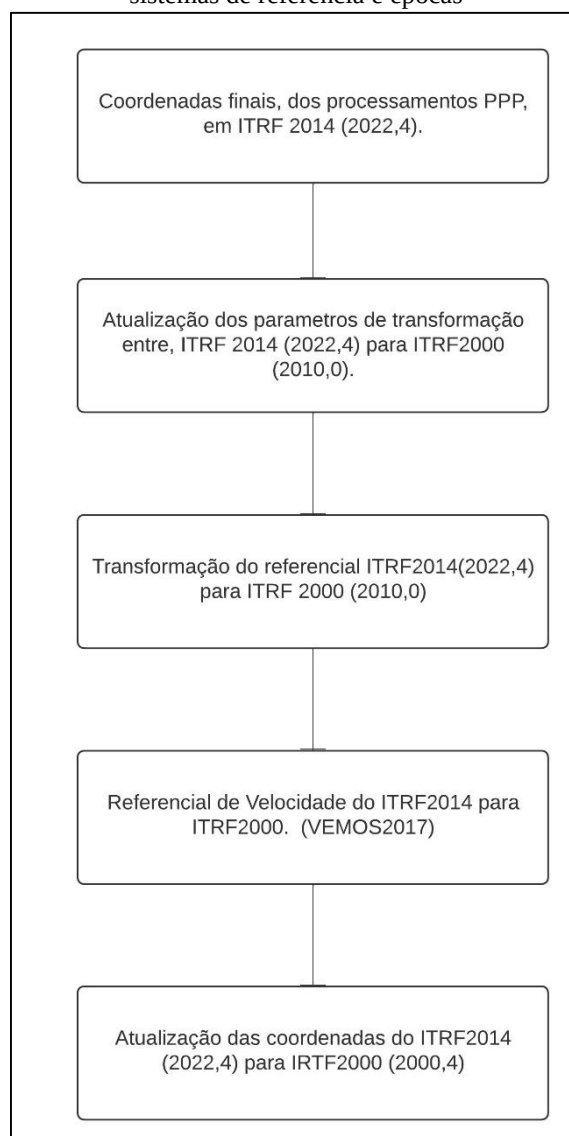
Como as diversas soluções *online* e o sistema *desktop* geraram diversos arquivos, contendo várias informações sobre o processamento, bem como as coordenadas cartesianas (X, Y, Z), coordenadas geodésicas e coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) e respectivos desvios padrão (σ_x , σ_y , σ_z) no sistema de referência ITRF2014 (IGS14), na época da coleta dos dados, empregou-se uma rotina no *software* OCTAVE a fim de automatizar e realizar a transformação dos referencias e as atualizações das épocas, transformando os resultados finais para o referencial ITRF2014/IGS14.

As coordenadas de referência, contidas no descritivo da estação da RBMC, se encontram no sistema de referência oficial do Brasil, que é o SIRGAS2000, época 2000,4 o qual é uma densificação regional do ITRF2000 para a época 2000,4 (SIRGAS, 2022). Por isso, fez-se necessário realizar a transformação do referencial do ITRF2014 (IGS14) para ITRF2000, dos dados que foram estimados, bem como da atualização de coordenadas para compatibilizar à época de referência (2000,356).

Desta forma, todas as coordenadas a serem comparadas ficaram referenciadas para a mesma época e mesmo sistema de referência.

A Figura 23 a seguir, ilustra o processo de transformação de referencial e atualização das coordenadas de referência.

Figura 23 – Fluxograma - Processo de transformações de referencial realizadas para compatibilizar os sistemas de referência e épocas



Fonte: Os autores (2022).

A atualização e transformação das coordenadas de referência foram realizadas com base nas equações 22 a 27, Item 3.4.4 - Parâmetros, Transformação e Atualização de Coordenadas. No quadro são mostrados os parâmetros de transformação do ITRF2014 para ITRF2000, para a época 2010,0. Posteriormente, é realizado a atualização de 2010,0 para época 2000,4. Vale ressaltar que, essa pesquisa levou em consideração a compatibilidade existente entre os sistemas de referência SIRGAS2000 e ITRF2000.

Na fase de atualização de coordenadas, como anteriormente mencionado, foi necessário considerar as componentes de velocidade. As componentes do vetor velocidade da estação (V_x , V_y , V_z) que foram adquiridas por meio do *grid* do VEMOS2017, e o procedimento técnico foi executado por meio do *software* OCTAVE.

Com as coordenadas, devidamente transformadas e atualizadas, utilizou-se a ferramenta de transformação de coordenadas geodésicas para coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*), por meio da calculadora disponibilizada pelo INPE, com a finalidade de facilitar a análise final dos resultados.

Para realizar a análise dos resultados finais, com base na acurácia posicional, foram utilizadas as coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) no cálculo dos valores da REQM (Raiz do Erro Quadrático Médio) em $REQM_{R2D}$ e $REQM_{R3D}$. De posse das coordenadas - estimadas e de referência - ambas em UTM, foi realizado o cálculo das discrepâncias a partir das coordenadas estimadas para as soluções *online* e para o sistema *desktop* bem como para as coordenadas de referência da estação GOGY, disponibilizadas pelo IBGE em seus respectivos descritivos.

Para o cálculo das discrepâncias da resultante planimétrica foram utilizadas as Equações 24 a 27:

$$\begin{vmatrix} \Delta_{N(metros)} \\ \Delta_{E(metros)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N_{(estimada)} & - & N_{(referência)} \\ E_{(estimada)} & - & E_{(referência)} \end{vmatrix} \quad (24)$$

Estas equações possibilitaram calcular a discrepância planimétrica entre as coordenadas UTM estimadas em N e E em relação às coordenadas de referência também no sistema UTM da estação GOGY.

Para finalizar a etapa de cálculos do $REQM_{R2D}$ utilizou-se a equação seguinte, onde n representa o número total das observações.

$$REQM_{R2D} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{N(coordenadas\ UTM)}}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{E(coordenadas\ UTM)}}{n}\right)^2} \quad (25)$$

Com relação a altimetria, a discrepância altimétrica (Δh) foi calculada utilizando-se a equação seguinte, também no sistema UTM.

$$\Delta_{h(\text{coordenadas } UTM)} = h_{(\text{estimado})} - h_{(\text{referência})} \quad (26)$$

Por fim, para finalizar todo o processo, foi calculado o Erro Quadrático das Resultantes planimétricas e tridimensionais utilizando-se a equação seguinte.

$$REQM_{R3D} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{N(UTM)}}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{E(UTM)}}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{hDP(UTM)}}{n}\right)^2} \quad (27)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir foram embasados nas análises das acurácias, calculadas em função da discrepância planimétrica e altimétrica, obtidas entre as coordenadas estimadas por meio dos processamentos em PPP, das soluções *online* e sistema *desktop*, compatibilizadas e atualizadas, e a coordenada de referência (Estação GOGY). Foi realizado o cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) para a resultante planimétrica e altimétrica de todos os processamentos.

Para a apresentação dos resultados, foram gerados gráficos e tabelas referentes ao dia dez (10) de maio do ano 2022, considerando para cada solução e sistemas, o intervalo de rastreo, todos iniciados às 12:00h e concluídos às 16:30h UTC.

5.1 Análise dos resultados com diferentes taxas de gravação

Conforme proposto no trabalho, foi realizado os processamentos nas plataformas *online* e sistemas *desktop*, utilizando diferentes taxas de gravação (1s, 5s e 15s) para todos os intervalos de tempo de ocupação. Entretanto, tanto para soluções *online* e sistemas *desktop*, não houve alterações nos resultados estimados, ou seja, não foi constatado nenhuma correlação imediata da variável (taxa de gravação), para influenciar a acurácia dos resultados nos diferentes intervalos de tempo.

Os resultados das coordenadas estimadas, processadas utilizando apenas a constelação GPS e processamentos utilizando mais de uma (1) constelação, estão contidos no Apêndice 01.

5.2 Análise dos resultados com diferentes tempos de ocupação

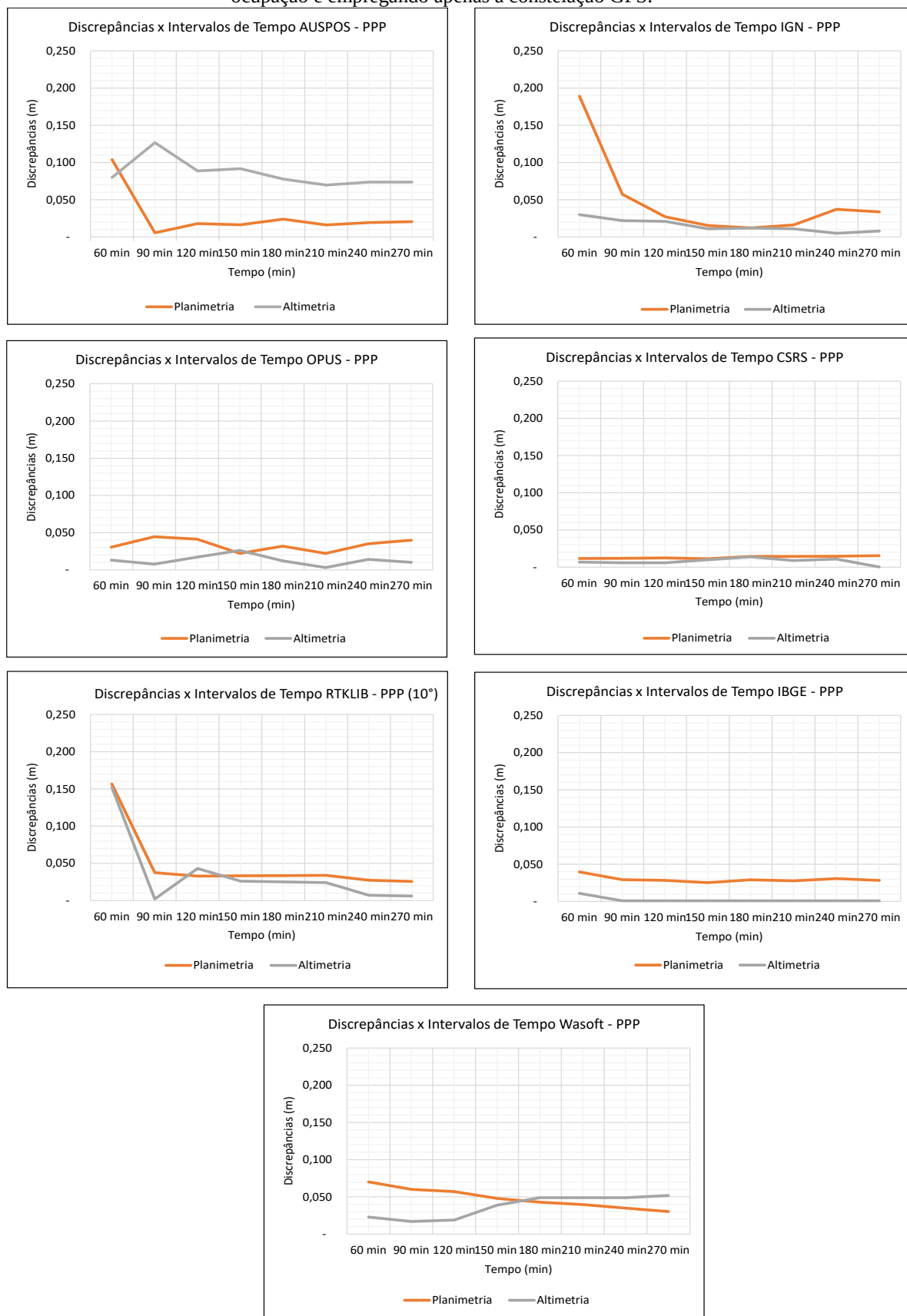
Como mencionado anteriormente, foi realizado o cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) para a análise da planimetria e altimetria, com base na relação das coordenadas estimadas (compatibilizadas para SIRGAS2000), pelas soluções *online* e sistemas *desktop*, com a de referência (Estação GOGY – RBMC), em UTM (*Universal Transverse Mercator*).

Seguidamente, foram relacionados essas informações com a taxa de ocupação (intervalo de tempo do processamento de 0 minutos – 270 minutos), como já estabelecido

nos objetivos do trabalho, com a finalidade de analisar como esses valores se comportaram em menor e maior tempo de ocupação.

Na Figura **24** a seguir mostra o comportamento das coordenadas resultantes em termos de REQM, em relação ao tempo de ocupação, para os processamentos das soluções *online* e sistemas *desktop*, utilizando apenas a constelação GPS.

Figura 24 – Comportamento das REQM, obtidas nas diversas plataformas, de acordo com o tempo de ocupação e empregando apenas a constelação GPS.



Fonte: Os autores (2022).

Analisando a Figura 24, percebe-se que o comportamento dos valores das discrepâncias diminuíram com tempo, ou seja, quanto maior o tempo, menores são as discrepâncias. Embora os resultados apresentem um sentido lógico, a proposta do trabalho é apresentar que o método PPP pode ser usual, ou seja, sua aplicabilidade seja diretamente correlacionada com a qualidade dos resultados em menos tempo de ocupação.

Por meio disso, analisando a Figura 24, podemos perceber que a solução *online* CSRS– PPP, se destacou dentre as demais soluções pelas poucas oscilações ao longo do tempo de ocupação, por conta da estabilidade e menores valores a partir dos 90 minutos de ocupação. Observa-se que a altimetria se estabiliza abaixo dos 0,010m, já a planimetria tem pequenas variações milimétricas após os 90 minutos de ocupação, com valores entre 0,012m – 0,016m.

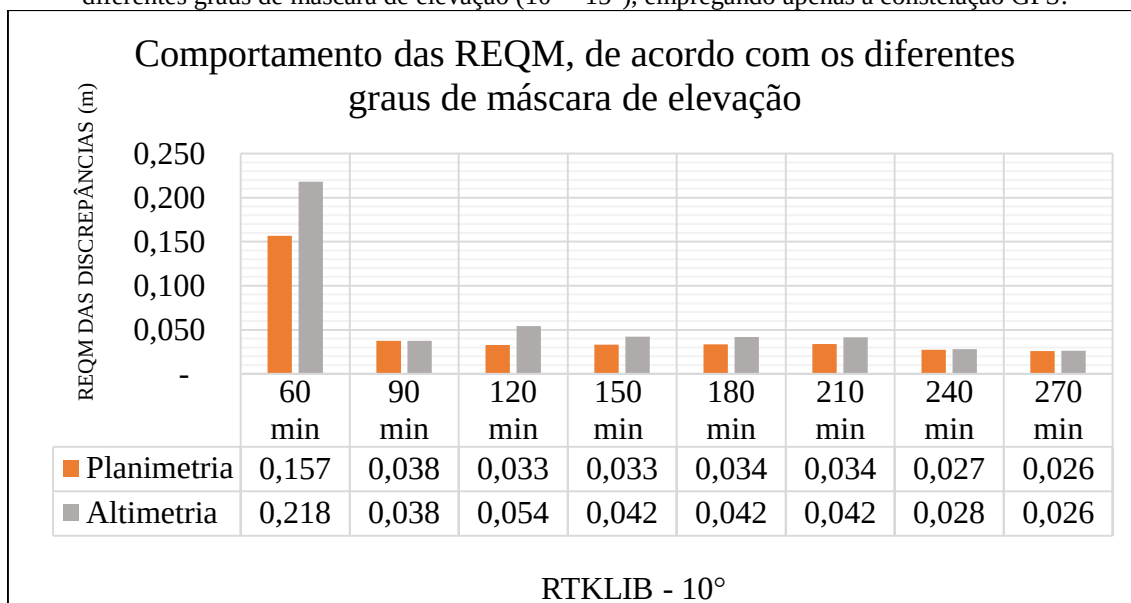
O sistema RTKLIB – PPP também apresentou uma estabilidade milimétrica na planimetria durante um intervalo de tempo (90 minutos – 210 minutos), estabilizando seus valores entre 0,038m – 0,040m. Se tratando de altimetria, o RTKLIB - PPP também apresentou uma estabilidade milimétrica, mas ocorreu durante o intervalo de tempo de 150 minutos – 210 minutos, com valor de 0,022m. Entretanto, tanto a planimetria como a altimetria sofreram novas oscilações, dessa vez a nível centimétrico, após os 230 minutos de tempo de ocupação.

A plataforma *online* OPUS-PPP apresentou resultados inferiores em relação a todas as plataformas, por conta da instabilidade ao longo do tempo de ocupação, obtendo oscilações centimétricas nos valores planimétricos e altimétricos.

5.3 Análise dos resultados com diferentes máscaras de elevação

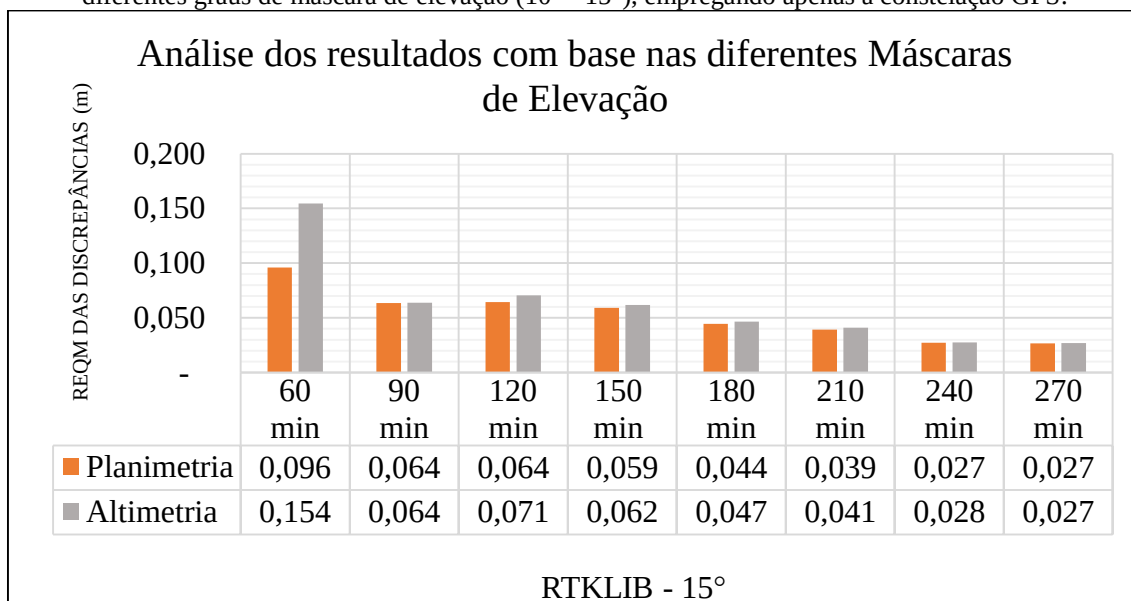
Com base no que foi proposto no trabalho, realizou-se a comparação entre os diferentes graus de máscara de elevação (10° - 15°). A análise foi realizada por meio do sistema RTKLIB – PPP, por conta da facilidade em manipular e processar os dados em diferentes graus de máscara de elevação. Nas Figuras a seguir, são apresentados os valores planimétricos e altimétricos dos resultados.

Figura 25 – Comportamento das REQM, obtidas por meio do sistema RTKLIB, de acordo com os diferentes graus de máscara de elevação (10° - 15°), empregando apenas a constelação GPS.



Fonte: Os autores (2022).

Figura 26 – Comportamento das REQM, obtidas por meio do sistema RTKLIB, de acordo com os diferentes graus de máscara de elevação (10° - 15°), empregando apenas a constelação GPS.



Fonte: Os autores (2022).

Com base nas Figuras 26 e 27, observa-se diferenças nos valores em planimetria e altimetria entre os processamentos, empregando 10° e 15° graus de máscara de elevação.

O destaque está para o RTKIB – PPP empregando 10° graus de máscara de elevação, pois seus valores em planimetria e altimetria foram menores que os valores onde foi empregado a máscara de elevação em 15° graus. É possível visualizar na figura 26 que a diferença dos resultados foram menores a nível centimétrico, a partir dos 90 minutos de tempo de ocupação até 180 minutos, em relação a figura 27. Após isso, os resultados foram similares.

5.4 Análise dos resultados com multi-constelações GNSS

Para a análise dos resultados e fins comparativos, foi empregado mais de uma constelação nos processamentos em PPP. Vale ressaltar que, para examinar qualquer mudança ou influência dessa variável na acurácia planimétrica e altimétrica, foram considerados também os resultados dos processamentos utilizando apenas a constelação GPS. Por meio disso, é possível realizar uma comparação entre eles.

Vale ressaltar que apenas as plataformas IBGE – PPP, RTKLIB – PPP e *WASOFT* – PPP, permitem os processamentos utilizando mais de uma constelação.

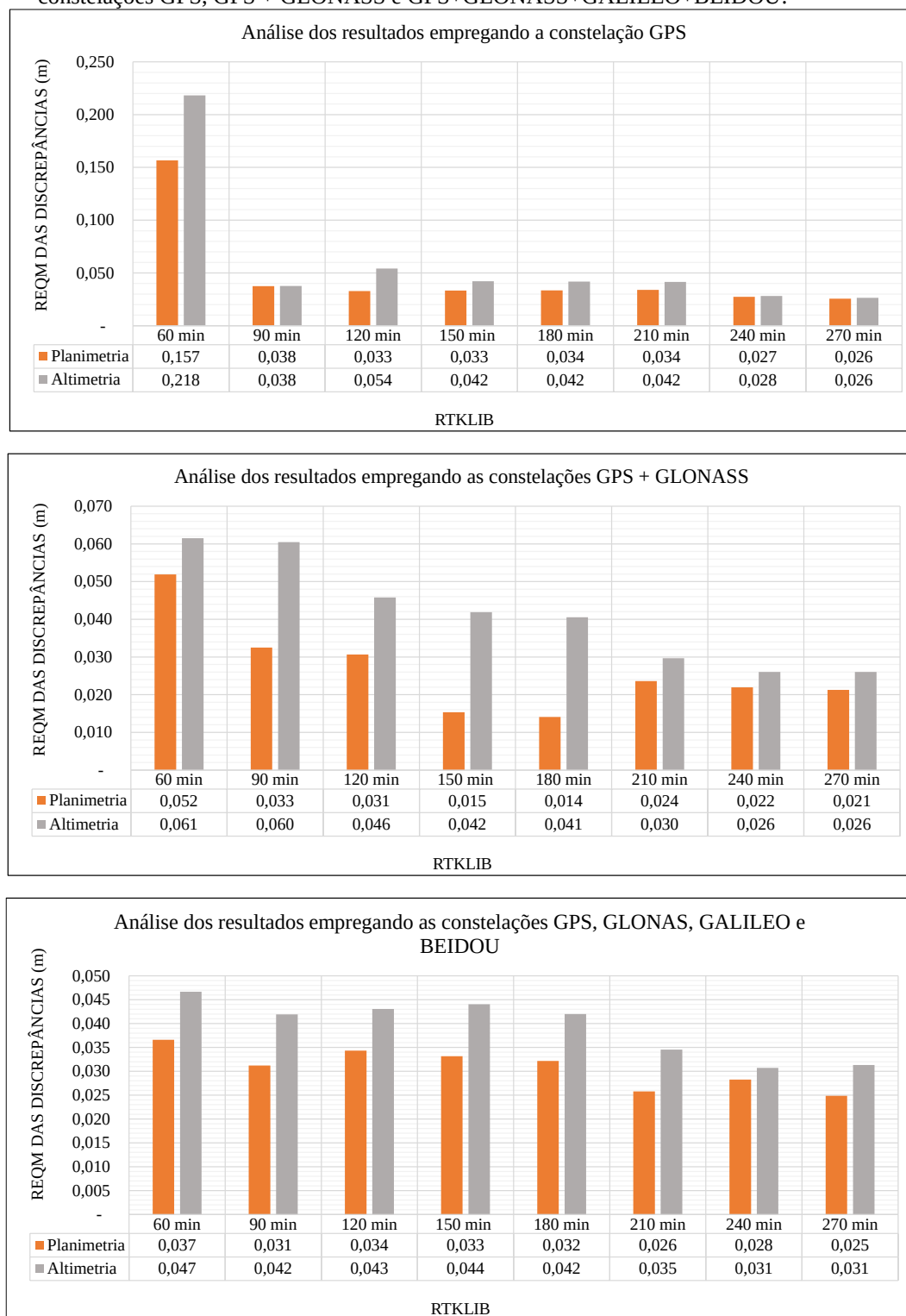
Nas Figuras 28, 29 e 30 a seguir, são apresentados respectivamente os resultados dos processamentos do IBGE - PPP, RTKLIB - PPP e *WASOFT* - PPP.

Figura 27 – Comportamento das REQM, obtida pela plataforma IBGE - PPP, empregando as constelações GPS e GPS + GLONASS.



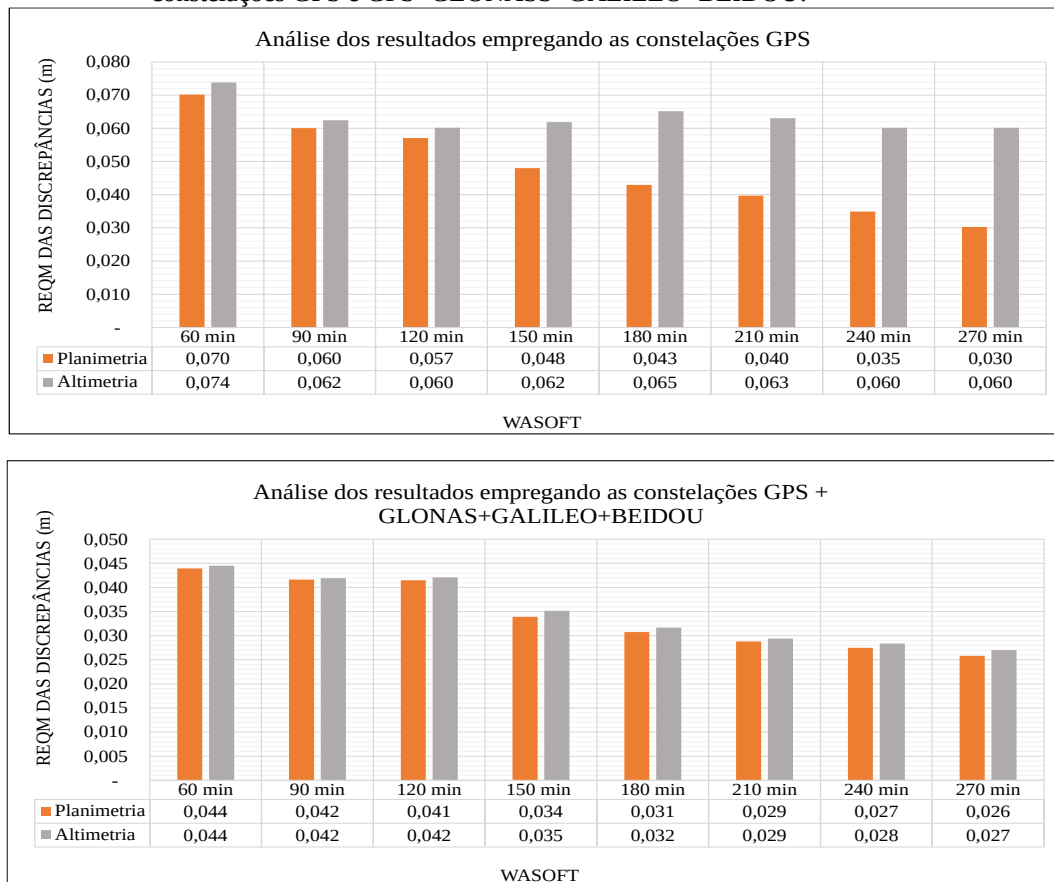
Fonte: Os autores (2022).

Figura 28 – Comportamento das REQM, obtida pela plataforma RTKLIB - PPP, empregando as constelações GPS, GPS + GLONASS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.



Fonte: Os autores (2022).

Figura 29 – Comportamento das REQM, obtida pela plataforma WASOFT - PPP, empregando as constelações GPS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.



Fonte: Os autores (2022).

Conforme a Figura 27, por meio dos processamentos em PPP da plataforma *online* IBGE-PPP e empregando-se a estratégia de processamento utilizando a constelação (GPS) e depois duas constelações (GPS+GLONASS), ocorreram diferenças milimétricas nos resultados estimados. Observa-se que em todos os intervalos de tempo ocorreram poucas variações milimétricas de valores em planimetria e altimetria.

Analisando a Figura 28, observa-se que os resultados do RTKLIB-PPP apresentaram diferenças, com destaque para processamento empregando mais de uma constelação, pois apresentou resultados planimétricos e altimétricos a nível de centímetro, com valores de 0,044 m a 0,044 m para GPS+GLONASS e 0,037 m – 0,047 m para multi-constelações com apenas 60 minutos de tempo de ocupação. Contudo, os valores para o processamento utilizando apenas o GPS, para os 60 minutos de tempo de ocupação, iniciaram a nível do décimo do centímetro. Vale destacar que, ao longo do tempo, os valores planimétricos e altimétricos dos processamentos oscilaram milimetricamente.

Na Figura 29, os processamentos ocorridos na plataforma *desktop* WASOFT – PPP utilizando a estratégia de uso de constelações, apresentaram comportamento semelhante ao RTKLIB.

Com 60 minutos de taxa de ocupação, analisa-se que os valores planimétricos e altimétrico, empregando-se a estratégia multi-constelações, foram menores em relação ao processamento utilizando apenas o GPS, com valores de 0,044m – 0,044m. Pode-se destacar também que, ao fim do tempo de ocupação (270 minutos), os valores dos processamentos utilizando multi-constelações também foram menores.

5.5 Análise dos resultados com a utilização do PPP-AR (solução de ambiguidades)

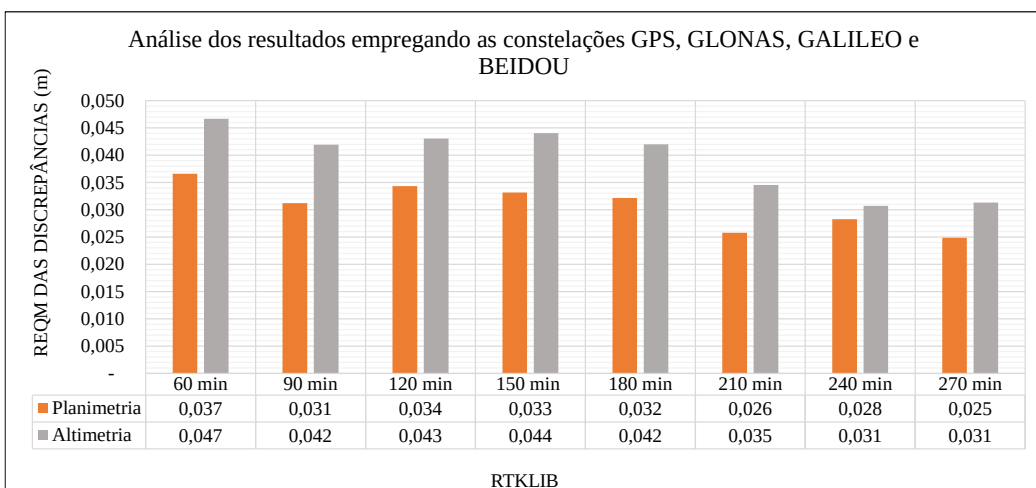
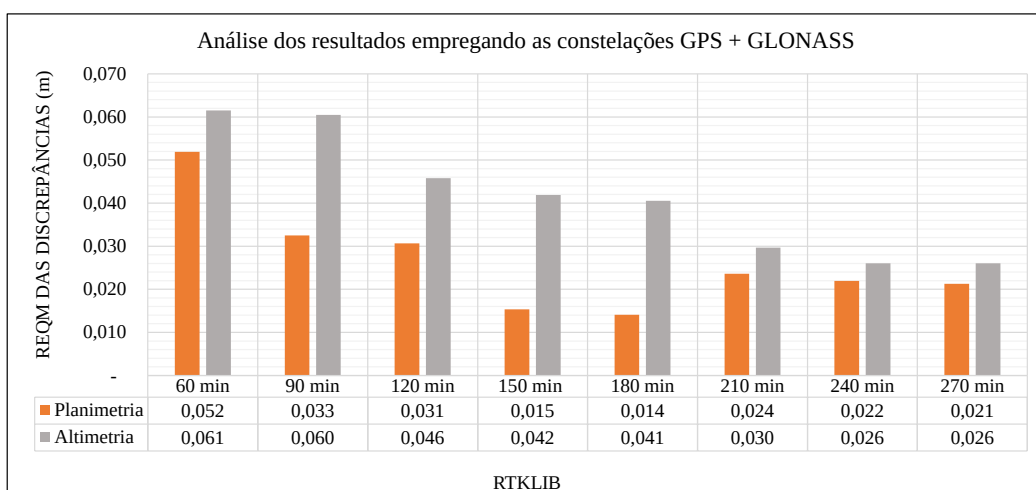
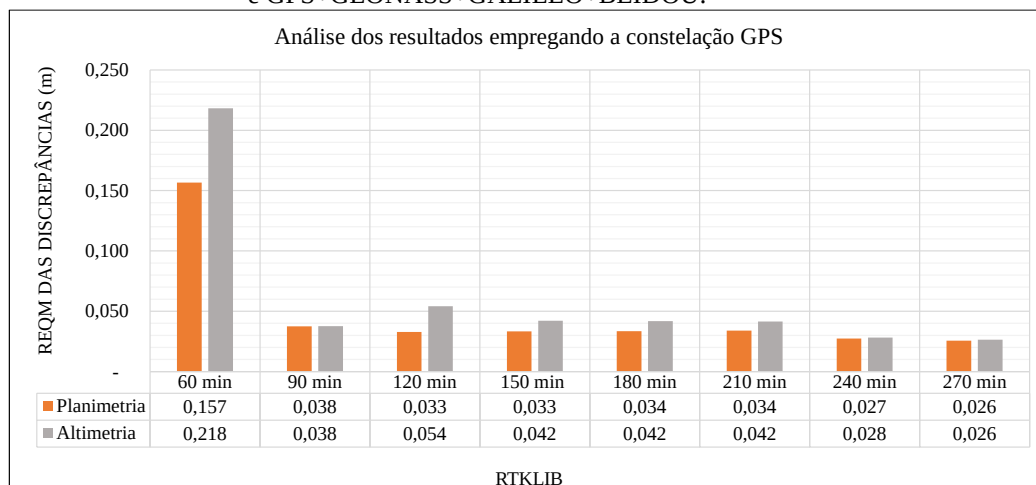
Como proposto no trabalho foram realizados os processamentos utilizando o PPP-AR, com a finalidade de avaliar as perspectivas futuras voltadas para a qualidade dos resultados. Destaque-se que a solução *online* CSRS - PPP já atribui a tecnologia de PPP-AR em todos os processamentos de dados.

O sistema RTKLIB-PPP é visto como opção *desktop* para atribuir o PPP – AR (solução de ambiguidades) aos processamentos em diferentes intervalos de tempo de ocupação, por meio disso, realizou-se os processamentos empregando o PPP-AR, utilizando as constelações GPS, GPS+GLONASS e multi-constelações para os diferentes intervalos de tempo de ocupação.

Salienta-se também que foram realizados os mesmos processamentos, mas não fazendo o uso do PPP – AR (solução de ambiguidades), com a finalidade de comparar os resultados e identificar as possíveis influências no processamento em PPP, porém o IBGE-PPP ainda não atribuiu ao seu sistema a tecnologia de solução de ambiguidades.

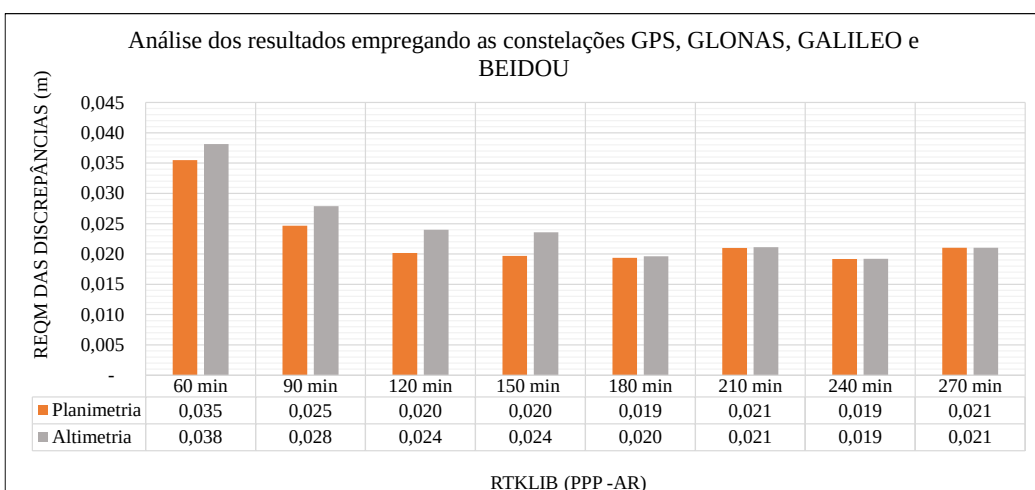
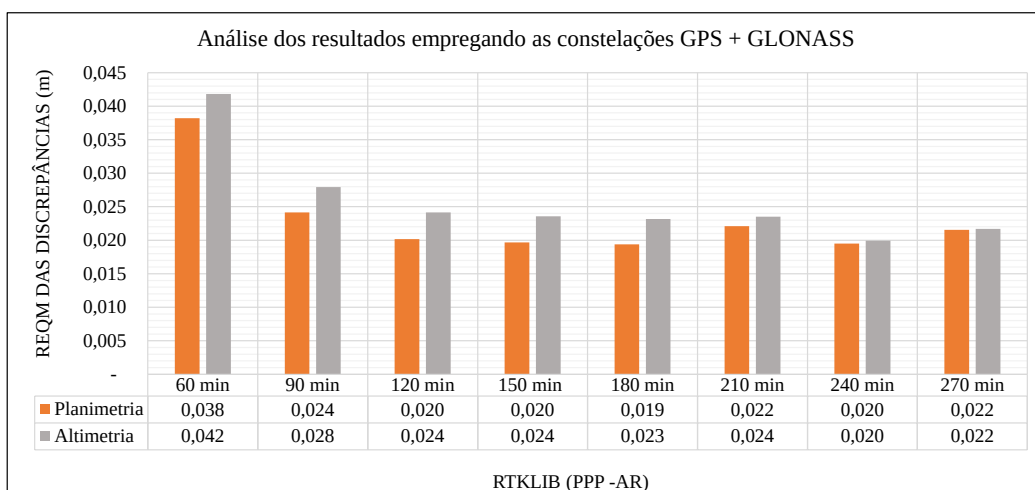
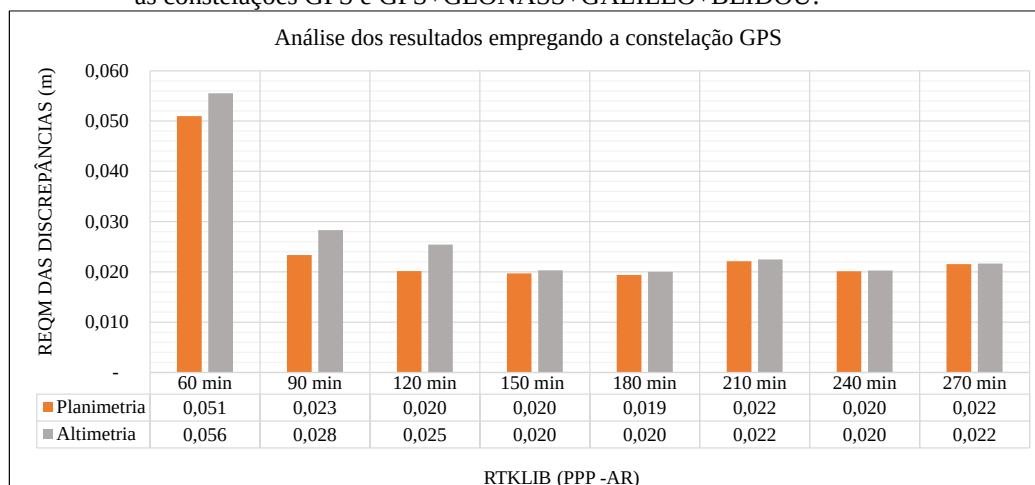
Nas Figuras a seguir, podemos observar o comportamento dos resultados (planimétricos e altimétricos) com e sem o PPP – AR (solução de ambiguidades).

Figura 30 – Comportamento das REQM, obtida pela plataforma - PPP, empregando as constelações GPS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.



Fonte: Os autores (2022).

Figura 31 – Comportamento das REQM, obtida pela plataforma - PPP, atribuindo o PPP-AR empregando as constelações GPS e GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU.



Fonte: Os autores (2022).

A partir das Figuras 31 e 32 verifica-se que o comportamento dos valores planimétricos e altimétricos, utilizando-se algoritmos de PPP-AR, são superiores aos processamentos onde não se usa a tecnologia. Analisando visualmente os gráficos, existe

uma pequena variação de 0,001m nos processamentos com algoritmos de PPP-AR, onde essa estabilidade acontece após os 90 minutos de tempo de ocupação.

Importante destacar que, os processamentos sem a utilização dos algoritmos PPP-AR já são considerados satisfatórios para alguns trabalhos de engenharia, porém, quando atribuímos a tecnologia, ocorre uma potencialização nos resultados estimados com pouco tempo de ocupação. De acordo com Geng *et al.* (2013), para se alcançar uma elevada acurácia com uso de curtas sessões de observações, na realização do PPP, se faz necessário a solução da ambiguidade inteira.

De modo geral, como proposto no trabalho, as soluções de ambiguidades é um fator que influencia consideravelmente nos resultados. Na Tabela 1 a seguir, apresenta as taxas de soluções de ambiguidades do RTKLIB e do CSRS-PPP, com a finalidade de comparar a potencialidade dos algoritmos presentes em cada plataforma. A seguir é apresentado a tabela de taxas de resolução de ambiguidades.

Tabela 1 – Taxas de resolução de ambiguidades.

Plataforma de Processamento	Média	Máximo	Mínimo
CSRS - PPP	84,26%	98,27%	25,12%
RTKLIB - PPP	70,54%	85,30%	34,50%

Fonte: Os autores (2022).

5.6 Ranqueamento das soluções *online* e sistemas *desktop*.

Após a análise de todos os resultados das plataformas de soluções *online* e sistemas *desktop*, foi elaborado um *ranking* destas que ofereceram valores mais próximos com as coordenadas de referência da estação GOGY.

Lembrando que não se pretende neste estudo apontar qual plataforma é melhor, entretanto realizar um comparativo de resultados, indicando o nível de concordância em termos planimétricos e altimétricos baseando-se na acurácia posicional obtidos com estas plataformas. Salienta - se que todas as plataformas disponíveis, tanto *online* ou *desktop*, as quais foram utilizadas neste estudo são alternativas a depender da finalidade a que se destina os trabalhos topográficos/geodésico de fácil utilização, robustas e disponíveis gratuitamente.

Para essa classificação, foram considerados todos os processamentos realizados neste trabalho, separando-os com base na quantidade de constelações usadas e nos valores médios da REQM em planimetria e altimetria.

Nos Quadros 13,14 e 15 a seguir, apresenta-se o *ranking* e os valores das REQM planimétrico e altimétrico das soluções *online* e sistemas *desktop*.

Quadro 13 – Classificação das plataformas *online* e *desktop* empregando a utilização da constelação GPS.

Posição/Classificação	Plataforma de Processamento	REQM - R2D (m)	REQM - R3D (m)
6	AUSPOS -PPP	0,027	0,089
5	OPUS -PPP	0,033	0,036
4	IGN -PPP	0,027	0,031
3	IBGE -PPP	0,029	0,029
1	CSRS -PPP	0,013	0,015
2	RTKLIB-PPP (10°)	0,021	0,022
7	RTKLIB-PPP (15°)	0,052	0,052
8	WaSoft - PPP	0,048	0,061

Fonte: Os autores (2022).

Quadro 14 – Classificação das plataformas *online* e *desktop* empregando a utilização das constelações GPS +GLONASS.

Posição/Classificação	Plataforma de Processamento	REQM - R2D (m)	REQM - R3D (m)
1	IBGE - PPP	0,027	0,028
2	RTKLIB - PPP	0,025	0,039

Fonte: Os autores (2022).

Quadro 15 – Classificação das plataformas *online* e *desktop* empregando a utilização das constelações GPS +GLONASS+GALILEO+BEIDOU.

Posição/Classificação	Plataforma de Processamento	Constelações	REQM - R2D (m)	REQM - R3D (m)
1	WaSoft - PPP	MULTI – CONST.	0,034	0,035
2	RTKLIB - PPP	MULTI – CONST.	0,031	0,039

Fonte: Os autores (2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

6.1 Considerações Finais

O principal objetivo deste trabalho consistiu em analisar comparativamente as diversas soluções *online* e sistema *desktop*, para o processamento empregando o método de Posicionamento por Ponto Preciso, considerando as variáveis tempo de ocupação, taxa de gravação, máscara de elevação e multi-constelações. Para alcançar o objetivo foi necessário realizar várias campanhas de processamentos para cada uma das plataformas *online* e *desktop*, empregando as variáveis. Por meio disso, o estudo permitiu verificar a acurácia das coordenadas estimadas e a influência das variáveis nos resultados.

Além disso, verifica as potencialidades das plataformas de processamento de dados GNSS, utilizando o método PPP no fornecimento de coordenadas acuradas.

O estudo também buscou revisar a literatura quanto ao estado da arte do método de PPP e os principais sistemas de navegação GNSS. Agregando-se a isto, foi apresentado também uma descrição dos sistemas de referência geodésicos modernos, a importância da transformação e atualização das coordenadas de referência, o uso do modelo de velocidades atual da América do Sul, bem como a compatibilização de épocas e sistemas de referência das coordenadas relacionadas. Foi possível também avaliar as perspectivas futuras para o PPP, assim como verificar as potencialidades do PPP-AR (solução de ambiguidades).

As campanhas de processamento utilizando o método PPP foram executados para o dia dez (10) de maio de 2022, nas quais as acurácias das coordenadas estimadas desses processamentos foram analisadas em planimetria e altimetria. As análises dos resultados foram feitas separadamente, afim de verificar o comportamento dos resultados com base na variável específica. Ressaltando que, para a obtenção dos valores de porcentagens, apresentadas a seguir, considerou apenas os valores dos processamentos feitos.

A análise com base no uso de diferentes taxas de gravação concluiu que não houve qualquer influência da componente coordenadas estimadas, ou seja, cada processamento realizado utilizando as taxas de gravação de 1 segundo, 5 segundos e 15 segundos, não tiveram quaisquer alterações nos resultados. Isso ocorreu para todas as plataformas *online* e *desktop*.

A análise com base no tempo de ocupação observa-se que todos os valores (planimétricos e altimétricos), das plataformas *online* e *desktop*, foram mais acurados com um maior tempo de ocupação e todas apresentaram resultados coerentes em relação ao tempo total. Entretanto, observa-se que a plataforma de maior destaque foi o CSRS – PPP por conta da sua estabilidade a nível milimétrico dos valores (planimétrico e altimétrico), com 90 minutos de processamento. Por meio disso podemos concluir a potencialidade da plataforma *online*.

A análise com base no uso de diferentes máscaras de elevação baseou-se nos resultados das coordenadas estimadas oriundas dos processamentos da plataforma RTKLIB – PPP. Observa-se que os valores (planimétricos e altimétricos), no intervalo de tempo de 0 a 180 minutos, para os processamentos utilizando 10° graus de máscara de elevação foram cerca 68% maiores em relação aos resultados utilizando 15° graus de máscara de elevação.

Conclui-se que os processamentos utilizando 10° graus de máscara de elevação possuíam valores de acurácia planimétrica e altimétrica elevados, enquanto os valores dos resultados obtidos empregando 15° de máscara de elevação, foram inferiores. Entretanto, os valores ficam similares após o intervalo de tempo de 210 minutos de tempo de ocupação.

As análises feitas com base nos processamentos empregando multi-constelações para a plataforma IBGE – PPP, com a campanha GPS/GLONAS, foi possível observar resultados tanto planimétricos e altimétricos, similares com a campanha GPS, com diferenças milimétricas entre elas.

Para os processamentos utilizando os sistemas *desktop* RTKLIB e WaSoft, observa-se que a integração de constelações proporcionou valores mais acurados em comparação com valores utilizando apenas a constelação GPS, em menos tempo de ocupação.

Foi realizado também campanhas de processamento utilizando algoritmos de solução de ambiguidades (PPP-AR), para o sistema *desktop* RTKLIB, com a finalidade de comparar com os resultados dos processamentos que não fizeram uso desses algoritmos. Foi possível observar resultados mais acurados nos processamentos das campanhas GPS e multi-constelação. Os valores em planimetria e altimetria para os processamentos com o uso de algoritmos de PPP-AR, foram de 58% mais acurados em relação ao processamento que não utiliza algoritmos de PPP-AR.

Vale ressaltar que a solução *online* CSRS – PPP já faz uso de algoritmos PPP-AR e seus resultados tiveram uma qualidade posicional.

Portanto, foi possível identificar vantagens e desvantagens no uso plataformas *online* e sistemas *desktop*. Para as plataformas *online* verificou uma facilidade de manuseio e processamento dos dados, já as desvantagens são baseadas na falta de alteração de parâmetros. Para as plataformas *desktop* verificou a melhores opções de parâmetros, livre escolha de arquivos de correções e modelagem de erros, já as desvantagens estão ligadas a complexidade de manusear e compreender o funcionamento.

6.2 Perspectivas

Ao longo do trabalho foi possível esclarecer a importância do método PPP atualmente para a engenharia, onde seu desempenho foi significativamente melhorado graças aos avanços contínuos nas tecnologias de órbita, relógio e resolução de ambiguidade (PPP-AR) de satélites.

Por meio disso, as perspectivas futuras para o método estão alinhadas ao seu constante aperfeiçoamento, para se tornar cada vez mais um método usual. Para isso são realizadas investigações utilizando algoritmos (PPP - AR) como forma de aprimorar o funcionamento do método PPP, obtendo elevadas acurácias posicionais com um menor tempo de ocupação.

A velocidade de convergência também continua sendo um fator limitante em aplicações de PPP em tempo real, por meio disso, diversos trabalhos vêm explorando a modelagem de correções de atrasos troposféricos para uma solução rápida de ambiguidade (CUI, *et al*).

É importante ressaltar o constante uso de plataformas *online* e *desktop*, para se realizar o método PPP. Por meio disso, estão surgindo cada vez mais outras plataformas, empregando algo novo para a realização do método PPP, e as ferramentas já existentes, estão sempre em constante atualização, para um melhor funcionamento.

6.3 Recomendações para trabalhos futuros

Recomenda-se para trabalhos futuros a investigação do desempenho do método PPP, aplicado em diferentes latitudes e longitudes, ou seja, várias estações RBMC. Pode-se também realizar análises temporais.

Vale ressaltar que diversos programas e algoritmos estão sendo construídos para estimar as ambiguidades, ou seja, a tecnologia PPP-AR estão em constante atualização na busca em melhorar a qualidade dos resultados com menos tempo de ocupação. Por meio disso, a investigação de outros algoritmos deve ser contínuo ao longo dos anos.

REFERÊNCIAS

- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling *online* ar station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, DOI: **10.1002/2016JB013098**. 2016.
- ALCAY, Salih; TURGUT, Muzeyyen. *Evaluation of the positioning performance of multi-GNSS RT-PPP method*. *Arabian journal of geosciences*, v. **14**, n. **3**, p. **1-19**, 2021.
- ALVES, CHAENNE MILENE DOURADO et al. Avaliação da qualidade do Posicionamento por Ponto Preciso na sua forma *online*. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE**, p. 001-007, 2010.
- ALVES, D. B. M., de Abreu, P. A. G., & Souza, J. S. (2013). **GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento**. *Rev. Bras. Geom*, 1(1), 8-13. BUENO. M. A., Conceitos, Históricos e Divisões da Agricultura. Instituto Federal Goiano, Campus Iporá – GO. 2012.
- ALVES, Daniele Barroca Marra; DE ABREU, Pedro Augusto Giraldez; SOUZA, Jéssica Saldanha. **GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento**. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 1, n. 1, 2013.
- AUSPOS. Serviço de Processamento GPS *online*. Posicionamento da Austrália, Disponível em: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- AZAMBUJA, José Luiz Fay de. **Potencialidades de serviços *online* de Posicionamento por Ponto Preciso em aplicações geodésicas: uma análise envolvendo longo período de dados das estações da RBMC**. 2015.
- AZAMBUJA, Jos Luiz; MATSUOKA, Marcelo Tomio. **Velocidades das coordenadas obtidas por Posicionamento por Ponto Preciso: um modelo considerando coordenadas horizontais e altura elipsoidal**. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 4, n. 2, 2016.
- BARBOSA, Rui. **China Lança Último Beidou 3**. Em Órbita, Disponível em: [https://www.orbita.zenite.nu/trashed/ DA SILVA](https://www.orbita.zenite.nu/trashed/DA%20SILVA). Acesso em: 05 de junho de 2022.
- BARBOSA, Rui C. **“Chinese Bolster Navigation System with Dual Beidou Launch,”NASA Spaceflight**. Disponível em: <https://www.nasaspaceflight.com/2019/11/chinese-bolster-navigation-system-dual-BeiDou-lançamento>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- BOLBOL, S.; ALI, A. H.; EL-SAYED, M. S.; ELBEAH, M. N. *Performance evaluation of Precise Point Positioning (PPP) using CSRS-PPP online service*. *American Journal of Geographic Information System*, v. 6, n. 4, p. 156-167, 2017. DOI.

10.5923/j.ajgis.20170604.03.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses. *Geophys. Res. Lett.* 2004. 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984.

BULBUL, S.; BILGEN, B.; INAL, C. **The performance assessment of Precise Point Positioning (PPP) under various observation conditions.** *Measurement*, v. 171, p. 108780, 2021. DOI. 10.1016/j.measurement.2020.108780.

BLEWITT, G. Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km. *Journal Geophys Research* v.94, B8, p.10187-10203. 1989.

_____. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, v. v. 17, n.3, p.199-202. 1990.

_____. The fixed-point theorem of ambiguity resolution for Precise Point Positioning of GPS networks: Theory and applications. *Eos Trans. AGU*, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G43A-0977., 2006.

CANTO, Alex Honório Tavares do et al. **O Uso do GNSS na Determinação de Pequenos Deslocamentos Estruturais.** 2019.

COSTA, SONIA MARIA ALVES et al. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**, v. 2, p. 8-11, 2008.

CUI, Bobin et al. **Modelagem de correções de atraso troposférico de área ampla para resolução rápida de ambiguidade de PPP.** *Soluções GPS*, v. 26, n. 2, p. 1-15, 2022.

CHAVES, W. O. MONICO, J. F. G. **Análise da consistência entre o ITRF2014 e o SIR15P01.** Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositocarta. Rio de Janeiro - RJ, p. 149-153. 2017

CSRS. **Posicionamento por Ponto Preciso.** CSRS-PPP. Disponível em: <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>. Acesso em: 16 nov. 2022.

DA CRUZ FERREIRA, Raissa et al. **Revista Brasileira de Cartografia.** Análise Comparativa da Acurácia Posicional Proporcionada por Plataformas de Processamento de Dados GPS no Posicionamento Relativo e por Ponto Preciso, v. 74, n. 1, 2022.

DA MOTTA, Renan Rodrigues; FORTES, Luiz Paulo Souto. **Revista Brasileira de Cartografia.** Avaliação Preliminar da Técnica de PPP em Tempo Real usando efemérides IGS, n. 69/3, p. 463-472, 2017.

DA SILVA, Crislaine Menezes et al. **Revista Brasileira de Cartografia.** Galileo: a consolidação do sistema de posicionamento europeu, v. 8, n. 4, p. 238-255, 2020.

DE LIMA, Dário Manuel Bettencourt. **Processamento GPS Usando Serviços Online**. Tese de Doutorado. Portugal.Universidade da Beira Interior, 2011.

DO LAGO, Isabel Franco; FERREIRA, Luiz Danilo Damasceno; KRUEGER, Claudia Pereira. **GPS e GLONASS: Aspectos Teóricos e Aplicações práticas**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 8, n. 2, 2002.

EL-DIASTY, M. E ELSOBEIEY, M. **Precise Point Positioning Technique with IGS RealTime Service (RTS) for Maritime Applications**. *Positioning*, v. 6, n. 4, p. 71, 2015. DOI: 10.4236/pos.2015.64008.

ESA. *European Space Agency*. 2022. Disponível em: <https://www.esa.int>. Acesso em 05 jun. 2022.

GAPS. **GPS Analysis and Positioning Software**. UNB. Disponível em: <http://gaps.gge.unb.ca/>. Acesso em: 04 jun. 2022.

GENG, J.; BOCK, Y. **Triple-frequency GPS Precise Point Positioning with rapid ambiguity resolution**. DOI 10.1007/s00190-013-0619-2. p. 449-460, 2013.

GENG, J.; MENG, X.; TEFERLE, F.; DODSON, A. **Performance of Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution for 1- to 4-hour observation periods**. *Survey Review*, v.42, p.155-165. 2010.

GENG, J.; MENG, X.; DODSON, A. H.; TEFERLE, F. N. **Integer ambiguity resolution in Precise Point Positioning: method comparison**. *Journal of Geodesy*, v. 84, n. 9, p. 569-581, 6 ago 2010b.

GENG, J.; MENG, X.; TEFERLE, F. N.; DODSON, A. H. **Hourly Precise Point Positioning with resolution ambiguity**. IESSG University of Nottingham. Disponível em: <http://www.loran.org/Meetings/Meeting2008/Presentation%20pdfs/6B3%20GENG.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

GENG, J.; TEFERLE, F.; SHI, C.; MENG, X.; DODSON, A.; LIU, J. **Ambiguity resolution in Precise Point Positioning with hourly data**. *GPS solutions*. 2009.

GENG, J.; TEFERLE, F. N.; MENG, X.; DODSON, A. H. **Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time Precise Point Positioning**. *Advances in Space Research*, v.47,10, doi: 10.1016/j.asr.2010.03.030, p. 0273-1177. 2011.

GENG, Jianghui et al. **PRIDE PPP-AR: an open-source Software for GPS PPP ambiguity resolution**. *GPS Solutions*, v. 23, n. 4, p. 1-10, 2019.

GLAB. **Ferramenta GNSS-LAB**. GAGE, Disponível em: <https://gage.upc.edu/gLAB/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

GLONASS-IAC. *Beidou Constellation Status*. 2019. Disponível em:

<https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/index.php>. Acesso em 02 jun. 2022.

GMV. **Introdução Geral do Beidou.** ESA, Disponível em: <https://gssc.esa.int/navipedia/index>. Acesso em: 05 jun. 2022.

GMV. **Informações sobre o terminal de usuário.** MAGICGNSS, Disponível em: <https://magicgnss.gmv.com/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

HAUSCHILD, A.; MONTENBRUCK, O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real time positioning. *GPS Solut.* v. 13, p. 173-182, nov. 2008.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice:** Wien: Springer-Verlag, 2001.

HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard; LICHTENEGGER, Herbert; WASLE, Elmar. **GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more.** Springer Science & Business Media, 2007.

IBGE. **Serviço online para pós- processamento de dados GNSS.** IBGE PPP, Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 16 nov. 2022.

IGS. **International GNSS Service Status.** 2021. Disponível em: <https://igs.org>. Acesso em: 16 nov. 2022.

ITRF (2022b). International Terrestrial Reference Frame. **Transformation parameters from ITRF2022 to past ITRF2000.** Disponível em: . Acesso em 20 out. 2022

JÚNIOR, Paulo de Tarso Setti; ALVES, Daniele Barroca Marra; GOUVEIA, Tayná Aparecida Ferreira. Revista Brasileira de Cartografia. Uso Integrado dos Sistemas Galileo e GPS: Uma Análise da Acurácia no Posicionamento Por Ponto com Correções Atmosféricas, n. 68/3, p. 595-607, 2016.

KRZAN, G.; PRZESTRZELSKI, P. GLONASS/ GPS *Precise Point Positioning* with IGS *real-time service products*. *Acta Geodyn. Geomater.* v. 13, n. 1, p. 69, 2016. DOI: 10.13168/AGG.2015.0047.

LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J. P. **Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK.** ION NTM 2008. San Diego, California, 2008.

LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C. **Wide area based Precise Point Positioning.** *Proceedings of the Institute of Navigation - 19th International Technical Meeting of the Satellite Division*, ION GNSS2006, 4, 2272 - 2278, 2006.

LEANDRO, Rodrigo F.; LANGLEY, Richard B.; SANTOS, Marcelo C. Análise de dados GNSS em GAPS, o software de análise e posicionamento GPS, utilizando produtos IGS. In: Proc., Workshop do Centro de Análise de Serviços IGNS. 2008.

LEANDRO, Rodrigo Figueiredo. **Precise Point Positioning with GPS: a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis.** *Geodesy and Geomatics Engineering*, 2009. Disponível em:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK_EwiBhNG6ouj4AhU5upUCHcMSBMcQFnoECAkQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww2.unb.ca%2Fgge%2FPubs%2FTR267.pdf&usg=AOvVaw0HwQj_PfjMypNhwU65ACsf. Acesso em: 28 maio 2022.

LEICK, A. **GPS: satellite surveying**: John Wiley & Sons, 1994.

_____. **GPS satellite surveying**. 3rd. ed.: New York: John Wiley & Sons, 2004. 435p.

LIMA, Chaenne Milene Dourado Alves. **Posicionamento por ponto preciso com solução de ambiguidades inteiras no contexto de rede GPS**. 2015.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais gps**. Dissertação de Mestrado, UNESP, Presidente Prudente, 2003.

MARQUES, Haroldo A. *et al.* **PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análises de resultados no modo estático e cinemático**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 6, p. 1331-1345, 2014.

MARQUES, Haroldo Antonio et al. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2012.

MARQUES, Haroldo Antonio et al. *Software RT_PPP-PPP Online* Descrição e Manual de Uso.

MARQUES, Haroldo Antonio. **Influência da ionosfera no posicionamento GPS: estimativas dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem**. 2008.

MENEZES, Raiane Rintielle Vaz. **Análise do GNSS PPP multi-constelações com uso dos sistemas GPS, GLONASS e GALILEO**. 2019.

MENDEZ ASTUDILLO, Jorge et al. *Analyzing the zenith tropospheric delay estimates in Online Precise Point Positioning (PPP) services and PPP Software packages*. *Sensors*, v. 18, n. 2, p. 580, 2018.

MILENE DOURADO ALVES, Chaenne. **Solução de ambiguidades GPS no Posicionamento por Ponto Preciso utilizando uma rede de estações**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 476 p

MCCARTHY D. D.; PETIT G. *IERS Conventions* (2003), *IERS Technical Note 32*, *Central Bureau of IERS- Observatoire de Paris*.

NISCHAN, Thomas. **GFZRNx - RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox**. *GFZ Data Services*. Disponível em : <https://doi.org/10.5880/GFZ.1>. 2016.

Acesso em: 22 abr. 2022.

NRCAN.GPS POSITIONING GUIDE. Disponível em: https://luna.csr.ncan.gc.ca/GPS_Guide_e/GPS_Guide_e.pdf. Acesso em: 20 abr. 2022.

OPUS. **Atendimento ao usuário de Posicionamento Online**. Sobre Opus. Disponível em: <https://geodesy.noaa.gov/OPUS/about.jsp>. Acesso em: 15 nov. 2022.

RTKLIB. Disponível em: <https://www.rtklib.com>. Acesso em: 16 nov. 2022.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. (Dissertação - Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001. 167 f.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd.ed. Berlin: New-York: Walter de Gruyter, 2003.

SEJAS, M. I. **Suavização da Pseudodistância pela Fase da Onda Portadora: Análise da Técnica**. 105f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

SETTI JÚNIOR, Paulo de Tarso. **Posicionamento por Ponto multi-GNSS: análise dos sistemas, sinais e modelos ionosféricos**. 2019.

SILVA, Mariana Santos. **Análise estatística espacial dos eventos de cintilação ionosférica no Brasil**. 2021.

SIRGAS (2022b). **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. VEMOS: Modelo de velocidade para o SIRGAS**. Disponível em: . Acesso em outubro de 2022.

SHI, Junbo; GAO, Yang. *A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods*. **GPS solutions**, v. 18, n. 4, p. 519-528, 2014.

STRANG, G.; BORRE, K. *Linear algebra, geodesy and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, 1997, 624p.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio. *Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open-source program package RTKLIB*. In: **International symposium on GPS/GNSS**. International Convention Center Jeju Korea, 2009.

TEUNISSEN, P. J. G.; KHODABANDEH, Amir. *Review and principles of PPP-RTK methods*. **Journal of Geodesy**, v. 89, n. 3, p. 217-240, 2015.

TRF (2022b). *International Terrestrial Reference System. ITRF solutions*. Disponível em: . Acesso em 20 out. 2022.

THEODORO, Lais Thuany Cardoso. **Análise da influência da modelagem troposférica**

na resolução de ambiguidades no PPP, 2020.

WaSoft – WAPPP. Disponível em: <http://www.WaSoft/e/ppp/prog/>: Acesso em 16 nov. 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A: tabelas para cada plataforma *online* e *desktop*, contendo os valores das coordenadas estimadas, empregando as taxas de gravação de: 1 segundo, 5 segundos e 15 segundos.

AUPOS				
Intervalo de tempo min	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,591	8.156.720,716	734,281
90 minutos	1s	686.129,616	8.156.720,621	734,328
120 minutos	1s	686.129,606	8.156.720,627	734,290
150 minutos	1s	686.129,608	8.156.720,627	734,293
180 minutos	1s	686.129,599	8.156.720,628	734,279
210 minutos	1s	686.129,612	8.156.720,631	734,271
240 minutos	1s	686.129,606	8.156.720,629	734,275
270 minutos	1s	686.129,604	8.156.720,629	734,275

AUPOS				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,591	8.156.720,716	734,281
90 minutos	5s	686.129,616	8.156.720,621	734,328
120 minutos	5s	686.129,606	8.156.720,627	734,290
150 minutos	5s	686.129,608	8.156.720,627	734,293
180 minutos	5s	686.129,599	8.156.720,628	734,279
210 minutos	5s	686.129,612	8.156.720,631	734,271
240 minutos	5s	686.129,606	8.156.720,629	734,275
270 minutos	5s	686.129,604	8.156.720,629	734,275

AUPOS				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,591	8.156.720,716	734,281
90 minutos	15s	686.129,616	8.156.720,621	734,328
120 minutos	15s	686.129,606	8.156.720,627	734,290
150 minutos	15s	686.129,608	8.156.720,627	734,293
180 minutos	15s	686.129,599	8.156.720,628	734,279
210 minutos	15s	686.129,612	8.156.720,631	734,271
240 minutos	15s	686.129,606	8.156.720,629	734,275
270 minutos	15s	686.129,604	8.156.720,629	734,275

OPUS				
Intervalo de tempo	T. de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,591	8.156.720,624	734,214
90 minutos	1s	686.129,579	8.156.720,633	734,209
120 minutos	1s	686.129,581	8.156.720,630	734,218
150 minutos	1s	686.129,599	8.156.720,623	734,227
180 minutos	1s	686.129,593	8.156.720,633	734,213
210 minutos	1s	686.129,600	8.156.720,626	734,204
240 minutos	1s	686.129,589	8.156.720,632	734,215
270 minutos	1s	686.129,584	8.156.720,634	734,211

OPUS				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,591	8.156.720,624	734,214
90 minutos	5s	686.129,579	8.156.720,633	734,209
120 minutos	5s	686.129,581	8.156.720,630	734,218
150 minutos	5s	686.129,599	8.156.720,623	734,227
180 minutos	5s	686.129,593	8.156.720,633	734,213
210 minutos	5s	686.129,600	8.156.720,626	734,204
240 minutos	5s	686.129,589	8.156.720,632	734,215
270 minutos	5s	686.129,584	8.156.720,634	734,211

OPUS				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,591	8.156.720,624	734,214
90 minutos	15s	686.129,579	8.156.720,633	734,209
120 minutos	15s	686.129,581	8.156.720,630	734,218
150 minutos	15s	686.129,599	8.156.720,623	734,227
180 minutos	15s	686.129,593	8.156.720,633	734,213
210 minutos	15s	686.129,600	8.156.720,626	734,204
240 minutos	15s	686.129,589	8.156.720,632	734,215
270 minutos	15s	686.129,584	8.156.720,634	734,211

IGN PPP Francês				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,437	8.156.720,665	734,171
90 minutos	1s	686.129,570	8.156.720,644	734,179
120 minutos	1s	686.129,603	8.156.720,637	734,180
150 minutos	1s	686.129,630	8.156.720,629	734,190
180 minutos	1s	686.129,628	8.156.720,626	734,189
210 minutos	1s	686.129,634	8.156.720,625	734,190
240 minutos	1s	686.129,655	8.156.720,631	734,196
270 minutos	1s	686.129,651	8.156.720,631	734,193

IGN PPP Francês				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,437	8.156.720,665	734,171
90 minutos	5s	686.129,570	8.156.720,644	734,179
120 minutos	5s	686.129,603	8.156.720,637	734,180
150 minutos	5s	686.129,630	8.156.720,629	734,190
180 minutos	5s	686.129,628	8.156.720,626	734,189
210 minutos	5s	686.129,634	8.156.720,625	734,190
240 minutos	5s	686.129,655	8.156.720,631	734,196
270 minutos	5s	686.129,651	8.156.720,631	734,193

IGN PPP Francês				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,437	8.156.720,665	734,171
90 minutos	15s	686.129,570	8.156.720,644	734,179
120 minutos	15s	686.129,603	8.156.720,637	734,180
150 minutos	15s	686.129,630	8.156.720,629	734,190
180 minutos	15s	686.129,628	8.156.720,626	734,189
210 minutos	15s	686.129,634	8.156.720,625	734,190
240 minutos	15s	686.129,655	8.156.720,631	734,196
270 minutos	15s	686.129,651	8.156.720,631	734,193

CSRS Canadá				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravações	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,617	8.156.720,628	734,208
90 minutos	1s	686.129,621	8.156.720,629	734,207
120 minutos	1s	686.129,621	8.156.720,629	734,207
150 minutos	1s	686.129,621	8.156.720,628	734,211
180 minutos	1s	686.129,621	8.156.720,631	734,215
210 minutos	1s	686.129,620	8.156.720,631	734,210
240 minutos	1s	686.129,623	8.156.720,631	734,212
270 minutos	1s	686.129,626	8.156.720,631	734,201

CSRS Canadá				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravações	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,617	8.156.720,628	734,208
90 minutos	5s	686.129,621	8.156.720,629	734,207
120 minutos	5s	686.129,621	8.156.720,629	734,207
150 minutos	5s	686.129,621	8.156.720,628	734,211
180 minutos	5s	686.129,621	8.156.720,631	734,215
210 minutos	5s	686.129,620	8.156.720,631	734,210
240 minutos	5s	686.129,623	8.156.720,631	734,212
270 minutos	5s	686.129,626	8.156.720,631	734,201

CSRS Canadá				
Intervalo de tempo	Taxa de Gravações	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,617	8.156.720,628	734,208
90 minutos	15s	686.129,621	8.156.720,629	734,207
120 minutos	15s	686.129,621	8.156.720,629	734,207
150 minutos	15s	686.129,621	8.156.720,628	734,211
180 minutos	15s	686.129,621	8.156.720,631	734,215
210 minutos	15s	686.129,620	8.156.720,631	734,210
240 minutos	15s	686.129,623	8.156.720,631	734,212
270 minutos	15s	686.129,626	8.156.720,631	734,201

IBGE - PPP				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,646	8.156.720,647	734,190
90 minutos	1s	686.129,631	8.156.720,644	734,200
120 minutos	1s	686.129,613	8.156.720,644	734,200
150 minutos	1s	686.129,613	8.156.720,641	734,200
180 minutos	1s	686.129,610	8.156.720,644	734,200
210 minutos	1s	686.129,607	8.156.720,641	734,200
240 minutos	1s	686.129,616	8.156.720,647	734,200
270 minutos	1s	686.129,613	8.156.720,644	734,200

IBGE - PPP				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,646	8.156.720,647	734,190
90 minutos	5s	686.129,631	8.156.720,644	734,200
120 minutos	5s	686.129,613	8.156.720,644	734,200
150 minutos	5s	686.129,613	8.156.720,641	734,200
180 minutos	5s	686.129,610	8.156.720,644	734,200
210 minutos	5s	686.129,607	8.156.720,641	734,200
240 minutos	5s	686.129,616	8.156.720,647	734,200
270 minutos	5s	686.129,613	8.156.720,644	734,200

IBGE - PPP				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,646	8.156.720,647	734,190
90 minutos	15s	686.129,631	8.156.720,644	734,200
120 minutos	15s	686.129,613	8.156.720,644	734,200
150 minutos	15s	686.129,613	8.156.720,641	734,200
180 minutos	15s	686.129,610	8.156.720,644	734,200
210 minutos	15s	686.129,607	8.156.720,641	734,200
240 minutos	15s	686.129,616	8.156.720,647	734,200
270 minutos	15s	686.129,613	8.156.720,644	734,200

RTK-LIB				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,474	8.156.720,673	734,049
90 minutos	1s	686.129,652	8.156.720,637	734,199
120 minutos	1s	686.129,651	8.156.720,627	734,244
150 minutos	1s	686.129,652	8.156.720,628	734,227
180 minutos	1s	686.129,651	8.156.720,629	734,226
210 minutos	1s	686.129,651	8.156.720,630	734,225
240 minutos	1s	686.129,597	8.156.720,630	734,208
270 minutos	1s	686.129,599	8.156.720,630	734,207

RTK-LIB				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,474	8.156.720,673	734,049
90 minutos	5s	686.129,652	8.156.720,637	734,199
120 minutos	5s	686.129,651	8.156.720,627	734,244
150 minutos	5s	686.129,652	8.156.720,628	734,227
180 minutos	5s	686.129,651	8.156.720,629	734,226
210 minutos	5s	686.129,651	8.156.720,630	734,225
240 minutos	5s	686.129,597	8.156.720,630	734,208
270 minutos	5s	686.129,599	8.156.720,630	734,207

RTK-LIB				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,474	8.156.720,673	734,049
90 minutos	15s	686.129,652	8.156.720,637	734,199
120 minutos	15s	686.129,651	8.156.720,627	734,244
150 minutos	15s	686.129,652	8.156.720,628	734,227
180 minutos	15s	686.129,651	8.156.720,629	734,226
210 minutos	15s	686.129,651	8.156.720,630	734,225
240 minutos	15s	686.129,597	8.156.720,630	734,208
270 minutos	15s	686.129,599	8.156.720,630	734,207

WaSoft				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	1s	686.129,550	8.156.720,621	734,224
90 minutos	1s	686.129,560	8.156.720,617	734,218
120 minutos	1s	686.129,563	8.156.720,616	734,220
150 minutos	1s	686.129,572	8.156.720,612	734,240
180 minutos	1s	686.129,578	8.156.720,611	734,250
210 minutos	1s	686.129,581	8.156.720,610	734,250
240 minutos	1s	686.129,586	8.156.720,613	734,250
270 minutos	1s	686.129,590	8.156.720,614	734,253

WaSoft				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	5s	686.129,550	8.156.720,621	734,224
90 minutos	5s	686.129,560	8.156.720,617	734,218
120 minutos	5s	686.129,563	8.156.720,616	734,220
150 minutos	5s	686.129,572	8.156.720,612	734,240
180 minutos	5s	686.129,578	8.156.720,611	734,250
210 minutos	5s	686.129,581	8.156.720,610	734,250
240 minutos	5s	686.129,586	8.156.720,613	734,250
270 minutos	5s	686.129,590	8.156.720,614	734,253

WaSoft				
Intervalo de tempo	Taxa Gravação	Coord. UTM E	Coord. UTM N	Coord. UTM U
60 minutos	15s	686.129,550	8.156.720,621	734,224
90 minutos	15s	686.129,560	8.156.720,617	734,218
120 minutos	15s	686.129,563	8.156.720,616	734,220
150 minutos	15s	686.129,572	8.156.720,612	734,240
180 minutos	15s	686.129,578	8.156.720,611	734,250
210 minutos	15s	686.129,581	8.156.720,610	734,250
240 minutos	15s	686.129,586	8.156.720,613	734,250
270 minutos	15s	686.129,590	8.156.720,614	734,253