

PAULO DE TARSO SETTI JÚNIOR

**POSICIONAMENTO POR PONTO MULTI-GNSS:
ANÁLISE DOS SISTEMAS, SINAIS E MODELOS IONOSFÉRICOS**



PAULO DE TARSO SETTI JÚNIOR

**POSICIONAMENTO POR PONTO MULTI-GNSS:
ANÁLISE DOS SISTEMAS, SINAIS E MODELOS IONOSFÉRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientadora: Profa. Dra. Daniele Barroca Marra Alves

S495p Setti Júnior, Paulo de Tarso
 Posicionamento por Ponto multi-GNSS : análise dos
 sistemas, sinais e modelos ionosféricos / Paulo de Tarso
 Setti Júnior. -- , 2019
 106 p.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
 (Unesp), Faculdade de Ciências Farmacêuticas,
 Araraquara,
 Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves

 1. Posicionamento por Ponto. 2. Posicionamento
 multi-GNSS. 3. NeQuick G. 4. Klobuchar. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Posicionamento por Ponto multi-GNSS: análise dos sistemas, sinais e modelos ionosféricos

AUTOR: PAULO DE TARSO SETTI JÚNIOR
ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Profa. Dra. CLAUDIA PEREIRA KRUEGER
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Presidente Prudente, 13 de março de 2019

DADOS CURRICULARES

Paulo de Tarso Setti Júnior

Nascimento	24/06/1994 – Itapira, SP
Filiação	Paulo de Tarso Setti Rosângela Aparecida Grejo Setti
2012 – 2017	Graduação Bacharelado em Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2017 – 2019	Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Mestrado (Processo 2016/24861-3) e pela concessão da Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE) durante um período de seis meses em 2018 (Processo 2017/22223-2).

Agradeço a minha orientadora, Profa. Daniele Barroca por todos os anos de orientação, que possibilitaram a realização dessa pesquisa. Agradeço também ao Prof. Marcio Aquino e a Sreeja Veetil, da *University of Nottingham*, pelo apoio prestado e a forma interessada com que me acompanharam durante a realização da BEPE.

Agradeço ao Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) e ao *Nottingham Geospatial Institute Research Group* pelas discussões e contribuições no decorrer desse trabalho. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), à Universidade Estadual Paulista (UNESP) e à *University of Nottingham* pela infraestrutura fornecida.

Agradeço também aos meus pais e avó, que nunca mediram esforços para que eu conseguisse buscar meus objetivos e por terem guiado meu caminho até aqui. Às minhas irmãs pelo companheirismo, apoio e por sempre se orgulharem de mim. Aos meus amigos, pelo auxílio nas horas de dificuldade, pelas conversas, risadas, momentos de descontração e alegria. Vocês tornaram mais fácil cada etapa dessa caminhada.

Agradeço ao *International GNSS Service* (IGS) e o projeto piloto *The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project* (MGEX), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e ao projeto *Concept for Ionospheric-Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America/ Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil* (CIGALA/CALIBRA) pelo fornecimento dos dados utilizados nessa pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“‘Poirot,’ I said. ‘I have been thinking...’
‘An admirable exercise my friend. Continue it.’”
(Agatha Christie)*

RESUMO

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) têm sido cada vez mais empregado em atividades que necessitam de estimativas de posição. Além do difundido sistema norte-americano GPS (*Global Positioning System*), orbitam a Terra satélites de outros três sistemas similares: o GLONASS, desenvolvido pela antiga União Soviética e que se encontra com constelação completa, o europeu Galileo e o chinês BDS, os dois últimos em fase de implantação e com previsão de dispor de constelação completa em 2020. Nas mensagens de navegação, os sistemas GPS e Galileo enviam também parâmetros para correção do atraso ionosférico a nível global, os quais são utilizados nos modelos de Klobuchar e NeQuick G, respectivamente. A tendência é que esses quatro sistemas funcionem em conjunto a nível de usuário, melhorando a disponibilidade e acuracidade do posicionamento. Na presente pesquisa avaliou-se a acurácia do Posicionamento por Ponto com uso de pseudodistância e efemérides precisas considerando os sistemas e frequências de forma separada, bem como o seu uso integrado no posicionamento denominado multi-GNSS. Além disso, o desempenho dos modelos de Klobuchar e NeQuick G na região brasileira e a nível global foram analisados. Três experimentos foram realizados; no primeiro deles, verificou-se que o posicionamento multi-GNSS em relação ao posicionamento GPS pode apresentar uma melhoria de aproximadamente 11% em ambientes desobstruídos e de até 60% em ambientes com alto grau de obstrução. Verificou-se que a taxa de melhoria está diretamente ligada ao nível de multicaminho da estação (correlação de 0,74). Com base nos resultados obtidos no segundo e terceiro experimentos, que avaliaram o desempenho dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, verificou-se que estes apresentam um erro relativo a nível global de aproximadamente 49 e 40%, respectivamente. O uso do modelo de Klobuchar é recomendado para períodos e regiões de alta atividade ionosférica, uma vez que o atraso ionosférico é normalmente superestimado. O modelo NeQuick G, por outro lado, é recomendado para regiões e períodos de baixa atividade ionosférica, uma vez que o atraso ionosférico é normalmente subestimado.

Palavras-chave: Posicionamento por Ponto, posicionamento multi-GNSS, NeQuick G, Klobuchar.

ABSTRACT

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) have been increasingly employed in activities that require position estimates. In addition to the widespread North American GPS (Global Positioning System), satellites from three similar systems are currently orbiting the Earth: GLONASS, developed by the former Soviet Union, which has now a full constellation, and the European Galileo and Chinese BDS, both under implementation phase and with plans to reach full constellation by 2020. Through their navigation messages, GPS and Galileo send parameters for ionospheric delay correction at global level, which are used in the Klobuchar and NeQuick G models, respectively. The tendency is for these four systems to work together at the user level, improving the positioning availability and accuracy. In this research we aimed to evaluate the accuracy of the Point Positioning (with pseudoranges and precise ephemeris) using the different systems and frequencies separately, as well as their integration in the so-called multi-GNSS positioning. In addition, the performance of the Klobuchar and NeQuick G models in the Brazilian region and worldwide was analyzed. Three experiments were performed; in the first one, it was verified that the multi-GNSS positioning in relation to GPS positioning can show an improvement of approximately 11% in unobstructed environments and up to 60% in environments with a high degree of obstruction. It was verified that the improvement rate is directly linked to the multipath level of the station (correlation of 0.74). Based on the results obtained in the second and third experiments, which evaluated the performance of the Klobuchar and NeQuick G, the models showed an overall relative error of approximately 49 and 40%, respectively. The use of the Klobuchar model is recommended for periods and regions of high ionospheric activity, since the ionospheric delay is usually overestimated. The NeQuick G model, on the other hand, is recommended for regions and periods of low ionospheric activity, since the ionospheric delay is usually underestimated.

Key-words: Point Positioning, multi-GNSS positioning, NeQuick G, Klobuchar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trajetória dos satélites GEO, IGSO e MEO da constelação BDS	28
Figura 2 - Densidade eletrônica em função da altitude.....	39
Figura 3 - Ciclos solares.....	42
Figura 4 - Regiões da ionosfera	42
Figura 5 - Ilustração do modelo de Klobuchar	45
Figura 6 - Fluxograma de execução do sistema de PP em desenvolvimento.....	53
Figura 7 – Estações da RBMC utilizadas no experimento.....	55
Figura 8 – Número de satélites rastreados e PDOP dos diferentes sistemas, estação PBJP, DOY 12 de 2019	57
Figura 9 - Diagrama polar dos satélites observados estação PBJP, DOY 12 de 2019	58
Figura 10 - PDOP e erro do posicionamento GPS, nas frequências L1 C/A, L2C e L5	59
Figura 11 - PDOP e erro do posicionamento GLONASS, nas frequências L1 e L2	60
Figura 12 - PDOP e erro do posicionamento Galileo, nas frequências E1, E5a, E5b e E5	61
Figura 13 - PDOP e erro no posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019	62
Figura 14 - Resíduos dos satélites GPS, GLONASS, Galileo e BDS no posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019.....	63
Figura 15 - Erro do relógio do receptor e ISB para posicionamento multi-GNSS.....	64
Figura 16 - REQM 3D do posicionamento nas diferentes observáveis GNSS, considerando todas as estações e dias analisados	65
Figura 17 - Porcentagem de melhoria do posicionamento multi-GNSS em relação ao GPS L1 C/A nas diferentes estações para todos os dias analisados (DOY 06 a 15 de 2019).....	66
Figura 18 - MP1 GPS médio nas diferentes estações para todos os dias analisados.....	68
Figura 19 - PDOP GPS e multi-GNSS, considerando máscara de elevação de 30°	69
Figura 20 – PDOP e erro no posicionamento GPS com PDOP máximo de 6,0 e sem limite de PDOP e posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019	70
Figura 21 - REQM para todas as estações e períodos, nas configurações GPS e multi-GNSS e disponibilidade	72
Figura 22 - Estações da Rede CIGALA/CALIBRA selecionadas.....	75
Figura 23 - Número de manchas solares para o período selecionado.....	75
Figura 24 - REQM 3D da posição estimada para os dias de junho e para outubro	77

Figura 25 - STEC, Erro horizontal e vertical (no-iono) e S4 para a estação PRU2, 22 de outubro de 2014	78
Figura 26 - STEC, Erro horizontal e vertical (no-iono) e S4 para a estação PRU2, 21 de junho de 2018	78
Figura 27 - Erro horizontal e vertical para estação PRU2, 22 de outubro de 2014 para processamento sem correção ionosférica e com modelo de Klobuchar e NeQuick G	80
Figura 28 - Erro horizontal e vertical para estação PRU2, 21 de junho de 2018 para processamento sem correção ionosférica e com modelo de Klobuchar e NeQuick G	80
Figura 29 - Melhoria na REQM 3D, considerando todas as estações e anos analisados, para os meses de junho e outubro.....	82
Figura 30 - Estações selecionadas para análise no domínio do atraso ionosférico e da posição.....	85
Figura 31 - REQM (m) mensal do atraso ionosférico (L1) do modelo de Klobuchar, para o segundo semestre de 2017 e primeiro semestre de 2018	86
Figura 32 - REQM (m) mensal do atraso ionosférico (L1) do modelo NeQuick G, para o segundo semestre de 2017 e primeiro semestre de 2018	87
Figura 33 - REQM mensal dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, considerando as diferentes regiões da Terra, de acordo com a latitude magnética.....	88
Figura 34 - Atraso ionosférico estimado a partir de observações de dupla frequência, modelo de Klobuchar e NeQuick G para estação NOTT, uma semana de março de 2018	89
Figura 35 - Viés do atraso ionosférico para todas as estações e períodos analisados.....	91
Figura 36 – REQM do atraso ionosférico para todas as estações e períodos analisados	92
Figura 37 - REQM 3D da posição estimada das estações processadas considerando a configuração no-iono, Klobuchar e NeQuick G.....	93
Figura 38 - REQM 3D da posição estimada das estações processadas considerando a configuração no-iono, Klobuchar e NeQuick G.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos sistemas GNSS.....	21
Tabela 2 - Dados das ondas portadoras L1 e L2 GLONASS	25
Tabela 3 - Características das camadas ionosféricas	40
Tabela 4 - Efeito sistemático máximo provocado pela ionosfera na direção vertical	44
Tabela 5 - REQM 3D (m) das diferentes observáveis para as estações processadas, considerando todos os dias analisados	65
Tabela 6 - REQM 3D (m) das diferentes configurações processadas GPS e multi-GNSS para as estações processadas, considerando todos os dias analisados	71

LISTA DE SIGLAS

BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite Demonstration System</i>
BDT	<i>BeiDou Time</i>
C	BeiDou
CALIBRA	<i>Concept for Ionospheric-Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America</i>
CAS	<i>Chinese Academy of Sciences</i>
CCIR	<i>Comité Consultatif International des Radiocommunications</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CGCS	<i>China Geodetic Coordinate System</i>
CIGALA	<i>Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
DIA	Detecção, Identificação e Adaptação
DOP	<i>Dilution of Precision</i>
DOY	<i>Day of Year</i>
E	Galileo
EC	<i>European Commission</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FOC	<i>Full Operational Capabitily</i>
G	GPS
GAGAN	<i>GPS and GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System</i>
GCS	<i>Ground Control Segment</i>
GDOP	<i>Geometric DOP</i>
GEO	<i>Geostationary Earth orbit</i>
GIM	<i>Global Ionospheric Map</i>

GIOVE	<i>Galileo In-Orbit Validation Element</i>
GLONASS	<i>GLObal NAVigation Satellite System</i>
GMS	<i>Ground Mission Segment</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GST	<i>Galileo System Time</i>
GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i>
HDOP	<i>Horizontal Dilution of Precision</i>
ICB	<i>Interchannel Bias</i>
ICTP	<i>International Centre for Theoretical Physics</i>
IGG	<i>Institute of Geodesy and Geophysics</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined geo-synchronous orbit</i>
IOV	<i>In-Orbit Validation</i>
ISB	<i>Intersystem Bias</i>
ISMR	<i>Ionospheric Scintillation Monitor Receivers</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LEOP	<i>Launch and Early Operation</i>
LOCC	<i>LEOP Control Centers</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MGEX	<i>The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project</i>
MVC	<i>Matriz Variância-Covariância</i>
OCS	<i>Operational Control System</i>
OS	<i>Open Service</i>
P	<i>Precised or Protected</i>
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
PPP	<i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
PZ	<i>Parametry Zemli</i>
R	<i>GLONASS</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RINEX	<i>The Receiver-Independent Exchange Format</i>
SA	<i>Selective Availability</i>

SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SP3	<i>The Standard Product 3</i>
STEC	<i>Slant TEC</i>
TAI	Tempo Atômico Internacional
TDOP	<i>Time Dilution of Precision</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>TEC Unit</i>
TEQC	<i>Translation, Editing and Quality Checking</i>
TGD	<i>Time Group Delay</i>
UE	União Europeia
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
UT	<i>Universal Time</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VDOP	<i>Vertical Dilution of Precision</i>
VTEC	<i>Vertical TEC</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	19
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Estrutura da dissertação.....	20
2 SISTEMAS GLOBAIS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE.....	21
2.1 <i>Global Positioning System</i>	22
2.2 <i>GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM</i>	23
2.3 Galileo.....	25
2.4 <i>BeiDou Navigation Satellite Demonstration System</i>	27
3 POSICIONAMENTO POR PONTO	30
3.1 Equação de Observação.....	30
3.2 Cálculo dos erros dos relógios dos satélites e tendência diferencial do código.....	31
3.3 Modelo Funcional.....	32
3.4 Modelo Estocástico.....	34
3.5 Diluição da Precisão.....	34
3.6 Controle de Qualidade.....	35
3.6.1 Detecção.....	35
3.6.2 Identificação.....	36
3.6.3 Adaptação.....	37
4 EFEITOS E MODELOS IONOSFÉRICOS NO GNSS	38
4.1 Estrutura da Ionosfera.....	38
4.2 Variações da densidade de elétrons.....	41
4.3 Efeitos da Ionosfera nos sinais GNSS.....	43
4.4 Modelo de Klobuchar.....	44
4.5 NeQuick G.....	47
4.6 Determinação de TEC calibrado a partir de observações GNSS em dupla frequência.....	49
5 EXPERIMENTO I: AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO POR PONTO MULTI-GNSS.....	52
5.1 Metodologia.....	52
5.2 Resultados e discussões.....	56
5.2.1 Sistemas e frequências.....	56
5.2.2 Aumento na máscara de elevação.....	69

5.3 Considerações	72
6 EXPERIMENTO II: AVALIAÇÃO TEMPORAL DOS MODELOS DE KLOBUCHAR E NEQUICK G NO POSICIONAMENTO MULTI-GNSS NA REGIÃO BRASILEIRA	74
6.1 Metodologia	74
6.2 Resultados e discussões.....	76
6.3 Considerações	82
7 EXPERIMENTO III: AVALIAÇÃO SAZONAL DOS MODELOS DE KLOBUCHAR E NEQUICK G A NÍVEL GLOBAL	84
7.1 Metodologia	84
7.2 Resultados e discussões.....	85
7.2.1 Análise baseada nos Mapas Globais Ionosféricos	86
7.2.2 Análise baseada no domínio do atraso ionosférico	89
7.2.3 Análise baseada no domínio da posição	93
7.3 Considerações	95
8 CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

Os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* – Sistemas de Navegação Global por Satélite) vêm sendo cada vez mais utilizados em uma ampla variedade de aplicações que necessitam de estimativas de posição. Dentre os sistemas que compõem o GNSS pode-se destacar o GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*), Galileo e BeiDou (BDS - *BeiDou Navigation Satellite Demonstration System*), bem como os sistemas de aumento baseados tanto em estações terrestres quanto em satélites (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008; SEEBER, 2003).

O GPS é um sistema de radionavegação desenvolvido pelos Estados Unidos da América (EUA) a partir da década de 1970 e operacional desde 1995, em processo de modernização desde 2005. Devido a sua abrangência global e alta acurácia, tornou-se um meio de posicionamento amplamente utilizado (MONICO, 2008), contando atualmente com 31 satélites operacionais em órbita (GPS, 2019). Para a correção dos efeitos ionosféricos de primeira ordem que afetam o sinal transmitido pelos satélites, especialmente em receptores de simples frequência, oito coeficientes são enviados juntamente com as mensagens de navegação GPS, sendo estes parte do Modelo de Klobuchar, que corrige algo em torno de 50% do atraso ionosférico contido em observações de pseudodistância (HOBIER e JAKOWSKI, 2017; KLOBUCHAR, 1987).

O GLONASS, desenvolvido pela antiga União Soviética e hoje mantido pela Rússia, já contava com constelação completa em 1995. Após passar por um período sem manutenção no final da década de 1990 e início dos anos 2000, em que chegou a contar com menos de 10 satélites disponíveis (FEAIRHELLER e CLARK, 2006; REVNIVYKH et al., 2017), conta hoje com 26 satélites em órbita, dos quais 24 estão operacionais (IAC, 2019).

O sistema europeu Galileo, desenvolvido a partir da década de 1990 para fins civis, conta hoje com 22 satélites operacionais (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017). Para correção dos efeitos ionosféricos, as mensagens de navegação Galileo contêm três coeficientes, que devem ser aplicados no modelo NeQuick G para estimativa da densidade de elétrons na atmosfera e posterior correção do atraso ionosférico no sinal transmitido. De acordo com Radicella (2009) 70% do erro provocado pela ionosfera nas observações de pseudodistância é corrigido com a aplicação do modelo.

Integra ainda o GNSS o sistema chinês BDS. Iniciado na década de 1980, conta hoje com 21 satélites operacionais de cobertura global, além de satélites geossíncronos e geostacionários de cobertura regional (MGEX, 2019). Tanto o sistema Galileo quanto o BDS, se seguido o planejamento, devem ser declarados operacionais em 2020, quando contarão com constelação completa.

Devido a esse cenário do GNSS com diversos sistemas e sinais, a tendência no meio acadêmico e comercial tem sido o uso dos diversos sistemas em conjunto. Na literatura (BARTOLOMÉ, 2014; LI et al., 2015a; LI et al., 2015b; LOU et al., 2015; MONTENBRUCK et al., 2017; PAN et al., 2017; ODIJK, 2017; SETTI JÚNIOR, ALVES e GOUVEIA, 2016), diversas vantagens já vêm sendo citadas na utilização do uso conjunto dos sistemas, como a obtenção de um maior número de observações para o ajustamento, melhor geometria dos satélites (indicada pelo DOP (*Dilution of Precision* - Diluição de Precisão)), melhor cobertura em áreas de visibilidade restrita como os grandes centros urbanos, com possibilidade de aumento da máscara de elevação, e minimização dos erros sistemáticos inerentes a cada sistema.

Com relação aos modelos de Klobuchar e NeQuick G para correção do atraso ionosférico, alguns estudos já foram realizados. Falcone, Hahn e Burger (2017) apresentam resultados para diversas estações espalhadas pelo globo e processamento de dados do dia 21 de maio de 2015. Os resultados apontam um melhor desempenho do modelo NeQuick G em relação ao modelo de Klobuchar. Wang et al. (2016) comparou os modelos no domínio do atraso ionosférico no sinal para o ano de 2013, chegando à conclusão de que o modelo de Klobuchar corrige cerca de 57% do atraso ionosférico, e o NeQuick G cerca de 72%. Píríz et al. (2016) fez comparações para duas estações no hemisfério norte para os três primeiros meses de 2016. Os resultados apontaram que o NeQuick G, em comparação com o modelo de Klobuchar, apresentou melhorias significativas para latitudes médias (melhoria em torno de 23% na REQM (Raiz do Erro Quadrático Médio) do atraso ionosférico nas observações de pseudodistância), e poucas melhorias para baixas latitudes (melhoria de aproximadamente 3,5% na REQM). É também destacado o tempo de processamento exigido pelo NeQuick G, em torno de sessenta vezes maior que o modelo de Klobuchar. Angrisano et al. (2013) fez testes para três estações, uma no Canadá, uma na Itália e uma no Peru, e os resultados obtidos foram similares no domínio das coordenadas na utilização dos dois modelos.

Nesse sentido, estudos que busquem avaliar a performance do posicionamento multi-GNSS tornam-se de grande importância, especialmente nesse momento em que os

sistemas Galileo e BDS aproximam-se de contar com constelação completa. Além disso, estudos que avaliem a performance do modelo NeQuick G especificamente na região brasileira não foram apresentados na literatura.

1.1 Objetivos

A presente dissertação teve como objetivo avaliar a performance do posicionamento multi-GNSS, além de analisar o comportamento do modelo ionosférico NeQuick G, especialmente na região brasileira. A partir desses objetivos, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a estrutura e o estado-da-arte dos quatro sistemas globais de posicionamento por satélite (GPS, GLONASS, Galileo e BDS);
- Desenvolver um software que realize o Posicionamento por Ponto, com uso de pseudodistância nos diferentes sistemas e frequências (e suas combinações) e correção do atraso ionosférico pelos modelos de Klobuchar e NeQuick G;
- Analisar a qualidade do Posicionamento por Ponto considerando as diferentes constelações e sinais, bem como sua combinação no posicionamento multi-GNSS;
- Analisar a qualidade do modelo NeQuick G em relação ao modelo de Klobuchar a nível global e regional, considerando o comportamento sazonal da ionosfera.

1.2 Justificativa

Um dos principais temas tratados atualmente tanto em eventos científicos quanto em revistas internacionais relacionados à área de navegação por satélite é a interoperabilidade entre os sistemas GNSS, que compartilham frequências para que essa integração seja facilitada. Esses sistemas foram desenvolvidos de forma a garantir seu uso em conjunto. Assim, é de extrema importância que se desenvolvam estudos nesse sentido no Brasil, haja visto que, juntos, os quatro sistemas somam mais de 70 satélites orbitando a Terra, o que possibilitaria um maior número de observações para a estimativa da posição a partir do ajustamento e um aumento na máscara de elevação sem perda da quantidade mínima de satélites necessária. O uso combinado do GPS e GLONASS já tem sido abordado (JEREZ, 2017; MARQUES et al., 2018; SILVA e MARQUES, 2016), e a maioria dos receptores e softwares comerciais já se utiliza de ambos os sistemas. No entanto, referente ao uso do Galileo e BDS e até mesmo dos novos sinais GPS,

pouco se tem estudado no Brasil. No exterior, entretanto, o tópico já é algo muito explorado, como pode ser visto nos artigos científicos mais atuais. Outro aspecto relevante é que já existem dados disponíveis dos satélites Galileo e BDS em órbita, embora os sistemas ainda não tenham atingido constelação completa.

No que se trata do uso combinado GPS e Galileo, algumas pesquisas já foram realizadas e os resultados apresentados em Setti Júnior, Alves e Gouveia (2016) mostraram uma melhoria de até 22% na acurácia do posicionamento combinado em relação ao uso apenas da constelação GPS. Outro ponto que justifica essa dissertação é que não existem estudos sobre o uso do modelo NeQuick G para correção do atraso ionosférico na região brasileira e os resultados obtidos com a sua aplicação podem se mostrar superiores aos obtidos com o uso do difundido Modelo de Klobuchar, o que resultaria num avanço na acurácia obtida no posicionamento.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta de sete outros capítulos além da introdução aqui apresentada. No Capítulo 2, denominado de “Sistemas globais de posicionamento por satélite”, são apresentadas as principais características e estado-da-arte dos quatro sistemas globais (GPS, GLONASS, Galileo e BDS). O Capítulo 3, denominado de “Posicionamento por Ponto”, apresenta a equação de observação, bem como os modelos funcional e estocástico adotados para realização dos experimentos. No Capítulo 4, denominado de “Efeitos e modelos ionosféricos no GNSS”, é apresentada uma visão geral da ionosfera e seu efeito nos sinais GNSS, bem como uma descrição dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, associados respectivamente aos sistemas GPS e Galileo, e utilizados para correção do atraso ionosférico especialmente por usuários de simples frequência. Para cumprimento dos objetivos, três experimentos foram realizados e descritos em diferentes capítulos desta dissertação. O primeiro experimento, denominado de “Avaliação do Posicionamento por Ponto multi-GNSS” é apresentado e analisado no Capítulo 5. O Capítulo 6 descreve e analisa o segundo experimento, denominado de “Avaliação temporal dos modelos de Klobuchar e NeQuick G no posicionamento multi-GNSS na região brasileira” e, no Capítulo 7, são apresentados os resultados e análises obtidos no terceiro experimento, denominado de “Avaliação sazonal dos modelos de Klobuchar e NeQuick G a nível global”. No Capítulo 8 são apresentadas considerações, as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS GLOBAIS DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITE

Os sistemas de navegação global por satélite tiveram início na década de 1970, visando a determinação instantânea de posição, velocidade e tempo de um usuário, independentemente das condições atmosféricas e de sua localização no globo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Desenvolvidos de maneira concomitante e independente, o GPS e o GLONASS foram os sistemas pioneiros, sendo os únicos, atualmente, a dispor de constelação completa. Integram também o GNSS os sistemas Galileo e BDS, ambos em desenvolvimento. A Tabela 1 sumaria as principais características dos quatro sistemas globais, que serão detalhados em seguida.

Tabela 1 - Principais características dos sistemas GNSS

Parâmetro	GPS	GLONASS	Galileo	BDS
Desenvolvido por	EUA	Rússia	União Europeia	China
Constelação nominal	24	24+3	24+6	27 MEO
Satélites operacionais	31	24	22	21 MEO
Planos orbitais	6	3	3	3
Inclinação	55°	64,8°	56°	55°
Altitude (km)	20200	19100	23222	21500
Repetibilidade (dias siderais)	1	8	10	7
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
Identificação dos satélites	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Efemérides	Elementos keplerianos	P,V,T	Elementos keplerianos	Elementos keplerianos
Modelo Ionosférico	Klobuchar	-	NeQuick G	Klobuchar regional
Sistema de referência	WGS84	PZ-90	GTRF	CGCS2000

Fonte: Adaptado de Langley, Teunissen e Montenbruck (2017)

Com cobertura regional, o GNSS compreende ainda os sistemas de aumento baseados em satélites (SBAS – *Satellite-Based Augmentation System*), como o norte-americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*), o europeu EGNOS (*European Geostationary*

Navigation Overlay Service) e o indiano GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*), e em estações terrestres (GBAS – *Ground-Based Augmentation System*). Este capítulo apresenta uma visão geral dos quatro sistemas globais atualmente existentes.

2.1 Global Positioning System

O GPS, declarado operacional em 1995, é o sistema de navegação por satélite desenvolvido e operado pelos Estados Unidos da América. O sistema é composto por uma constelação nominal de 24 satélites em órbita terrestre média (MEO – *Medium Altitude Earth Orbit*), bem como por estações terrestres espalhadas pelo globo para monitorar e controlar os satélites (SEEBER, 2003).

Em relação às frequências, é utilizada a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), em que todos os satélites transmitem na mesma frequência e a identificação é dada por um código atribuído a cada satélite, denominado de PRN (*Pseudo Random Noise*).

Desde 1978, 67 satélites GPS foram colocados em órbita (HEGARTY, 2017), dos quais 31 estão operacionais (GPS, 2019). Durante esse período, o GPS passou por diversos projetos de modernização, tanto dos centros de controle quanto dos blocos de satélites. Dentre as principais mudanças ocorridas, vale destacar a desativação da disponibilidade seletiva (SA – *Selective Availability*) em maio de 2000, técnica esta que degradava intencionalmente os sinais transmitidos para uso civil como forma de segurança nacional (MONICO, 2008). Satélites GPS III não contam mais com a possibilidade de reativação da SA, tornando permanente a decisão tomada no ano 2000 (GPS, 2018).

Quanto aos sinais, inicialmente o sistema possuía apenas as portadoras L1 e L2, sendo que apenas o código P (*Precise or Protected* – Preciso ou Protegido), reservado para uso dos militares norte-americanos e usuários autorizados, era transmitido em L2 (SEEBER, 2003). Como resultado dos projetos de modernização, a partir do bloco IIR-M a portadora L2 passou a transmitir seu segundo sinal civil, denominado de L2C. Além disso, uma terceira portadora, denominada de L5, começou a ser transmitida no bloco IIF a partir de 2010, com o terceiro sinal civil L5C. Hoje, 19 satélites transmitem sinais em L2C e 12 com portadora L5 (GPS, 2019). Uma nova geração (GPS III) está em desenvolvimento e contará com um quarto sinal civil em L1 (L1C) (GPS, 2019). Um satélite GPS III foi lançado em dezembro de 2018, e está atualmente em fase de testes.

O segmento de controle inclui uma estação central, localizada no Colorado, EUA, além de uma rede global de estações de monitoramento e antenas terrestres. As estações monitoras contam com receptores GPS de alta precisão, que rastreiam os sinais GPS e enviam as observações para a estação central. Essa é então responsável por processar os dados recebidos e gerar estimativas de posição, velocidade, parâmetros de relógio para cada satélite da constelação, bem como previsões de tais valores para um determinado número de dias no futuro. Os dados gerados são então transmitidos para os satélites diariamente a partir da estação central (HEGARTY, 2017; HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

As informações de posição dos satélites e relógios são disponibilizadas a partir das efemérides. As efemérides transmitidas GPS trazem as coordenadas dos satélites expressas em elementos keplerianos, que demandam menor espaço em memória (MONICO, 2008). Nessas efemérides são também transmitidos coeficientes que descrevem a ionosfera a nível global e que podem ser utilizados para correção do atraso ionosférico por usuários de simples frequência pelo modelo de Klobuchar (seção 4.4). As efemérides precisas (ultrarápidas, rápidas e finais) são de responsabilidade do IGS (*International GNSS Service*), que reúne os dados de diversos centros de análise para produzir os arquivos.

O sistema de referência utilizado pelas efemérides transmitidas é o WGS84 (*World Geodetic System*). O sistema de tempo GPS é baseado em relógios atômicos das estações de controle, tendo como origem o dia 6,0 de janeiro de 1980, UTC (*Universal Time Coordinate*). Entretanto, o tempo GPS não é ajustado pelos saltos de segundos e a diferença com o TAI (Tempo Atômico Internacional) é de 19 segundos (HEGARTY, 2017; SEEBER, 2003).

2.2 GLObal NAVigation Satellite System

O GLONASS (cuja nomenclatura original é *GLObal'naya NAVigationnaya Sputnikowaya Sistema*), declarado operacional em 1995, é o sistema global desenvolvido pela antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) e atualmente mantido pela Rússia. De forma similar ao sistema norte-americano, foi criado para fins militares e posteriormente expandido para uso civil, conforme diversas declarações do governo russo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Devido ao ângulo de inclinação em relação ao equador maior que o do GPS (Tabela 1), a constelação GLONASS apresenta cobertura global um pouco diferente, podendo fornecer melhor cobertura para altas latitudes (SEEBER, 2003). Embora a constelação completa tenha

sido alcançada em 1995, o sistema passou por um longo período de decadência, sem novos lançamentos necessários devido à curta vida útil dos satélites e chegando a contar com sete satélites ativos em 2001 (FEAIRHELLER e CLARK, 2006; REVNIVYKH et al., 2017). A partir de 2002, teve início um plano de metas que visava o reestabelecimento da cobertura global e modernização do sistema, que conta hoje com 26 satélites em órbita, dos quais 24 estão ativos (IAC, 2019).

Em relação às frequências de transmissão dos sinais, na concepção original é utilizada a tecnologia FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada satélite transmite em uma frequência diferente, e cada satélite é identificado de acordo com a mesma (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Como nos primeiros satélites GPS, a portadora L1 possuía sinal civil e para usuários autorizados, enquanto que a segunda portadora apresentava apenas sinal para usuários autorizados (MONICO, 2008).

A partir da geração GLONASS-M, incluiu-se ao sistema um novo sinal civil na portadora L2 (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). Os satélites GLONASS-K1 passaram a transmitir, além dos sinais FDMA, uma nova portadora L3, CDMA, com sinal civil a uma frequência de 1202,025 MHz. A nova geração GLONASS-K2 contará com a tecnologia CDMA também nas portadoras L1 e L2 (REVNIVYKH et al., 2017).

A determinação de cada frequência FDMA é dada por (SEEBER, 2003):

$$f_L = f_0 + k \Delta f_L, \quad (2.1)$$

em que f_0 é a frequência fundamental, k é o canal atribuído a cada satélite e Δf_L representa a taxa de variação da frequência.

A relação entre as frequências das portadoras f_{L1} e f_{L2} , apresentada por Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), é dada por:

$$\frac{f_{L1}}{f_{L2}} = \frac{9}{7}. \quad (2.2)$$

A partir disso, e com os dados da Tabela 2, que apresenta os valores de f_0 e Δf das portadoras L1 e L2, determina-se a frequência de cada satélite da constelação.

O segmento de controle é composto pelo sistema de controle central, pela central responsável pela sincronização do tempo GLONASS e pelas estações monitoras. O sistema de controle central é localizado em Krasnoznamensk, 40 km ao sul de Moscou. É ele o responsável por planejar e coordenar todo o trabalho do segmento de controle.

Tabela 2 - Dados das ondas portadoras L1 e L2 GLONASS

	L1 (MHz)	L2 (MHz)
f_0	1602,0000	1246,0000
Δf	0,5625	0,4375

Fonte: Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008)

As estações de monitoramento, antes distribuídas apenas pelo território da antiga União Soviética, estão sendo expandidas por diversos países desde 2013 como parte do projeto de modernização do sistema. A primeira estação fora dessa região e primeira no Hemisfério Sul foi implantada no Brasil, na cidade de Brasília. Três estações foram também implantadas na Antártida. Estações em Cuba, Cazaquistão, outros países da América do Sul, África e Oceania estão em planejamento, para alcance da cobertura global (REVNIVYKH et al., 2017).

As informações de posição e tempo dos satélites da constelação gerados pelo segmento de controle são disponibilizadas aos usuários pelas efemérides transmitidas. Diferentemente do que é feito no sistema GPS, são fornecidas informações de posição, velocidade e aceleração dos satélites, causadas pelas perturbações gravitacionais do Sol e da Lua. Os valores são fornecidos em intervalos de trinta minutos, necessitando-se de interpolação para as demais épocas (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). As efemérides precisas finais GLONASS são produzidas e disponibilizadas desde 1998 seguindo o mesmo formato de arquivo das efemérides precisas GPS.

O sistema de referência utilizado nas efemérides transmitidas é o PZ-90 (*Parametry Zemli 1990*). O sistema de tempo GLONASS é relacionado ao UTC, com um *offset* constante de três horas, devido à diferença de fusos entre Moscou 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, LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

2.3 Galileo

A decisão do governo norte-americano de não autorizar outras nações a participarem da construção e manutenção do sistema GPS levou a União Europeia (UE), a partir da Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*) e da Comissão Europeia (EC – *European Commission*), a desenvolver uma solução própria para o GNSS (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017; MONICO, 2008). Diferentemente dos sistemas GPS e GLONASS,

que foram desenvolvidos para fins militares, a constelação Galileo surge como a primeira contribuição civil para o GNSS.

O desenvolvimento do sistema Galileo foi iniciado de fato em 2005, com o lançamento do primeiro satélite GIOVE (*Galileo In-Orbit Validation Element*) (GIOVE A). Esse satélite, juntamente com o segundo GIOVE (GIOVE B), lançado em 2008, assegurou as frequências designadas para o sistema e serviu como teste para as tecnologias empregadas, como os relógios atômicos utilizados e geração dos sinais de navegação (ESA, 2006; FALCONE, HAHN e BURGER, 2017). Tais satélites não estão mais ativos, e foram movidos para altitudes aproximadamente 100 km acima da órbita nominal Galileo (ESA, 2012).

O lançamento de dois satélites em 2011 e outros dois em 2012 marcaram a fase IOV (*In-Orbit Validation*), que com quatro satélites (mínimo necessário para determinação de posição e tempo) teve como objetivo performar validações iniciais do sistema e da rede de estações terrestres utilizando uma constelação reduzida em locais de teste. A primeira determinação de posição utilizando a constelação Galileo foi realizada em março de 2013 e, a partir desse momento, as mensagens de navegação Galileo vem sendo transmitidas continuamente (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017). Embora estes satélites tenham servido como IOV, eles integram hoje a constelação operacional do sistema.

A constelação Galileo, que conta atualmente com 26 satélites em órbita, 22 dos quais estão operacionais, segue rumo à fase FOC (*Full Operational Capability*), quando contará com os 30 satélites na constelação e que deve ser alcançada em 2020 (ESA, 2019).

Cada satélite Galileo transmite sinais em três frequências (Tabela 1) na técnica CDMA. É interessante notar que o sinal E1 é transmitido na mesma frequência que o sinal L1 GPS, e a sub-banda E5a utiliza-se da mesma frequência que a nova portadora L5 GPS.

Os sinais são utilizados para oferecer três tipos de serviço de posicionamento: OS (*Open Service*), que se utiliza da banda E1 e das sub-bandas E5a e E5b para posicionamento acessível ao público; PRS (*Public Regulated Service*) nas frequências E1 e E6, um serviço restrito a usuários autorizados pelo governo; e CS (*Commercial Service*) também na frequência criptografada E6. Como um quarto serviço, os satélites Galileo dão suporte ao Cospas-Sarsat, um serviço de busca e resgate internacional liderado pelos Estados Unidos, Rússia, Canadá e França, capazes de localizar sinais eletromagnéticos de emergência (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017; GSA, 2016). De acordo com Falcone, Hahn e Burger (2017), o sistema Galileo foi projetado para alcançar uma acurácia no serviço OS dupla frequência (E1/E5) de 4 m (95%) na horizontal e 8 m (95%) na vertical.

O segmento de controle Galileo é composto pelo GCS (*Ground Control Segment*), para controle da constelação, e pelo GMS (*Ground Mission Segment*), responsável pelas tarefas relacionadas aos serviços do sistema. O GCS desempenha todas as funções relacionadas à coordenação e controle dos satélites, e inclui uma rede global de estações para proporcionar cobertura global. O GMS, por sua vez, mede e monitora os sinais Galileo, gera as mensagens de navegação e as distribui aos satélites. Os centros GCS e GMS são localizados em Oberpfaffenhofen (Alemanha) e em Fucino (Itália), respectivamente. Dois outros centros, denominados de LOCC (*Launch and Early Operation (LEOP) Control Centers*), integram o segmento de controle, sendo responsáveis por controlar os satélites durante o lançamento, até que estes atinjam as órbitas desejadas (ESA, 2019; FALCONE, HAHN e BURGER, 2017).

Analogamente ao sistema GPS, as informações de posição dos satélites e relógios são disponibilizadas nas efemérides transmitidas, que trazem as coordenadas dos satélites expressas em elementos keplerianos. Nestas efemérides são também transmitidos coeficientes que descrevem a ionosfera a nível global, e que podem ser utilizados para correção do atraso ionosférico por usuários de simples frequência pelo modelo NeQuick G (seção 4.5). Efemérides precisas Galileo são produzidas e disponibilizadas pelo MGEX (*The Multi-GNSS Experiment and Pilot Project*).

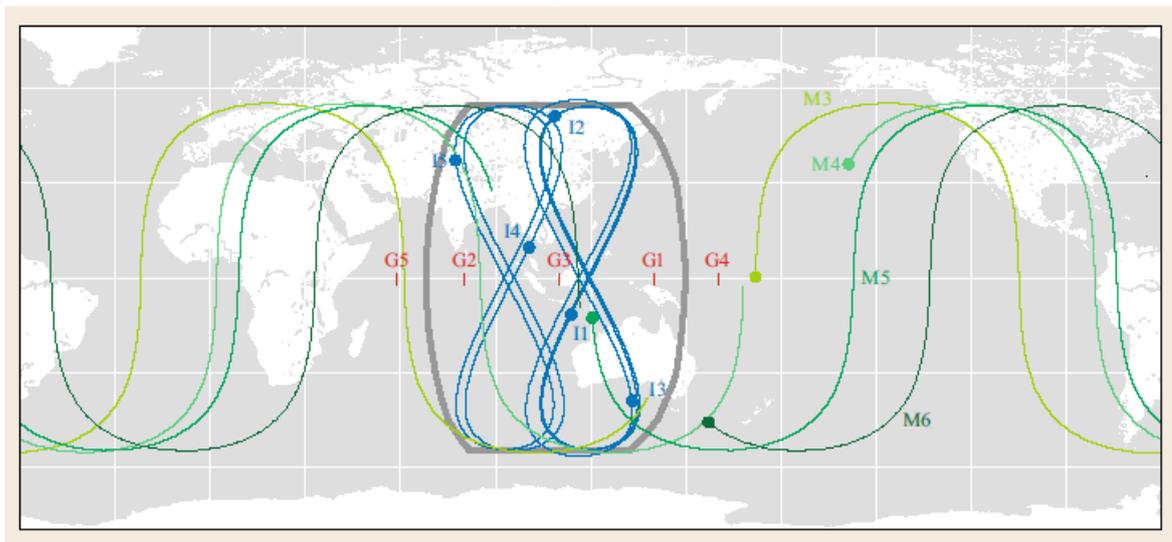
O Galileo estabeleceu seu próprio sistema de referência para efemérides transmitidas, denominado de GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*), que está alinhado ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) com respeito à origem, escala, orientação e taxas de variação (FALCONE, HAHN e BURGER, 2017). Quanto ao sistema de tempo, o Galileo adota o GST (*Galileo System Time*), gerado por relógios atômicos pelo segmento de controle, e que é definido como sendo idêntico ao sistema de tempo GPS (JEKELI e MONTENBRUCK, 2017). De acordo com Beard e Senior (2017), o GST tem origem em 00:00 UTC do dia 22 de agosto de 1999, estabelecido como estando 13 segundos à frente do UTC para estar consistente com o tempo GPS.

2.4 BeiDou Navigation Satellite Demonstration System

A China, nos anos 1980, decidiu construir seu próprio sistema de navegação por satélite em três fases. A primeira fase, denominada de *BeiDou Navigation Satellite Demonstration System* (BeiDou-1, ou BDS-1), se concretizou com o lançamento de três satélites geoestacionários nos anos de 2000 a 2003 para demonstração do sistema. Tais satélites

foram mais tarde substituídos por satélites da fase BDS-2, que correspondeu à fase regional do sistema, iniciada no ano de 2004 e declarada operacional em 2012 (LIU et al., 2014). Esta fase é composta por 14 satélites, sendo 5 deles de órbita geostacionária (GEO - *Geostationary Earth Orbit*), 5 de órbita geossíncrona (IGSO - *Inclined Geo-Synchronous Orbit*), e 4 de órbita MEO, recobrando todo o território chinês e outras partes da Ásia e do Pacífico (LIU et al., 2014; YANG, TANG e MONTENBRUCK, 2017). A terceira e última fase do sistema é composta por uma constelação global (BDS-3), e deve estar completa em 2020 (SUN et al., 2012; YANG, TANG e MONTENBRUCK, 2017). A Figura 1 ilustra a trajetória da constelação BDS em 1 de julho de 2014.

Figura 1 - Trajetória dos satélites GEO (vermelho), IGSO (azul) e MEO (verde) da constelação BDS em 1 de julho de 2014



Fonte: Yang, Tang e Montenbruck, 2017.

Quando completa, a constelação será composta por 5 satélites GEO, 27 MEO e outros 3 satélites IGSO. Serão transmitidos sinais abertos e autorizados em três frequências, denominadas de B1, B2, B3 (Tabela 1), além de uma quarta frequência, Bs, em 2483,5 – 2500 MHz (YANG, TANG e MONTENBRUCK, 2017). Hoje, a constelação conta com 21 satélites MEO operacionais (MGEX, 2019).

O segmento de controle BDS, denominado de OCS (*Operational Control System*) tem como principais funções estabelecer e manter o sistema de referência do sistema, denominado de CGCS2000 (*China Geodetic Coordinate System*) (YANG, 2009), manter o sistema de tempo, determinar órbitas precisas e previsões, prever atrasos dos relógios, monitorar, processar e prever atrasos ionosféricos, bem como determinar e transmitir para os

satélites mensagens de navegação. O OCS é composto por uma estação central, além de estações monitoras do tipo A (usadas para monitoramento de órbitas e atraso ionosférico) e do tipo B (responsáveis pelo serviço de aumento BDS e integridade), sendo a maior parte delas localizada em território chinês.

Analogamente aos sistemas GPS e Galileo, as informações de posição dos satélites e relógios são disponibilizadas a partir das efemérides transmitidas, trazendo as coordenadas dos satélites expressas em elementos keplerianos. Efemérides precisas BDS são produzidas e disponibilizadas pelo MGEX.

O sistema adota o sistema de tempo BDT (*BeiDou Time*), que tem como origem 00:00 UTC do dia 1 de janeiro de 2016, com um *offset* constante de 33 segundos em relação ao TAI (BEARD e SENIOR, 2017; JEKELI e MONTENBRUCK, 2017).

3 POSICIONAMENTO POR PONTO

A atividade de posicionamento consiste na determinação da posição de um objeto em relação a um referencial (MONICO, 2008). Dependendo do método empregado pode-se classificar o posicionamento de diversas formas. Se as coordenadas são determinadas em relação ao geocentro, tem-se o posicionamento absoluto, ou por ponto. Caso as coordenadas sejam estimadas com relação a um outro vértice de posição conhecida, tem-se o posicionamento relativo (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

De acordo com Odijk (2017), o Posicionamento por Ponto é caracterizado pela utilização de observações de pseudodistância medidas por um receptor e processadas visando determinar sua posição. É necessário que se conheça as posições e erros dos relógios dos satélites GNSS, que podem ser obtidos a partir das mensagens de navegação ou das efemérides precisas.

3.1 Equação de Observação

No Posicionamento por Ponto, a observável básica GNSS utilizada é a pseudodistância, dada para um instante de observação t , frequência j e constelação S por (ODJIK, 2017):

$$P_r^s = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) + T_r^s + c [dt_r(t) + d_{r,j}^s(t) + \Delta d_{r,j}^s(t)] - c [dt^s(t - \tau_r^s) + d_j^s(t - \tau_r^s)] + \mu_j^s I_r^s(t) + \varepsilon_{PD_{r,j}}^s, \quad (3.1)$$

em que P_r^s é a observação de pseudodistância (m), ρ_r^s é a distância geométrica entre o satélite e o receptor (m), τ_r^s é o tempo de propagação do sinal (s), T_r^s é o atraso troposférico (m), c é a velocidade da luz no vácuo (m/s), dt_r é o erro do relógio do receptor (s) em relação ao tempo do sistema S , $d_{r,j}^s$ é a tendência do código no hardware do receptor (s), $\Delta d_{r,j}^s$ é a tendência intercanal do código (s), dt^s é o erro do relógio do satélite (s) em relação ao tempo do sistema S , d_j^s é a tendência do código no hardware do satélite (s), μ_j^s é o coeficiente ionosférico, I_r^s é o atraso ionosférico (m) e $\varepsilon_{PD_{r,j}}^s$ representa os erros aleatórios na medida do código e outros erros não modelados.

A tendência no hardware do receptor ($d_{r,j}^s$) é, em princípio, diferente para cada constelação, mesmo quando os sinais são rastreados em bandas que se sobrepõem (L1 GPS e

El Galileo, por exemplo). Quando levada em consideração, tal tendência é denominada de ISB (*Intersystem bias*) (ODJIK, 2017; DALLA TORRE e CAPORALI, 2015). No caso da constelação GLONASS, que se utiliza da técnica FDMA, as observações de pseudodistância são ainda contaminadas pela tendência intercanal do código ($\Delta d_{r,j}^s$) (ICB – *interchannel bias*).

Na equação de observação de pseudodistância, o atraso ionosférico de primeira ordem é determinado para uma frequência, ou seja, $I_{r,j}^s = \mu_j^s I_r^s(t)$. Normalmente, I_r^s refere-se ao atraso na primeira frequência, definindo-se o coeficiente ionosférico para uma dada frequência j como:

$$\mu_j^s = \left(\frac{f_1^s}{f_j^s} \right)^2. \quad (3.2)$$

Alguns outros erros que afetam a medida de pseudodistância, como multicaminho e centro de fase da antena do satélite, foram desconsiderados em (3.1).

3.2 Cálculo dos erros dos relógios dos satélites e tendência diferencial do código

No Posicionamento por Ponto, os erros dos relógios dos satélites devem ser determinados. Quando as efemérides precisas são utilizadas, uma primeira correção a ser realizada devido ao movimento do relógio do satélite em relação ao receptor é a correção relativística (Δt_{rel}), dada por (KOUBA, 2009):

$$\Delta t_{rel} = -\frac{2}{c^2} \bar{X}_s \bar{V}_s, \quad (3.3)$$

em que \bar{X}_s é a posição do satélite e \bar{V}_s é a velocidade do satélite.

Outra correção a ser aplicada ao erro do relógio advindo das efemérides precisas é relacionada à tendência diferencial do código (DCB – *Differential Code Bias*), correção análoga ao TGD (*Time Group Delay*) nas efemérides transmitidas. Isso ocorre porque as observações de pseudodistância apresentam algumas tendências sistemáticas relacionadas a atrasos causados por componentes eletrônicas internas de hardware e que afetam todo o processo de geração, transmissão e processamento dos sinais (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014).

Devido a essa tendência, que não é acessível diretamente em sua forma absoluta, tem sido comum definir o erro do relógio com 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 BDS (DACH, MONTENBRUCK e PRANGE, 2014; GE et al., 2017).

Desta forma, pode-se redefinir a tendência do código do hardware do satélite (d_j^s) na equação (3.1) como (GE et al., 2017):

$$d_{P_1}^s = \frac{1}{\alpha-1} DCB_{P_1P_2}; \quad (3.4)$$

$$d_{P_2}^s = \frac{\alpha}{\alpha-1} DCB_{P_1P_2}, \quad (3.5)$$

em que $\alpha = f_1^2/f_2^2$, constante relacionada às frequências.

No caso, por exemplo, em que o código L1 C/A GPS é utilizado, deve-se ainda realizar uma outra correção, que relaciona a tendência de hardware entre o código P1 e C/A, e é dada por (ODIJK, 2017):

$$d_j^s = d_{P_1}^s - d_{C_1}^s = DCB_{1C}. \quad (3.6)$$

O mesmo princípio apresentado na equação (3.6) deve ser utilizado para outras frequências e sistemas, assim como para a tendência do código no hardware do receptor.

3.3 Modelo Funcional

Quando um receptor coleta simultaneamente observações de pseudodistância de quatro ou mais satélites visíveis, pode-se estimar sua posição tridimensional. Nessas condições, cada observação coletada por um receptor gera uma equação que comporá o sistema de equações do método paramétrico, com base na equação de pseudodistância (3.1).

O erro do relógio do receptor no tempo de recepção deve ser estimado juntamente com a posição no processo de ajustamento das observações de pseudodistância. Na realidade, o erro do relógio estimado é uma combinação do erro verdadeiro do relógio, somado ao atraso de hardware do receptor, uma vez que ambos os termos não podem ser separados, ou seja (ODIJK, 2017):

$$dt_{r,j}^s(t) = dt_r(t) + d_{r,j}^s. \quad (3.7)$$

Para realizar o posicionamento é necessário calcular a órbita (X^s, Y^s, Z^s) e o erro do relógio do satélite no instante de transmissão do sinal corrigido dos efeitos relativísticos e atraso de hardware do satélite (seção 3.2), além de corrigir os efeitos sistemáticos envolvidos nas

medidas, como o atraso troposférico e o atraso ionosférico. A distância geométrica é calculada a partir da diferença das coordenadas do satélite (no instante de transmissão) e do receptor (X_r , Y_r , Z_r) a partir de (MONICO, 2008):

$$\rho_r^s(t, t - \tau_r^s) = \sqrt{(X^s(t - \tau_r^s) - X_r)^2 + (Y^s(t - \tau_r^s) - Y_r)^2 + (Z^s(t - \tau_r^s) - Z_r)^2}. \quad (3.8)$$

A linearização da equação de pseudodistância, considerando o receptor r e o satélite s será então dada por (MARQUES, 2012; MONICO, 2008; ODJIK, 2017):

$$E \{ \Delta PD_r^s \} = - \frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} (\Delta X_r) - \frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} (\Delta Y_r) - \frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} (\Delta Z_r) + c(dt_{r,j}^s), \quad (3.9)$$

em que ΔPD_A^j representa a diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para pseudodistância), $(\rho_r^s)^0$ é a distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados e $E \{ . \}$ representa operador de esperança matemática.

Os termos $(\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r \text{ e } dt_{r,j}^s)$ são as correções aos parâmetros incógnitos (coordenadas do receptor e erro do relógio). A diferença entre a pseudodistância observada e a calculada pode ser representada por $L = L_0 - L_b$.

A equação (3.9) linearizada pode então ser escrita na forma matricial por:

$$E [\Delta PD_r^s] = AX = \begin{bmatrix} -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ c(dt_{r,j}^s) \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10), os fatores c (velocidade da luz) e $dt_{r,j}^s$ ficam juntos em um só produto por razões numéricas. As três primeiras colunas da matriz A contêm os cossenos diretores para o vetor entre o receptor e o satélite e, dessa forma, todos os coeficientes dessa matriz devem ter valores menores ou iguais ao módulo de 1.

Quando mais de um sistema é utilizado no posicionamento, o erro do relógio do receptor é dado 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 acrescida como novos parâmetros a serem determinados no ajustamento. Se o erro do relógio do receptor é dado em função do sistema S , o erro do relógio para um sistema G será dado por (ODJIK, 2017):

$$dt_{r,j}^G(t) = dt_{r,j}^S(t) + \Delta dt_{r,j}^{G,S}. \quad (3.11)$$

Deste modo, o número de parâmetros a ser estimado é igual a $3 + i$, sendo i o número de sistemas utilizados.

3.4 Modelo Estocástico

A maior parte dos erros contidos nas observações GNSS (atraso troposférico, atraso ionosférico, multicaminho) está relacionada ao ângulo de elevação dos satélites em relação ao plano do observador. Para diminuição de tais erros, modelos estocásticos baseados no ângulo de elevação dos satélites podem ser definidos, normalmente baseados em funções trigonométricas e exponenciais. Uma das funções mais utilizadas é a do seno, dada por:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_0^2}{\text{sen}^2 \theta}, \quad (3.12)$$

em que θ é o ângulo de elevação do satélite e σ_0^2 representa a variância a priori das observações. Como valor a priori, Cai et al. (2015) e Kazmierski et al. (2018) propõem a utilização de um desvio padrão de 0,30 m.

3.5 Diluição da Precisão

O cálculo do DOP indica a qualidade da geometria dos satélites acima do horizonte no momento de coleta (LANGLEY, 1999). Quando quatro satélites são utilizados, o DOP posicional (PDOP) pode ser interpretado como o inverso do volume de um tetraedro formado pelas posições do usuário e dos satélites por ele observados (MONICO, 2008). A melhor geometria, então, ocorre quando o volume é maximizado, o que implica um PDOP mínimo.

O mesmo conceito pode ser derivado do ajustamento das observações GNSS pelo método dos mínimos quadrados a partir da MVC dos parâmetros no Posicionamento por Ponto (LANGLEY, 1999; MONICO, 2008), propagada para o sistema local (MARQUES, 2012; JEKELI, 2002; SEEBER, 2003). Surge daí diversos tipos de DOP, que são dados por (MONICO, 2008):

$$\text{Geométrico:} \quad \text{GDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_{cdt_r}^2}; \quad (3.13)$$

$$\text{Horizontal:} \quad \text{HDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}; \quad (3.14)$$

$$\text{Posição:} \quad \text{PDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2}; \quad (3.15)$$

$$\text{Vertical:} \quad \text{VDOP} = \sigma_u; \quad (3.16)$$

$$\text{Tempo:} \quad \text{TDOP} = \sigma_{\text{cdt}_t}. \quad (3.17)$$

Na prática, verifica-se que a geometria ideal é alcançada quando o valor de PDOP é inferior a 5 ou 6 (BORRE et al., 2007; LANGLEY, 1999).

3.6 Controle de Qualidade

A etapa do controle de qualidade tem como objetivo estabelecer e assegurar a qualidade da solução encontrada, uma vez que nesta podem estar contidos erros não modelados nas observações ou ainda *outliers*. Assim, a partir dele é possível verificar o quanto as observações são consistentes com o modelo adotado, além de detectar a presença de erros grosseiros para que em seguida possa ocorrer a adaptação do modelo.

O controle de qualidade pode ser dividido em três etapas: detecção, identificação e adaptação, usualmente denominadas de DIA (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001).

3.6.1 Detecção

Na etapa da detecção, o modelo é testado para diagnosticar possíveis erros nas observações. Para verificação da validade da solução obtida, pode-se utilizar a estatística Qui-quadrado, por meio de um teste estatístico, conhecido como teste Qui-quadrado (GEMAEL, 1994), ou Teste Global do Modelo ou teste n-dimensional (TEUNISSEN, 1985), baseado na variância a priori (σ_0^2) e a variância a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) obtida do ajustamento com m observações e n parâmetros:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{m-n}. \quad (3.18)$$

O teste leva a formulação de duas hipóteses: a hipótese nula e a alternativa:

$$H_0: E\{\hat{\sigma}_0^2\} = \sigma_0^2; \quad (3.19)$$

$$H_1: E\{\hat{\sigma}_0^2\} > \sigma_0^2. \quad (3.20)$$

As hipóteses formuladas descrevem que, na hipótese básica H_0 , os fatores de variância a posteriori e a priori são estatisticamente iguais, contra uma hipótese alternativa H_1 , que supõe que a variância a posteriori é maior que a priori. Para a validação de uma das hipóteses, compara-se o valor calculado por:

$$T = \chi_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (m-n), \quad (3.21)$$

que tem distribuição Qui-quadrado, com $(m - n)$ graus de liberdade, com os valores teóricos da distribuição Qui-quadrado.

A hipótese básica não é rejeitada, ao nível de significância α , no teste estatístico, se:

$$T < \chi_{m-n, 1-\alpha}^2. \quad (3.22)$$

Caso contrário, o resultado obtido indica que há problemas no ajustamento. Uma vez que tenha sido detectado algum erro, a identificação do mesmo deve ser realizada.

3.6.2 Identificação

A etapa da identificação visa localizar a possível fonte do erro responsável pela rejeição na etapa da detecção; isto é feito a partir de uma procura entre todos os candidatos. A identificação pode ser realizada com base no teste *data snooping* desenvolvido por Baarda, a partir do cálculo das correções normalizadas (W) dadas por (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998):

$$W = \frac{C^T P C}{\sqrt{C^T P \Sigma_V P C}}, \quad (3.23)$$

em que o vetor C é a redundância parcial, P é a matriz dos pesos e Σ_V a MVC dos resíduos.

O vetor C é um vetor n -dimensional que contém elementos unitários para as observações a serem testadas e zero para as outras posições. O numerador da equação (3.23) representa o resíduo transformado e o denominador o erro estimado. Quando a MVC das observações tem estrutura diagonal, a equação (3.23) pode ser representada por:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}}, \quad (3.24)$$

em que w_i é a correção normalizada da i -ésima observação, v_i representa o resíduo e σ_{v_i} é o desvio padrão do respectivo resíduo, considerando que a MVC dos resíduos é calculada com o fator de variância a priori.

A estatística w_i tem como distribuição a raiz quadrada da distribuição F com graus de liberdade igual a 1 e ∞ , ou seja, $\sqrt{F_{\alpha}(1, \infty)} = N_{\frac{\alpha}{2}}(0, 1) = \sqrt{\chi_{\alpha, 1}^2}$. Logo (TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001):

$$w_i \sim N_{\frac{\alpha}{2}}(0, 1). \quad (3.25)$$

A partir disso, é formulada a hipótese básica, em que a observação i não contém erro, e a hipótese alternativa, que supõe o oposto:

$$H_0: \nabla_i = 0; \quad (3.26)$$

$$H_1: \nabla_i \neq 0. \quad (3.27)$$

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

$$-\sqrt{\chi_{\alpha_0, 1}^2} < w_i < \sqrt{\chi_{\alpha_0, 1}^2}. \quad (3.28)$$

Caso contrário, a observação i contém erro, e alguma adaptação deve ser realizada. Como o teste é realizado para cada observação separadamente, mais de um resíduo pode exceder os valores críticos. Neste caso, exclui-se a observação que contém a maior estatística.

3.6.3 Adaptação

A etapa da adaptação visa eliminar a influência da observação em que foi identificada a existência de erro, podendo ser realizada de diversas maneiras (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998). A maneira mais simples de eliminar tal influência é a partir da exclusão da observação do modelo matemático e posterior repetição do ajustamento.

4 EFEITOS E MODELOS IONOSFÉRICOS NO GNSS

Os sinais GNSS estão sujeitos a diversos efeitos que degradam o posicionamento, desde o satélite (órbita, relógio, relatividade, atraso de hardware, centro de fase da antena, fase *wind-up*), à propagação do sinal (refração troposférica, refração ionosférica, perda de ciclos, multicaminho, rotação da Terra), ao receptor (relógio, canais, centro de fase da antena, atraso de *hardware*, fase *wind-up*) até efeitos que afetam a própria estação (coordenadas, multicaminho, marés terrestres, movimento do polo, carga oceânica, pressão atmosférica) (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Os sinais emitidos pelos satélites propagam-se através da atmosfera terrestre até atingir o receptor. Nesse caminho, são afetados por diferentes regiões atmosféricas de diferentes naturezas e estados variáveis, causando variações na direção e velocidade de propagação, na polarização e potência do sinal (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003). Uma dessas regiões é a ionosfera, que causa o erro de maior magnitude nas observações GNSS.

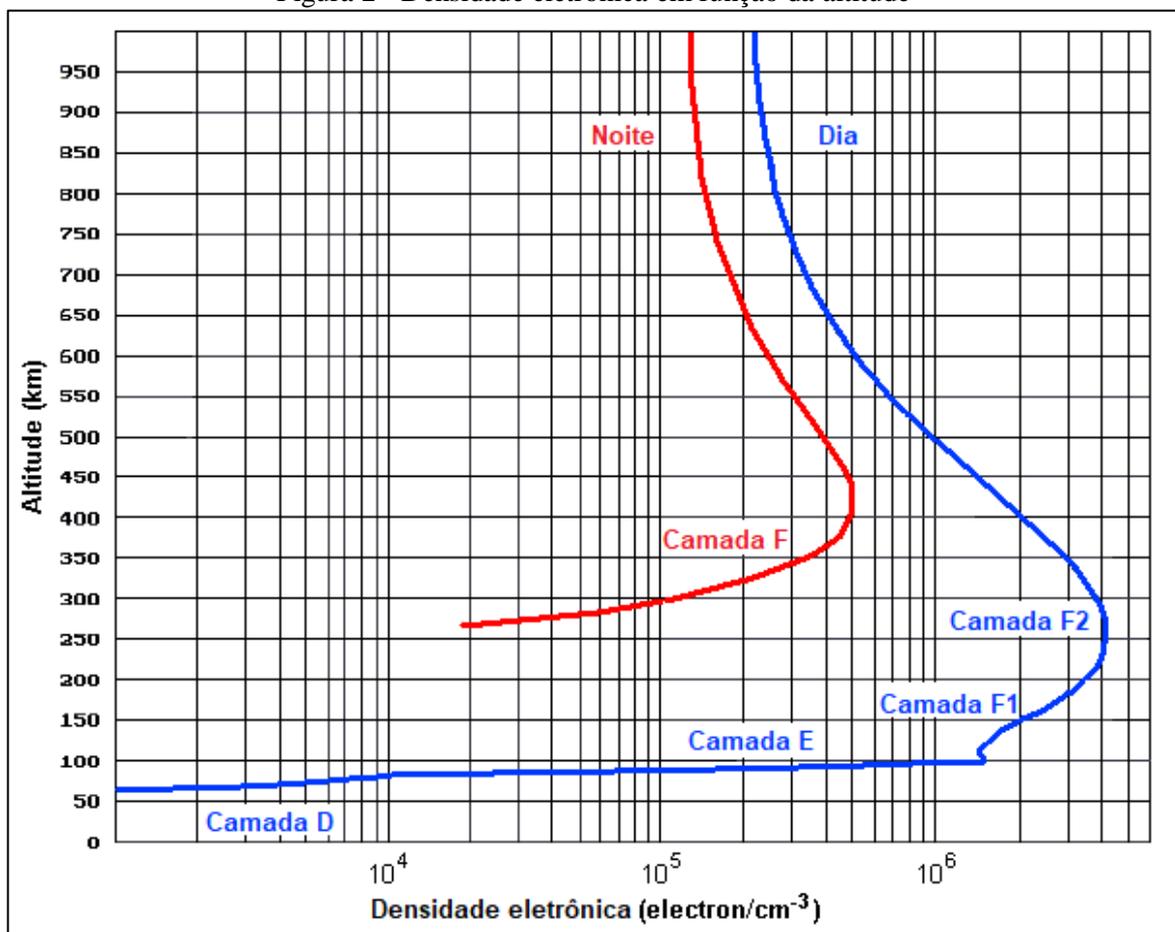
A ionosfera é a camada da atmosfera terrestre que varia de aproximadamente 50 a 1000 km de altitude (SEEBER, 2003), sendo definida como a parte da atmosfera superior onde existe ionização suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). Trata-se de um meio dispersivo, o que significa que, neste meio, a propagação de sinais depende da frequência do sinal (MONICO, 2008). Os efeitos da ionosfera no posicionamento são proporcionais ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, ao número de elétrons presente na atmosfera no raio vetor (coluna com seção transversal de um metro quadrado) entre um determinado satélite e o receptor. O TEC é dado em elétrons/m² (el/m²), porém é comum adotar-se a unidade TECU (*TEC Unit* – Unidades de TEC) devido à ordem de grandeza dos valores ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$).

4.1 Estrutura da Ionosfera

Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização, que consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, pelos principais constituintes da atmosfera superior (O, O₂, N, N₂, NO). De maneira menos intensa, raios cósmicos e partículas de energia originadas dos ventos solares podem também contribuir para a ionização ionosférica (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017).

À medida que a radiação solar penetra na atmosfera mais densa, a produção de elétrons aumenta até um nível em que a densidade de elétrons é máxima. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, uma vez que a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida. Dessa forma, devido às diferentes taxas de absorção e aos diferentes constituintes atmosféricos, distintas regiões são formadas na ionosfera, denominadas de camadas D, E e F (Figura 2), sendo esta última subdividida em F1 e F2 (FEDRIZZI, 1999; McNAMARA, 1991).

Figura 2 - Densidade eletrônica em função da altitude



Fonte: Adaptado de <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-hf-tutorial-nm7m3.htm>

A camada D, conhecida também como baixa ionosfera, situa-se na parte inferior da ionosfera, aproximadamente entre 50 e 85 km de altura, com concentração máxima de elétrons por volta de 80 km (DAVIES, 1990) e densidade da ordem de 10^3 el/cm^3 . Esta camada é produzida pela ionização de várias espécies de moléculas, por ser a parte da ionosfera mais densa em elementos neutros. Não apresenta, entretanto, efeitos mensuráveis nas frequências GNSS.

A camada E, situada aproximadamente entre 85 e 140 km de altura, é a região de máxima condutividade elétrica ionosférica, sendo importante devido à presença das correntes elétricas ionosféricas e à interação destas correntes com o campo geomagnético. A concentração máxima de elétrons atinge um valor aproximado de 10^5 el/cm³. Embora não desapareça completamente à noite, assume-se geralmente, para efeitos práticos, que a densidade de elétrons cai para zero no período noturno (KOMJATHY, 1997).

A camada F, por sua vez, situa-se aproximadamente entre 140 e 1000 km de altura, sendo subdividida nas camadas F1 e F2. A camada F1 está compreendida entre 140 e 200 km, apresentando uma concentração de elétrons que varia entre $2,5 \times 10^5$ e $4,0 \times 10^5$ el/cm³, proporcionalmente ao número de manchas solares. De acordo com Klobuchar (1987), esta região, combinada à E, pode totalizar até 10% do atraso ionosférico.

A camada F2, produzida principalmente por meio de ionização do átomo de oxigênio (KLOBUCHAR, 1987), está situada entre aproximadamente 200 e 1000 km de altura, com pico de densidade de elétrons entre 300 e 450 km e densidade de elétrons podendo chegar a $5,2 \times 10^{11}$ el/cm³ nas latitudes médias (KOMJATHY, 1997). Esta camada apresenta uma característica difusa devido à concentração de elétrons. Este fenômeno é denominado de *spread F* e ocorre principalmente à noite, provocando uma variação na densidade de elétrons, com uma consequente cintilação nos sinais de rádio (JOHNSON, 1965). A camada F2 é a que apresenta a maior variabilidade da ionosfera, causando a maioria dos efeitos mais intensos nos sinais GNSS.

É ainda válido mencionar que a ionosfera se comporta de forma distinta durante os períodos diurno e noturno (Figura 2). A diferença básica consiste na queda na densidade de elétrons durante a noite, devido à ausência de radiação solar. A Tabela 3 resume as características das camadas ionosféricas, dando destaque para a diferença de concentração máxima de elétrons nos períodos diurno e noturno.

Tabela 3 - Características das camadas ionosféricas

Camada	Início e término da camada (km)	Concentração máxima de elétrons (el/cm³) (dia)	Concentração máxima de elétrons (el/cm³) (noite)
D	60 – 85	$10^2 - 10^4$	-
E	85 – 140	10^5	2×10^3
F1	140 – 200	5×10^5	10^3
F2	200 - 1000	10^6	3×10^5

Fonte: SEEBER (2003)

Embora tenha sido apresentada a estrutura da ionosfera em função da altura, deve-se ainda lembrar que ocorrem também variações em cada uma das camadas em função da latitude.

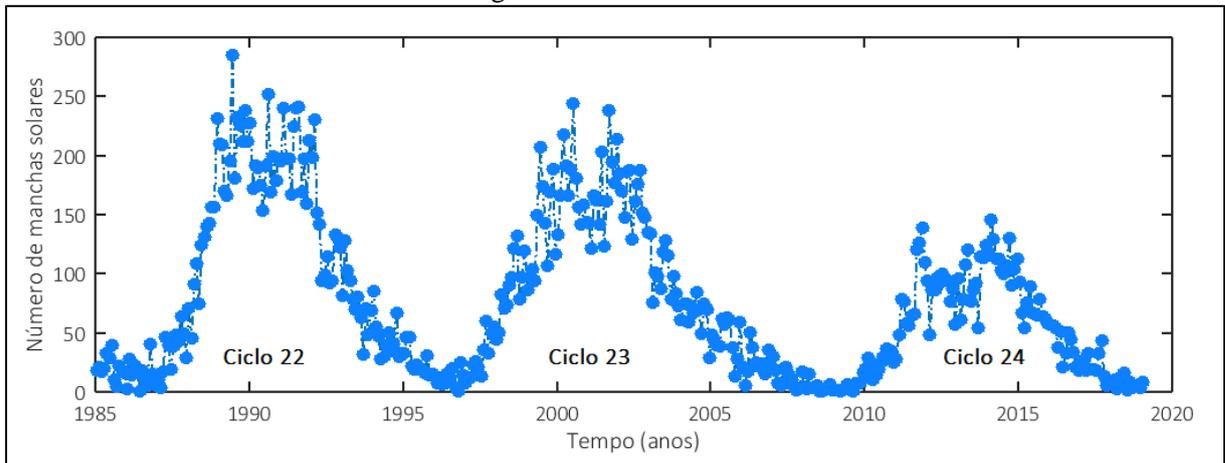
4.2 Variações da densidade de elétrons

A densidade de elétrons varia no tempo e no espaço tendo relação com o fluxo de ionização solar, atividade magnética, estação do ano, localização no globo e ciclos de manchas solares (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008). As variações temporais se dividem em variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos (MONICO, 2008). As variações diurnas ocorrem devido a mudanças em regiões da ionosfera causadas por recombinações de elétrons e íons. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12 e 16 horas locais (WEBSTER, 1993). As mudanças sazonais estão relacionadas às variações na densidade de elétrons causadas pela mudança do ângulo zenital do sol e pelo fluxo de ionização, que mudam devido às estações do ano e movimento aparente do sol em relação à Terra.

Os ciclos de longo período correspondem aos ciclos solares, que ocorrem em intervalos de aproximadamente 11 anos (Figura 3), estando associados às manchas solares (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008). As manchas solares, que podem durar alguns dias ou semanas, correspondem a regiões mais frias e escuras na superfície do sol, em volta das quais existe um elevado nível de radiação ultravioleta. Um aumento nesse número de manchas provoca um aumento na radiação solar. O valor do TEC é proporcional ao aumento de atividade solar. Em períodos de máxima atividade, o TEC máximo diurno pode atingir valores até 50% maiores do que em períodos de mínima atividade (BEARD, 1975 apud FEDRIZZI, 2003).

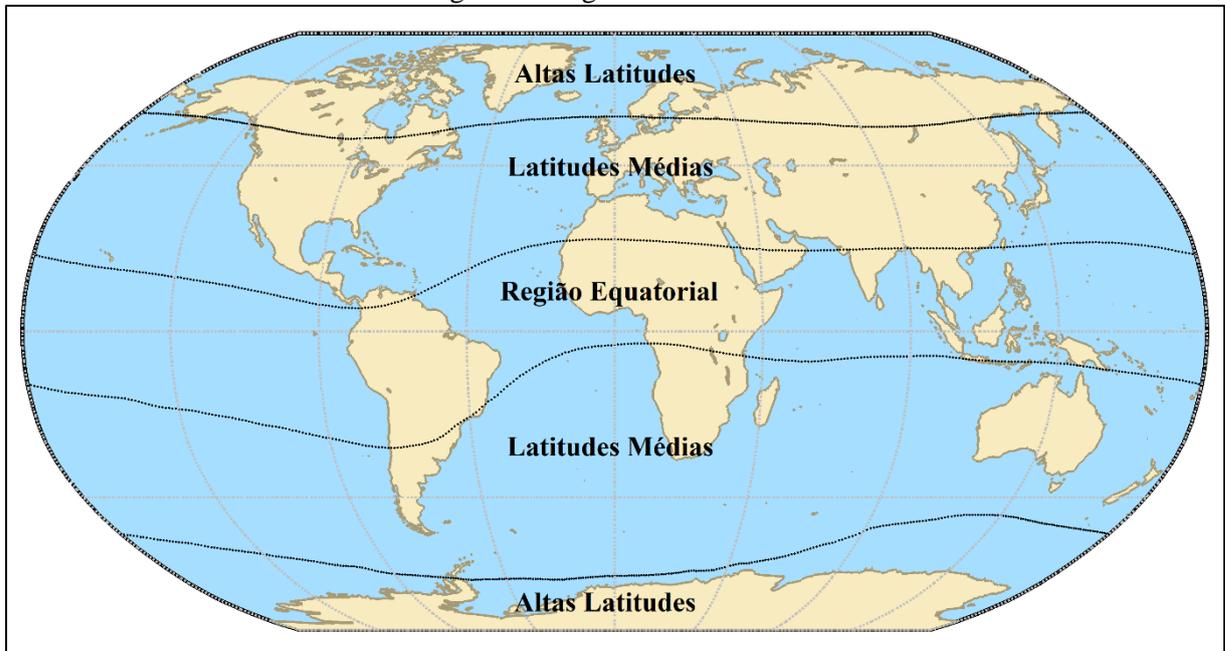
Quanto à localização geográfica, os níveis de densidade de elétrons são mais intensos nas regiões equatoriais, enquanto que as latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, e as regiões polares são de difícil previsão (MONICO, 2008). A Figura 4 ilustra as regiões da ionosfera de acordo com o equador geomagnético. Nota-se que o Brasil se encontra em uma região privilegiada para estudos sobre o tema, já que grande parte de seu território se encontra na região equatorial.

Figura 3 - Ciclos solares



Fonte: Adaptado de SIDC (2019)

Figura 4 - Regiões da ionosfera



Ocorre também na ionosfera o efeito fonte, que nada mais é do que a elevação do plasma com posterior descida ao longo das linhas do campo geomagnético, até alcançar baixas latitudes. O efeito de subida e descida do plasma causa dois picos de ionização nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10 e 20° de latitude, tornando a ionização no equador menos intensa (anomalia equatorial) (MONICO, 2008).

Ainda, o campo geomagnético pode sofrer influência das atividades solares, como explosões e manchas solares. Esses ventos podem causar os chamados ventos solares que podem afetar as linhas de força do campo geomagnético, fazendo com que as mesmas sejam

comprimidas. Em decorrência disso podem ocorrer tempestades geomagnéticas que originam tempestades ionosféricas (DAVIES, 1990).

Na ionosfera pode acontecer também o efeito denominado de cintilação ionosférica. Trata-se de rápidas flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons e, conseqüentemente, do índice de refração (CONKER et al., 2003; MONICO, 2008; VAN DIERENDONCK, 1999, 2001). A cintilação, relacionada às bolhas ionosféricas, causa enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra, em muitos casos, a perda do sinal. As bolhas ionosféricas ocorrem sempre após o pôr do sol e sobretudo no período noturno até à meia-noite, podendo em algumas fases do ano durarem a noite toda até o amanhecer (MONICO, 2008).

4.3 Efeitos da Ionosfera nos sinais GNSS

Os efeitos da ionosfera nos sinais GNSS ocorrem de maneira distinta, causando um avanço na fase e um atraso no grupo (CAMARGO, 1999; LEICK, 2004). A densidade de elétrons ao longo do caminho entre o receptor (r) e o satélite (s), que representa o TEC, é dada por:

$$\text{TEC} = \int_r^s n_e ds, \quad (4.1)$$

em que n_e é o índice de refração da fase ou do grupo.

O erro devido à refração ionosférica na pseudodistância ($I_{p_r}^s$) e na fase ($I_{f_r}^s$) podem ser representados respectivamente por (CAMARGO, 1999):

$$I_{p_r}^s = +\frac{A}{f^2} \text{TEC}; \quad (4.2)$$

$$I_{f_r}^s = -\frac{A}{f^2} \text{TEC}, \quad (4.3)$$

em que $A = 40,3 \text{ m}^3/\text{s}^2$.

O erro devido à ionosfera relacionado com o código ($I_{p_r}^s$) é usualmente denominado de atraso ionosférico, ou atraso do grupo. De acordo com as equações (4.2) e (4.3), verifica-se que o erro devido à ionosfera, seja ele atribuído para a fase da onda portadora ou para os sinais

modulados pelo código, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera.

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, calculada pelas expressões (4.2) e (4.3) representa somente o efeito de primeira ordem da ionosfera. O erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 2003). A Tabela 4 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras L1 e L2 GPS e para a combinação linear L0, livre da ionosfera (*ion-free*). Para direções inclinadas, o erro devido à ionosfera pode aumentar em até três vezes.

Tabela 4 - Efeito sistemático máximo provocado pela ionosfera na direção vertical

Frequência	Efeito de 1ª ordem (1/f²) (m)	Efeito de 2ª ordem (1/f³) (m)	Efeito de 3ª ordem (1/f⁴) (m)
L1	32,5	0,036	0,002
L2	53,5	0,076	0,007
L0	0,0	0,026	0,006

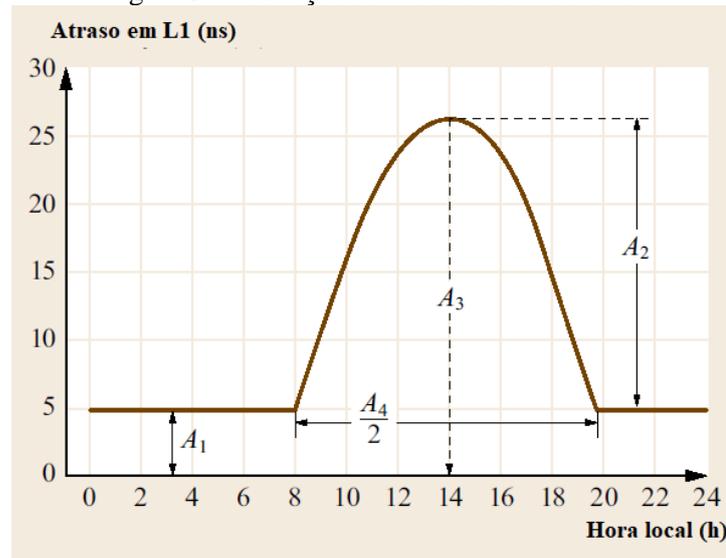
Fonte: Seeber (2003)

A minimização dos efeitos da ionosfera no posicionamento pode ser feita de diversas maneiras. Se disponíveis dados de dupla frequência, pode ser realizada a combinação linear *ion-free* das observáveis, na qual os efeitos de primeira ordem da ionosfera são eliminados (MONICO, 2008). No caso de receptores de simples frequência, os mapas regionais ou globais da ionosfera, ou os modelos de Klobuchar e NeQuick G, por exemplo, podem ser utilizados visando estimar o atraso ionosférico contido nas observações GNSS.

4.4 Modelo de Klobuchar

O GPS fornece coeficientes para correção do atraso ionosférico no modelo de Klobuchar. O modelo depende da frequência do sinal, sendo seu atraso calculado na frequência L1 para um determinado ponto geomagnético e hora local (KLOBUCHAR, 1987). As variações diurnas do atraso são modeladas por uma função semi-cosseno, variando em amplitude e período, dependendo da hora local e da latitude geomagnética (Figura 5). Durante a noite, o atraso vertical é fixado em 5 ns (1,5 m em L1).

Figura 5 - Ilustração do modelo de Klobuchar



Fonte: Adaptado de Hobiger e Jakowski (2017)

O atraso final entre o satélite e o receptor em L1 é calculado da seguinte forma (KLOBUCHAR, 1987): inicialmente, deve-se conhecer a latitude φ e longitude λ do receptor, bem como o azimute A e o ângulo E de elevação do satélite e a época de observação. Então, calcula-se o ângulo formado a partir do geocentro entre o receptor e o ponto ionosférico (ponto formado pela intersecção do vetor satélite/receptor e a camada ionosférica de altitude média igual a 350 km para o modelo) pela seguinte relação:

$$\psi = \frac{0,0137}{E + 0,11} - 0,022. \quad (4.4)$$

Calcula-se a latitude do ponto ionosférico, que tem seu valor condicionado ao intervalo $-0,416 \leq \varphi_I \leq 0,416$:

$$\varphi_I = \varphi + \psi \cos(A),$$

$$\varphi_I = \begin{cases} 0,416, & \text{se } \varphi_I > 0,416 \\ -0,416, & \text{se } \varphi_I < -0,416 \end{cases}. \quad (4.5)$$

Em seguida, calcula-se a longitude sub-ionosférica (longitude geodésica do ponto ionosférico):

$$\lambda_I = \lambda + \frac{\psi \sin(A)}{\cos(\varphi_I)}. \quad (4.6)$$

Calcula-se, então, a latitude geomagnética do ponto ionosférico:

$$\Phi_m = \varphi_I + 0,064 \cos(\lambda_I - 1,617) . \quad (4.7)$$

Obtém-se o tempo local do ponto ionosférico para a época de observação, cujo valor deve estar no intervalo $0 \leq t \leq 86400$:

$$t = 4,32 \cdot 10^4 \lambda_I + t_{GPS} \\ t = \begin{cases} t - 86400, & \text{se } t > 86400 \\ t + 86400, & \text{se } t < 0 \end{cases} . \quad (4.8)$$

Calcula-se o fator de inclinação, que relaciona o atraso ionosférico vertical com o ângulo de elevação do satélite:

$$F = 1 + 16(0,53 - E)^3 . \quad (4.9)$$

Posteriormente, o período do atraso ionosférico é calculado por:

$$P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \Phi_m^n \quad (4.10)$$

$$P = 72000, \text{ se } P \leq 72000 .$$

Em seguida, calcula-se a fase do modelo:

$$x = \frac{2\pi(t - 14 \times 3600)}{P} . \quad (4.11)$$

Então, calcula-se a amplitude:

$$A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \Phi_m^n \quad (4.12)$$

$$A = 0, \text{ se } A < 0 .$$

Finalmente, calcula-se o atraso ionosférico para L1 em metros:

$$I_r^s = \begin{cases} c F \left[5 \cdot 10^9 + A \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right], & \text{se } |x| < 1,57 \\ c F (5 \cdot 10^9), & \text{se } |x| > 1,57 \end{cases} . \quad (4.13)$$

Embora o modelo tenha sido criado para estimativa do atraso ionosférico na frequência L1, esse pode ser convertido para outras frequências GNSS a partir da relação (KLOBUCHAR, 1987):

$$I_f = \left(\frac{f_{L1_{GPS}}}{f} \right)^2 I_{L1_{GPS}}, \quad (4.14)$$

em que I_f representa o atraso ionosférico para a frequência f desejada, $f_{L1_{GPS}}$ é a frequência L1 GPS e $I_{L1_{GPS}}$ é o atraso estimado para a frequência L1.

Nos procedimentos descritos, deve-se considerar os ângulos dados em semicírculos. Os coeficientes α_n e β_n , conhecidos como ion alpha e ion beta, são obtidos no cabeçalho dos arquivos de navegação do sistema GPS.

Segundo a literatura, o modelo de Klobuchar pode remover algo em torno de 50 a 60% do erro devido à ionosfera no posicionamento (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017; KLOBUCHAR, 1987; NEWBY e LANGLEY, 1992).

4.5 NeQuick G

O NeQuick é um modelo tridimensional de densidade de elétrons, desenvolvido pelo *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP) em Trieste, na Itália, e pela Universidade de Graz, na Áustria (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017; RADICELLA, 2009). O modelo foi então adaptado para usuários de simples frequência Galileo (NeQuick G), constelação esta que em sua mensagem de navegação transmite diariamente três coeficientes do modelo (EC, 2016). O modelo tem ainda como parâmetros de entrada a posição tridimensional do receptor e do satélite, bem como a hora UT (*Universal Time*) e o mês da época de processamento.

O modelo baseia-se nas características das camadas ionosféricas E, F1 e F2, caracterizando-o como semi-empírico pelo fato de levar em consideração as propriedades físicas destas camadas. O comportamento espaço-temporal dos parâmetros do modelo, como a máxima densidade de elétrons na camada F2, são obtidos de coeficientes disponíveis em tabelas mensais do *Comité Consultatif International des Radiocommunications* (CCIR). Em adição à dependência em latitude e longitude destes parâmetros, o cálculo do atraso é também dependente do campo magnético terrestre expresso pela latitude modificada (MODIP) (RAWER, 1963) do local (μ), dada por:

$$\text{tg}(\mu) = \frac{I}{\sqrt{\cos \varphi}}, \quad (4.15)$$

em que I é a inclinação magnética a 300 km e φ é a latitude geográfica do ponto ionosférico.

Os coeficientes nos arquivos CCIR são dados para atividade solar alta e baixa, calculados a partir de médias mensais de manchas solares. Para determinação dos parâmetros para outras condições solares, os coeficientes são linearmente interpolados. Deste modo, o modelo é capaz de oferecer a distribuição tridimensional a nível global da densidade eletrônica para qualquer período de um ciclo solar.

A atividade solar é modelada por um polinômio de segunda ordem, dado por (RADICELLA, 2009):

$$Az(\mu) = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2, \quad (4.16)$$

em que Az representa o nível efetivo de ionização e a_i são os parâmetros ionosféricos transmitidos nas mensagens de navegação Galileo, atualizados a cada 12 ou 24 horas usando um conjunto de estações globais. Embora nenhuma informação venha sendo transmitida até então, o modelo foi desenvolvido de modo a transmitir cinco coeficientes relacionados a um parâmetro de perturbação ionosférica, dando um indicativo da atividade ionosférica em cada região magnética do globo. As regiões magnéticas, em função da MODIP, são dadas por: MODIP 1 ($60^\circ < \text{MODIP} \leq 90^\circ$), MODIP 2 ($30^\circ < \text{MODIP} \leq 60^\circ$), MODIP 3 ($-30^\circ \leq \text{MODIP} \leq 30^\circ$), MODIP 4 ($-60^\circ \leq \text{MODIP} < -30^\circ$) e MODIP 5 ($-90^\circ \leq \text{MODIP} < -60^\circ$).

Um conjunto global de estações é utilizado para avaliação do STEC (*Slant TEC*) necessário para determinação dos coeficientes a serem transmitidos. De acordo com Radicella (2009) e Hobiger e Jakowski (2017), os parâmetros a_i são atualizados a cada 24 horas. Segundo a documentação, o modelo ionosférico corrige cerca de 70% do efeito da ionosfera sobre os sinais E1, E5 e E6 transmitidos pelos satélites Galileo (NURMI et al., 2014; ORUS PEREZ et al., 2018; RADICELLA, 2009).

A implementação do NeQuick G em receptores mostra-se um pouco mais complexa quando comparada com a do modelo de Klobuchar associado ao GPS porque, além dos parâmetros obtidos nas mensagens de navegação, o modelo assume a disponibilidade de arquivos para determinação da latitude geomagnética e mapas com índices para predição da ionosfera a longo termo (arquivos CCIR) (NURMI et al., 2014).

4.6 Determinação de TEC calibrado a partir de observações GNSS em dupla frequência

A partir de observações de dupla frequência de fase e pseudodistância pode-se estimar o TEC entre o satélite e o receptor a partir do ajustamento ou associando tais observações a informações a priori de TEC advindas, por exemplo, de Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Map*). Para estimativas acuradas do conteúdo eletrônico, os DCBs dos satélites e receptor devem ser tratados de forma adequada (ARIKAN et al., 2008; MONICO, 2008).

De maneira simplificada e considerando apenas um dos sistemas GNSS, a equação de pseudodistância (3.1) pode ser reescrita, considerando duas diferentes frequências f_1 e f_2 como (ODJIK, 2017; SEEBER, 2003):

$$P_{1,r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + I_{1,r} + c(d_1^s + d_{1,r}); \quad (4.17)$$

$$P_{2,r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + I_{2,r} + c(d_2^s + d_{2,r}). \quad (4.18)$$

Equações similares podem ser escritas para as observações de fase da onda portadora (ODJIK, 2017; MONICO, 2008):

$$L_{1,r}^s = \lambda_1 \Phi_{1,r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda_1 \Phi_{\text{trop},r}^s - \lambda_1 \Phi_{\text{ion}1,r}^s - c(d_1^s + d_{1,r}) + \lambda_1 N_1^s; \quad (4.19)$$

$$L_{2,r}^s = \lambda_2 \Phi_{2,r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda_2 \Phi_{\text{trop},r}^s - \lambda_2 \Phi_{\text{ion}2,r}^s - c(d_2^s + d_{2,r}) + \lambda_2 N_2^s, \quad (4.20)$$

em que $L_{1,r}^s$ e $L_{2,r}^s$ são as observações de fase (m) correspondentes às frequências f_1 e f_2 , λ_1 e λ_2 são os comprimentos de onda, $\Phi_{1,r}^s$ e $\Phi_{2,r}^s$ são as observações de fase (ciclos), $\Phi_{\text{trop},r}^s$ e $\Phi_{\text{trop},r}^s$ correspondem ao atraso troposférico (ciclos), $\Phi_{\text{ion}1,r}^s$ e $\Phi_{\text{ion}2,r}^s$ correspondem ao atraso ionosférico (ciclos), N_1^s e N_2^s correspondem às ambiguidades iniciais da fase (ciclos).

A partir da combinação das equações (4.17) e (4.18), pode-se obter a combinação linear livre de geometria da pseudodistância (P_4), dada por (ARIKAN, 2008):

$$P_{4,r}^s = P_{2,r}^s - P_{1,r}^s = I_{2,r}^s - I_{1,r}^s + c(d_2^s - d_1^s) + c(d_{2,r} - d_{1,r}). \quad (4.21)$$

A distância geométrica entre o receptor e o satélite, o atraso troposférico e outras fontes de erros são eliminadas na combinação devido ao fato de não dependerem da frequência de transmissão do sinal. A tendência do código no satélite e no receptor (DCBs) para os sinais f_1 e f_2 pode ser definido por (LEICK, 2004):

$$\text{DCB}^s = d_1^s - d_2^s; \quad (4.22)$$

$$\text{DCB}_r = d_{1,r} - d_{2,r}. \quad (4.23)$$

Utilizando a relação entre o atraso ionosférico na pseudodistância e o TEC, apresentada na equação (4.2), e a relação entre os DCBs do satélite e do receptor, apresentada nas equações (4.22) e (4.23), a expressão para a combinação linear livre de geometria da pseudodistância pode ser obtida por (ARIKAN et al., 2008):

$$P_{4,r}^s = A \left[\frac{(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 f_2^2} \right] \text{TEC}_r^s - c(\text{DCB}_r + \text{DCB}^s). \quad (4.24)$$

Valores diários dos DCBs dos satélites e de receptores MGEX são disponibilizados pelo MGEX. No caso do DCB de algum receptor não estar disponível, Arikan et al. (2008) apresenta um modo de calcular seu valor com base em informações de TEC advindas dos GIMs:

$$\text{DCB}_r(n) = \left[\frac{A (f_1^2 - f_2^2)}{c f_1^2 f_2^2} \right] \text{TEC}_r^s(n) - \frac{1}{c} P_{4,r}^s + \text{DCB}^s, \quad (4.25)$$

em que n representa a época da amostra.

Uma aproximação para o DCB do receptor é obtida para cada satélite a cada época e um valor final pode ser obtido a partir da média de todas as observações. Visando a redução dos efeitos do multicaminho, apenas observações de satélites acima de 60° de elevação são geralmente utilizadas.

Informações de TEC podem ser então obtidas por meio das observações de fase, que são cerca de cem vezes mais precisas do que as de pseudodistância. A combinação linear livre de geometria da fase (L_4) é dada por (ARIKAN et al., 2008):

$$L_{4,r}^s = A \left[\frac{(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 f_2^2} \right] \text{TEC}_r^s - c(\text{DCB}_r + \text{DCB}^s) + \Delta N^s, \quad (4.26)$$

em que:

$$\Delta N^s = \lambda_1 N_1^s - \lambda_2 N_2^s. \quad (4.27)$$

Para obtenção de valores de TEC a partir da equação (4.26), é necessário determinar a ambiguidade inicial da fase ΔN^s . Considerando observações para um mesmo arco conectado (observações contínuas, sem perdas de ciclos), o nivelamento da fase pode ser dado por (ARIKAN et al, 2008):

$$B = \frac{1}{n_{me}} \sum_{i=1}^{n_{me}} (P_{4,r}^s(i) - L_{4,r}^s(i)), \quad (4.28)$$

em que n_{me} é o número de observações de fase em um arco conectado. Para detecção de perdas de ciclos, o método TurboEdit (BLEWITT, 1990) pode ser utilizado.

Por fim, ao se inserir o termo B na equação de fase (4.26) obtém-se (ARIKAN et al., 2008):

$$TEC = \frac{1}{A} \left[\frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \right] [B + L_{4,r}^s(n) + c(DCB_r + DCB^s)]. \quad (4.29)$$

A partir da equação (4.29) pode-se obter valores calibrados de TEC ao longo do caminho entre o receptor e todos os satélites (STEC), a cada época observada.

5 EXPERIMENTO I: AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO POR PONTO MULTI-GNSS

O primeiro experimento consistiu em avaliar os resultados obtidos no Posicionamento por Ponto com o uso dos sistemas GPS, GLONASS e Galileo de forma individual, considerando suas diferentes frequências, e do posicionamento multi-GNSS, que integrou também, além dos três sistemas anteriormente citados, o sistema BDS. Avaliou-se ainda a performance do posicionamento multi-GNSS em comparação ao GPS em simulações de ambiente com alto grau de obstrução a partir do aumento na máscara de elevação. Este capítulo apresenta a metodologia adotada, os resultados e discussões, além de considerações sobre o experimento.

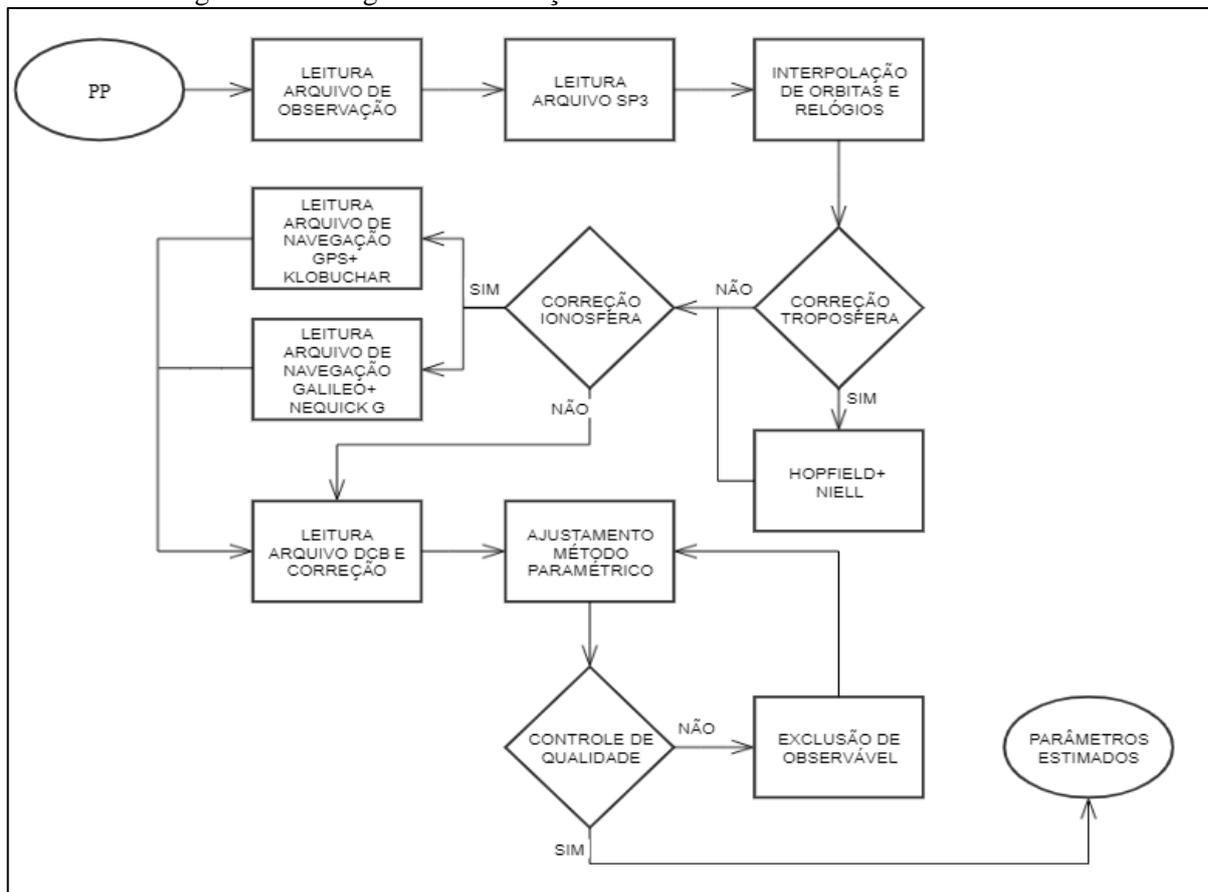
5.1 Metodologia

Para realização do experimento apresentado neste e nos dois próximos capítulos, foi implementado em C++ um software para realização do Posicionamento por Ponto considerando as diferentes constelações e frequências. A Figura 6 apresenta o fluxograma de execução do sistema desenvolvido, considerando as suas diferentes etapas de processamento.

Inicialmente é realizada a leitura do arquivo de observação da estação no formato RINEX (*The Receiver-Independent Exchange Format*), versão 3 (IGS, 2018), que possibilita extrair as observações de pseudodistância em qualquer uma das frequências de qualquer um dos sistemas disponíveis.

Visando obter as coordenadas e erro do relógio dos satélites foi desenvolvida uma rotina para leitura das efemérides precisas GNSS disponibilizadas em <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/> pelo CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), centro associado ao MGEX em formato SP3 (*Standard Product 3*). Nelas, as coordenadas dos satélites dos quatro sistemas estão associadas ao ITRF 2014 e o erro do relógio do satélite é dado em relação ao tempo GPS, também para os quatro sistemas. Tanto as coordenadas quanto o erro do relógio são disponibilizados com intervalo amostral de 5 minutos; a interpolação de Chebyshev (SEEBER, 2003) foi utilizada visando a determinação desses valores em todas as épocas de observação. Além disso, as coordenadas dos satélites foram calculadas no instante de transmissão do sinal, corrigidas do movimento de rotação da Terra (MONICO, 2008) e dos efeitos relativísticos.

Figura 6 - Fluxograma de execução do sistema de PP em desenvolvimento



Em seguida, foi realizada a implementação de leitura dos arquivos com valores diários de DCBs, disponibilizados em <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcb> pelo IGG (*Institute of Geodesy and Geophysics*) da CAS (*Chinese Academy of Sciences*), em Wuhan, centro também associado ao MGEX. Tais arquivos contém os valores de DCB para diversas frequências dos sistemas GNSS e são necessários para correção do erro do relógio do satélite para uma dada frequência que difere da combinação *ion-free*.

Foi também implementada a leitura dos arquivos de navegação GPS e Galileo (extensões .n e .l do formato RINEX, respectivamente), disponibilizados pela UNAVCO em <ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex3/nav>, para obtenção dos parâmetros dos modelos ionosféricos de Klobuchar e NeQuick G (Capítulo 4), caso se deseje realizar a correção do atraso ionosférico para posicionamento em simples frequência.

O modelo NeQuick G foi implementado com base no documento “*Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users*”, disponível em [https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo Ionospheric Model.pdf](https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo_Ionospheric_Model.pdf), que descreve

todas as funções do modelo, disponibilizando também os arquivos auxiliares. A implementação do modelo de Klobuchar se deu com base em GPS Directoreate (2018) e em Klobuchar (1987).

Em seguida, inicia-se a etapa do processamento dos dados GNSS no Posicionamento por Ponto pelo método paramétrico com a estimativa das coordenadas e erro do relógio do receptor, conforme descrito no Capítulo 3. Cabe ao usuário definir quais sistemas e frequências serão utilizados e se será aplicada a correção do atraso troposférico pelo modelo de Hopfield (HOPFIELD, 1969; HOPFIELD, 1971) com função de mapeamento de Niell (NIELL, 1996). O usuário deverá decidir ainda se serão aplicadas correções do atraso ionosférico e, em caso positivo, se será utilizado o modelo de Klobuchar ou NeQuick G.

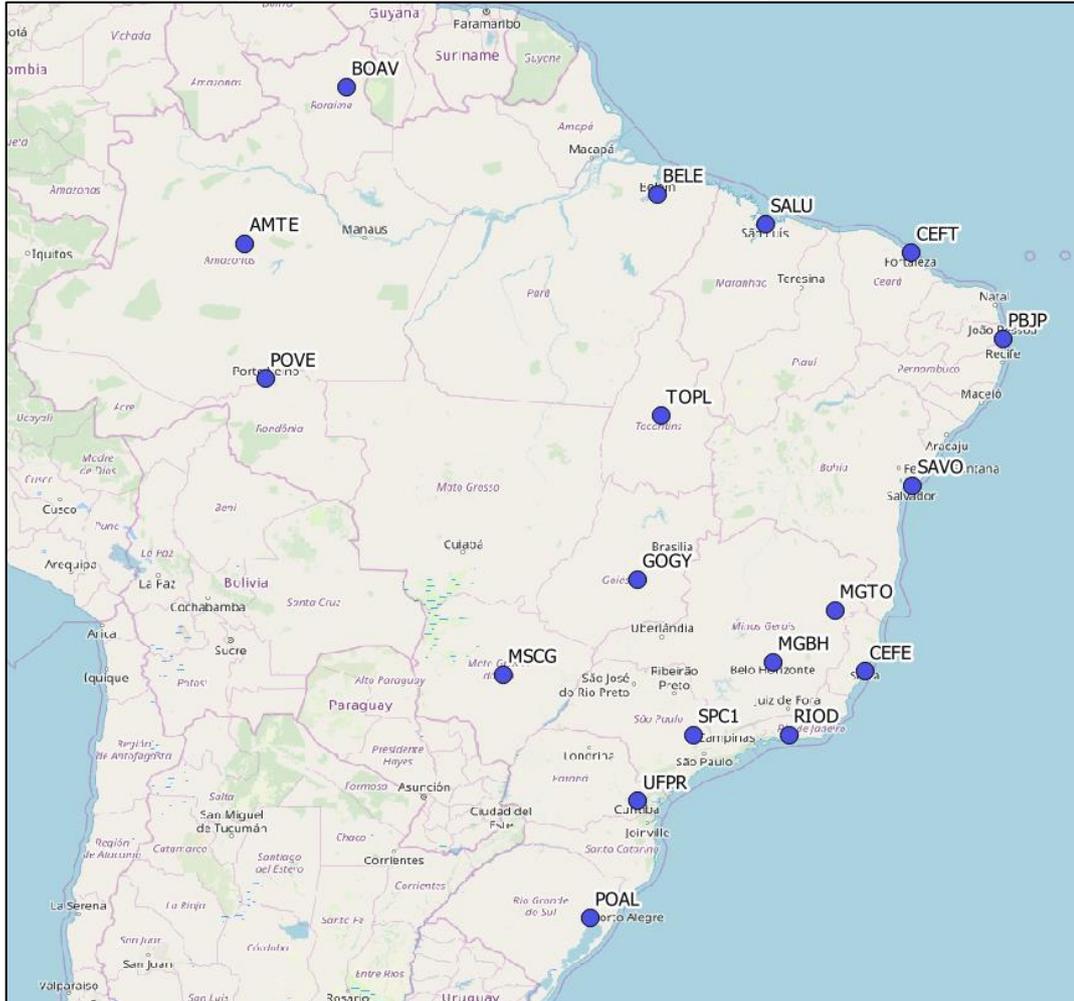
O controle de qualidade é realizado a partir do método DIA (seção 3.6) com nível de significância de 5%. Como resultados do processamento, são gerados arquivos com as coordenadas estimadas do receptor e erro do relógio em relação ao sistema de tempo GPS (além do ISB dos diferentes sistemas em relação ao GPS, quando mais de uma constelação é utilizada), bem como seus desvios padrão em coordenadas cartesianas e componentes locais, o número de satélites utilizados no ajustamento e todos os tipos de DOP, além dos resíduos de cada satélite, época por época. Quando a estação tem coordenadas conhecidas, pode-se ainda calcular as discrepâncias entre os valores ajustados e os valores de referência. Como definição padrão, a máscara de elevação adotada é de 10° e o ajustamento é realizado apenas quando o PDOP é inferior ou igual a 6,0.

Para a realização do experimento, foram utilizadas dezoito estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) (Figura 7) que possuem receptores multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo e BDS) e disponibilizam os dados no formato RINEX 3. Devido ao recente lançamento de satélites Galileo e BDS, foram selecionados dez dias do mês de janeiro de 2019 (06 a 15 de janeiro) para o processamento. Como uma das principais vantagens do posicionamento multi-GNSS é a melhoria na geometria dos satélites, a escolha de dez dias é justificada pelo tempo que a constelação Galileo leva para repetir sua configuração de satélites no espaço; todas as outras constelações têm tempo de repetibilidade menor que dez dias (Tabela 1). Desta maneira, o período selecionado cobre todas as configurações de satélites acima do horizonte das estações brasileiras.

O software desenvolvido foi então utilizado para leitura dos arquivos de observação no formato RINEX 3.04 das estações, com intervalo amostral de 15 s. O arquivo SP3 contendo as coordenadas geocêntricas das órbitas e erro do relógio dos satélites foi também lido, interpolando-se os valores obtidos para um intervalo amostral de 15 s, compatível com as

observações presentes no arquivo de observação. Os efeitos da troposfera no posicionamento foram corrigidos pelo modelo de Hopfield e os efeitos da ionosfera foram corrigidos, nesse experimento, para todos os sistemas e frequências com o uso do modelo de Klobuchar.

Figura 7 – Estações da RBMC utilizadas no experimento



Os resultados são apresentados e discutidos em termos do número de satélites utilizados, PDOP, REQM das coordenadas estimadas e resíduos dos satélites. Foram utilizadas como referência as coordenadas oficiais das estações, disponibilizadas pelo IGBE, e atualizadas para a época de processamento.

No experimento, foi avaliado o posicionamento com observações de pseudodistância GPS nas frequências L1 C/A, L2C e L5, GLONASS L1 C/A e L2 C/A, Galileo E1, E5a, E5b e E5. No posicionamento multi-GNSS, foram utilizadas observações GPS e GLONASS L1 C/A, Galileo E1 e BDS B1. As observações BDS foram incluídas no posicionamento multi-GNSS apenas quando dois ou mais satélites eram rastreados

simultaneamente, para haver redundância na estimativa do ISB em relação a este sistema. Na segunda parte do experimento, quando um ambiente com alto grau de obstrução é simulado, o posicionamento é realizado com GPS L1 C/A e multi-GNSS com uma máscara de elevação de 30°.

5.2 Resultados e discussões

Os resultados e discussões serão divididos em duas partes. Na primeira delas, é realizada uma análise das diferentes constelações e frequências que compõem o GNSS, bem como do posicionamento multi-GNSS, considerando as configurações padrão do sistema desenvolvido (máscara de elevação de 10° e PDOP menor ou igual a 6,0). Na segunda parte, são apresentados os resultados do posicionamento simulando um ambiente altamente obstruído. Para efeito de análise, inicialmente serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para o dia 12 de janeiro, estação PBJP, localizada na cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, e, em seguida, os resultados médios das estações utilizadas no experimento (Figura 7). A estação foi selecionada para análise por possuir resultados próximos à média final de todas as estações. Em figuras, os sistemas serão abreviados para: G – GPS, R – GLONASS, E – Galileo, C – BDS, seguindo a nomenclatura usada no formato RINEX.

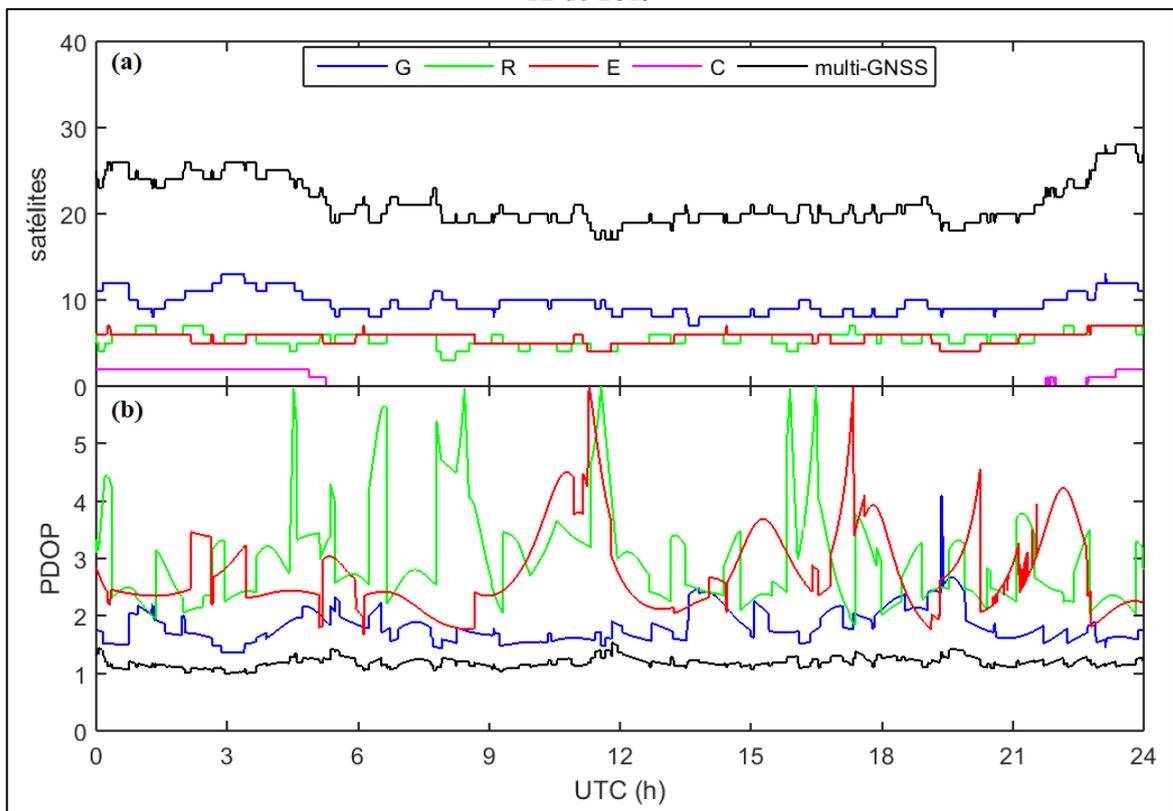
5.2.1 Sistemas e frequências

A Figura 8 (a) apresenta o número de satélites rastreados pela estação PBJP no dia 12 de janeiro de 2019, que corresponde ao Dia do Ano (DOY – *Day of Year*) 12 de 2019, considerando os quatro sistemas globais e a soma de todos eles (multi-GNSS). O número de satélites GPS varia entre 7 e 13, com uma média de 10 satélites a cada época. Para as constelações GLONASS e Galileo, a média é de 5 satélites, variando entre 4 e 7. A constelação BDS, por sua vez, apresenta um máximo de dois satélites rastreados simultaneamente. Faz-se necessário destacar que, embora a constelação BDS já tenha vários outros satélites MEO operacionais em órbita, suas coordenadas precisas ainda não estão sendo determinadas pelos centros associados ao MGEX devido ao seu recente lançamento e, deste modo, não foram considerados neste experimento.

A Figura 8 (b), por sua vez, apresenta o PDOP época a época para o mesmo dia, considerando as observações de pseudodistância L1 C/A GPS e GLONASS, E1 Galileo e a

soma de todas estas com a frequência B1 BDS na combinação multi-GNSS. Considerando o dia analisado, o PDOP GPS tem uma média de 1,8, valor este que aumenta para 2,8 no GLONASS, 2,9 no Galileo e, considerando a combinação multi-GNSS, o PDOP médio é de 1,2. Para as constelações GLONASS e Galileo, nota-se que em alguns momentos do dia o PDOP tem valores superiores a 6,0, limite definido na literatura visando alcançar bons resultados no posicionamento.

Figura 8 – (a) Número de satélites rastreados e (b) PDOP dos diferentes sistemas, estação PBJP, DOY 12 de 2019

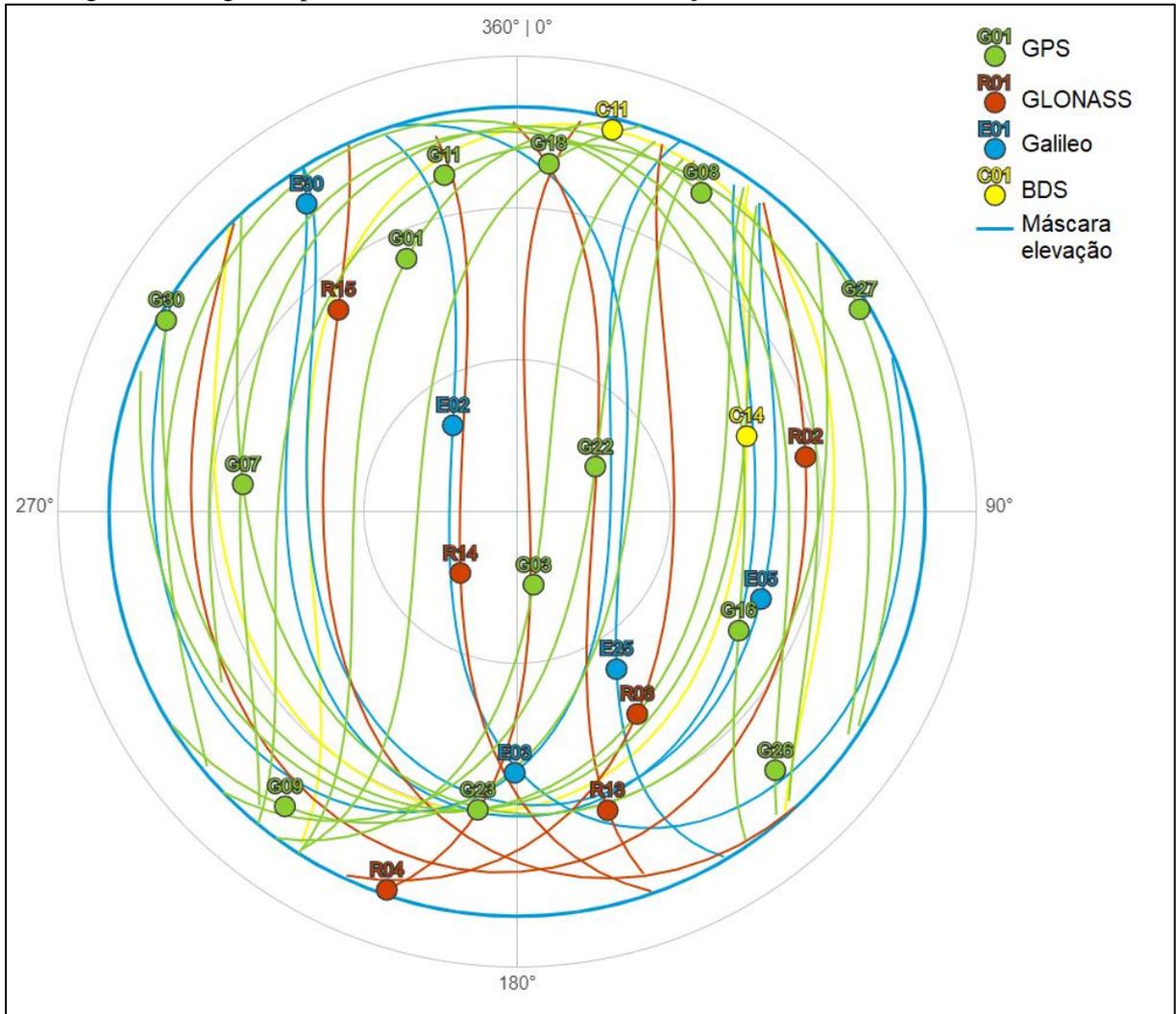


Legenda: G: GPS, R: GLONASS, E: Galileo, C: BDS

A Figura 9 apresenta um diagrama polar (máscara de elevação de 10°) dos satélites observados pela estação, às 3h UTC do dia 12, momento este em que o PDOP multi-GNSS atinge valor mínimo. Verifica-se um caminho similar dos satélites das diferentes constelações acima do observador. Como o GLONASS tem uma inclinação maior em relação ao equador (Tabela 1), é possível notar que seus satélites chegam mais ao sul quando comparado ao caminho das outras três constelações. A combinação multi-GNSS faz com que se tenha

disponível, neste caso, um satélite com elevação superior a 60° em cada quadrante, melhorando a geometria da configuração.

Figura 9 - Diagrama polar dos satélites observados estação PBJP, 3h UTC, DOY 12 de 2019

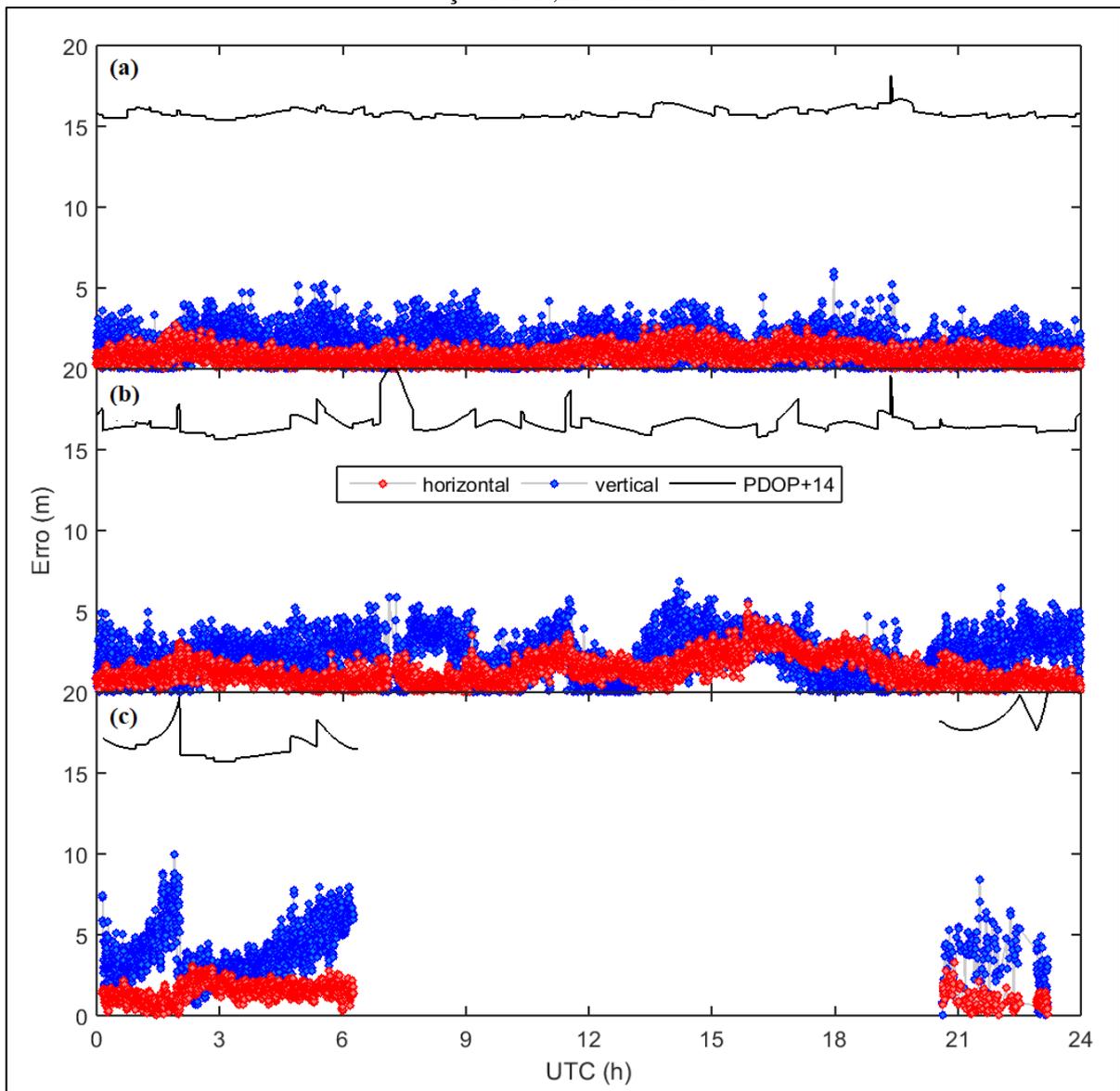


Fonte: Adaptado de Trimble (2019)

A Figura 10 apresenta o PDOP (somado a uma constante de 14, para facilidade de visualização) e erro nas componentes horizontal e vertical do posicionamento GPS nas três frequências analisadas. Devido ao número de satélites que atualmente transmite cada uma das frequências, enquanto que o posicionamento L1 C/A pôde ser realizado durante o dia todo, o posicionamento em L2C foi realizado em 99,3% do tempo e em apenas 28% do tempo na frequência L5. Devido ao baixo número de satélites que transmitem a terceira frequência GPS, nota-se que os piores resultados foram obtidos na L5, altamente influenciados pelos altos valores de PDOP. O posicionamento em L2C apresenta resultados comparáveis aos da

frequência L1 C/A em grande parte do tempo; devido à frequência menor, entretanto, tal sinal está mais sujeito aos efeitos dispersivos da ionosfera, o que se torna mais evidente durante o período da tarde, hora local, em que o posicionamento vertical é degradado se comparado ao L1 C/A. Considerando o dia analisado, a REQM 3D do posicionamento foi de 1,93 m para L1 C/A, de 3,06 m para L2C e de 4,41 m para L5.

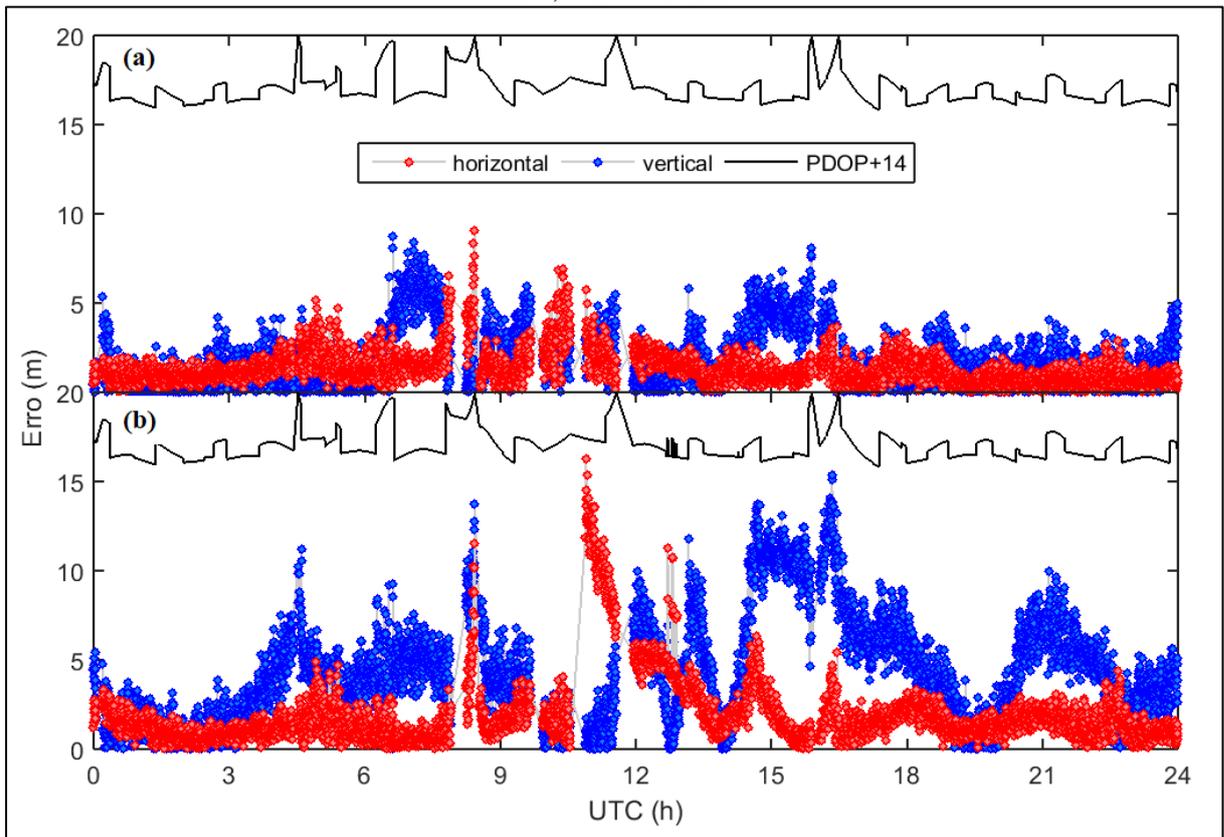
Figura 10 - PDOP e erro do posicionamento GPS, nas frequências (a) L1 C/A, (b) L2C e (c) L5, estação PBJP, DOY 12/2019



A Figura 11 apresenta o PDOP e erro nas componentes horizontal e vertical do posicionamento GLONASS nas duas frequências analisadas. Devido a momentos em que o valor de PDOP é superior a 6,0, o posicionamento nesse sistema foi realizado em 92% do dia.

É novamente possível visualizar que a frequência L2 C/A é mais suscetível a erros relacionados à frequência, como o atraso ionosférico. Levando em conta o dia todo, a REQM do posicionamento foi de 2,83 m para L1 C/A e de 5,90 m para L2 C/A.

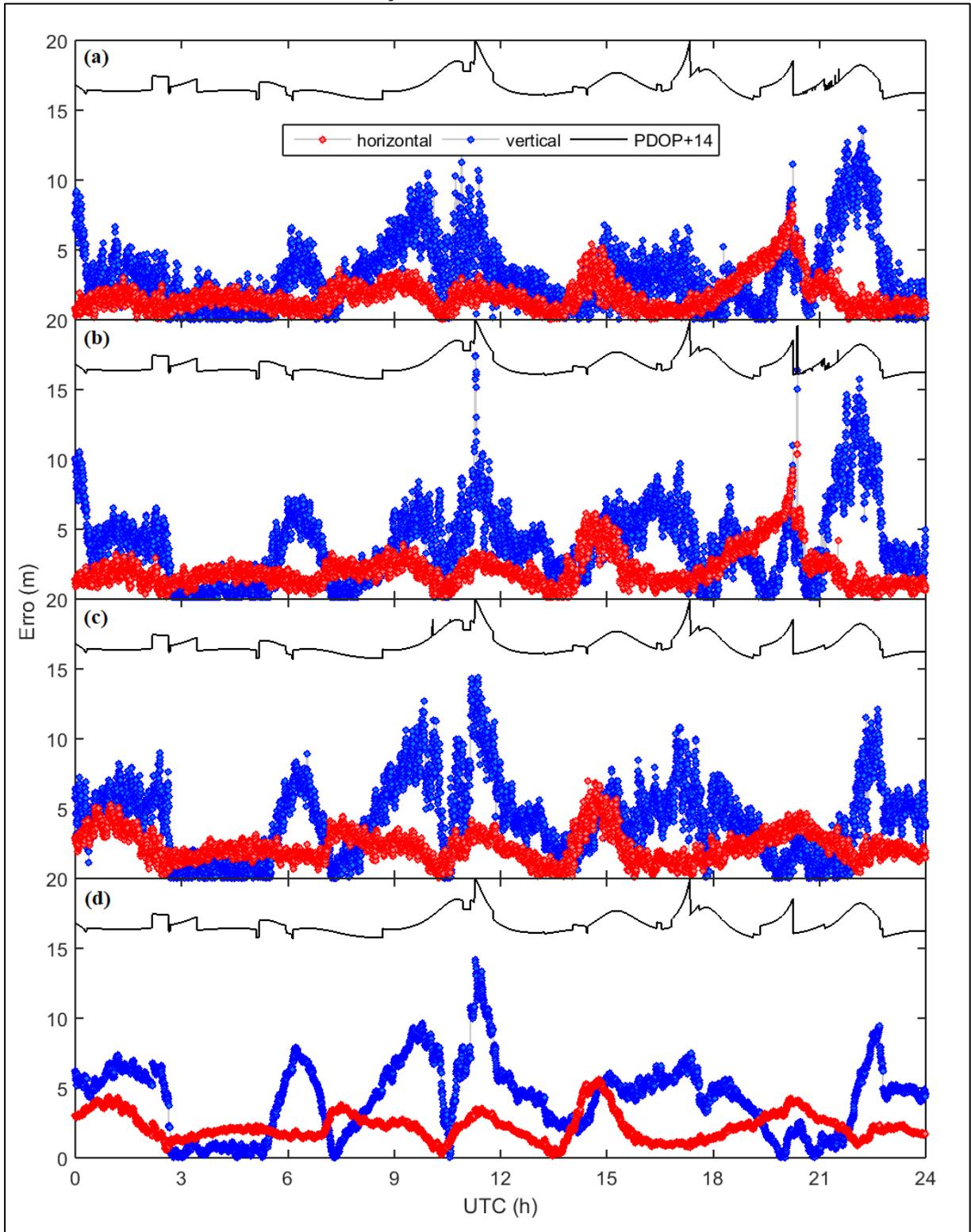
Figura 11 - PDOP e erro do posicionamento GLONASS, nas frequências (a) L1 e (b) L2, estação PBJP, DOY 12/2019



A Figura 12 apresenta o PDOP e erro nas componentes horizontal e vertical do posicionamento Galileo nas quatro frequências analisadas. O PDOP mantém-se inferior a 6,0 em 99,7%, permitindo assim que se realize o posicionamento quase que durante o dia todo. Como todos os satélites Galileo transmitem as quatro observáveis, os valores de PDOP das quatro soluções são idênticos, salvo instantes em que pode ter havido falha de recepção de alguma observável por parte do receptor GNSS.

É interessante notar o comportamento da série de coordenadas estimadas com a observável E5 que, embora atinja erros da mesma magnitude que as demais, mostra-se bem menos ruidosa devido à técnica de modulação envolvida (COLOMINA et al., 2012; SILVA et al., 2012). Considerando todo o período analisado, a REQM do posicionamento foi de 4,51 m para E1, de 5,34 m para E5a, de 5,59 m para E5b e de 5,54 m para E5.

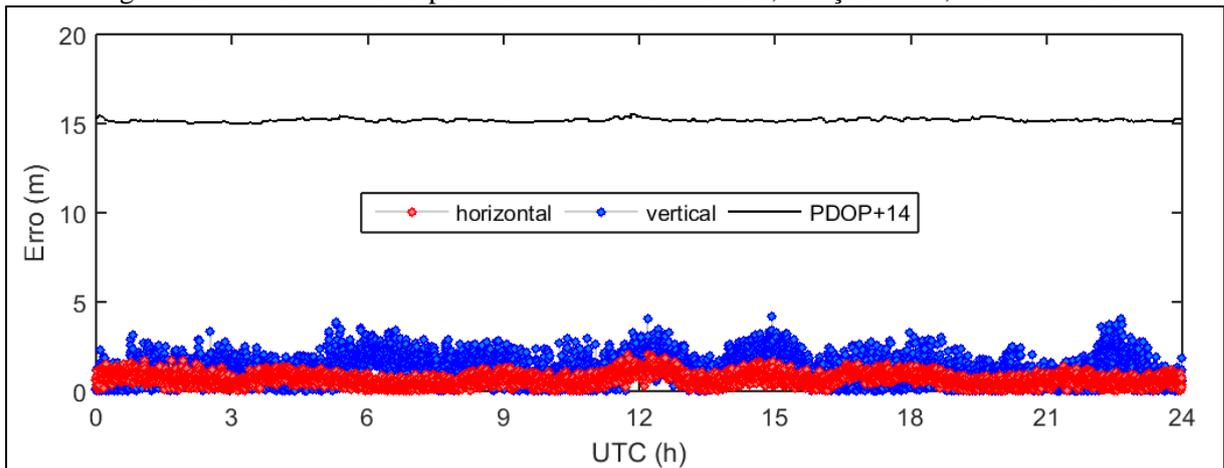
Figura 12 - PDOP e erro do posicionamento Galileo, nas frequências (a) E1, (b) E5a, (c) E5b e (d) E5, estação PBJP, DOY 12/2019



A Figura 13 apresenta o PDOP e erro horizontal e vertical do posicionamento multi-GNSS, que se utilizou de observáveis dos quatro sistemas globais. É possível notar que o PDOP

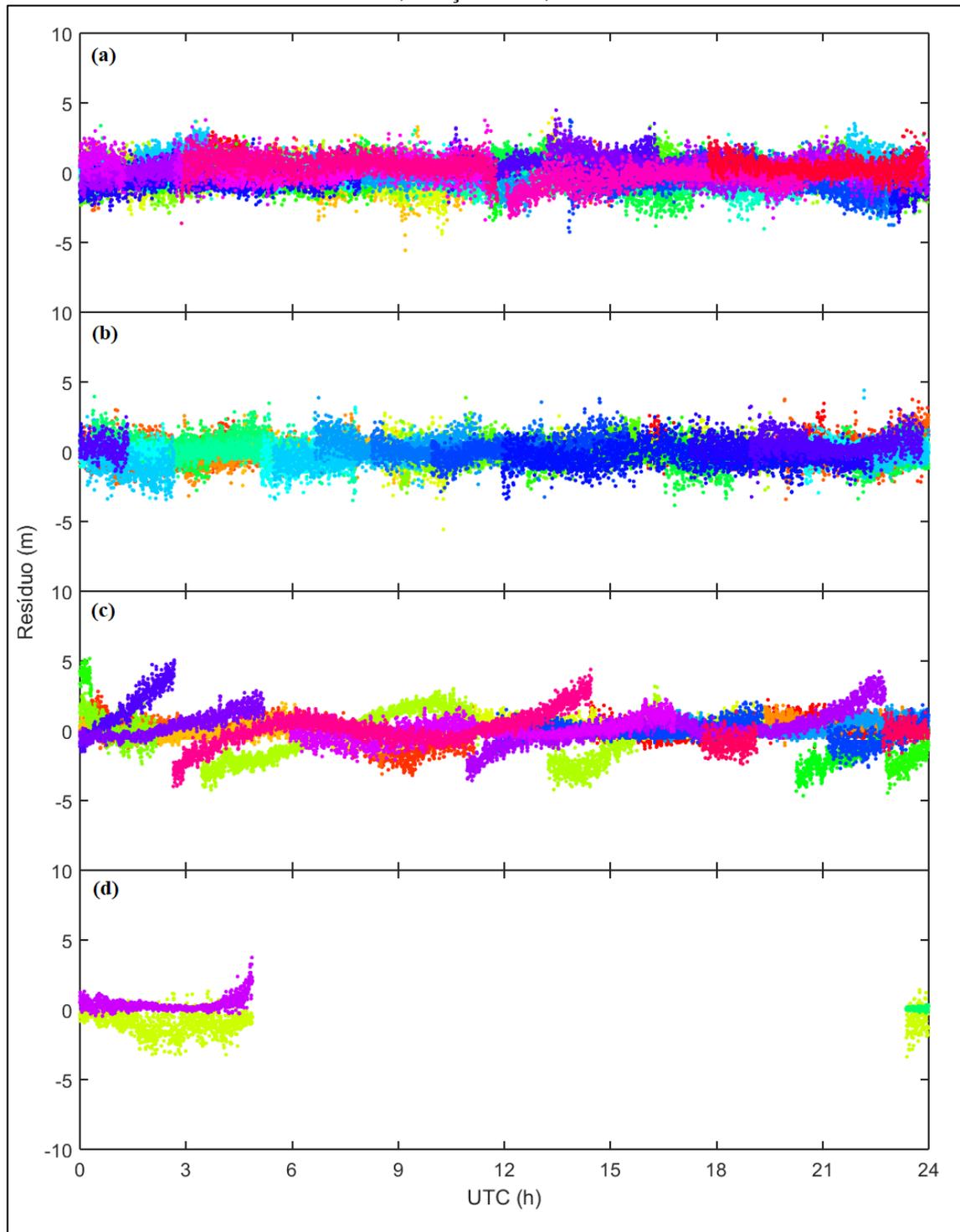
se mantém baixo e estável durante todo o dia, fazendo com que a estimativa das coordenadas se torne também mais acurada. A REQM, considerando todo o período de processamento, foi de 1,59 m, o que representa uma melhoria de 18% em relação ao posicionamento GPS em L1 C/A.

Figura 13 - PDOP e erro no posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019



Ainda em relação ao posicionamento multi-GNSS, a Figura 14 apresenta os resíduos dos satélites GPS, GLONASS, Galileo e BDS; cada cor representa um satélite diferente da constelação em questão. A análise dos resíduos, que contêm os ruídos e erros não modelados nas observações, permite avaliar a adequação das observáveis ao modelo matemático adotado. Observa-se que a maior parte dos resíduos de todas as constelações ficou entre -3 e +3 m. Considerando todos os satélites de cada sistema, a REQM dos resíduos foi de 0,78 m para os satélites GPS, de 0,81 m para os satélites GLONASS, de 1,03 m para os satélites Galileo e de 0,90 m para os satélites BDS. Como era de se esperar, a menor REQM foi a dos satélites GPS, que estavam sempre em maior número no ajustamento. Os maiores valores de REQM associam-se às constelações Galileo e BDS. Além do fato da constelação BDS contar com um número expressivamente menor de satélites, o que pode ainda ter contribuído para tais valores é o fato de que as coordenadas e erro dos relógios dos satélites Galileo e BDS são determinados (e fixados no ajustamento) com menor acurácia (CAI et al., 2015; STEIGENBERGER et al., 2015; ZHAO et al., 2013) se comparados às coordenadas e erro dos relógios dos satélites GPS e GLONASS.

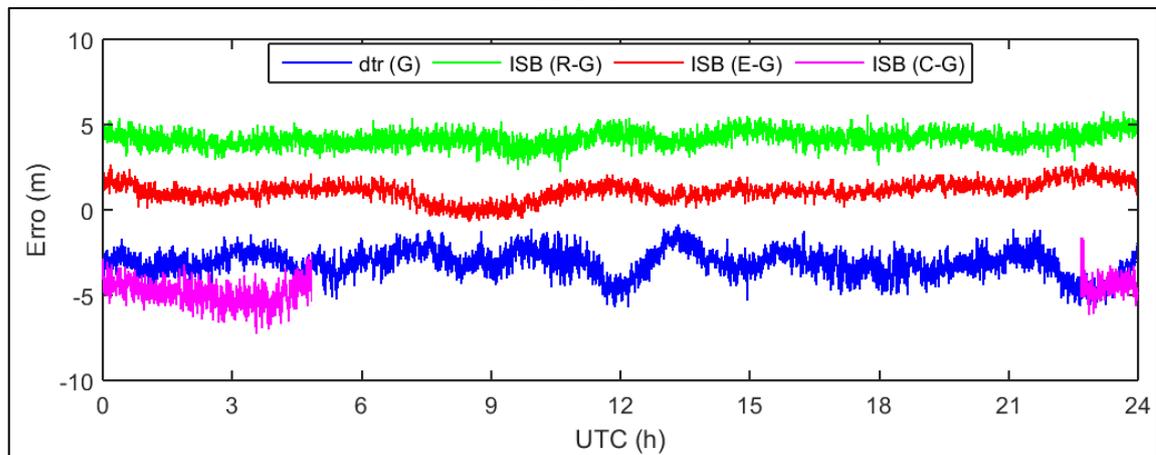
Figura 14 - Resíduos dos satélites (a) GPS, (b) GLONASS, (c) Galileo e (d) BDS no posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019



Nas análises em relação ao posicionamento multi-GNSS para a estação PBJP, DOY 12 de 2019, a Figura 15 apresenta o erro do relógio do receptor estimado com relação ao tempo GPS, bem como o ISB estimado entre os sistemas GLONASS, Galileo e BDS em relação ao GPS. Embora tais estimativas sejam completamente dependentes de cada receptor, pode-se

perceber que, com relação aos ISBs, os valores estimados para o sistema BDS são os mais ruidosos, devido ao pequeno número de satélites empregados no ajustamento. Comparando os valores de ISB Galileo e GLONASS, nota-se que os valores estimados para o GLONASS são sutilmente mais ruidosos, uma vez que tais valores acabam por absorver os ICBs do sistema, que se utiliza da técnica FDMA para transmissão dos sinais.

Figura 15 - Erro do relógio do receptor e ISB para posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019



Levando em consideração todos os dez dias analisados, a Tabela 5 apresenta a REQM 3D do posicionamento nas diferentes observáveis, para cada uma das 18 estações utilizadas no experimento. É possível notar que os resultados concordam entre si e com os resultados descritos nessa seção para a estação PBJP, processamento do dia 12 de janeiro de 2019.

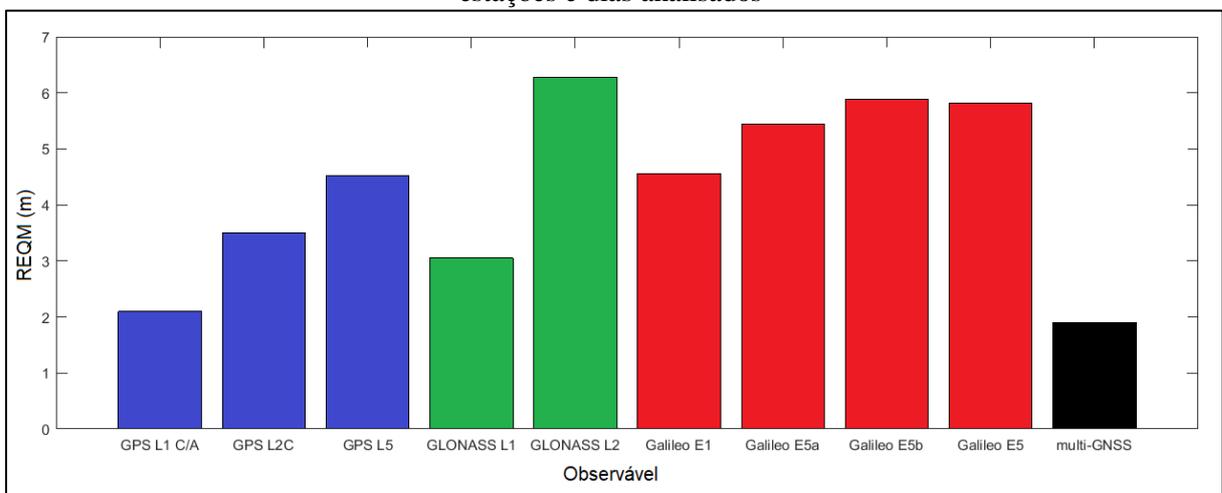
Considerando todas as épocas e estações, a Figura 16 apresenta a REQM 3D final de cada uma das observáveis. Analisando cada um dos sistemas de forma separada, nota-se que os melhores resultados se associam às maiores frequências, o que já era esperado. Tomando como referência o posicionamento GPS L1 C/A, a REQM 3D GLONASS L1 C/A é 45% menos acurada e o Galileo E1 111% menos acurada; como já citado anteriormente, motivos como o número de satélites, PDOP, técnica FDMA para o GLONASS e precisão com que as coordenadas Galileo são estimadas são justificativas para tais resultados. Durante o período total dos dados, o posicionamento GPS em L1 C/A foi realizado em 100% do tempo (PDOP médio de 2,0), em 97% do tempo na frequência L2C (PDOP médio de 2,8) e em 40% do tempo na L5 (PDOP médio de 3,3); o posicionamento GLONASS foi realizado em 90% do tempo

(PDOP médio de 2,8) e o Galileo em 94% do tempo (PDOP médio de 2,8). O posicionamento multi-GNSS, obviamente, também se deu no período total (PDOP médio de 1,2).

Tabela 5 - REQM 3D (m) das diferentes observáveis, considerando todos os dias analisados

Estação	GPS			GLONASS		Galileo				multi-GNSS
	L1 C/A	L2C	L5	L1 C/A	L2 C/A	E1	E5a	E5b	E5	
AMTE	2,38	3,92	4,84	3,25	6,17	5,52	6,38	7,00	6,70	1,74
BELE	1,75	2,88	4,48	2,43	5,44	4,34	5,03	5,71	5,70	1,52
BOAV	1,98	3,67	4,97	2,60	5,78	4,76	5,96	6,22	6,27	1,78
CEFE	2,08	3,06	3,72	3,26	6,67	4,39	5,20	5,56	5,49	1,95
CEFT	2,08	3,06	5,19	2,86	5,96	4,48	5,19	5,80	5,67	1,66
GOGY	2,38	4,11	4,37	3,50	6,74	3,79	4,93	5,17	5,14	2,24
MGBH	2,73	3,68	4,07	3,60	6,95	4,88	5,83	6,08	6,09	2,50
MGTO	2,12	3,27	4,05	3,19	6,33	4,61	5,52	5,89	5,77	2,01
MSCG	2,37	6,24	5,30	3,50	6,83	4,84	5,87	6,16	5,94	2,17
PBJP	2,01	3,17	5,21	2,99	6,30	4,44	5,34	5,93	5,84	1,74
POAL	1,95	3,25	4,56	2,86	5,96	4,13	4,98	5,48	5,43	1,80
POVE	1,83	3,26	4,35	2,48	6,09	4,38	5,17	5,76	5,73	1,64
RIOD	2,12	2,92	4,18	3,02	6,20	4,42	5,26	5,64	5,59	1,93
SALU	1,92	3,01	4,44	2,71	6,14	4,68	5,37	6,15	5,96	1,62
SAVO	1,98	3,06	4,39	3,63	6,44	4,47	5,26	5,67	5,66	1,79
SPC1	1,84	3,11	3,92	3,06	6,52	4,47	5,53	5,77	5,66	1,82
TOPL	1,94	3,21	4,66	2,77	6,21	4,46	5,39	5,87	5,85	1,80
UFPR	2,18	3,37	4,56	3,12	6,43	4,47	5,45	5,68	5,67	2,11

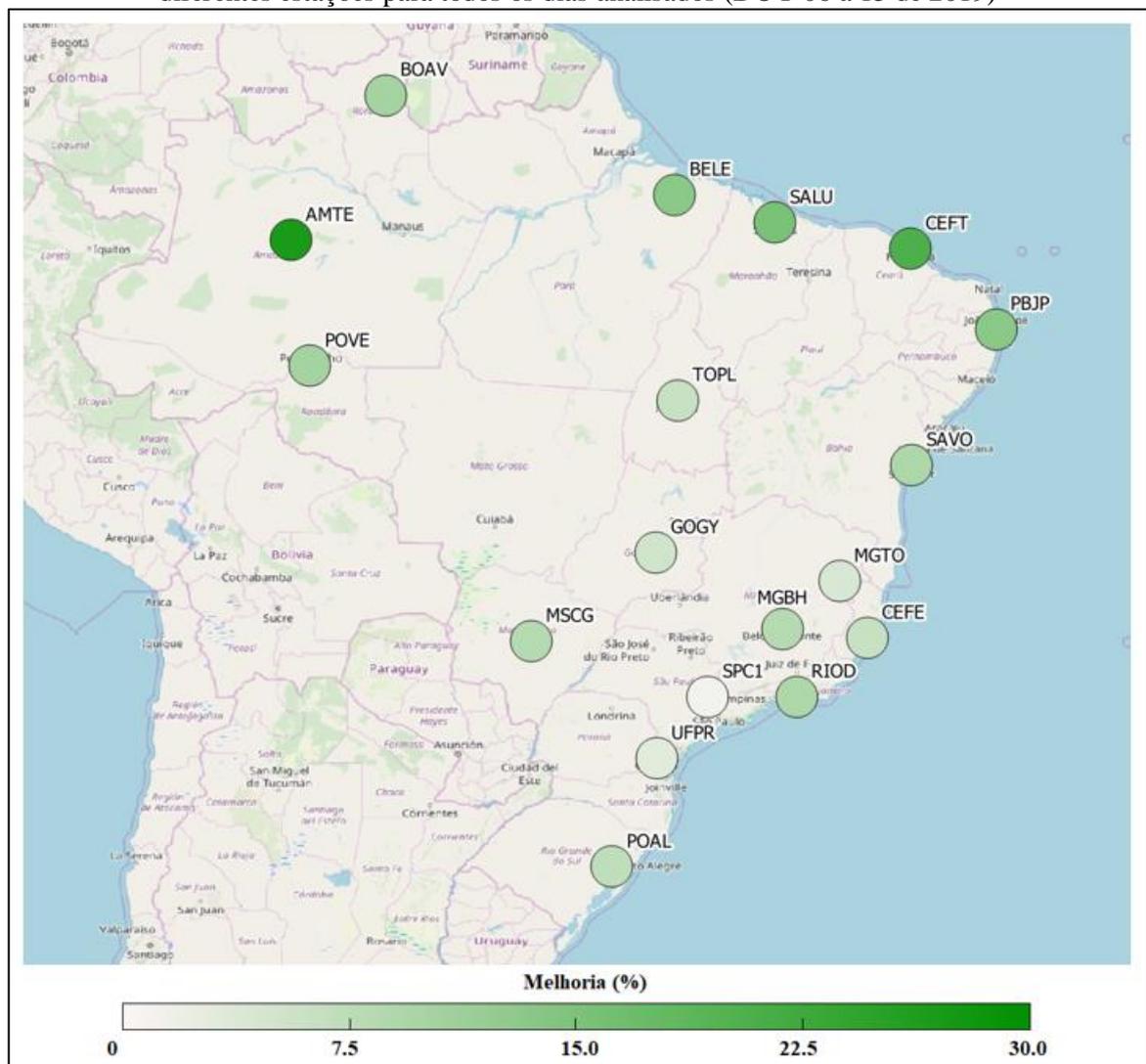
Figura 16 - REQM 3D do posicionamento nas diferentes observáveis GNSS, considerando todas as estações e dias analisados



No que se refere aos resíduos dos sistemas, considerando todos os períodos e estações analisadas, o GPS apresentou REQM de 0,86 m, o GLONASS de 0,92 m, o Galileo de 1,09 m e o BDS de 0,93 m. Deste modo, as análises apresentadas anteriormente para a estação PBJP, DOY 12 de 2019, podem ser estendidas para os resultados que consideram todos os dados processados.

Com relação aos resultados obtidos para o posicionamento multi-GNSS, a Figura 17 apresenta o percentual de melhoria deste em relação ao posicionamento GPS na frequência L1 C/A (melhor resultado obtido no posicionamento individual das diferentes constelações GNSS). Considerando o período total analisado, nota-se que houve melhoria na REQM 3D de todas as estações, melhoria esta que variou entre aproximadamente 1 e 27%.

Figura 17 - Percentual de melhoria do posicionamento multi-GNSS em relação ao GPS L1 C/A nas diferentes estações para todos os dias analisados (DOY 06 a 15 de 2019)



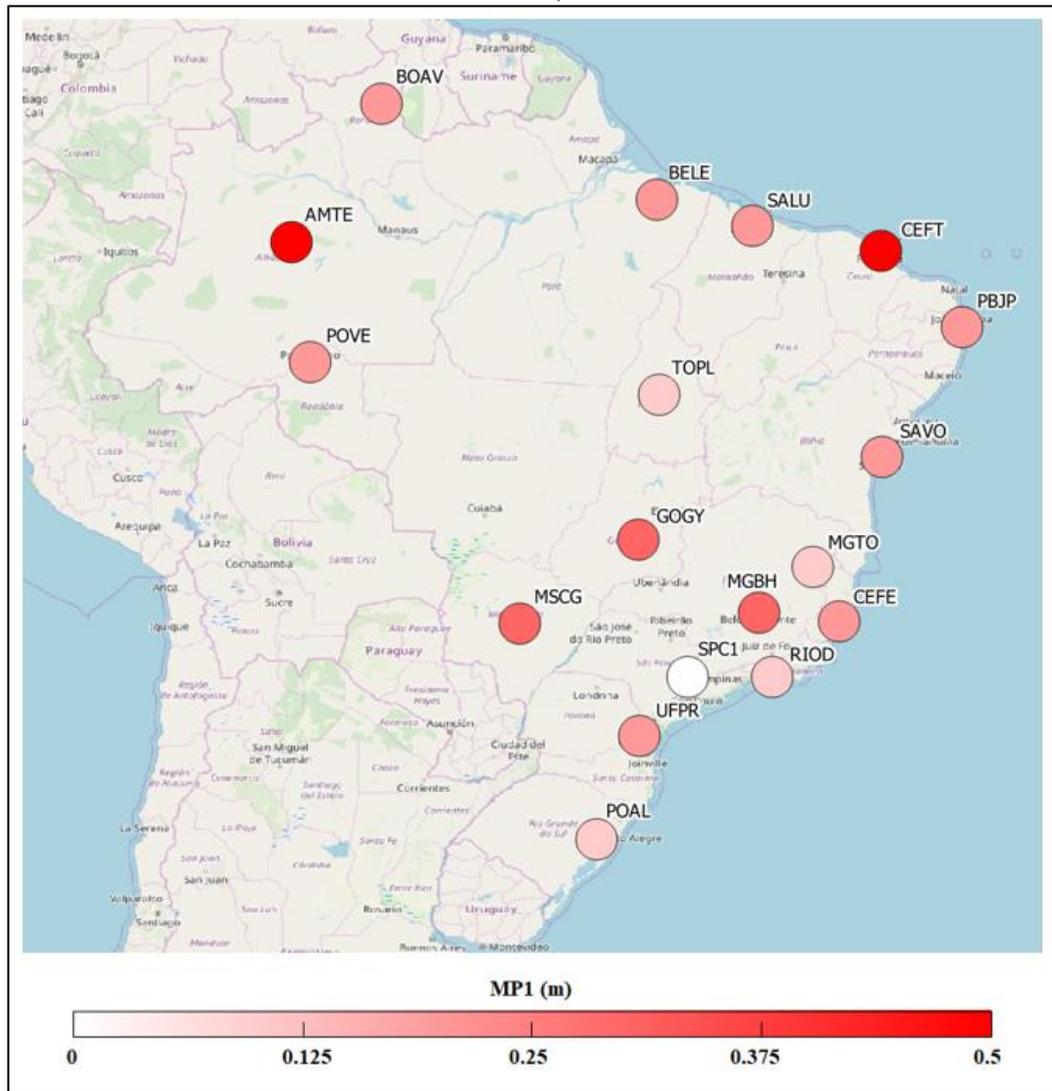
É possível notar que as estações que apresentaram um percentual maior de melhoria no posicionamento multi-GNSS estão localizadas próximas ao equador; de fato, o coeficiente de correlação de Pearson encontrado entre a latitude e a porcentagem de melhoria foi de 0,70, indicando correlação de moderada a forte (SHESKIN, 2003). Tal resultado pode ser justificado pela órbita dos satélites que, devido à inclinação dos sistemas, recobre melhor a região equatorial e, deste modo, faz com que o PDOP próximo à região equatorial seja menor quando comparado às latitudes médias e altas. Assim, no posicionamento multi-GNSS o número de satélites rastreados pelas estações próximas ao equador é maior, o que acaba por melhorar a geometria e fazer com que haja mais observações disponíveis para estimativa da posição.

Entretanto, apenas a posição da estação em relação à latitude não justifica completamente os resultados encontrados, como por exemplo o fato de que a melhoria encontrada na estação AMTE, localizada no estado do Amazonas, foi maior que de outras estações localizadas em latitudes similares e a estação SPC1, localizada no estado de São Paulo, teve um percentual menor de melhoria se comparado à estações localizadas em latitudes mais altas.

A Figura 18 apresenta o índice de multicaminho MP1 médio para os dez dias de experimento nas diferentes estações, calculado para os satélites GPS a partir do software TEQC (*Translation, Editing and Quality Checking*) da UNAVCO. O efeito de multicaminho nada mais é do que sinais que atingem a antena do receptor a partir de reflexões sofridas no ambiente em torno da estação (MONICO, 2008; SOUZA e MONICO, 2003). O índice MP1 é calculado a partir de uma combinação linear entre as observações L1 e L2 de fase e pseudodistância (ESTEY e MEERTENS, 1999). Como o cálculo do índice utiliza a observável fase da onda portadora, interferências na mesma e perdas de ciclo têm influência direta nos valores obtidos (ALVES et al., 2013; PINTO, CALDEIRA e CALDEIRA, 2017) e, portanto, pode indicar o estado da ionosfera na estação avaliada. Comparando os resultados apresentados na Figura 17 e na Figura 18, é possível notar que as estações que apresentaram os maiores percentuais de melhoria estão associadas a um índice maior de multicaminho, enquanto que as que apresentaram melhorias mais baixas estão associadas a um baixo nível de multicaminho; o coeficiente de correlação de Pearson encontrado entre as duas variáveis foi de 0,74, indicando alta correlação. Desta maneira, com base nos resultados apresentados, pode-se dizer que o posicionamento multi-GNSS é mais vantajoso nos casos em que o nível de multicaminho da estação é mais elevado; a introdução de satélites de outras constelações, localizados em outras posições sobre o horizonte, com outros ângulos de elevação, podem dar mais consistência para

a solução, fazendo com que melhores resultados sejam obtidos. Levando-se ainda em consideração o fato de que o índice de multicaminho pode indicar o estado da ionosfera, o posicionamento multi-GNSS apresenta melhorias mais expressivas em casos de ionosfera mais ativa.

Figura 18 - MP1 GPS médio nas diferentes estações para todos os dias analisados (DOY 06 a 15 de 2019)



Nas estações em que o nível de multicaminho já era baixo, como é o caso da estação SPC1, localizada no estado de São Paulo, em que a REQM 3D GPS L1 C/A foi de 1,84 m, poucas melhorias são notadas no posicionamento multi-GNSS (aproximadamente 1%). Nestes casos, resultados mais acurados tornam-se difíceis de serem obtidos devido à própria precisão com que as observações de pseudodistância são efetuadas, ainda que se inclua observações de outros satélites.

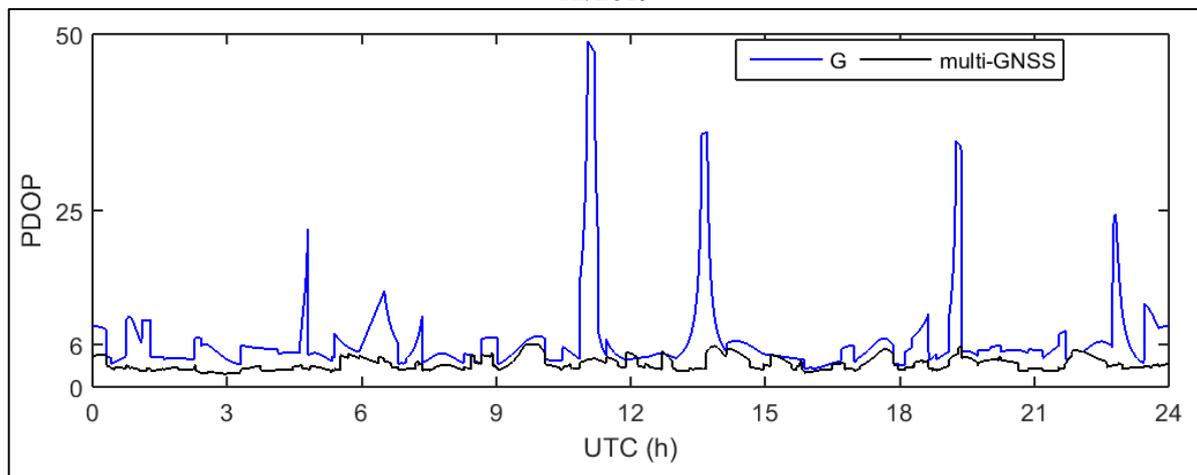
Considerando todas as estações e períodos analisados, verifica-se que, para a região brasileira, o posicionamento GPS L1 C/A apresentou REQM 3D de 2,10 m e o posicionamento multi-GNSS REQM 3D de 1,90 m, representando uma melhoria de aproximadamente 11%.

5.2.2 Aumento na máscara de elevação

Nesta segunda parte do experimento, são apresentados os resultados obtidos no posicionamento GPS L1 C/A (denominado, a partir daqui, de posicionamento GPS) e multi-GNSS considerando uma máscara de elevação de 30° .

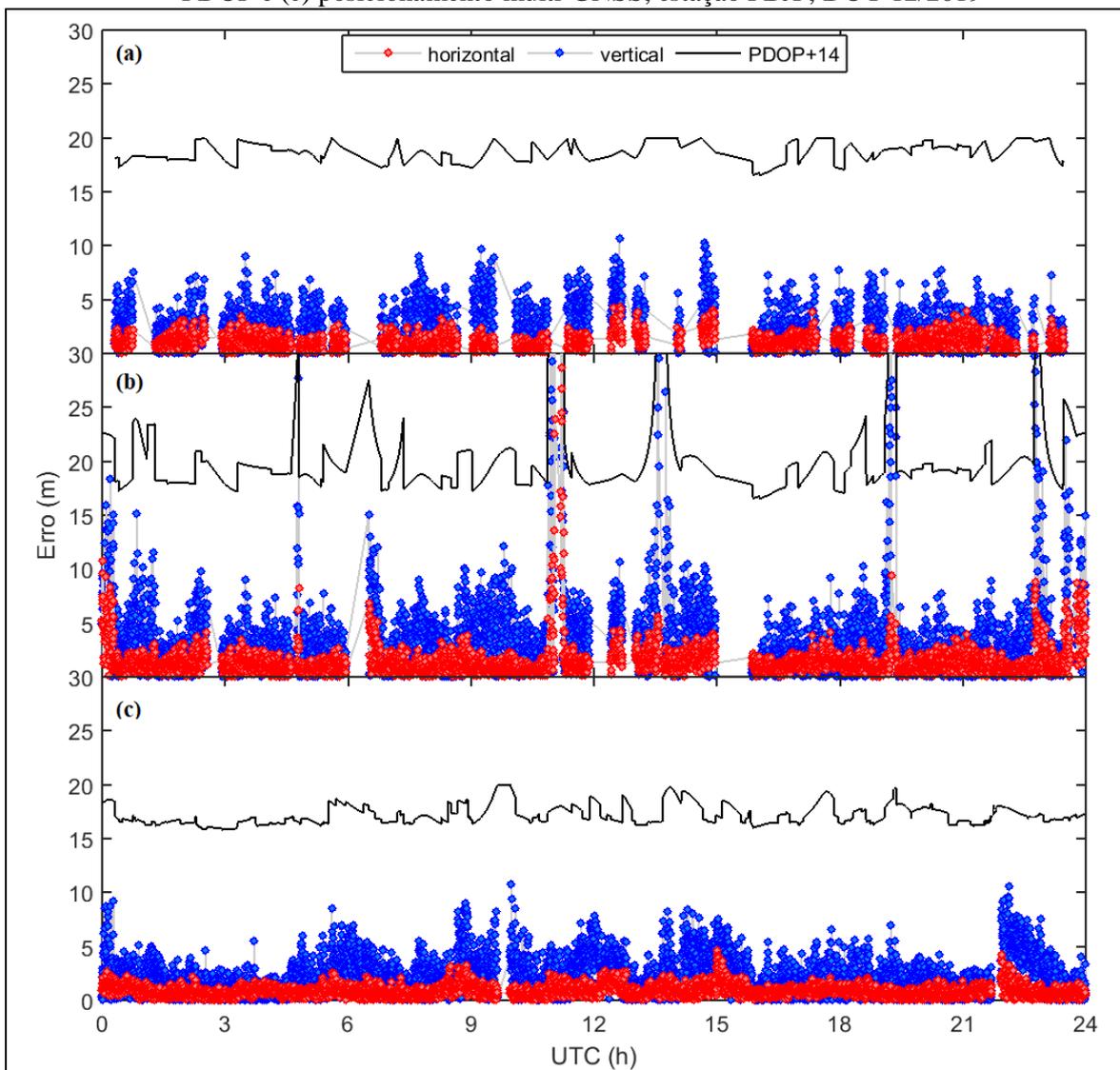
A Figura 19 apresenta o PDOP época a época para a estação PBJP, dia 12 de janeiro, considerando os satélites GPS e multi-GNSS. Comparando os resultados com os anteriormente apresentados na Figura 8 (b), que utilizava máscara de elevação de 10° , nota-se que tanto o PDOP GPS quanto o PDOP multi-GNSS foi deteriorado, com médias de 6,2 para o GPS e 3,2 para o multi-GNSS. Embora tenha havido degradação, o PDOP multi-GNSS apresentou valores inferiores a 6,0 em 97% do tempo e o GPS em apenas 59% do tempo. Devido a esse cenário, o posicionamento GPS foi realizado com duas abordagens diferentes: na primeira delas, manteve-se o valor máximo de PDOP fixado em 6,0; na segunda abordagem, a imposição de limite máximo de PDOP foi retirada, permitindo o posicionamento GPS em toda época que tivesse pelo menos quatro satélites GPS sendo rastreados acima de 30° (o que permitiu o posicionamento em 86% do dia).

Figura 19 - PDOP GPS e multi-GNSS, considerando máscara de elevação de 30° , estação PBJP, DOY 12/2019



A Figura 20 apresenta o erro na estimativa das coordenadas, época a época, para o posicionamento GPS com limite máximo de PDOP igual a 6,0, sem limite de PDOP e para o posicionamento multi-GNSS. Nota-se, especialmente no caso em que o limite de PDOP é removido para o posicionamento GPS, que o erro se torna bastante dependente da geometria dos satélites, com erros superiores a 30 m tanto na componente horizontal quanto na componente vertical quando a geometria é ruim. Considerando o dia analisado, o posicionamento GPS com limite de PDOP tem REQM 3D de 3,26 m (embora o posicionamento seja realizado em apenas 59% do dia) e de 5,80 m quando o limite é eliminado; a REQM 3D do posicionamento multi-GNSS é de 2,93 m, representando uma melhoria de 10% e 49% em relação aos dois processamentos GPS.

Figura 20 – PDOP e erro no posicionamento GPS (a) com PDOP máximo de 6,0 e (b) sem limite de PDOP e (c) posicionamento multi-GNSS, estação PBJP, DOY 12/2019



Considerando os dados de todos os dias analisados neste experimento, a Tabela 6 apresenta a REQM 3D do posicionamento GPS e multi-GNSS descrito nessa seção para cada uma das 18 estações. É possível notar que os resultados concordam entre si e com os resultados descritos nessa seção para a estação PBJP, processamento do dia 12 de janeiro de 2019.

Tabela 6 - REQM 3D (m) das diferentes configurações processadas GPS e multi-GNSS para as estações processadas, considerando todos os dias analisados

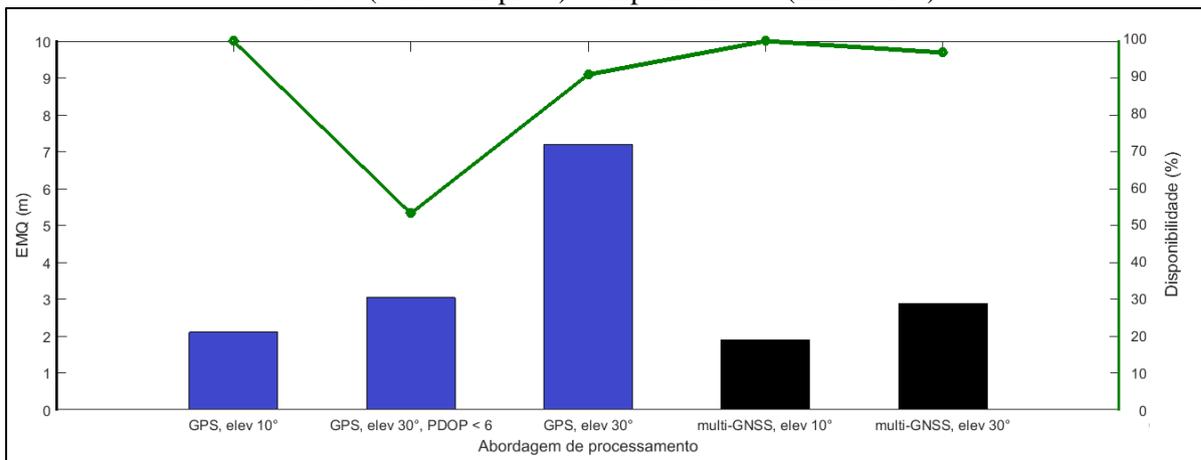
Estação	GPS		multi-GNSS
	PDOP ≤ 6	sem limite PDOP	
AMTE	3,19	8,81	2,95
BELE	3,07	7,13	2,87
BOAV	2,77	7,28	2,68
CEFE	3,09	8,02	3,00
CEFT	3,72	6,81	3,19
GOGY	3,07	7,22	2,84
MGBH	3,27	8,72	3,12
MGTO	2,84	7,53	2,83
MSCG	3,34	7,16	2,89
PBJP	3,32	5,46	3,14
POAL	3,09	7,35	2,73
POVE	2,66	6,60	2,60
RIOD	3,28	8,78	2,90
SALU	3,21	7,74	3,10
SAVO	3,32	5,15	3,10
SPC1	2,32	5,69	2,26
TOPL	2,67	4,81	2,65
UFPR	2,81	7,50	2,58

Sumariando todos os resultados obtidos, a Figura 21 apresenta a REQM 3D do posicionamento GPS e multi-GNSS com máscara de elevação de 10 e 30° (com PDOP limitado a um máximo de 6,0) e a REQM 3D do posicionamento GPS, máscara de elevação de 30° e sem limite máximo de PDOP considerando todas as estações e períodos analisados.

Analisando a Figura 21, é possível perceber que a configuração que proporciona menor erro no posicionamento é a multi-GNSS, com máscara de elevação de 10° (REQM de 1,90 m) e o GPS com a mesma máscara (REQM de 2,10 m). São estes também os dois únicos casos em que o posicionamento é realizado em 100% do tempo. Quando a máscara de elevação é aumentada para 30°, a REQM do posicionamento multi-GNSS é aumentada para 2,89 m (degradação de 52%) e a do GPS é aumentada para 3,04 m mantendo-se o limite de PDOP e

para 7,19 m quando este limite é removido (degradação de 45 e 242%, respectivamente, comparando-se tais valores com o posicionamento GPS com elevação de 10°). A disponibilidade do sistema é também bastante prejudicada quando a máscara de elevação é aumentada; o posicionamento GPS com limite de PDOP, por exemplo, é realizado em apenas 54% do dia e em 91% do tempo quando o limite é removido.

Figura 21 - REQM para todas as estações e períodos, nas configurações GPS (barras em azul) e multi-GNSS (barras em preto) e disponibilidade (linha verde)



Comparando-se os valores de REQM multi-GNSS em relação ao GPS no aumento da máscara de elevação, nota-se uma melhoria de 5% com limite de PDOP e de 60% sem limite. Mais importante do que a melhoria na estimativa das coordenadas, entretanto, é a disponibilidade da configuração multi-GNSS, que permite o posicionamento em 97% do tempo.

5.3 Considerações

Nos experimentos, buscou-se avaliar as características e acurácia do Posicionamento por Ponto utilizando observações de pseudodistância nas diferentes frequências e sistemas. Foram analisadas as observáveis L1 C/A, L2C e L5 GPS, L1 e L2 GLONASS, E1, E5a, E5b e E5 Galileo, e o posicionamento multi-GNSS, que incluiu também observações BDS em B1.

Considerando os sistemas de forma individual, os melhores resultados foram encontrados na primeira frequência. Já na comparação entre as diferentes constelações, os melhores resultados foram obtidos para o sistema GPS, que conta com um maior número de satélites em órbita, seguido pelo GLONASS e, por fim, o sistema Galileo, sendo que estes dois

últimos apresentaram valores de PDOP e número de satélites visíveis bastante similar. O posicionamento multi-GNSS apresentou melhores resultados que qualquer um dos sistemas de forma individual, sendo que as maiores taxas de melhoria em relação ao GPS foram encontradas para a região equatorial e estações altamente afetadas pelo efeito do multicaminho.

Ao se aumentar a máscara de elevação do processamento, simulando um ambiente com muitas obstruções que impediriam o sinal de chegar dos satélites até o receptor, percebe-se que o posicionamento multi-GNSS apresenta melhores valores que o GPS na estimativa da posição e permite que o posicionamento seja realizado em praticamente 100% do tempo. A melhoria média, nesse caso, foi de 60%.

6 EXPERIMENTO II: AVALIAÇÃO TEMPORAL DOS MODELOS DE KLOBUCHAR E NEQUICK G NO POSICIONAMENTO MULTI-GNSS NA REGIÃO BRASILEIRA

Neste segundo experimento, buscou-se fazer uma avaliação comparativa da performance dos modelos ionosféricos NeQuick G e Klobuchar no Posicionamento por Ponto multi-GNSS (GPS e Galileo) na região brasileira ao longo do tempo, captando as variações sazonais e de longo período da ionosfera. Este capítulo apresenta a metodologia adotada, os resultados, discussões e considerações sobre o experimento.

6.1 Metodologia

Para realização do Posicionamento por Ponto, foi novamente empregado o software desenvolvido, descrito em detalhes na seção 5.1. Foram utilizados, neste experimento, as observáveis GPS (L1 C/A) e Galileo (E1), aos quais se associam os modelos de Klobuchar e NeQuick G. Selecionou-se duas estações (PRU2 e POAL) da Rede CIGALA/CALIBRA (*Concept for Ionospheric-Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America/ Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*) (Figura 22), localizadas em diferentes latitudes magnéticas e, conseqüentemente, afetadas de forma diferente pela ionosfera. A estação PRU2 está localizada em uma latitude magnética de aproximadamente -13° , portanto localizada na parte sul da região do globo afetada pela anomalia equatorial, onde a densidade de elétrons é alta e variável, e onde bolhas de plasma podem frequentemente se formar, ocasionando a geração de irregularidades como a cintilação ionosférica. A estação POAL, por sua vez, está localizada em uma latitude magnética de aproximadamente -21° , região em que a densidade eletrônica é menor e mais regular.

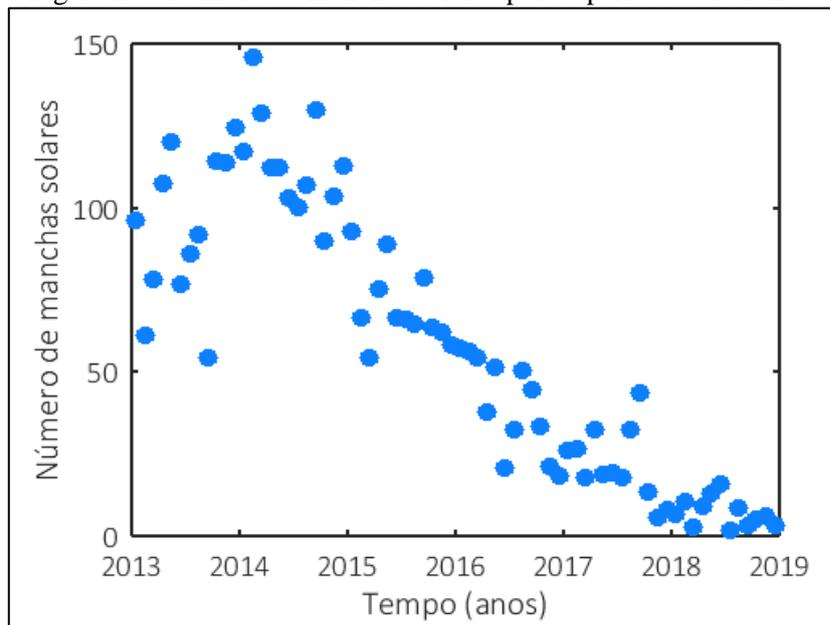
Para analisar a performance de ambos os modelos sob diferentes condições ionosféricas, foram selecionados três dias do mês de junho e três dias do mês de outubro de 2013, ano em que o sistema Galileo começou a calcular e transmitir os parâmetros do modelo NeQuick G, até 2018 (dias 20 a 22 de junho e outubro, exceto para outubro de 2018, em que foram selecionados os dias 30 e 31 devido à disponibilidade de dados). Os dias de junho selecionados estão próximos do solstício de inverno no hemisfério Sul, caracterizado por baixa atividade ionosférica, e os dias de outubro estão próximos do equinócio de primavera no hemisfério Sul, caracterizado por atividade ionosférica alta. O período de 2013 a 2018

selecionado cobre parte do ciclo solar 24 (e sua transição para o ciclo solar 25), que atingiu seu pico no ano de 2014 e vêm enfraquecendo desde então (Figura 23).

Figura 22 - Estações da Rede CIGALA/CALIBRA selecionadas



Figura 23 - Número de manchas solares para o período selecionado



Fonte: Adaptado de SIDC (2019)

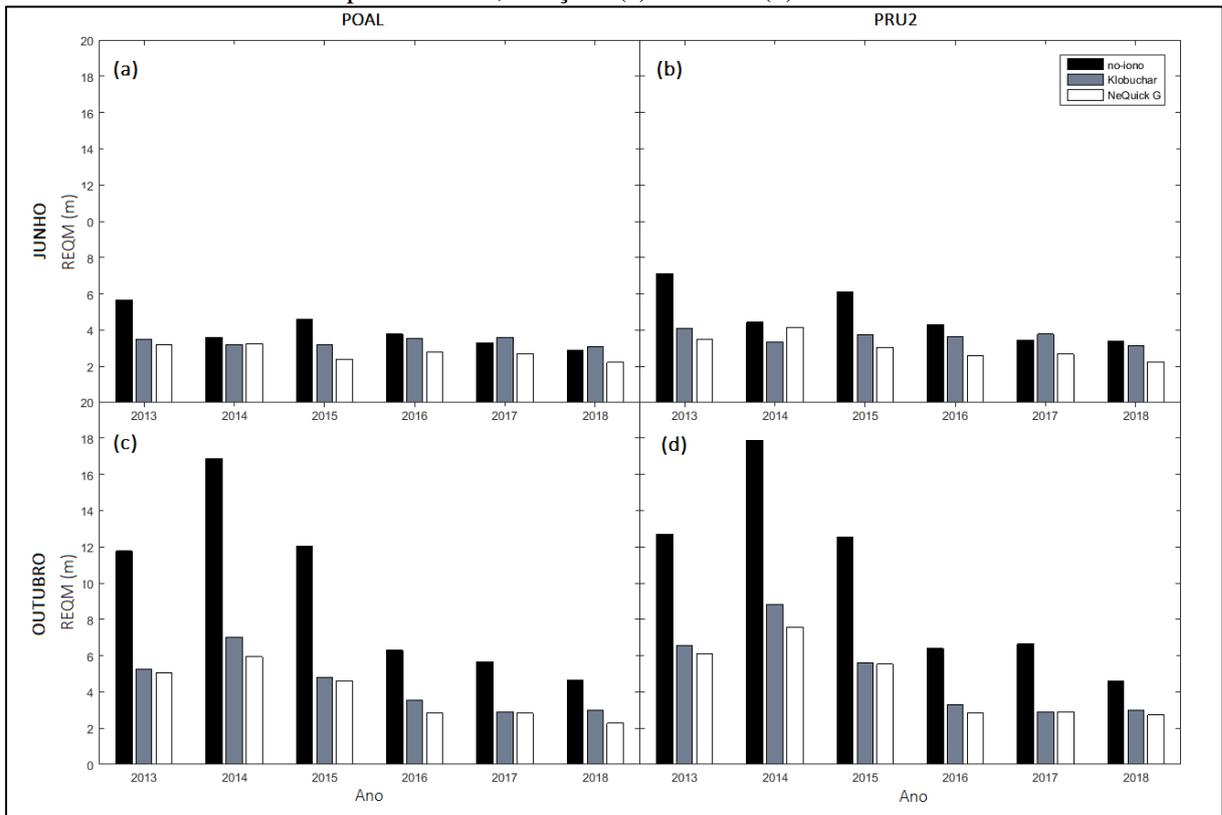
A comparação entre os modelos deu-se no domínio da posição. Para avaliar a eficácia dos modelos ionosféricos, a posição estimada sem correções ionosféricas (chamada de “no-iono”) foi também analisada. A análise é apresentada principalmente em relação à REQM das coordenadas tridimensionais.

6.2 Resultados e discussões

A Figura 24 apresenta a REQM 3D da posição estimada para as estações POAL e PRU2, considerando os resultados dos três dias de junho e outubro selecionados e para as três abordagens da ionosfera: solução sem correção ionosférica e dos modelos de Klobuchar e NeQuick G. Analisando a Figura 24, é possível notar o comportamento sazonal da ionosfera: os erros são sempre maiores em outubro se comparados aos de junho do mesmo ano. Os maiores erros estão também sempre associados à estação PRU2 quando comparados aos de POAL nos mesmos períodos devido à localização das estações em relação ao equador magnético. Os maiores erros, quando não são aplicadas correções ionosféricas, ocorrem em outubro de 2014, pico do ciclo solar, com REQM de 18,0 m para PRU2 (Figura 24 (d)) e de 16,9 m para POAL (Figura 24 (c)). Os menores erros (solução no-iono), por outro lado, estão associados aos resultados de junho de 2018, mês de atividade ionosférica baixa, e quando o ciclo solar está atingindo o seu mínimo (REQM de 3,4 m para PRU2 (Figura 24 (b)) e de 2,9 m para POAL (Figura 24 (a))).

Comparando a performance dos modelos ionosféricos é possível notar que, na maior parte dos casos, o emprego de um modelo para eliminar ou reduzir o atraso ionosférico das observações é benéfico para a estimativa da posição, especialmente quando a ionosfera está mais ativa (mês de outubro, anos próximos do máximo do ciclo solar). Considerando todos os períodos e estações, a maior taxa de melhoria na REQM do posicionamento é de 65% para a estação POAL, outubro de 2014, quando a REQM 3D de 16,9 m quando não é aplicado modelo ionosférico decresce para 6,0 m com o modelo de NeQuick G (Figura 24 (c)). Comparando ambos os modelos, o modelo NeQuick G apresenta melhores resultados que o modelo de Klobuchar em 92% do tempo. A maior taxa de melhoria é dada em períodos de baixa atividade ionosférica: estação POAL, junho de 2018 (Figura 24 (a)) e estação PRU2, junho de 2016, 2017 e 2018 (Figura 24 (b)), quando a REQM foi melhorado em 29%.

Figura 24 - REQM 3D da posição estimada para os dias de junho, estações (a) POAL e (b) PRU2, e para outubro, estações (c) POAL e (d) PRU2



Para melhor entendimento dos resultados apresentados na Figura 24, a Figura 25 e a Figura 26 apresentam uma visualização época a época dos erros horizontal e vertical (sem correção ionosférica) da posição estimada da estação PRU2, para o dia 22 de outubro de 2014 (Figura 25, maior REQM da Figura 24), e do dia 21 de junho de 2018 (Figura 26, segunda menor REQM da Figura 24, escolhida para manter a análise focada na estação PRU2). Os erros na coordenada são então associados ao STEC época a época da estação (em unidades de TEC, equivalente a um erro em distância de 16,2 cm na frequência L1) e ao índice S4, obtidos dos receptores ISMR (*Ionospheric Scintillation Monitor Receivers*) utilizados no experimento. É válido ressaltar que, embora exemplificadas pelas duas figuras, as análises feitas podem ser estendidas para os outros períodos e estações.

Na Figura 25 (a) e na Figura 26 (a) é possível notar o comportamento da ionosfera ao longo do dia; os menores valores de densidade eletrônica são encontrados durante o período noturno, atingindo então um pico no período vespertino, hora local (UTC – 3h). Considerando os meses de outubro de 2014 e junho de 2018 em relação ao período do ano e ao ciclo solar, já

era esperado que os valores de TEC fossem muito maiores na Figura 25 (máximo em torno de 300 TECU) do que na Figura 26 (máximo em torno de 100 TECU).

Figura 25 - (a) STEC, (b) Erro horizontal e vertical (no-iono) e (c) S4 para a estação PRU2, 22 de outubro de 2014

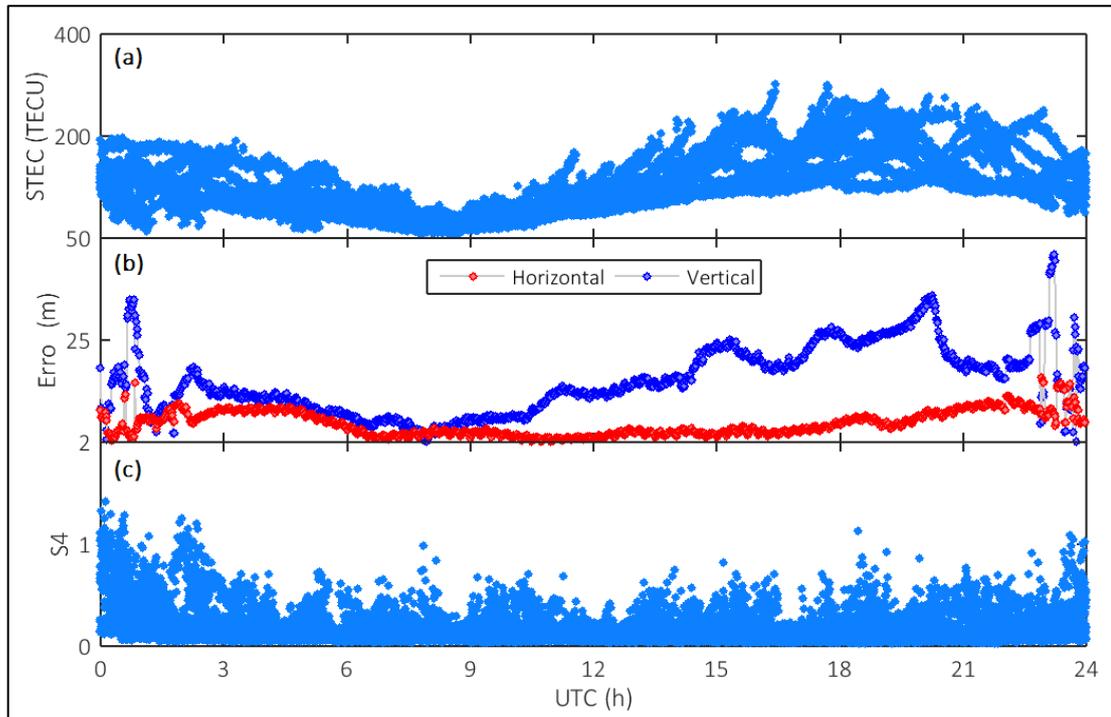
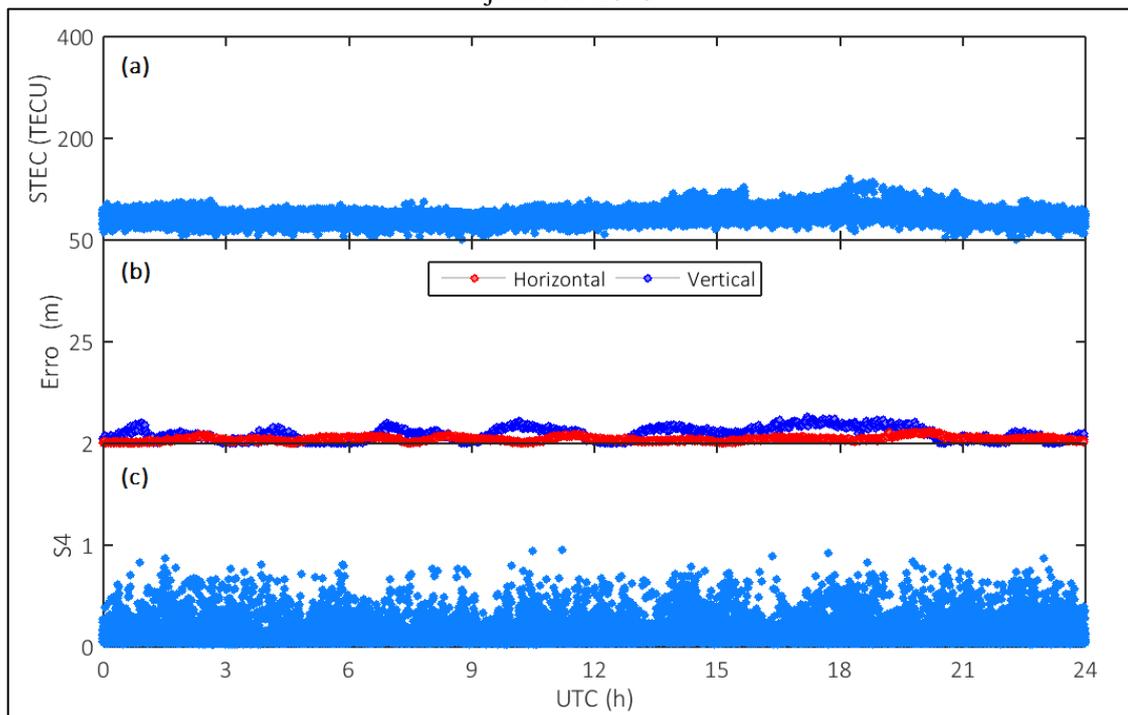


Figura 26 - (a) STEC, (b) Erro horizontal e vertical (no-iono) e (c) S4 para a estação PRU2, 21 de junho de 2018



Analisando a Figura 25 (b) e a Figura 26 (b), é possível notar a influência do TEC na estimativa da posição, especialmente na componente vertical (que também é influenciada pela geometria dos satélites). No dia de outubro de 2014, o erro médio vertical é de 15,0 m, enquanto que em junho de 2018 este valor decai para 2,4 m. O erro horizontal é menos afetado pela ionosfera, indo de uma média de 4,5 m em outubro de 2014 para 1,1 m em junho de 2018. Embora seja possível notar a correlação entre o TEC e o erro posicional (na componente vertical, outubro de 2014, por exemplo, é possível notar um pico de 35,9 m no erro por volta de 20h15min UTC, 17h15min hora local, que concorda com o máximo do TEC para o dia), o TEC não é capaz de explicar alguns picos no erro que ocorrem durante o período noturno, tanto na componente horizontal (máximo de 15,8 m) quanto na vertical (máximo de 45,9 m). Tais picos podem ser explicados pela cintilação ionosférica.

A Figura 25 (c) e a Figura 26 (c) apresentam os valores do índice S4 para os dois dias analisados, época a época. A intensidade da cintilação é normalmente classificada como forte quando o índice S4 é superior a 1 (TIWARI et al., 2011). Como pode ser visto na Figura 25 (c) e é reportado na literatura (KELLEY, 1989; MARQUES et al., 2018), a cintilação normalmente ocorre em períodos de alta atividade ionosférica, começando após o pôr do sol, aproximadamente 18h locais, afetando os sinais GNSS até aproximadamente 3h da manhã. Comparando a Figura 25 (b) e a Figura 25 (c) nota-se facilmente que os maiores erros no posicionamento ocorrem simultaneamente a períodos de cintilação forte.

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam uma visualização época a época dos erros horizontal e vertical para os mesmos dois dias anteriormente caracterizados, agora apresentando o comportamento da solução quando os modelos de Klobuchar e NeQuick G são aplicados. Para melhor entendimento e visualização dos resultados, a escala das duas figuras não é a mesma.

Analisando a Figura 27 e a Figura 28, diferentes conclusões podem ser obtidas para as componentes horizontal e vertical. Na componente horizontal, as diferenças entre os modelos e a solução sem correção ionosférica são quase imperceptíveis para os períodos de baixa atividade ionosférica (Figura 28, REQM horizontal de 1,1 m para as três estratégias de processamento). No período de alta atividade ionosférica (Figura 27), o erro horizontal decresce de 4,5 m na solução no-iono para 4,1 m com o modelo de Klobuchar (melhoria de 9%) e para 3,5 m com o modelo NeQuick G (melhoria de 22%).

Figura 27 - Erro horizontal e vertical para estação PRU2, 22 de outubro de 2014 para processamento (a) sem correção ionosférica e com modelo de (b) Klobuchar e (c) NeQuick G

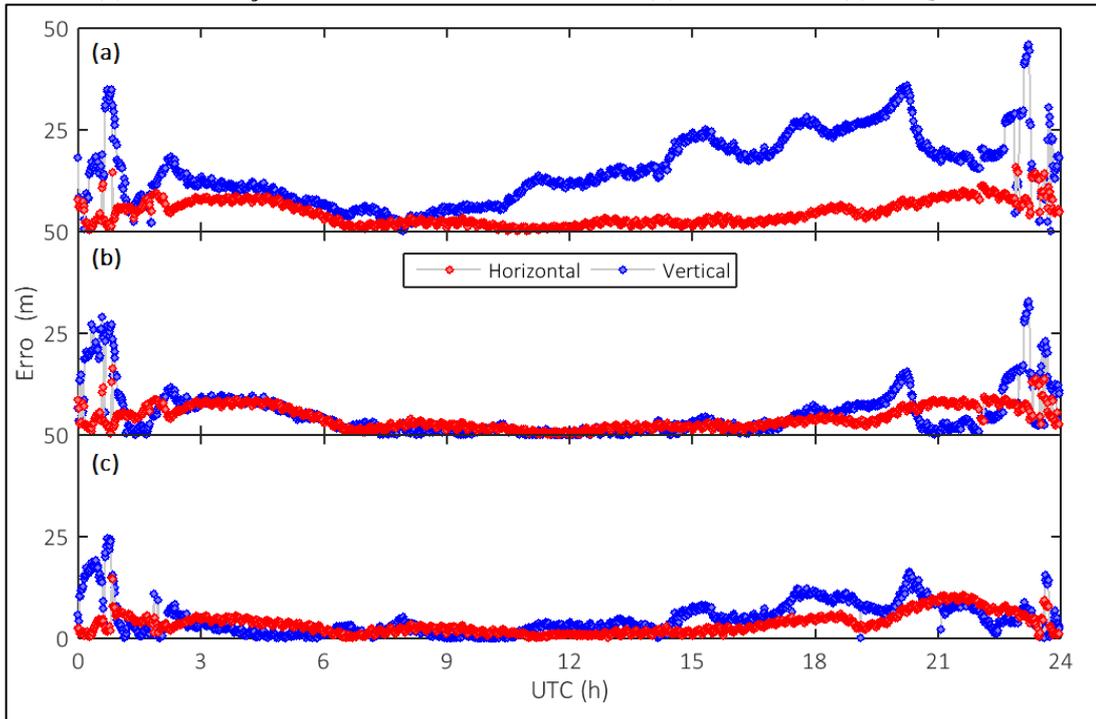
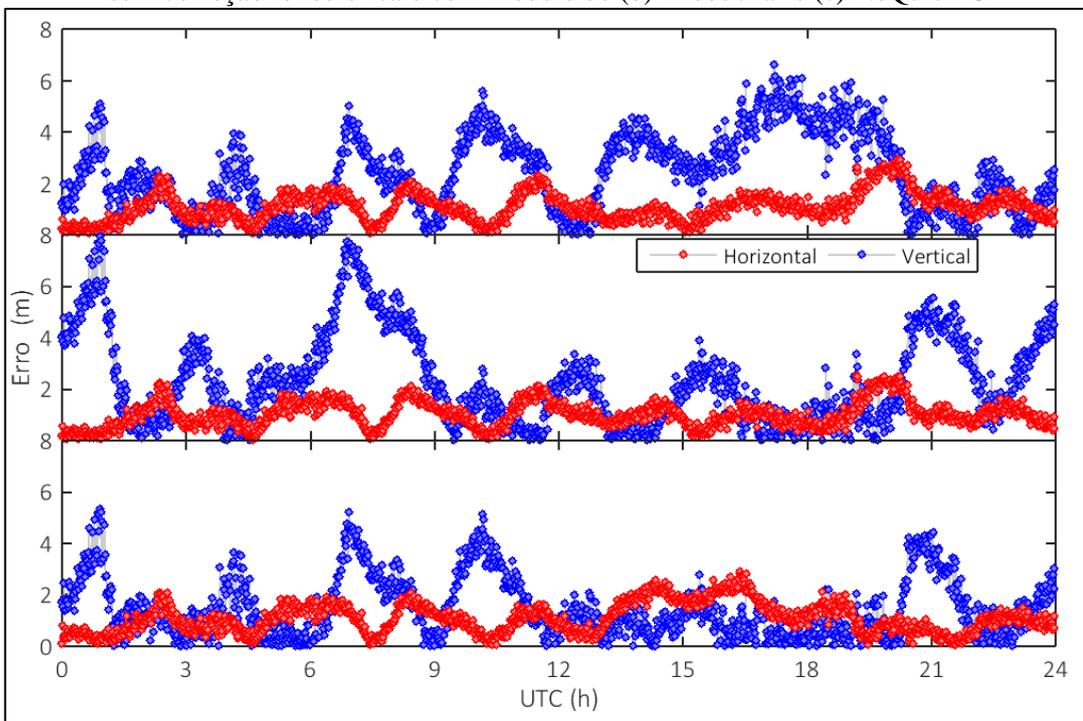


Figura 28 - Erro horizontal e vertical para estação PRU2, 21 de junho de 2018 para processamento (a) sem correção ionosférica e com modelo de (b) Klobuchar e (c) NeQuick G



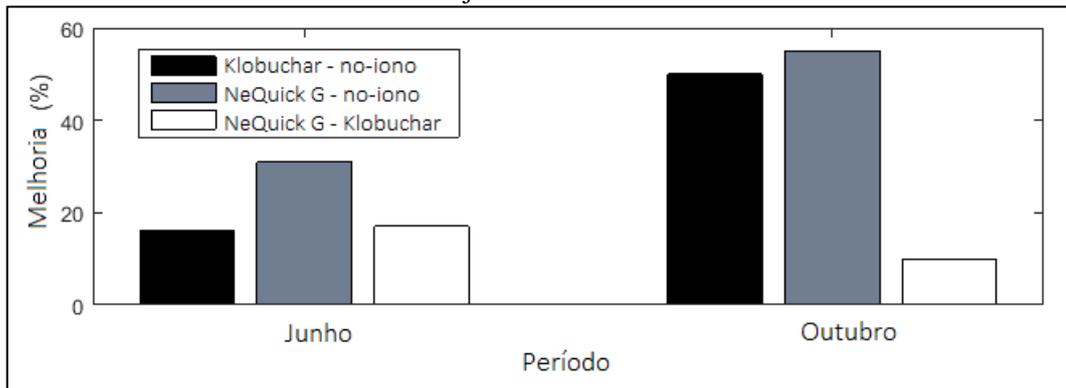
Na componente vertical (a mais afetada pelo atraso ionosférico), o impacto da correção ionosférica é maior. Para o período de baixa atividade ionosférica, a REQM vertical decresce de 2,4 m na solução no-iono para 2,3 m com Klobuchar (melhoria de 4%) e para 1,5 m com NeQuick G (melhoria de 38%). Na Figura 28, entretanto, é possível notar que, em algumas épocas, o uso de um modelo ionosférico pode degradar a estimativa da posição. Isto ocorre principalmente na componente vertical e com o modelo de Klobuchar durante o período noturno, quando o atraso ionosférico é fixado em uma constante de 5 ns; o modelo tem uma melhor performance durante o período diurno, quando o atraso é modelado por uma função de semi-cosseno. As melhorias mais significativas ocorrem na componente vertical durante o período de alta atividade ionosférica (Figura 27): a REQM vertical decresce de 15,0 m no-iono para 4,9 m com o modelo de Klobuchar (melhoria de 67%) e para 4,7 m com o modelo NeQuick G (melhoria de 69%).

Com relação aos erros causados devido à cintilação ionosférica (Figura 25 e Figura 27), é possível notar uma deficiência em ambos os modelos. Embora o erro posicional seja expressivamente reduzido com a utilização de qualquer um dos dois modelos (na componente vertical, o erro máximo é reduzido de 45,9 m no-iono para 32,8 m com Klobuchar e para 24,7 m com NeQuick G), estes ainda são bem maiores do que seria esperado durante o período noturno na ausência de cintilação.

Vale ressaltar que outros fatores além do ciclo solar podem estar afetando a acurácia dos resultados (melhores resultados obtidos proporcionalmente à baixa no ciclo solar), como a qualidade com que as órbitas e DCBs dos satélites são estimados, o número de estações utilizadas para cálculo dos parâmetros ionosféricos transmitidos pelos satélites GPS e Galileo e, de uma maneira mais expressiva, o número de satélites Galileo utilizados no experimento (em 2013, 2014 e 2015, o número de satélites Galileo rastreados simultaneamente variou entre 0 e 3, com uma média de 1 satélite; em 2017 e 2018, este número cresceu para 5 satélites, com um mínimo de 2 e máximo de 7). Entretanto, tais fatores afetam todas as estratégias de processamento da mesma maneira, não afetando ou comprometendo os resultados e conclusões aqui apresentados.

Para sumariar os resultados descritos e discutidos nesta seção, a Figura 29 apresenta a melhoria na REQM 3D da posição estimada com cada um dos modelos em relação à solução sem correção ionosférica e a melhoria com o uso do modelo NeQuick G em relação ao modelo de Klobuchar, considerando as médias de todas as estações e anos analisados para os meses de junho e outubro.

Figura 29 - Melhoria na REQM 3D, considerando todas as estações e anos analisados, para os meses de junho e outubro



Considerando os resultados médios apresentados na Figura 29, é possível concluir que ambos os modelos são capazes de minimizar o erro causado pela ionosfera nas observações de pseudodistância GNSS, especialmente em períodos de alta atividade ionosférica (o modelo de Klobuchar melhora a estimativa da posição em 50% em outubro e o NeQuick G em 55%). Em períodos de baixa atividade ionosférica, a aplicação de um modelo de correção ionosférica tem um impacto menor (16% para o Klobuchar e 31% para o NeQuick G em junho). Entretanto, nota-se que o modelo NeQuick G mostra-se superior ao modelo de Klobuchar nos dois casos, especialmente em períodos de baixa atividade ionosférica (17% melhor em junho e 10% melhor em outubro).

6.3 Considerações

Neste experimento, a performance do Posicionamento por Ponto multi-GNSS (GPS e Galileo) em simples frequência (L1/CA para GPS e E1 para Galileo) usando dois modelos ionosféricos, Klobuchar, associado ao GPS, e NeQuick G, associado ao Galileo, e sem correções ionosféricas foi analisada. Para o experimento, duas estações brasileiras (PRU2 e POAL) localizadas em diferentes partes do país foram selecionadas e os resultados do Posicionamento por Ponto foram analisados considerando um período de 6 anos, desde 2013 até 2018 (cobrindo todo o período em que parâmetros do NeQuick G têm sido transmitido por satélites Galileo), considerando assim variações sazonais e de longo período que afetam a ionosfera.

Pelos resultados obtidos, é possível concluir que há um benefício na acurácia do posicionamento quando um modelo ionosférico é utilizado, especialmente na componente

vertical, que é a mais afetada pelo atraso ionosférico. O uso de ambos os modelos melhora a acurácia do posicionamento, principalmente em períodos de alta atividade ionosférica, quando os erros são maiores, embora nenhum deles consiga lidar de forma eficaz com a cintilação ionosférica. Considerando todos os períodos e estações, o modelo NeQuick G mostra-se melhor que o Klobuchar em quase todos os casos analisados; esta melhoria é notada de forma mais expressiva em períodos de baixa atividade ionosférica, quando o NeQuick G é até 29% melhor que o modelo de Klobuchar.

Deste modo, é possível concluir que, para a região brasileira, o modelo NeQuick G é superior ao modelo de Klobuchar na maior parte do tempo, tanto para a estação PRU2 (localizada mais próxima do equador geomagnético) quanto para a estação POAL (mais afastada do equador geomagnético) e no período de 2013 a 2018.

7 EXPERIMENTO III: AVALIAÇÃO SAZONAL DOS MODELOS DE KLOBUCHAR E NEQUICK G A NÍVEL GLOBAL

Neste terceiro e último experimento, buscou-se fazer uma avaliação comparativa da performance dos modelos ionosféricos NeQuick G e Klobuchar a nível global, considerando as diferentes latitudes e o comportamento sazonal da ionosfera ao longo de um ano. Este capítulo apresenta a metodologia adotada, os resultados, discussões e considerações sobre o experimento.

7.1 Metodologia

A análise dos modelos de Klobuchar e NeQuick G foi conduzida considerando três diferentes abordagens: inicialmente, utilizou-se como referência os valores de TEC extraídos de GIMs e duas análises baseadas em 20 estações das Redes MGEX, CIGALA/CALIBRA e da rede da *University of Nottingham* (Figura 30), no domínio do atraso ionosférico e no domínio da posição.

Na primeira abordagem, o atraso ionosférico calculado a partir de ambos os modelos foi comparado com os valores de TEC vertical (VTEC – *Vertical TEC*), convertidos para atraso ionosférico na frequência L1 pela equação 4.2, extraídos de GIMs disponibilizados pelo IGS. Tais mapas cobrem uma área de 87,5° de latitude norte a 87,5° de latitude sul e de 180° de longitude leste a 180° de longitude oeste, com valores a cada 2,5° em latitude e 5° em longitude. Os GIMs são calculados num intervalo amostral de 2 horas, com dados da Rede IGS. Todos os mapas de julho de 2017 a junho de 2018 (um ano de dados) foram utilizados nesta primeira análise.

Comparações no domínio do atraso ionosférico foram então realizadas. O atraso no sinal L1 foi calculado para todas as observáveis GPS (L1/L2) e Galileo (E1/E5a) usando tanto o modelo de Klobuchar quanto o modelo NeQuick G e comparado com o atraso calculado a partir da metodologia proposta por Arikan et al. (2008), descrita na seção 4.6. Para cobrir diferentes condições ionosféricas ao longo do ano, uma semana de dados de setembro (DOY 267 a 273) e dezembro (DOY 358 a 364) de 2017 e de março (DOY 84 a 90) e junho (DOY 175 – 181) de 2018 foram utilizadas, empregando as 20 estações descritas anteriormente (Figura 30), cobrindo diferentes latitudes magnéticas.

Figura 30 - Estações selecionadas para análise no domínio do atraso ionosférico e da posição



A análise no domínio da posição deu-se com o emprego do software de Posicionamento por Ponto desenvolvido, descrito em detalhes na seção 5.1. Foram utilizados, neste caso, os sistemas GPS (L1/CA) e Galileo (E1), com o emprego dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, além da solução “no-iono”, em que não foram aplicadas correções do atraso ionosférico, e os resultados foram analisados em termos da REQM 3D, comparando as coordenadas estimadas das estações com suas coordenadas oficiais, atualizadas para a época de processamento.

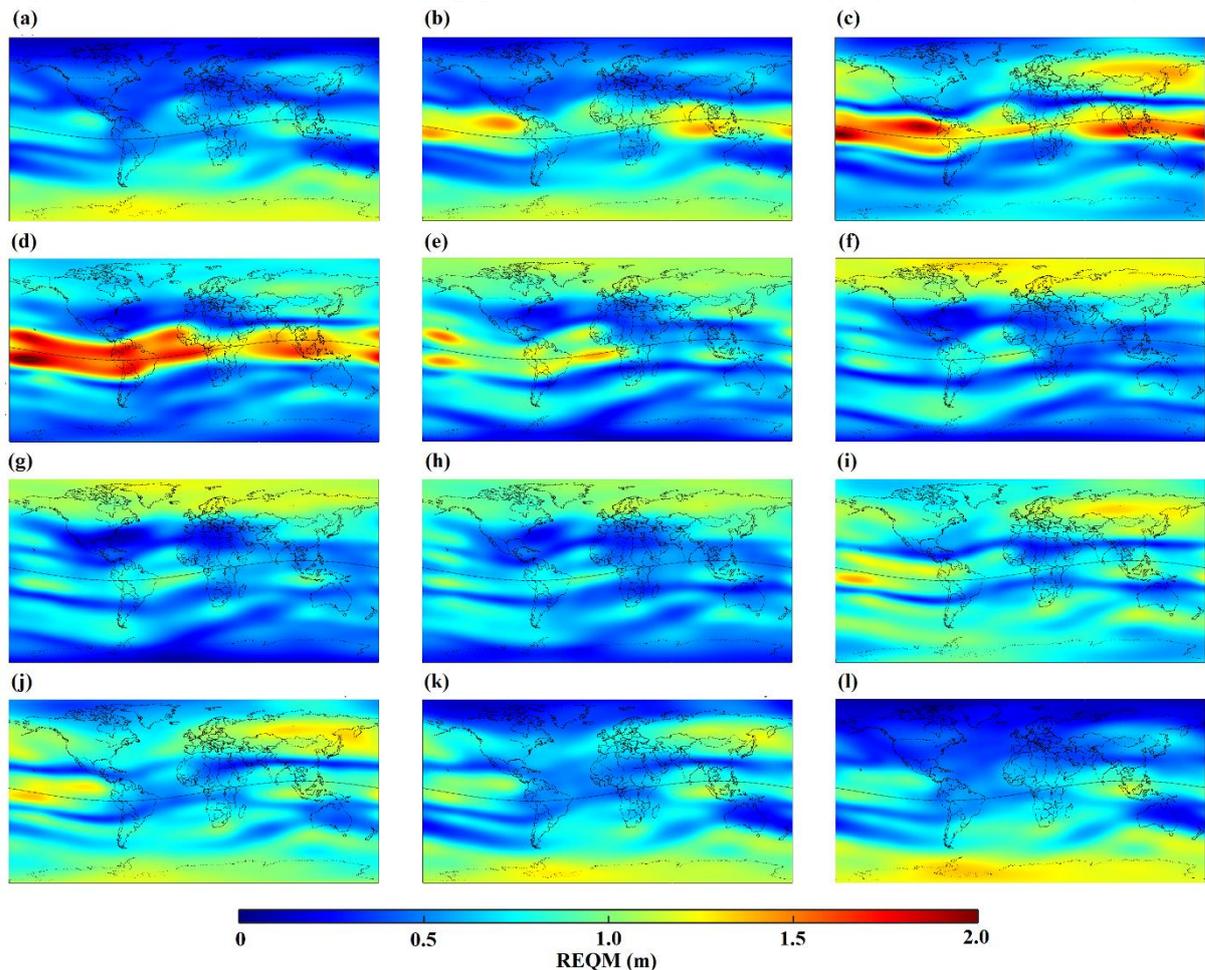
7.2 Resultados e discussões

Esta seção é dividida em três subseções, cada qual contendo uma das abordagens descritas para realização do experimento.

7.2.1 Análise baseada nos Mapas Globais Ionosféricos

A Figura 31 e a Figura 32 apresentam a REQM mensal do atraso ionosférico dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, respectivamente, interpolados para todo o globo terrestre com base nos GIMs, para todo o período de estudo. A Figura 33, por sua vez, apresenta a REQM mensal dividido nas diferentes regiões da Terra, de acordo com as latitudes magnéticas (ZOLESI e CANDLER, 2014): baixas latitudes (0 - 20°), latitudes médias (20 - 65°) e altas latitudes (65 - 90°), para os hemisférios Norte e Sul.

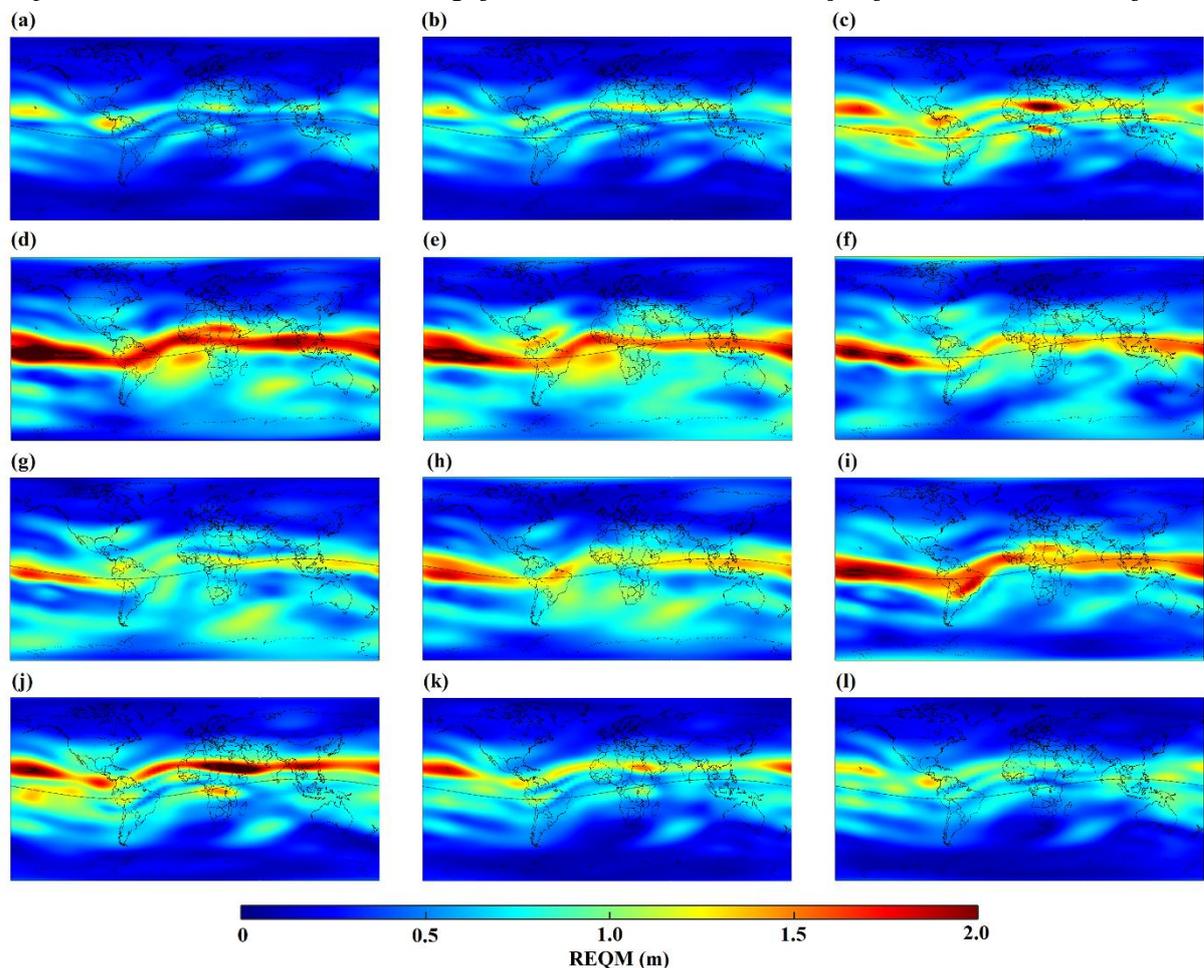
Figura 31 - REQM (m) mensal do atraso ionosférico (L1) do modelo de Klobuchar, para o segundo semestre de 2017, meses (a) julho, (b) agosto, (c) setembro, (d) outubro, (e) novembro e (f) dezembro e primeiro semestre de 2018, meses (g) janeiro, (h) fevereiro, (i) março, (j) abril, (k) maio e (l) junho



Com base na análise da Figura 31, Figura 32 e Figura 33, algumas conclusões podem ser feitas sobre o comportamento sazonal dos modelos ionosféricos de Klobuchar e NeQuick G para as diferentes regiões da Terra, considerando o ano de 2017/2018. Em relação

às altas latitudes, o modelo NeQuick G é mais estável ao longo do ano, enquanto que o modelo de Klobuchar é mais dependente dos parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação, sendo a sua REQM altamente variável ao longo do ano. Considerando todo o ano analisado e as altas latitudes, o modelo de Klobuchar apresenta REQM de 0,65 m e o NeQuick G REQM igual a 0,25 m. Nessas regiões, a melhor performance do modelo de Klobuchar é obtida em meses próximos ao solstício de verão em ambos os hemisférios e a pior performance durante o solstício de inverno.

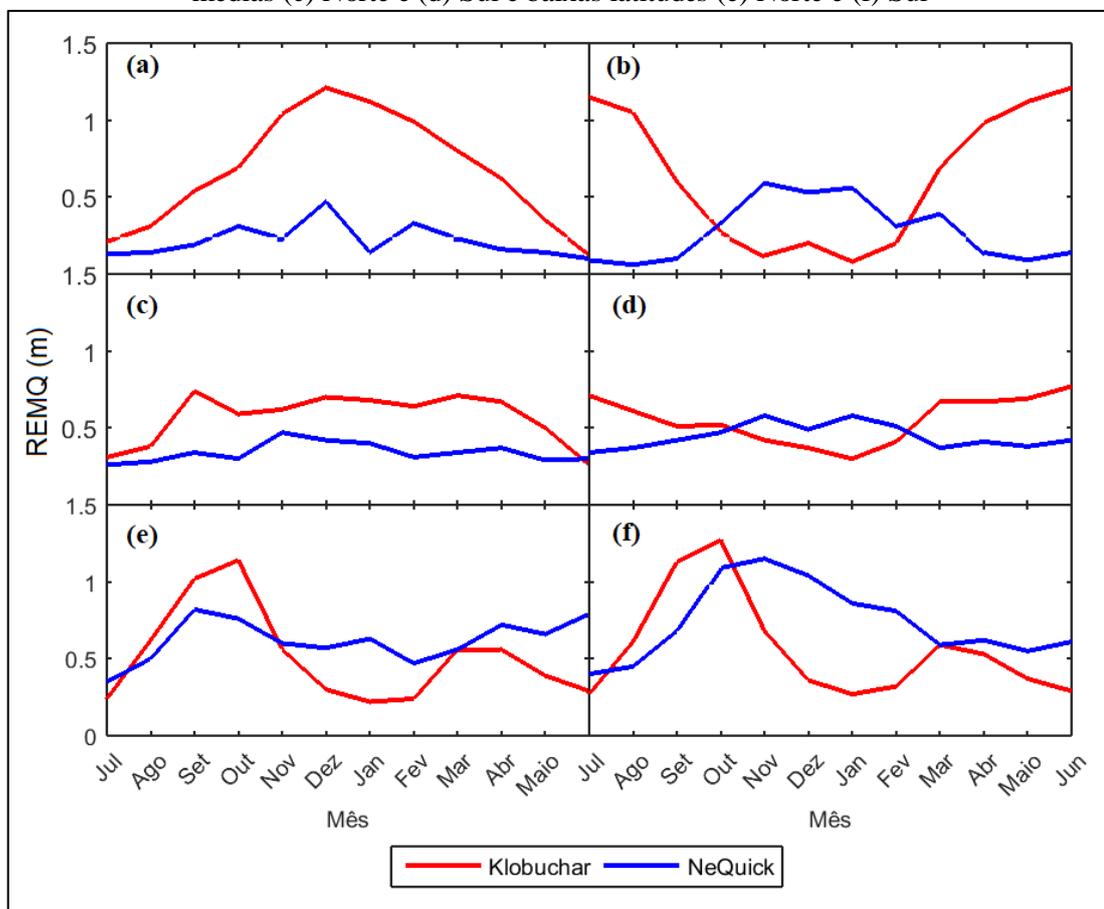
Figura 32 - REQM (m) mensal do atraso ionosférico (L1) do modelo NeQuick G, para o segundo semestre de 2017, meses (a) julho, (b) agosto, (c) setembro, (d) outubro, (e) novembro e (f) dezembro e primeiro semestre de 2018, meses (g) janeiro, (h) fevereiro, (i) março, (j) abril, (k) maio e (l) junho



Novamente considerando todo o período, ambos os modelos apresentam uma performance mais estável nas regiões de médias latitudes, tendo o modelo de Klobuchar uma REQM de 0,56 m e o modelo NeQuick G uma REQM de 0,39 m. Tais resultados já eram esperados, uma vez que estas são as regiões que apresentam um comportamento mais calmo da

ionosfera, em que o nível de densidade eletrônica é mais baixo e estável comparado às regiões polares e equatorial. É também nestas regiões que a maior parte das estações GNSS utilizadas para geração dos parâmetros ionosféricos transmitidos nas mensagens de navegação estão localizadas. No hemisfério Norte, o modelo NeQuick G tem uma melhor performance que o modelo de Klobuchar durante todo o ano, enquanto que no hemisfério Sul o modelo de Klobuchar apresenta menores valores de REQM durante o verão.

Figura 33 - REQM mensal dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, considerando as diferentes regiões da Terra, de acordo com a latitude magnética: altas latitudes (a) Norte e (b) Sul, latitudes médias (c) Norte e (d) Sul e baixas latitudes (e) Norte e (f) Sul



Na região de baixas latitudes, o modelo de Klobuchar apresentou REQM de 0,53 m e o modelo NeQuick G REQM de 0,69 m, indicando uma performance ruim do modelo NeQuick G nesta região. Considerando o modelo de Klobuchar, maiores valores de REQM são obtidos em meses próximos aos equinócios, quando a atividade ionosférica é mais alta.

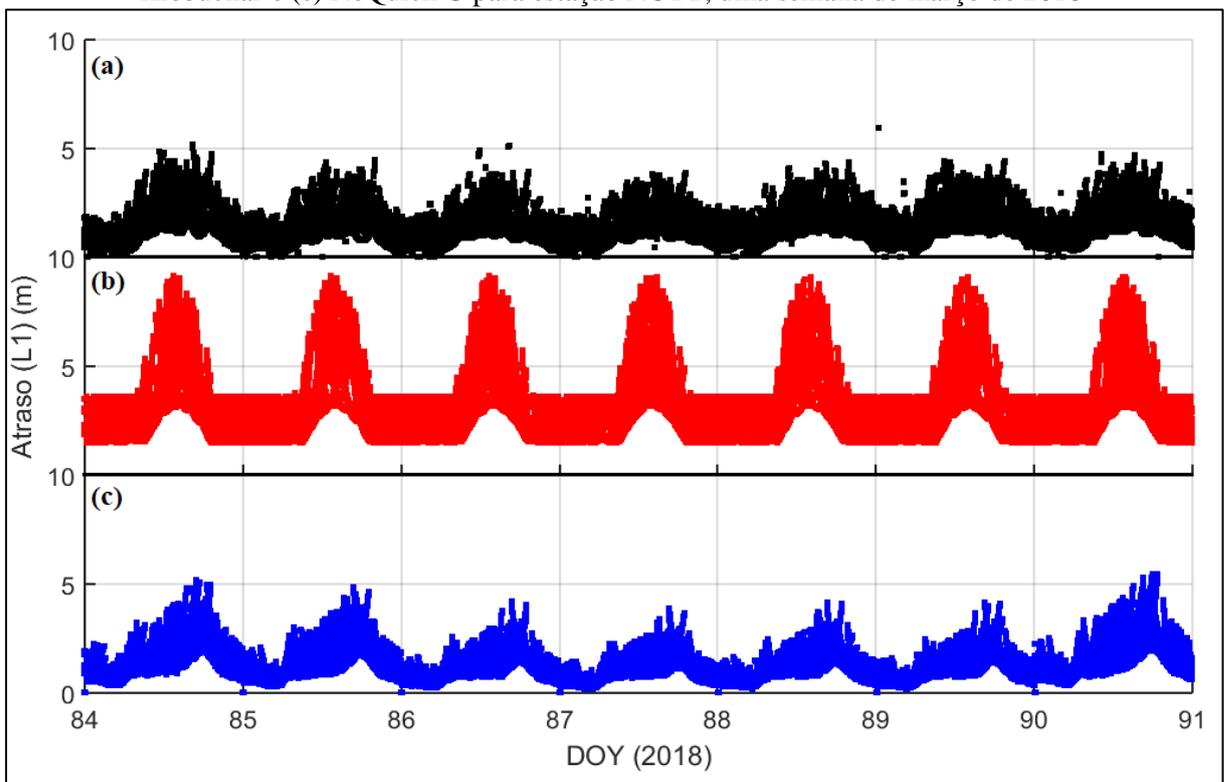
Considerando o globo como um todo, o modelo de Klobuchar apresentou um erro relativo de 49% e o modelo NeQuick G um erro relativo de 40%.

7.2.2 Análise baseada no domínio do atraso ionosférico

A segunda análise foi realizada considerando o atraso ionosférico na frequência L1 calculado a partir dos modelos de Klobuchar e NeQuick G, comparado ao atraso calibrado obtido de observações de dupla frequência. Em contrapartida à análise apresentada na subseção 7.2.1, esta leva em consideração valores de STEC ao invés de VTEC.

A Figura 34 exemplifica para a estação NOTT (localizada em Nottingham, no Reino Unido, em uma latitude magnética aproximada de $+55^\circ$) a abordagem que foi adotada para as 20 estações e para as quatro semanas de 2017 e 2018 mencionadas na seção 7.1. Na Figura 34 (a), é apresentado o atraso ionosférico calculado a partir de observações de dupla frequência GPS e Galileo coletadas pela estação durante uma semana de março de 2018; na Figura 34 (b), o atraso para os mesmos satélites e período computado pelo modelo de Klobuchar e na Figura 34 (c) pelo modelo NeQuick G.

Figura 34 - Atraso ionosférico estimado a partir de (a) observações de dupla frequência, (b) modelo de Klobuchar e (c) NeQuick G para estação NOTT, uma semana de março de 2018



Analisando a Figura 34, é possível notar o comportamento característico do atraso ionosférico e, por consequência, da densidade eletrônica ao longo do dia, atingindo um máximo

durante o período da tarde e um mínimo durante o período noturno. A partir das estimativas do modelo de Klobuchar, é possível verificar que o atraso ionosférico é fixado em uma constante durante o período noturno e modelado por uma função de semi-cosseno durante o dia. Nota-se também que o modelo NeQuick G tem um comportamento mais realístico da estimativa do atraso, embora os resultados não sejam melhores em todas as épocas quando comparados aos valores de referência.

A Figura 35 apresenta o viés e a Figura 36 a REQM dos modelos de Klobuchar e NeQuick G para cada uma das estações e períodos. Em ambas as figuras, as ilustrações na coluna da esquerda representam o modelo de Klobuchar e as na coluna da direita representam o modelo NeQuick G. Cada uma das linhas representa um dos períodos: semana de setembro e dezembro de 2017 e de março e junho de 2018.

A partir de uma análise da Figura 35, nota-se que, na maioria expressiva dos casos, o modelo NeQuick G apresenta um viés negativo, o que indica que o modelo tende a subestimar o atraso ionosférico nas observações GNSS. O modelo de Klobuchar, por outro lado, tende a superestimar o atraso ionosférico (viés positivo) nas latitudes altas e médias e subestimar o atraso ionosférico (viés negativo) nas baixas latitudes. Considerando todas as estações e períodos analisados, o modelo de Klobuchar apresenta um viés médio de 0,72 m e o modelo NeQuick G um viés médio de -0,33 m.

Analisando a Figura 36, que apresenta a REQM de cada um dos modelos, observa-se que, em ambos os modelos, os maiores valores de REQM são obtidos em épocas próximas aos equinócios, quando a atividade ionosférica é mais alta, e na região de baixas latitudes. É também nessas regiões e períodos que o modelo NeQuick G tem o seu pior desempenho.

Nas altas latitudes, os maiores valores de REQM são obtidos para o modelo de Klobuchar durante o solstício de inverno em ambos os hemisférios. Durante os solstícios de verão, a performance dos dois modelos é bastante similar. Durante os equinócios, o modelo NeQuick G tem um melhor desempenho que o modelo de Klobuchar. Nas latitudes médias, o modelo NeQuick G apresenta uma melhor performance que o modelo de Klobuchar na maior parte dos casos, especialmente em estações localizadas no hemisfério Norte e para os períodos próximos aos equinócios.

Considerando todos os períodos e estações analisados, o modelo de Klobuchar apresenta REQM de aproximadamente 1,62 m e o modelo NeQuick G REQM em torno de 1,28 m, demonstrando, de um modo geral, a superioridade do modelo NeQuick G em relação ao modelo de Klobuchar.

Figura 35 - Viés do atraso ionosférico para todas as estações e períodos analisados, semana de setembro (a) Klobuchar, (b) NeQuick G e dezembro (c) Klobuchar, (d) NeQuick G de 2017 e semana de março (e) Klobuchar, (f) NeQuick G) e junho (g) Klobuchar, (h) NeQuick G de 2018

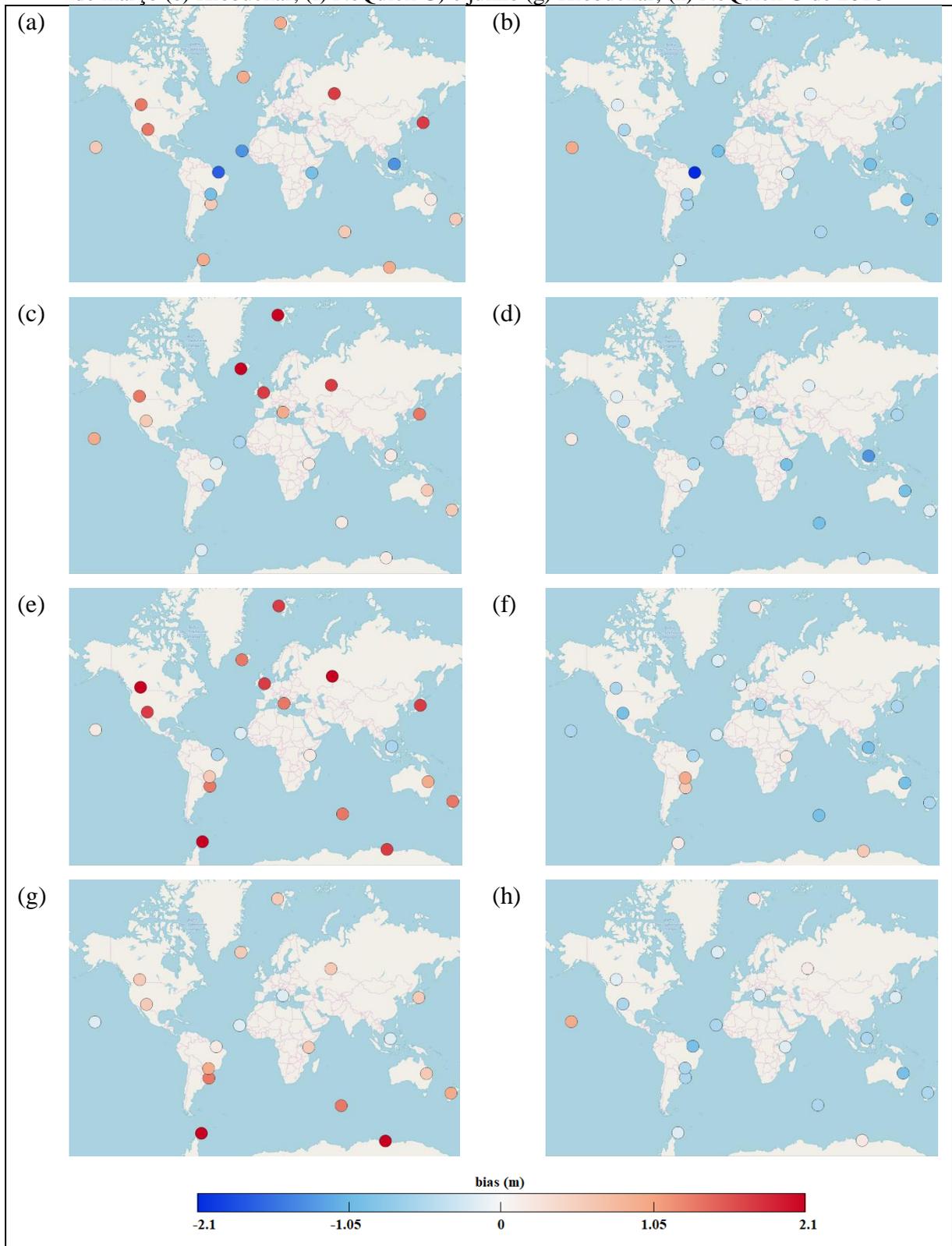
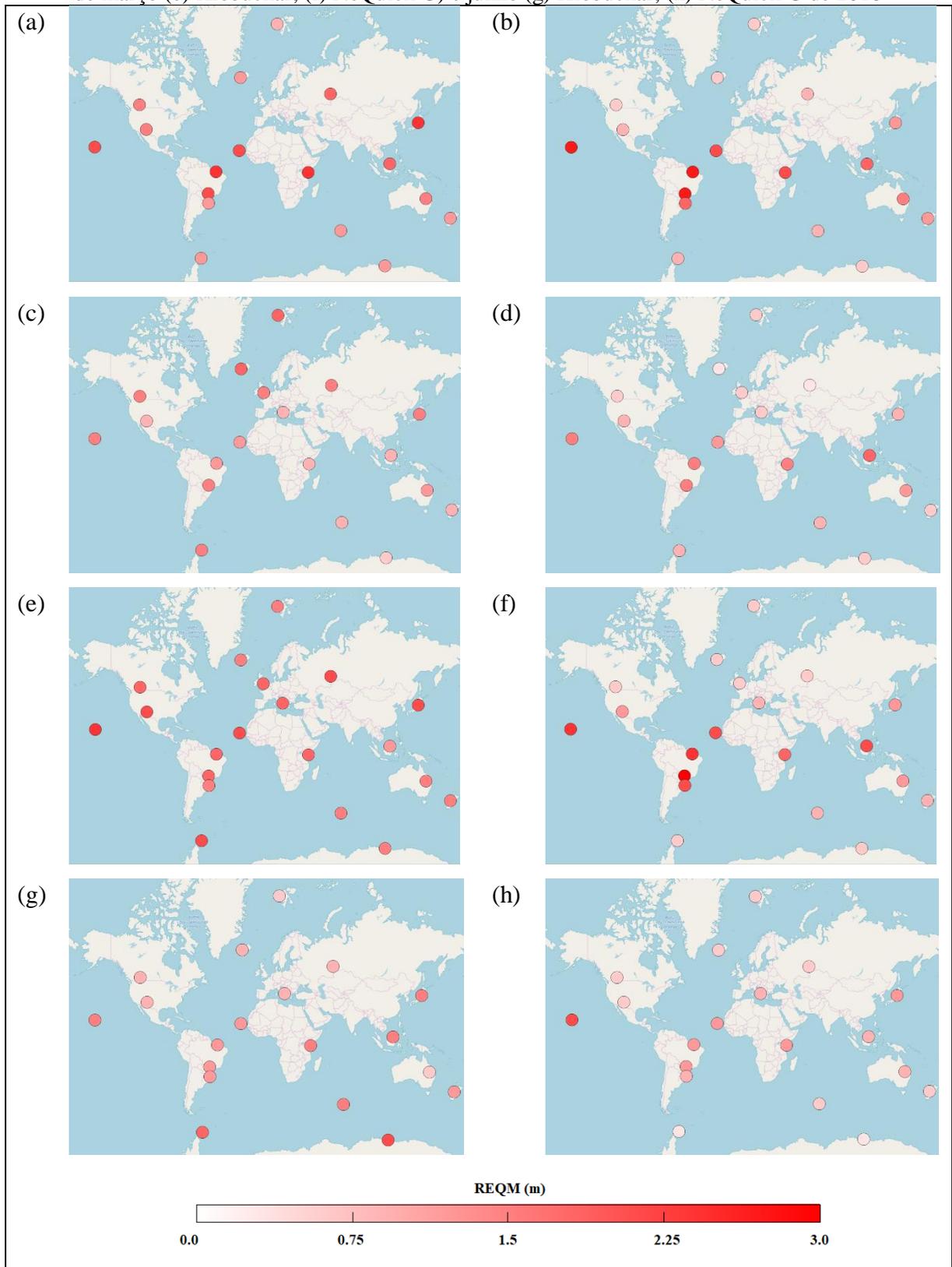


Figura 36 – REQM do atraso ionosférico para todas as estações e períodos analisados, semana de setembro (a) Klobuchar, (b) NeQuick G e dezembro (c) Klobuchar, (d) NeQuick G de 2017 e semana de março (e) Klobuchar, (f) NeQuick G) e junho (g) Klobuchar, (h) NeQuick G de 2018



7.2.3 Análise baseada no domínio da posição

A terceira análise deu-se no domínio da posição. A Figura 37 e a Figura 38 apresentam a REQM 3D para cada uma das semanas analisadas e para cada uma das 20 estações, considerando as três diferentes abordagens: sem correção ionosférica e com a aplicação dos modelos de Klobuchar e N1eQuick G.

Figura 37 - REQM 3D da posição estimada das estações processadas para a semana de (a) setembro e (b) dezembro de 2017, considerando a configuração no-iono, Klobuchar e NeQuick G

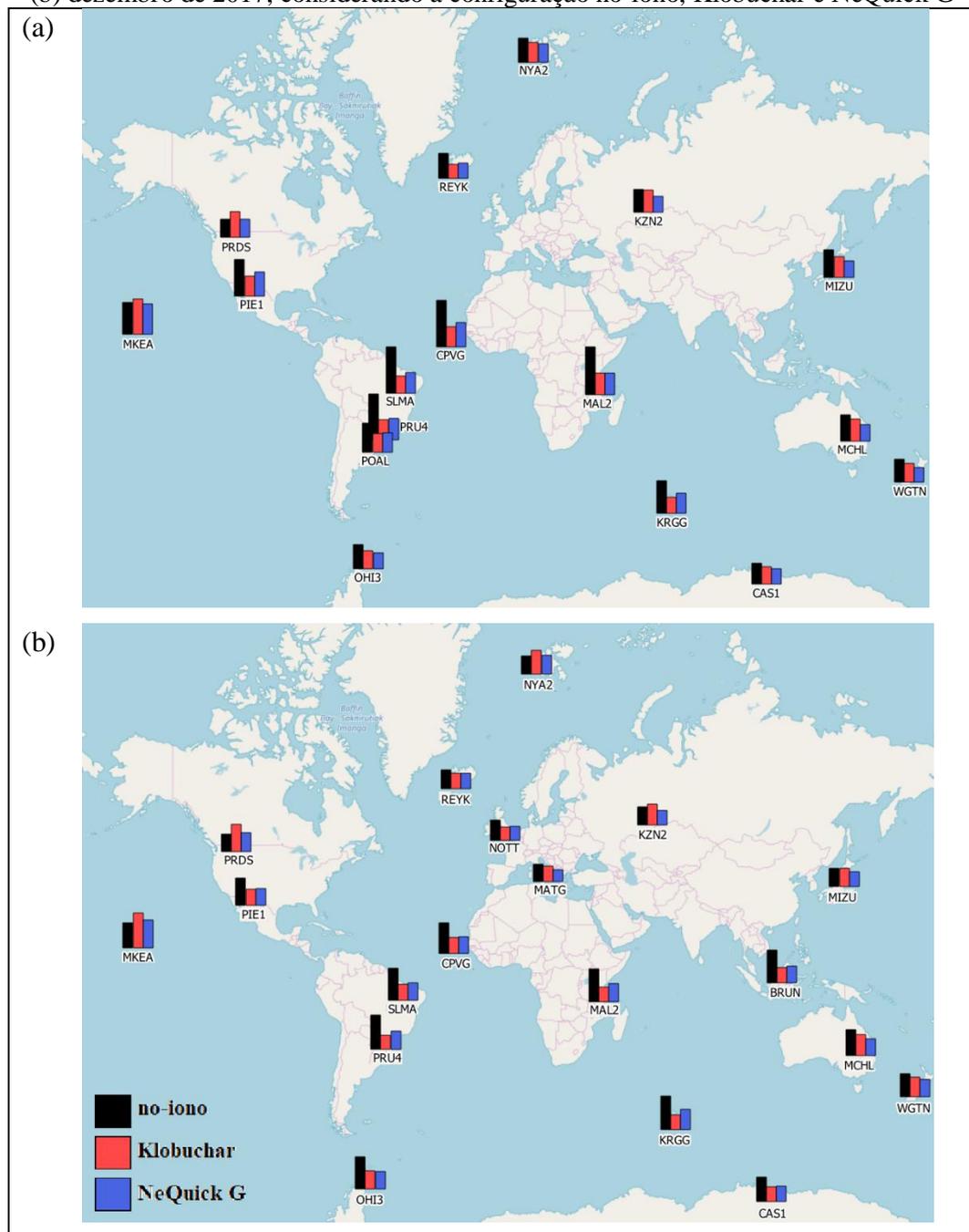
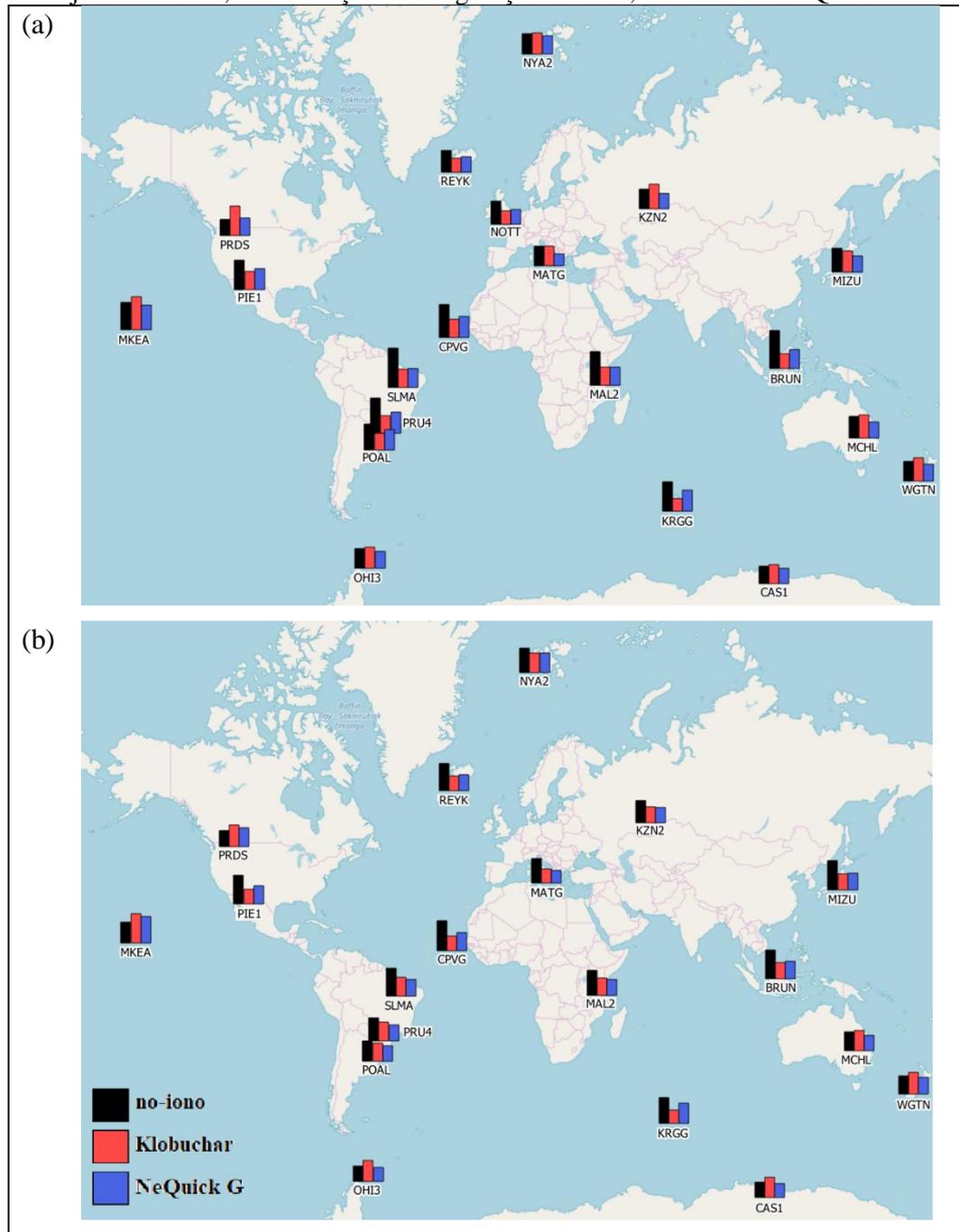


Figura 38 - REQM 3D da posição estimada das estações processadas para a semana de (a) março e (b) junho de 2018, considerando a configuração no-iono, Klobuchar e NeQuick G



Conforme esperado, os maiores erros foram obtidos para as baixas latitudes, quando não foram aplicadas correções ionosféricas, especialmente durante os meses de setembro de 2017 (Figura 37 (a)) e março de 2018 (Figura 38 (a)), próximos aos equinócios. Considerando todas as estações, os maiores erros foram encontrados nas estações PRU4 e SLMA, localizadas no Brasil, e na estação MAL2, localizada no Quênia, com REQM variando entre 6,1 e 6,5 m, durante o mês de setembro de 2017.

Nas latitudes médias, os valores de REQM são em geral menores e o modelo NeQuick G tem um melhor desempenho em relação ao Klobuchar na maior parte dos casos. Nas altas latitudes, conforme já havia sido constatado, os maiores erros do modelo de Klobuchar ocorrem nos meses próximos aos solstícios de inverno em ambos os hemisférios, uma vez que o atraso ionosférico é superestimado, fazendo com que aconteça até mesmo de o erro na estimativa da posição da estação acabar sendo maior do que na estimativa em que não são aplicadas correções ionosféricas. O modelo NeQuick G se adequa melhor nessas regiões.

Considerando todas as estações e períodos analisados, a aplicação do modelo de Klobuchar nas observações GNSS traz uma melhoria de 19% na REQM 3D das coordenadas estimadas, enquanto que o modelo NeQuick G proporciona uma melhoria média de 28%.

7.3 Considerações

Neste experimento, o desempenho dos modelos de Klobuchar e NeQuick G a nível global foi avaliado durante o segundo semestre de 2017 e primeiro semestre de 2018, totalizando um ano de dados, de modo a detectar as variações sazonais dos modelos. Na primeira parte do experimento, o atraso ionosférico estimado pelos modelos foi comparado com valores obtidos dos GIMs; na segunda parte, foi utilizado como referência valores de atraso obtidos a partir de estimativas calibradas de TEC calculados de observações de dupla frequência de satélites GPS e Galileo; na terceira e última parte, foi realizado o Posicionamento por Ponto multi-GNSS com a utilização de ambos os modelos, comparados à solução sem correções ionosféricas.

Baseando-se nas três partes do experimento, verifica-se que, no geral, o modelo NeQuick G apresenta um melhor desempenho em relação ao modelo de Klobuchar; tal superioridade é mais expressiva nas regiões de médias latitudes. Nas regiões de baixa latitude, o modelo NeQuick G tem a sua pior performance, sendo em diversos meses do ano inferior ao modelo de Klobuchar. O pior desempenho é obtido durante os períodos próximos aos equinócios e durante o verão. Nas altas latitudes, o modelo NeQuick G tem um desempenho muito mais estável que o modelo de Klobuchar, sendo que este tem a sua pior performance em períodos próximos aos solstícios de inverno.

O desempenho geral de ambos os sistemas é justificado a partir do viés de cada um deles, conforme foi verificado na Figura 35. O modelo de Klobuchar, por superestimar o atraso ionosférico, considerando a média do globo todo, acaba se adequando melhor aos períodos e

regiões em que a atividade ionosférica é mais alta, como as regiões de baixa latitude e períodos próximos aos equinócios. O modelo NeQuick G, por sua vez, por subestimar o atraso ionosférico, tem um melhor ajuste em regiões e períodos de atividade ionosférica mais baixa, como as regiões de latitude média e períodos próximos ao inverno.

8 CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As atividades que se utilizam de posicionamento tiveram um grande avanço com o desenvolvimento dos sistemas de navegação por satélite. Têm-se hoje disponível quatro constelações globais, duas delas operacionais (GPS e GLONASS) e duas em fase de desenvolvimento (Galileo e BDS), ambas com previsão de constelação completa em 2020.

Neste contexto, buscou-se nessa dissertação inicialmente fazer uma revisão dos sistemas globais de navegação disponíveis atualmente, destacando as semelhanças e diferenças entre eles. Além disso, foi feita uma revisão dos conceitos relacionados à ionosfera na propagação de sinais GNSS e sobre os modelos de Klobuchar e NeQuick G para correção do atraso ionosférico por receptores de simples frequência, modelos associados respectivamente aos sistemas GPS e Galileo. Apresentou-se também toda a fundamentação matemática do Posicionamento por Ponto, incluindo sua equação de observação, modelo funcional e modelo estocástico.

De forma a cumprir os objetivos propostos, foram realizados, descritos e analisados três experimentos diferentes. O primeiro experimento teve como objetivo analisar as características e acurácia do Posicionamento por Ponto considerando diferentes sistemas e frequências, bem como do posicionamento multi-GNSS. Foram avaliadas as observáveis L1 C/A, L2C e L5 GPS, L1 e L2 GLONASS, E1, E5a, E5b e E5 Galileo, e o posicionamento multi-GNSS, que incluiu também observações BDS em B1. Neste experimento, inicialmente apresentou-se a metodologia utilizada no desenvolvimento do software de Posicionamento por Ponto implementado, que se utiliza de efemérides precisas para determinação das coordenadas e erros do relógio dos satélites; o atraso troposférico é corrigido pelo modelo de Hopfield com função de mapeamento de Niell e o atraso ionosférico pode ser estimado pelos modelos de Klobuchar e/ou NeQuick G. Os efeitos relativísticos e os DCBs dos satélites foram corrigidos; a ponderação das observações é realizada com base no ângulo de elevação dos satélites, dando um peso menor para satélites próximos ao horizonte, que são mais fortemente contaminados pelos efeitos atmosféricos e de multicaminho. No software desenvolvido, é possível ao usuário escolher quais sistemas e frequências devem ser utilizados no ajustamento.

Com relação aos resultados apresentados no primeiro experimento, obtidos do processamento de 18 estações da RBMC espalhadas pelo território brasileiro e de 10 dias de janeiro de 2019 (DOY 06 a 15), foi possível concluir que, considerando os sistemas de forma individual, os melhores resultados foram obtidos na primeira frequência e para o sistema GPS,

que tem mais satélites em órbita. Vale destacar o comportamento da frequência Galileo E5 que, devido à sua modulação, é menos ruidosa que qualquer outra frequência de qualquer um dos sistemas.

O posicionamento multi-GNSS apresentou melhores resultados que qualquer um dos sistemas de forma individual, sendo que as maiores taxas de melhoria em relação ao GPS foram encontradas para a região equatorial e estações altamente afetadas pelo efeito do multicaminho (taxa de melhoria média de 11%). O aumento da máscara de elevação, realizado com o objetivo de simular um ambiente obstruído, acaba por degradar a acurácia e, em diversos momentos do dia, até mesmo impedir que este seja realizado devido ao reduzido número de satélites e/ou devido à sua ruim geometria. Desta forma, o posicionamento multi-GNSS é especialmente benéfico em ambientes obstruídos, em que o nível de multicaminho é alto, na região equatorial e quando se faz necessário um aumento na máscara de elevação.

O segundo experimento avaliou os modelos de Klobuchar e NeQuick G no Posicionamento por Ponto multi-GNSS GPS e Galileo, considerando períodos de junho e outubro de 2013 a 2018, cobrindo todo o período de atividade do modelo NeQuick G. Foram selecionadas duas estações em território brasileiro (PRU2 e POAL), em diferentes latitudes geomagnéticas. A seleção destas estações e períodos permitiu captar as variações espaciais, sazonais e de longo período da ionosfera.

Considerando todos os períodos e as duas estações analisadas, o modelo NeQuick G mostrou-se melhor que o Klobuchar em quase todos os casos, especialmente em períodos de baixa atividade ionosférica, quando sua superioridade foi de até 29%. Entretanto, é importante ressaltar a diferença na complexidade de ambos os modelos: enquanto que o modelo de Klobuchar é bastante simples, em que a ionosfera é modelada por uma função de semi-cosseno, o modelo NeQuick G envolve uma grande quantidade de funções para fazer uma modelagem tridimensional da densidade eletrônica presente nas diferentes camadas ionosféricas. Essa complexidade resulta em um tempo maior de processamento (em torno de 60 vezes maior que o do modelo de Klobuchar) e a sua implementação em receptores de simples frequência de baixo custo para atividades em tempo real pode não ser tão simples; além do mais, considerando a acurácia requerida nas atividades que empregam esse tipo de receptor, o uso do modelo NeQuick G pode não ser apresentar grandes vantagens. Desta maneira, pelos resultados apresentados no segundo experimento, o emprego do modelo NeQuick G é especialmente recomendado em atividades que requeiram um certo grau de acurácia e em atividades pós-processadas, em que o tempo de execução do modelo não seria um problema.

O terceiro experimento teve como objetivo avaliar o desempenho dos modelos de Klobuchar e NeQuick G a nível global, de modo a detectar o comportamento sazonal de ambos os modelos. O experimento foi dividido em três etapas: a avaliação dos modelos deu-se em relação ao atraso ionosférico obtido por GIMs e por TEC calibrado de estações multi-GNSS e a partir do posicionamento multi-GNSS, considerando os sistemas GPS e Galileo.

Verificou-se que, no geral, o modelo NeQuick G apresenta um melhor desempenho em relação ao modelo de Klobuchar (erro relativo de 40 e 49%, respectivamente). O modelo de Klobuchar, por superestimar o atraso ionosférico, considerando a média do globo todo, se adequa melhor aos períodos e regiões em que a atividade ionosférica é mais alta, como as regiões de baixa latitude e períodos próximos aos equinócios. O modelo NeQuick G, por sua vez, por subestimar o atraso ionosférico, tem um melhor ajuste em regiões e períodos de atividade ionosférica mais baixa, como as regiões de latitude média e períodos próximos ao inverno. É válido ressaltar a concordância entre os resultados obtidos no segundo e terceiro experimentos, que mostram que o modelo NeQuick G é especialmente recomendado na região brasileira em locais de latitudes médias e em períodos de baixa atividade ionosférica.

Com relação ao Posicionamento multi-GNSS, recomenda-se a realização de testes adicionais das frequências BDS quando as coordenadas precisas dos novos satélites começarem a ser determinadas e disponibilizadas pelo MGEX, bem como a sua integração no posicionamento multi-GNSS; da mesma forma, em breve devem estar disponíveis dados da nova portadora L3 GLONASS, com sinal CDMA, em quantidade suficiente para realização do posicionamento. Testes adicionais também podem ser realizados comparando os resultados aqui apresentados com os obtidos a partir da combinação de frequências na observável *ion-free*, que elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Análises similares podem também ser realizadas com o uso da observável fase da onda portadora, no Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Em se tratando dos modelos ionosféricos de Klobuchar e NeQuick G, recomenda-se a verificação do comportamento sazonal de ambos os modelos a nível global considerando um período maior de dados, de modo a captar as variações de longo período da ionosfera.

REFERÊNCIAS

ALVEZ, D. B. M.; SOUZA, E. M.; KANESHIRO, V. Y.; SOUZA, J. S. Análise de séries temporais de multicaminho em estações de monitoramento. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, (Versão Online), V.19, N.03, p. 353-373, 2013.

ANGRISANO, A.; GAGLIONE, S.; GIOIA, C.; MASSARO, M.; TROISI, S. Benefit of the NeQuick Galileo Version in GNSS single-point positioning. **International Journal of Navigation and Observation**, 2013.

ARIKAN, F., NAYIR, H., SEZEN, U. ARIKAN, O. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC. **Radio Science**, 43(4)., 2008.

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.

BEARD, R.; SENIOR, K. **Clocks**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. **Geophysical research letters** 17, no. 3 199-202, 1990.

BORRE, K.; AKOS, D. M; BERTELSEN, N.; RINDER, P.; JENSEN, S. H. **A software defined GPS and Galileo receiver**. 1.ed. Boston: Birkhäuser, 2007.

CAI, C.; GAO, Y.; PAN, L. Z.; ZHU, J. J.. Precise Point Positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. **Advances in Space Researches**. 2015.

CAMARGO, P. O. **Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman**, Curitiba. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.

_____. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

COLOMINA, I., MIRANDA, C., PARÉS, M.E., ANDREOTTI, M., HILL, C., DA SILVA, P.F., SILVA, J.S., PARÉS, T., MONICO, J.FG.; CAMARGO, P.O. Galileo's surveying potential. **GPS World**, 3, pp.18-33, 2012.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability. **Radio Science**. Virginia. V. 38 (1): 1-23, 2003.

DACH, R.; MONTENBRUCK, O.; PRANGE, L. Status of the IGS-MGEX project. In: **Proceedings of EUREF 2014 symposium**, Vilnius, Lithuania, 3–7 June, 2014.

DALLA TORRE, A.; CAPORALI, A. An analysis of intersystem biases for multi-GNSS positioning. **GPS Solutions**;19(2):297-307, 2015.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd. 1990.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **European GNSS (Galileo) open service ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users**. 2016. Disponível em: <https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo_Ionospheric_Model.pdf> Acesso: abril/2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2006. **The first Galileo satellites**. Disponível em <<http://www.esa.int/esapub/br/br251/br251.pdf>> Acesso: novembro/2017.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2012. **Mission accomplished for Galileo's pathfinder GIOVE-A**. Disponível em <https://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Mission_accomplished_for_Galileo_s_pathfinder_GIOVE-A>. Acesso: abril/2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2019. **Galileo constellation status**. Disponível em <<https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>>. Acesso: fevereiro/2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), 2019. **Galileo's Ground Control Segment contracted for upgrade**. <https://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_s_ground_control_segment_contracted_for_upgrade>. Acesso: janeiro/2019

ESTEY, L. H.; MEERTENS, C. M. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. **GPS solutions**, v.3, n.1, p42-49, 1999.

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.

FEAIRHELLER, S.; CLARK, R. Other Satellite Navigation Systems. In: KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. (Eds). **Understanding GPS: Principles and Applications**, 2 ed. Artech House, Norwood, cap 11, p. 595-634, 2006.

FEDRIZZI, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. 142p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

_____. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS**. 223p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

GE, Y., ZHOU, F., SUN, B., WANG, S., & SHI, B. The impact of satellite time group delay and inter-frequency differential code bias corrections on multi-GNSS combined positioning. **Sensors**, 17(3), 602, 2017.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.

GPS Directorate. **Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200**, Revision J. 2018. Disponível em <<https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>> Acesso: fevereiro/2019.

GPS **Selective Availability**. 2018. Disponível em <<https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/>>. Acesso: abril/2019.

GPS **Space segment**. 2019. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations/>>. Acesso: fevereiro/2019.

GSA - EUROPEAN GNSS AGENCY, 2016. **Galileo services**. Disponível em <<https://www.gsa.europa.eu/galileo/services>> Acesso: novembro/2017.

HEGARTY, C. J. **The Global Positioning System (GPS)**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

HOBIGER, T.; JAKOWSKI, N. **Atmospheric Signal Propagation**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Berlin, 2017.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo and more**. Springer-Verlage Wien, 501p., 2008.

HOPFIELD, H. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. **Journal of Geophysical Research**. 74, 4487–4499, 1969.

_____. Tropospheric effect on electro-magnetically measured range prediction from surface weather data. **Radio Science** 6, 357–367, 1971.

IAC. **Information and analysis center for positioning, navigation and timing**. 2018. Disponível em <<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>. Acesso: fevereiro/2019.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **RINEX**. 2015. Disponível em: <<ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>>. Acesso em: fevereiro/2018.

JEKELI, C. **Geometric Reference Systems in Geodesy**. Ohio State University, Lecture Note. 2002.

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 posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017.

JOHNSON, F.S.. **Satellite Environment Handbook.** 2. ed. California : Stanford University Press, 1965.

KAZMIERSKI, K., HADAS, T., SOŚNICA, K., Weighting of multi-GNSS observations in real-time precise point positioning. **Remote Sensing**, 10(1), p.84, 2018.

KELLEY MC, **The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**, Academic Press, San Diego, CA, 1989.

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.

KOMJATHY, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System.** Tese. University of New Brunswick, 1997.

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

LANGLEY, R. B. Dilution of Precision. **GPS World.** 1999.

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.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying.** 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 2004.

LI, X.; ZHANG, X.; REN, X.; FRITSCHÉ, 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.; FRITSCHÉ, 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.** 2016;20(4):849-62.

MACHADO, W. C. **Solução rápida das ambiguidades GPS para aplicações no posicionamento relativo de linhas de base curtas.** 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências

Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 200.

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

MARQUES, H.A., MARQUES, H.A.S., AQUINO, M., VEETIL,, MONICO, J.F.G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects. **Journal of Space Weather and Space Climate**, 8, p.A15, 2018.

McNAMARA, L.F. **The ionosphere**: communications, surveillance and direction finding. Florida: Krieger Publishing Company, 1991.

MGEX - THE MULTI-GNSS EXPERIMENT AND PILOT PROJECT, 2018. **BDS status**. Disponível em < http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.php >. Acesso: fevereiro/2018.

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.

NASA. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **The sunspot cycle**. 2016. Disponível em < <https://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml> >. Acesso: dezembro/2018.

NEWBY, S. P.; LANGLEY, R. B. Three Alternative Empirical Ionospheric Models – Are They Better Than the GPS Broadcast Model? In: Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. **Proceedings...** v.1,p.240-4, 17 to 20 March 1992.

NIELL, A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. **Journal of Geophysical Research**. 101, pp. 3227-3246, 1996.

NURMI, J.; LOHAN, E. S.; SAND, S.; HURKSKAINEN, H. (edit.) **Galileo Positioning Technology**. New York: Springer, 2014. 327p.

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

ORUS PEREZ, R., PARRO-JIMENEZ, J.M., PRIETO-CERDEIRA, R. Status of NeQuick G after the solar maximum of cycle 24. **Radio Science**, 53(3), pp.257-268, 2018.

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.

PINTO, P. V. S.; CALDEIRA, M. C. O; CALDEIRA, C. R.T. Análise dos índices de multicaminho MP1 e MP2 em estações de monitoramento contínuo. In: **Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposita**. 2017.

PIRIZ, R & ROLDAN, P & GOLCZ, R & MORIANA, C & LEUTE, JULIA. Performance of the NeQuick G iono model for single-frequency GNSS timing applications. 1-4. 10.1109/**EFTF**.2016.7477769, 2016.

RADICELLA, S. M. **The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution**. In: *Annals of Geophysics*, vol. 52, n. 3/4, p. 417-422, jun./aug. 2009.

REVNIVYKH, S.; BOLKUNOV, A.; SERDYUKOV, A.; MONTENBRUCK, O. **GLONASS**. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Berlin, 2017.

ROWER, K. **Propagation of decameter waves** (h.f. band). In B. Landmark (Ed.) *Meteorological and Astronomical Influences on Radio Wave Propagation* (pp. 221-250). Oxford: Pergamon Press Inc, 1963.

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

SETTI JÚNIOR, P. T.; ALVES, D. B. M.; GOUVEIA, T. A. F. Uso integrado dos sistemas Galileo e GPS: uma análise da acurácia no posicionamento por ponto com correções atmosféricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 3, 2016.

SHEKIN, D.J. **Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures**. crc Press. 2003.

SIDC. **Solar Influences Data Analysis Center**. Disponível em <<http://www.sidc.be/silso/datafiles>>. Acesso: fevereiro/2019.

SILVA, E.G. S; MARQUES, H.A. PPP com integração de dados GPS/GLONASS: fundamentos envolvidos e análise de acurácia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 22(2), 2016.

SILVA, P.F., SILVA, J.S., PERES, T.R., FERNÁNDEZ, A., PALOMO, J.M., ANDREOTTI, M., HILL, C., COLOMINA, I., MIRANDA, C. AND PARÉS, M.E. Results of Galileo AltBOC for precise positioning. In: 2012 **6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing** (pp. 1-9). IEEE. 2012

SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. Efeito do multicaminho nas medidas de fase e pseudodistância GPS: detecção e atenuação utilizando wavelets. In: **III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**. 2003.

STEIGENBERGER, P., HUGENTOBLER, U., LOYER, S., PEROSANZ, F., PRANGE, L., DACH, R., UHLEMANN, M., GENDT, G., MONTENBRUCK, O. Galileo orbit and clock quality of the IGS multi-GNSS experiment. **Advances in Space Research**. 55 (1), 269–281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.030>. 2015.

SUN, F., LIU, S., ZHU, X., MEN, B. Research and progress of Beidou satellite navigation system. **Science China Information Sciences**, 55(12), pp.2899-2907. 2012.

TEUNISSEN, P. J.; **Quality control in geodetic networks**. In: Optimization and design of geodetic networks, Berlin: Springer-Verlag, 1985.

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

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H.J. 3WBMod assisted PLL GPS software receiver for mitigating scintillation affect in high latitude region. **IEEE**, 2011.

TRIMBLE. **GNSS Planning Online**. Disponível em < <https://www.gnssplanning.com>>. Acesso: março/2019.

VAN DIERENDONCK, A. J. Eye on the ionosphere: Measuring ionospheric scintillation effects from GPS signals, **GPS Solutions**., 2(4), 60–63, 1999.

_____. Measuring ionospheric scintillation effects from GPS signals. In: **ION 59th Annual Meeting**. Albuquerque, New Mexico, pp. 391–396, 2001.

WANG, N., YUAN, Y., LI, Z., LI, Y., HUO, X. AND LI, M. An examination of the Galileo NeQuick model: comparison with GPS and JASON TEC. **GPS solutions**, 21(2), pp.605-615, 2017.

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

YANG, Y. Chinese geodetic coordinate system 2000. **Chinese Science Bulletin**, 54(15), pp.2714-2721, 2009.

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.

ZHAO, Q.; GUO, J.; LI, M.; QU, L.; HU, Z.; SHI, C.; LIU, J. Initial results of precise orbit and clock determination for COMPASS navigation satellite system. **Journal of Geodesy** 87 (5), 475–486, 2013.

ZOLESI, B.; CANDLER, L. R. Ionospheric prediction and forecasting, **Springer Geophysics**, Heidelberg, Germany, ISBN 978-3-642-38429-5, 2014.