

FELIPE TINTINO LINHARES DE SOUZA

JOÃO PEDRO VOLTARE ZAUPA

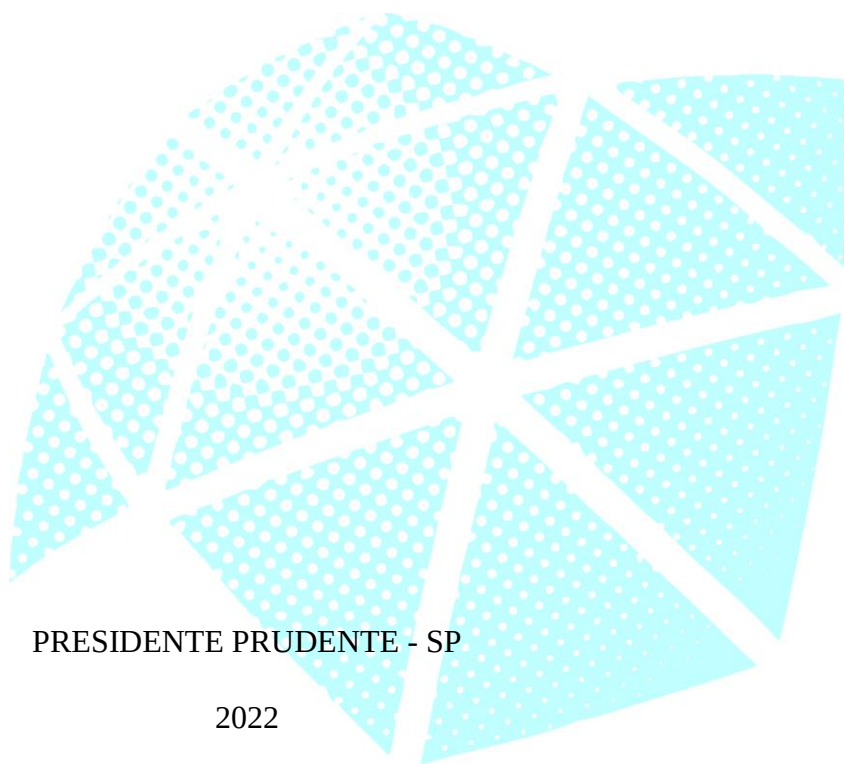
JOHN LENNON FERREIRA DA SILVA

MALUANE ALINE STAFOCHER

**PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS MULTI-GNSS NO
POSICIONAMENTO POR PONTO**

PRESIDENTE PRUDENTE - SP

2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

**PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS MULTI-GNSS NO
POSICIONAMENTO POR PONTO**

Relatório final correspondente ao Trabalho de
Conclusão do Curso de Engenharia Cartográfica e de
Agrimensura da FCT UNESP em Presidente Prudente.
Orientadores: Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves,
Me. Paulo de Tarso Setti Júnior.

PRESIDENTE PRUDENTE - SP

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

P956 Processamento e análise de dados multi-GNSS no Posicionamento por Ponto /
Felipe Tintino Linhares de Souza ... [et al.]. - 2022
84 f. : il.

Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves

Coorientador: Paulo de Tarso Setti Júnior

Trabalho de conclusão (bacharelado - Engenharia Cartográfica e de
Agrimensura) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e
Tecnologia, Presidente Prudente, 2022

Inclui bibliografia

1. Posicionamento por Ponto. 2. GNSS. 3. Multi-GNSS. 4. Ionosfera. I.
Souza, Felipe Tintino Linhares de. II. Zaupe, João Pedro Voltare. III. Silva, John
Lennon Ferreira da. IV. Stafocher, Maluane Aline. V. Alves, Daniele Barroca
Marra. VI. Setti Júnior, Paulo de Tarso. VII. Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. VIII. Título.

Alessandra Kuba Oshiro Assunção
CRB-8/9013

DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins a composição da Banca Examinadora da Defesa da Disciplina TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC, dos alunos Felipe Tintino Linhares de Souza, João Pedro Voltare Zaupa, John Lennon Ferreira da Silva e Maluane Aline Stafocher, do 5º Ano do Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura desta Faculdade, realizada às 14 horas do dia 21 de dezembro de 2022, conforme segue:

Membros da Banca:

Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves - Departamento de Cartografia
Dra. Crislaine Menezes da Silva - Pós Doutoranda do Departamento de Cartografia
Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques - Departamento de Cartografia

Título do Trabalho:

PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS MULTI-GNSS NO POSICIONAMENTO POR PONTO

Presidente Prudente, 21 de dezembro de 2022

Documento assinado digitalmente
 **NILTON NOBUHIRO IMAI**
Data: 27/03/2023 15:56:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Nilton Nobuhiro Imai
Chefe do Departamento de Cartografia - FCT/Unesp

Documento assinado digitalmente
 **EDMUR AZEVEDO PUGLIESI**
Data: 18/04/2023 19:22:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edmur Azevedo Pugliesi
Coordenador do Curso de Grad. em Eng. Cartográfica e de Agrimensura - FCT/Unesp

RESUMO

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) vêm cada vez mais sendo empregados em operações que necessitam de estimativas de posição. Dentre os sistemas que compõem o GNSS, tem-se o norte-americano GPS (*Global Positioning System*), o GLONASS (*GLObal'naya NAvigationnaya Sputnikowaya Sistema*) desenvolvido pela União Soviética, o Galileo, desenvolvido pela União Europeia, e o chinês BeiDou, onde apenas o Galileo não se encontra operacional atualmente. Nos dias de hoje, a tendência é a utilização conjunta dos sistemas ao nível do usuário, resultando na melhoria da disponibilidade e da acurácia do posicionamento. Este trabalho teve como objetivo principal o processamento e análise de dados de estações brasileiras no Posicionamento por Ponto, considerando os 4 sistemas GNSS individualmente e utilizando combinações entre eles, sob diferentes condições atmosféricas. O posicionamento multi-GNSS (utilizando todos os sistemas GNSS) obteve os melhores resultados, por conta da maior quantidade de satélites, oferecendo maior redundância nas observações. Dentre os sistemas autônomos, os que apresentaram os melhores resultados foram o GPS e o Galileo.

Palavras-chave: Posicionamento por Ponto, GNSS, multi-GNSS, Ionosfera.

ABSTRACT

The GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) has been increasingly used in operations that require position estimation. The term GNSS includes the American GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLObal'naya NAvigationnaya Sputnikowaya Sistema*) developed by the Soviet Union, Galileo, developed by the European Union, and the Chinese BeiDou. Currently Galileo is the only one that has not been declared operational. Nowadays, the trend is to combine the systems at the user level, improving the system availability and the positioning accuracy. The objective of this study is to process and analyze GNSS data from Brazilian stations in Point Positioning, considering the 4 GNSS individually and combined, under different atmospheric conditions. The multi-GNSS (with all GNSS systems) positioning obtained the best results, due to the larger number of satellites, offering greater redundancy of observations. Among the autonomous systems, the GPS and Galileo presented the best results.

Keywords: Point Positioning, GNSS, multi-GNSS, Ionosphere.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Órbitas dos sistemas GNSS.	10
Figura 2 - Degradação da qualidade por conta do SA em 02/05/2000.	12
Figura 3 - Segmento Espacial do GPS.	13
Figura 4 - Distribuição dos satélites nas órbitas.	14
Figura 5 - Estações de controle GPS.	16
Figura 6 - Número de satélites GLONASS conforme o tempo.	19
Figura 7 - Segmento Espacial do GLONASS.	21
Figura 8 - Satélites GLONASS.	21
Figura 9 - Estações de controle do GLONASS.	22
Figura 10 - Tecnologias presentes nos satélites GLONASS.	25
Figura 11 - Satélites GIOVE – A e GIOVE – B.	26
Figura 12 - Constelação Galileo.	27
Figura 13 - Arranjo dos satélites Galileo em planos orbitais.	27
Figura 14 - Constelação atual do BeiDou.	32
Figura 15 - Estações controle e monitoramento no território chinês.	34
Figura 16 - Regiões Ionosféricas.	45
Figura 17 - Fluxograma de execução do software utilizado.	47
Figura 18 - Distribuição das estações selecionadas.	49
Figura 19 - TEC (GPS) obtido pela estação PRU2 nos meses de março e junho de 2022.	52
Figura 20 - Índice S4 obtido na estação PRU2 para o multi-GNSS nos dias de março e junho de 2022.	53
Figura 21 - Localização do equador magnético.	54
Figura 22 - Número de satélites e PDOP obtidos no PP autônomo para PPTE no mês de março.	55
Figura 23 - Discrepância horizontal (azul) e vertical (vermelho) obtida no PP autônomo, para março.	56
Figura 24 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D obtidos no PP autônomo em março de 2022.	57
Figura 25 - Sigma a posteriori obtido no PP autônomo em março, na estação PPTE.	58
Figura 26 - Atividade ionosférica em PRU2 para o dia 11 de março de 2022: (a) TEC; (b) Cintilação.	59
Figura 27 - Número de satélites e PDOP para o dia 11/03/2022 em PPTE.	60

Figura 28 - Discrepância horizontal (azul) e vertical (vermelho) obtida no PP autônomo, para o dia 11/03/2022.	61
Figura 29 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D obtidos no PP autônomo no dia 11/03/2022.	61
Figura 30 - Erro horizontal (azul), vertical (vermelho) e tridimensional (preto) do PP multi-GNSS para o dia 11/03/2022, em PPTE.	62
Figura 31 – Erro tridimensional (azul) e desvio padrão tridimensional (vermelho) do PP multi-GNSS para o mês de março de 2022, em PPTE.	63
Figura 32 - Número de satélites obtidos no PP autônomo.	64
Figura 33 - RMS3D obtido no PP autônomo nas 20 estações analisadas para os meses de (a) março e (b) junho.	65
Figura 34 - Média do RMS3D obtida no PP autônomo nas 20 estações para os meses de março e junho.	66
Figura 35 - Acurácia posicional (RMS3D) obtida no PP multi-GNSS em diferentes estações para os meses de março (em (a)) e junho (em (b)) de 2022.	67
Figura 36 - Média do multicaminho (MP1 GPS) em diferentes estações do país.	70
Figura 37 - Melhoria obtida no PP Multi GNSS entre GPS+Galileo e GPS autônomo em diferentes estações para os meses de março (em (a)) e junho (em (b)) de 2022.	71
Figura 38 - Erros horizontal e vertical e seus respectivos desvios padrão obtida no PP multi-GNSS e GPS+Galileo (G+E) em diferentes estações para os meses de março e junho de 2022.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características principais dos GNSS.	11
Tabela 2 - Dados sobre cada satélite GPS.	14
Tabela 3 - Gerações do GPS.	16
Tabela 4 - Parâmetros do WGS84.	17
Tabela 5 - Gerações do GLONASS.	20
Tabela 6 - Distribuição das frequências FDMA dos satélites GLONASS.	23
Tabela 7 - Dados das gerações Galileo.	28
Tabela 8 - Resumo das missões do BeiDou.	31
Tabela 9 - Satélites da constelação BeiDou.	32
Tabela 10 - Localização das estações selecionadas.	49
Tabela 11 - Porcentagem de melhoria do sistema GPS em relação aos demais no PP autônomo, para o mês de março.	58
Tabela 12 - Porcentagem de melhoria do sistema GPS em relação aos demais no PP autônomo, para o dia 11/03/2022 em PPTE.	62
Tabela 13 - Valores de acurácia posicional (em metros) obtidos no Posicionamento por Ponto.	69
Tabela 14 - Valores numéricos dos erros horizontal e vertical (em metros) e seus respectivos desvios padrão (em metros) obtida no PP multi-GNSS e GPS+Galileo em diferentes estações para o mês de março de 2022.	73
Tabela 15 - Valores numéricos dos erros horizontal e vertical (em metros) e seus respectivos desvios padrão (em metros) obtida no PP multi-GNSS e GPS+Galileo em diferentes estações para o mês de junho de 2022.	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Objetivos	9
2. SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE	10
2.1 GPS	12
2.1.1 Histórico sobre o Sistema	12
2.1.2 Segmentos do GPS	12
2.1.2.1 Segmento Espacial do GPS	13
2.1.2.2 Segmento de Controle do GPS	16
2.1.2.3 Segmento de Usuário do GPS	17
2.1.3 Sistema de Referência e Sinais	17
2.2 GLONASS	18
2.2.1 Histórico sobre o Sistema	18
2.2.2 Segmentos do GLONASS	19
2.2.2.1 Segmento Espacial do GLONASS	19
2.2.2.2 Segmento de Controle do GLONASS	22
2.2.2.3 Segmento de Usuário do GLONASS	22
2.2.3 Sistema de Referência e Sinais	23
2.3 Galileo	25
2.3.1 Histórico sobre o Sistema	25
2.3.2 Segmentos do Galileo	26
2.3.2.1 Segmento Espacial do Galileo	26
2.3.3 Segmento de Controle do Galileo	28
2.3.4 Segmento de Usuário do Galileo	28
2.3.5 Sistema de Referência e Sinais	29
2.3.6 Serviços do Galileo	29
2.3.7 Os Relógios Atômicos e o Sistema de Tempo Galileo	30
2.4 BeiDou	30
2.4.1 Histórico sobre o Sistema	30
2.4.2 Segmentos do BeiDou	31
2.4.2.1 Segmento Espacial do BeiDou	31
2.4.2.2 Segmento de Controle do BeiDou	33
2.4.3 Sinais	34

3. POSICIONAMENTO POR PONTO GNSS	35
3.1 Equação de Observação - Pseudodistância	35
3.2 Cálculo dos Erros dos Relógios dos Satélites e Atraso Diferencial do Código	36
3.3 Modelo Funcional	37
3.4 Modelo Estocástico	39
3.5 DOP	40
3.6 Controle de Qualidade	41
3.6.1 Detecção	41
3.6.2 Identificação	42
3.6.3 Adaptação	43
3.7 Erros Contidos no Posicionamento GNSS	43
3.7.1 Atmosfera Neutra	43
3.7.2 Ionosfera	44
4. METODOLOGIA	47
4.1 Experimento I	51
4.2 Experimento II	53
5. RESULTADOS E ANÁLISES	55
5.1 Experimento I	55
5.1.1 Período de alta atividade ionosférica (Março/2022)	55
5.1.2 Análise do PP Autônomo para o dia 11 de março	59
5.1.3 Experimento do multi-GNSS	62
5.2 Resultados do Experimento II	63
5.2.1 Resultados Obtidos no PP Autônomo	64
5.2.2 Resultados Obtidos no PP Combinado	66
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO 1 – MULTICAMINHO NAS ESTAÇÕES DA RBMC	81
ANEXO 2 - DIAS EM QUE CADA SISTEMA APRESENTOU O MELHOR RMS3D NO PP AUTÔNOMO	84

1. INTRODUÇÃO

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) são utilizados para determinação de coordenadas e vêm sendo muito aplicados em atividades de navegação, monitoramento de estruturas, posicionamento, entre outros. Dentre os sistemas que compõem o GNSS, destacam-se: o GPS (*Global Positioning System*) que conta com 31 satélites operacionais em órbita, encontrando-se operacional desde 1995 (GPS, 2022); o GLONASS (*GLObal'naya NAvigationnaya Sputnikowaya Sistema*) com 25 satélites em órbita inicialmente lançados com a tecnologia FDMA e desenvolvendo a terceira frequência com tecnologia CDMA (IAC, 2022), o Galileo com 24 satélites em órbita, com expectativa de tornar-se operacional em 2024 (ESA, 2023); e o BeiDou com 29 satélites em órbita terrestre média, contando com mais 12 satélites em órbita geossíncrona e 8 em geostacionária (IAC, 2022). Também fazem parte do GNSS os sistemas de aumento GBAS (*Ground Based Augmentation System*) e SBAS (*Satellite Based Augmentation System*).

O desenvolvimento da tecnologia no campo da geociência possibilitou o surgimento da emissão e recepção de sinais de múltiplas frequências, permitindo a utilização de diversos serviços, bem como a tendência no meio comercial e acadêmico do posicionamento combinado. Atualmente, mais de 100 satélites GNSS em órbita terrestre média estão em operação. Diversos estudos têm apontado vantagens na utilização dos sistemas em conjunto (multi-constelações e frequências), muito por conta da maior redundância de observações, fornecendo uma melhor estimativa da posição no ajustamento, além de melhorar a geometria dos satélites. Outra vantagem a ser citada na combinação de constelações é a melhor cobertura em áreas de visibilidade restrita, possibilitando também o aumento da máscara de elevação, evitando possíveis obstruções de sinais (BAHADUR e NOHUTCU, 2018; LI et al., 2015a; LI et al., 2015b; LOU et al., 2015; MONTENBRUCK et al., 2017; PAN et al., 2017; ODIJK, 2017).

Existem diversos métodos que fazem uso do GNSS e que são empregados no posicionamento, sendo um deles o Posicionamento por Ponto (PP). Este consiste em determinar a posição de um ponto de interesse em relação ao geocentro (ODIJK, 2017). Para isso, se faz necessário a obtenção de observações coletadas simultaneamente por no mínimo quatro satélites GNSS, determinando a posição tridimensional e o erro do relógio do receptor (MONICO, 2008).

Em um cenário de posicionamento utilizando a multi-constelação GNSS, o IGS (*International GNSS Service*) ampliou suas pesquisas, dando início ao projeto MGEX

(*The Multi-GNSS Experiment*), cujo objetivo é rastrear, coletar e analisar os dados da combinação de sistemas GNSS, além de disponibilizar gratuitamente as efemérides precisas e outros produtos das quatro constelações (MONTENBRUCK et al., 2017).

Há de se destacar que diversos erros estão presentes no uso dessa tecnologia, como os de satélites (órbita, relógio e relatividade), de receptores (relógio, centragem e canais), de estações (movimento do polo, marés, carga dos oceanos e coordenadas) e os erros relacionados à propagação dos sinais, dando ênfase à refração ionosférica, cintilações, multicaminho e refração causada pela atmosfera neutra (TEUNISSEN, 2017).

A camada ionosférica causa diversas anomalias que provocam diferentes tipos de efeitos e atenuação dos sinais GNSS, inclusive a cintilação. A cintilação ionosférica corresponde às flutuações de amplitude ou fase das ondas de rádio à medida que se propagam através de regiões de densidade eletrônica irregular. Causa enfraquecimento e em muitos casos perda do sinal rastreado pelo receptor (MENDONÇA, 2013; CONKER et al., 2003). Nas regiões equatoriais, os efeitos da ionosfera estão associados a anomalias equatoriais, com maior intensidade no pico local da anomalia (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Isso torna o Brasil uma área privilegiada para estudar o assunto, já que a maior parte de seu território está localizada na região equatorial, fortemente influenciada por esses efeitos.

1.1. Objetivos

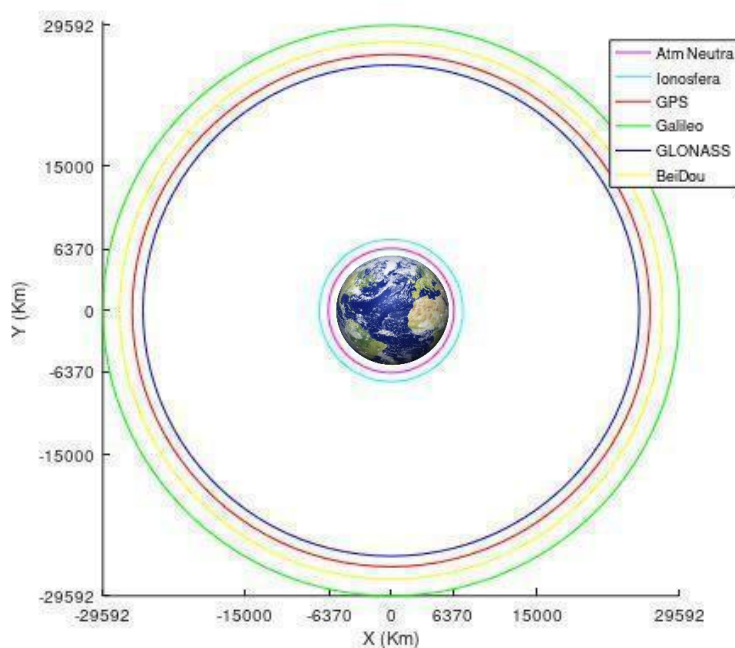
O objetivo principal deste trabalho é a realização do Posicionamento por Ponto de forma autônoma e combinada (multi-GNSS) considerando diferentes condições ionosféricas e diferentes sistemas de navegação GNSS, por meio do processamento dos dados em um software científico desenvolvido por pesquisadores do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) e da análise dos resultados obtidos realizando um comparativo entre as diferentes combinações.

2. SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE

Caracterizada pelo estudo da forma e dimensão da Terra, a Geodésia é também considerada a ciência da medição e mapeamento da superfície terrestre (SEEBER, 2003). Pode-se afirmar que, com o advento do GNSS na década de 1970, as atividades geodésicas vêm experimentando uma grande revolução, muito por conta do avanço tecnológico e científico na área, possibilitando a obtenção da posição do usuário de modo estático ou cinemático, com agilidade e precisão superiores aos métodos convencionais de levantamento. Ao utilizar a tecnologia GNSS, o trabalho de levantamento se apresenta mais prático e eficiente, devido à não necessidade de intervisibilidade entre os pontos de interesse, além de permitir o uso sob quaisquer condições climáticas.

Criados para fins militares, os pioneiros GPS e GLONASS alcançaram a constelação nominal em 1995, tornando-se operacionais. Outro sistema que se apresenta operacional é o BeiDou, que obteve a constelação completa em 2020. Ainda em desenvolvimento, espera-se que o sistema europeu Galileo apresente totalmente operacional nos próximos três anos, após os quais serão sucedidos pelos satélites conhecidos como ‘Galileo de segunda geração’ (G2G), cujo primeiro lançamento está agendado para 2024 (Comissão Europeia, 2021). A Figura 1 demonstra a altitude dos satélites em órbita e a Tabela 1 apresenta algumas características dos sistemas GNSS, que serão discutidos em detalhe neste capítulo.

Figura 1 - Órbitas dos sistemas GNSS.



Fonte: Os Autores, 2022.

Tabela 1 - Características principais dos GNSS.

Informações	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
País Responsável	Estados Unidos da América	Rússia	União Europeia	China
Satélites em Operação	31	22+3	23	27+2 MEO 10+2 IGSO 7+1 GEO
Constelação Nominal	24	24	24+6	27 MEO 3 IGSO 5 GEO
Órbitas	6	3	3	3
Inclinação	55°	64,8°	56°	55°
Altitude (Km)	20200	19100	23222	21500
Frequências (MHz)	L1: 1575,42 L2: 1227,60 L5: 1176,45	L1: 1597-1617 L2: 1240-1260 L3: 1202,025	E1: 1575,42 E5a: 1176,45 E5b: 1207,14 E5: 1191,795 E6: 1278,75	B1: 1561,098 B2: 1207,14 B3: 1268,52
Tecnologia	CDMA	CDMA/FDMA	CDMA	CDMA
Efemérides	Elementos Kleperianos	P, V, T	Elementos Kleperianos	Elementos Kleperianos
Sistema de Referência	WGS84	PZ-90	GTRF	CGCS2000
Modelo Ionosférico	Klobuchar	-	NeQuick G	BDGIM
Repetibilidade	1 dia sideral	10 dias siderais	10 dias siderais	7 dias siderais
Sistema de Tempo	GPST	GLST	GST	BDT

Fonte: Adaptado de Langley et al. (2017).

Desenvolvido para cobertura regional, o GNSS engloba também os sistemas de aumento baseados em satélites, nomeado como SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) que têm como exemplos o sistema norte-americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*), o europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) e o indiano GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*). Pode-se também citar os sistemas de aumento baseados em estações terrestres (GBAS – *Ground-Based Augmentation System*). O presente capítulo apresenta uma visão geral dos quatro sistemas globais atualmente existentes.

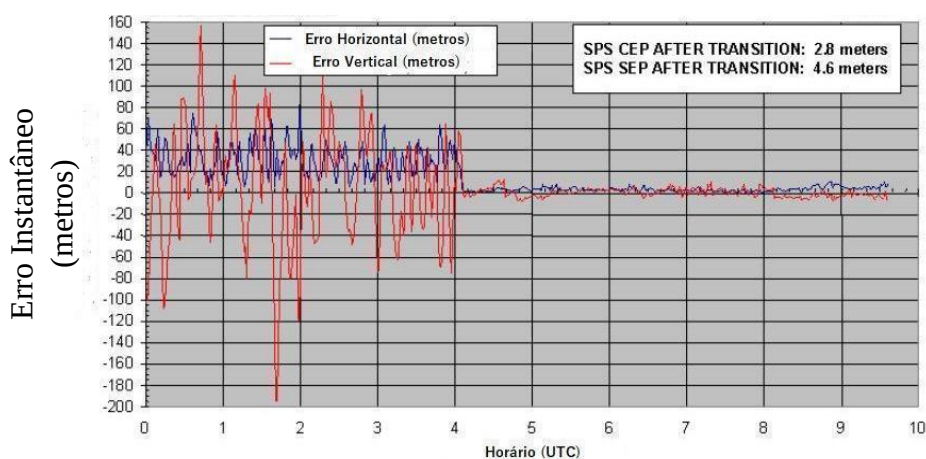
2.1 GPS

2.1.1 Histórico sobre o Sistema

Desenvolvido e mantido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América (DoD - *Department of Defense*), o sistema foi desenvolvido inicialmente com foco em servir às forças armadas. Em 1978 os primeiros satélites, como NAVSTAR, inicialmente foi desenvolvido e utilizado com principal objetivo o uso militar, e a partir de 1980 expandido para uso civil. Em 1995, NAVSTAR foi declarado operacional (MONICO, 2008) com 24 satélites em MEO (*Medium Earth Orbit*) (SEEBER, 2003). Atualmente o sistema é composto por 31 satélites operacionais (GPS.gov, 2022).

Nos dias de hoje, ao utilizar métodos de posicionamento com o sistema GPS, é possível alcançar acurácia posicional centimétrica quando todos os erros envolvidos são devidamente modelados e/ou eliminados. Porém a qualidade obtida nem sempre foi assim, como parte estratégica, o governo norte americano incluiu no sistema disponível para uso público a disponibilidade seletiva (SA- *Selective Availability*), que era uma degradação nos sinais dos satélites (Figura 2) (HENNING, 2008) a partir da manipulação de seus relógios. A SA foi removida no dia 2 de maio de 2000, visando fins comerciais.

Figura 2 - Degradação da qualidade por conta do SA em 02/05/2000.



Fonte: GPS Support Center, Air Force Space Command (2018).

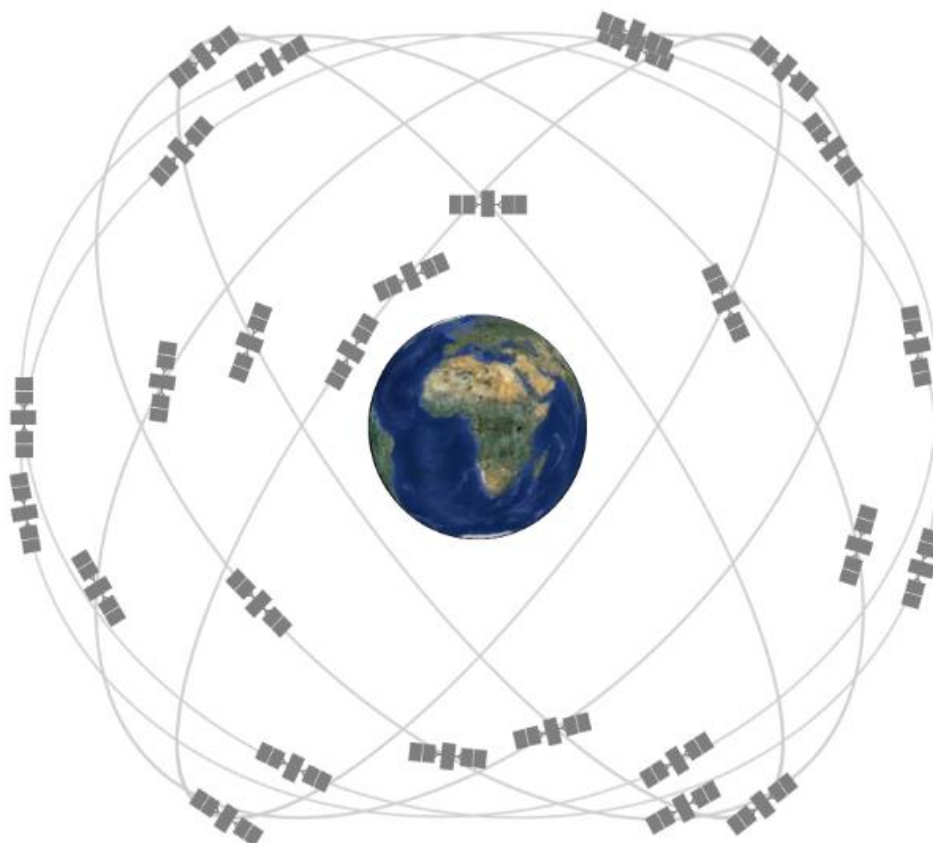
2.1.2 Segmentos do GPS

O presente tópico é subdividido em 3 subseções, sendo estas o segmento espacial (constelação nominal e número de satélites operacionais em órbita), de controle (manutenção e monitoramento do sistema por centros de análises) e de usuário (o “como” o dado é disponibilizado ao usuário).

2.1.2.1 Segmento Espacial do GPS

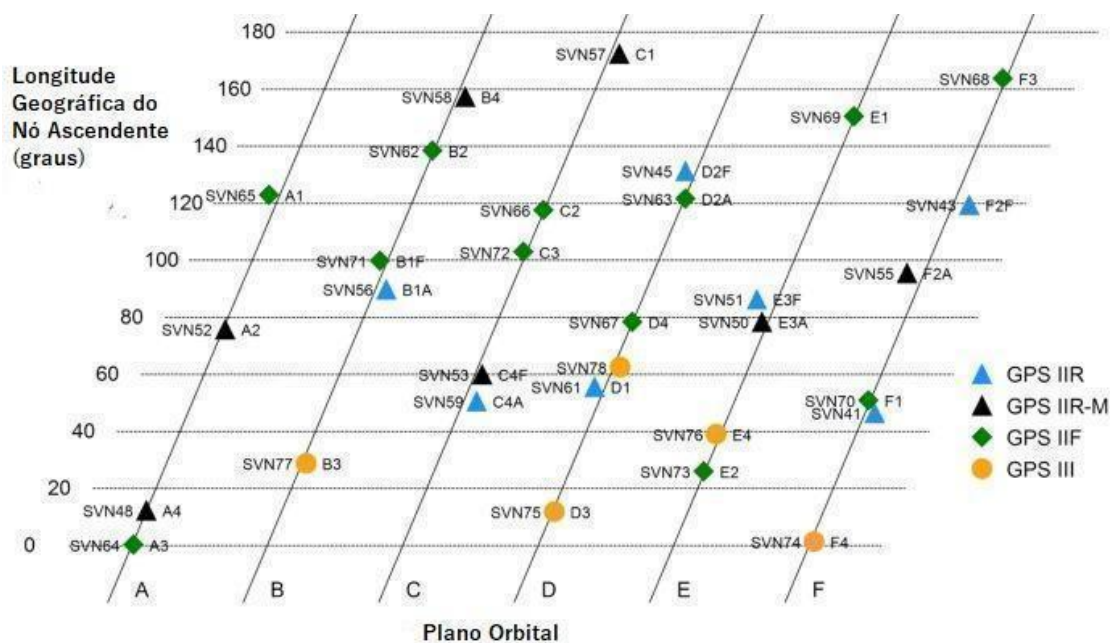
O sistema GPS consiste em uma constelação mínima de 24 satélites para cobertura global, distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, sendo que cada satélite circula a Terra duas vezes por dia (Figura 3). Os planos orbitais são inclinados em um ângulo de 55° em relação ao equador, numa altitude média de aproximadamente 20200 km e um período orbital de 12 horas siderais. Atualmente (novembro de 2022), a constelação GPS contém 31 satélites operacionais em MEO (GPS.gov, 2022). A Figura 4 apresenta o arranjo dos satélites GPS separados nos 6 planos orbitais e a Tabela 2 apresenta os dados de cada PRN (*Pseudo Random Noise*) /SVN (*Space Vehicle Number*) do sistema.

Figura 3 - Segmento Espacial do GPS.



Fonte: GPS.gov (2022).

Figura 4 - Distribuição dos satélites nas órbitas.



Fonte: Adaptado de Space Systems Command (2022).

Tabela 2 - Dados sobre cada satélite GPS.

Órbita	Slot	SVN	PRN	Geração	Relógio	Interrupção
A	1	65	24	IIF	RB	
A	2	52	31	IIR-M	RB	
A	3	64	30	IIF	RB	
A	4	48	7	IIR-M	RB	14 nov. 2022
B	1	56	16	IIR	RB	
B	2	62	25	IIF	RB	
B	4	58	12	IIR-M	RB	
B	5	71	26	IIF	RB	
B	6	77	14	III	RB	
C	1	57	29	IIR-M	RB	
C	2	66	27	IIF	RB	
C	3	72	8	IIF	CS	
C	4	53	17	IIR-M	RB	
C	5	59	19	IIR	RB	
D	1	61	2	IIR	RB	
D	2	63	1	IIF	RB	
D	3	45	21	IIR	RB	
D	4	67	6	IIF	RB	15 nov. 2022
D	5	78	11	III	RB	
D	6	75	18	III	RB	
E	1	69	3	IIF	RB	
E	2	73	10	IIF	RB	
E	3	50	5	IIR-M	RB	

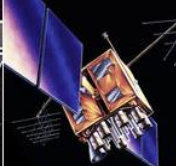
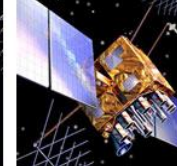
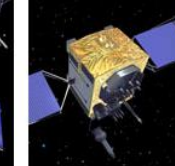
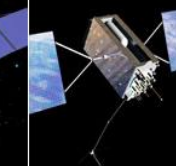
E	4	51	20	IIR	RB	
E	5	76	23	III	RB	
F	1	70	32	IIF	RB	14 out. 2022
F	2	55	15	IIR-M	RB	16 nov. 2022
F	3	68	9	IIF	RB	
F	4	74	4	III	RB	
F	5	41	22	IIR	RB	26 jan. 2022
F	6	43	13	IIR	RB	

Fonte: Adaptado de *Navigation Center*, 2022.

Conforme a Tabela 2 o número do veículo espacial e o número de cada satélite dado por PRNs. Têm-se os 6 planos orbitais nomeados de A à F e o slot referido. Os relógios atômicos de rubídio (Rb número atômico 37) têm acurácia na ordem de 10^{-9} segundos e os de césio (Cs número atômico 55) uma acurácia na ordem de $5 \cdot 10^{-13}$ segundos. Também é fornecido a data de interrupção do satélite, ou seja, quando foi realizada a desativação do satélite, assim deixando de se tornar operacional.

No decorrer dos anos, o sistema GPS vem passando por atualizações, eles são nomeados por blocos. A primeira mudança na modernização do GPS foi a desativação da SA, quando a precisão do GPS civil teve uma melhora muito significativa (GPS.gov, 2022). Com as gerações dos blocos, também foram realizadas incorporações de algumas portadoras para o uso civil. No início, o sistema possuía apenas os sinais L1 e L2, sendo que a portadora L2 transmitia apenas o sinal protegido P (*Precise or Protected*) para uso militar. A frequência L2C, para uso civil, foi implementada a partir do bloco IIR-M. A portadora L5 (L5C) foi desenvolvida no Bloco IIF, quando a vida útil dos satélites aumentou para 12 anos. A partir do bloco III, foi iniciada uma última portadora nomeada como L1C, sendo o quarto sinal civil em L1. Atualmente 24 satélites transmitem sinais da onda portadora L2C e 17 com a portadora L5 (GPS.gov, 2023). A Tabela 3 apresenta as principais características dos blocos de satélites desativados e os operacionais (31 satélites). Vale ressaltar que os EUA estão comprometidos em manter disponibilidade de pelo menos 24 satélites GPS operacionais, em 95% do tempo (GPS.gov, 2022).

Tabela 3 - Gerações do GPS.

					
Informações	Bloco IIA	Bloco IIR	Bloco IIR-M	Bloco IIF	GPS III/IIIF
Status	Desativado em 2019	Operacional	Operacional	Operacional	Operacional
Satélites em operação	-	7 satélites	7 satélites	12 satélites	5 satélites
Lançamento	1990-1997	1997-2004	2005-2009	2010-2016	2018
Vida Útil	7,5 anos	7,5 anos	7,5 anos	12 anos	15 anos
Sinais	L1 e L2	L1 e L2	L1 e L2C	L1, L2C e L5C	L2C, L5C e L1C

Fonte: Adaptado de GPS.gov, 2022

2.1.2.2 Segmento de Controle do GPS

O segmento de controle consiste em uma rede global de instalações terrestres que rastreiam os satélites GPS, monitoram suas transmissões, realizam análises e enviam comandos de dados para a constelação. Atualmente é composto por uma estação de controle mestre (MCS – *Master Control Station*) localizada em Colorado Springs, uma estação de controle mestre alternativa (AMCS – *Alternate Master Control Station*) na Califórnia, 11 antenas de comando e controle (GA - *Ground Antenna*) e 16 locais de monitoramento (MS – *Monitoring Sites*) (Figura 5) (GPS.gov, 2022).

Figura 5 - Estações de controle GPS.



Fonte: GPS.gov, 2022.

2.1.2.3 Segmento de Usuário do GPS

O segmento de usuário inclui todos que utilizam o sistema de alguma forma, para receber sinal GPS em posição, velocidade e tempo. Esse segmento está ligado com os receptores para recebimento de sinais dos satélites, o qual com o desenvolvimento da tecnologia, foram criadas antenas que recepcionam múltiplos sinais, podendo também se comunicarem via sinais de rádio, internet ou *Bluetooth*. Instituições de pesquisa e a iniciativa privada têm desenvolvido redes para envio de correções, assim possibilitando aplicações que requerem diferentes níveis de acurácia, desde navegação com celulares até receptores geodésicos de nível centimétrico ou milimétrico.

2.1.3 Sistema de Referência e Sinais

O sistema de referência empregado pelas efemérides transmitidas é o WGS84 (*World Geodetic System*), desenvolvido pelo DoD em 1987 e atualmente monitorado e mantido pela NGA tendo sua origem adotada no geocentro (centro de massa da Terra). Para a implementação inicial do WGS84, foram utilizados mais de mil pontos com as coordenadas obtidas através de observações obtidas pelo TRANSIT (primeiro sistema de satélites desenvolvido pela Marinha dos EUA em conjunto com a DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) com o primeiro satélite lançado em outubro de 1957) com precisão de 1 a 2 metros. Foram realizados refinamentos sucessivos até chegar à precisão a nível centimétrico em relação ao ITRF2000 (*International Terrestrial Reference Frame* – época 1997), assim formando em 2002 a realização WGS84 (G1150) (ESA, 2011). A realização mais recente é a WGS84 (G2139), introduzida em 3 de janeiro de 2021 removendo pequenos erros sistemáticos em relação ao ITRF2014 (NGA, 2021). Os parâmetros do elipsoide de referência do WGS84 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do WGS84.

Semieixo maior	a	6378137,0 m
Fator de achatamento	f	1/298,257223563
Velocidade Angular da Terra	ω_E	$7292115,0 \cdot 10^{-11}$ rad/s
Constante Gravitacional	μ	$3986004,418 \cdot 10^8$ m ³ /s ²

Fonte: Adaptado de ESA, 2011.

O sistema de tempo GPS é o GPST (*GPS Time*) que é equipado com relógios atômicos das estações de controle, alcançando uma precisão de nanosegundos. O sistema tem como origem o dia 06/01/1980, 00h UTC (*Universal Time Coordinated*); o tempo

não é ajustado pelos saltos de segundos e tem uma diferença com o TAI (Tempo Atômico Internacional) de 19 segundos (HEGARTY, 2017).

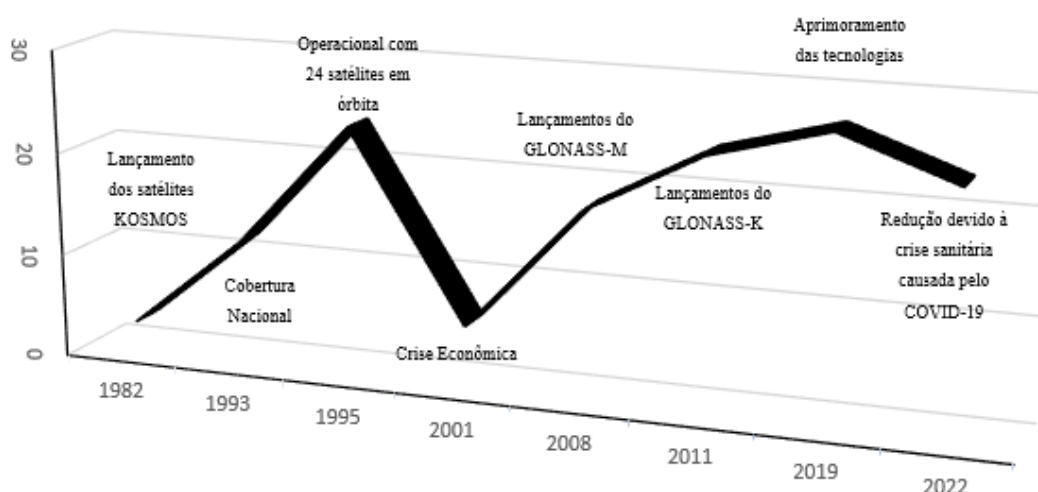
A tecnologia empregada dos sinais é a CDMA (*Code Division Multiple Access*), técnica em que todos os satélites transmitem na mesma frequência, sendo: L1 = 1575,42 MHz, L2 = 1227,60 MHz e L5 = 1176,45 MHz, e sua identificação é dada pelo PRN, um código atribuído a cada satélite individualmente. O sistema GPS possui as portadoras L1, L2 e L5. As portadoras L1 e L2 foram as primeiras, sendo direcionadas para uso dos militares e usuários autorizados (SEEBER, 2003). A partir do bloco IIR-M a L2 desenvolveu seu sinal civil para a portadora L2C. Por fim, no bloco IIF, a portadora L5 transmitiu seu terceiro sinal civil nomeado como L5C (GPS.gov, 2022).

2.2 GLONASS

2.2.1 Histórico sobre o Sistema

O sistema de navegação GLONASS foi desenvolvido pela antiga União Soviética para fins militares em meio à Guerra Fria, sendo declarado operacional em 1995, e atualmente mantido e monitorado pelo governo russo. Devido a uma crise econômica entre 1996 e 1999, em que foram cortados 80% dos investimentos russos no programa espacial, somente 6 satélites operacionais permaneceram em órbita, caracterizando o sistema como inoperante. A economia foi recuperada devido ao início do plano de metas para modernização em 2002 e o sistema foi expandido para uso civil e tornado operacional em 2006 (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Foram gastos no total, cerca de US\$ 4,7 bilhões (quatro bilhões e 700 milhões de dólares) de 2001 a 2011, restaurando o status de operacional em total capacidade, com o lançamento dos satélites de segunda geração, o GLONASS-M em 2006 e de terceira geração, o GLONASS-K, que teve início em fevereiro de 2011. Satélites da geração GLONASS-K2 devem ser lançados em breve. A Figura 6 demonstra o histórico do número de satélites durante esses períodos.

Figura 6 - Número de satélites GLONASS conforme o tempo.



Fonte: Adaptado de IAC, 2022.

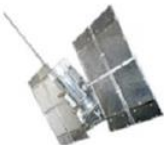
2.2.2 Segmentos do GLONASS

2.2.2.1 Segmento Espacial do GLONASS

Diferentemente do GPS, o sistema GLONASS utiliza um ângulo de inclinação em relação ao equador um pouco maior ($64^{\circ}48'$), que resulta em uma melhor cobertura para latitudes elevadas (SEEBER, 2003). O segmento espacial é composto por uma constelação nominal de 24 satélites em MEO, distribuídos em 3 planos orbitais com uma separação de 120° entre eles, contendo cerca de oito satélites com o mesmo espaçamento em cada plano. Os satélites orbitam em uma altitude aproximada de 19140 km e período orbital de 11 horas e 15 minutos siderais. A constelação operacional atual (2022) do GLONASS contém 22 satélites operacionais em MEO com mais três em manutenção (IAC, 2022).

A constelação atual é composta por satélites de 2 gerações GLONASS operacionais e mais uma em desenvolvimento. Apresenta-se na Tabela 5 as características de cada geração.

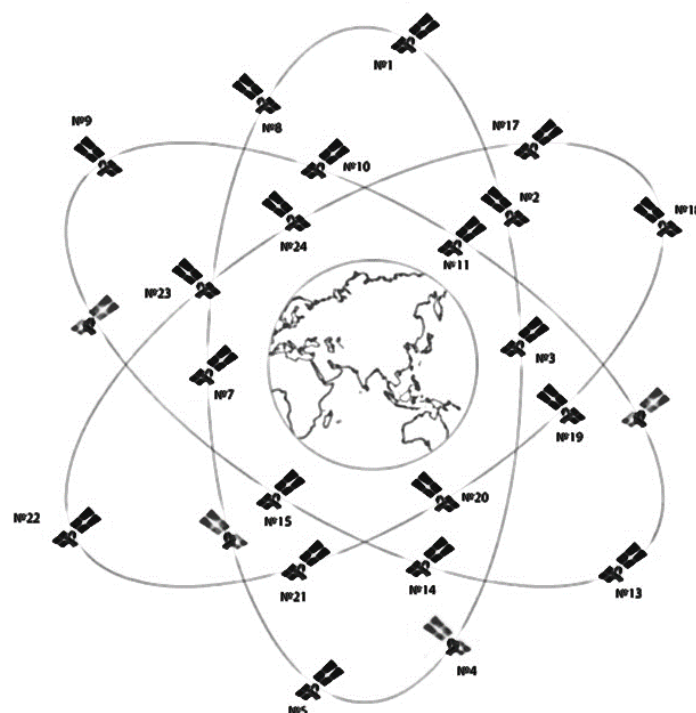
Tabela 5 - Gerações do GLONASS.

				
Informações	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS-K	GLONASS-K2
Status	Desativado	Operacional	Operacional	Desenvolvimento
Lançamento	1982	2003	2011	2022
Vida Útil	3 anos	7 anos	10 anos	10 anos
Massa	1500 kg	1415 kg	935 kg	1600 kg
Consumo de Energia	-	1400 W	1270 W	4370 W
Tecnologia de Sinais	FDMA	FDMA/CDMA	FDMA/CDMA	FDMA/CDMA
Frequências Abertas	L_1	L_1, L_2 e L_3	L_1, L_2 e L_3	L_1, L_2 e L_3

Fonte: Adaptado de IAC, 2022.

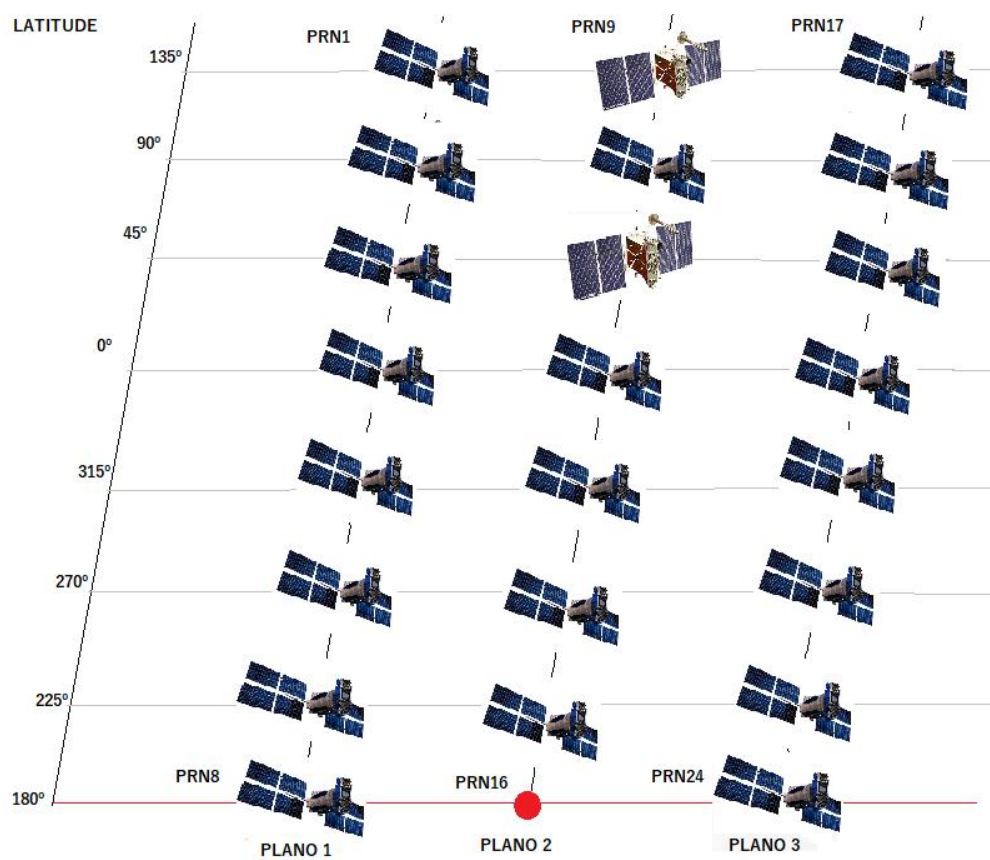
Com pequeno período de duração e lançamento ainda no século XX, os satélites da primeira geração GLONASS foram desativados, bem como a sua produção. A geração GLONASS-M foi lançada em 2003 e está operacional até hoje, com lançamentos de satélites com tecnologia CDMA logo em 2014. Foi um marco para a evolução do sistema, afinal a vida útil dos satélites e a massa do mesmo são mais agradáveis, bem como a transmissão de mais de uma frequência (L_1 e L_2 , inicialmente). Em 25 de fevereiro de 2011, o governo russo, já com a ideia da implantação da tecnologia CDMA, lançou o primeiro satélite pertencente à geração GLONASS-K, esse que se apresenta mais leve e bem mais duradouro, consumindo menos energia em relação à tecnologia anterior e emitindo sinais nas frequências L_1 , L_2 e L_3 . O lançamento dos satélites de geração GLONASS-K2 estava marcado para 2019, porém foi adiado para final de 2021 e novamente postergado para 2023. Assim, demonstra-se nas Figuras 7 e 8 o arranjo espacial dos satélites GLONASS.

Figura 7 - Segmento Espacial do GLONASS.



Fonte: Adaptado de ESA, 2011.

Figura 8 - Satélites GLONASS.



Fonte: Os Autores, 2022.

2.2.2.2 Segmento de Controle do GLONASS

O segmento de controle consiste em várias estações de controle, inicialmente implantadas apenas na URSS (onde se encontra a estação central), porém com o projeto de reorganização desde 2013 foi se instalando em diversos países. No Brasil, por exemplo, foi instalada a primeira estação de controle GLONASS no Hemisfério Sul (SPUTINK NEWS, 2015), além disso, exceto a Rússia, é o país que mais contém estações de controle do GLONASS.

A estação de monitoramento mestre (*System Control Center – SCC*) localiza-se em Krasnoznamensk, tem-se também uma rede de 5 estações TT&C (*Telemetry, Tracking and Command*) em Schelkovo, Komsomoisk, St-Peteburg, Ussuriysk e Yenisseisk. Schelkovo também possui um relógio central (CC-M), uma estação a laser (SLR), 3 estações de *upload* (*Uplink Stations – ULS*) e outras estações de monitoramento e medições MS (*Monitoring and Measuring Stations*) (Figura 9).

Figura 9 - Estações de controle do GLONASS.



Fonte: Revnivykh, 2008.

2.2.2.3 Segmento de Usuário do GLONASS

Assim como no GPS, esse segmento no GLONASS está associado aos receptores, geralmente recebem sinais dos satélites GPS, GLONASS ou de ambos. Com o projeto de reestruturação adotado em 2013 o uso dos receptores GLONASS se tornou mais confiável (MONICO, 2008).

2.2.3 Sistema de Referência e Sinais

Uma peculiaridade do GLONASS é a adoção, na concepção original, da FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) como tecnologia utilizada para transmissão de sinais. Nessa tecnologia cada satélite transmite em uma frequência diferente, sendo identificado de acordo com ela. A obtenção das frequências é dada por (MONICO, 2008; SEEGER, 2003):

$$f_L = f_0 + k\Delta_{f_L} \quad (1)$$

em que f_0 é a frequência fundamental de cada onda portadora, podendo ser no sinal L_1 , com 1602 MHz com taxa de variação da frequência (Δ_{f_L}) de 0,5625 MHz, no sinal L_2 , com 1246 MHz e variação de 0,4375 MHz, ou no sinal L_3 , com 1204,704 MHz variando 0,4230 MHz. Também se faz presente na equação o canal atribuído ao satélite (k , que inicialmente variavam de 0 a 24, porém devido a interferências nas observações de radioastronomia e satélites de comunicação as frequências foram realocadas para o intervalo de -7 a 7) (MONICO, 2008). Por fim, as relações entre as frequências das portadoras, f_{L_1} , f_{L_2} e f_{L_3} , apresentadas por Hofmann-Wellenhof et al. (2008), são dadas por:

$$\frac{f_{L_1}}{f_{L_2}} = \frac{9}{7} \quad e \quad \frac{f_{L_1}}{f_{L_3}} = \frac{94}{125} \quad (2)$$

Assim, as frequências emitidas por cada satélite são transmitidas de maneira variável, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição das frequências FDMA dos satélites GLONASS.

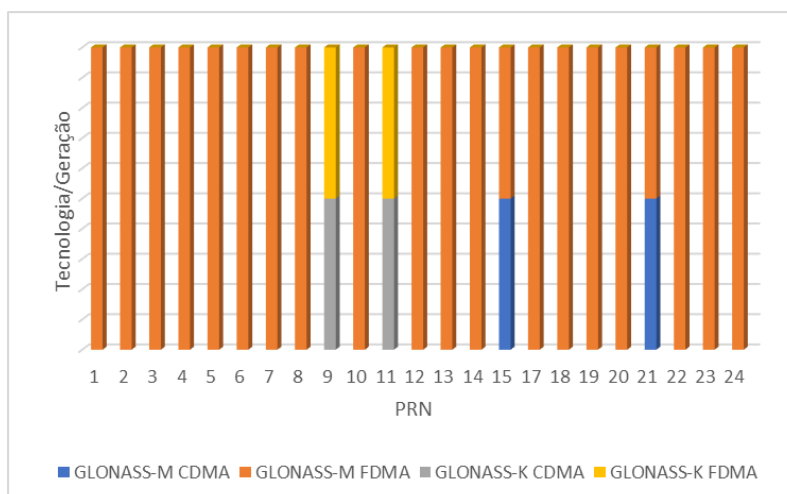
Plano	PRN	k	L1 (MHz)	L2 (MHz)	L3 (MHz)	Lançamento
I	1	1	1602,5625	1246,4375	1205,127	14/12/2009
	2	-4	1599,75	1244,25	1203,012	07/04/2013
	3	5	1604,8125	1248,1875	1206,819	04/11/2011
	4	6	1605,375	1248,625	1207,242	12/11/2019
	5	1	1602,5625	1246,4375	1205,127	17/06/2018
	6	-4	1599,75	1244,25	1203,012	14/12/2009

	7	5	1604,8125	1248,1875	1206,819	04/11/2011
	8	6	1605,375	1248,625	1207,242	04/11/2011
2	9	-2	1600,875	1245,125	1203,858	01/12/2014
	10	-7	1598,0625	1242,9375	1201,743	25/12/2007
	11	0	1602	1246	1204,704	25/10/2020
	12	-1	1601,4375	1245,5625	1204,281	27/05/2019
	13	-2	1600,875	1245,125	1203,858	25/12/2007
	14	-7	1598,0625	1242,9375	1201,743	22/09/2017
	15	0	1602	1246	1204,704	03/11/2018
3	17	4	1604,25	1247,75	1206,396	07/02/2016
	18	-3	1600,3125	1244,6875	1203,435	24/03/2014
	19	3	1603,6875	1247,3125	1205,973	26/10/2007
	20	2	1603,125	1246,875	1205,55	26/10/2007
	21	4	1604,25	1247,75	1206,396	14/06/2014
	22	-3	1600,3125	1244,6875	1203,435	02/03/2010
	23	3	1603,6875	1247,3125	1205,973	02/03/2010
	24	2	1603,125	1246,875	1205,55	16/03/2020
Inoperantes	11	-	-	-	-	29/05/2016
	16	1	1602,5625	1246,4375	1205,127	04/10/2010

Fonte: Adaptado de IAC, 2022.

A tecnologia FDMA não permite eliminar os erros dos relógios e ambiguidades nas Duplas Diferenças (SEEBER, 2003). Além disso, como nos primeiros satélites GPS, a portadora L_1 possuía sinal civil e para usuários autorizados, enquanto a segunda portadora apresentava apenas sinal para usuários autorizados (MONICO, 2008). A fim de amenizar os erros e garantir um melhor resultado, houve um maior desenvolvimento de satélites que emitem sinais com tecnologia CDMA, que hoje conta com 4 satélites, sendo 2 da geração GLONASS-M lançados depois de 2014 e 2 da geração GLONASS-K (Figura 10).

Figura 10 - Tecnologias presentes nos satélites GLONASS.



Fonte: Os Autores, 2022.

Primeiramente o sistema de referência do GLONASS foi o SGS-85, posteriormente adotando-se o SGS-90, mas foi alterado para o PZ-90 (*Parametry Zemli* 1990). O sistema de tempo GLONASS, nomeado de GLST (*GLONASS System Time*) é relacionado ao UTC, com um *offset* constante de três horas, devido à diferença de fusos entre o relógio central CC-M (Schelkovo) e Greenwich. A relação já inclui os saltos de segundos, mas existe ainda um termo a ser inserido na relação devido ao uso de relógios diferentes para o monitoramento das escalas de tempo (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

2.3 Galileo

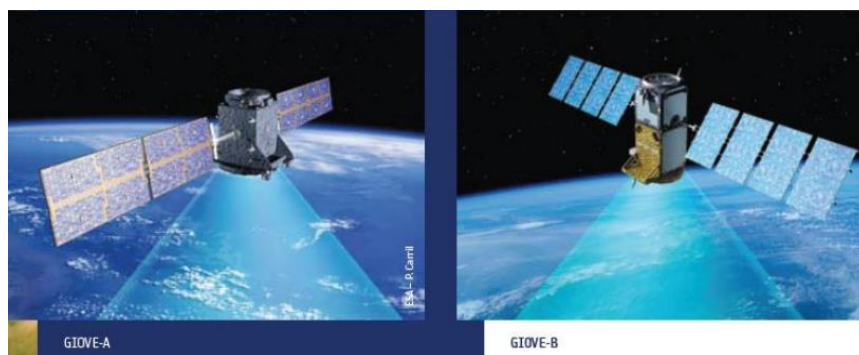
2.3.1 Histórico sobre o Sistema

O desenvolvimento do sistema Galileo iniciou-se após o governo dos Estados Unidos se recusar a compartilhar o acesso às configurações dos satélites GPS, quando a União Europeia viu a necessidade de ter um sistema global de navegação por satélite próprio. O objetivo do sistema Galileo, desenvolvido pela ESA (*European Space Agency* – Agência Espacial Europeia), é fornecer uma série de serviços para usuários civis, diferentemente dos sistemas GPS e GLONASS que eram utilizados para fins militares.

Os primeiros satélites foram lançados na fase de testes, entre os anos 2005 e 2008. Denominados de GIOVE – *Galileo In-Orbit Validation Element* (GIOVE A e GIOVE B), estes satélites não estão mais ativos, por isso estão fora da órbita nominal Galileo. Em 2011 foram lançados dois satélites e no ano seguinte (2012) foram lançados mais dois satélites, tendo início a fase IOV (*In-Orbit Validation*), quando se iniciaram os testes com

quantidade mínima para determinar a posição e o tempo. Em março de 2013 foi obtida a primeira determinação de posição através da constelação Galileo.

Figura 11 - Satélites GIOVE – A e GIOVE – B.



Fonte: ESA, 2022.

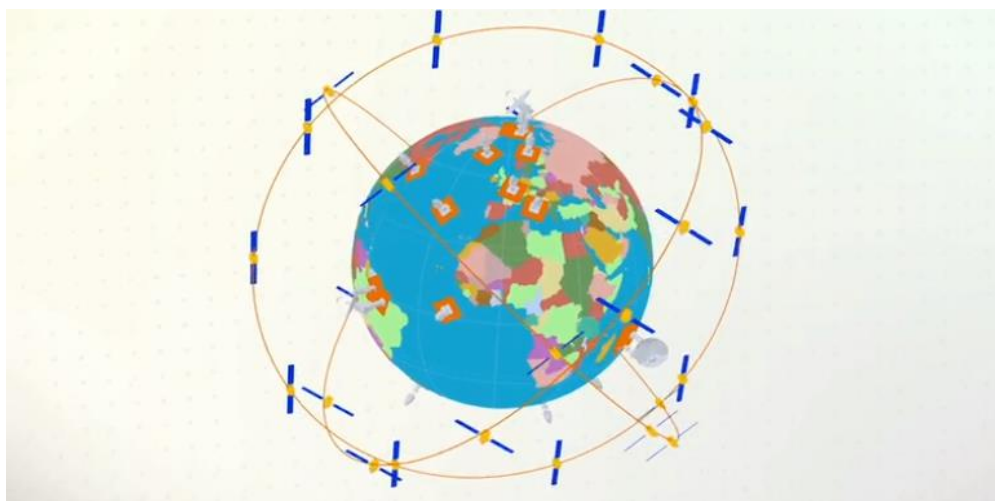
A União Europeia iniciou negociações com os governos da América Latina para permitir programas de promoção de cooperação nos dois continentes. Em outubro de 2011, uma carta de intenção para um diálogo sobre políticas do espaço foi assinada entre o Sr. Aloizio Mercadante, Ministro da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil, e Antonio Tajani, Vice-presidente da Comissão Europeia, com o objetivo de construir um sistema eficaz de parceria e cooperação entre o Brasil e a UE em atividades espaciais civis, dentro do qual o GNSS está incluído (Galileo, 2022). Para o GNSS europeu, é esperado que o sistema esteja completo nos próximos anos, com uma constelação de 30 satélites.

2.3.2 Segmentos do Galileo

2.3.2.1 Segmento Espacial do Galileo

O segmento espacial do Galileo, quando estiver totalmente implantado, contará uma constelação completa de 30 satélites em órbita média, sendo destes, 6 satélites reservas, distribuídos homogeneamente em três planos orbitais. A constelação Galileo atualmente tem 28 satélites em órbita, dos quais 24 estão em operação (janeiro de 2023) com altitude orbital de 23.222 km e inclinação de 56° em relação ao equador (Figura 12). A trajetória nominal seguida pelos satélites operacionais é uma órbita circular com período orbital de aproximadamente 14h. Tal configuração garante que a constelação se repetirá a cada 10 dias siderais, ou 17 órbitas (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2022; FALCONE et al., 2017; GSC, 2022).

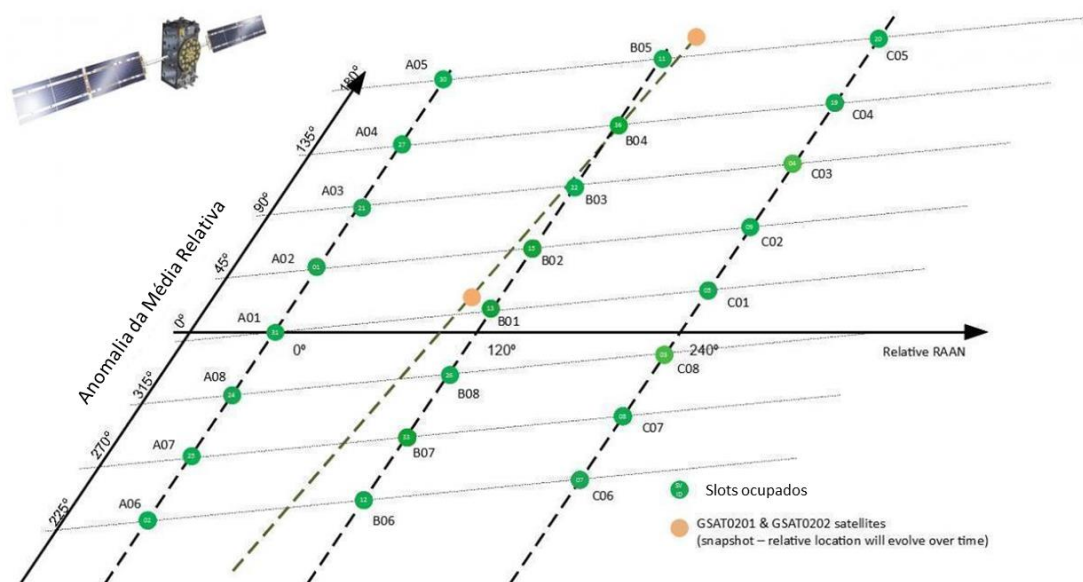
Figura 12 - Constelação Galileo.



Fonte: ESA, 2022.

A Figura 13 apresenta o arranjo dos satélites nas órbitas, separados por PRNs, demonstrando o plano orbital e a latitude. Além dos satélites em MEO, também são apresentados na imagem a localização de outros dois satélites, o GSAT0201 e GSAT0202 (primeiros satélites da geração FOC- *Full Operational Capability*).

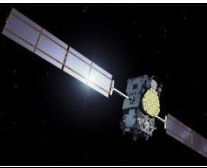
Figura 13 - Arranjo dos satélites Galileo em planos orbitais.



Fonte: ESA, 2022.

A Tabela 7 apresenta as principais características dos satélites Galileo, conforme a evolução da tecnologia.

Tabela 7 - Dados das gerações Galileo.

				
Dados	GIOVE	IOV	FOC	G2G
Situação	Desativado	Operacional	Operacional	Desenvolvimento
Satélites	Lançados: 2 Planejados: 0 Operacionais: 0	Lançados: 4 Planejados: 0 Operacionais: 3	Lançados: 22 Planejados: 10 Operacionais: 20	Lançados: 0 Planejados: 12 Operacionais: 0
Massa (kg)	602	700	733	-
Consumo (W)	600~700	1355~1420	1900	-
Vida útil	2~4 anos	12 anos	>12 anos	-

Fonte: Adaptado de GSC, 2022.

2.3.3 Segmento de Controle do Galileo

O segmento de controle Galileo é composto por uma estação terrestre (*Ground Control Segment* – GCS) para monitoramento da constelação e um segmento de missão terrestre (*Ground Mission Segment* – GMS), que é responsável pelas tarefas relacionadas ao serviço (BARTOLOMÉ et al., 2015; FALCONE et al., 2017; GSC, 2022).

Suas funções básicas são:

- Controlar e manter o status e configuração da constelação de satélites;
- Prever efemérides e evolução do relógio de satélite;
- Manter a escala de tempo GNSS correspondente (através de relógios atômicos);
- Atualizar as mensagens de navegação para todos os satélites.

Assim, o GCS e o GMS monitoram os satélites por meio de uma rede mundial de estações para o monitoramento e controle, que são divididas em sensores que coletam e encaminham medições e dados do Galileo SIS (*Signal-In-Space*) para os GCCs (*Galileo Control Centres*) em tempo real, que são os GSS (*Galileo Sensor Stations*), estações que realizam o *uplink* dos dados (ULS – *Galileo Uplink Stations*) e estações TT&C (*Telemetry, Tracking & Control stations*).

2.3.4 Segmento de Usuário do Galileo

Da mesma forma que nos demais sistemas, o segmento de usuários do Galileo envolverá os vários tipos de receptores. Para o usuário, são transmitidos sinais em três frequências E1, E5 e E6. Os sinais em E1 e E5a são transmitidos nas mesmas frequências

que os sinais GPS L1 e L5 e ambos os sistemas usam princípios de modulação equivalentes (SILVA, 2020).

O segmento do usuário é composto por todos os receptores e dispositivos compatíveis que coletam os sinais do sistema Galileo e calculam a sua localização. A gama de aplicações previstas do Galileo é enorme e abrange os setores público e privado em vários segmentos de mercado (BARTOLOMÉ et al., 2015; GSC, 2022).

2.3.5 Sistema de Referência e Sinais

O sistema de referência do Galileo (*Galileo Terrestrial Reference Frame – GTRF*) foi estabelecido com precisão compatível à versão mais atual do Sistema Internacional de Referência Terrestre (ITRS) a um nível de 3 cm (2 *sigmas*) (GENDT et al., 2011). Sua realização e manutenção são de responsabilidade do Provedor de Serviços Geodésicos Galileo (*Galileo Geodetic Service Provider – GGSP*), um consórcio entre cinco instituições europeias. Juntamente com a realização do GTRF, o GGSP determina também os parâmetros de orientação da Terra e das órbitas precisas e erros nos relógios dos satélites Galileo (FRITSCHKE, 2016).

Cada satélite Galileo transmite sinais em três frequências diferentes utilizando a tecnologia CDMA, nomeadamente E1 (1575,420 MHz, alinhado com GPS L1), E5 (1191,795 MHz) e E6 (1278,750 MHz). O sinal E5 é dividido em duas sub-bandas, E5a (1176,450 MHz, alinhada com GPS L5) e E5b (1207,140 MHz), que podem ser rastreadas e utilizadas separadamente, equivalentes a duas portadoras diferentes na banda E5 (Galileo OS SIS ICD, 2016; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

2.3.6 Serviços do Galileo

Esses sinais e componentes são a base de quatro serviços de posicionamento:

- *Open Service* (OS), que é um serviço básico de posicionamento oferecido gratuitamente nas bandas E1, E5a e E5b;
- *High Accuracy Service* (HAS), que é complementar ao OS, na banda E6 adicionado um terceiro sinal criptografado, disponível para uso comercial;
- *Public Regulatory Service* (PRS), um serviço restrito, disponível apenas para usuários autorizados pelo governo europeu, que deve permanecer operacional mesmo em situações de crise em que outros serviços possam ser interrompidos;
- Serviço de Busca e Resgate (*Search and Rescue Service – SAR*), que é um serviço de suporte ao COSPAS-SARSAT, um serviço de busca e resgate internacional.

2.3.7 Os Relógios Atômicos e o Sistema de Tempo Galileo

Os relógios são componentes essenciais do sistema Galileo, que necessitam ser precisos para a escala de nanossegundos (ns), equivalente a um bilionésimo de segundo, possibilitando a obtenção da distância com precisão (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2019; FALCONE et al., 2017). A bordo de cada satélite, o relógio principal caracteriza-se por ser atômico com base na maser de hidrogênio passivo, utilizando a transição ultra estável de 1,4 GHz em um átomo de hidrogênio, medindo o tempo dentro de 0,45 ns em 12 horas. Já a segunda fonte de tempo é um relógio de rubídio, que tem a precisão de 1,8 ns em 12 horas (BARTOLOMÉ et al., 2015; ESA, 2022; FALCONE et al., 2017).

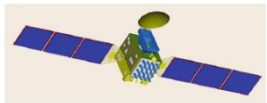
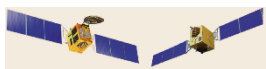
Em relação ao sistema de tempo, o Galileo adota o GST (*Galileo System Time*), constituído por relógios atômicos pelo segmento de controle, definindo um sistema de tempo semelhante ao adotado no GPS (JEKELI e MONTENBRUCK, 2017). Segundo Beard e Senior (2017), o GST tem origem às 00:00 (UTC) do dia 22 de agosto de 1999, estabelecido como estando 13 segundos à frente do UTC para ser consistente com o tempo GPS.

2.4 BeiDou

2.4.1 Histórico sobre o Sistema

Nos anos de 1980, a China iniciou o desenvolvimento de seu próprio sistema de navegação por satélite em três fases, sendo a primeira denominada de *BeiDou Navigation Satellite Demonstration System* (BeiDou-1), a segunda chamada de BeiDou-2 e a terceira BeiDou-3. Na primeira fase, foram lançados três satélites geoestacionários entre os anos de 2000 e 2003, com o intuito de testar o sistema de navegação. Na segunda fase, estes satélites foram substituídos por novos satélites lançados, num total de 14 satélites (5 de órbita geoestacionária (GEO – *Geostationary Earth Orbit*), 5 de órbita geossíncrona (IGSO – *Inclined Geo-Synchronous Orbit*), e 4 de órbita média), correspondendo à fase regional do sistema de navegação que foi iniciada em 2004 e finalizada em 2012, recobrando todo o território chinês e outras partes da Ásia e do Pacífico (LIU et al., 2014; YANG, TANG e MONTENBRUCK, 2017). A terceira fase é composta por uma constelação global, que foi declarada operacional no ano de 2020 (IAC, 2022). Na Tabela 8 pode ser encontrado um resumo das missões do sistema de navegação BeiDou.

Tabela 8 - Resumo das missões do BeiDou.

			
Missão	BDS-1	BDS-2	BDS-3
Datas e Lançamentos	2000 – 2 satélites GEO 2003 – Terceiro satélite GEO	2004 – Início BDS-2 2007 – Primeiro satélite da BDS-2 (Satélite MEO) 2012 – Rede completa com 14 satélites (5 GEO, 4 IGSO e 4 MEO)	2009 – Início BDS-3 2020 – Rede completa com 30 satélites (3 GEO, 3 IGSO e 24 MEO)
Sinais	Banda C, L e S	Bandas B1, B2 e B3	Bandas B1, B2 e B3

Fonte: Adaptado de ESA, 2022.

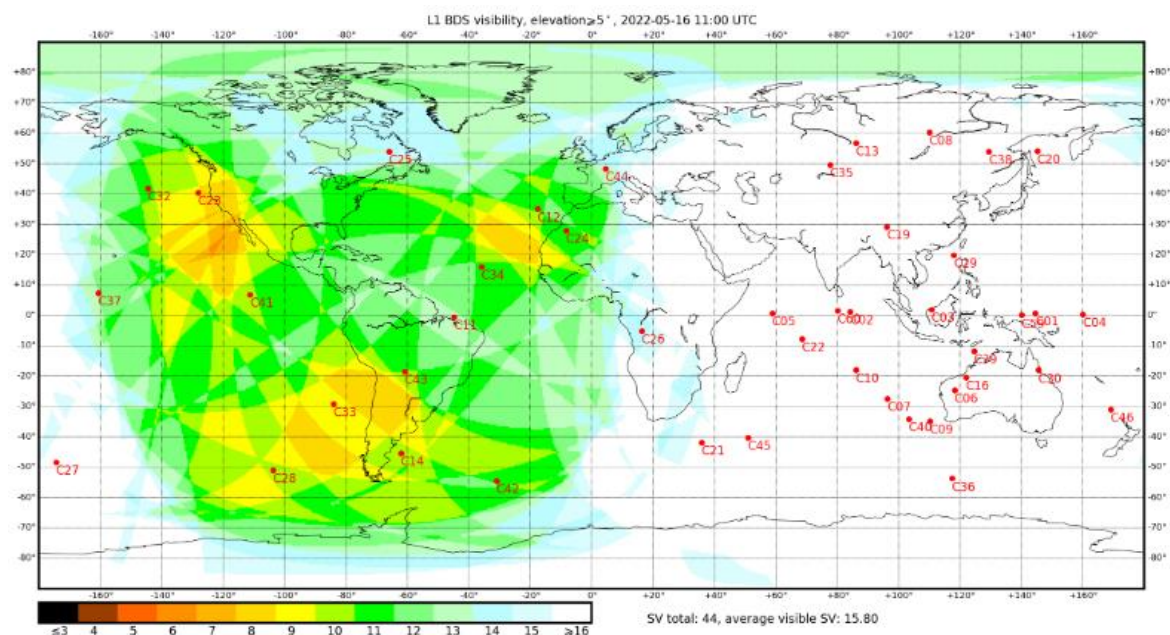
2.4.2 Segmentos do BeiDou

Neste tópico serão apresentados os segmentos espacial e de controle do sistema de navegação BeiDou. O segmento de usuário não será apresentado devido a ser semelhante aos sistemas GPS, Galileo e GLONASS.

2.4.2.1 Segmento Espacial do BeiDou

O segmento espacial do sistema BeiDou é composto por uma constelação nominal de satélites sendo de 27 satélites MEO, 3 satélites IGSO e 5 satélites GEO, divididos em 3 planos orbitais, contendo um período orbital de 12 horas e 53 minutos e uma repetibilidade de 7 dias siderais (YANG, TANG e MONTENBRUCK, 2017). Atualmente (novembro de 2022), a constelação de satélites é composta por 44 satélites operacionais, sendo 29 satélites MEO, 12 satélites IGSO e 8 satélites GEO (IAC, 2022). A Figura 14 apresenta os satélites disponíveis atualmente.

Figura 14 - Constelação atual do BeiDou.



Fonte: glonass-iac.ru (2022).

Na Tabela 9, encontram-se os satélites da constelação BeiDou, separados pelo seu PRN, missão e sua data de lançamento.

Tabela 9 - Satélites da constelação BeiDou.

Tipo de órbita	PRN	Missão	Data de lançamento
GEO	C01	BDS-2	17/05/2019
	C02	BDS-2	25/10/2012
	C03	BDS-2	12/06/2016
	C04	BDS-2	01/11/2010
	C05	BDS-2	25/02/2012
	C59	BDS-3	01/11/2018
	C60	BDS-3	09/03/2020
	C61	BDS-3	23/06/2020
IGSO	C06	BDS-2	01/08/2010
	C07	BDS-2	18/12/2010
	C08	BDS-2	10/04/2011
	C09	BDS-2	27/07/2011
	C10	BDS-2	02/12/2011
	C13	BDS-2	30/03/2016
	C16	BDS-2	10/07/2018
	C31	BDS-3	30/03/2015
	C38	BDS-3	20/04/2019
	C39	BDS-3	25/06/2019
	C40	BDS-3	05/11/2019

	C56	BDS-3	30/09/2015
MEO	C11	BDS-2	30/04/2012
	C12	BDS-2	30/04/2012
	C14	BDS-2	19/09/2012
	C19	BDS-3	05/11/2017
	C20	BDS-3	05/11/2017
	C21	BDS-3	12/02/2018
	C22	BDS-3	12/02/2018
	C23	BDS-3	29/07/2018
	C24	BDS-3	29/07/2018
	C25	BDS-3	25/08/2018
	C26	BDS-3	25/08/2018
	C27	BDS-3	12/01/2018
	C28	BDS-3	12/01/2018
	C29	BDS-3	30/03/2018
	C30	BDS-3	30/03/2018
	C32	BDS-3	19/09/2018
	C33	BDS-3	19/09/2018
	C34	BDS-3	15/10/2018
	C35	BDS-3	15/10/2018
	C36	BDS-3	19/11/2018
	C37	BDS-3	19/11/2018
	C41	BDS-3	16/12/2019
	C42	BDS-3	16/12/2019
	C43	BDS-3	23/11/2019
	C44	BDS-3	23/11/2019
	C45	BDS-3	23/09/2019
	C46	BDS-3	23/09/2019
	C57	BDS-3	25/07/2015
	C58	BDS-3	25/07/2015

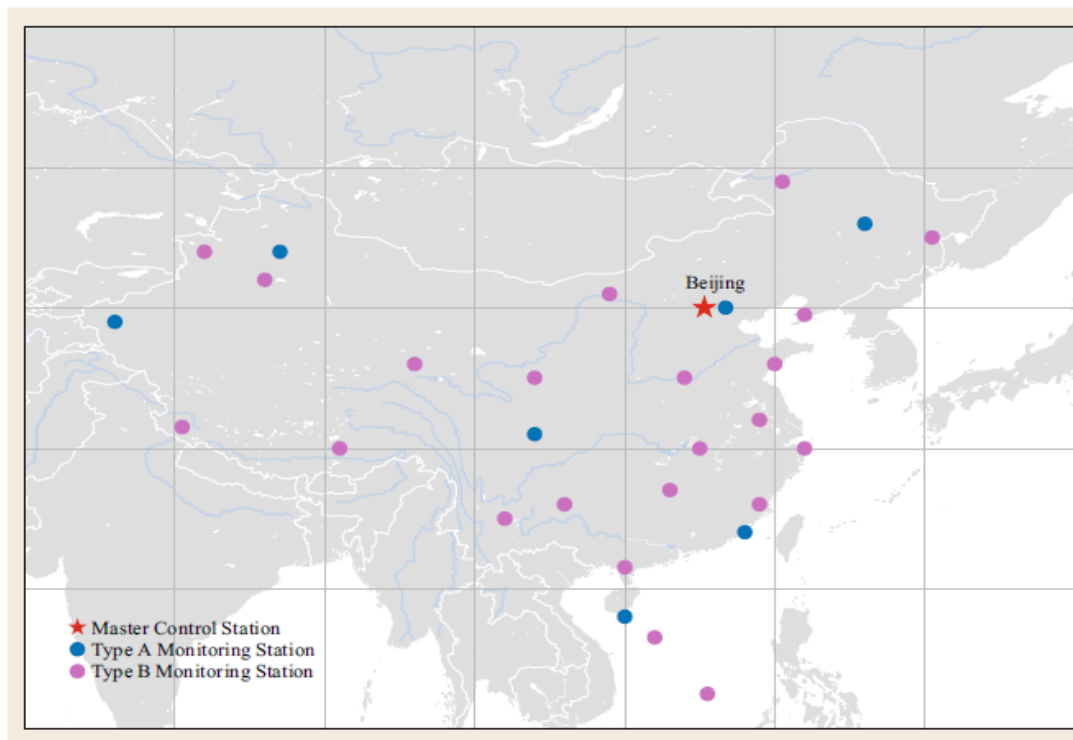
Fonte: glonass-iac.ru (2022).

2.4.2.2 Segmento de Controle do BeiDou

O segmento de controle do BeiDou é denominado de OCS (*Operational Control System*), consistindo em uma estação central de controle e estações de monitoramento e *upload*. Como função principal estabelecer e manter o sistema de referência do BeiDou (Atualmente utiliza-se o CGCS2000 (*China Geodetic Coordinate System 2000*)), manter o sistema de tempo, monitorar, processar e prever atrasos ionosféricos e monitoramento dos satélites em órbita (SETTI JÚNIOR, 2019). Na Figura 15 encontra-se a disposição

das estações de controle e monitoramento do sistema de navegação BeiDou localizadas no território chinês.

Figura 15 - Estações controle e monitoramento no território chinês.



Fonte: TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017.

Na Figura 15, encontram-se a estação master de controle e dois tipos de estações de monitoramento, as do Tipo A (em azul) que realizam o monitoramento das órbitas e do atraso ionosférico, e do Tipo B (em rosa) que são responsáveis pela integridade do sistema BeiDou (TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

2.4.3 Sinais

O sistema BeiDou disponibiliza sinais fornecidos pelos satélites por meio de dois serviços, sendo eles o aberto, que oferece a banda B1 da fase BDS-2 contendo a frequência de 1561,098 MHz, e o serviço autorizado, que é de uso apenas militar e pelo governo chinês, utiliza as bandas B1, B2 (1207,14 MHz) e B3 (1268,52 MHz) (ESA, 2022).

O sistema de tempo adotado pelo BeiDou é o BDT (*BeiDou Time*), que tem origem em 00:00 UTC no dia 01 de janeiro de 2016, contendo um *offset* constante de 33 segundos em relação ao TAI (Tempo Atômico Internacional) (BEARD e SENIOR, 2017; JEKELI e MONTENBRUCK, 2017).

3. POSICIONAMENTO POR PONTO GNSS

O termo posicionamento trata-se da determinação da posição de um objeto em relação a uma referência. Quando as coordenadas deste objeto são determinadas em relação ao geocentro, é denominado de Posicionamento por Ponto, ou absoluto (MONICO, 2008). Estas coordenadas são determinadas a partir de um processamento, podendo ser pós-processado, em que as coordenadas são obtidas após a coleta dos dados, ou em tempo real, em que a posição é determinada no instante da coleta dos dados (KAPLAN e HEGARTY, 2006).

Devido à acurácia métrica do método, o Posicionamento por Ponto é normalmente utilizado em atividades de navegação. Faz-se o uso das observáveis de pseudodistância que são medidas pelo receptor e processadas para a determinação de suas coordenadas. As posições dos satélites GNSS e os seus respectivos erros de relógio são calculados a partir das efemérides transmitidas (mensagens de navegação), além de não se aplicar correções do atraso de propagação causado pela atmosfera a partir de modelos (ODIJK, 2017). No entanto, vale ressaltar que o PP empregado no presente trabalho utiliza de efemérides precisas, além de realizar a correção dos efeitos atmosféricos. Mais detalhes do método empregado são apresentados no capítulo 4 dedicado a metodologia.

3.1 Equação de Observação - Pseudodistância

O modelo funcional das observações de pseudodistância pode ser encontrado na Equação 3, dada pelo instante t , frequência j e constelação S (MONICO, 2008; ODIJK, 2017).

$$P_r^S = \rho_r^S(t, t - \tau_r^S) + c(dt_r(t) + d_{r,j}^S(t) + \Delta d_{r,j}^S(t)) - c(dt^S(t - \tau_r^S) + d_j^S(t - \tau_r^S)) + T_r^S + \mu_j^S I_r^S(t) + \varepsilon_{PD_{r,j}}^S \quad (3)$$

em que:

- P_r^S – Observação de pseudodistância (em metros);
- ρ_r^S – Distância geométrica do centro de fase da antena do receptor até o satélite considerando o instante de transmissão do sinal (em metros);
- τ_r^S – Tempo de propagação do sinal (em segundos);
- c – Velocidade da luz no vácuo (em metros/segundo);
- dt_r – Erro do relógio do receptor (em segundos);
- dt^S – Erro do relógio do satélite (em segundos);
- T_r^S – Atraso troposférico no sentido satélite-receptor (em metros);

- I_r^S – Atraso ionosférico (em metros);
- μ_j^S – Coeficiente ionosférico;
- $d_{r,j}^S$ e d_j^S – Atraso de hardware ou *bias* para o receptor e o satélite (em segundos), respectivamente;
- $\Delta d_{r,j}^S$ – Atraso intercanal do código (em segundos);
- $\varepsilon_{PD_{r,j}}^S$ – Demais erros não modelados e erros aleatórios na medida do código.

O atraso de hardware do receptor ($d_{r,j}^S$) é diferente para cada constelação mesmo quando sinais são rastreados em bandas que se sobrepõem – como por exemplo a L1 GPS e E1 Galileo – e quando considerado, é denominado de *Intersystem bias* (ISB). Em relação à constelação GLONASS – que se utiliza da tecnologia FDMA – as observações de pseudodistância são calculadas considerando o atraso intercanal do código $\Delta d_{r,j}^S$ (ICB – *Interchannel bias*) (ODJIK, 2017).

O atraso ionosférico presente na equação de pseudodistância trata-se de um erro de primeira ordem e é determinado apenas para uma frequência, assim define-se o coeficiente ionosférico μ_j^S como sendo (ODJIK, 2017):

$$\mu_j^S = \left(\frac{f_1^S}{f_j^S} \right)^2 \quad (4)$$

3.2 Cálculo dos Erros dos Relógios dos Satélites e Atraso Diferencial do Código

Os erros dos relógios dos satélites devem ser conhecidos no Posicionamento por Ponto. Fazendo uso de efemérides precisas a primeira correção a ser realizada é em relação ao movimento do relógio do satélite em relação ao receptor, denominado de correção relativística (Δt_{rel}) (KOUBA, 2009). Vale ressaltar que é utilizado o sistema de tempo GPST para todos os sistemas. A Equação 5 mostra como é calculado o valor de Δt_{rel} .

$$\Delta t_{rel} = -\frac{2}{c^2} \underline{X}_s \underline{V}_s, \quad (5)$$

em que $\underline{X}_s$ é a posição do satélite e $\underline{V}_s$ é a velocidade do satélite. Quando se utiliza de efemérides precisas também é aplicado uma outra correção ao erro do relógio, que é relacionada ao atraso diferencial do código (DCB – *Differential Code Bias*) – correção análoga ao TGD (*Time Group Delay*) quando utiliza efemérides transmitidas. Isso ocorre, pois, as observações de pseudodistância apresentam erros sistemáticos relacionados aos

atrasos causados internamente pelo *hardware* e que afetam o processo de geração, transmissão e processamento dos sinais (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014).

Os valores de DCB podem ser utilizados na modelagem do TEC (*Total Electron Contents* – Conteúdo Total de Elétrons) obtido a partir de dados de uma rede GNSS global. O IGS disponibiliza arquivos no formato IONEX contendo os parâmetros DCB estimados dos satélites e receptores para a utilização na modelagem (PROL et al., 2014).

Devido ao atraso causado pelas partes internas do *hardware*, impossibilitando acessar diretamente, o erro do relógio passou a ser definido em relação à combinação linear *ion-free* de dupla frequência para: L1/L2 P(Y) GPS, G1/G2 P GLONASS, E1/E5a Galileo e B1/B2 BeiDou (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014).

Em relação ao Posicionamento por Ponto utilizando uma única frequência (simples frequência), os atrasos DCB refletem entre duas observações do código que são obtidas a partir da mesma frequência ou até de frequências diferentes (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014).

O atraso de *hardware* do satélite (d_j^S) é definido como mostrado nas Equações 6 e 7 (GE et al., 2017).

$$d_{P1}^S = \frac{1}{\alpha - 1} DCB_{P1P2} \quad (6)$$

$$d_{P2}^S = \frac{\alpha}{\alpha - 1} DCB_{P1P2}, \quad (7)$$

em que $\alpha = f_1^2/f_2^2$ é uma constante relacionada às frequências utilizadas no posicionamento. Quando se calcula este atraso para o código L1 C/A GPS deve-se considerar um atraso de hardware entre o código P1 e C/A, que é mostrado na Equação 8 (ODJIK, 2017).

$$d_j^S = d_{P1}^S - d_{C1}^S = DCB_{IC}. \quad (8)$$

3.3 Modelo Funcional

No posicionamento, quando um receptor coleta dados de pseudodistância de quatro ou mais satélites visíveis, pode-se estimar a sua posição tridimensional. Assim, cada observação de cada satélite coletada pelo receptor acarretará uma equação – com base na Equação de pseudodistância já apresentada em (3) – que comporá o sistema de equações do método paramétrico (ODJIK, 2017).

O erro do relógio do receptor no tempo de recepção também será estimado juntamente com a posição no ajustamento dos dados. O erro do relógio será estimado a partir da combinação do erro verdadeiro do relógio somado ao atraso de *hardware* do receptor, sendo que ambos não podem ser separados, como mostrado na Equação 9 (ODJIK, 2017).

$$dt_{r,j}^S(t) = dt_r(t) + d_{r,j}^S. \quad (9)$$

No processo do posicionamento é necessário calcular a órbita ou posição do satélite (X^S, Y^S, Z^S) e o erro do relógio do satélite no instante de transmissão do sinal, aplicado as correções dos efeitos relativísticos e do atraso de *hardware* do satélite – mostrado nas Equações 5, 6, 7 e 8 – além de corrigir os efeitos sistemáticos envolvidos nas medidas (efeitos troposférico e ionosférico) (MONICO, 2008).

A distância geométrica entre satélite – no instante de transmissão – e receptor é calculada a partir das diferenças entre as coordenadas de ambos (sendo (X^S, Y^S, Z^S) as coordenadas do satélite, e (X_r, Y_r, Z_r) as coordenadas do receptor), como mostrado na Equação 10 (MONICO, 2008).

$$\rho_r^S(t, t - \tau_r^S) = \sqrt{(X^S(t, t - \tau_r^S) - X_r)^2 + (Y^S(t, t - \tau_r^S) - Y_r)^2 + (Z^S(t, t - \tau_r^S) - Z_r)^2}. \quad (10)$$

A equação de pseudodistância pode ser linearizada considerando o receptor (r) e o satélite (s) a partir da Equação 11 (MARQUES, 2012; MONICO, 2008; ODJIK, 2017).

$$E\{\Delta PD_r^S\} = -\frac{X^S - X_r^0}{(\rho_r^S)^0} (\Delta X_r) - \frac{Y^S - Y_r^0}{(\rho_r^S)^0} (\Delta Y_r) - \frac{Z^S - Z_r^0}{(\rho_r^S)^0} (\Delta Z_r) + c(dt_{r,j}^S), \quad (11)$$

em que:

- ΔPD_A^j - Representa a diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para a pseudodistância);
- ρ_r^S - é a distância geométrica calculada, em relação a parâmetros aproximados e $E\{\cdot\}$ (operador de esperança matemática);
- $\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, dt_{r,j}^S$ - são as correções dos parâmetros incógnitos sendo as coordenadas do receptor e o erro do relógio, respectivamente;

Assim, a diferença entre a pseudodistância observada e a calculada será representada por $L = L_0 - L_b$. A Equação 11 pode ser escrita de forma matricial, podendo ser visualizada na Equação 12.

$$E\{\Delta PD_r^S\} = AX = \left[-\frac{X^S - X_r^0}{(\rho_r^S)^0} \quad -\frac{Y^S - Y_r^0}{(\rho_r^S)^0} \quad -\frac{Z^S - Z_r^0}{(\rho_r^S)^0} \quad 1 \right] [\Delta X_r \ \Delta Y_r \ \Delta Z_r \ c(dt_{r,j}^S)]^T \quad (12)$$

Os valores presentes na matriz A (Equação 10) referem-se aos cossenos diretores para o vetor entre o receptor e o satélite, assumindo valores menores ou iguais ao módulo de 1.

O erro do relógio do receptor, quando utilizado mais de um sistema no posicionamento, é fornecido em função de um dos sistemas para todas as observações e a tendência entre os sistemas no receptor ($\Delta dt_{r,j}^{G,S}$) é somada ao parâmetro determinado no ajustamento. Seja o erro do relógio do receptor estimado em função do sistema S, o erro do relógio do sistema G será dado pela Equação 13 (ODJIK, 2017).

$$dt_{r,j}^G(t) = dt_{r,j}^S(t) + \Delta dt_{r,j}^{G,S}. \quad (13)$$

O número de parâmetros a serem estimados será igual a 3 + i, onde o valor de i é a quantidade de sistemas utilizados.

3.4 Modelo Estocástico

Para refinamento das coordenadas no ajustamento pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), necessita-se de redundância no número de observações. Ao assumir que as observações são não correlacionadas, a matriz Peso (P) é composta de elementos não nulos apenas na diagonal principal. O desvio padrão a priori adotado foi de 30 centímetros, de acordo com Cai et al. (2015) e Kazmierski et al. (2018), e a precisão das observações originais é dada pelo seno do ângulo de elevação (E), permitindo o cálculo da MVC (Matriz Variância-Covariância) das observações originais (Σ_{L_b}). Assim, para ‘n’ satélites, o modelo estocástico é dado por:

$$\sigma_0 = 0,3 \quad \sigma_r^{si} = 1/\text{sen}(E_r^{si}) \quad (14)$$

$$\Sigma_{L_b} = [(\sigma_r^{s1})^2 \ \dots \ 0 \ \vdots \ \vdots \ 0 \ \dots \ (\sigma_r^{sn})^2] = \left[\frac{1}{(\text{sen}(E_r^{s1}))^2} \ \dots \ 0 \ \vdots \ \vdots \ 0 \ \dots \ \frac{1}{(\text{sen}(E_r^{sn}))^2} \right] \quad (15)$$

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1} \quad (16)$$

Com o sistema devidamente ponderado de acordo com a elevação dos satélites (s_i , sendo “i” o PRN do referido satélite, “r” o receptor e “s” o satélite), é possível por meio do método paramétrico (GEMAEL, 1994) calcular o vetor dos resíduos (V) e posteriormente o fator de variância sigma a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$).

$$V = AX + L = E\{\Delta PD_r^s\} + \Delta PD_a^j \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T PV}{r} \quad (18)$$

sendo “r” a redundância do sistema, calculada pela subtração entre número de satélites ‘n’ e o número de parâmetros ‘m’.

3.5 DOP

DOP (*Dilution Of Precision* – Diluição De Precisão) é um termo usado para designar o efeito da geometria dos satélites visíveis na precisão da medição do receptor. A precisão de posicionamento é assumida como sendo igual ao produto da precisão da medição da distância satélite-receptor e o DOP:

$$\sigma_{POS} = DOP * \sigma_{DIST}. \quad (19)$$

Os valores de DOP são inversamente proporcionais ao volume do corpo sólido gerado pelos satélites e as coordenadas do ponto a determinar. O DOP é calculado no ajustamento das observações GNSS pelo MMQ a partir da MVC dos parâmetros no Posicionamento por Ponto (LANGLEY, 1999; MONICO, 2008), expandido para o sistema local (MARQUES, 2012; JEKELI, 2002; SEEGER, 2003). Dessa forma, quanto maior o volume, menor o DOP.

Em seguida, é apresentado os modelos matemáticos de alguns tipos de DOP, que são dados por (MONICO, 2008):

- GDOP (*Geometric DOP*, resultante 4D do PDOP e do TDOP):

$$GDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_{cdtr}^2} \quad (20)$$

- HDOP (*Horizontal DOP*, resultante 2D do EDOP e do NDOP):

$$HDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2} \quad (21)$$

- PDOP (*Positional DOP* – resultante 3D do HDOP e do VDOP): VDOP (Vertical DOP):

$$PDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2} \quad (22)$$

$$VDOP = \sigma_u \quad (23)$$

- TDOP (*Time DOP* – referente ao padrão de tempo, por exemplo, do relógio do receptor):

$$TDOP = \sigma_{cdt_r} \quad (24)$$

- EDOP (DOP na componente Leste);
- NDOP (DOP na componente Norte);
- RDOP (*Relative DOP* – DOP relativo), empregado no método de posicionamento relativo envolvendo dois ou mais receptores GNSS.

No caso de posicionamento multi-GNSS, por exemplo, são calculados os valores de DOP considerando que todos os satélites visíveis formam uma única constelação GNSS. No entanto, diferentes tipos de DOP são úteis no planejamento de levantamentos onde podem ocorrer obstruções de sinal, como em áreas urbanas, podendo ajudar a determinar o melhor momento para rastreamento por satélite.

3.6 Controle de Qualidade

O controle de qualidade visa determinar a qualidade do ajustamento. A partir disso, pode-se controlar a qualidade das observações com o modelo, detectando os erros grosseiros e adaptando ao modelo adotado. O controle de qualidade será fracionado em detecção, identificação e adaptação (DIA) (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001).

3.6.1 Detecção

Na detecção tem-se os prováveis erros nas observações, para solucionar esses erros aplica-se o teste Qui-Quadrado (GEMAEL, 1994). O teste Qui-Quadrado é calculado pela Equação 27, sendo a variância a priori e a variância a posteriori obtida do ajustamento com m observações e n parâmetros. O teste tem duas hipóteses: a nula e a alternativa.

$$H_0: E\{\sigma_0^2\} = \sigma_0^2 \quad (25)$$

$$H_1: E\{\sigma_0^2\} > \sigma_0^2 \quad (26)$$

Em H_0 estatisticamente, os fatores de variância a priori são iguais, já em H_1 a variância a posteriori é maior que a variância a priori. Com isso, compara-se o valor calculado:

$$T = X_C^2 = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2} (r) \quad (27)$$

sendo X^2_C os valores da distribuição Qui-Quadrado. Não será rejeitada a hipótese se:

$$T < X^2_{m-n,l-\alpha} \quad (28)$$

No caso de a hipótese nula ser rejeitada, afirma-se que existe algum problema no ajustamento, logo deve-se realizar a etapa de identificação.

3.6.2 Identificação

A identificação é utilizada para encontrar o princípio do erro na etapa anterior (detecção). Realiza-se a identificação com base no teste *Data Snooping*, a partir do cálculo das correções normalizadas (W) dadas por (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998):

$$W = \frac{C^T P C}{\sqrt{C^T P \Sigma_V P C}}, \quad (29)$$

em que:

- C – Vetor da redundância parcial (C é um vetor n -dimensional, contendo elementos unitários para observações testes e zero para outras posições);
- P - Matriz dos pesos;
- Σ_V - MVC dos resíduos;
- $C^T P C$ - Representa o resíduo transformado;
- $\sqrt{C^T P \Sigma_V P C}$ - O erro estimado.

Caso a MVC das observações tenha estrutura diagonal, a equação poderá ser representada por:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{vi}}, \quad (30)$$

sendo:

- w_i - Correção normalizada da i -ésima observação;
- v_i - Resíduo;
- σ_{vi} - Desvio padrão do respectivo resíduo (considerando a MVC dos resíduos sendo calculada com o fator de variância a priori).

Sabe-se que w_i tem como distribuição a raiz quadrada da distribuição F com graus de liberdade igual a um e infinito (1 e ∞), ou seja,

$$\sqrt{F_{\alpha}(1, \infty)} = N_{\frac{\alpha}{2}}(0,1) = \sqrt{\chi^2_{\alpha,1}} \quad (31)$$

$$w_i \sim N_{\frac{\alpha}{2}}(0,1) \quad (32)$$

Com isso, tem-se a hipótese básica, em que a observação i não contém erro, e a hipótese alternativa, que supõe o oposto:

$$H_0: \nabla_i = 0; \quad (33)$$

$$H_1: \nabla_i \neq 0 \quad (34)$$

A hipótese básica não é rejeitada a um nível de significância α_0 se:

$$-\sqrt{\chi_{\alpha,1}^2} < w_i < \sqrt{\chi_{\alpha,1}^2} \quad (35)$$

Porém se for rejeitada, a observação i contém erros, e com isso deve-se ajustar a mesma. Temos que o teste é realizado individualmente para cada observação, com isso mais de um resíduo pode ultrapassar os valores críticos, e por isso terá que ser excluída a observação que tem a maior estatística.

3.6.3 Adaptação

A maneira mais simples de realizar a adaptação é quando se elimina as observações que apresentaram erros, sendo assim, além da eliminação, deve-se realizar a repetição do ajustamento. Vale ressaltar que existem demais modos de adaptação (TEUNISSEN, 1985).

3.7 Erros Contidos no Posicionamento GNSS

No posicionamento GNSS, existem fontes de erros que podem degradar a qualidade da determinação da posição. Dentre estas fontes, pode citar os satélites (contendo os erros de órbita, relógio, relatividade, atraso de *hardware*, centro de fase da antena, fase *wind-up*), a propagação do sinal (refração troposférica, refração ionosférica, perda de ciclos, multicaminho, rotação da Terra), o receptor/antena (relógio, canais, centro de fase da antena, atraso de *hardware*, fase *wind-up*) e a própria estação (coordenadas, multicaminho, marés terrestres, movimento do polo, carga oceânica, pressão atmosférica) (MONICO, 2008). Os erros relacionados a estas fontes são denominados de sistemáticos, podendo ser minimizados e/ou modelados por técnicas matemáticas (SEEBER, 2003).

3.7.1 Atmosfera Neutra

A Atmosfera Neutra é composta principalmente por gases, incluindo vapor d'água, sua camada corresponde a mais próxima da superfície terrestre e com maior

concentração de gases, variando de 0 a 50 km de altura aproximadamente (SEEBER, 2003). Sua influência na propagação dos sinais GNSS modifica em função do ângulo de elevação do satélite e da densidade da atmosfera.

As diferenças nas concentrações dos gases e vapor d'água acabam gerando nos sinais diversos efeitos. Atualmente são conhecidos alguns deles, causados pela atmosfera neutra terrestre sobre sinais GPS: atenuação, cintilação e o atraso.

A atenuação atmosférica é a diminuição da potência da onda eletromagnética, exercida pelos elementos que constituem a atmosfera. A cintilação é uma oscilação na amplitude da onda eletromagnética, causada por irregularidades e variações bruscas no índice de refração. Já o atraso gera erros nas observações GNSS em escalas maiores, devendo ser tratado de uma maneira adequada (SEEBER, 2003).

Um dos modelos empíricos mais conhecidos da atmosfera neutra é o Hopfield, além deste tem-se também o modelo de Saastamoinen, o de Previsão Numérica do Tempo (PNT) e outros demais modelos (SEEBER, 2003). O atraso total causado pela atmosfera neutra pode ser dividido em duas partes, a componente úmida e seca (hidrostática). O atraso causado pela componente hidrostática pode ser estimado com maior precisão, uma vez que é bastante estável durante várias horas, variando em função da temperatura, altitude, latitude e pressão atmosférica. A componente úmida, por outro lado, é de mais difícil modelagem devido a sua rápida variação ao longo do tempo, o que dificulta sua estimativa, porém representa algo em torno de 10% a 20% do atraso total (GOUVEIA, 2019).

3.7.2 Ionosfera

A camada ionosférica varia de aproximadamente 50 a 1000 km de altitude, e sua influência no posicionamento GNSS depende da frequência do sinal emitido pelos satélites e é proporcional ao valor do TEC (MONICO, 2008).

O TEC (dado em elétrons/m²) se baseia no número de elétrons presentes na ionosfera entre um determinado satélite e o receptor. Ele é proporcional aos efeitos da camada ionosférica e pode causar a perda de sintonia entre o receptor e o satélite, a variação dos seus valores é baseada na atividade magnética, estação do ano, localização do globo, ionização solar e ciclos de manchas solares (CAMARGO, 1999).

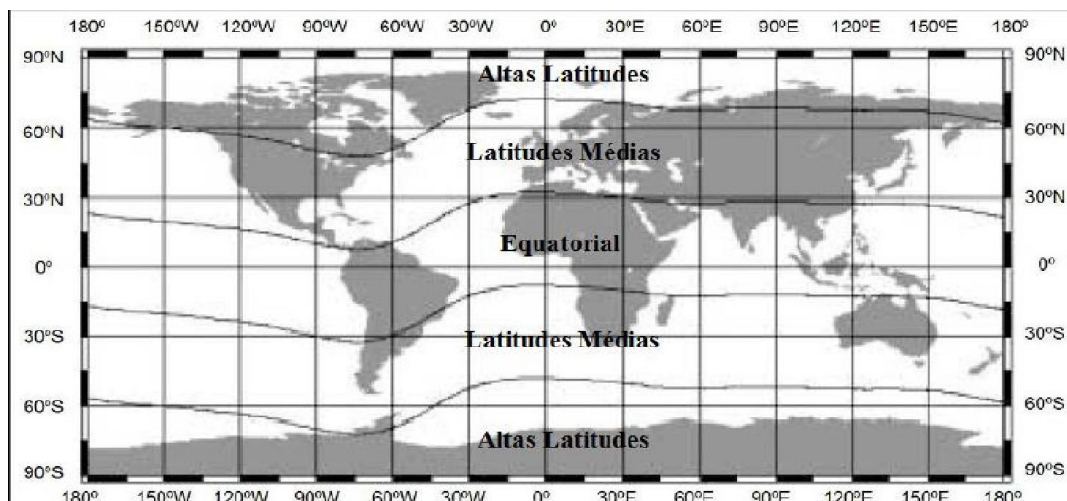
As variações temporais na camada ionosférica são divididas em variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos (MONICO, 2008). As variações diurnas ocorrem em relação a novas combinações de elétrons e íons em regiões da ionosfera. No decorrer do

dia, o comportamento da densidade de elétrons depende da hora local, atingindo valores máximos entre 12h e 16h local. Em relação às variações sazonais, está relacionado à mudança do ângulo zenital do sol e ao fluxo de ionização que alteram em relação às estações do ano e movimento aparente do sol em relação a Terra, resultando na variação da densidade de elétrons (WEBSTER, 1993).

Os ciclos de longos períodos, ou ciclos de manchas solares, ocorrem no intervalo de aproximadamente 11 anos (MONICO, 2008). Em relação às manchas solares, podem ter uma duração de dias a semanas, baseiam-se em regiões mais frias e escuras da superfície do sol contendo um elevado nível de radiação UV (ultravioleta), então com o aumento do número de manchas ocorre um aumento de radiação solar (BEARD, 1975 *apud* SETTI JÚNIOR, 2019).

Para a compreensão dos efeitos da ionosfera, é essencial verificar a localização no globo. A região equatorial é a área mais afetada pelo aumento da quantidade de elétrons, ocasionado pela Anomalia de Ionização Equatorial que ocorre nas latitudes de $\pm 15^\circ$, no entanto nas médias e altas latitudes o efeito menor é menos relevante (SEEBER, 2003). Na Figura 16 pode-se compreender melhor a disposição das regiões ionosféricas.

Figura 16 - Regiões Ionosféricas.



Fonte: MONICO, 2008.

Os efeitos ocasionados pela camada ionosférica podem ser minimizados no posicionamento GNSS, por meio de diferentes técnicas. Caso haja dados de receptores de dupla ou de multi-frequência, pode ser utilizada a combinação denominada livre de ionosfera (*Ion-Free*), que elimina os erros ionosféricos de primeira ordem (MONICO, 2008). Quando utilizado um receptor de simples frequência, pode-se utilizar modelos

como o de Klobuchar, NeQuick G e BDGIM (*BeiDou Global Ionospheric delay correction Model* – Modelo de correção do atraso ionosférico global do BeiDou), além dos mapas globais ou regionais da ionosfera (MONICO, 2008; WANG, 2021).

O modelo de Klobuchar é utilizado para correção do atraso ionosférico de primeira ordem, e é calculado na frequência L1 para um determinado ponto geomagnético e uma hora local. Segundo a literatura, este modelo pode remover cerca de 50 a 60% do erro ocasionado pela ionosfera no posicionamento (KLOBUCHAR, 1987). Embora o atraso seja estimado para a frequência L1, este pode ser convertido para as demais frequências GNSS a partir de (KLOBUCHAR, 1987):

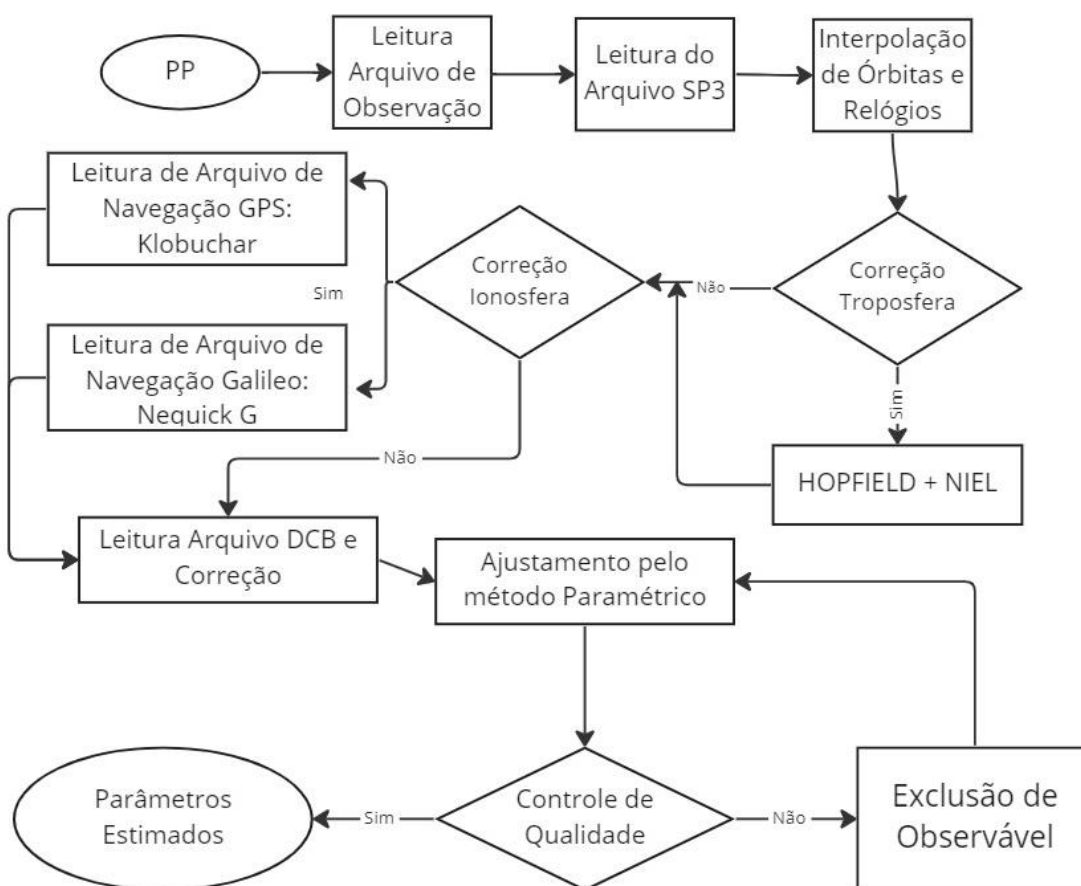
$$I_f = \left(\frac{f_{L1GPS}}{f} \right)^2 I_{L1GPS} \quad (36)$$

em que I_f representa o atraso ionosférico para determinada frequência f , f_{L1GPS} é a frequência L1 GPS e I_{L1GPS} é o atraso estimado para a frequência L1.

4. METODOLOGIA

Para a execução deste trabalho foi utilizado um software científico em desenvolvimento na FCT/UNESP implementado em C++ capaz de realizar o Posicionamento por Ponto em diferentes frequências e constelações (SETTI JÚNIOR, 2019). Na Figura 17 visualiza-se o fluxograma de execução do software utilizado e suas principais possibilidades de processamento.

Figura 17 - Fluxograma de execução do software utilizado.



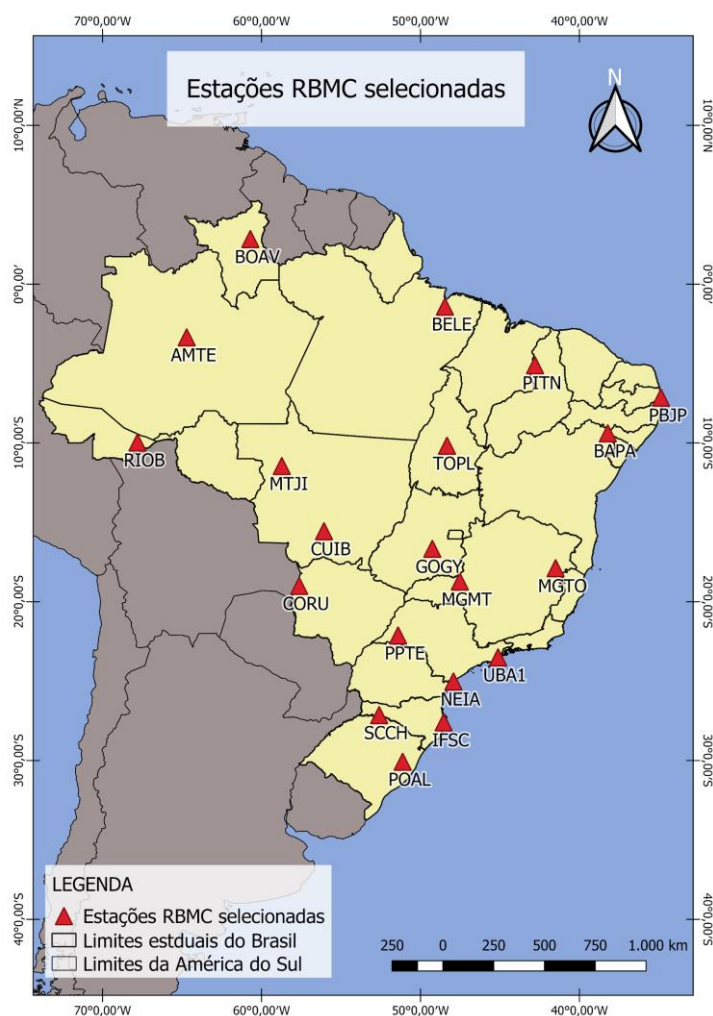
Fonte: SETTI JÚNIOR, 2019.

Para os dados de entrada, foram utilizados arquivos de observação de cada estação GNSS no formato RINEX (*Receiver-Independent Exchange Format*), na versão 3, que contêm as informações de pseudodistância nos sistemas e frequências disponíveis, obtidos no banco de dados do IBGE. Cada arquivo RINEX contém 24 horas de observações, com intervalo amostral de 15 segundos, das 00:00 às 23:59:45 UTC.

Também foram utilizados os arquivos de efemérides precisas GNSS, a fim de calcular as coordenadas e erro do relógio dos satélites, processadas e disponibilizadas pelo IAC (*Information and Analysis Center*), centro associado ao MGEX, no formato SP3 (*Standard Product 3*), localizado em <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/mgex/> (2022). Para a obtenção dos parâmetros do Klobuchar, foram utilizadas as efemérides transmitidas do IGS (*International GNSS Service*), localizado em <https://igs.org/products/> (2022). Os arquivos DCBs (*Differential Code Biases*) utilizados, valores diários, foram disponibilizados pelo IGG (*Institute of Geodesy and Geophysics*) da CAS (*Chinese Academy of Sciences*) associado ao MGEX, em <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/bias/> (2022).

Para os experimentos foram utilizados dados de 20 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS) distribuídas pelo território brasileiro (Figura 18 e Tabela 10), cujas coordenadas estão referenciadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). Equipadas com receptores multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou) e fornecendo dados completos e incompletos (não contêm observações de BeiDou B2A) no formato RINEX 3. Os dados foram processados de modo que os resultados serão analisados de forma independente e combinada (GPS+Galileo e GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS). Os meses de março e junho de 2022 foram escolhidos por serem períodos de alta e baixa atividade ionosférica, respectivamente.

Figura 18 - Distribuição das estações selecionadas.



Fonte: Os autores, 2022.

Tabela 10 - Localização das estações selecionadas.

Id. Da Estação	Nome da Estação	UF	Latitude	Longitude	Alt. Elip
AMTE	Tefé	AM	- 03° 20' 44,48531"	- 64° 42' 23,94032"	45,786 m
BAPA	Paulo Afonso	BA	- 09° 23' 24,52881"	- 38° 12' 55,66334"	245,104 m
BELE	Belém	PA	- 01° 24' 31,66368"	- 48° 27' 45,17859"	9,077 m
BOAV	Boa Vista	RR	+ 02° 50' 42,65645"	- 60° 42' 4,01375"	69,478 m
CORU	Corumbá - UFMS	MS	- 19° 00' 1,01308"	- 57° 37' 46,61301"	156,591 m
CUIB	Cuiabá	MT	- 15° 33' 18,94678"	- 56° 04' 11,51958"	237,444 m
GOGY	Goiânia	GO	- 16° 39' 53,02249"	- 49° 15' 16,82295"	734,201 m

IFSC	Florianópolis - IFSC	SC	- 27° 35' 39,95974"	- 48° 32' 31,50019"	26,473 m
MGMT	Monte Carmelo	MG	- 18° 43' 26,77271"	- 47° 31' 25,66202"	912,469 m
MGTO	Teófilo Otoni	MG	- 17° 53' 2,38740"	- 41° 29' 54,51485"	390,566 m
MTJI	Juína IFMT	MT	- 11° 26' 55,48101"	- 58° 43' 24,90455"	328,242 m
NEIA	Cananéia	SP	- 25° 01' 12,86150"	- 47° 55' 29,88667"	6,055 m
PBJP	João Pessoa	PB	- 07° 08' 10,60120"	- 34° 52' 24,32631"	49,070 m
PITN	Teresina	PI	- 05° 06' 8,93362"	- 42° 47' 34,90519"	67,971 m
POAL	Porto Alegre	RS	- 30° 04' 26,55276"	- 51° 07' 11,15324"	76,745 m
PPTE	Presidente Prudente	SP	- 22° 07' 11,65707"	- 51° 24' 30,72249"	431,049 m
RIOB	Rio Branco	AC	- 09° 57' 55,65256"	- 67° 48' 10,12187"	172,625 m
SCCH	Chapecó	SC	- 27° 08' 15,23669"	- 52° 35' 58,22430"	744,245 m
TOPL	Palmas	TO	- 10° 10' 15,79274"	- 48° 19' 50,44474"	256,554 m
UBA1	Ubatuba (Marégrafo)	SP	- 23° 30' 0,63702"	- 45° 07' 8,04537"	6,216 m

Fonte: Os autores, 2022.

A observável utilizada foi a pseudodistância na frequência L1 GPS (1575,42 MHz), L1 GLONASS (1597~1617 MHz), E1 Galileo (1575,42 MHz) e B1 BeiDou (1561,098 MHz). Foi empregado o modelo de Hopfield para a correção dos efeitos da atmosfera neutra no posicionamento e o modelo de Klobuchar para a minimização dos efeitos ionosféricos. Adotou-se uma máscara de elevação de 10° e PDOP limitado a 6.

Foram realizados experimentos a fim de avaliar os resultados obtidos no posicionamento via combinações de sistemas e de forma autônoma, a partir da acurácia posicional. Além disso, realizou-se uma verificação do impacto dos efeitos sistemáticos no Posicionamento por Ponto, bem como a influência da localidade das estações, do multicaminho, das cintilações e do número de satélites rastreados.

A acurácia posicional é calculada através do RMS3D (*Root Mean Square error 3D* – Raíz do Erro Quadrático Médio Tridimensional), obtida a partir da discrepância tridimensional (Er_{3D}) e o desvio padrão tridimensional (Σ_{3D}).

$$Er_{3D} = \sqrt{(E_{est} - E_{RBMC})^2 + (N_{est} - N_{RBMC})^2 + (U_{est} - U_{RBMC})^2} \quad (37)$$

$$\Sigma_{3D} = \sqrt{(\sigma_E)^2 + (\sigma_N)^2 + (\sigma_U)^2} \quad (38)$$

$$RMS3D = \sqrt{Er_{3D}^2 + \Sigma_{3D}^2} \quad (39)$$

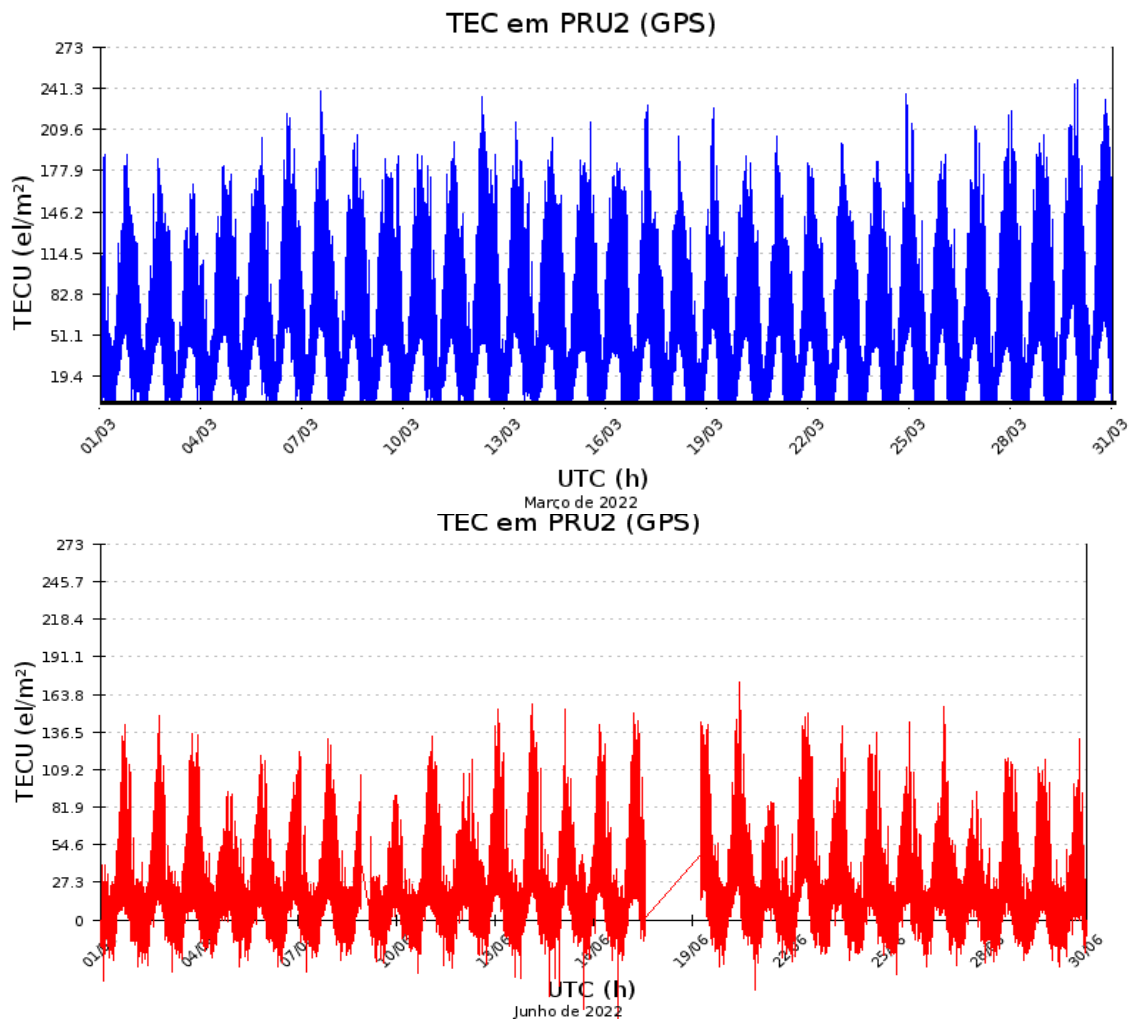
sendo E_{est} , N_{est} e U_{est} as coordenadas E, N e U estimadas no ajustamento de observações, e E_{RBMC} , N_{RBMC} e U_{RBMC} as coordenadas tomadas como verdadeiras disponibilizadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), coordenadas SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geodésico das Américas – época 2000,4). Estas coordenadas foram atualizadas para a época do experimento, e σ_E , σ_N e σ_U são os desvios padrão das componentes E, N e U obtidos a partir do ajustamento.

O primeiro experimento consistiu em um estudo de caso, no qual avaliou-se uma estação, contendo um maior detalhamento dos resultados, servindo como justificativa para os resultados gerais do segundo experimento.

4.1 Experimento I

Neste experimento foi realizado o processamento de dados para a estação PPTE, localizada na cidade de Presidente Prudente – SP, no software científico descrito, analisando os resultados do posicionamento obtidos. O processamento dos dados no PP foi realizado para o mês de março de 2022. Na Figura 19 são apresentados os valores de TEC (*Total Electron Content*) para os meses de março e junho de 2022, meses de estudo neste projeto, de uma estação localizada também em Presidente Prudente (a cerca de 280 m de distância de PPTE), nomeada de PRU2 e pertencente à rede INCT GNSS-NavAer (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea). Vale ressaltar que a unidade de medida é a TECU (*Total Electron Content Unit*), número de elétrons por metro quadrado, e o sistema selecionado para análise foi o GPS.

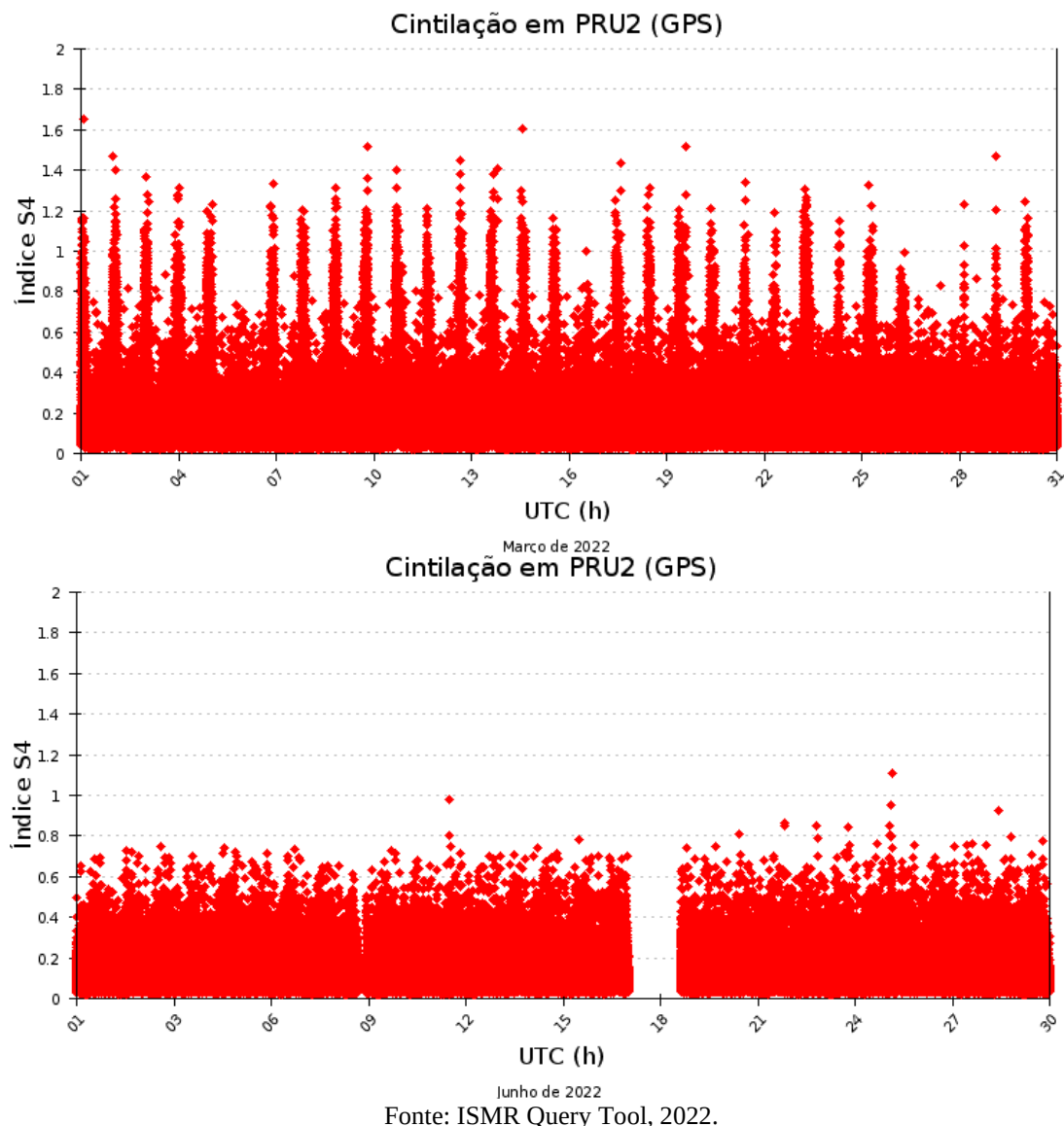
Figura 19 - TEC (GPS) obtido pela estação PRU2 nos meses de março e junho de 22.



Fonte: ISMR Query Tool, 2022.

Observa-se que o TEC para o mês de junho não ultrapassa a marca de 190 TECU (30,4 metros de erro na distância em portadora L1 GPS), em que 1 TECU equivale a 10^{16} elétrons/m² e a 16 centímetros de erro na distância em portadora L1 GPS (KLOBUCHAR, 1996), demonstrando que a densidade de elétrons presente na camada ionosférica no mês de março é mais elevada, contendo um pico superior a 241 TECU (38,6 metros de erro na distância em portadora L1 GPS). Identifica-se também a presença de valores negativos de TEC, que ocorrem devido problemas na calibração do DCB do receptor na estação utilizada. Para a mesma estação, analisa-se também a cintilação ionosférica, por meio do índice S4 obtido para o sistema GPS com uma máscara de elevação de 10°, com a finalidade de analisar a perturbação na densidade dos elétrons, afetando a fase e amplitude dos sinais (Figura 20).

Figura 20 - Índice S4 obtido na estação PRU2 para o multi-GNSS nos dias de março e junho de 2022.



Fonte: ISMR Query Tool, 2022.

Observa-se que os maiores valores de S4 ocorrem no mês de março de 2022, muito por conta de este ser um mês de alta atividade ionosférica. De acordo com TIWARI et al. (2011), o limiar para considerar alto S4 é acima de 1, considerando moderado entre 0,5 e 1 e baixo quando for menor que 0,5. Para o mês de junho, os valores de S4 estão, em sua maioria, menores que 1, representando uma perturbação moderada na densidade de elétrons, assim afetando menos o sinal em relação ao mês de março.

4.2 Experimento II

Semelhante ao que foi realizado no experimento anterior, foi avaliado em âmbito nacional, utilizando 20 estações da rede RBMC (conforme apresentado na Tabela 10), o comportamento dos diferentes sistemas no PP autônomo e combinado, além de realizar

uma correlação entre o multicaminho e a acurácia posicional. Ao observar o percentil 99,7% obtido no sigma a posteriori dos diferentes sistemas (GPS - 0,27 m; Galileo - 0,34 m; GLONASS - 0,42 m e BeiDou - 0,56 m), obtido no Experimento I (detalhados na subseção 5.1.3), constatou-se que os menores valores foram obtidos para GPS e Galileo (adotando-se ponderação integral) e os maiores encontram-se em GLONASS e BeiDou (foi utilizado metade do peso). O processamento foi realizado para os meses de março e junho. É importante ressaltar o efeito sistemático obtido em estações localizadas próximas à linha do equador magnético (apresentado na seção 3.7), como demonstra-se na Figura 21.

Figura 21 - Localização do equador magnético.



Fonte: Os autores, 2022.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos em ambos os experimentos realizados neste trabalho, subdividido em duas seções.

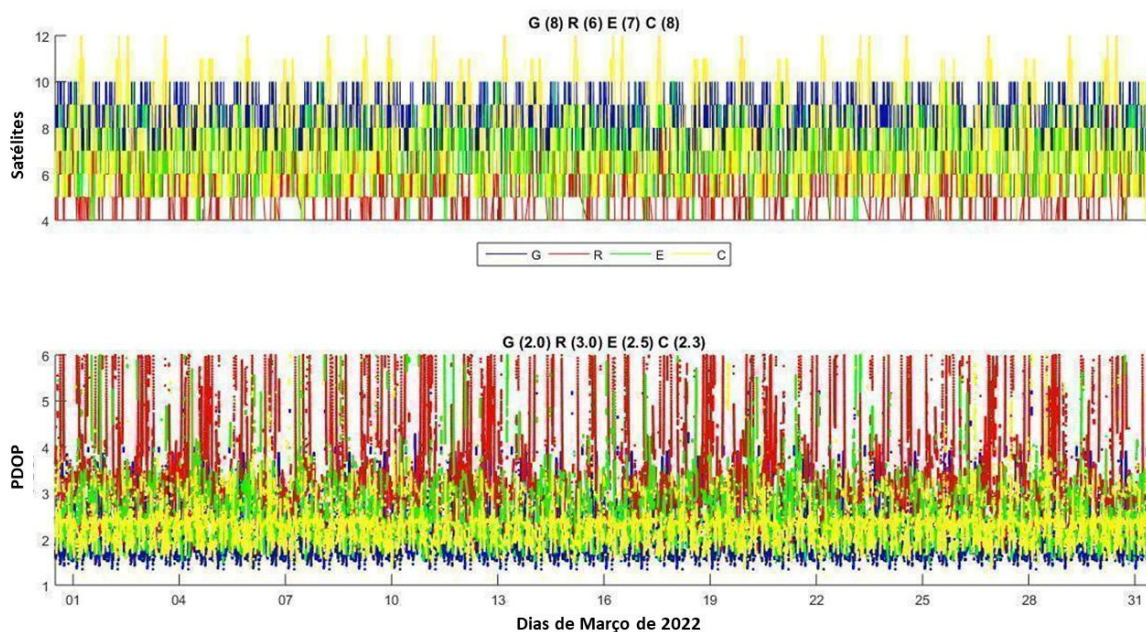
5.1 Experimento I

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no primeiro experimento. Este tópico será dividido em 3 partes: na primeira serão apresentados os resultados do PP autônomo e combinado para o mês de março; na segunda os resultados do PP autônomo apenas para o dia 11 de março (dia de alta cintilação no mês de março); por fim o processamento multi-GNSS para o mesmo dia citado.

5.1.1 Período de alta atividade ionosférica (Março/2022)

Conforme apresentado nas Figuras 19 e 20, o mês de março demonstrou resultados elevados na concentração de elétrons com ocorrência de cintilação. Considerando o período analisado, a Figura 22 apresenta o número de satélites por época nos 31 dias de coleta, bem como o PDOP obtido.

Figura 22 - Número de satélites e PDOP obtidos no PP autônomo para PPTe no mês de março.



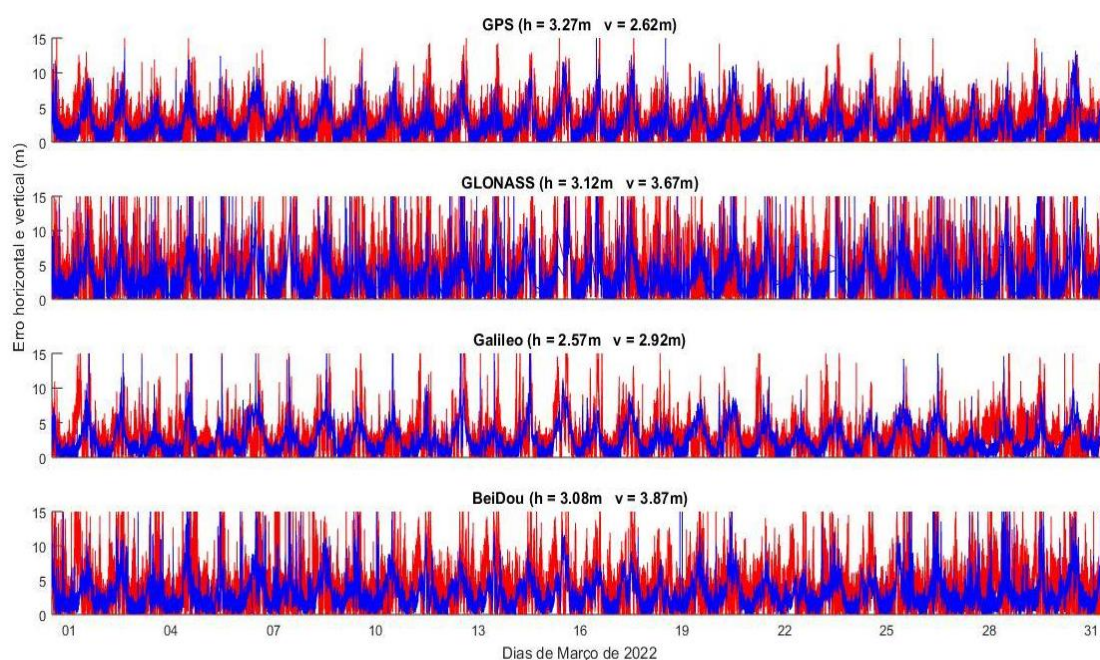
Fonte: Os Autores, 2022.

Pode-se observar na Figura 22 que as constelações GPS e BeiDou contam com um maior número de satélites, com média de 8 satélites por época, sendo que o sistema

chinês apresentou um número máximo de 12 e um mínimo de 5 satélites rastreados. O GPS apresenta-se mais regular, com um máximo de 10 e um mínimo de 7 satélites. Os sistemas Galileo e GLONASS apresentaram uma média de 6 e 5 satélites por época, respectivamente. Em algumas épocas, devido à máscara de elevação de 10° e por ainda não se apresentar como operacional, o Galileo apresentou um número abaixo de 4 satélites. Esse fato pode ser justificado pela exclusão da observação pelo método DIA, ou a ausência do rastreio, assim não apresentando redundância, muito menos o número mínimo de observações para a estimativa da posição, excluindo a referida época. Isso também ocorre no GLONASS, porém outro efeito que afeta na exclusão de épocas no PP pelo sistema é o valor elevado de PDOP, que em muitas das vezes ultrapassou o limite de 6 (24% das épocas), obtendo a maior média entre os sistemas (3). O PDOP do GPS é o que apresenta melhores resultados, com a menor média entre os sistemas (2), seguido pelo BeiDou (2,3), devido ao lançamento em massa de novos satélites, e Galileo (2,5).

Realizado o processamento do PP autônomo e a estimativa da posição por época chegou-se aos resultados dos erros (discrepância obtida entre as coordenadas estimadas e as coordenadas de referência - coordenadas SIRGAS atualizadas para a época de rastreio dos dados) obtidos nas componentes horizontal (h) e vertical (v) para cada sistema, ao qual demonstra-se a média dos resultados logo acima de cada gráfico, como na Figura 23.

Figura 23 - Discrepância horizontal (azul) e vertical (vermelho) obtida no PP autônomo, para março.

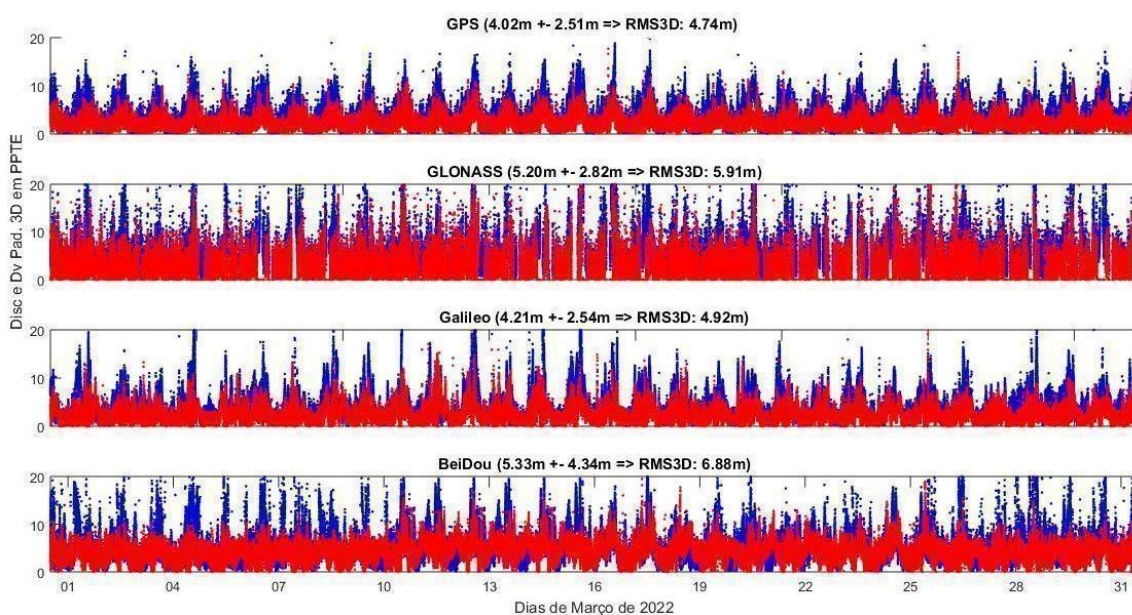


Fonte: Os Autores, 2022.

Na Figura 23 pode-se observar que o sistema que apresentou a maior discrepância horizontal foi o GPS, com uma média de 3,27 m, seguido pelo GLONASS com 3,12 m de erro. Ao analisar o erro vertical, observa-se que o sistema BeiDou apresentou o pior resultado entre os demais, com cerca de 3,87 m de erro médio, sendo um erro 48%, 6% e 26% maior em relação à discrepância vertical obtida nos sistemas GPS, GLONASS e Galileo, respectivamente.

Assim, pode-se concluir que para as discrepâncias, os melhores resultados foram obtidos pelos sistemas GPS e Galileo, nos componentes vertical e horizontal, respectivamente. Outro fator a ser analisado para a obtenção da acurácia é o desvio padrão. Assim, apresenta-se na Figura 24 um gráfico da discrepância e desvio padrão tridimensional obtidos em cada época.

Figura 24 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D obtidos no PP autônomo em março de 2022.



Fonte: Os Autores, 2022.

Conforme apresentado na Figura 24 o GPS foi o sistema que obteve a melhor acurácia tridimensional entre os sistemas, obtendo uma discrepância 3D média de 4,02 m e um desvio padrão 3D médio de 2,51 m, assim resultando em um RMS3D de 4,74 m. A Tabela 11 apresenta a porcentagem de melhoria do sistema GPS comparado aos demais.

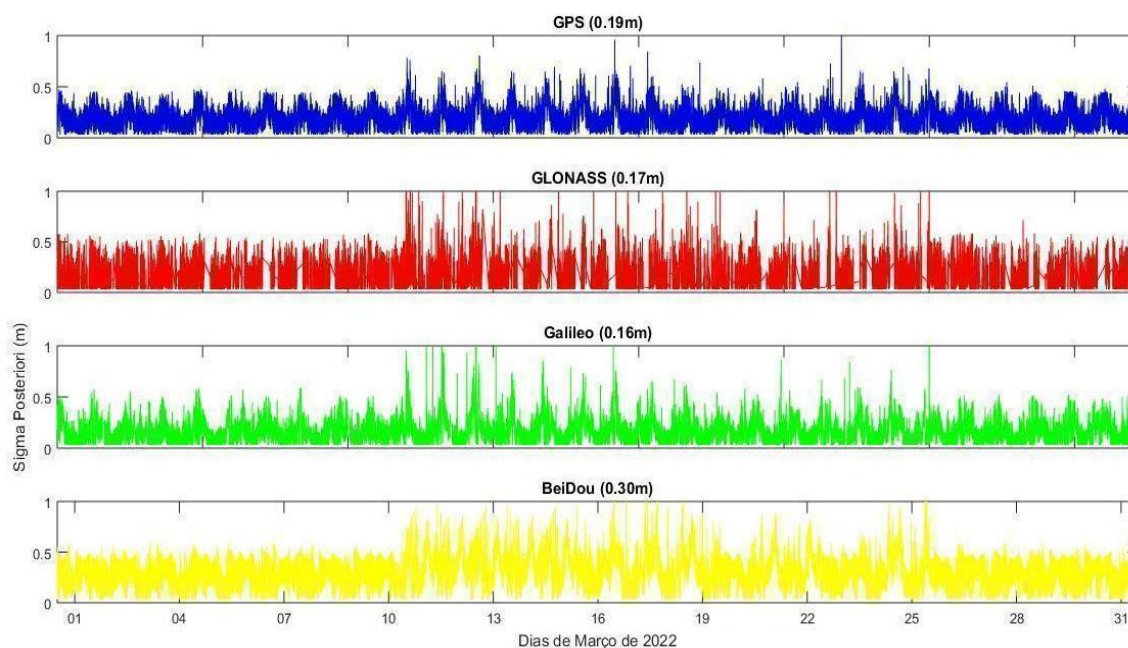
Tabela 11 - Porcentagem de melhoria do sistema GPS em relação aos demais no PP autônomo, para o mês de março.

GPS	Discrepância	Desvio Padrão	RMS3D
GLONASS	29%	12%	25%
Galileo	5%	1%	4%
BeiDou	33%	73%	45%

Fonte: Os Autores, 2022.

Observa-se que o desvio padrão tridimensional do sistema BeiDou apresenta-se elevado, sendo o pior entre os demais sistemas, afetando a acurácia posicional. Esse número elevado também é apresentado no desvio padrão a posteriori, como pode-se observar na Figura 25. O desvio padrão que mais se aproxima ao do GPS é o do sistema europeu Galileo, sendo apenas 1% maior. Muitas épocas do GLONASS apresentaram o desvio padrão como nulo, por não obter redundância nas observações.

Figura 25 - Sigma a posteriori obtido no PP autônomo em março, na estação PPTE.



Fonte: Os Autores, 2022.

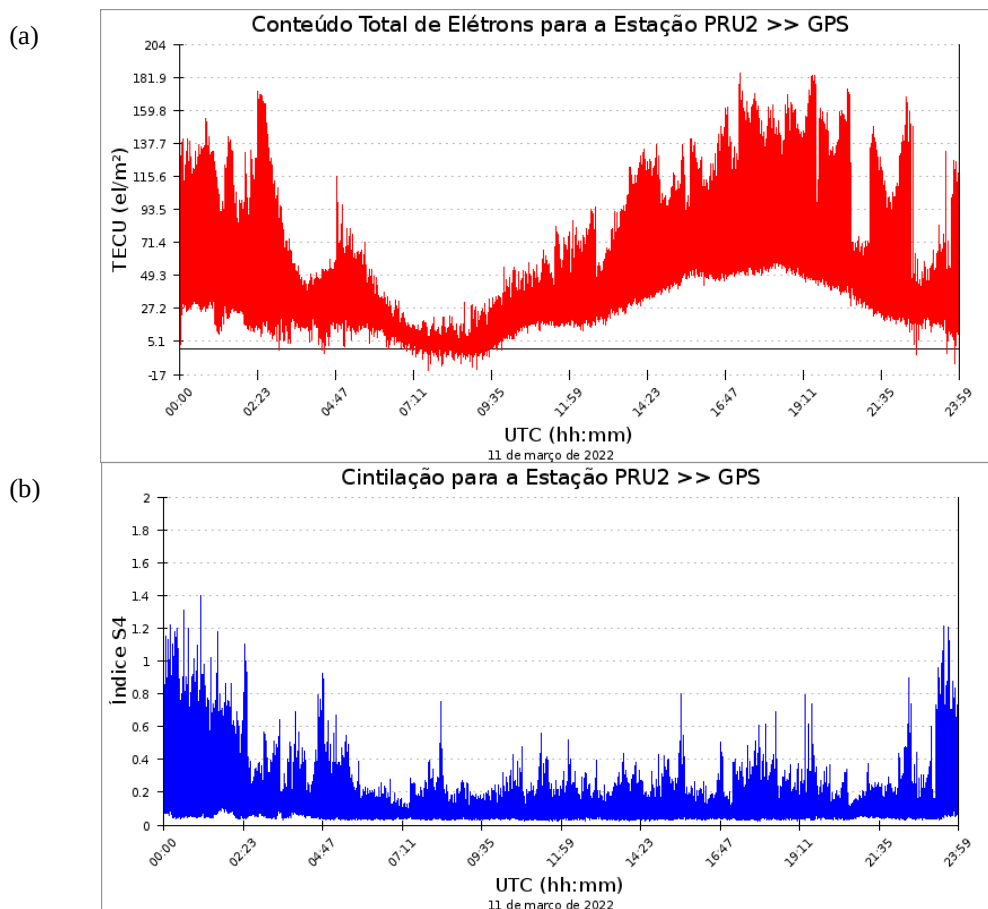
A Figura 25 mostra uma variação nos valores de sigma a posteriori a partir do dia 10 de março, isso pode ter ocorrido devido às altas cintilações obtidas no período e grande concentração de elétrons na ionosfera (Figuras 19 e 20). Observa-se também que o sistema Galileo apresentou o menor valor de sigma a posteriori, seguido pelo GLONASS cujas piores épocas são excluídas devido ao elevado PDOP, assim mantendo um resultado médio baixo. Ao comparar com a análise da acurácia obtida no PP autônomo, pode-se

concluir que GPS e Galileo obtiveram os melhores resultados. Realiza-se então a análise para o dia 11 de março de 2022, um dia com elevado TEC e S4.

5.1.2 Análise do PP Autônomo para o dia 11 de março

As Figuras 26.a e 26.b apresentam o TEC e a cintilação ionosférica, respectivamente na estação PRU2, para realizar a análise da alta atividade ionosférica.

Figura 26 - Atividade ionosférica em PRU2 para o dia 11 de março de 2022: (a) TEC; (b) Cintilação.

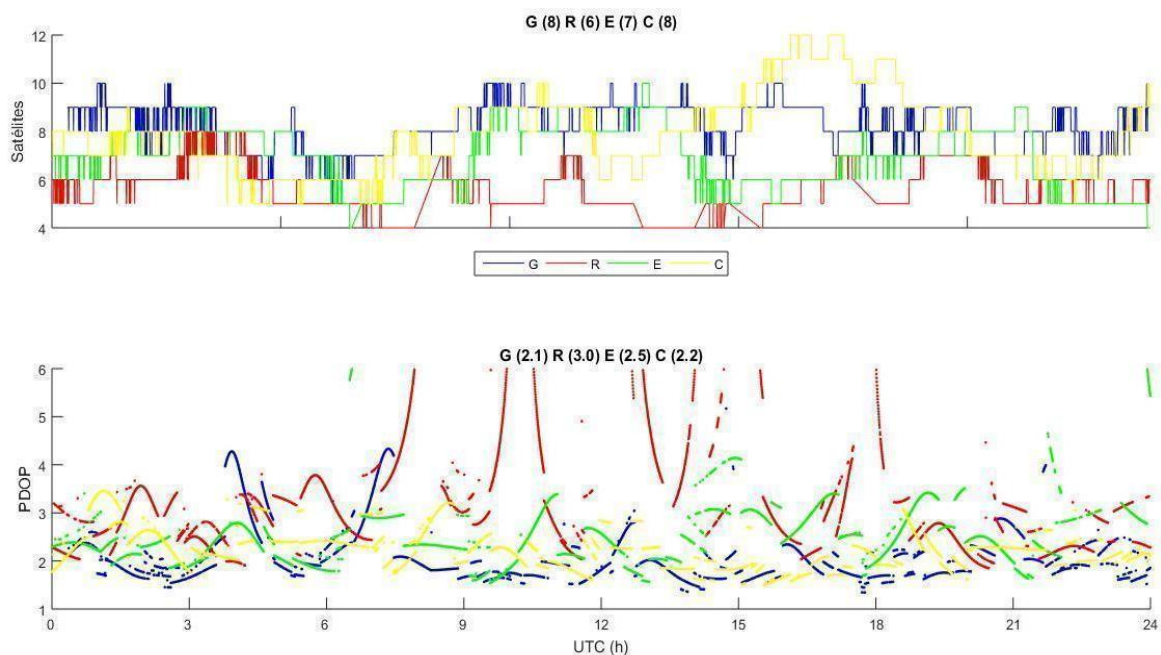


Fonte: ISMR Query Tool, 2022.

Observa-se uma alta concentração de elétrons no período a partir das 15 horas (meio-dia no horário local), diminuindo apenas com o pôr do sol (18 horas no horário local, 21 horas UTC). Já em relação ao índice S4, ocorre um pico após o pôr do sol, reduzindo apenas na meia noite do horário local. Pode-se considerar um período de alta cintilação pois em parte das épocas o índice S4 apresentou-se superior a 1. O período com a menor densidade de elétrons na ionosfera foi das 6 às 12 horas UTC, contendo um valor baixo de TEC, bem como reduzido índice S4. Observa-se também que neste mesmo

período, houve resultados negativos de TEC, o que ocorre quando os DCBs não são precisamente calibrados. Apresenta-se na Figura 27 o número de satélites e PDOP obtidos em cada época no PP autônomo.

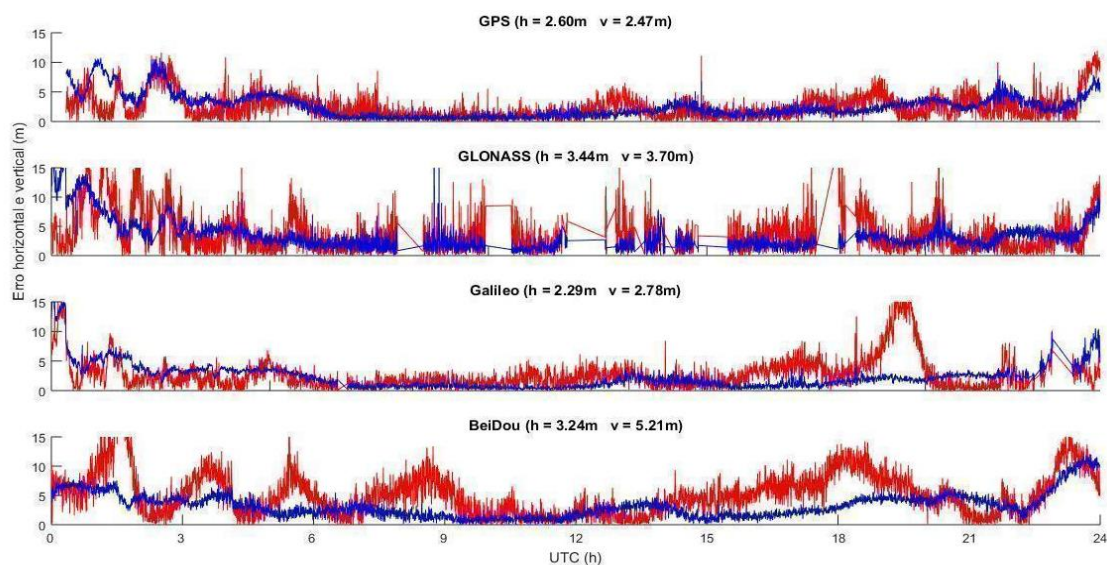
Figura 27 - Número de satélites e PDOP para o dia 11/03/2022 em PPTE.



Fonte: Os Autores, 2022.

Pode-se observar que os resultados desse dia em particular condizem com os resultados obtidos para a média dos 31 dias de março. Nota-se também o elevado PDOP do sistema GLONASS, excluindo várias épocas no posicionamento por ser superior a 6. GPS e BeiDou continuaram a ser os sistemas com maior média de satélites por época (8). A Figura 28 apresenta os resultados dos erros nas componentes horizontal e vertical obtidos no PP autônomo.

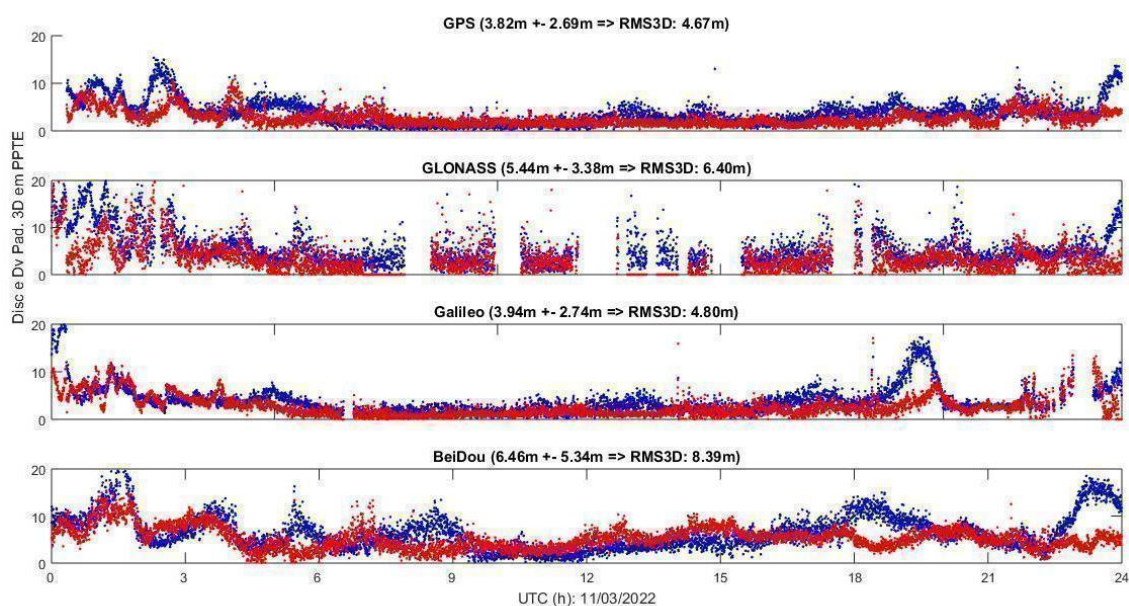
Figura 28 - Discrepância horizontal (azul) e vertical (vermelho) obtida no PP autônomo, para o dia 11/03/2022.



Fonte: Os Autores, 2022.

Observa-se novamente um resultado condizente com o obtido para o mês inteiro, sendo o sistema Galileo aquele que conteve os menores valores na discrepância horizontal e o sistema GPS sendo melhor na vertical. Nota-se também um aumento nas discrepâncias em épocas de elevada concentração de elétrons e cintilação ionosférica. Realizou-se também um estudo da discrepância e desvio padrão tridimensional, bem como acurácia posicional no PP autônomo para o referido dia (Figura 29).

Figura 29 - Discrepância (azul) e desvio padrão (vermelho) 3D obtidos no PP autônomo no dia 11/03/2022.



Fonte: Os Autores, 2022.

Observa-se na Figura 29 a elevada discrepância tridimensional obtida no período de alta cintilação (21 às 24 e 0 às 3 horas UTC). Há de se observar o elevado número de exclusão de épocas no sistema GLONASS, devido ao elevado PDOP. O sistema GPS continua a apresentar os melhores resultados e o BeiDou, os piores (destacando-se o elevado desvio padrão obtido), assim, na Tabela 12 demonstra-se a porcentagem de melhoria do GPS em relação aos demais sistemas.

Tabela 12 - Porcentagem de melhoria do sistema GPS em relação aos demais no PP autônomo, para o dia 11/03/2022 em PPTE.

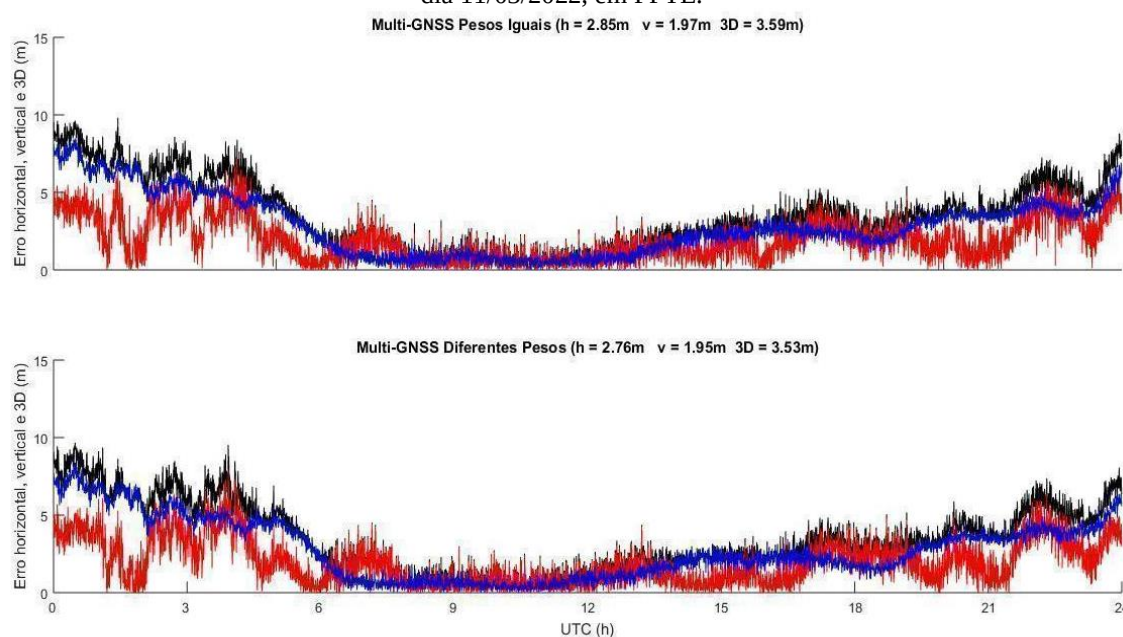
GPS	Discrepância	Desvio Padrão	RMS3D
GLONASS	42%	26%	37%
Galileo	3%	2%	3%
BeiDou	69%	99%	80%

Fonte: Os Autores, 2022.

5.1.3 Experimento do multi-GNSS

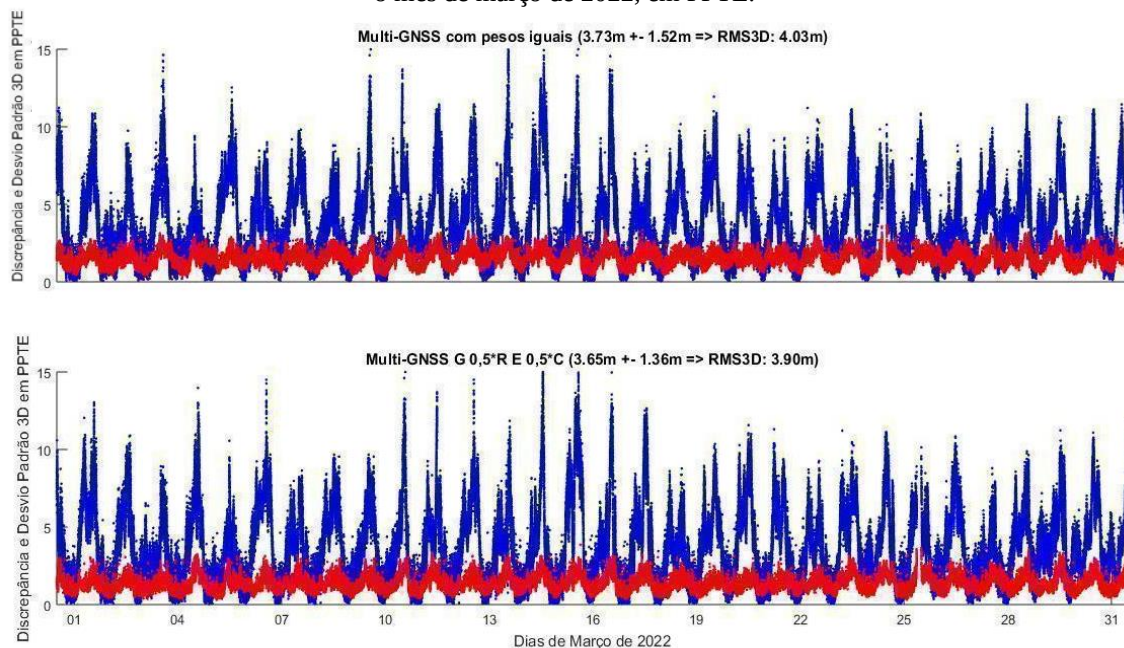
Como no processamento autônomo os sistemas GPS e Galileo obtiveram os melhores resultados, foi realizado o PP combinado multi-GNSS com mesma ponderação para todos os sistemas e ponderações diferentes, adotando metade do peso para observações advindas dos sistemas GLONASS e BeiDou e mantendo o peso para GPS e Galileo, assim observa-se os resultados do RMS horizontal, vertical e tridimensional obtidos para o dia 11 de março (Figura 30) e para o mês de março (Figura 31) de 2022.

Figura 30 - Erro horizontal (azul), vertical (vermelho) e tridimensional (preto) do PP multi-GNSS para o dia 11/03/2022, em PPTE.



Fonte: Os Autores, 2022.

Figura 31 – Erro tridimensional (azul) e desvio padrão tridimensional (vermelho) do PP multi-GNSS para o mês de março de 2022, em PPTE.



Fonte: Os Autores, 2022.

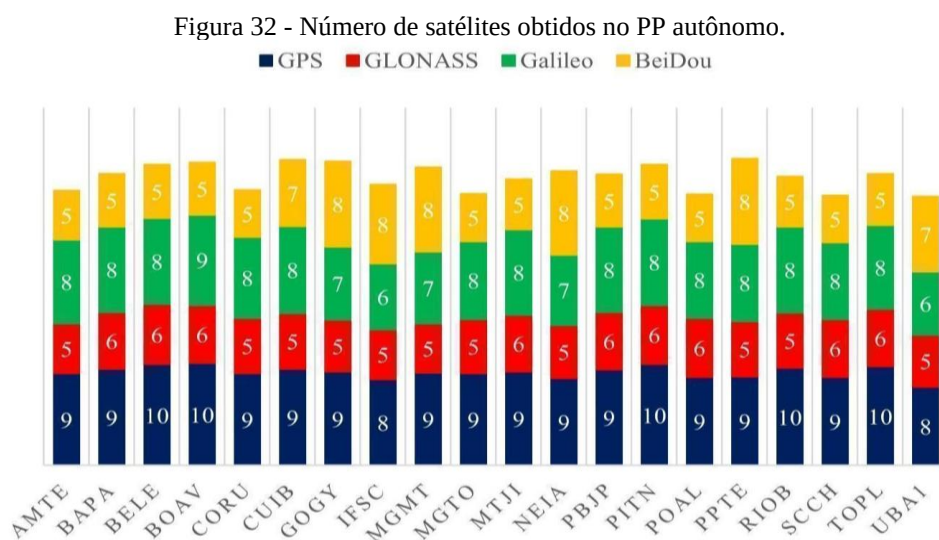
Observa-se que ao utilizar diferentes ponderações entre os sistemas que constituem o GNSS, a acurácia obtida no PP multi-GNSS resulta em uma melhoria decimétrica, de 13 cm. Como demonstrado na Figura 30, o desvio padrão tridimensional obtém uma melhoria de 16 cm, o que é significativo em termos de precisão. Na Figura 31 é possível constatar uma melhoria de até 6 cm na acurácia tridimensional, sendo que de acordo com a Figura 30 a componente que apresentou a maior melhoria foi a horizontal, com 9 cm a menos de erro médio.

5.2 Resultados do Experimento II

A presente seção é subdividida em quatro partes. No primeiro tópico, apresenta-se os resultados obtidos no PP autônomo. Em seguida é mostrado os dados de acurácia obtidos no PP combinado multi-GNSS, bem como o índice de multicaminho MP_1^{GPS} obtido em cada estação. Após isso, compara-se a acurácia obtida no PP autônomo GPS com o combinado multi-GNSS e GPS + Galileo (G + E). Por fim, realiza-se uma média dos resultados obtidos nas 20 estações.

5.2.1 Resultados Obtidos no PP Autônomo

Primeiramente é apresentado o número médio de satélites obtidos nos 2 meses de coleta, demonstrando a diferença entre a quantidade de satélites rastreados em cada estação, conforme a Figura 32.

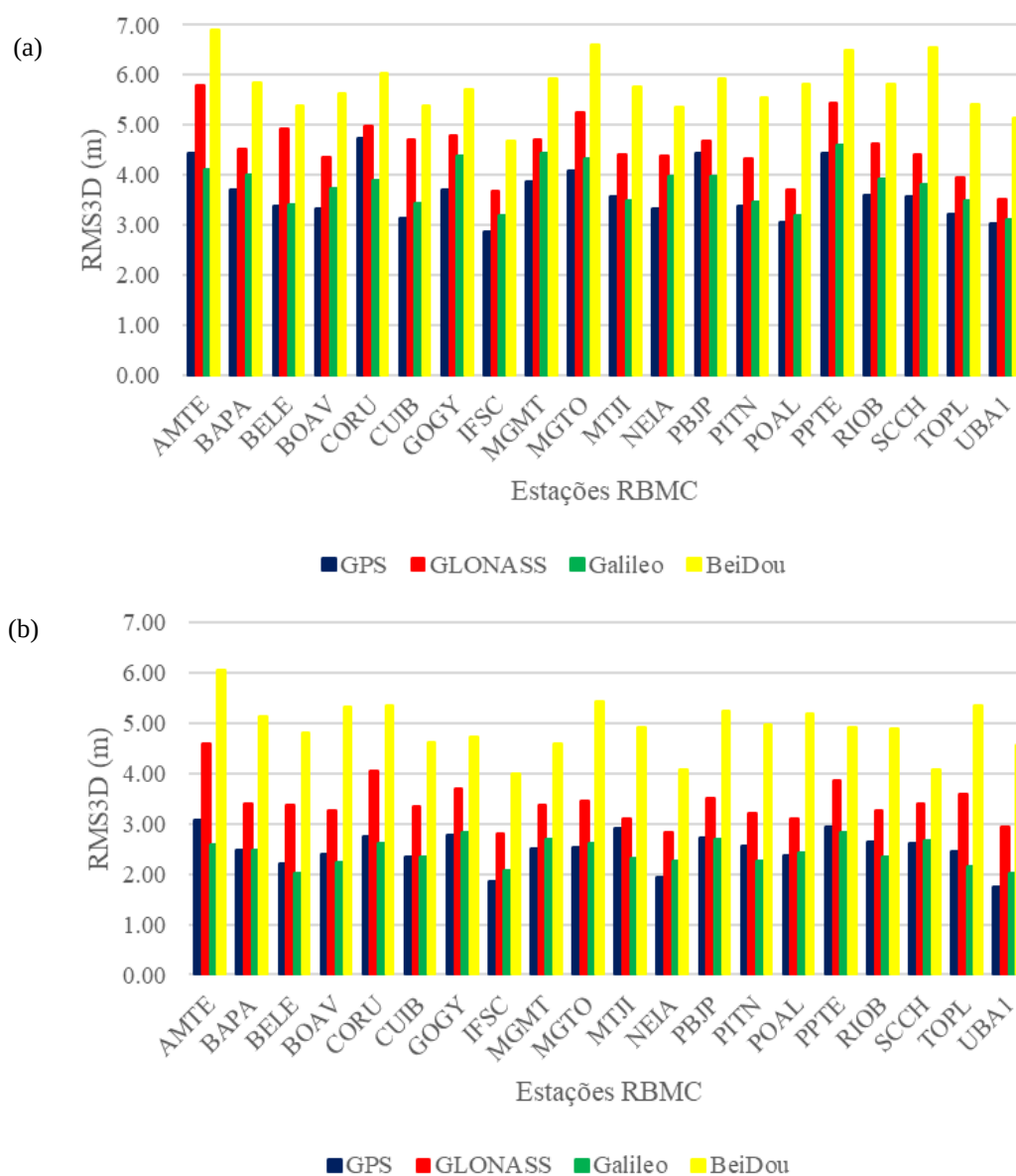


Fonte: Os Autores, 2022.

Observa-se na Figura 32 que em algumas estações foram rastreados cerca de 7 a 8 satélites BeiDou por época, enquanto para outras foi obtido uma média de 5. Isso ocorre devido a alguns receptores não rastrearem observáveis de satélites pertencentes à geração B2A, assim contendo um número máximo de PRNs disponíveis menor do que o número de satélites operacionais. Constata-se que há um maior rastreo de satélites GPS (9), seguido por Galileo (8), BeiDou (7) e GLONASS (5), respectivamente, ao fazer uma média das 20 estações.

A Figura 33 apresenta uma média dos resultados de posicionamento obtidos para junho e março. Em cada mês de coleta é possível observar uma mudança significativa (na ordem de décimetros) na acurácia posicional, quando comparado a cada estação e em cada mês.

Figura 33 - RMS3D obtido no PP autônomo nas 20 estações analisadas para os meses de (a) março e (b) junho.



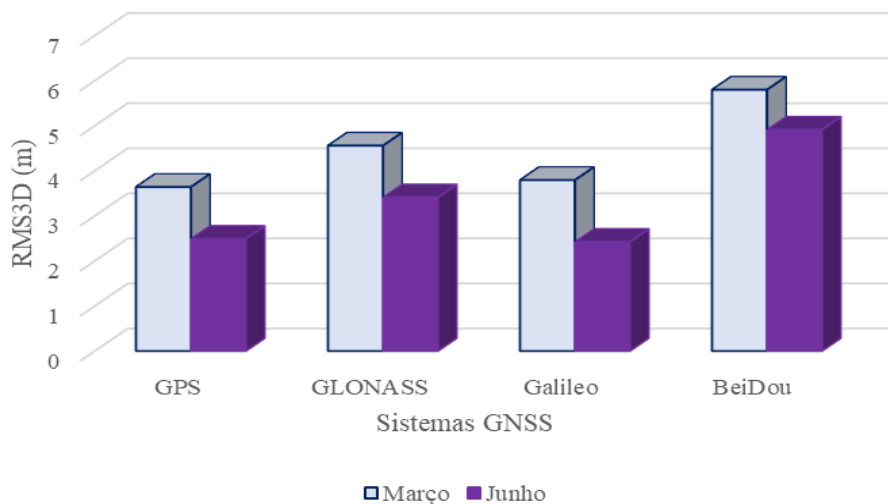
Fonte: Os Autores, 2022.

Conforme a Figura 33.a, para o mês de alta atividade ionosférica (março), o GPS na maioria das estações apresentou o resultado mais acurado (3,64 m), seguido por Galileo (3,79 m), GLONASS (4,56 m) e BeiDou (5,8 m), respectivamente. Neste mês o Galileo apresentou-se melhor para as estações AMTE (4,12 m), CORU (3,81 m), MTJI (3,48 m) e PBJP (3,97 m).

Quando observados os resultados obtidos para o mês de junho (Figura 33.b), ao realizar uma média das 20 estações, o sistema Galileo apresentou-se com a melhor acurácia, sendo cerca de 3%, 41% e 103% mais acurado que os sistemas GPS, GLONASS e BeiDou, respectivamente. Para observar a melhoria da acurácia na comparação entre

os meses, apresenta-se a Figura 34, demonstrando a média da acurácia tridimensional das 20 estações.

Figura 34 - Média do RMS3D obtida no PP autônomo nas 20 estações para os meses de março e junho.

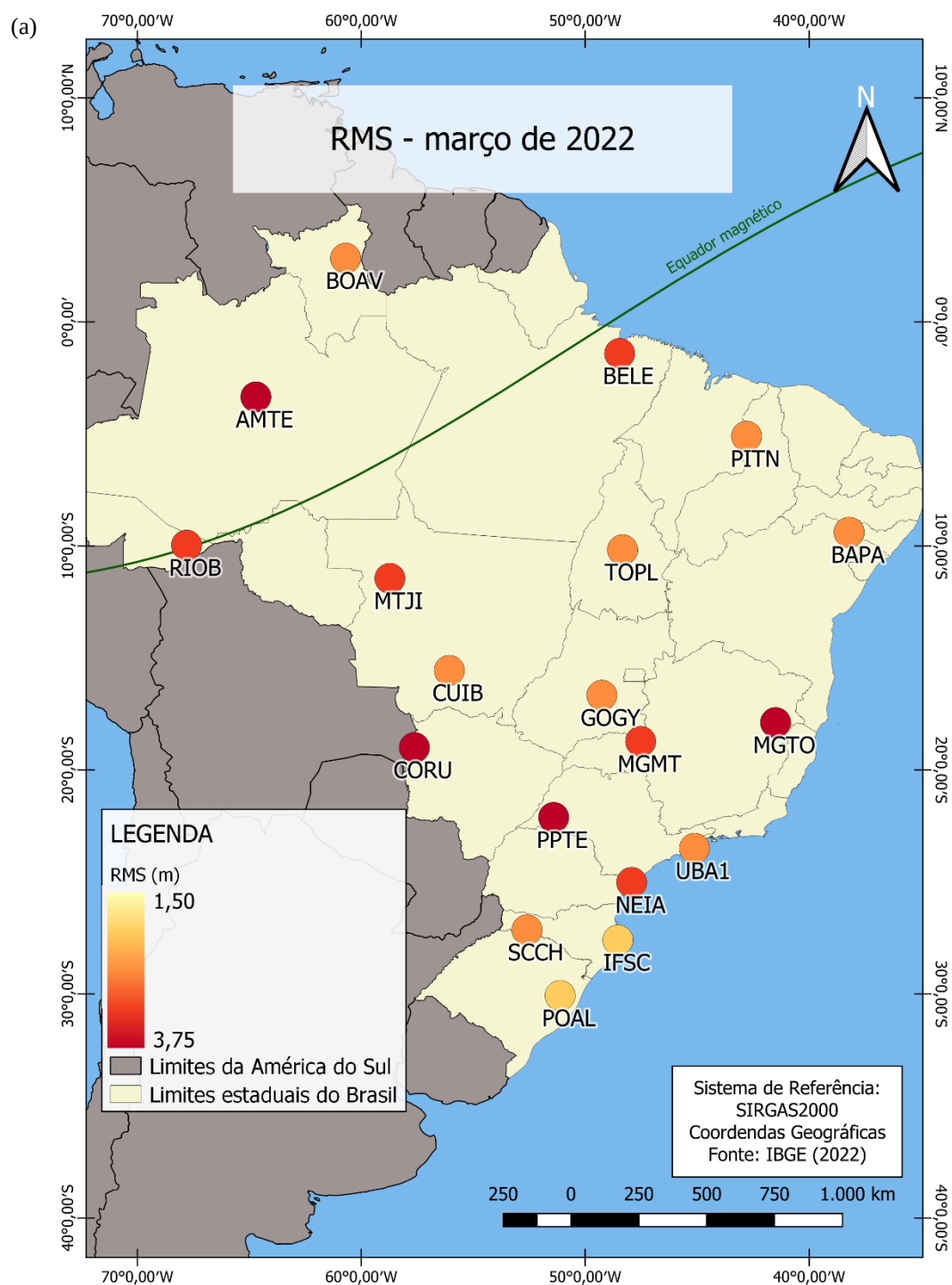


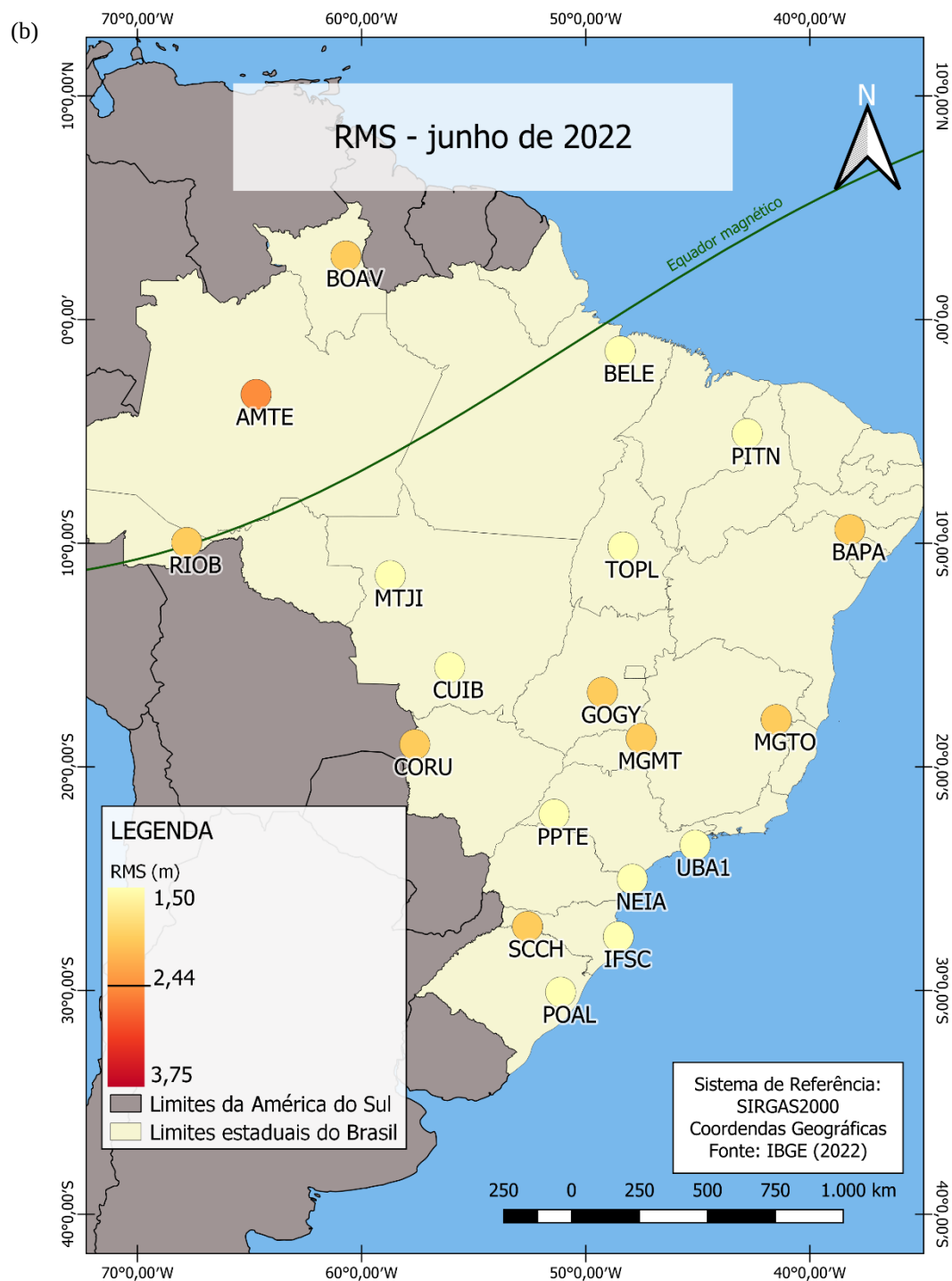
Observa-se na Figura 34 que o sistema que apresentou maior porcentagem de melhoria de março para junho foi o Galileo, com um resultado 57% mais acurado, seguido por GPS (46%), GLONASS (34%) e BeiDou (18%). A melhoria dos resultados é devido à baixa atividade ionosférica no mês de junho. Vale ressaltar que conforme observado no Experimento 1 do estudo de caso (Seção 5.1), os resultados do BeiDou em sua maioria são influenciados pelo alto valor de desvio padrão obtido no PP autônomo.

5.2.2 Resultados Obtidos no PP Combinado

A Figura 35 apresenta o mapa da acurácia posicional média obtida no PP multi-GNSS para os meses de março de junho de 2022.

Figura 35 - Acurácia posicional (RMS3D) obtida no PP multi-GNSS em diferentes estações para os meses de março (em (a)) e junho (em (b)) de 2022.





Fonte: Os Autores, 2022.

Observando as Figuras 35.a e 35.b, foi identificado um intervalo de RMS para março sendo de 1,50 a 3,75 m, e para junho sendo de 1,50 a 2,44 m. No mês de março foi visualizado um intervalo maior de erro devido à alta atividade ionosférica ocorrida neste mês quando comparado ao mês de junho. Pode-se destacar os valores altos de RMS obtidos em estações que se localizam na região de latitude magnética próxima aos 15°, sendo influenciados pelo efeito fonte (CORU, MGMT, MGTO, NEIA e PPTE).

Na Tabela 13, apresenta-se os valores numéricos de acurácia posicional que foi obtida no Posicionamento por Ponto GPS e GPS+Galileo e Multi GNSS, para todas as estações nos períodos de março e junho.

Tabela 13 - Valores de acurácia posicional (em metros) obtidos no Posicionamento por Ponto.

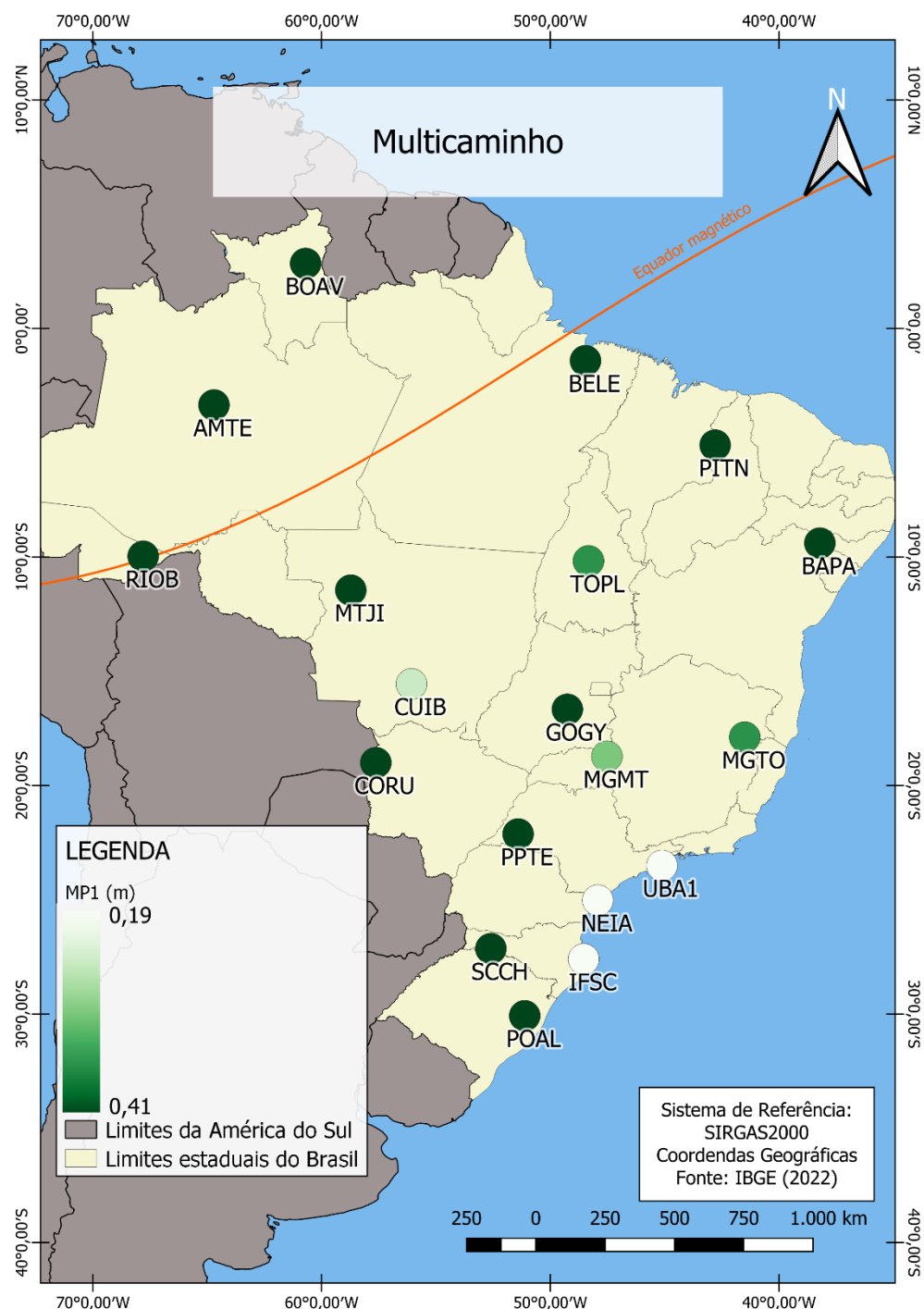
Estação	Março			Junho		
	GPS	GPS+Galileo	multi-GNSS	GPS	GPS+Galileo	multi-GNSS
AMTE	4,44	3,90	3,66	3,08	2,42	2,44
BAPA	3,70	2,72	2,57	2,49	2,16	1,98
BELE	3,38	3,17	3,11	2,20	1,95	1,85
BOAV	3,33	2,72	2,61	2,39	1,93	1,98
CORU	4,72	3,78	3,57	2,75	2,27	2,16
CUIB	3,12	2,54	2,54	2,34	2,06	1,77
GOGY	3,71	2,97	2,83	2,78	2,36	2,10
IFSC	2,86	2,53	2,37	1,86	1,79	1,57
MGMT	3,86	3,26	3,22	2,51	2,19	2,13
MGTO	4,09	3,50	3,39	2,52	2,19	2,01
MTJI	3,57	3,14	2,95	2,91	1,79	1,71
NEIA	3,32	2,99	3,04	1,93	1,63	1,65
PBJP	4,43	2,75	3,12	2,71	2,14	2,12
PITN	3,37	2,77	2,88	2,55	1,79	1,69
POAL	3,05	2,61	2,58	2,36	1,95	1,95
PPTE	4,45	3,87	3,48	2,95	2,02	1,95
RIOB	3,58	3,25	2,91	2,65	2,06	1,98
SCCH	3,57	3,06	2,83	2,62	2,12	2,00
TOPL	3,22	3,05	2,55	2,44	1,87	1,73
UBA1	3,03	2,70	2,47	1,74	1,64	1,61
MÉDIA	3,06	3,64	2,93	2,49	2,02	1,92

Fonte: Os Autores, 2022.

A localização ao qual se encontra a antena do receptor é de suma importância, levando em consideração o ambiente ao redor, visando evitar demais objetos que possam causar multicaminho e obstrução do sinal. Para realizar uma análise mais sucinta da

acurácia obtida no PP multi-GNSS em diferentes locais do país, faz-se necessário demonstração de um mapa com a média do índice de multicaminho MP_1^{GPS} (Figura 36).

Figura 36 - Média do multicaminho (MP1 GPS) em diferentes estações do país.



Fonte: Os Autores, 2022.

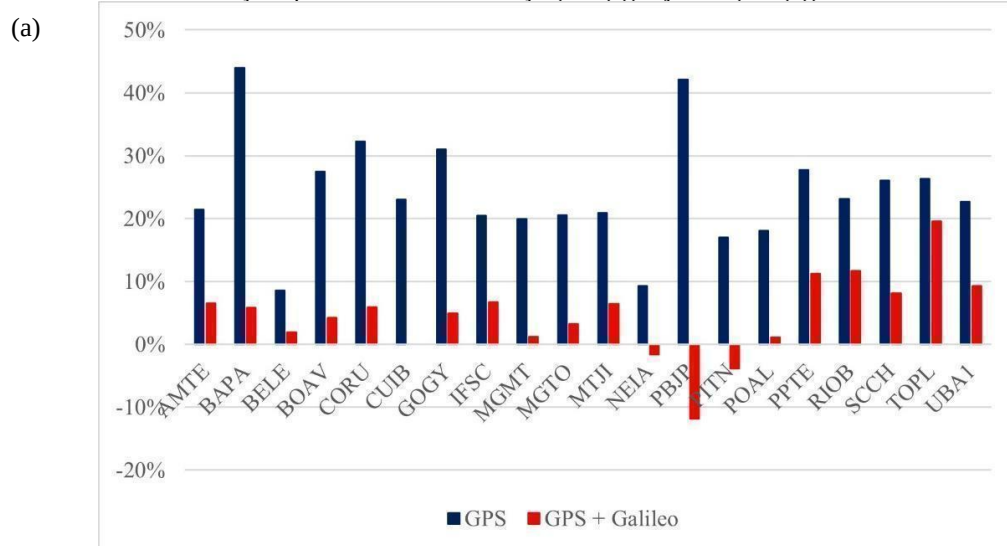
Visualiza-se no mapa apresentado na Figura 36 que as estações que menos sofrem com o efeito do multicaminho são a IFSC, NEIA e UBA1. A maior parte das estações

contém um índice MP_1^{GPS} superior a 35 cm. No Anexo 1 são apresentados os gráficos de multicaminho obtidos a cada dia do ano nas estações selecionadas.

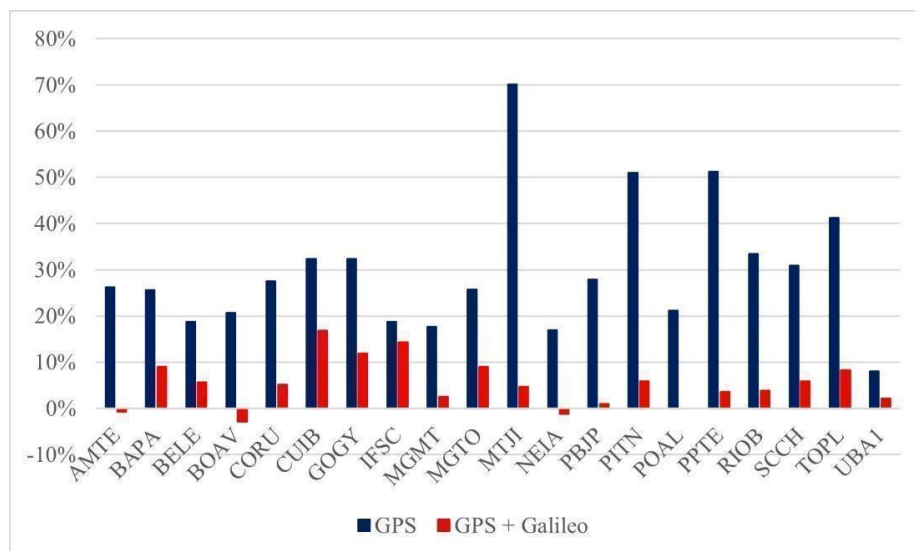
Pode-se observar que existe uma correlação entre as estações com os maiores erros e as estações com os maiores valores de multicaminho. De acordo com os valores numéricos apresentados, a correlação de Pearson encontrada entre o posicionamento e o multicaminho em março foi de 44%, podendo ser devido ao efeito da ionosfera, que é mais ativa neste mês. Em relação aos valores de junho, por ser um mês de baixa atividade ionosférica, foi obtido 62% de correlação. O multicaminho é uma das principais fontes de erros no posicionamento, podendo ser ocasionado por interferências ao redor das estações de referência, mas no experimento realizado nota-se que a PPTE e as demais estações utilizadas estão presentes na região de anomalia equatorial, sendo suscetíveis aos efeitos da camada ionosférica. Portanto, pode-se observar que, no que diz respeito às estações IFSC, NEIA e UBA1, os menores erros foram obtidos em junho, em comparação às demais estações ocorre também devido ao baixo índice de multicaminho. O mesmo ocorre com as estações que apresentaram maiores erros para o mesmo mês, como podemos observar AMTE, CORU, PPTE e MGTO.

A Figura 37 apresenta a porcentagem de melhoria obtida entre o posicionamento multi-GNSS e os modos GPS+Galileo e GPS no modo autônomo.

Figura 37 - Melhoria obtida no PP Multi GNSS entre GPS+Galileo e GPS autônomo em diferentes estações para os meses de março (em (a)) e junho (em (b)) de 2022.



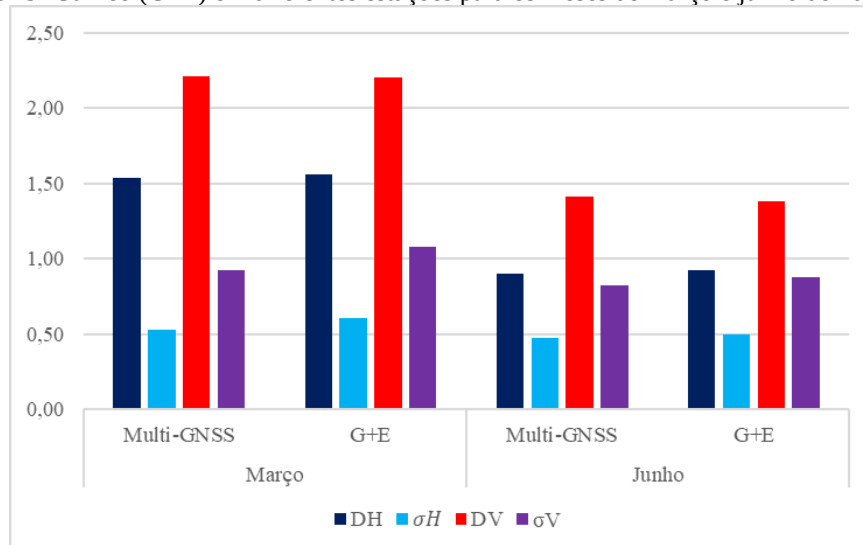
(b)



Fonte: Os Autores, 2022.

Em relação à Figura 37, em algumas estações o modo GPS+Galileo apresentou melhores resultados (em março: NEIA, PBJP e PITN; em junho: AMTE, BOAV e NEIA), porém em outras, na maioria dos casos, o multi-GNSS apresentou melhor resultado (média de 2,93 m em março e 1,92 m em junho, considerando as 20 estações). Isto ocorre provavelmente devido a maior redundância de observações que acarreta um menor desvio padrão. A média do RMS3D obtido na combinação GPS+Galileo em março foi de 3,06 m, e para junho foi de 2,02 m. Na Figura 38 visualiza-se os valores dos erros horizontal e vertical e seus respectivos desvios padrão do posicionamento multi-GNSS e GPS+Galileo nos meses de março e junho de 2022.

Figura 38 - Erros horizontal e vertical e seus respectivos desvios padrão obtida no PP multi-GNSS e GPS+Galileo (G+E) em diferentes estações para os meses de março e junho de 2022.



Fonte: Os Autores, 2022.

De acordo com a Figura 38, o diferencial entre os dois resultados é o desvio padrão ser menor no multi-GNSS devido a redundância das observações, contendo uma maior média dos satélites por época, ocasionando em um menor RMS3D. Nas Tabelas 14 e 15 apresenta-se os valores numéricos, apresentados na Figura 38, para todas as estações utilizadas nos períodos de março e junho de 2022.

Tabela 14 - Valores numéricos dos erros horizontal e vertical (em metros) e seus respectivos desvios padrão (em metros) obtida no PP multi-GNSS e GPS+Galileo em diferentes estações para o mês de março de 2022.

Março	multi-GNSS				GPS + Galileo			
	H	σ_H	V	σ_V	H	σ_H	V	σ_V
AMTE	1,43	0,36	3,21	0,62	1,36	0,45	3,26	0,80
BAPA	2,10	0,38	2,37	0,65	1,74	0,42	2,75	0,73
BELE	0,96	0,30	2,60	0,51	1,10	0,37	2,50	0,64
BOAV	0,96	0,30	2,60	0,51	1,68	0,41	2,39	0,71
CORU	1,70	0,39	2,01	0,65	1,94	0,48	2,37	0,87
CUIB	1,41	0,53	2,10	0,94	1,31	0,61	1,86	1,09
GOGY	2,05	0,65	1,87	1,16	1,89	0,75	1,96	1,36
IFSC	1,15	0,50	1,84	0,92	1,51	0,58	1,78	1,06
MGMT	2,23	0,60	2,18	1,08	2,39	0,70	2,15	1,29
MGTO	2,10	0,65	2,50	1,19	2,17	0,76	2,57	1,37
MTJI	1,32	0,54	2,34	0,93	1,21	0,6	2,4	1,06
NEIA	1,51	0,63	2,23	1,17	1,52	0,67	2,11	1,23
PBJP	1,6	0,64	2,03	1,08	1,49	0,74	1,91	1,29
PITN	1,58	0,57	2,06	0,94	1,43	0,63	2,05	1,05
POAL	1,15	0,58	1,79	1,03	1,23	0,63	1,5	1,08
PPTE	2,39	0,67	2,41	1,22	2,18	0,77	2,35	1,41
RIOB	0,69	0,53	2,65	0,90	0,71	0,62	2,68	1,09
SCCH	1,65	0,62	1,90	1,11	1,68	0,75	1,90	1,34
TOPL	1,37	0,54	1,85	0,91	1,38	0,65	1,89	1,11
UBA1	1,35	0,53	1,71	1,01	1,36	0,56	1,75	1,07

Fonte: Os Autores, 2022.

Tabela 15 - Valores numéricos dos erros horizontal e vertical (em metros) e seus respectivos desvios padrão (em metros) obtida no PP multi-GNSS e GPS+Galileo em diferentes estações para o mês de junho de 2022.

Junho	multi-GNSS				GPS + Galileo			
	H	σ_H	V	σ_V	H	σ_H	V	σ_V
AMTE	0,93	0,68	1,71	1,12	0,83	0,63	1,59	1,08
BAPA	1,20	0,45	1,37	0,77	1,21	0,51	1,36	0,89
BELE	0,68	0,42	1,32	0,68	0,65	0,46	1,22	0,76
BOAV	1,15	0,43	1,53	0,70	1,04	0,46	1,27	0,76
CORU	1,15	0,43	1,53	0,70	1,27	0,53	1,25	0,97

CUIB	1,11	0,40	1,11	0,71	1,31	0,49	1,33	0,86
GOGY	1,22	0,44	1,36	0,79	1,41	0,50	1,50	0,91
IFSC	0,53	0,33	1,27	0,60	0,56	0,37	1,30	0,69
MGMT	1,10	0,36	1,62	0,65	1,11	0,45	1,62	0,82
MGTO	0,88	0,35	1,64	0,63	0,89	0,48	1,58	0,87
MTJI	0,79	0,49	1,06	0,85	0,83	0,51	1,21	0,89
NEIA	0,63	0,48	1,24	0,88	0,61	0,4	1,28	0,74
PBJP	1,18	0,51	1,41	0,86	1,17	0,54	1,44	0,93
PITN	0,86	0,49	1,17	0,8	0,91	0,52	1,15	0,86
POAL	0,79	0,54	1,69	0,93	0,58	0,49	1,61	0,86
PPTE	1,10	0,64	1,33	1,16	1,10	0,64	1,33	1,16
RIOB	0,62	0,49	1,76	0,84	0,72	0,50	1,66	0,87
SCCH	0,69	0,53	1,72	0,96	0,74	0,53	1,70	0,95
TOPL	0,83	0,49	1,32	0,82	0,91	0,50	1,17	0,86
UBA1	0,61	0,52	1,17	0,99	0,60	0,42	1,10	0,82

Fonte: Os Autores, 2022.

Conforme apresentado nas Tabelas 14 e 15, é possível obter informações mais detalhadas dos erros vertical e horizontal calculados no posicionamento de cada estação utilizada. É possível observar o efeito da ionosfera na componente vertical. No mês de março, período de alta atividade ionosférica, o erro vertical foi elevado (cerca de 2 m tanto no multi-GNSS quanto no G+E) quando comparado ao mês de junho, período de baixa atividade ionosférica, em que a média foi de 1,42 m para o multi-GNSS e 1,38 m para o G+E.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se inicia com uma revisão bibliográfica sobre o GNSS, apresentando os sistemas globais que deste fazem parte, bem como suas principais características. Foi também apresentado os modelos matemáticos (funcional e estocástico) do PP. Vale a ressalva que o posicionamento realizado contém informações de efemérides precisas, trabalhando com uma qualidade superior ao PP Simples (PPS), realizando também correções da refração ionosférica na pseudodistância e dos efeitos da atmosfera neutra.

Desta forma, realizou-se o processamento autônomo de simples frequência e combinado com múltiplas constelações, utilizando cada sistema. Por meio dos resultados no PP autônomo, definiu-se uma ponderação para o PP multi-GNSS. O trabalho contou com dados de 20 estações RBMC, coletando dados de 61 dias, sendo destes, 31 dias de março e 30 pertencentes a junho de 2022. Apresentou-se 2 experimentos, sendo o primeiro uma análise sobre uma estação em específico, buscando justificar os resultados obtidos no segundo experimento.

Pode-se concluir com os resultados obtidos que o sistema GPS obteve o menor PDOP, erro posicional, desvio padrão posicional e acurácia tridimensional comparado aos demais sistemas no PP autônomo, tanto para o mês de junho, quanto para o mês de março, na maior parte dos dias (Anexo 2).

A ocorrência desse resultado pode ser devido ao sistema apresentar-se a mais tempo no mercado, assim contendo maior tempo em operação, proporcionando um maior período de estudo sobre os sinais omitidos, bem como desenvolvimento de modelos para amenização de erros. Além de conter a maior constelação operacional, apresentando-se disponível para o posicionamento em, no mínimo, 95% do tempo, assim de acordo com o comprometimento dos EUA. Para o mês de junho, ao qual é amenizado os efeitos da ionosfera, o sistema Galileo apresentou os melhores resultados em 11 das 20 estações selecionadas. Assim, apesar de não se constar como operacional, o sistema monitorado pela União Europeia obteve bons resultados comparados aos demais, sendo 3% mais bem acurado que o GPS para o mês de junho. Os resultados do GLONASS foram piores comparados ao Galileo e ao GPS, o PDOP do sistema russo foi muito degradado, apresentando uma “ruim” geometria no período e nas localidades ao qual foi realizado o posicionamento. O BeiDou apresentou os piores resultados, por mais que algumas estações tivessem observações de satélites B2A (chegando a ser o segundo sistema com maior número de satélites por época), o desvio padrão obtido foi o pior dentre os sistemas.

Como já era esperado, o PP combinado multi-GNSS apresentou os melhores resultados em quesito de acurácia tridimensional na maior parte das estações, com o menor erro horizontal (1,22 m). Ao analisar o desvio padrão tridimensional, devido à alta redundância de observações, o multi-GNSS apresentou o menor resultado (1,01 m), mantendo-se regular até em período de alta cintilação. No quesito de erro vertical, a combinação GPS + Galileo apresentou os melhores resultados, sendo 2% melhor em relação ao multi-GNSS.

Finalizando, o Trabalho de Conclusão de Curso atingiu os objetivos esperados, possibilitando a análise dos resultados de PP autônomo e combinado, e verificando o impacto atmosférico e do multicaminho no posicionamento, como a ionosfera e atmosfera neutra. Com isso, para estudos futuros, recomenda-se a utilização de um maior período de dados, maior número de estações, aplicação de diferentes ponderações no PP multi-GNSS e diferentes combinações no PP, utilizando também dados multi-frequência.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAHADUR, B., NOHUTCU, M. **PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis**. GPS Solutions, 22(4), p.113, 2018.
- BARTOLOMÉ, J. P.; MAUFROID, X.; HERNÁNDEZ, I. F.; SALCEDO, J. A. L.; GRANADOS, G. S. Overview of Galileo System. In: NUERM, J.; LOHAN, E. S.; SAND, S.; HURKSKAINEN, H. **Galileo Positioning Technology**. New York: Springer, 2014, 327p.
- BEARD, R.; SENIOR, K. **Clocks**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.
- CAI, C.; GAO, Y.; PAN, L. Z.; ZHU, J. J.. **Precise Point Positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo**. Adv. Space Res. 2015, 56, 133-143.
- CAMARGO P. O. **Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman**, Curitiba, 1992. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- DACH R, MONTENBRUCK O, PRANGE L. **Status of the IGS-MGEX project**. In: Proceedings of EUREF 2014 symposium, Vilnius, Lithuania, 3–7 June, 2014.
- EC – European Commission. **Commission awards €1.47 bn in contracts to launch the 2nd Generation of Galileo Satellites**. 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/defence-industry-space/commission-awards-eu147-bn-contracts-launch-2nd-generation-galileo-satellites-2021-01-20_pt. Acesso em: 15 mai. 2022.
- ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **BeiDou Signal Plan**. 2022. Disponível em: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_Signal_Plan. Acesso em: 09 mai. 2022.
- ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **GLONASS Space Segment**. 2023. Disponível em <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>. Acesso em: 06 jan. 2023.
- ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **Reference Frames in GNSS**. 2011. Disponível em https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Reference_Frames_in_GNSS#cite_note-2. Acesso em: 27 mai. 2022.
- FALCONE, M; HAHN, J.; BURGER, T. **Galileo**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.
- GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações – aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.
- GE, Y., ZHOU, F., SUN, B., WANG, S., & SHI, B. (2017). **The impact of satellite time group delay and inter-frequency differential code bias corrections on multi-GNSS combined positioning**. Sensors, 17(3), 602. <https://doi.org/10.3390/s17030602>.
- GOUVEIA, T. A. F., **Função de Mapeamento Brasileira da Atmosfera Neutra e sua Aplicação no Posicionamento GNSS na América do Sul**. Tese de Doutorado. Presidente Prudente: Unesp, 2019.

GPS – The Global Positioning System. **Control segment**. 2022. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/> . Acesso: 10 mai. 2022.

GPS – The Global Positioning System. **Space segment**. 2023. Disponível em: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations/> . Acesso: 06 jan. 2023.

GSC – European GNSS Service Centre. System Galileo. 2022. Disponível em: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>. Acesso em: 12 mai. 2022.

HENNING, W. **National Geodetic Survey User Guidelines For Classical Real Time GNSS Positioning**. DRAFT, 2008. pp. 77-78.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

IAC. Information and analysis center for positioning, navigation and timing. **BEIDOU CONSTELLATION STATUS**. Disponível em <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/>. Acesso em: 09 mai. 2022.

IAC. Information and analysis center for positioning, navigation and timing. **GLONASS 2022**. Disponível em <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>. Acesso em: 09 mai. 2022.

ISMR, **Query Tool**. Disponível em: <https://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/index.php>. Acesso em: 12 ago. 2022.

JEKELI, C; MONTENBRUCK, O. **Time and Reference Systems**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

JEREZ, G. O. **Análise da Integração GPS/GLONASS para sob efeito de Cintilação Ionosférica**. Presidente Prudente: Unesp, 2017.

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users**. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23, n.3, p. 325-331, 1987.

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric effects on GPS. In: **Global Positioning System: Theory and Applications**, Washington: Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996. v.1, p.485-515.

KOUBA, J., **A guide to using International GNSS Service (IGS) products**. 2009. IGS Central Bureau, Pasadena.

LANGLEY, R.B.; TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. **Introduction to GNSS**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

LI, X.; ZHANG, X.; REN, X.; FRITSCH, M.; WICKERT, J.; SCHUH, H. **Precise positioning with current multi-constellation global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou**. Science Reports. 2015a.

LI, X.; ZHANG, X.; REN, X.; FRITSCH, M.; WICKERT, J.; SCHUH, H. **Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo**. Journal of Geodesy. 2015b.

LIU, J.; GU, D.; JU, B.; YAO, J.; DUAN, X.; YI, D. **Basic performance of BeiDou-2 navigation satellite system used in LEO satellites precise orbit determination.** Chinese Journal of Aeronautics, 27(5), pp.1251-1258, 2014.

LOU, Y.; ZHENG, F.; GU, S.; WANG, C.; GUO, H.; FENG, Y. **Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models.** GPS solutions. 2015;20(4):84962.

MACHADO, W. C. **Solução rápida das ambiguidades GPS para aplicações no posicionamento relativo de linhas de base curtas.** 2001. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS.** 2012. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** 2ª ed. São Paulo: editora UNESP, 476 p., 2008.

MONTENBRUCK, O.; STEIGENBERGER, P.; PRANGE, L.; DENG, Z.; ZHAO, Q.; PEROSANZ, F.; ROMERO, I.; NOLL, C.; STURZE, A.; WEBER, G.; SCHMID, R.; MACLEOD, K.; SCHAER, S. **The multi-GNSS experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – achievements, prospects and challenges.** In: Advances in Space Research, v. 59, no 7, p. 1671-1697. 2017.

NGA - National Geospatial-Intelligence Agency. **Recent Update to WGS 84 Reference Frame and NGA Transition to IGS ANTEX.** Office of Geomatics / GNSS Division, 2021.

ODIJK, D. **Positioning Model.** In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

PAN, L., CAI, C., SANTERRE, R., ZHANG, X. **Performance evaluation of single-frequency point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo.** Survey Review, 49(354), pp.197-205, 2017.

PROL, F. D. S.; CAMARGO, P. D. O. **Estimativa da tendência diferencial do código nos receptores GNSS.** Boletim de Ciências Geodésicas [online]. 2014, v. 20, n. 4 [Acessado 6 Janeiro 2023], pp. 735-749. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000400042>>.

RBMC - **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo GNSS.** IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e de Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.

REVNIVYKH, S. **GLONASS Status and Progress.** CGSIC Meeting. Savannah, GA, US, 2008.

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

SETTI JÚNIOR, P. T. **Posicionamento por Ponto multi-GNSS: análise dos sistemas, sinais e modelos ionosféricos.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

SILVA, C. M.; SETTI JUNIOR, P. T.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. **Galileo: a consolidação do sistema de posicionamento europeu**. RBGeo - Revista Brasileira de Geomática. 2020

Sputnik News, 2015. Disponível em: <<http://br.sputniknews.com/mundo/20151027/2554254/Glonass-estacao-36-paises-navegacao.html>>. Acesso em Nov. 2022.

TEUNISSEN, P. J., **Quality control and GPS**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBER, A. GPS for Geodesy, 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998. p.271-318.

TEUNISSEN, P.J., **Zero Order Design: Generalized Inverses, Adjustment, the Datum Problem and S-Transformations**. Springer, 1985.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. **3WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region**. Proceedings of IEEE, 2011.

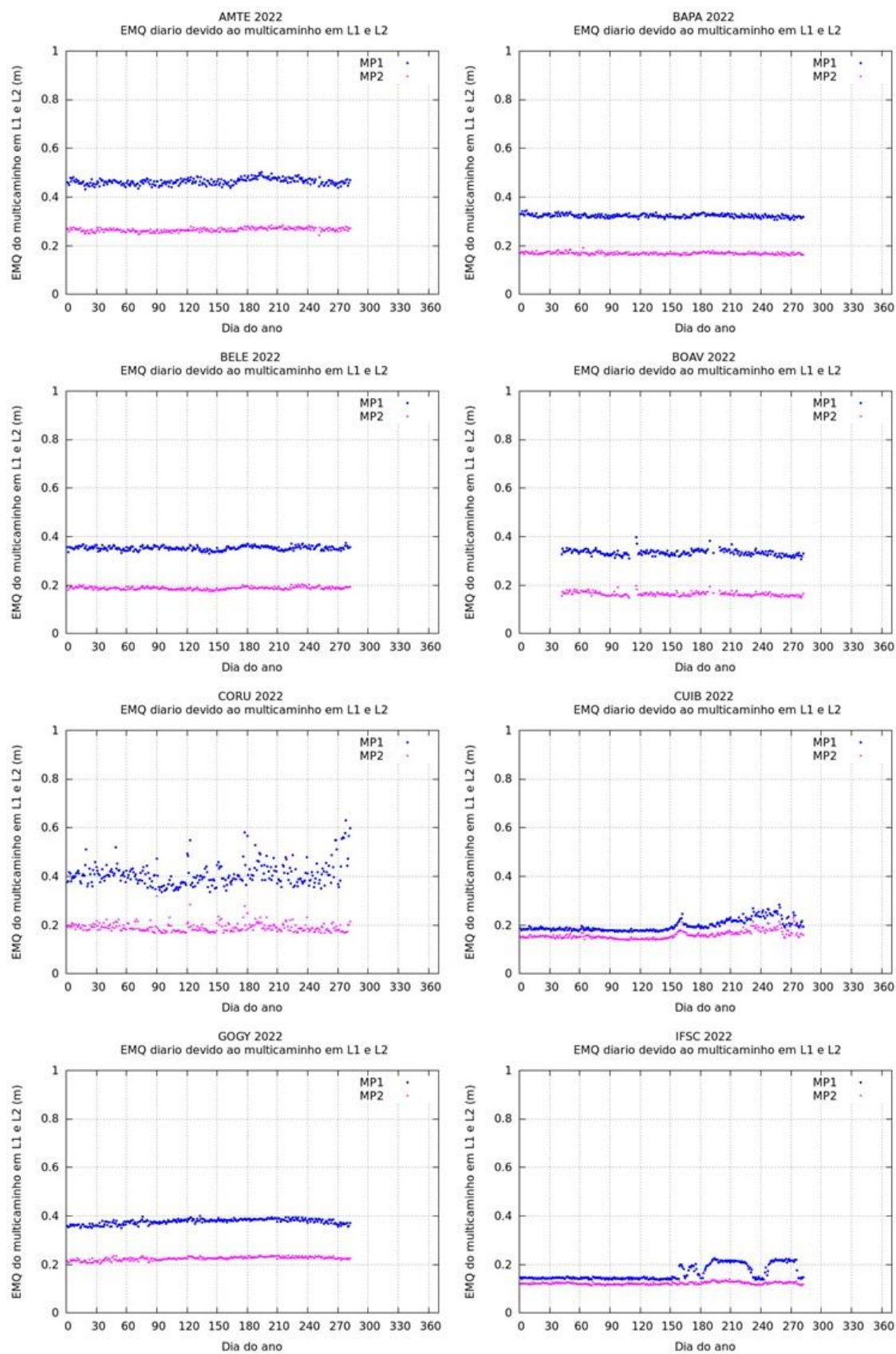
WANG, N., LI, Z., YUAN, Y. et al. **BeiDou Global Ionospheric delay correction Model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions**. GPS Solutions, 2021.

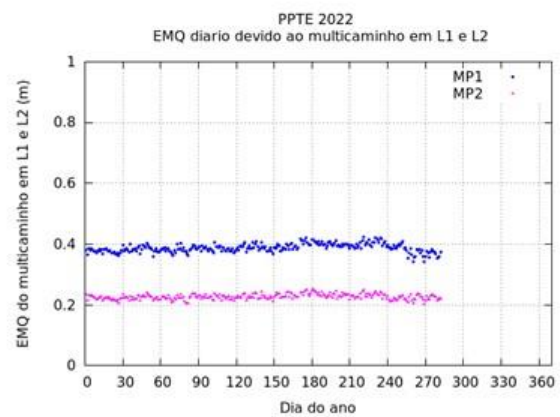
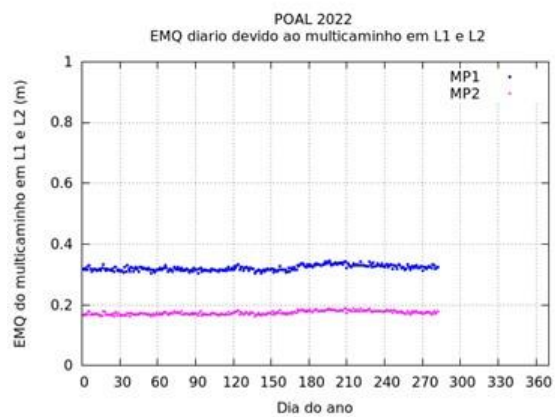
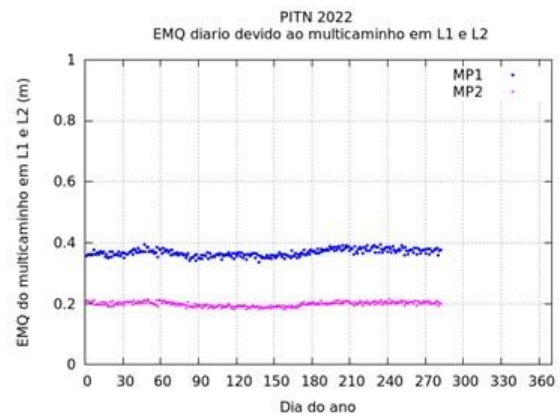
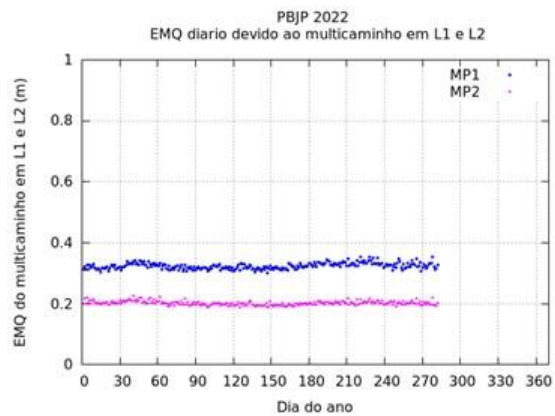
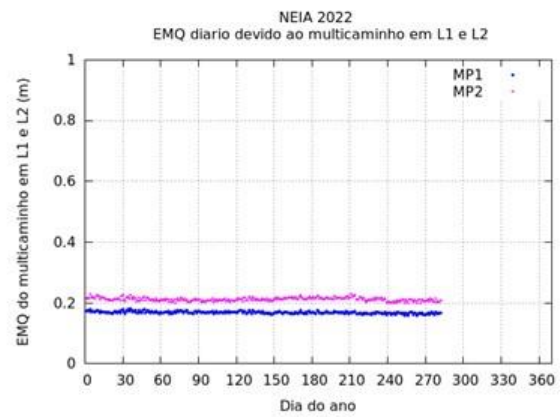
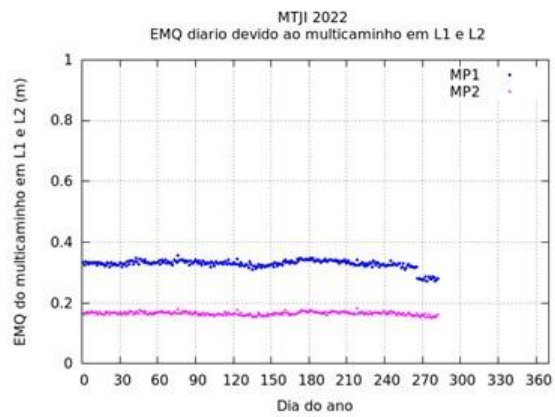
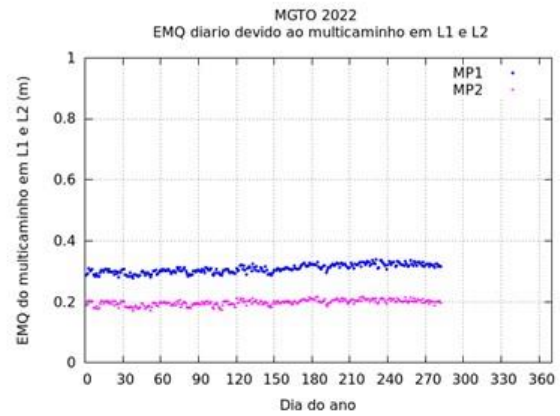
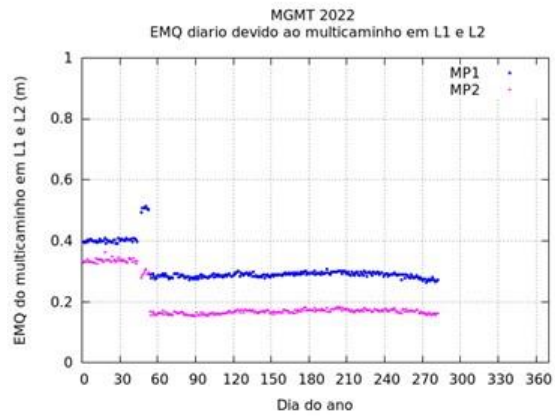
WEBSTER, I., **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. 1993. Dissertação. Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

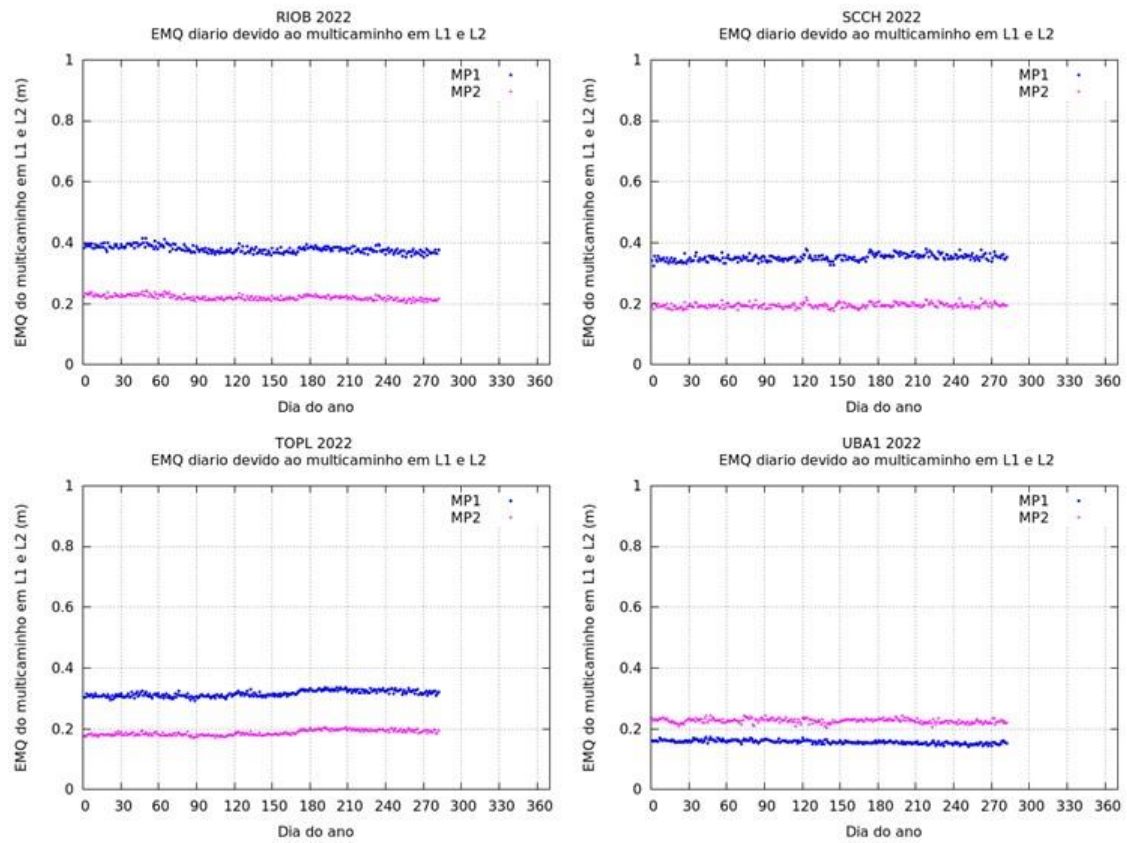
YANG, Y.; TANG, J.; MONTENBRUCK, O. **Chinese Navigation Satellite Systems**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

ZHENG, Y.; ZHENG, F.; YANG, C.; NIE, G.; LI, S. **Analyses of GLONASS and GPS+GLONASS Precise Positioning Performance in Different Latitude Regions**. Remote Sens. 2022, 14, 4640. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14184640>.

ANEXO 1 – MULTICAMINHO NAS ESTAÇÕES DA RBMC

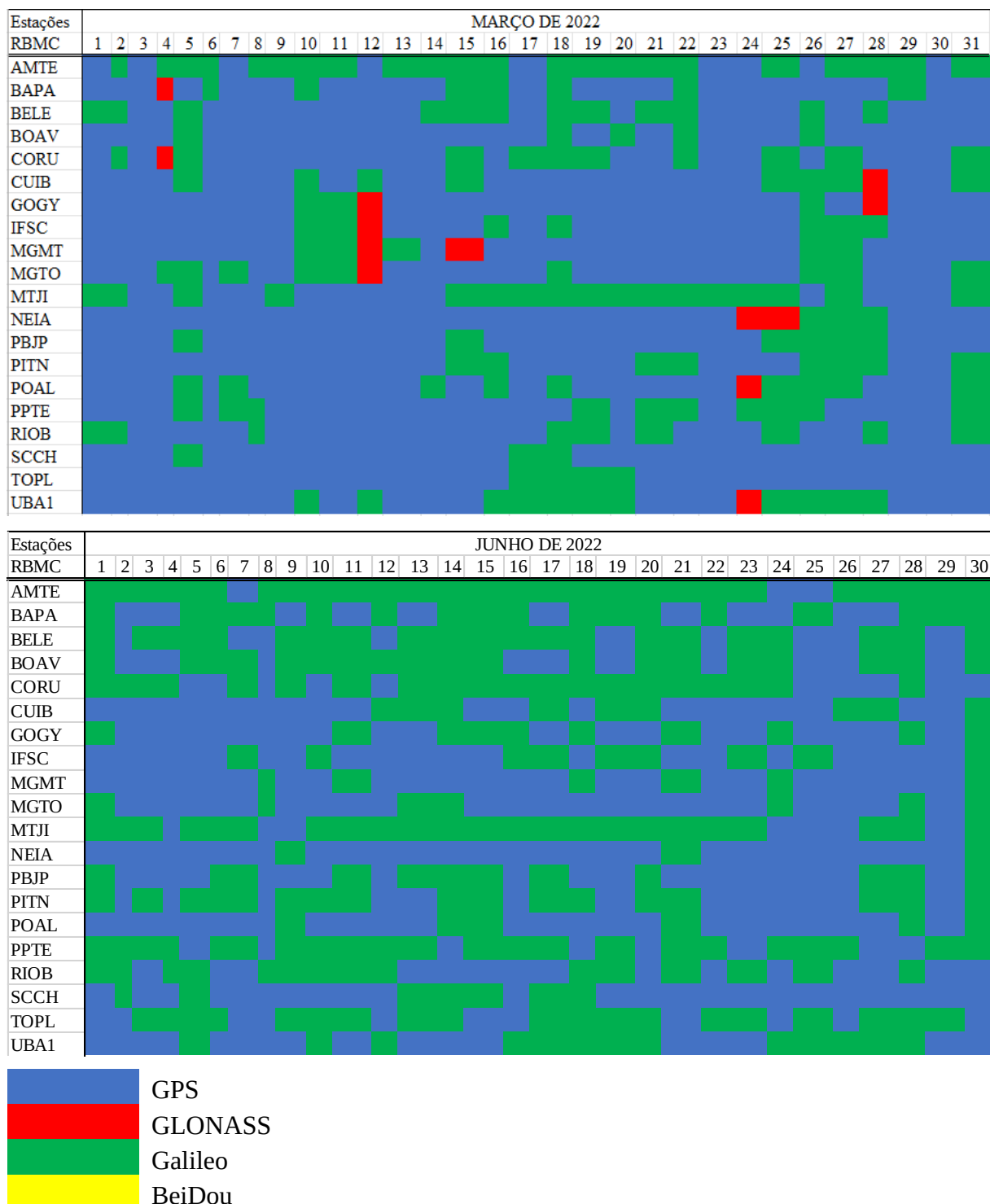






Fonte: RBMC, 2022.

ANEXO 2 - DIAS EM QUE CADA SISTEMA APRESENTOU O MELHOR RMS3D NO PP AUTÔNOMO



Fonte: Os Autores, 2022.