



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

VIVIANE APARECIDA DOS SANTOS

**USO DE DADOS DE REDES GNSS ATIVAS PARA A GERAÇÃO DE
MAPAS REGIONAIS IONOSFÉRICOS**



Presidente Prudente – SP

2020



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

VIVIANE APARECIDA DOS SANTOS

**USO DE DADOS DE REDES GNSS ATIVAS PARA A GERAÇÃO DE
MAPAS REGIONAIS IONOSFÉRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientadora:

Dra. Daniele Barroca Marra Alves

Coorientador:

Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Junior

Presidente Prudente – SP

2020

S237u	Santos, Viviane Aparecida dos Uso de dados de redes GNSS ativas para a geração de mapas regionais ionosféricos / Viviane Aparecida dos Santos. -- Presidente Prudente, 2020 114 p. : il., tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves Coorientador: Paulo Sérgio De Oliveira Junior 1. GNSS. 2. Ionosfera. 3. Mapa regional ionosférico. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Uso de dados de redes GNSS ativas para a geração de mapas regionais ionosféricos

AUTORA: VIVIANE APARECIDA DOS SANTOS

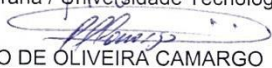
ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES

COORDENADOR: PAULO SÉRGIO DE OLIVEIRA JÚNIOR

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


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


Prof. Dr. CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR
Campus Apucarana / Universidade Tecnológica Federal do Paraná


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

Presidente Prudente, 03 de março de 2020

DADOS CURRICULARES

Viviane Aparecida dos Santos

Nascimento 18/11/1994 - Tupã/SP

Filiação Aparecido Euclides dos Santos
Vera Lúcia Gomes Botareli dos Santos

2013-2018 Graduação
Bacharelado em Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP

2018- 2020 Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP

AGRADECIMENTOS

Por mais que eu queira, é impossível agradecer a todos que contribuíram direta ou indiretamente para eu chegar até aqui, mas aqui vão alguns agradecimentos.

Gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, pela sabedoria e por sempre estar comigo.

Aos meus pais, Vera e Aparecido, por todo apoio, apesar das dificuldades e por serem a minha base familiar. Ao meu irmão Renato, ou melhor, Ua, por ser o meu maior exemplo de ser humano e de profissional.

A minha orientadora, Daniele, por sua paciência, atenção e por todo conhecimento transmitido a mim, desde 2013. Ao meu coorientador Paulo Sérgio, por todo apoio e ensinamentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), à Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela infraestrutura fornecida.

Aos meus colegas do PPGCC pelas conversas, confraternizações e troca de conhecimento, contribuindo na execução dos projetos de pesquisa e no convívio agradável.

Ao Ítalo e ao Rafael por sempre me socorrerem quando o Bernese dava algum problema.

As minhas amigas, irmãs de república por todo apoio, carinho, conversas e trocas de experiências: Camila, Aruane e Thais.

Aos meus amigos, por sempre me apoiarem e estarem comigo em todos os momentos: Tamires, Maria Tereza, Aline Mizuno, Aline Avance, Leomar, Nando, Géssica, Gui, Fran, Alemão, Aline Barroca, Isa e Victor.

Aos meus familiares que sempre me incentivaram, em especial o meu tio Marco, as minhas primas: Gislaine, Márcia, Ana, Juliana e Simone.

A minha afilhada Manoella, que mesmo tão pequena, me trouxe muitas alegrias com seus simples sorrisos.

A todos os meus professores, desde o ensino fundamental até a pós-graduação, que sempre estiveram dispostos a transmitirem seus conhecimentos e mostrar que a educação transforma o mundo.

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

EPÍGRAFE

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, e o conhecimento do Santo a prudência.”

Provérbios 9:10

RESUMO

Uma das principais fontes de erro sistemático no posicionamento pelo GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é a ionosfera, a qual está relacionada ao conteúdo total de elétrons (TEC - *Total Electron Content*). O TEC por sua vez é influenciado por diversas variáveis, entre elas os ciclos solares, época do ano, hora local, localização geográfica, atividade geomagnética, além de irregularidades. Com o intuito de minimizar os efeitos causados pela ionosfera vários modelos têm sido desenvolvidos. Os GIMs (*Global Ionospheric Maps*) são um exemplo, disponibilizados por diversos centros, como o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*) o qual tem maior concentração de estações na Europa e sua precisão varia de acordo com o número de estações, a região do globo, o período dos dados, além de outros fatores. Por isso a precisão dos GIMs pode variar de 2 a 8 TECU (*TEC Unit*). Mas, devido sua característica global, apenas parte dos erros ionosféricos são reduzidos quando empregados para fins de posicionamento. Portanto, nessa pesquisa, foram utilizados dados da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), do IGS e da RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Contínuo) durante o período de baixa e de alta intensidade de elétrons, no ciclo solar 24, a fim de gerar mapas ionosféricos por meio do software científico Bernese 5.2: MIBB (Mapa Ionosférico Brasileiro a partir do Bernese). Após a geração dos MIBBs, os mesmos puderam ser comparados com os disponibilizados pelo CODE, já que esse centro também utiliza o Bernese para obter os dados de ionosfera no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*). A diferença média encontrada entre os IONEX foi de aproximadamente 3 TECU e de 7 TECU, no período de baixa e alta atividade ionosférica, respectivamente. Além disso, foi realizado o posicionamento por ponto pós-processado por meio da ferramenta RTKLIB, aplicando o IONEX do CODE e o MIBB, em dois dias no período de alta e baixa atividade ionosférica, os quais foram os que apresentaram maior e menor diferença quando se comparou os valores de VTEC dos IONEX. De acordo com os resultados obtidos, as diferenças de discrepâncias não apresentaram um comportamento padrão entre os modelos. Enquanto que em relação às diferenças de desvios padrão, os MIBBs apresentaram os menores valores para os dias analisados. Foi possível comparar também os valores de DCBs (*Differential Code Bias*) obtidos com os MIBBs com os disponibilizados pelo CODE das estações pertencentes à rede IGS, que foram utilizadas na geração dos mapas ionosféricos. A diferença média entre os valores de DCBs foi de aproximadamente 1,70 ns.

ABSTRACT

The ionosphere is one of the main sources of systematic errors in GNSS (Global Navigation Satellite System), and is directly related to the TEC (Total Electron Content). The TEC is influenced by several variables: solar cycle, time of the year, local time, geographic position, geomagnetic activity, and other irregularities. In order to minimize the effects caused by the ionosphere different models have been developed, among them we can highlight the GIMs (Global Ionospheric Maps). They are provided by several centers, such as CODE (Center for Orbit Determination in Europe). In general, the accuracy of models varies with the number of stations, the region of the globe, the data period, and other factors. According to some authors, the GIMs' accuracy can go from 2 to 8 TECU (TEC Unit). However, due to its global characteristic, few parts of the ionospheric errors are reduced when employed for positioning purposes. In this sense, we propose a strategy that combines data derived from RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS), IGS (International GNSS Service) and RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) to generate a regional ionospheric map using Bernese 5.2 software. The ionospheric maps generated by proposed strategy are called Brazilian Ionospheric Map from Bernese (Mapa Ionosférico Brasileiro a partir do Bernese - MIBB). In the conducted experiments we used GNSS data derived from low and high electron intensity periods, in the solar cycle 24. A comparative analysis was performed from the generated IONEX (IONosphere map Exchange format) and the map available by CODE. In both cases, Bernese software was applied to obtain ionospheric data in IONEX format. The average difference found between the IONEXs was approximately 3 and 7 TECU for low and high ionospheric activity periods, respectively. In addition, post-processed point positioning was performed using the RTKlib tool for two days that showed the biggest differences. According to the results obtained, the differences in discrepancies showed a non-standard behavior between the models. In relation to the differences in standard deviations, the MIBBs presented the lowest values for the days analyzed. Additionally, it was also compared the values of DCBs (Differential Code Bias) for IGS' stations obtained by MIBBs with those made available by CODE. The average difference between the DCB values was approximately 1.70 ns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Densidade eletrônica em função da altitude	23
Figura 2- Número de manchas solares desde 1700 até 1 de fevereiro de 2020	27
Figura 3- Regiões geográficas da ionosfera	28
Figura 4- Explosão solar	29
Figura 5- Campo geomagnético	30
Figura 6- Influência do vento solar no campo geomagnético	31
Figura 7- Localização da AMAS	32
Figura 8- Bolhas ionosféricas.....	33
Figura 9-Distribuição das estações.....	35
Figura 10- SCINTEC em tempo real.....	35
Figura 11- Rede de Monitoramento da América do Sul	38
Figura 12- Distribuição das estações IGS no Brasil e em países vizinhos.....	41
Figura 13- Fluxograma de execução da pesquisa.....	47
Figura 14- Número de manchas solares	48
Figura 15- Valores de TEC para o mês de junho de 2014	48
Figura 16- Valores de TEC para o mês de outubro de 2014	49
Figura 17- Estações da rede CIGALA/CALIBRA.....	50
Figura 18- Estações utilizadas na geração dos MIBBs	51
Figura 19- Sequência de processamentos utilizando a pseudodistância	52
Figura 20-Sequência de processamentos utilizando a fase	54
Figura 21- Estações utilizadas para realizar a validação dos MIBBs no posicionamento	57
Figura 22- Estações utilizadas para comparar os valores de DCBs obtidos com o Bernese com os do CODE	58
Figura 23- Diferença média dos valores de VTEC ao utilizar a pseudodistância como observável	59
Figura 24- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 164/2014	60
Figura 25- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 173/2014	60
Figura 26- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 277/2014	61
Figura 27- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 285/2014	62
Figura 28- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 164 do ano de 2014	63
Figura 29- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 173 do ano de 2014	63
Figura 30- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 277 do ano de 2014	64
Figura 31- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 285 do ano de 2014	64
Figura 32- Diferença nos valores de VTEC para o dia 164/2014	66
Figura 33- Diferença nos valores de VTEC para o dia 173/2014	66
Figura 34- Diferença nos valores de VTEC para o dia 277/2014	67
Figura 35- Diferença nos valores de VTEC para o dia 285/2014	67
Figura 36- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação SMAR	69

Figura 37- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação SMAR	70
Figura 38- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação PPTE	71
Figura 39- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação PPTE	72
Figura 40- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação GVA1	73
Figura 41- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação GVA1.....	74
Figura 42- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação AMCO.....	75
Figura 43- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação AMCO	76
Figura 44- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação PBCG	77
Figura 45- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação PBCG.....	78
Figura 46- Diferença de DCBs nos dias 164 e 173 do ano de 2014	80
Figura 47- Diferença de DCBs nos dias 277 e 285 do ano de 2014	82
Figura 48- Diferença média dos valores de VTEC ao utilizar a fase como observável.....	83
Figura 49- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 162/2014.....	84
Figura 50- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 165/2014.....	85
Figura 51- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 275/2014.....	86
Figura 52- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 276/2014.....	86
Figura 53-Diferença nos valores de VTEC para o dia 162/2014	87
Figura 54-Diferença nos valores de VTEC para o dia 165/2014	88
Figura 55-Diferença nos valores de VTEC para o dia 275/2014	88
Figura 56-Diferença nos valores de VTEC para o dia 276/2014	89
Figura 57- Diferença nos valores de VTEC para o dia 162/2014 entre os MIBBs.....	90
Figura 58- Diferença nos valores de VTEC para o dia 165/2014 entre os MIBBs.....	90
Figura 59- Diferença nos valores de VTEC para o dia 275/2014 entre os MIBBs.....	91
Figura 60- Diferença nos valores de VTEC para o dia 276/2014 entre os MIBBs.....	91
Figura 61- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação SMAR	93
Figura 62- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação SMAR	94
Figura 63- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação PPTE	95
Figura 64- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação PPTE	96
Figura 65- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação GVA1.....	97
Figura 66- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação GVA1.....	98

Figura 67- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação AMCO	99
Figura 68- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação AMCO	100
Figura 69- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação PBCG	101
Figura 70- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação PBCG	102

LISTA DE SIGLAS

AIUB	<i>Astronomical Institute of the University of Bern</i>
AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
BPE	<i>Bernese Processing Engine</i>
CALIBRA	<i>Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil.</i>
CIGALA <i>Latin America</i>	<i>Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
EMBRACE	Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
ESOC	<i>European Space Operations Center</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System</i>
GIB	Grade Ionosférica Brasileira
GIM	<i>Global Ionospheric Maps</i>
GIVE	<i>Grid Ionospheric Vertical Error</i>
GLONASS	<i>GLObal Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HL	Hora Local
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IGN	<i>Institut National de L'Information Géographique et Forestière</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IONEX	<i>IONosphere map Exchange format</i>
IPP	<i>Ionosphere Pierce Point</i>
IRI	Ionosfera de Referência Internacional
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
JPL	<i>Jet Propulsión Laboratory</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OACI	Organização Internacional de Aviação Civil
PPGCC	Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
SACCSA	<i>Solución de Aumentación para el Caribe, Centro y Sur América</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> - Razão Sinal Ruído
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>TEC Unit</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UPC	<i>Polytechnical University of Catalonia</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>
VTEC	Vertical TEC

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	18
1.2 Justificativa.....	18
2 OBSERVÁVEIS GNSS E A IONOSFERA	20
2.1 GNSS.....	20
2.1.1 Observáveis.....	20
2.2 IONOSFERA.....	22
2.2.1 Conteúdo Total de Elétrons	23
2.2.2 Variação do Conteúdo Total de Elétrons	26
2.2.2.1 Variações temporais	26
2.2.2.2 Variação Espacial.....	28
2.2.2.3 Eventos solares.....	28
2.2.2.4 Campo geomagnético.....	29
2.2.2.5 Irregularidades Ionosféricas	31
2.3 Monitoramento da ionosfera e mapas ionosféricos	34
2.3.1 CIGALA/CALIBRA.....	34
2.3.2 SCINTEC.....	35
2.3.3 TEC Map.....	36
2.3.4 SIRGAS UNLP.....	37
2.3.6 GIB.....	41
2.3.7 Mod Ion.....	42
3 SOFTWARE BERNESE.....	44
3.1 Módulos.....	45
4 METODOLOGIA	47
4.1 Materiais e Métodos	47
4.1.1 Geração dos MIBBs utilizando a pseudodistância.....	51
4.1.2 Geração dos MIBBs utilizando a fase.....	54
4.2 Validação dos resultados	55
4.2.1 Comparação entre os mapas ionosféricos	56
4.2.1.1 Validação no posicionamento	56
4.2.1.2 Comparação dos valores de DCBs dos receptores	58
5 RESULTADOS E ANÁLISES	59
5.1 MIBBs obtidos utilizando a observável pseudodistância	59
5.2 Mapas ionosféricos disponibilizados pelo CODE	62
5.3 Comparação entre os MIBBs obtidos a partir da pseudodistância e os mapas do CODE	65
5.4 Aplicação dos MIBBs gerados a partir da observável pseudodistância no posicionamento por ponto	68
5.5 Comparação dos valores de DCBs do receptor	78
5.6 MIBBs obtidos utilizando a observável fase	82
5.6 Comparação entre os mapas ionosféricos ao utilizar a fase	87
5.7 Aplicação dos MIBBs gerados a partir da observável fase no posicionamento por ponto	92
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6.1 Conclusão	103
6.2 Recomendações para trabalhos futuros	104
REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE A- SOFTWARE BERNESE.....	111

1 INTRODUÇÃO

Uma das tecnologias espaciais mais avançadas utilizada nas atividades que envolvem posicionamento é o GNSS (*Global Navigation Satellite System*), onde o princípio básico é a obtenção da distância entre a antena do receptor e no mínimo quatro satélites (MONICO, 2008; SEEGER, 2003). O GNSS engloba os sistemas GPS (*Global Positioning System*) (<https://www.gps.gov/>), GLONASS (*GLObal Navigation Satellite System*) (<http://www.russianspaceweb.com/>), Galileo (<https://www.gsa.europa.eu/>) e o Beidou (<http://en.beidou.gov.cn/>), além dos sistemas de aumento baseados em satélites ou estações terrestres, SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) e GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), respectivamente.

Do satélite até o receptor os sinais GNSS podem sofrer diferentes tipos de influência, que podem provocar variações em sua direção e velocidade de propagação, polarização e potência. Os efeitos ocasionados durante a passagem do sinal pela atmosfera podem degradar a qualidade da observável GNSS e consequentemente a acurácia do posicionamento (CAMARGO, 1999; SEEGER, 2003). Dentre as fontes de erro pode-se citar: o satélite, propagação do sinal, receptor/antena e estação. Em relação à propagação do sinal, a ionosfera é a principal fonte de erro sistemático no posicionamento GNSS.

A ionosfera é uma camada da atmosfera que se estende de 50 km a 1000 km aproximadamente e está relacionada diretamente ao TEC (*Total Electron Content*). A densidade de elétrons, responsável pela descrição do estado da ionosfera, sofre variações devido a: coordenadas geográficas ou geomagnéticas, hora local, altitude, estação do ano, ciclo de manchas solares, tempestades geomagnéticas e, até mesmo, com as marés e os ventos na termosfera (WEBSTER, 1993; MATSUOKA, 2007; CONKER et al., 2003).

Dessa maneira, a ionosfera deve ser modelada de forma adequada para que se possa alcançar a acurácia pretendida no posicionamento. Por esse motivo diversos modelos têm sido desenvolvidos, a fim de minimizar os efeitos causados pela ionosfera (MATSUOKA; CAMARGO, 2007). Um deles é o GIM (*Global Ionospheric Maps*), que fornece valores de VTEC (*Vertical TEC*) para todo o globo. O GIM é disponibilizado por diversos centros como CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), ESOC (*European Space Operations Center*), JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), UPC (*Polytechnical University of Catalonia*) e IGS (*International GNSS Service*) no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*).

Em regiões onde a atividade ionosférica é muito intensa, pode haver deficiência no uso de mapas globais, já que os mesmos não levam em consideração os aspectos particulares de cada região. Assim, surge a necessidade de gerar mapas regionais, principalmente para o Brasil, já que

grande parte do território brasileiro está localizado na região de baixa latitude (região equatorial), na qual a ionosfera apresenta alta intensidade e irregularidades, tais como a anomalia equatorial, bolhas ionosféricas, anomalia do atlântico sul, entre outras (HARGREAVES, 1992; FEDRIZZI, 2003; RODRIGUES, 2003; WEBSTER, 1993; AGUIAR, 2010). Sendo assim, é necessário que essas características sejam consideradas na modelagem, para que se alcance um posicionamento de alta acurácia.

Em se tratando dos mapas regionais produzidos para o Brasil, é possível citar, por exemplo: o Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion), desenvolvido por Camargo (1999) e o GIB (Grade Ionosférica Brasileira), desenvolvido por Aguiar (2010). Além disso, no Brasil desde 2013 existe o TEC Map, que são mapas meteorológicos ionosféricos de TEC monitorados por estações GNSS terrestres, produzido pelo Programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) fornece os mapas ionosféricos, os quais disponibilizam dados de VTEC de 2005 a 2013, para a região de cobertura da rede SIRGAS, sendo que esses mapas são conhecidos como SIRGAS-UNLP e são mapas diários, disponibilizados a cada hora, onde os mesmos são calculados a partir do modelo LPIM (Modelo Ionosférico La Plata) (SIRGAS, 2019). Além de outras iniciativas como 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*) e SCINTEC, as quais serão apresentadas nessa pesquisa.

Uma outra possibilidade, ainda pouco explorada para o Brasil, é a geração de mapas ionosféricos utilizando o software científico Bernese (<http://www.bernese.unibe.ch/>), desenvolvido pela AIUB (*Astronomical Institute of the University of Bern*). O Bernese está disponível na FCT/UNESP (Universidade Estadual Paulista) e é muito utilizado pela comunidade científica internacional por ter a capacidade de modelar e/ou reduzir praticamente todos os erros envolvidos no posicionamento GNSS. Além disso, apresenta alta performance, alta acurácia, muita flexibilidade no processamento, ferramentas que permitem automação, padrões adotados internacionalmente, etc. Outra vantagem do Bernese é que após a aquisição do software é possível realizar alterações no código fonte e recompilar os programas, visto que todas as rotinas são disponibilizadas (DACH, 2015).

Neste sentido, estudos que procurem minimizar os erros relacionados à ionosfera são de grande valia, principalmente em regiões que sofrem fortemente com sua influência, como no caso do Brasil. Dessa forma, a geração de um produto mais adaptado às condições ionosféricas brasileiras irá contribuir para diminuir os erros relacionados à mesma no posicionamento GNSS.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho foi a geração e avaliação dos MIBBs (Mapa Ionosférico Brasileiro a partir do Bernese) empregando dados de estações ativas GNSS, para tanto, compareceram os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo relacionado à ionosfera e os efeitos ionosféricos no posicionamento;
- Gerar um modelo regional ionosférico a partir da observável pseudodistância e também da fase;
- Comparar os MIBBs com os disponibilizados pelo CODE;
- Comparar a performance dos MIBBs com os dos mapas do CODE quando aplicados no posicionamento por ponto;
- Comparar os valores de DCBs obtidos com os MIBBs e os disponibilizados pelo CODE;

1.2 Justificativa

Para que os erros ionosféricos sejam minimizados no posicionamento, diversos mapas têm sido desenvolvidos, um deles é o GIM, o qual é disponibilizado por diversos centros no formato IONEX. Mas, sabe-se que os mapas globais apresentam deficiência em regiões onde a atividade ionosférica é intensa, por esse motivo há a necessidade de gerar mapas regionais, caso do Brasil, no qual a maior parte do território está localizada na região do equador geomagnético, sendo essa a mais crítica para o posicionamento devido à ionosfera.

O software Bernese, que foi utilizado na geração do modelo regional ionosférico, além de ser um software de alta performance é utilizado mundialmente por diversos centros. Embora esse software seja capaz de produzir mapas ionosféricos e a rede disponível no Brasil contenha um número significativo de estações, ainda não foram desenvolvidos trabalhos neste sentido, logo essa pesquisa vem com o intuito de cobrir esta lacuna.

Na França, o IGN (*Institut National de L'Information Géographique et Forestière*) já fornece modelos ionosféricos produzidos por meio do Bernese (<http://rgp.ign.fr/PRODUITS/iono.php>). A validade do modelo é de 5 horas a partir do período de medições.

Outra justificativa é a associação do tema dessa pesquisa com outros projetos em desenvolvimento com o apoio financeiro de agências de fomento brasileiras. Entre eles, pode-se citar o projeto PQ da orientadora intitulado “GNSS: INVESTIGAÇÕES NO

POSICIONAMENTO GEODÉSICO E EFEITOS ATMOSFÉRICOS” (Processo 303553/2017-0) e o projeto INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) (Processo CNPq: 465548/2014-2) e Políticas Públicas (Processo FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo): 2017/50115-0) “Tecnologia GNSS no suporte à Navegação Aérea”, parceria entre a UNESP, o INPE, o ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica) e o IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço), do qual a orientadora é integrante.

Finalizando, a pesquisa está vinculada a um projeto de Doutorado em andamento no PPGCC (Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas), intitulado “Recuperação e análise de perfis de densidade de elétrons para a região brasileira: integração de rádio ocultação e informações ionosféricas regionais”, onde os mapas regionais ionosféricos gerados nessa pesquisa deverão ser empregados no contexto da radio ocultação GPS.

2 OBSERVÁVEIS GNSS E A IONOSFERA

2.1 GNSS

O termo GNSS foi criado em 1991 e, atualmente, é composto por diversos sistemas globais, sendo que os principais são: GPS, GLONASS, Galileo e o Beidou. Porém, dos sistemas citados anteriormente, atualmente o GPS e o GLONASS são os únicos que possuem constelação completa (LANGLEY; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

A seguir serão apresentadas as observáveis básicas GNSS, pseudodistância e fase da onda portadora, que permitem determinar a posição, velocidade e o tempo, para qualquer ponto da Terra, em relação a um sistema de referência definido e realizado. Além disso, será descrita algumas das combinações das observáveis.

2.1.1 Observáveis

As observáveis básicas obtidas pelos receptores GNSS são usualmente identificadas como pseudodistância e fase da onda portadora (MONICO, 2008). Outras observáveis também são obtidas por meio do GNSS, como a variação Doppler e o SNR (*Signal to Noise Ratio*- Razão Sinal Ruído).

A pseudodistância é uma medida de distância entre um satélite no momento de transmissão do sinal e a antena de um receptor no instante de recepção do sinal, a partir de uma medida de tempo realizada pelo receptor GNSS (MONICO, 2008). A observável pseudodistância é nomeada dessa maneira pelo não sincronismo entre os relógios do satélite e do receptor (CAMARGO, 1999). A medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite (s) no instante de transmissão (t^s) e sua réplica gerada no receptor (r) no instante de recepção (t_r) do sinal. O modelo funcional da pseudodistância, em metros, é dado por (MONICO, 2008):

$$PD_r^s(t) = p_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + v_{PD_r^s} \quad (1)$$

em que:

p_r^s : distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor, no instante de recepção do sinal (m);

c : velocidade da luz no vácuo (m/s);

dt_r : erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante de recepção (s);

dt^s : erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante de transmissão (s);

I_r^s : erro devido à ionosfera (m);

T_r^s : erro devido à troposfera (m);

dm_r^s : erro devido ao multicaminho (m); e

$v_{PD_r^s}$: erros aleatórios e sistemáticos não modelados.

Uma observável mais precisa que a pseudodistância é a fase da onda portadora, observável básica para a maioria das atividades geodésicas (MONICO, 2008). Porém, obtê-la requer um maior rigor matemático e a presença de um novo termo, a ambiguidade N .

A medida da fase da portadora é obtida por meio da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal, e sua réplica gerada pelo receptor, no instante de recepção. Diferentemente da pseudodistância, apenas uma medida fracionária é obtida (Φ), restando como incógnita o número inteiro de ciclos desconhecido denominado de ambiguidade (N_r^s) (MONICO, 2008; SUBIRANA; ZORNOZA; HERNÁNDEZ-PAJARES, 2013; LANGLEY; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

$$\Phi_r^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + [\Phi^s(t_0) - \Phi_r(t_0)] + N_r^s + v_{\Phi_r^s} \quad (2)$$

em que:

f : é a frequência nominal da onda portadora (Hz);

$\Phi^s(t_0)$: fase inicial no satélite, correspondente à época de referência t_0 (ciclos);

$\Phi_r(t_0)$: fase inicial no receptor, correspondente à época de referência t_0 (ciclos);

N_r^s : ambiguidade da fase no instante inicial de rastreamento (ciclos);

$v_{\Phi_r^s}$: erros aleatórios e sistemáticos não modelados.

2.2 IONOSFERA

A ionosfera é uma camada da atmosfera que se estende de 50 km à 1000 km, aproximadamente. Porém, o limite superior da ionosfera não é bem definido, já que o mesmo pode ser interpretado como uma zona de transição com a plasmasfera (MATSUOKA, 2007). Além disso, a ionosfera é composta de partículas carregadas eletricamente, chamadas íons. Os íons são átomos ou moléculas que ganharam ou perderam elétrons tendo carga elétrica negativa (ânions) ou carga elétrica positiva (cátions) (McNAMARA, 1991; LEICK, 1995; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007; AGUIAR, 2010).

Em relação a faixa de frequência do sinal GNSS, a ionosfera se comporta como um meio dispersivo, afetando assim a modulação e a fase da portadora, ocasionando um retardo e um avanço, respectivamente (LEICK, 1995; CAMARGO, 1999).

Segundo Davies (1990), a ionosfera pode ser dividida em três camadas denominadas: D, E e F. As mesmas são caracterizadas pelas variações da densidade de elétrons à medida que a altitude aumenta.

A região D é a mais baixa da ionosfera, com altitude máxima de aproximadamente 85 km, sendo que a concentração máxima de elétrons é na ordem de 10^3 elétrons/cm³ (DAVIES, 1990; FEDRIZZI, 1999). Essa camada é muito importante na propagação de rádio porque absorve energia das ondas em MF (*Medium Frequency*), HF (*High Frequency*) e VHF (*Very High Frequency*), além de refletir os sinais LF (*Low Frequency*) e VLF (*Very Low Frequency*) (DAVIES, 1990).

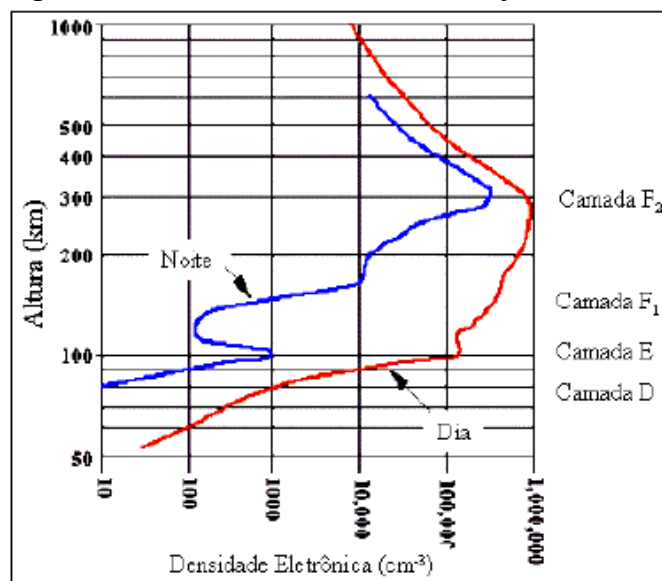
A camada E se estende entre 90 e 140 km de altura e seu comportamento está relacionado ao nível de atividade solar e do ângulo zenital do Sol. Normalmente, esta camada é livre de distúrbios e para fins práticos considera-se que ela está presente somente durante o dia, logo se assume que no período noturno a densidade de elétrons é praticamente nula (KOMJATHY, 1997).

Em relação a camada F, pode-se dizer que a mesma está compreendida entre 140 e 1000 km de altitude, a qual é subdividida em F1, F2 e F3. A camada F1 se estende entre as altitudes de 140 e 200 km, e apresenta uma típica concentração de elétrons variando de $2,3 \times 10^{11}$ a $3,3 \times 10^{11}$ elétrons/m³ devido à atividade solar, para a região de latitudes médias ao meio dia local (KOMJATHY, 1997; MATSUOKA, 2007). A principal fonte de ionização dessa camada é a radiação solar do extremo violeta. Já a camada F2 é formada entre as altitudes de 200 e 1000 km. Nessa camada é onde ocorre o pico de densidade de elétrons da ionosfera, geralmente entre 300 a 450 km. Pode-se dizer que a radiação ionizante dessa camada é a mesma responsável pela ionização da camada F1, porém, a F2 não segue a mesma variação diurna e sazonal (DAVIES,

1990). Já a camada F3 está localizada a aproximadamente 650 km de altura, e a mesma ocorre em latitudes próximas ao equador magnético devido a elevação do plasma, sob condições adequadas de campo magnético e vento (BARBOSA NETO,1999).

Existe diferença na densidade de elétrons durante o período diurno e noturno, onde é possível notar a variação na densidade de elétrons durante os dois períodos, sendo que durante o período noturno a densidade cai consideravelmente, como mostra a Figura 1.

Figura 1- Densidade eletrônica em função da altitude



Fonte: Adaptado de McNamara (1991)

O TEC é o principal parâmetro para descrever a atividade ionosférica no posicionamento GNSS, além disso o mesmo representa o número de elétrons contidos no caminho percorrido pelo sinal do satélite até o receptor. O TEC varia no tempo e espaço e é influenciado por diversos fatores, tais como: coordenadas geográficas ou geomagnéticas, hora local, altitude, estação do ano, ciclo de manchas solares, tempestades geomagnéticas e, até mesmo, marés e ventos na termosfera (WEBSTER, 1993; LEICK, 1995; MATSUOKA, 2007; CONKER et al., 2003). A seção 2.2.1 apresenta como obter o valor do TEC.

2.2.1 Conteúdo Total de Elétrons

A unidade utilizada para dimensionar o TEC é elétrons/m²; porém, como os valores apresentam uma ordem de grandeza elevada, utiliza-se o TECU (TEC Unit), o qual equivale a 1×10^{16} elétrons/m².

Segundo Seeber (2003), o TEC pode ser convertido em erro na distância medida pela pseudodistância ou pela fase, nas ondas portadoras L1 e L2, conforme as equações (3) e (4), respectivamente:

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (3)$$

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (4)$$

em que:

f: é a frequência da onda (MHz) portadora utilizada;

I_{gr}^s, I_{fr}^s : erro devido à refração ionosférica na pseudodistância e na fase, respectivamente.

Dessa maneira, é possível observar que tanto na fase como na pseudodistância, o erro é inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Consequentemente, as maiores frequências são menos afetadas pela ionosfera. Além disso, constata-se que o erro devido à ionosfera é de mesma magnitude em ambas as observáveis, porém de sinais contrários, devido o sinal sofrer avanço na fase e atraso na pseudodistância. A Tabela 1 apresenta como a ionosfera afeta a propagação em diferentes frequências e indica o erro residual na vertical para combinações entre duas frequências (SEEBER, 2003).

Tabela 1- Efeitos médios do atraso de propagação ocasionado pela ionosfera

Simples frequência	400 MHz	1600 MHz	2000 MHz	8000 MHz
Efeito médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% < do que	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m
Duas frequências	150/400 MHz	400/2000 MHz	1227/1572 MHz	2000/8000 MHz
Efeito médio	0,6 m	0,9 cm	0,3 cm	0,04 cm
90% < do que	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22 cm	4,5 cm	0,43 cm

Fonte: Seeber (2003)

Para o TEC na direção vertical (VTEC), é necessário utilizar uma função de mapeamento, sendo que a função secante é comumente empregada. Logo o efeito da refração para a pseudodistância e fase são obtidos a partir das equações (5) e (6):

$$I_{gr}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} \text{VTEC} \quad (5)$$

$$I_{fr}^s = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} \text{VTEC}. \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6) z' é o ângulo zenital do caminho do sinal em relação a um plano de altitude médio H_m , denominado ponto ionosférico, onde o mesmo é obtido pela equação (7):

$$\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z \quad (7)$$

em que:

R_m : é o raio médio da Terra (km);

H_m : representa a altura média da ionosfera (km);

z : é o ângulo zenital do satélite na estação de observação.

O TEC pode ser obtido a partir das pseudodistâncias provenientes dos códigos em L1 e L2, por meio da combinação linear apresentada na equação (8) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004). Vale destacar que é possível estimar o TEC utilizando também as portadoras L1 e L5, para isso deve-se substituir o subscrito $L2$ por $L5$ na equação (8).

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [(PD_{rL2}^s - PD_{rL1}^s) - v_{PD}] \quad (8)$$

em que:

f_{L1}, f_{L2} : são as frequências das portadoras L1 e L2 (Hz), respectivamente;

PD_{rL1}^s, PD_{rL2}^s : são as pseudodistâncias oriundas dos códigos L1 e L2 (m), respectivamente;

v_{PD} : são os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

De maneira análoga as pseudodistâncias, o TEC pode ser obtido pela combinação linear entre as medidas de fase das portadoras L1 e L2, como mostra a equação (9) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004). Ou ainda entre as medidas de fase das portadoras L1 e L5

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [(\lambda_{L2} \Phi_{rL2}^s - \lambda_{L1} \Phi_{rL1}^s) - (\lambda_{L1} N_{rL1}^s - \lambda_{L2} N_{rL2}^s) - v_\Phi] \quad (9)$$

em que:

$\lambda_{L1}, \lambda_{L2}$: comprimento de onda das portadoras L1 e L2 (cm), respectivamente;

$\Phi_{rL1}^s, \Phi_{rL2}^s$: são as fases oriundas dos códigos L1 e L2 (m), respectivamente;

N_{rL1}^s, N_{rL2}^s : são as ambiguidades da fase das portadoras L1 e L2 (ciclos), respectivamente; e

v_Φ : erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

Segundo Skone (1998), os valores de TEC obtidos por meio da pseudodistância são aproximadamente 10 vezes mais ruidosos do que os obtidos utilizando a fase da portadora. Isso se deve ao fato da pseudodistância ter precisão na ordem métrica, enquanto que a precisão fase é na ordem centimétrica a milimétrica (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

2.2.2 Variação do Conteúdo Total de Elétrons

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, sofre variação temporal e espacial decorrente de diversos fatores, os quais serão apresentados a seguir.

2.2.2.1 Variações temporais

Nas variações temporais estão inclusas as variações diurnas, sazonais e de ciclos de longos períodos.

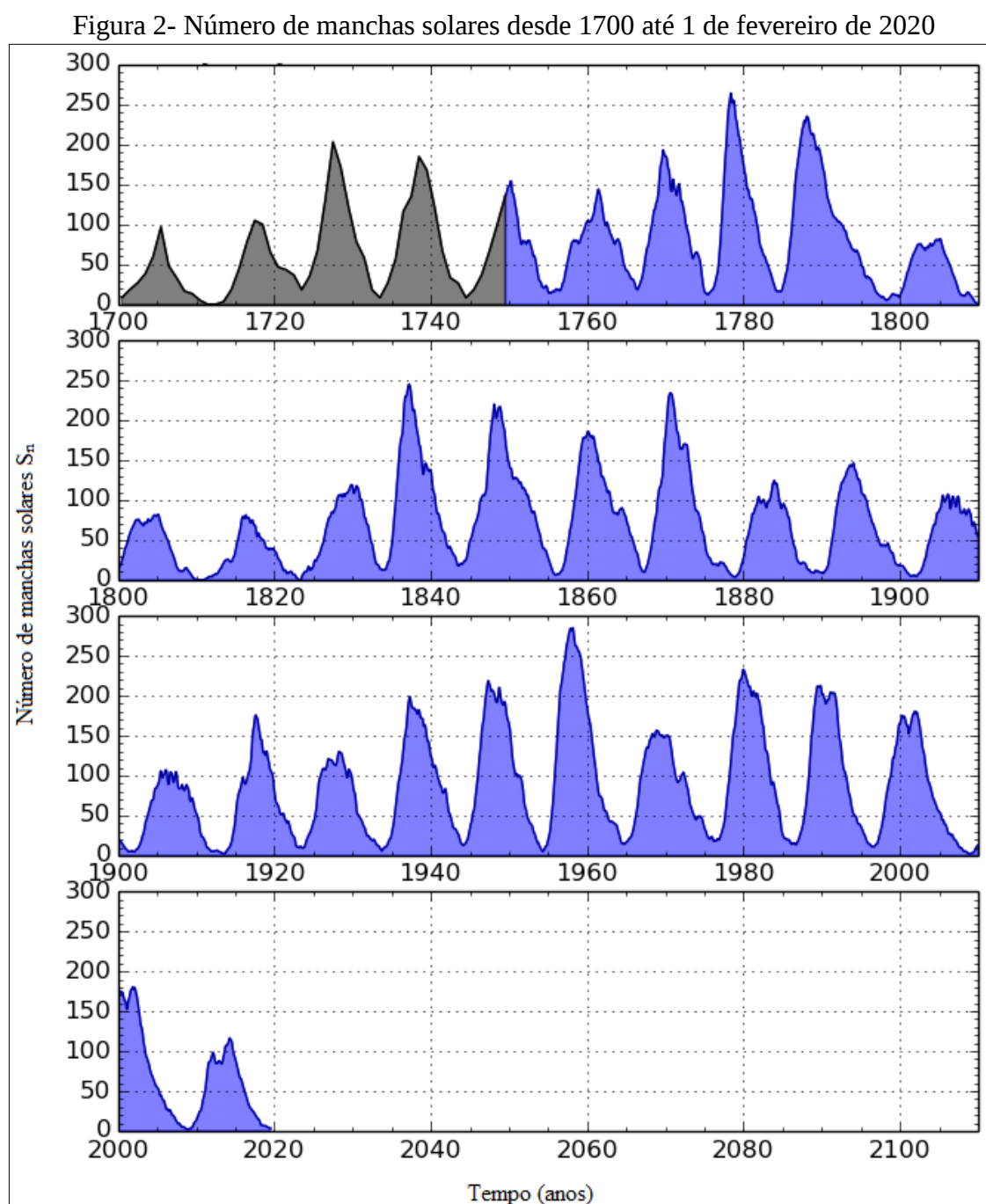
As variações diurnas são provenientes de mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que por sua vez, desaparecem no período noturno, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons (CAMARGO, 1999). A variação diurna se deve, principalmente, devido à radiação solar. Segundo Webster (1993), ao decorrer do dia a densidade de elétrons depende da HL (Hora Local), sendo que seu valor máximo ocorre entre às 12 e 16 HL (15 e 19 UTC), sendo que o pico é próximo às 14 HL. Já em regiões de baixas latitudes ocorre um segundo máximo entre às 21 e 22 HL, sendo na maioria das vezes maior que o primeiro (MATSUOKA, 2007).

Já em relação às variações sazonais, a densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano em uma determinada região devido ao ângulo zenital do Sol, além das mudanças na atmosfera neutra da qual a ionosfera é criada (McNAMARA, 1991). A densidade de elétrons na ionosfera atinge valores máximos, aproximadamente, nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócio) e valores mínimos nos meses de solstício de inverno e verão (no caso do hemisfério Sul o solstício de verão ocorre no mês de dezembro, enquanto que o solstício de inverno acontece em junho) (McNAMARA, 1991; MATSUOKA, 2007).

As variações de ciclos de longos períodos na densidade de elétrons, as quais são em torno de 11 anos, estão associadas à ocorrência de manchas solares, e o aumento da ionização da camada é proporcional ao número de manchas (McNAMARA, 1991; MATSUOKA, 2007; LANGLEY, 2011). As manchas solares são regiões frias e escuras que aparecem na superfície do Sol, as quais são rodeadas por regiões brilhantes que emitem um nível elevado de radiação ultravioleta. Dessa maneira, o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (McNAMARA, 1991). Além

disso, o período de duração de uma mancha solar é variável; algumas manchas aparecem por apenas alguns dias, enquanto outras permanecem por várias rotações solares, cujo período é de 27 dias aproximadamente (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007).

A Figura 2 apresenta o número de manchas solares desde 1700 até 1 de fevereiro de 2020, onde a partir da mesma é possível notar que no momento atual o número de manchas está em decréscimo. Vale destacar que o último pico no número de manchas solares é no ano de 2014.

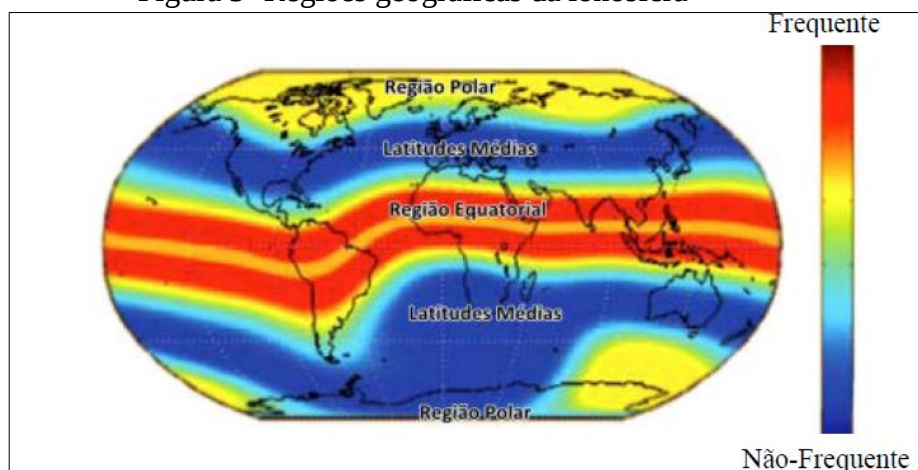


Fonte: Adaptado de <http://sidc.oma.be/html/wolfam1.html>. Acesso em: 09 fev. 2019

2.2.2.2 Variação Espacial

A estrutura global da ionosfera muda de acordo com a latitude geomagnética, em decorrência da variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação solar. Entre as latitudes 20° S e 20° N está delimitada a região equatorial, a qual possui um alto nível de densidade de elétrons. Já entre as latitudes de $\pm 20^\circ$ a $\pm 60^\circ$ estão delimitadas as regiões de latitudes médias, que são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas. E por fim as regiões polares estão localizadas entre as latitudes de $\pm 60^\circ$ a $\pm 90^\circ$ e não são muito previsíveis (WEBSTER, 1993; MATSUOKA, 2007). Os limites destas regiões não são definidos arbitrariamente, mas selecionados em função da evidência de regiões com processos ionosféricos relativamente homogêneos (FONSECA JUNIOR, 2002). A Figura 3 mostra a divisão das três maiores regiões geográficas da ionosfera.

Figura 3- Regiões geográficas da ionosfera



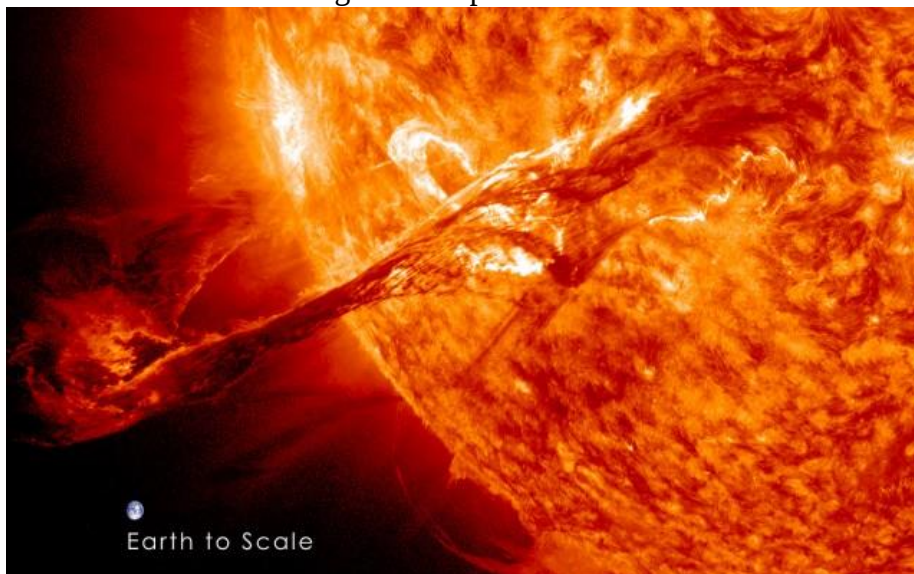
Fonte: Adaptado de <http://www.gpsworld.com/wp-content/uploads/2012/03/Fig1.jpg>. (Acesso em 15/02/2019)

2.2.2.3 Eventos solares

Segundo Webster (1993), a variação na quantidade da emissão da radiação ultravioleta emitida pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre com períodos que variam de minutos a semanas. Existem três tipos de fenômenos associados a essa variação:

- o primeiro está associado às explosões solares (*solar flares*), que são caracterizadas por um rápido aumento de energia na superfície do Sol e emitida na forma de raio-X e ultravioleta. A Figura 4 apresenta uma explosão solar emitida na superfície solar que ocorreu no ano de 2012.

Figura 4- Explosão solar



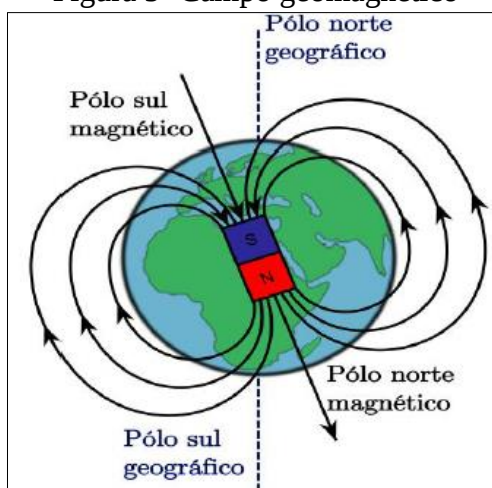
Fonte: <<https://www.reuters.com/news/picture/surface-of-the-sun-idUSRTX38DDT>>. (Acesso em 09/02/2020)

- o segundo está relacionado aos buracos na coroa, os quais são as fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, mais comuns no período em que há o declínio da atividade solar, causando assim as tempestades ionosféricas. Esse vento solar escapa de buracos na coroa solar aquecida e forma a heliosfera. Quando esse fenômeno ocorre, as partículas que estão sendo emitidas do Sol pelo vento solar sofrem uma aceleração, aumentando de forma significativa sua velocidade;
- o terceiro efeito está associado às manchas solares, as quais são regiões escuras, que aparecem na superfície do Sol e podem durar dias ou semanas.

2.2.2.4 Campo geomagnético

O campo geomagnético da Terra, também denominado como campo magnético, está localizado próximo à superfície do planeta e pode ser comparado a um dipolo, colocado no centro da Terra (McNAMARA, 1991; KIRCHHOFF, 1991). É possível observar na Figura 5 a ilustração do campo geomagnético.

Figura 5- Campo geomagnético



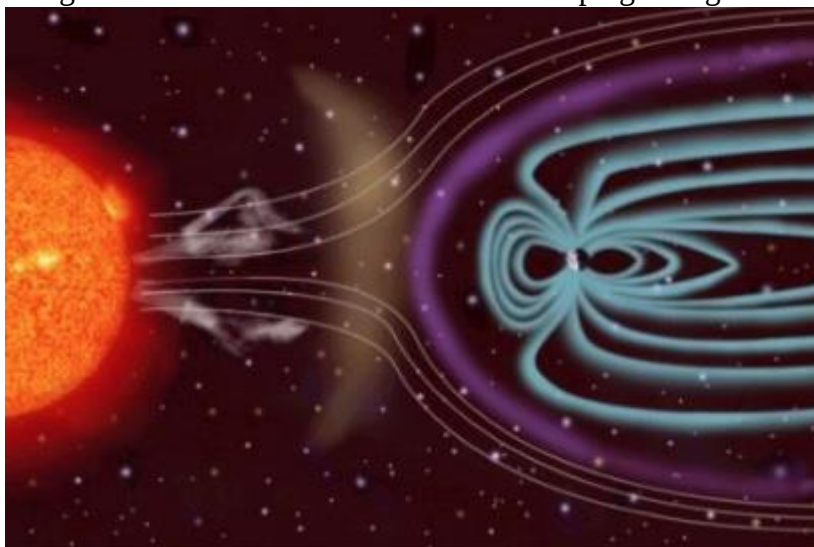
Fonte: Adaptado de McNamara (1991)

O campo magnético em torno da Terra forma as linhas de força geomagnéticas, sendo mais potentes nos pólos do que no equador. Isso provoca mudanças nas partículas carregadas na atmosfera, as quais giram em torno dela; e a razão depende da intensidade do campo, massa e carga das partículas. As maiores mudanças ocorrem no pólo decorrente da intensidade do campo magnético ser maior (CAMARGO, 1999).

O campo magnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons. Em relação à ionosfera, as linhas de força controlam os movimentos das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético proporcionará alterações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns percebidas são aquelas produzidas por meio das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Podem ocorrer também variações bruscas e intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991).

Vale destacar que após eventos solares, as linhas de força do campo geomagnético podem ser comprimidas de forma significativa, afetando o comportamento da ionosfera, causando as tempestades geomagnéticas, que por sua vez originam as tempestades ionosféricas (FEDRIZZI, 2003; DAL POZ, 2010). As emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar ocorrem continuamente, confinando e distorcendo o campo geomagnético (Figura 6) em uma cavidade com uma cauda magnética longa que se estende por centenas de raios terrestres na direção anti-solar, tornando-se diferente do modelo teórico da Figura 5. Esta cavidade denomina-se magnetosfera (LANGLEY, 2011).

Figura 6- Influência do vento solar no campo geomagnético



Fonte: <<http://sci.esa.int/cluster/36645-solar-wind/>>. Acesso em: 19 jun. 2019.

2.2.2.5 Irregularidades Ionosféricas

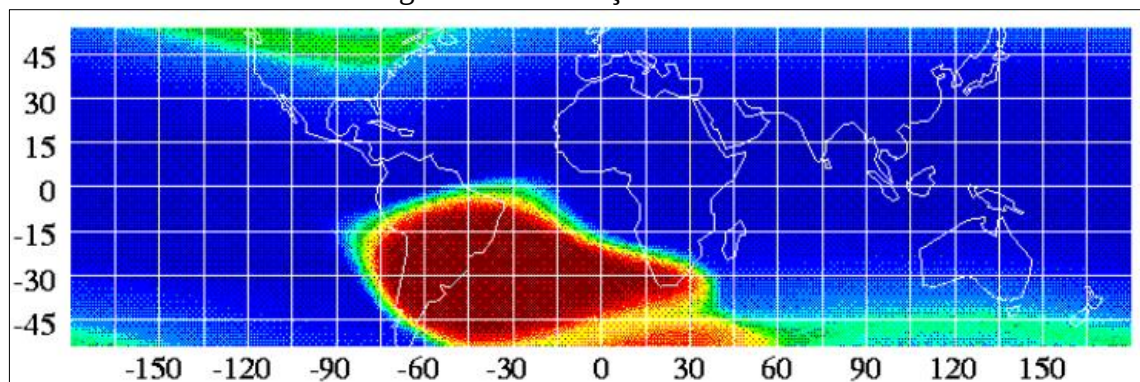
Em decorrência da alta radiação solar na região equatorial, além dos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre irregularidades (Mc NAMARA, 1991; OLIVEIRA, 2003). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o mesmo inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético, sendo que esse movimento é decorrente da ação da gravidade e gradientes de pressão. Assim, este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (OLIVEIRA, 2003; RODRIGUES, 2003; MATSUOKA, 2007; AGUIAR, 2010).

Em consequência da subida e posterior descida do plasma ocorre a formação de duas cristas, em que esses picos de densidade de elétrons nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético encontram-se, aproximadamente, em 15° de latitude geomagnética, já no equador geomagnético a densidade de elétrons fica menor (MATSUOKA, 2013). Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial. Como resultado para o posicionamento GNSS é que altos valores de TEC estão presentes nas regiões de baixas latitudes, e altos gradientes de TEC podem ocorrer na direção norte-sul, afetando a qualidade tanto do posicionamento por ponto quanto do relativo (VANI, 2014; AQUINO et al, 2006).

Segundo Mendonça (2013), na região da América Latina existe uma peculiaridade que altera o comportamento da ionosfera, causada pela chamada AMAS (Anomalia Magnética do Atlântico Sul). A AMAS é uma pequena porção do planeta que apresenta a menor intensidade magnética de todo o globo terrestre. Nessa camada, os íons passam a ser afetados a cerca de 100

km de altitude, enquanto que em regiões no hemisfério norte, essa altitude chega a 600 km. Essa anomalia encontra-se sob a América do Sul, mas se move lentamente para o oeste. A Figura 7 apresenta a localização do AMAS, sendo que a parte em vermelho é onde encontra-se a parte mais fraca do campo magnético (JASKULSKI et al., 2006).

Figura 7- Localização da AMAS



Fonte: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/misc_saad.html>. Acesso em: 09 fev. 2020

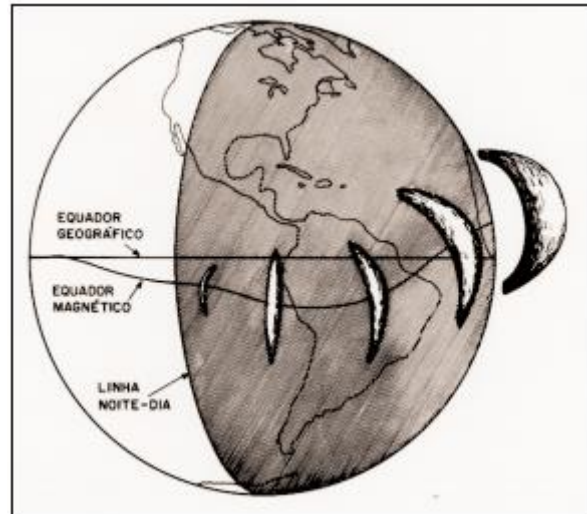
Dentre as irregularidades ionosféricas que afetam o sinal GNSS, pode-se citar também as cintilações ionosféricas, as quais são rápidas variações aleatórias na fase e amplitude do sinal de rádio recebido, causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera, podendo enfraquecer o sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra em muitos casos a degradação ou até mesmo perda do sinal na ionosfera (WEBSTER, 1993; CONKER et al., 2003; EL GIZAWY, 2003).

A região de média latitude exibe menor quantidade de distúrbio, enquanto a região abrangida pelo equador magnético, é a que apresenta os maiores distúrbios, devido à cintilação, além disso significantes efeitos podem ocorrer nas regiões polares e auroral. Na região equatorial, os efeitos mais intensos são encontrados entre as latitudes ± 10 graus e os horários mais intensos de cintilação ocorrem após o pôr do Sol, até aproximadamente meia noite local (WANNINGER, 1993; CAMARGO, 1999). Em relação ao Brasil, as ocorrências de cintilações são mínimas de abril até agosto, enquanto que entre os meses de setembro a março são máximas (CAMPOS et al., 1993).

A cintilação ionosférica também pode ocorrer em regiões caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas, como mostra a Figura 8. As mesmas estendem-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético, alcançando extensões de 10000 km e cerca de 150 km a 300 km na direção perpendicular, estabelecendo-se na alta ionosfera (SANTOS, 2001). As bolhas ocorrem sempre após o pôr do Sol até a meia noite; podendo também, durante algumas fases do ano, aparecerem

durante a noite toda até o amanhecer (SAHAI; FAGUNDES; BITENCOURT, 2000; DE PAULA, 2008; MATSUOKA, 2007).

Figura 8- Bolhas ionosféricas



Fonte: Soares (2001) apud Matsuoka (2007).

As cintilações que os sinais GNSS sofrem devido às irregularidades na ionosfera podem ser quantificadas, por diversos índices, como por exemplo o S4. O índice S4 é adimensional e estimado tanto para os sinais provenientes das portadoras L1 e L2, como para a portadora L5. Alguns limiares para o valor de S4 podem ser encontrados na literatura.

Segundo Conker et al. (2003), em relação a portadora L1 o S4 pode ser classificado como:

- ausência de cintilação: $S4 \approx 0,0$;
- cintilação forte: $S4 \approx 1,0$.

Já Muella et al. (2009) classifica o índice S4 para a portadora L1 em quatro categorias:

- cintilação fraca: $0,2 < S4 \leq 0,4$;
- cintilação moderada: $0,4 < S4 \leq 0,6$;
- cintilação forte: $0,6 < S4 \leq 1,0$; e
- cintilação saturada: $1,0 < S4 \leq 1,4$.

Enquanto Tiwari et al (2011) apresenta três níveis para índice S4:

- cintilação fraca: $S4 \leq 0,5$;
- cintilação moderada: $0,5 < S4 < 1$; e
- cintilação forte: $S4 \geq 1$.

2.3 Monitoramento da ionosfera e mapas ionosféricos

Nesta seção serão apresentadas breves descrições de algumas ferramentas disponíveis para o monitoramento da ionosfera no Brasil, além de alguns mapas ionosféricos utilizados para minimizar os efeitos relacionados a mesma.

2.3.1 CIGALA/CALIBRA

O projeto CIGALA foi financiado pelo EC (*European Commission*) e um dos objetivos foi a criação de uma base de dados de parâmetros da ionosfera com o intuito de analisar o TEC e os efeitos da cintilação ionosférica no GNSS. Tal projeto foi concluído em fevereiro de 2012 (CIGALA/CALIBRA, 2019).

Já o projeto CALIBRA é uma continuidade do projeto CIGALA. Participaram do CALIBRA a Universidade de Nottingham (UNOTT), Nottingham/Reino Unido, que liderou o mesmo, o Instituto Nacional de Geofísica e Vulcanologia (INGV), Roma/Itália, a Universidade de Nova Gorica (UNG), Eslovênia, e a empresa Septentrio Satellite Navigation (SSN), Bélgica, todos do continente europeu. Em se tratando do Brasil, participaram a FCT/UNESP e a empresa ConsultGEL (CSG). O projeto teve seu início em novembro de 2012 e término em fevereiro de 2015 (CIGALA/CALIBRA, 2019). Embora o projeto CIGALA/CALIBRA tenha sido concluído, a rede de receptores GNSS que foi implantada no Brasil continua em operação, coletando dados continuamente.

Além da infraestrutura de monitoramento, uma infraestrutura de análise foi implantada, a qual compreende o pré-processamento automatizado dos dados e aplicação de distintas técnicas de mineração e visualização de dados para suporte à análise dos mesmos. Estes recursos estão disponíveis no software desenvolvido denominado ISMR Query Tool2 (VANI, 2014; VANI; SHIMABUKURO; MONICO, 2017).

A base de dados integrada consiste em um esforço para concentrar dados de monitoramento de diferentes redes de estações em um único repositório. Atualmente, dados das redes CIGALA/CALIBRA, ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo) (<http://gnss.icea.gov.br/>) e LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*) (<http://lisn.igp.gob.pe/>) estão disponíveis. A Figura 9 mostra a distribuição das estações pertencentes as redes citadas anteriormente.

Figura 9-Distribuição das estações



Fonte: < <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/>>. Acesso em 02 jul.2019.

2.3.2 SCINTEC

No Brasil, o monitoramento e a geração de mapas em tempo real da cintilação ionosférica são realizados pelo INPE por meio do sistema SCINTEC¹, como mostra a Figura 10. O SCINTEC é um sistema que tem a finalidade de monitorar a cintilação ionosférica e o TEC sobre o território brasileiro.

Figura 10- SCINTEC em tempo real



Fonte: Adaptado de INPE (2019)

¹ <http://www.inpe.br/scintec/pt/>

Para isso o SCINTEC utiliza dados da rede de receptores GPS CASCADE, desenvolvida pela Universidade de Cornell (EUA). O SCINTEC está fazendo uma integração com o projeto LISN com a finalidade de prover mapas de cintilação e TEC sobre toda a América do Sul em tempo real (INPE, 2019). Para o futuro ainda está previsto uma integração com a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) com a finalidade de fazer o cálculo de TEC para analisar os gradientes latitudinais do TEC, os efeitos das irregularidades do plasma sobre o TEC e o desenvolvimento de modelos (INPE, 2019). Vale destacar, que atualmente o site encontra-se em manutenção.

2.3.3 TEC Map

O TEC Map são mapas meteorológicos ionosféricos de TEC monitorados por estações GNSS terrestres, que desde 2013 tem sido operacionalmente produzidos pelo programa EMBRACE do INPE. Para cobrir todo o continente, quatro redes GNSS foram utilizadas: a RBMC / IBGE, LISN, IGS e RAMSAC (TAKAHASHI et. al, 2016).

O TEC Map possui uma resolução de tempo de 10 min e são produzidos com um atraso de 12 horas, enquanto que a resolução espacial do mapa é bastante baixa, variando entre 50 e 500 km, dependendo da densidade dos pontos de observação (TAKAHASHI et. al, 2016).

Há diversas ferramentas disponíveis para o TEC Map no site do EMBRACE², entre as quais estão:

- TEC Map Início - plota o TEC em um dado instante, sendo que pode variar de 10 em 10 minutos;
- TEC Map Comparação - plota o TEC com 1h hora e com 24 h de atraso da hora inserida inicialmente;
- TEC Map Gráfico - plota ao longo de um dia os valores de TEC em forma de gráfico para uma dada estação;
- TEC Map Vídeo diário - plota uma animação do TEC ao longo de um dia todo;
- TEC Map Erro de distância vertical - plota o erro nas medidas de distância (vertical) em tempo real baseados no VTEC;
- TEC Map Comparação de Erro de Distância Vertical - plota o erro nas medidas de distância vertical em dois momentos: com atraso de 1h e de 24h do horário inserido;

² <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/#>

- TEC Map Estações - plota todas as estações que fornecem dados para os produtos relacionados a TEC do EMBRACE;

É importante destacar que os produtos gerados são apenas online e no formato de imagem, logo não é possível comparar com os mapas que foram gerados nesta pesquisa.

2.3.4 SIRGAS UNLP

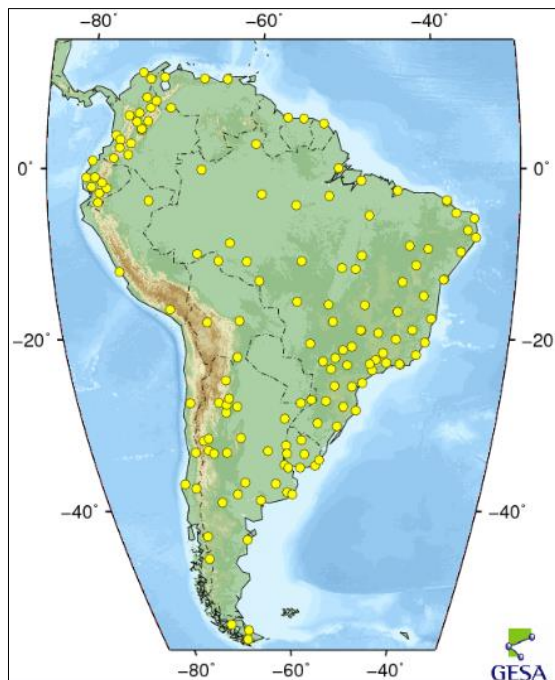
O SIRGAS foi criado em 1993 na Conferência Internacional para a Definição de um Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul, celebrada em Assunção no Paraguai. Este sistema de referência possuía definição idêntica ao ITRS (*International Terrestrial Reference System*) e sua realização foi uma densificação regional da realização do ITRS (ITRF- *International Terrestrial Reference Frame*) (SIRGAS, 2019).

O primeiro nome do SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul) foi alterado em fevereiro de 2001 para Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas devido à realização SIRGAS2000 que incluiu dados de estações localizadas nas Américas do Norte e Central, bem como à recomendação da Organização das Nações Unidas, em sua Sétima Conferência Cartográfica das Américas realizada em Nova York no período de 22 a 26 de Janeiro de 2001, sobre a adoção do SIRGAS como sistema de referência oficial em todos os países das Américas.

O SIRGAS fornece suporte para o desenvolvimento dos mais variados tipos de atividades práticas e científicas que envolvam coordenadas de alta precisão, navegação e pesquisas multidisciplinares para aplicações em geociências. Um dos produtos fornecidos pelo SIRGAS foram os mapas ionosféricos, os quais forneceram dados de VTEC de 2005 a 2013, para a região de cobertura da rede SIRGAS. Além disso, esses mapas são conhecidos como SIRGAS-UNLP³ e são mapas diários, disponibilizados a cada hora, onde os mesmos são calculados a partir do modelo LPIM. A Figura 11 mostra a Rede de Monitoramento da América do Sul.

³ <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/>

Figura 11- Rede de Monitoramento da América do Sul



Fonte: <<http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/>>. Acesso em 07 jul. 2019.

Os resultados gerados pelo SIRGAS UNPL eram disponibilizados de duas maneiras: grades e figuras numéricas, organizadas em arquivos e subdiretórios diários. A saída gráfica inclui três apresentações: 24 mapas por hora (plotados em um arquivo), uma figura que compõe os 24 mapas por hora e uma animação (SIRGAS, 2020).

O LPIM foi desenvolvido no final de 1990, quando sua primeira versão foi publicada. Os principais marcos no desenvolvimento do LPIM foram (SIRGAS, 2020):

- em 1998: a primeira versão de um modelo global foi estabelecida para representar o conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) de observações de código P coletadas por uma rede global de estações de GPS de medição contínua;
- em 2000: desenvolvimento da capacidade de processar observações de fase dos sinais de portadora GPS (em conjunto com os do código P);
- em 2006: implementação da modulação de latitude na representação espacial de VTEC;
- em 2009: estabelecimento de um modelo global capaz de representar a densidade de elétrons livres de observações GNSS coletadas por receptores localizado na superfície da terra, e perfis de densidade eletrônica fornecidos pelos satélites LEO.

Os mapas da ionosfera SIRGAS-UNLP estão sendo utilizados em diferentes estudos, tais como: validação da IRI (Ionosfera de Referência Internacional) sobre a América do Sul, melhoramento do posicionamento GNSS com receptores de simples frequência e análise da viabilidade para o cálculo da correção ionosférica para um sistema regional de aumento baseado em satélites (SBAS). Este último estudo tem sido promovido pela OACI (Organização Internacional de Aviação Civil) no âmbito do projeto SACCSA (*Solución de Aumentación para el Caribe, Centro y Sur América*) (SIRGAS, 2020).

2.3.5 Mapas globais da ionosfera

Desde 1 de janeiro de 1996 os GIMs são disponibilizados por diversos centros no formato IONEX. Em relação aos GIMs, o IGS tem um grupo de trabalho para desenvolver modelos para serem utilizados na sua geração. Atualmente, quatro centros de análise do IGS produzem estimativas do GIM no formato IONEX: CODE da Suíça, ESOC da Alemanha, JPL dos Estados Unidos e UPC da Espanha, sendo que todos utilizam dados GPS e GLONASS das estações ativas do IGS (PENHA; ORIHAN, 2013). A configuração principal de cada um dos modelos é dada por (IGS, 2020):

- CODE: o TEC é modelado por uma expansão em harmônicos esféricos até grau e ordem 15, referido a uma estrutura de referência geomagnética solar. Em relação aos parâmetros da ionosfera, são obtidos a cada 2 horas a partir de medidas da fase da portadora da rede global do IGS e de outras instituições (aproximadamente 240-260 estações), além disso, considera a ionosfera como uma camada com altitude de 450 km (AIUB, 2020);
- ESOC: utilizam um modelo bi-dimensional considerando a ionosfera como uma única camada com altitude de 450 km, utilizando 185–230 estações, bem como um modelo baseado no perfil 3D de Chapman, com uma integração vertical usando uma função exponencial;
- JPL: a ionosfera é modelada numa estrutura de referência geomagnética solar usando *splines* bicúbicas numa grade esférica com 1280 triângulos esféricos. O filtro de Kalman é usado para resolver, simultaneamente, a tendência instrumental L1–L2 e o atraso vertical nos pontos de uma grade ionosférica. Os parâmetros são modelados como um processo estocástico, utilizando dados de 180–190 estações;

- UPC: utilizam um modelo tomográfico estocástico e a ionosfera é dividida em duas camadas, com altitude de 450 km e 1130 km, dados de 185–205 estações são empregados.

Os arquivos IONEX contêm os valores de VTEC em um *grid* com resolução espacial de $2,5^\circ \times 5^\circ$ em latitude e longitude, respectivamente, enquanto que a resolução temporal é de 2 horas e o tempo de latência de 11 dias. Assim, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de 4 arquivos IONEX. Desde o fim de 2002, para cada dia, os arquivos IONEX gerados por cada um dos centros de análise são combinados para resultar em um único arquivo IONEX, ou seja, um único arquivo global do VTEC (PENHA; ORIHAN, 2013). Atualmente já vem sendo disponibilizados mapas com latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2- IONEXs disponibilizados pelo IGS

Tipo	Acurácia	Latência	Atualizações	Intervalo
Grid de TEC ionosférico final	2-8 TECU	~11 dias	semanal	2 horas
Grid de TEC ionosférico rápido	2-9 TECU	<24 horas	diariamente	2 horas

Os arquivos de cada centro e o arquivo combinado são disponibilizados pelo IGS, no seguinte endereço eletrônico: <<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>>.

No Brasil, de acordo com o IGS, há apenas 13 estações GNSS pertencentes a rede, localizadas em Belém, Boa Vista, Brasília, Eusébio, Cachoeira Paulista (duas estações), Porto Alegre, Porto Velho, São Luiz, Salvador, Tupã, Palmas e Curitiba, como mostra a Figura 12. O fato da rede no Brasil ser pouco densificada influencia na precisão média dos valores do VTEC, o qual pode variar também de acordo com a região do globo, entre outros fatores.

Figura 12- Distribuição das estações IGS no Brasil e em países vizinhos



Fonte: Adaptado de <http://www.igs.org/network>. Acesso em 16 jul. 2019

Atualmente diversos trabalhos têm sido desenvolvidos a fim de fornecer aos usuários GNSS métodos de correções ionosféricas em tempo real e com confiabilidade dos dados. Além disto, esforços também vêm sendo direcionados para corrigir a limitação na performance dos atuais métodos de geração de grade em regiões equatoriais (ICAO, 2006; POWELL; WALTER, 2010; SEO, 2010).

É importante destacar que o Brasil, por estar localizado na região equatorial, sofre forte influência dos efeitos ionosféricos, o que requer modelos mais apropriados, abrindo um campo de estudos e investigações relacionado com o tema clima espacial. Essa região do planeta sofre influência da anomalia equatorial e é considerada uma das que apresentam maiores variações temporais e espaciais do TEC, além da ocorrência dos efeitos de cintilação ionosférica (MATSUOKA, 2007; SILVA, 2009). Por esse motivo há a necessidade de aplicar modelos regionais, já que os mapas globais apresentam deficiências de estações em regiões como a do Brasil, onde a atividade ionosférica é muito intensa. Um exemplo de modelo regional para a região brasileira é o GIB, o qual será descrito na próxima seção.

2.3.6 GIB

O GIB é um modelo que foi desenvolvido por Aguiar (2010), no qual é calculado o atraso ionosférico na direção satélite/receptor e sua projeção para a direção vertical em todos os IPP (*Ionosphere Pierce Point*) observados por uma estação de referência, além da estimativa do

atraso de *hardware* dos satélites e receptores (RIBEIRO *et al.*, 2017). Além disso, é possível também a geração de uma grade do atraso ionosférico vertical por meio das funções de interpolação adaptativas e seu nível de confiança (GIVE - *Grid Ionospheric Vertical Error*) (AGUIAR, 2010).

A modelagem ionosférica no GIB é gerada por meio da estimação do atraso ionosférico absoluto, a partir de observáveis GPS coletadas pelas estações de referência da RBMC. Dessa maneira, é possível obter o atraso ionosférico sofrido pelos sinais dos satélites por meio da combinação linear livre de geometria da pseudodistância suavizada pela fase (AGUIAR, 2010).

$$I_{L_1}^V = sf(z')_r^s \frac{(PS_2 - PS_1)_r^s}{\gamma - 1} - \frac{c(b_s - b_r)}{\gamma - 1} \quad (10)$$

em que:

$I_{L_1}^V$: é o atraso ionosférico em metros em L1, na direção vertical;

$sf(z')_r^s$: é a função de mapeamento que projeta o atraso ionosférico da direção satélite/receptor para a vertical;

PS_1, PS_2 : são as pseudodistâncias suavizadas pela fase da portadora L1 e L2 (km), respectivamente;

γ : é a constante $\frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} = \left(\frac{77}{60}\right)^2$, para observáveis GPS, obtida a partir das frequências L1-L2 e converte o erro para L2;

b_s, b_r : representam as tendências interfrequência dos satélites e dos receptores (ns), respectivamente.

O GIB possibilita também o uso tanto em modo pós-processamento, quanto em processamento online, ou seja, em tempo real, pois a implementação do modelo foi desenvolvida e adaptada para estimativas utilizando o filtro de Kalman na assimilação de dados GPS em tempo real, quando esses são disponibilizados via protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) (RIBEIRO *et al.*, 2017).

2.3.7 Mod Ion

Camargo (1999) desenvolveu um modelo regional da ionosfera (Mod_Ion), o qual permite calcular o erro sistemático devido à ionosfera na portadora L1, bem como o TEC, e é representado pela série de Fourier, utilizado por Georgiadiou (1994), porém utilizando diversos receptores. Os parâmetros são estimados a partir de dados GPS de dupla frequência coletados por estações ativas da RBMC (CAMARGO, 1999; MATSUOKA *et al.*, 2002).

O modelo desenvolvido (Mod_Ion) teve sua performance avaliada no posicionamento por ponto, a primeira vez, com dados GPS da RBMC do ano de 1998, abrangendo 1 semana de cada estação do ano. Os resultados do posicionamento por ponto, com a pseudodistância, utilizando o modelo para corrigir os efeitos sistemáticos da ionosfera na portadora L1, para um período de 24 horas, proporcionaram resultados da ordem de metro para as discrepâncias das coordenadas cartesianas. Isto significa uma melhoria de aproximadamente 80,7% nos resultados obtidos (CAMARGO, 1999 e MATSUOKA et al., 2002).

Posteriormente, o modelo Mod_Ion foi avaliado, no posicionamento por ponto durante o período de máxima atividade solar (2000-2001), que ocorre aproximadamente a cada 11 anos. Neste período há um aumento da magnitude do erro devido à refração ionosférica. Mesmo assim, os experimentos realizados mostraram a potencialidade do Mod_Ion, proporcionando uma redução do erro, devido à ionosfera, na resultante da ordem de 82,3% (DAL POZ, 2002). Nesses experimentos as tendências interfrequências dos satélites foram tratadas como injunções absolutas (MATSUOKA; CAMARGO, 2002).

3 SOFTWARE BERNESE

O Bernese GNSS *Software* foi concebido pelo AIUB da Suíça e permite a realização de processamentos de alta acurácia e tem sido utilizado universalmente para atividades especialmente de cunho científico. Para mais detalhes sobre o software consulte o Apêndice A.

Em relação aos modelos de ionosfera gerados no Bernese, os mesmos são derivados do GNSS e podem ser de três tipos: locais, globais (ou regionais) ou específicos de uma estação.

Os modelos locais são baseados em expansões bidimensionais da série de Taylor. Além disso, o modelo local de TEC pode ser representado de acordo com a Equação (11) (BERN, 2015).

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm}(\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m \quad (11)$$

em que:

n_{max}, m_{max} : são os graus máximos da expansão de série bidimensional de Taylor em latitude β e em longitude s , respectivamente;

E_{nm} : são os coeficientes de TEC da série de Taylor, ou seja, os parâmetros do modelo local a serem estimados;

β_0, s_0 : são as coordenadas de origem;

β : é a latitude geográfica do ponto de interseção da linha entre o receptor até o satélite com a camada ionosférica;

s : está relacionado à hora local solar (LT), de acordo com:

$$s = LT - \pi \approx UT + \lambda - \pi \quad (12)$$

UT : Hora Universal

λ : longitude geográfica do ponto ionosférico.

Já no que diz a respeito ao modelo global, que também pode ser utilizado para aplicações regionais, pode ser escrito como mostra a equação (13) (BERN, 2015):

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos(m.s) + b_{nm} \sin(m.s)) \quad (13)$$

em que:

n_{max} : é o grau máximo harmônica esférica;

$\tilde{P}_{nm} = \Lambda(n, m)P_{nm}$: são as funções de Legendre normalizadas de grau n e ordem m , com base na função de normalização $\Lambda(n, m)$ e funções de Legendre P_{nm} ;

a_{nm}, b_{nm} : são os coeficientes TEC (desconhecidos) dos harmônicos esféricos, ou seja, os parâmetros dos modelos globais de ionosfera a serem estimados.

Já os modelos de TEC específicos da estação são tratados exatamente da mesma maneira que os modelos globais. No entanto, um conjunto completo de parâmetros da ionosfera é estimado em relação a cada estação envolvida (BERN, 2015).

3.1 Módulos

Os módulos do Bernese fazem o processamento dos dados GNSS, porém para se obter uma solução final é necessário utilizar vários módulos, pois cada um gera um tipo de resultado que será importado nos módulos seguintes.

Primeiramente, se faz necessário configurar a campanha que será usada e as seções a serem processadas. As seções são os limites de início e fim dos dados empregados. Citando um exemplo, uma rede que possui solução diária apresenta uma seção por dia, entre às 0 h e 24 h.

As funções dos módulos utilizadas nessa pesquisa são descritas a seguir:

- **RNX2STA**: extrair informações das estações a partir dos arquivos RINEX, para isso utiliza como dados de entrada os arquivos de observação RINEX;
- **RXOBV3**: transferir dados de pseudodistância/fase do RINEX para arquivos do Bernese, ou seja, responsável por importar os dados para a campanha. Esse módulo faz essa função ao selecionar os arquivos que estão dentro da pasta RAW e os transforma para o formato do Bernese. Nessa etapa, algumas configurações podem ser selecionadas como a escolha de qual (ou quais) constelação (ões) GNSS será (ão) processada (s);
- **POLUPD**: converter arquivos de pólo no formato do IERS para o formato Bernese;
- **GRDS1S2**: extrair os coeficientes de cargas atmosféricas da maré de uma grade global para os termos seno e cosseno da pressão atmosférica S1 e S2;
- **PRETAB**: transforma as coordenadas para o referencial celeste criando um arquivo tabular de órbita;
- **ORBGEN**: a partir do arquivo tabular de órbita gerado pelo PRETAB, o ORBGEN gera/atualiza a órbita padrão dos satélites;
- **RNXSMT**: suaviza as observações da pseudodistância e fase;
- **SNGDIF**: forma linhas de base a partir de arquivos de observação com zero diferença;
- **MAUPRP**: detecta e resolve perdas de ciclos, remove valores discrepantes;

- **GPSEST:** módulo principal de estimativa de parâmetros, o qual nessa pesquisa será utilizado para gerar mapas regionais da ionosfera. Nesse módulo o usuário pode escolher qual o modo que os dados serão processados: zero diferença ou dupla diferença, além disso, é possível optar por utilizar só fase e/ou pseudodistância. Vale ressaltar que segundo BERN (2015), é recomendável utilizar pseudodistância ao aplicar a zero diferença, enquanto que a fase é sugerida ao empregar a dupla diferença.

Outra coisa importante no Bernese, é que para ficar de modo automático, as variáveis devem ser escritas de maneira genérica, como mostra o Quadro 1.

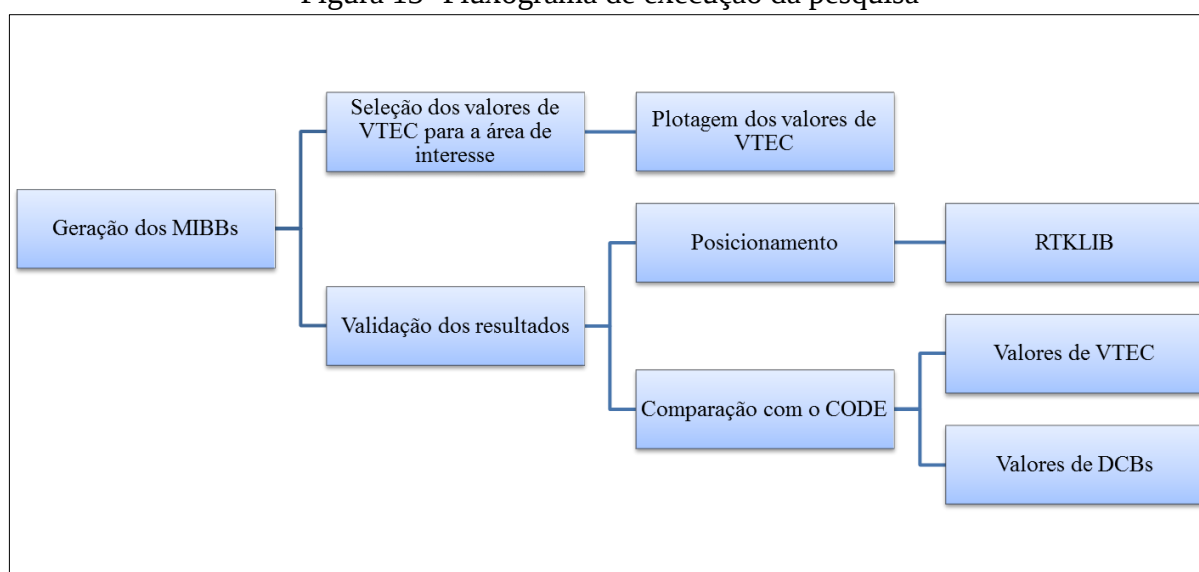
Quadro 1- Modo genérico de nomear as variáveis

Descrição	Modo genérico
Dia do ano (DOY)	\$S+0
Ano	\$Y+0
Semana GPS	\$W+0
Nome da estação, dia do ano	????\$S+0
Ano, dia do ano	\$YD+0
Semana GPS, dia do ano	\$WD+0

4 METODOLOGIA

O principal objetivo dessa pesquisa foi a geração de mapas regionais utilizando redes GNSS ativas, por meio do software Bernese: MIBB. Para tanto, inicialmente, foi realizado um estudo bibliográfico sobre o tema proposto, o qual serviu para aquisição dos fundamentos teóricos necessários para o estudo da ionosfera e seus efeitos, bem como dos GIMs e os processos envolvidos em sua elaboração. A Figura 13 apresenta o fluxograma de execução utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 13- Fluxograma de execução da pesquisa

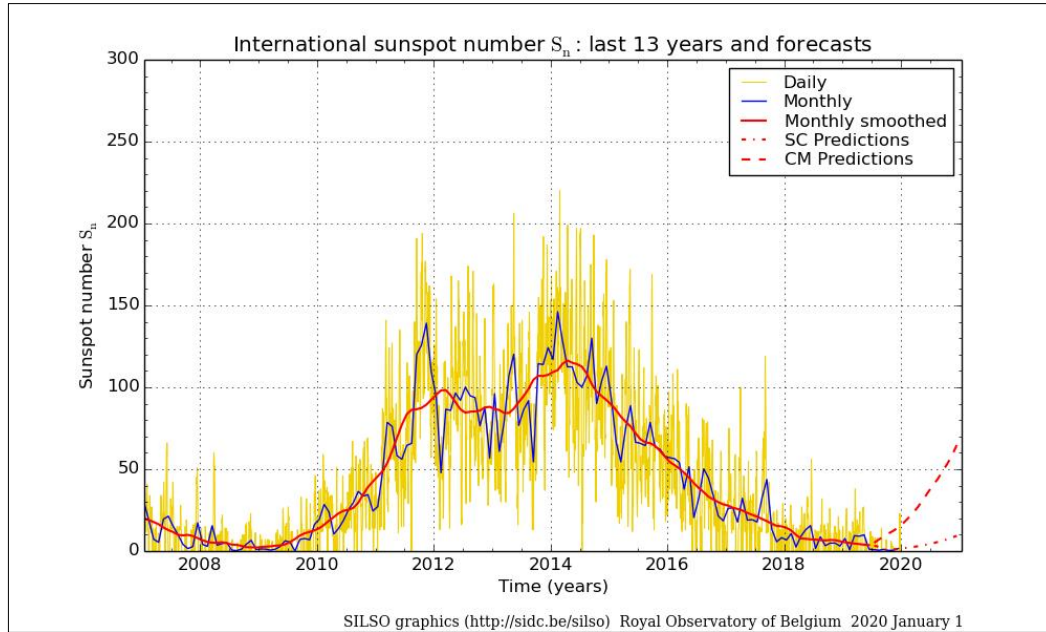


Na seção 4.1 são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

4.1 Materiais e Métodos

Primeiramente, foi necessário selecionar o período de dados a serem utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Assim, de acordo com a Figura 14 o ano de 2014 apresenta um alto número de manchas solares, tornando esse ano propício para estudos relacionados a atividade ionosférica.

Figura 14- Número de manchas solares



Fonte: <http://www.sidc.be/silso/dayssnplot>. Acesso em 16 jan. 2020.

Foram selecionados os meses de junho (do dia 152 ao 181) e outubro (do dia 274 ao 304), como mostram a Figura 15 e a Figura 16, respectivamente. Para referir-se ao dia selecionado, será utilizado o DOY (*Day of Year*), nesse caso o DOY durante o mês de junho vai de 152 até 181, enquanto que do mês de outubro é de 274 até 304.

Figura 15- Valores de TEC para o mês de junho de 2014

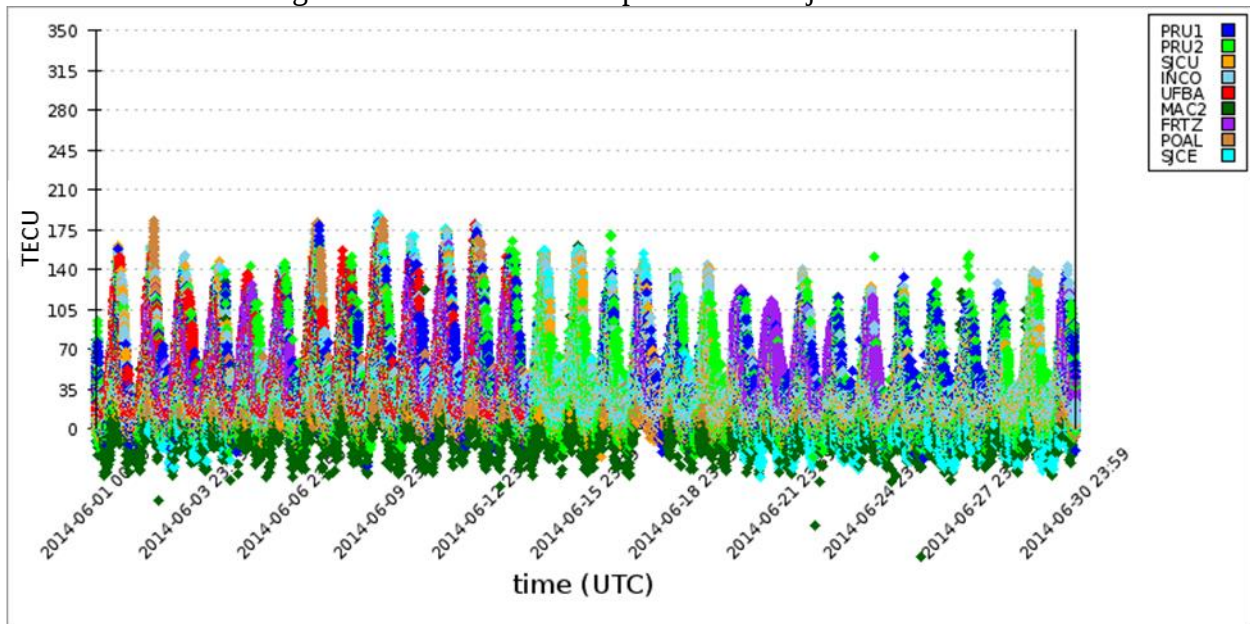
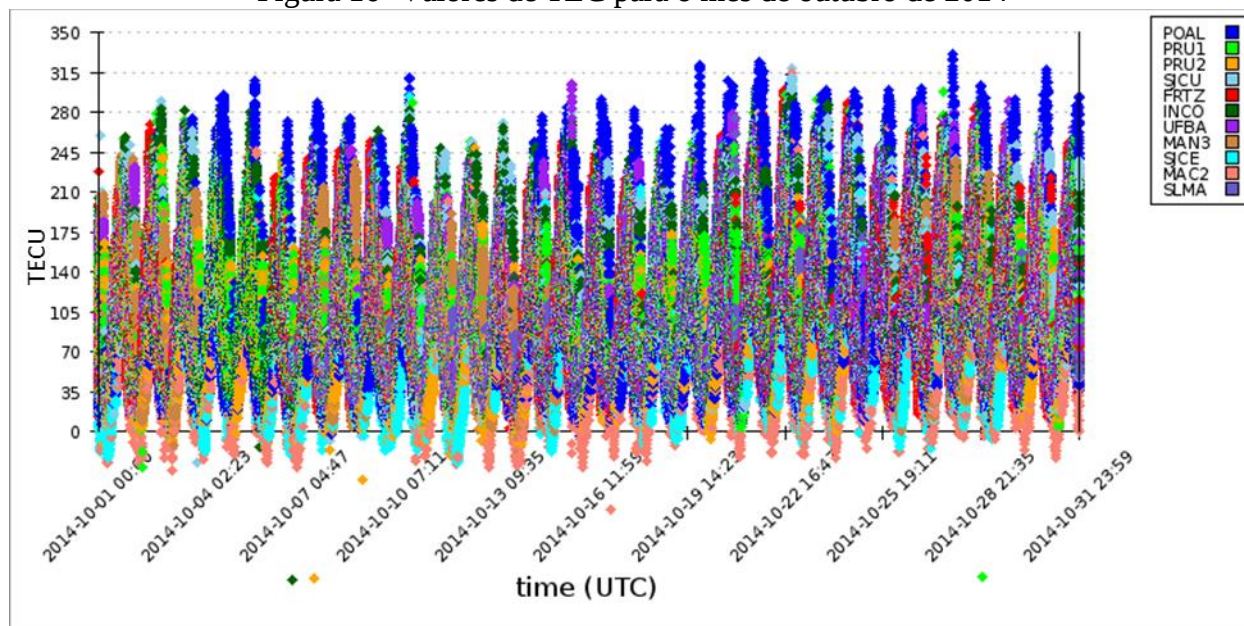
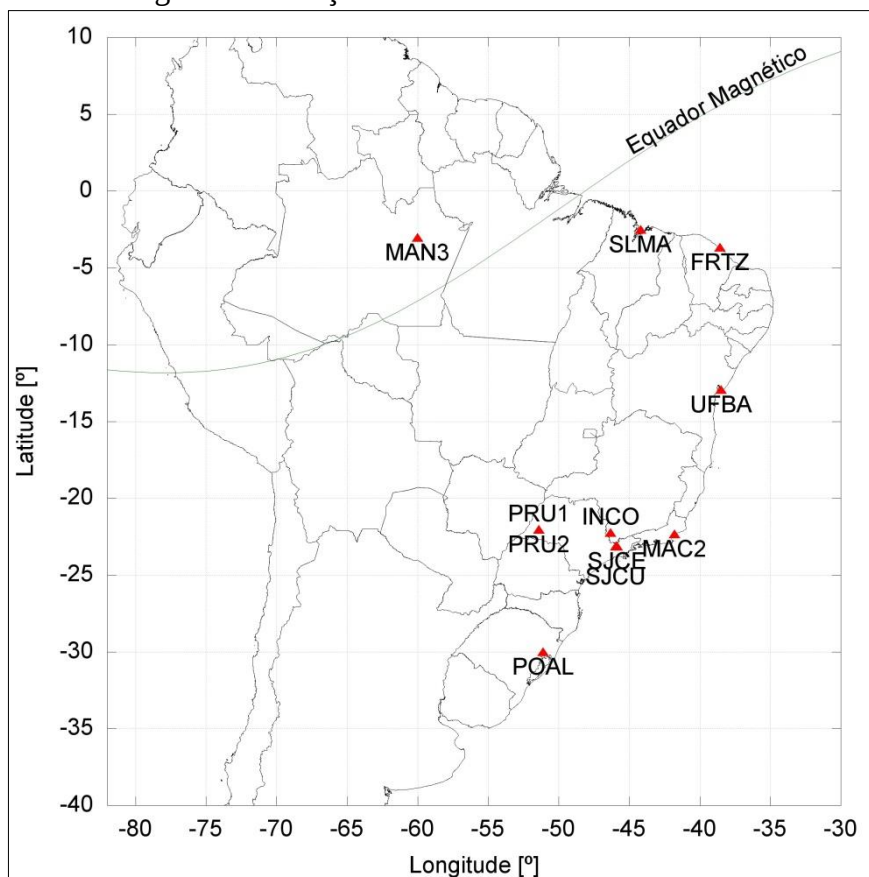


Figura 16- Valores de TEC para o mês de outubro de 2014



A partir das Figuras 15 e 16 é possível observar que os meses de junho e outubro são períodos de baixa e alta densidade de elétrons, respectivamente. Além disso, as Figuras 15 e 16 foram obtidas a partir da ferramenta ISMR Query Tool2, a partir de dados de 11 estações pertencentes a rede CIGALA/CALIBRA, como mostra a Figura 17.

Figura 17- Estações da rede CIGALA/CALIBRA



Posteriormente, no software Bernese foi criada a campanha, na qual puderam ser inseridos os dados de entrada nas suas respectivas pastas. No que se refere aos dados de entrada, foi necessário realizar o download de alguns arquivos, tais como: arquivos de observação (.o), efemérides precisas (.sp3), DCBs (*Differential Code Bias*) (.dcb) e parâmetros de orientação da Terra (.ERP). Ainda no que se refere aos dados de entrada, foi selecionada a opção de utilizar todos os sistemas de satélites disponíveis.

Em relação aos dados de observação, foram utilizados dados de três redes: da RBMC⁴, da RAMSAC⁵ (Rede Argentina de Monitoramento Contínuo por Satélite) e do IGS⁶. Em relação as estações do IGS, posteriormente foi possível comparar os valores de DCBs dos arquivos IONEX obtidos com os processamentos no Bernese e os disponibilizados pelo CODE de estações em comum. Já para realizar a validação dos MIBBs no posicionamento, foram utilizados dados das estações: SMAR, PPTE, GVA1, AMCO e PBCG, as quais estão localizadas na região Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil. É importante destacar que as

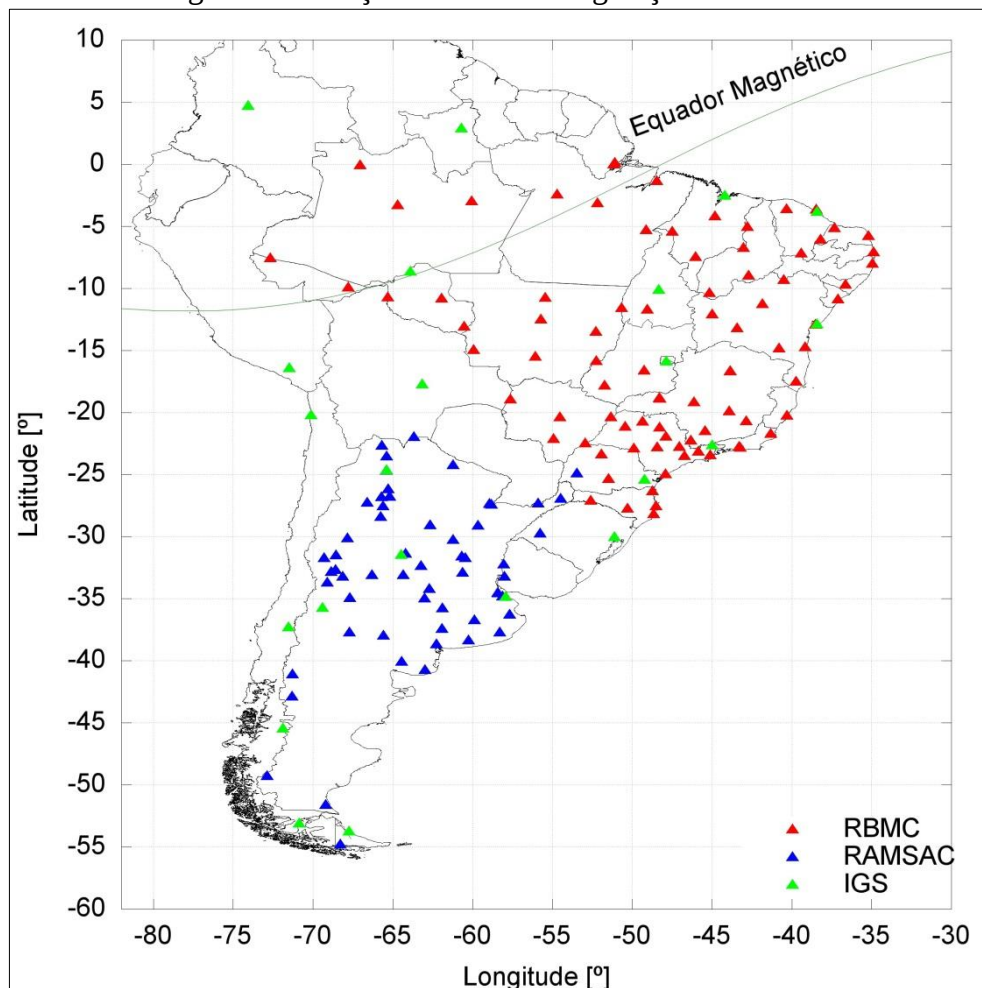
⁴Site da RBMC: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>

⁵Site da RAMSAC: <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex>

⁶ Site do IGS: <ftp://anonymous:a@cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/daily/>

estações utilizadas na etapa de validação não foram utilizadas na geração dos MIBBs. A Figura 18 mostra a distribuição das 180 estações utilizadas na geração dos MIBBs.

Figura 18- Estações utilizadas na geração dos MIBBs

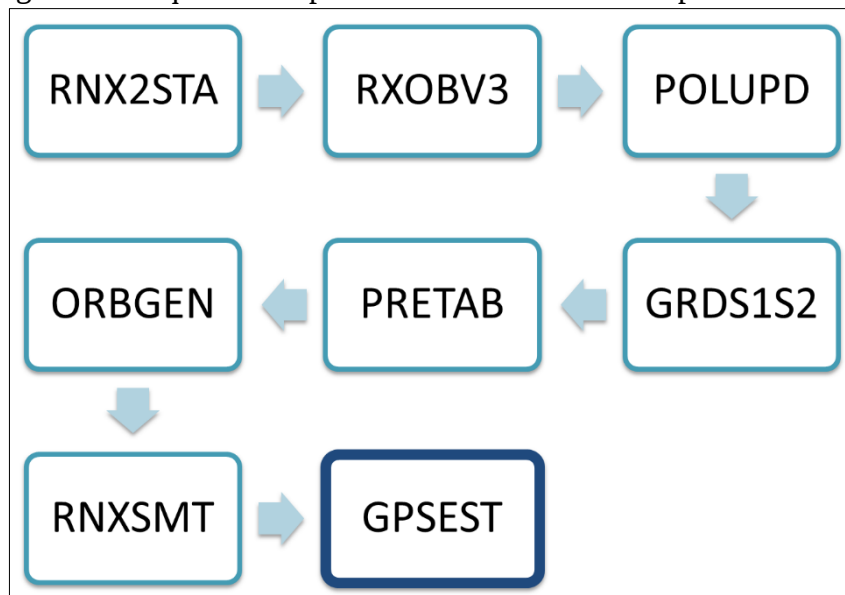


Em seguida deu-se início aos processamentos no Bernese. Vale destacar que foram realizados dois tipos de processamentos: um utilizando somente pseudodistância e outro só a fase, os quais são descritos a seguir.

4.1.1 Geração dos MIBBs utilizando a pseudodistância

A obtenção dos MIBBs utilizando como observável a pseudodistância envolveu 8 módulos do Bernese, como mostra a Figura 19, a qual apresenta a sequência de execução de cada um deles.

Figura 19- Sequência de processamentos utilizando a pseudodistância



Para cada módulo foi necessário inserir alguns dados de entrada, bem como setar alguns parâmetros. O Quadro 2 apresenta os dados de entrada e de saída de cada módulo que foi utilizado na geração dos mapas ionosféricos.

Quadro 2- Arquivos de entrada e saída de cada módulo utilizando a pseudodistância
(continua)

Módulo	Arquivos de entrada	Arquivos de saída
RNX2STA	????\$\$+0.14o	STA\$\$+0.STA
RXOBV3	????\$\$+0.14o STA\$\$+0.STA sir14P\$W+0.crd CONST. SATELLIT.I14 SAT_\$Y+0.CRX PCV_COD.I14 GPSUTC. ABREV	????\$\$+0.PZO ????\$\$+0.PZH ????\$\$+0.CZO ????\$\$+0.CZH
POLUPD	C04_\$Y+0.ERP GPSUTC. IAU2000R06.NUT IERS2010XY.SUB	COD\$YD+0.ERP
GRDS1S2	s1_s2_def_ce.dat sir14P\$W+0.crd DATUM_	s1s2\$\$+0.ATL
PRETAB	igs\$WD+0.sp3 COD\$YD+0.ERP FES2004.BLQ s1s2\$\$+0.ATL CONST.	COD\$YD+0.CLK COD\$YD+0.TAB

Quadro 2- Arquivos de entrada e saída de cada módulo utilizando a pseudodistância
(conclusão)

Módulo	Arquivos de entrada	Arquivos de saída
PRETAB	IERS2010XY.SUB IAU2000R06.NUT SAT\$Y+0.CRX	
ORBGEN	COD\$YD+0.TAB COD\$YD+0.ERP FES2004.BLQ s1s2\$\$+0.ATL CONST. SAT_\$Y+0.CRX SATELLIT.I14 DE405.EPH IERS2010XY.SUB IAU2000R06.NUT M2008_SMALL. TIDE2000.TPO OT_FES2004.TID GPSUTC.	COD\$YD+0.STD
RNXSMT	????\$\$+0.14° CONST. SATELLIT.I14 ????\$Y+0.CRX	????\$\$+0.SMT
GPSEST	????\$\$+0.CZH sir14P\$W+0.crd COD\$YD+0.STD COD\$YD+0.ERP P1P21410.DCB FES2004.BLQ s1s2\$\$+0.ATL CONST. DATUM_ PCV_COD.I14 RECEIVER. SATELLIT.I14 SAT_\$Y+0.CRX IERS2010XY.SUB IAU2000R06.NUT SINEX. IONEX. GPSUTC.	ION\$YD+0.ION ION\$YD+0.INX

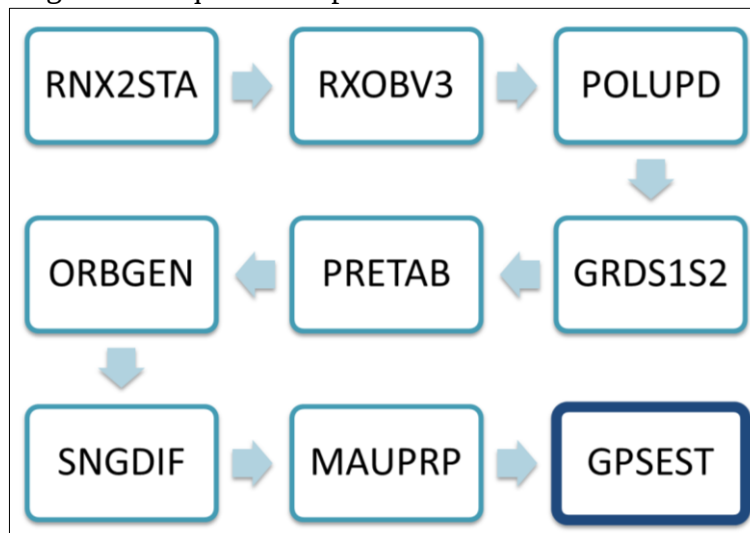
No módulo GPSEST, como recomendado no manual do Bernese, foi utilizada a zero diferença. Vale ressaltar que o GPSEST gera dois arquivos de saída, um na extensão .ION e outro .INX, sendo que o primeiro é utilizado pelo Bernese, enquanto o segundo possui a mesma extensão dos mapas ionosféricos disponibilizados pelo CODE, com resolução espacial de 2,5° x 5° em latitude e longitude, respectivamente.

Como os arquivos IONEX gerados para os 61 dias possuem valores de VTEC para todo o globo, foi necessário selecionar apenas os valores da região de abrangência das estações utilizadas no processamento (de 5° a -35° em latitude e de -75° a -35° em longitude), para isso foi utilizado um script na linguagem C++. Posteriormente, já com os valores de VTEC para a região de interesse, os mesmos foram plotados por meio da ferramenta Matlab.

4.1.2 Geração dos MIBBs utilizando a fase

A geração dos MIBBs utilizando a observável fase é igual a pseudodistância até o módulo ORBGEN, após o mesmo processa-se os módulos SNGDIF, MAUPRP e GPSEST, nessa sequência, como mostra a Figura 20.

Figura 20-Sequência de processamentos utilizando a fase



De maneira análoga a pseudodistância, foi necessário inserir alguns dados de entrada, bem como setar alguns parâmetros para cada módulo. No Quadro 3 são apresentados os dados de entrada e de saída de cada módulo, sendo que os módulos em comum com o processamento da pseudodistância não são apresentados, já que são iguais, exceto o módulo GPSEST, no qual foi utilizado modo dupla diferença, como recomendado no manual do Bernese.

Quadro 3- Arquivos de entrada e saída de cada módulo utilizando a fase
(continua)

Módulo	Arquivos de entrada	Arquivos de saída
SNGDIF	????\$S+0.PZH CONST. SATELLIT.I14	????\$S+0.PSH ????\$S+0.PSO

Quadro 4- Arquivos de entrada e saída de cada módulo utilizando a fase
(conclusão)

Módulo	Arquivos de entrada	Arquivos de saída
SNGDIF	DATUM_ ABREV.ABB sir14P\$W+0.crd	
MAUPRP	????\$S+0.PSH sir14P\$W+0.crd COD\$YD+0.STD COD\$YD+0.ERP CONST. DATUM_ IERS2010XY.SUB IAU2000R06.NUT SATELLIT.I14 SAT_\$Y+0.CRX STA\$S+0.STA PCV_COD.I14	CRD\$YD+0.crd
GPSEST	????\$S+0.PSH CRD\$YD+0.crd COD\$YD+0.STD COD\$YD+0.ERP P1P21410.DCB FES2004.BLQ s1s2\$S+0.ATL CONST. DATUM_ PCV_COD.I14 RECEIVER. SATELLIT.I14 SAT_\$Y+0.CRX IERS2010XY.SUB IAU2000R06.NUT SINEX. IONEX. GPSUTC.	ION\$YD+0.ION ION\$YD+0.INX

Após finalizar os módulos, assim como no processamento utilizando a pseudodistância, foi selecionada a área de abrangência das estações e posteriormente plotou-se os valores de VTEC na ferramenta Matlab. Vale destacar que ao utilizar a fase, só foi possível gerar mapas ionosféricos para 12 dos 61 dias, sendo que mais detalhes serão descritos na seção 5.6.

4.2 Validação dos resultados

Uma etapa muito importante da pesquisa é a validação dos MIBBs. Nessa seção são descritas as formas pelas quais os mapas foram validados.

4.2.1 Comparação entre os mapas ionosféricos

A partir dos valores de VTEC dos MIBBs obtidos utilizando a pseudodistância, foi possível comparar com os valores de VTEC dos disponibilizados pelo CODE, lembrando que esse centro também utiliza o software Bernese na geração dos mapas ionosféricos. Vale destacar que para calcular a diferença média diária, considerou-se o valor em módulo, além disso foi feito um script no Matlab.

Após obter as diferenças (VTEC do MIBB menos VTEC do CODE), fez-se uma média diária para os 61 dias de processamentos, e a partir disso foi possível selecionar o dia que apresentou a maior e a menor diferença, para os dois meses. Depois da seleção desses dias, aplicou-se os MIBBs e os mapas do CODE no posicionamento por ponto, por meio do software RTKLIB.

Em relação a fase como observável, foi possível gerar mapas ionosféricos para apenas 12 dos 61 dias que foram propostos inicialmente.

Assim como nos MIBBs gerados a partir da pseudodistância, os MIBBs obtidos utilizando a fase foram comparados com os mapas disponibilizados pelo CODE. Vale lembrar que o CODE utiliza a pseudodistância como observável na geração dos GIMs.

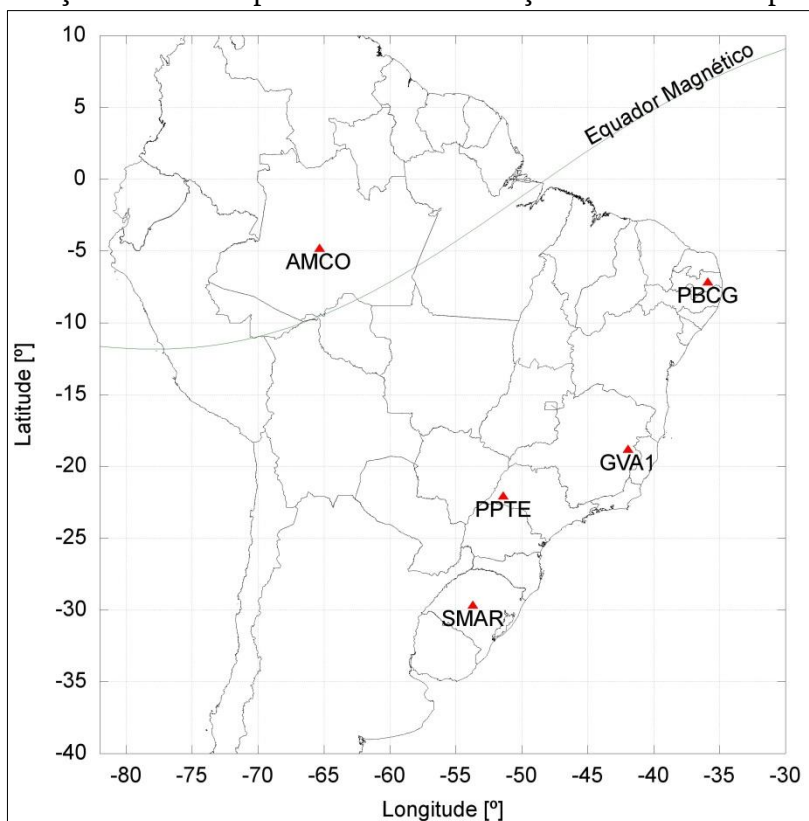
Após calcular as diferenças (VTEC obtido pelo Bernese menos VTEC do CODE), fez-se uma média diária para os 12 dias de processamento, e assim foi possível selecionar o dia que apresentou a maior e a menor diferença, nos dois meses. Da mesma maneira, foi feita a comparação dos MIBBs a partir da observável fase menos os gerados a partir da pseudodistância.

4.2.1.1 Validação no posicionamento

O RTKLIB é um pacote de programas de código aberto para posicionamento GNSS, no qual é possível realizar diversos tipos de posicionamento, tanto para tempo real como para pós-processamento (TAKASU, 2013). Além disso, o mesmo suporta mapas ionosféricos no formato IONEX.

Para realizar a validação por meio do RTKLIB, foram utilizadas as estações: SMAR, PPTE, GVA1, AMCO e PBCG, as quais não foram utilizadas na geração dos MIBBs e estão distribuídas no Brasil (Figura 21).

Figura 21- Estações utilizadas para realizar a validação dos MIBBs no posicionamento



Para realizar o posicionamento foi utilizado o modo posicionamento simples, além disso, foi necessário inserir como dados de entrada o arquivo de observação, as efemérides transmitidas e o IONEX de interesse, além de selecionar como correção da troposfera o modelo de Saastamoinen e utilizar uma máscara de elevação de 15° . Como saída, o programa gera um arquivo .pos, o qual apresenta as coordenadas da estação a cada 15 segundos, além da discrepância nas coordenadas locais (sdn, sde e sdu).

Os processamentos foram divididos em duas formas:

- Na primeira utilizou-se dados dos 4 dias selecionados na seção 4.2.1 (quando aplicou-se a pseudodistância como observável), para as 5 estações, utilizando o MIBB e posteriormente os IONEX do CODE, e assim foi obtido como resultado o erro nas componentes das coordenadas estimadas de cada estação.
- Na segunda foram usados dados dos 4 dias selecionados na seção 4.1.2 (quando aplicou-se a fase como observável), para as 5 estações, utilizando o MIBB e posteriormente os IONEX do CODE, obtendo dessa maneira o erro nas componentes das coordenadas estimadas de cada estação.

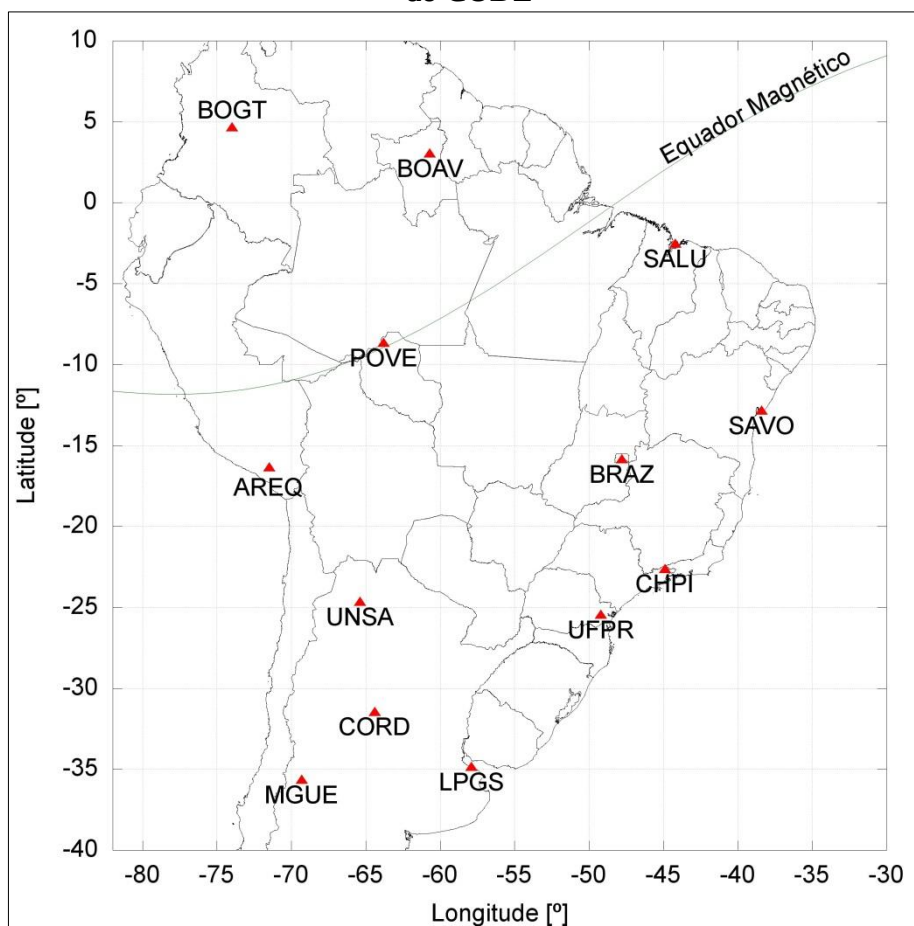
Posteriormente as coordenadas das estações foram atualizadas para a época 2014,46, dessa maneira foi possível calcular a discrepância das coordenadas ao longo do dia quando

aplicado o MIBB obtido com a pseudodistância e com a fase, e também quando utilizado o mapa do CODE. Após calcular as discrepâncias das coordenadas foram obtidas também as diferenças entre as mesmas, da seguinte forma: discrepâncias do MIBB menos discrepâncias do CODE. Além disso, foi calculada também a diferença entre os desvios padrão do MIBB e do CODE, nessa sequência.

4.2.1.2 Comparação dos valores de DCBs dos receptores

A partir das estações pertencentes a rede IGS, que foram utilizadas na geração dos mapas ionosféricos, como mostra a Figura 22, foi possível comparar os valores de DCBs dos MIBBs obtidos a partir da pseudodistância e os mapas disponibilizados pelo CODE. As diferenças dos valores de DCBs foram calculadas para os 4 dias selecionados anteriormente (4.2.1). Vale destacar, que foram utilizadas somente estações que possuíam dados em todos os quatro dias analisados.

Figura 22- Estações utilizadas para comparar os valores de DCBs obtidos com o Bernese com os do CODE

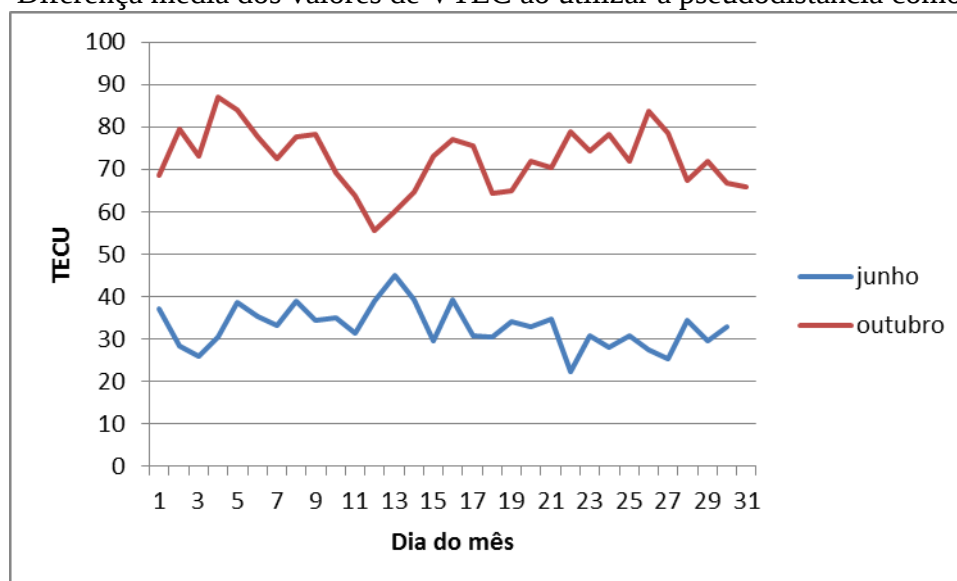


5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 MIBBs obtidos utilizando a observável pseudodistância

Ao utilizar como observável a pseudodistância, foi possível gerar MIBBs para os 61 dias propostos. A partir disso, foi calculada a diferença entre os valores de VTEC dos MIBBs e os mapas disponibilizados pelo CODE, dessa forma obteve-se uma média diária, como mostra a Figura 23.

Figura 23- Diferença média dos valores de VTEC ao utilizar a pseudodistância como observável



Ao observar a Figura 23 nota-se que no mês de junho o dia 13 (DOY 164) e o dia 22 (DOY 173) foram os que apresentaram o maior e menor valor de diferença de VTEC, respectivamente. Enquanto que no mês de outubro os dias 4 (DOY 277) e 12 (DOY 285) tiveram a maior e menor diferença, respectivamente. Além disso, como esperado, durante todo o mês de outubro a diferença média nos valores de VTEC foram maiores do que no mês de junho. Assim, será apresentado somente o resultado dos dias 164, 173, 277 e 285.

A Figura 24 e a

Figura 25 apresentam os valores de VTEC dos MIBBs para os dias 164 e 173 do mês de junho, respectivamente. Vale ressaltar que o tempo utilizado em todas as análises é o UTC (*Universal Time Coordinate*).

Figura 24- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 164/2014

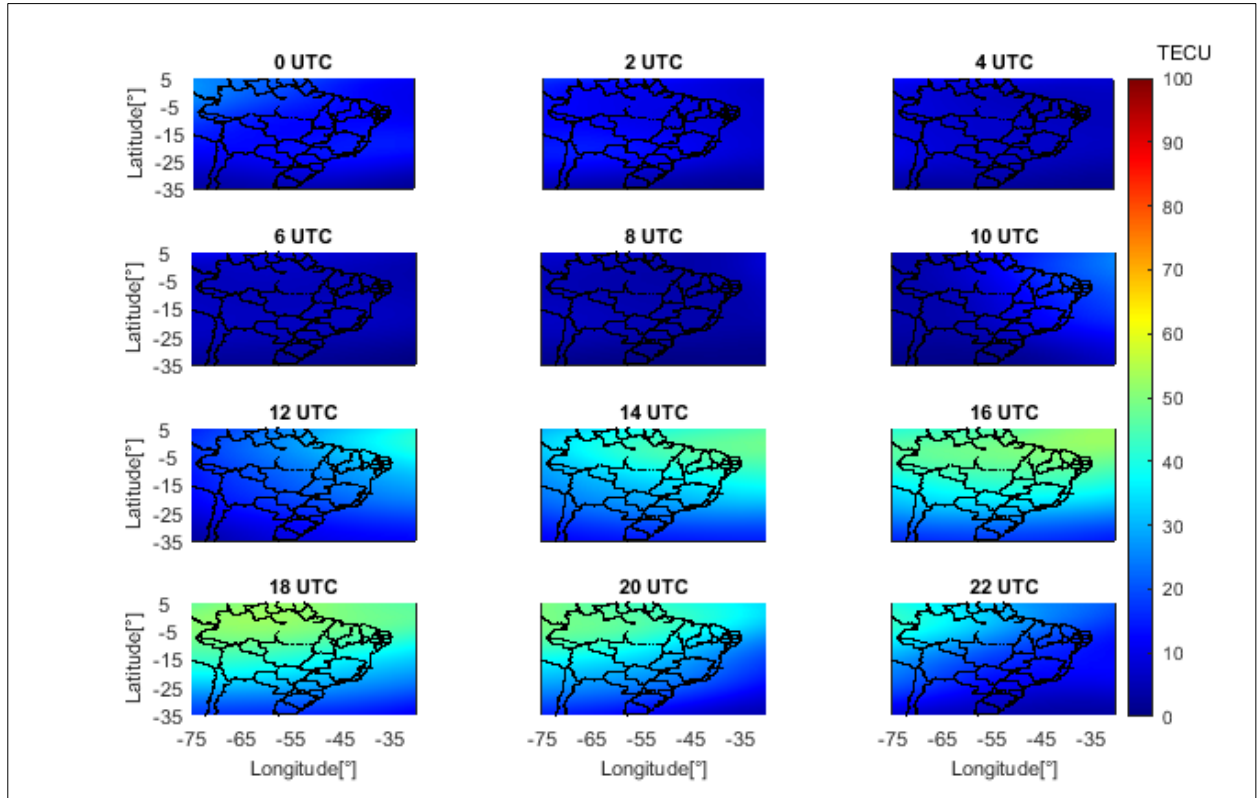
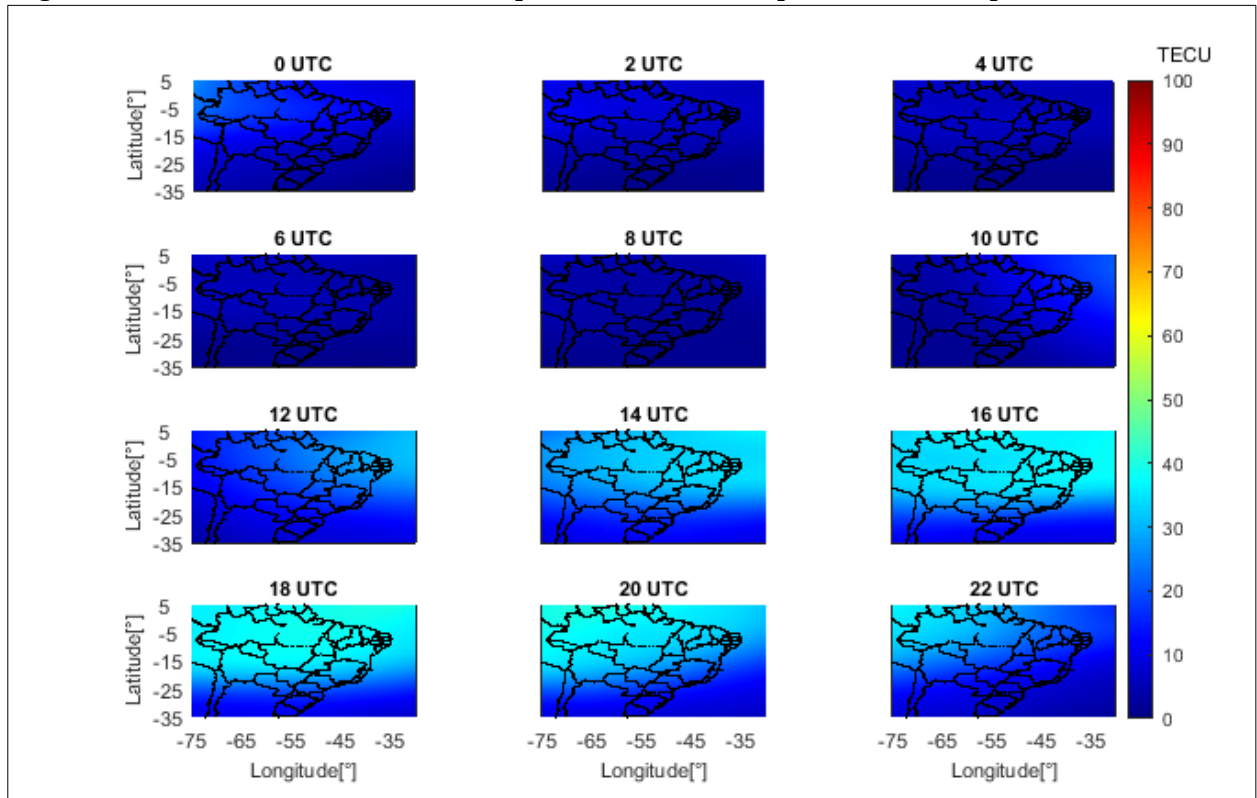


Figura 25- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 173/2014



Ao realizar uma análise comparativa entre as figuras 24 e 25, é possível notar que a Figura 24 apresenta maiores valores de VTEC entre as 14 e 20 UTC. Além disso, durante as 0 e 12 UTC, foi possível observar que em ambos os dias a atividade ionosférica foi muito baixa. Já a Figura 26 e a Figura 27 apresentam os valores de VTEC para os dias 277 e 285 do mês de outubro de 2014, obtidos por meio dos MIBBs.

Figura 26- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 277/2014

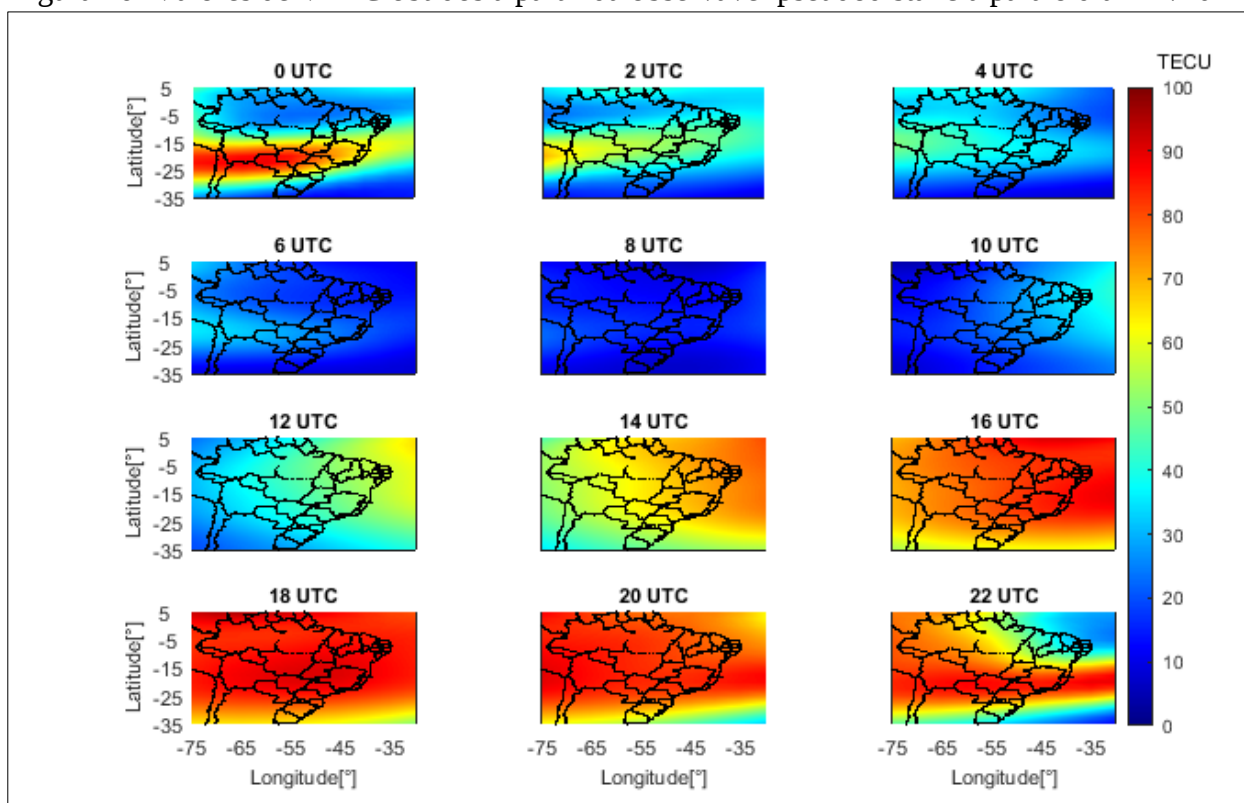
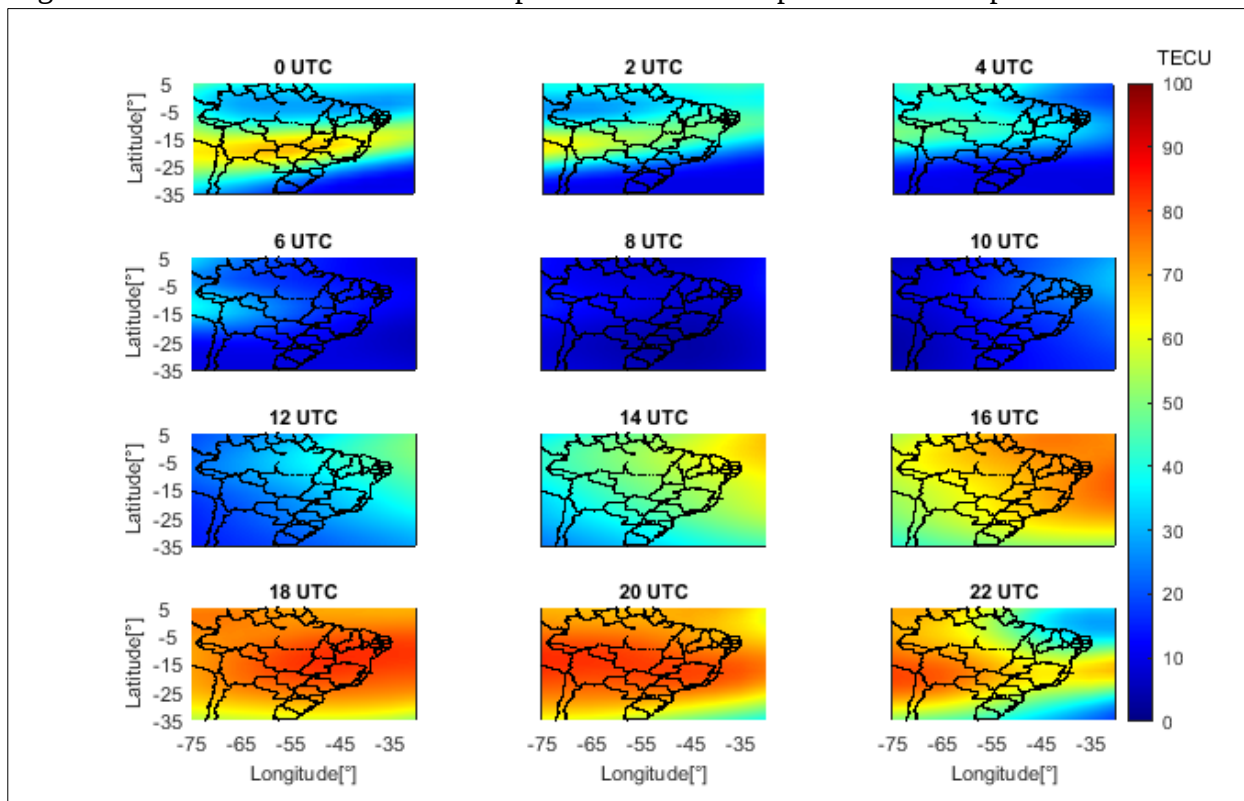


Figura 27- Valores de VTEC obtidos a partir da observável pseudodistância para o dia 285/2014



A partir da Figura 26 e da Figura 27 foi possível observar a anomalia equatorial se deslocando de Leste para Oeste, sendo que a mesma se inicia sobre o território brasileiro por volta das 14 UTC, visto que às 18 UTC é quando ocorrem os maiores valores de VTEC. Como esperado, constatou-se também que a densidade de elétrons no dia 277/2014 foi maior que no dia 285/2014.

Por fim, a partir da Figura 24,

Figura 25, Figura 26 e Figura 27 foi possível observar que, como esperado, no mês de junho a atividade ionosférica foi baixa, enquanto que no mês de outubro houve alta atividade.

5.2 Mapas ionosféricos disponibilizados pelo CODE

Assim como o Bernese, o CODE gera mapas ionosféricos com uma resolução temporal de 2 horas. Dessa maneira, os valores de VTEC para a região brasileira para os dias 164, 173, 277 e 285 do ano de 2014 são apresentados nas figuras 28, 29, 30 e 31, respectivamente.

Figura 28- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 164 do ano de 2014

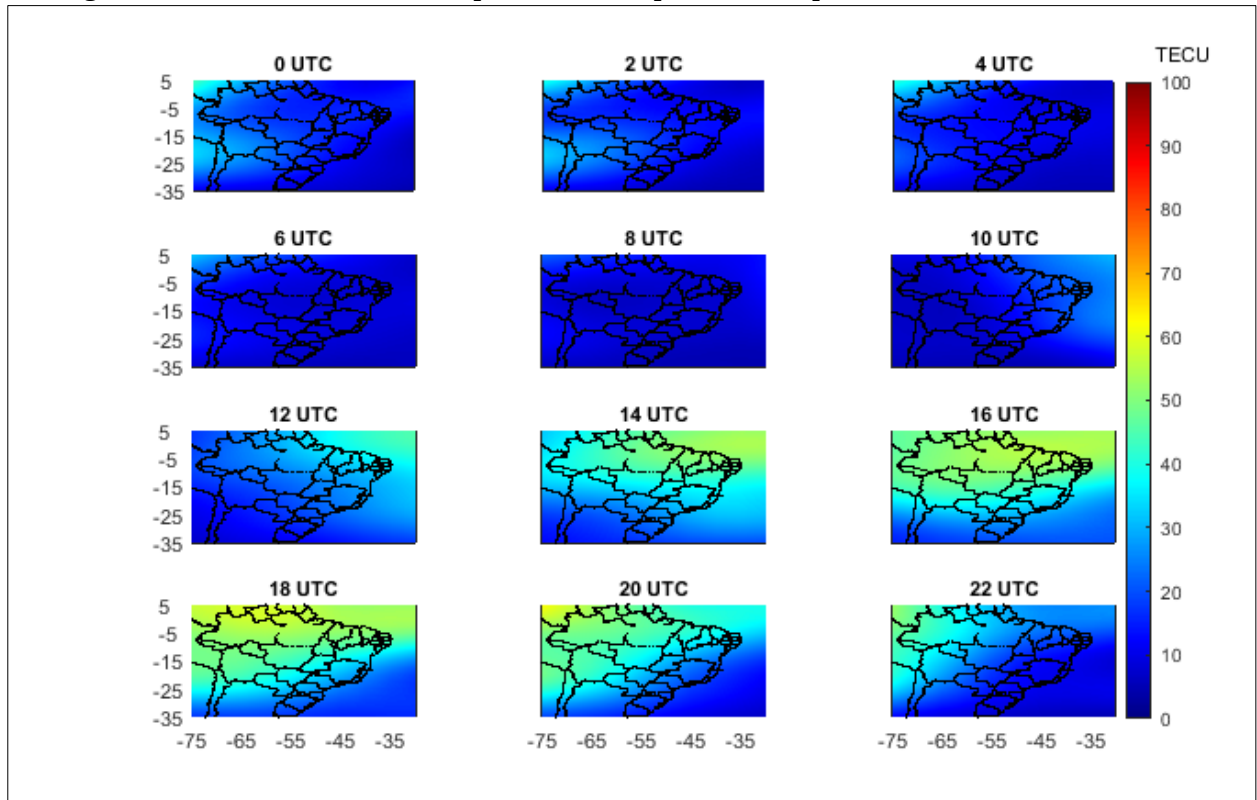


Figura 29- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 173 do ano de 2014

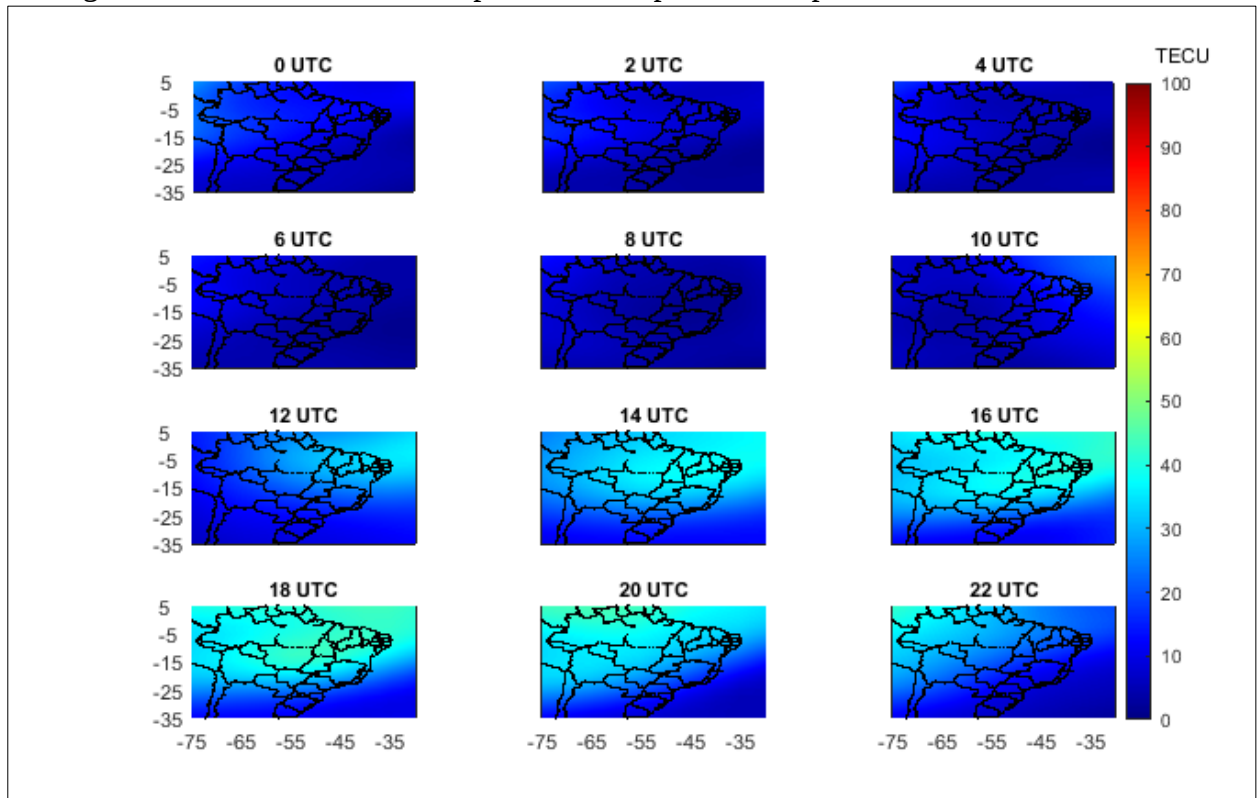


Figura 30- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 277 do ano de 2014

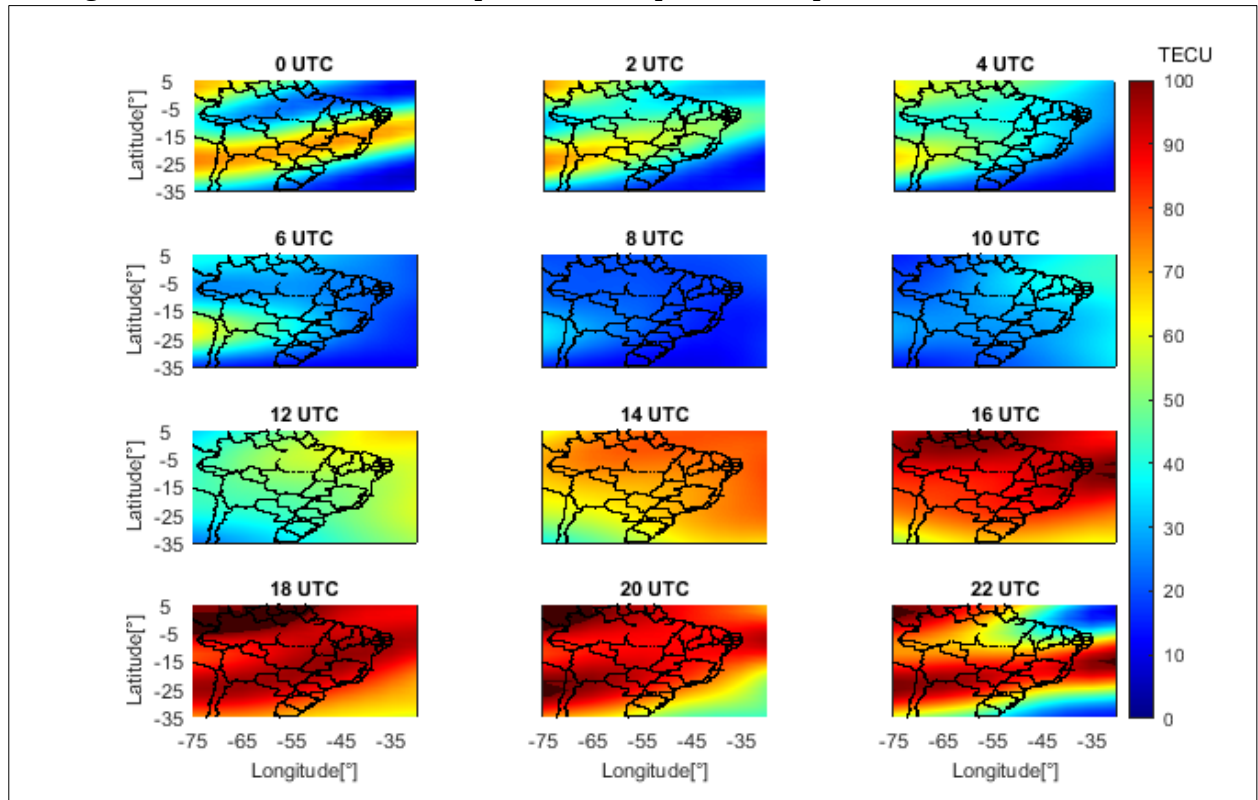
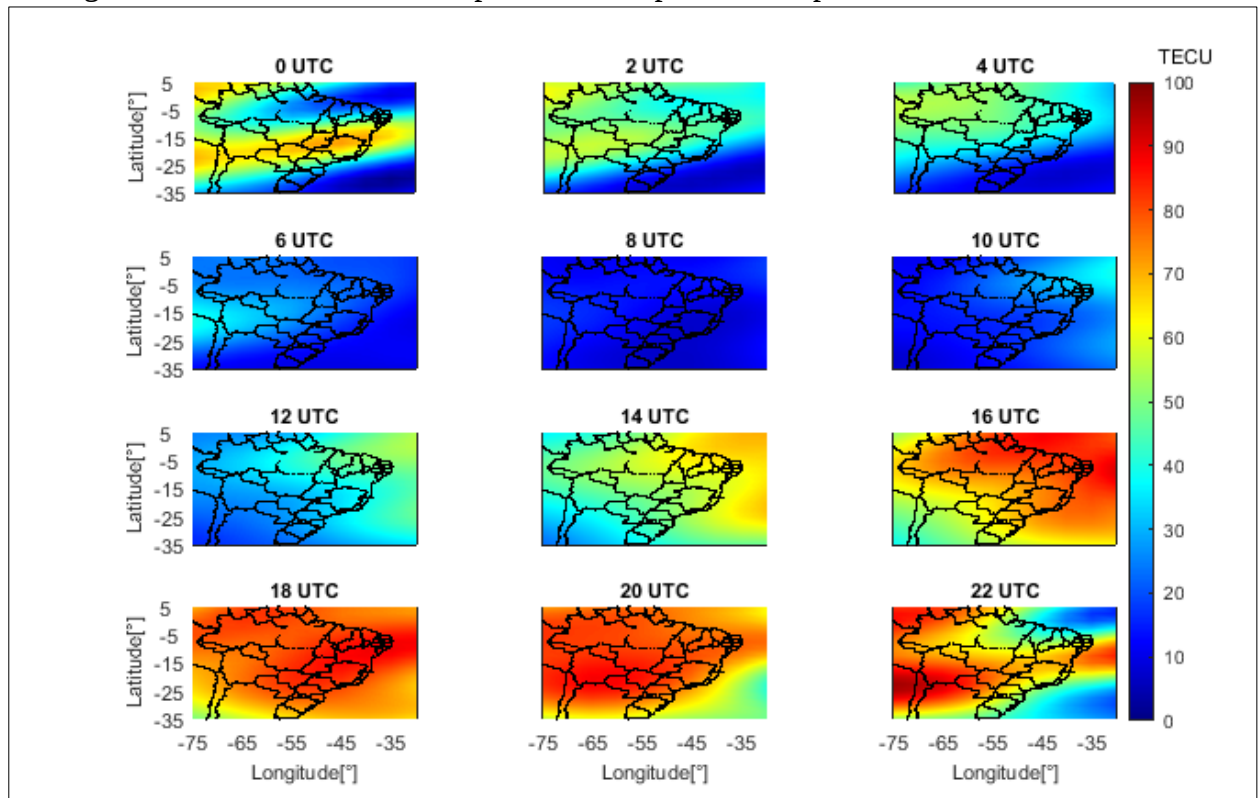


Figura 31- Valores de VTEC disponibilizados pelo CODE para o dia 285 do ano de 2014



De maneira análoga as figuras apresentadas na seção 5.1, os dias 164 e 173 mostram uma baixa atividade ionosférica no mês de junho, enquanto que nos dias do mês de outubro (277 e 285) há maior atividade ionosférica.

Ao observar a Figura 30 e a Figura 31 é possível notar o efeito fonte as 0 e 22 UTC sobre o território do Brasil, período esse que normalmente ocorre o segundo pico máximo. Além disso, ao realizar uma análise comparativa entre essas figuras é possível constatar que no dia 277/2014 a atividade ionosférica foi maior do que no dia 285, como esperado, já que de acordo com a Figura 16 os valores de TEC no dia 277/2014 são maiores do que no dia 285/2014.

5.3 Comparação entre os MIBBs obtidos a partir da pseudodistância e os mapas do CODE

Na geração dos IONEXs, o CODE utiliza como software o Bernese, além de possuir a mesma resolução temporal e espacial que os MIBBs. Dessa forma, comparou-se os valores de VTEC obtidos pelo MIBB com os disponibilizados pelo CODE. Vale lembrar que foi feito MIBB menos CODE.

As Figuras 32, 33, 34 e 35 apresentam as diferenças nos valores de VTEC obtidos por meio dessa pesquisa em relação aos gerados pelo CODE, para os dias 164, 173, 277 e 285 de 2014, respectivamente.

Figura 32- Diferença nos valores de VTEC para o dia 164/2014

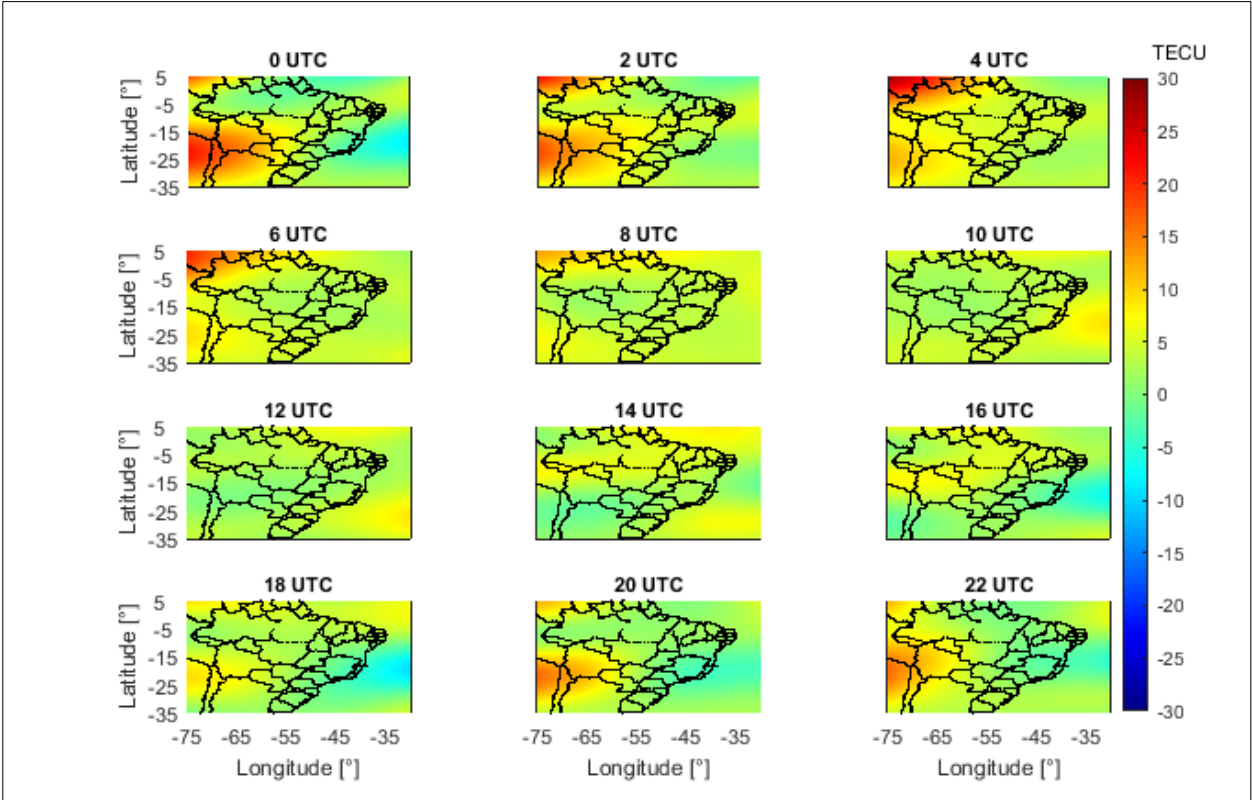


Figura 33- Diferença nos valores de VTEC para o dia 173/2014

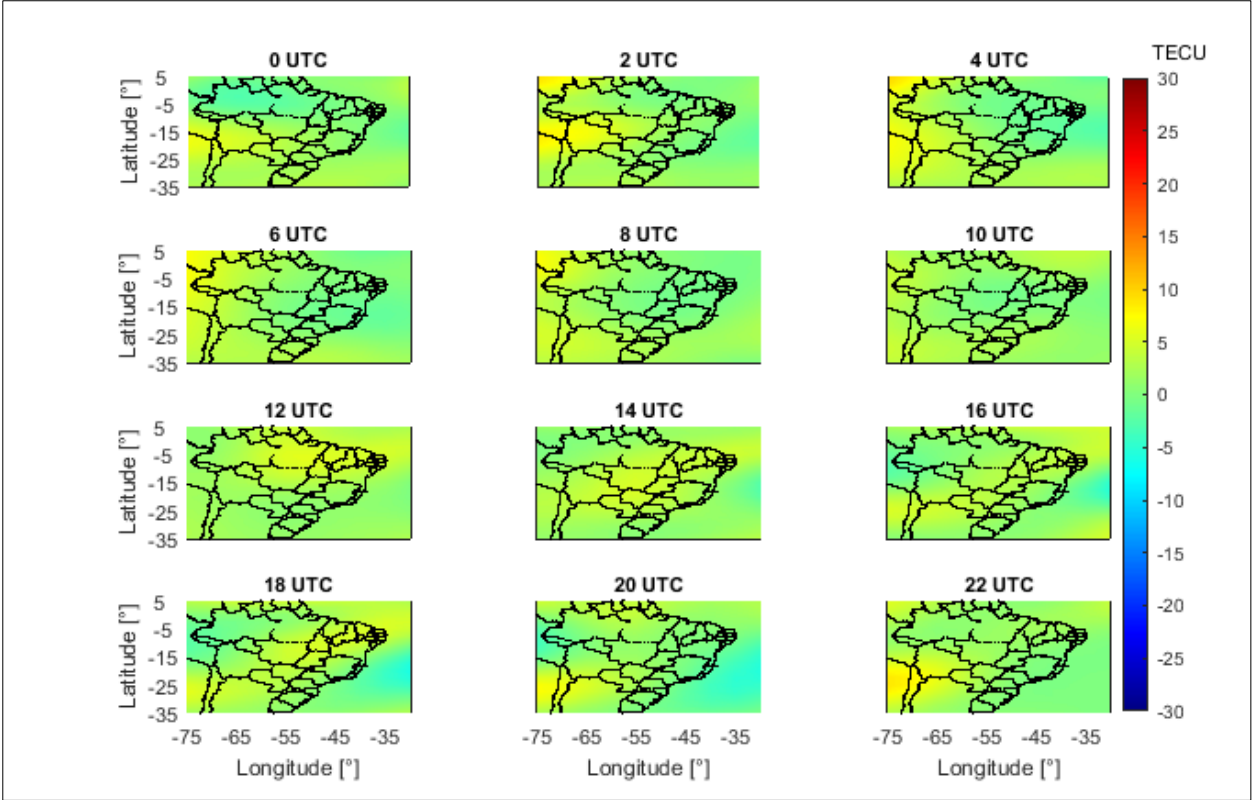


Figura 34- Diferença nos valores de VTEC para o dia 277/2014

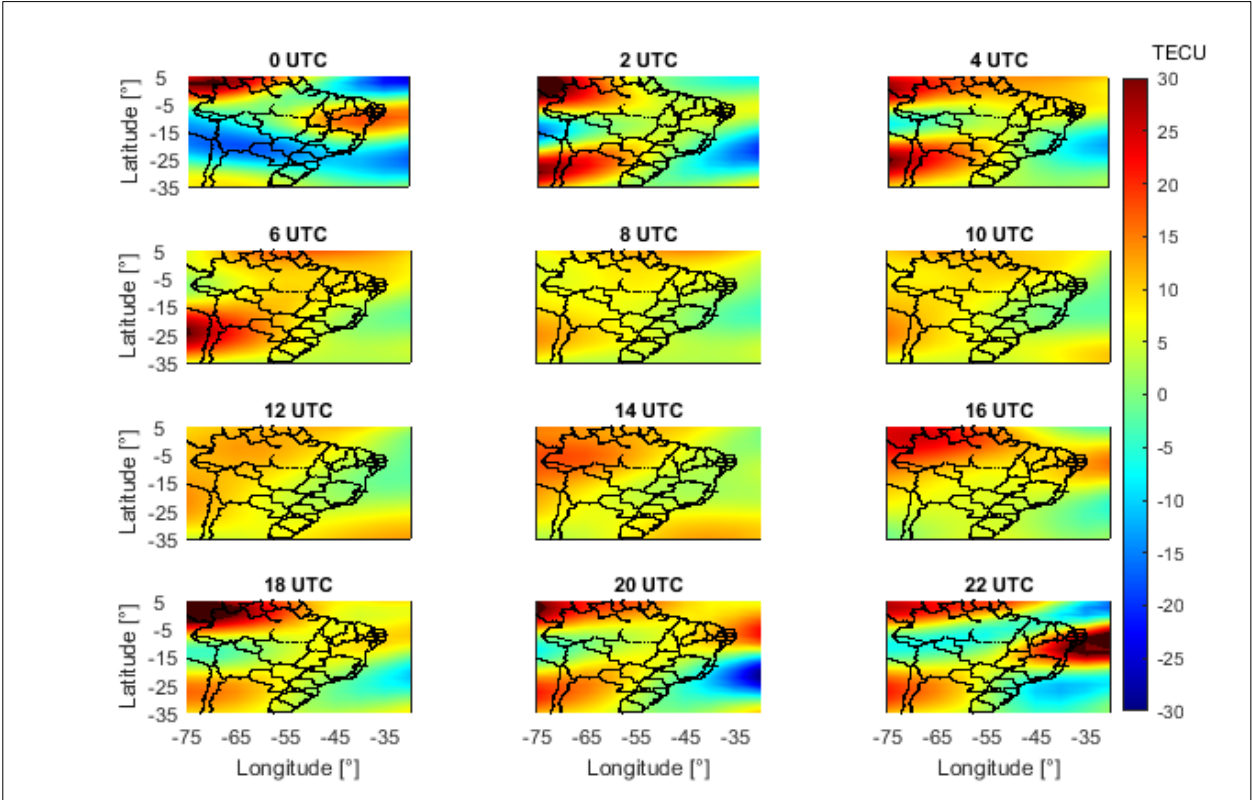
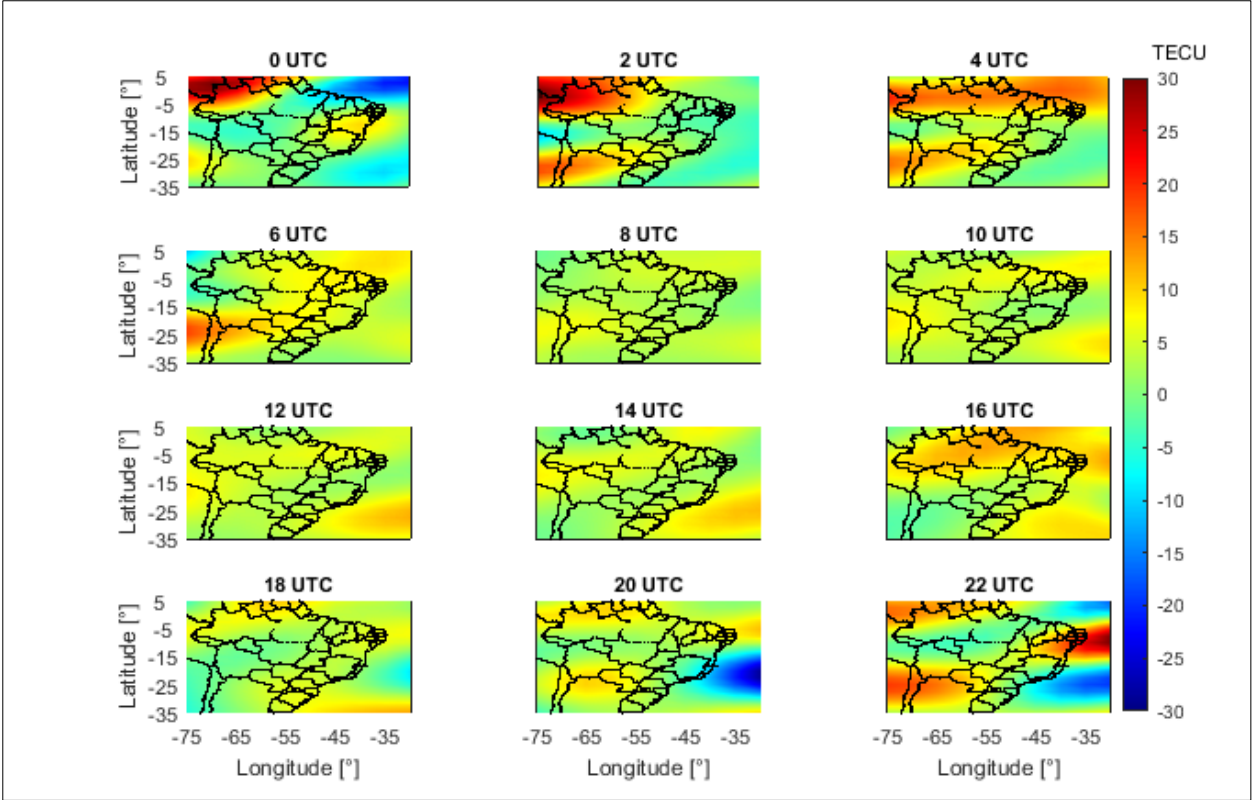


Figura 35- Diferença nos valores de VTEC para o dia 285/2014



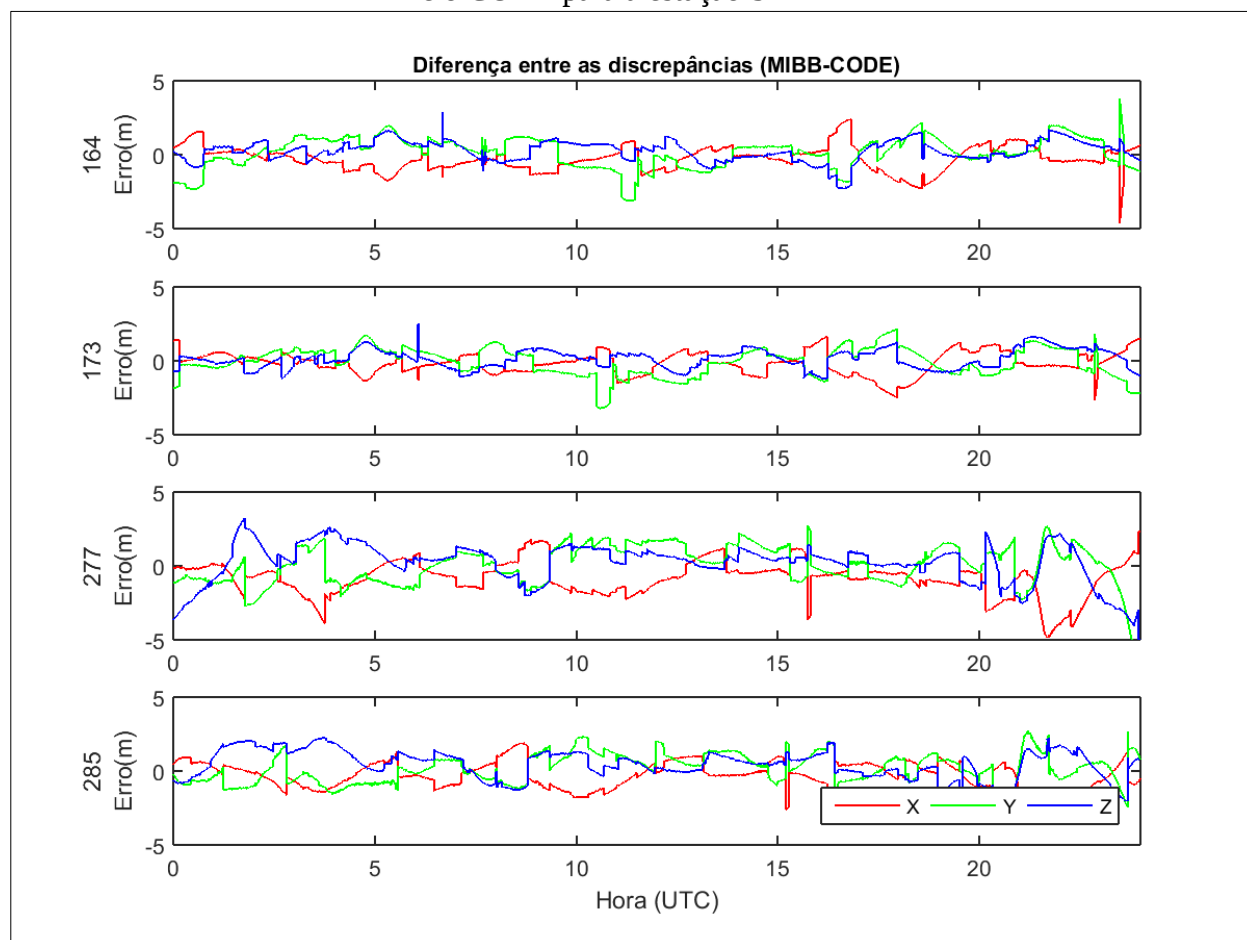
A partir das Figuras 32, 33, 34 e 35 é possível notar que os dias com maior atividade ionosférica (277 e 285) são os que apresentam as maiores diferenças nos valores de VTEC, além disso as maiores diferenças são na região da anomalia equatorial. A diferença média diária nos valores de VTEC nos dias 164, 173, 277 e 285 é de aproximadamente 4 TECU, 2 TECU, 8 TECU e 6 TECU, respectivamente. Foi possível observar também que há muitos valores negativos, o que indica que os valores disponibilizados pelo CODE são maiores do que os gerados pelo Bernese nessa pesquisa.

5.4 Aplicação dos MIBBs gerados a partir da observável pseudodistância no posicionamento por ponto

A aplicação de mapas ionosféricos no posicionamento é de suma importância, pois os mesmos minimizam erros relacionados a ionosfera e consequentemente é possível ter um posicionamento com maior acurácia. Dessa maneira, os IONEX do CODE e os MIBBs foram aplicados no posicionamento por ponto no modo pós processado, por meio do software RTKLIB, como apresentado na seção 4.2.1.1. Posteriormente, foi calculada das discrepâncias das coordenadas ao longo do dia, utilizando como valor verdadeiro as coordenadas das estações atualizadas para a época 2014,46. Em seguida, calculou-se a diferença das discrepâncias para as três componentes (X, Y, Z), sendo que para obter os valores de diferenças foi feito MIBB menos CODE. Foi possível calcular também as diferenças entre os desvios padrão das coordenadas do MIBB e os do CODE, nessa sequência.

A Figura 36 apresenta as diferenças entre as discrepâncias das coordenadas ao longo dos dias 164, 173, 277 e 285 na estação SMAR, a qual está localizada na região Sul do país.

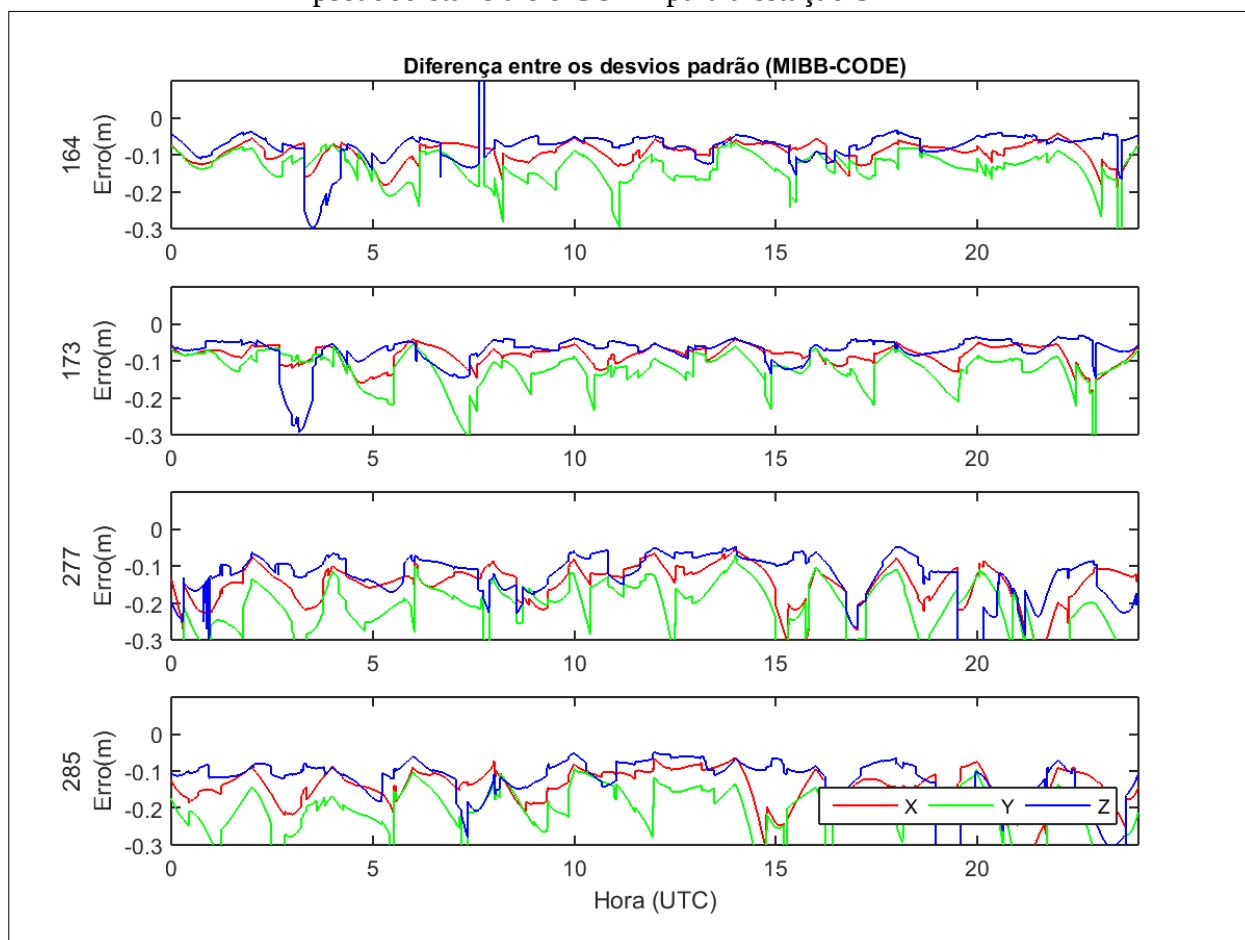
Figura 36- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação SMAR



A partir das diferenças entre as discrepâncias apresentadas na Figura 36, nota-se que hora o MIBB tem maior discrepância, hora o CODE, já que a diferença está variando entre valores positivos e negativos. Notou-se também que as maiores diferenças estão localizadas principalmente após as 20 UTC dos dias analisados. Observa-se ainda que o dia 277/2014 e 285/2014 apresentam as maiores amplitudes de diferenças, isso pode estar relacionado ao fato desses dias pertencerem ao mês de outubro, no qual há uma maior atividade ionosférica.

A Figura 37 apresenta a diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e com o CODE para a estação SMAR ao longo dos dias 164, 173, 277 e 285 do ano de 2014.

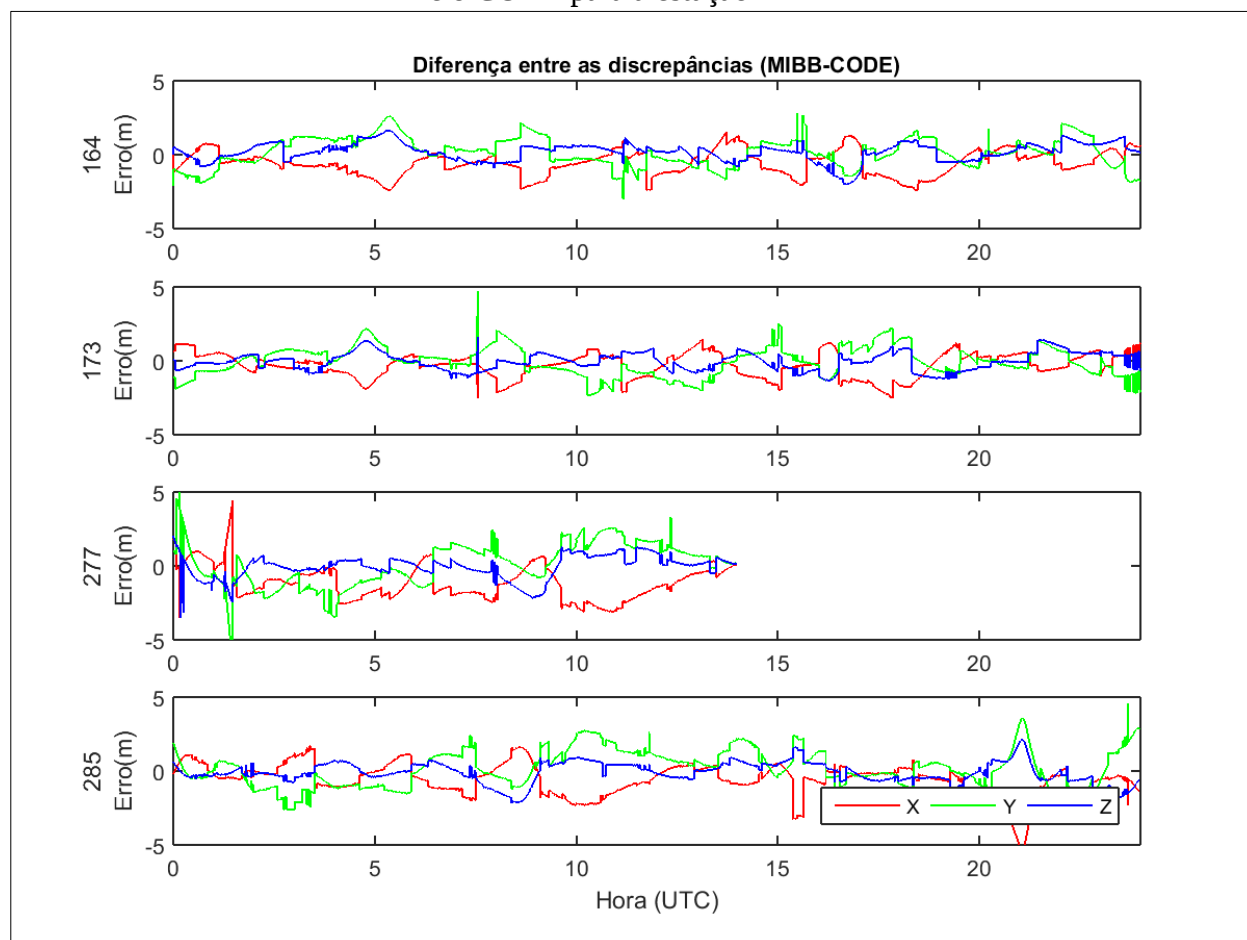
Figura 37- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação SMAR



Ao realizar uma análise na Figura 37 observa-se que os desvios padrão obtidos ao aplicar o MIBB são menores do que quando se aplica os do CODE, já que nos 4 dias estudados as diferenças são todas negativas nas três componentes (X, Y, Z), exceto no dia 164 na componente Z entre as 5 e 10 UTC.

A Figura 38 exibe as diferenças de discrepâncias nas coordenadas X, Y e Z para a estação PPTE, ao utilizar o mapa ionosférico MIBB e o do CODE.

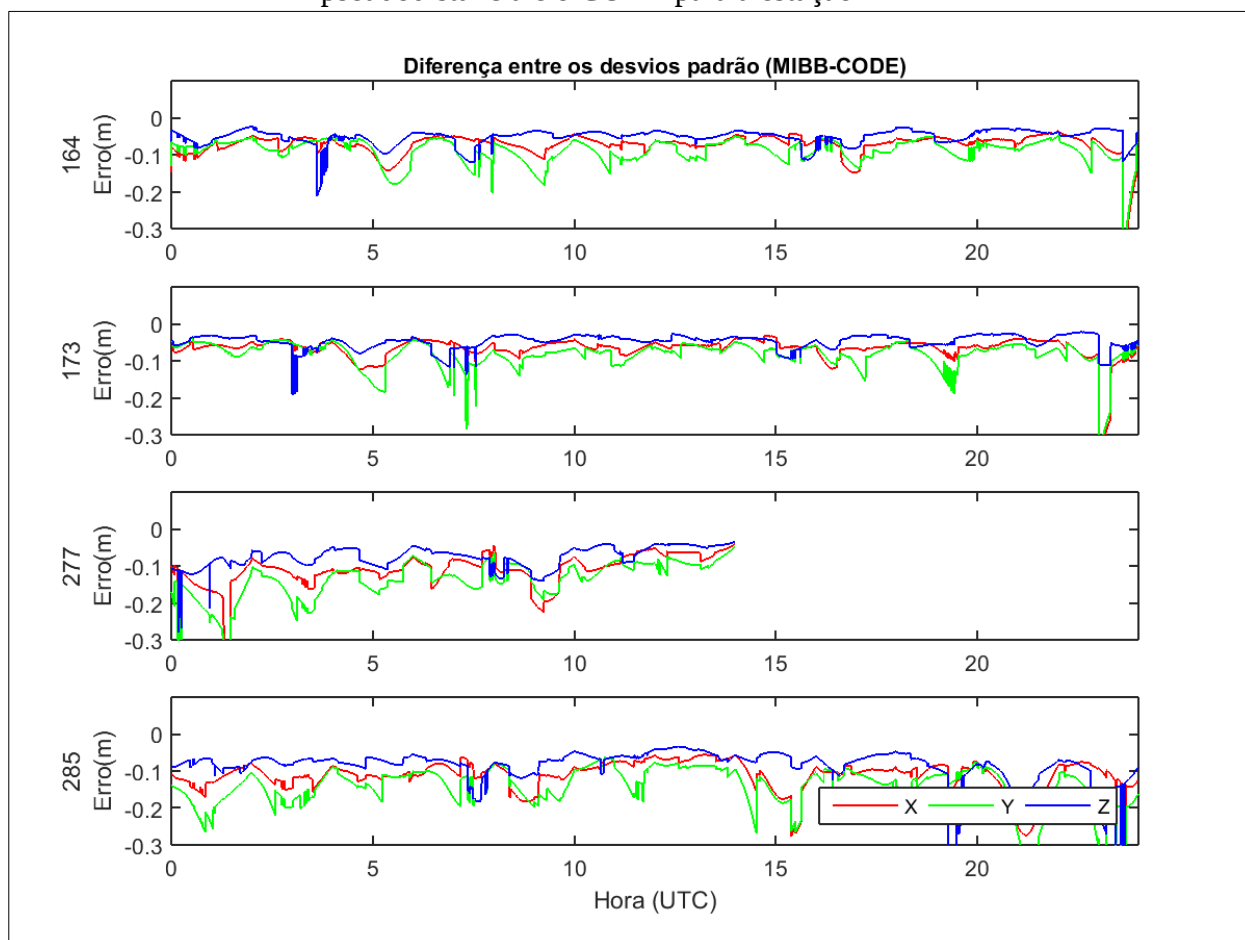
Figura 38- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação PPTE



A partir da Figura 38 observa-se que no dia 277/2014 há uma falta de informação a partir das 14 horas, isso pode estar relacionado a algum problema da ferramenta ao ler os arquivos. É possível constatar também que não há uma diferença significativa na amplitude das diferenças de discrepâncias entre os dias de baixa e de alta atividade ionosférica.

A Figura 39 exibe a diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e com o CODE para a estação PPTE.

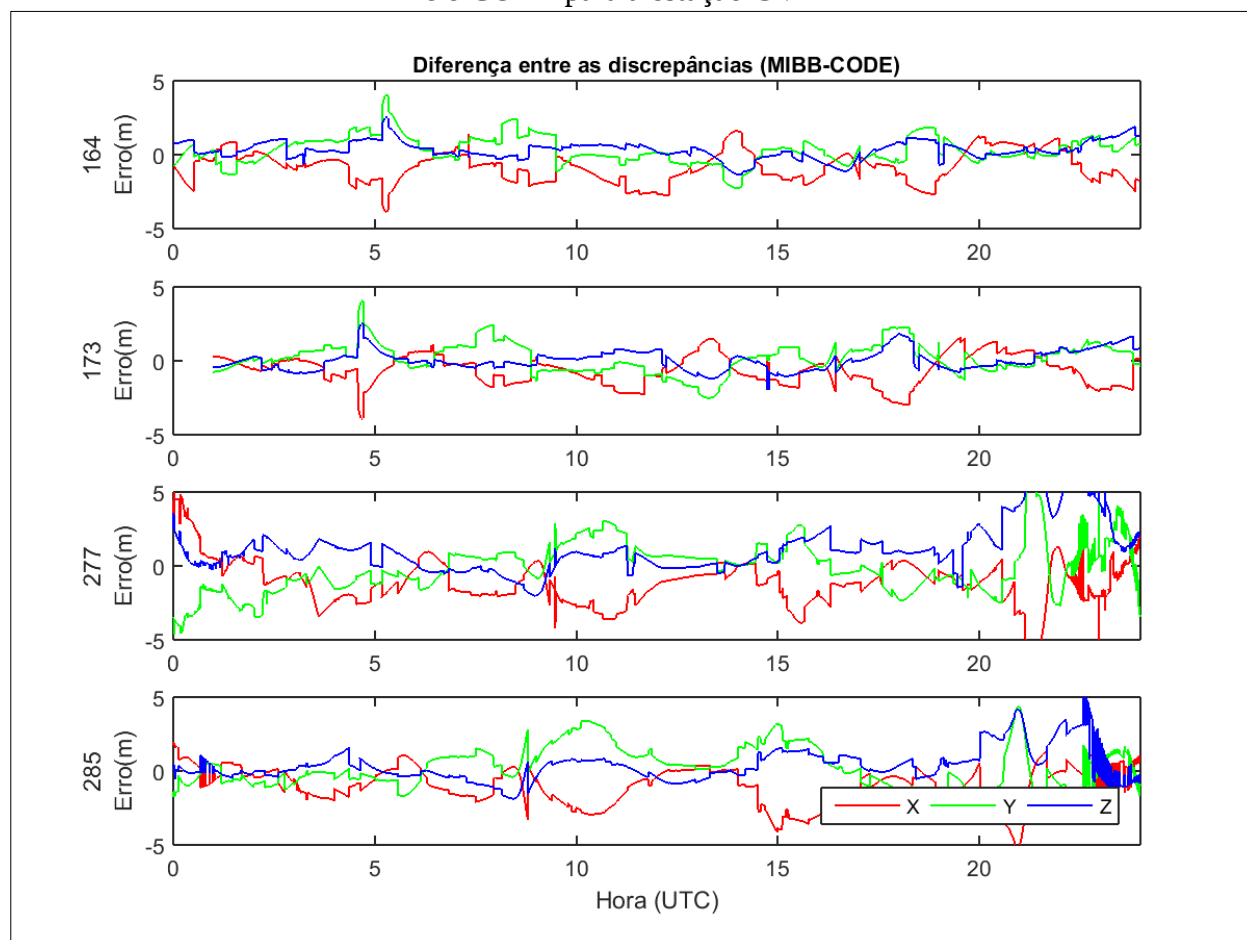
Figura 39- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação PPTE



Por meio da Figura 39 é possível observar que em todos os dias analisados, nas três componentes, os desvios padrão obtidos ao aplicar o MIBB apresentaram menores valores, quando comparados aos desvios padrão obtidos com o CODE. Além disso, a componente Y é a que apresenta as maiores diferenças de desvios padrão.

A seguir, a Figura 40 mostra as diferenças de discrepâncias nas coordenadas para a estação GVA1, a qual está localizada na região Centro-Oeste do Brasil.

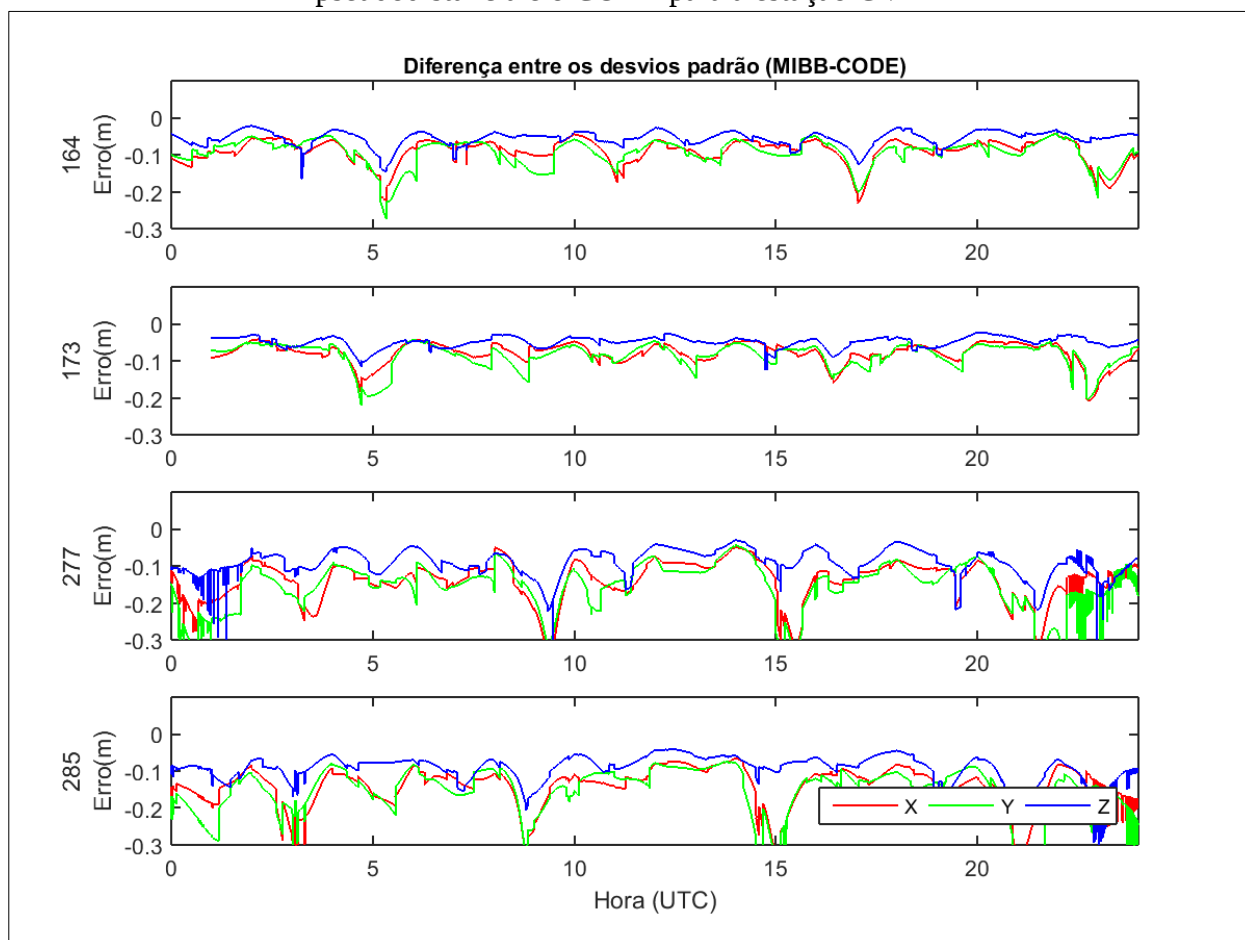
Figura 40- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação GVA1



Nos dias 277/2014 e 285/2014 é possível identificar que as maiores diferenças de discrepâncias são logo após as 20 UTC. Observa-se também que as amplitudes das diferenças de discrepâncias são menores nos dias de baixa atividade ionosférica (164/2014 e 173/2014) quando comparadas com as amplitudes dos dias de alta (277/2014 e 285/2014).

A Figura 41 mostra as diferenças entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e com o CODE para a estação GVA1, a qual está localizada na região Centro-Oeste do Brasil.

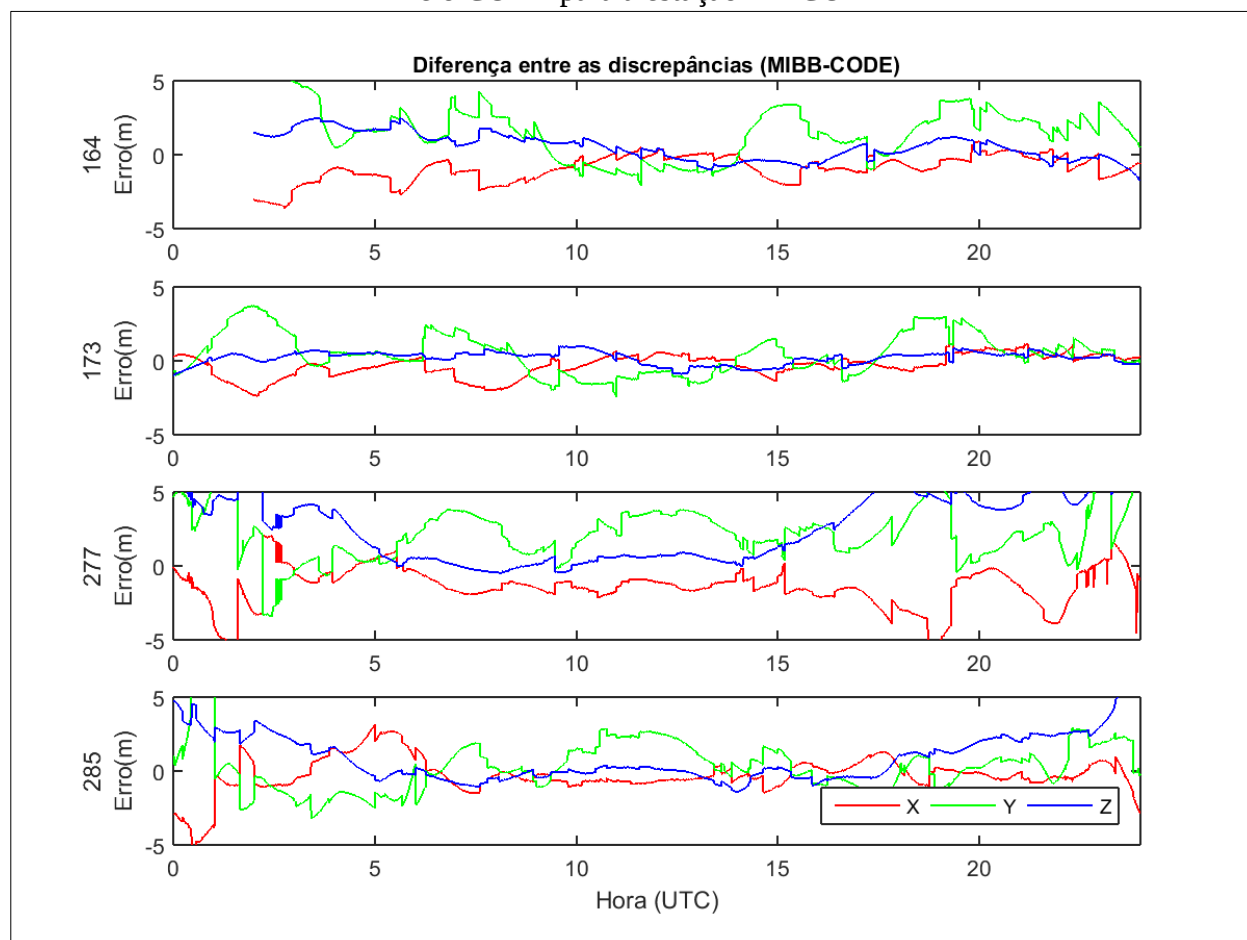
Figura 41- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação GVA1



A partir da Figura 41 observa-se, principalmente nos dias com alta densidade de elétrons, que após às 20 UTC tem-se as maiores diferenças de desvios padrão. E assim como nas estações anteriores, os desvios padrão obtidos com o MIBB são menores do que quando se aplica o CODE, já que todos os valores de diferenças são negativos.

A Figura 42 mostra as diferenças de discrepâncias obtidas ao realizar o posicionamento por ponto utilizando os IONEX do CODE e os MIBBs para a estação AMCO pertencente a região Norte do Brasil.

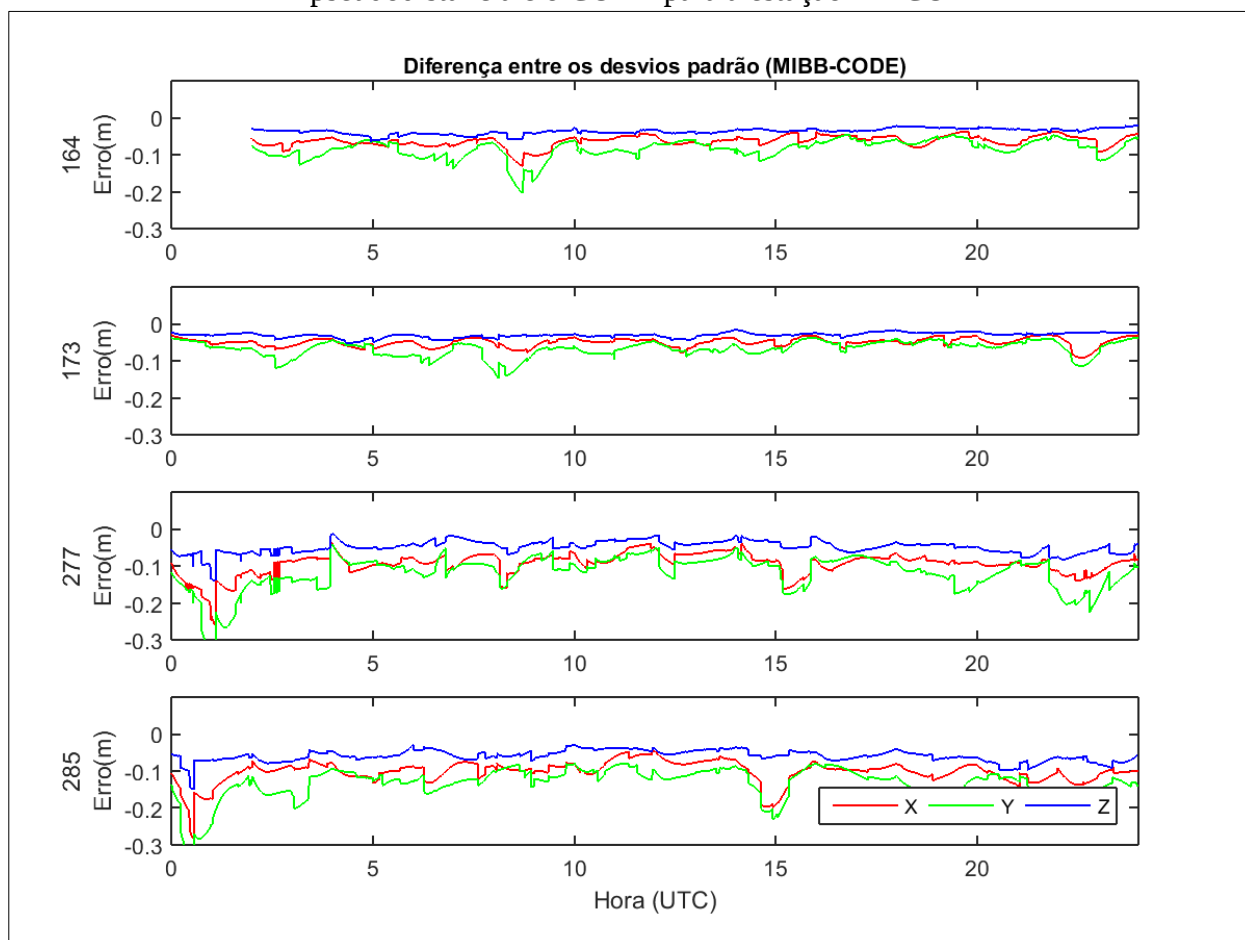
Figura 42- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação AMCO



Nota-se na Figura 42 que o dia 277/2014 foi o que apresentou a maior amplitude, ou seja, dia no qual houve maior diferença entre as discrepâncias das coordenadas. Enquanto que no dia 173/2014 os valores das discrepâncias das coordenadas estavam mais próximos ao aplicar o CODE e o MIBB.

A Figura 43 mostra as diferenças entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e com o CODE para a estação AMCO, ao longo dos dias 164, 173, 277 e 285, todos do ano de 2014.

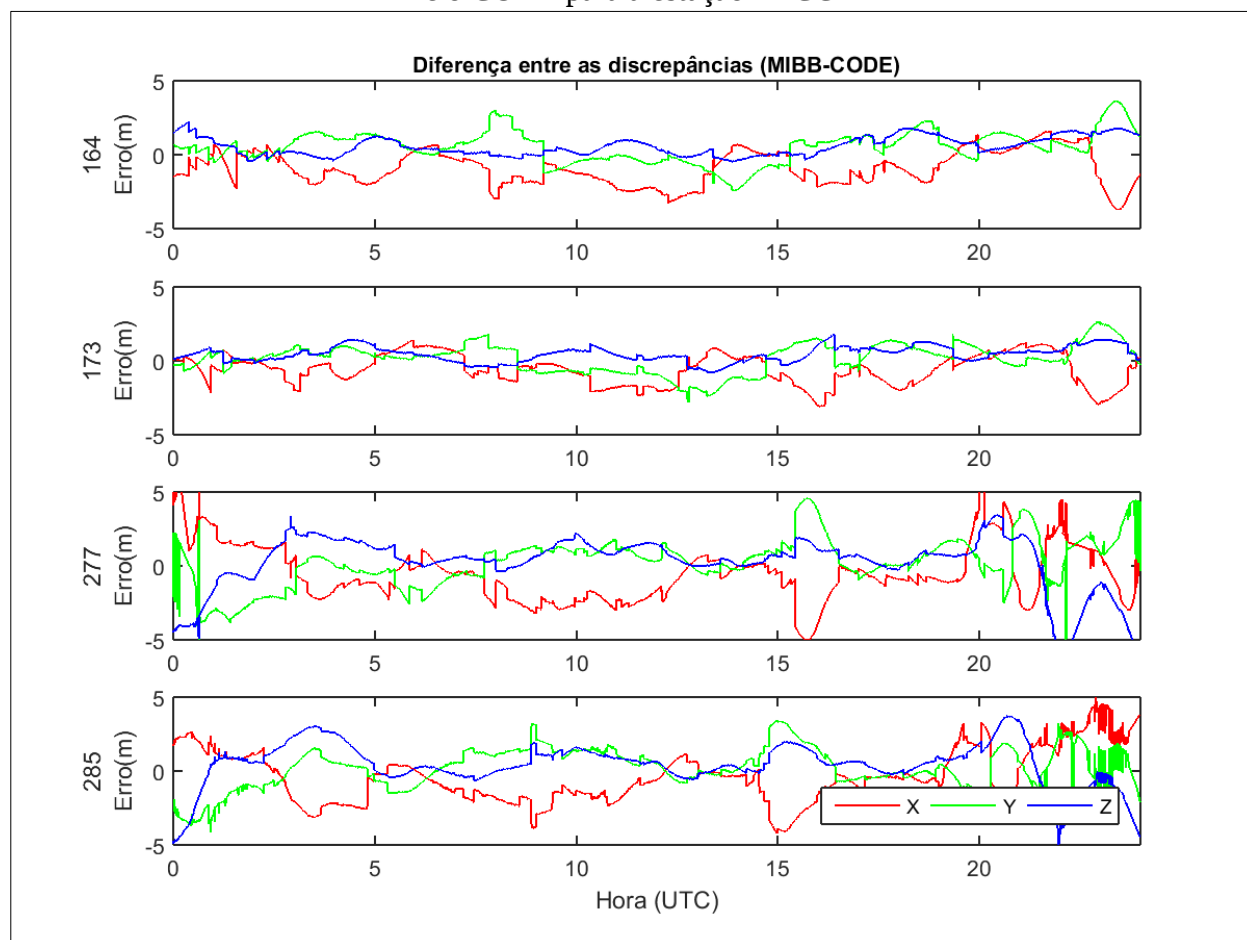
Figura 43- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação AMCO



No período de alta atividade ionosférica as maiores diferenças podem ser observadas em dois momentos: entre às 0 UTC e às 5 UTC e logo após às 20 UTC. Além disso, em todos os dias as componentes apresentaram comportamento similar entre elas. Constata-se também que as diferenças entre os desvios padrão são menores nos dias 164/2014 e 173/2014 (período de baixa densidade de elétrons), indicando que os mapas são mais semelhantes no período de baixa do que no período de alta atividade ionosférica.

Finalizando, a Figura 44 traz as diferenças de discrepâncias de coordenadas para a estação PBCG, localizada no Nordeste do país.

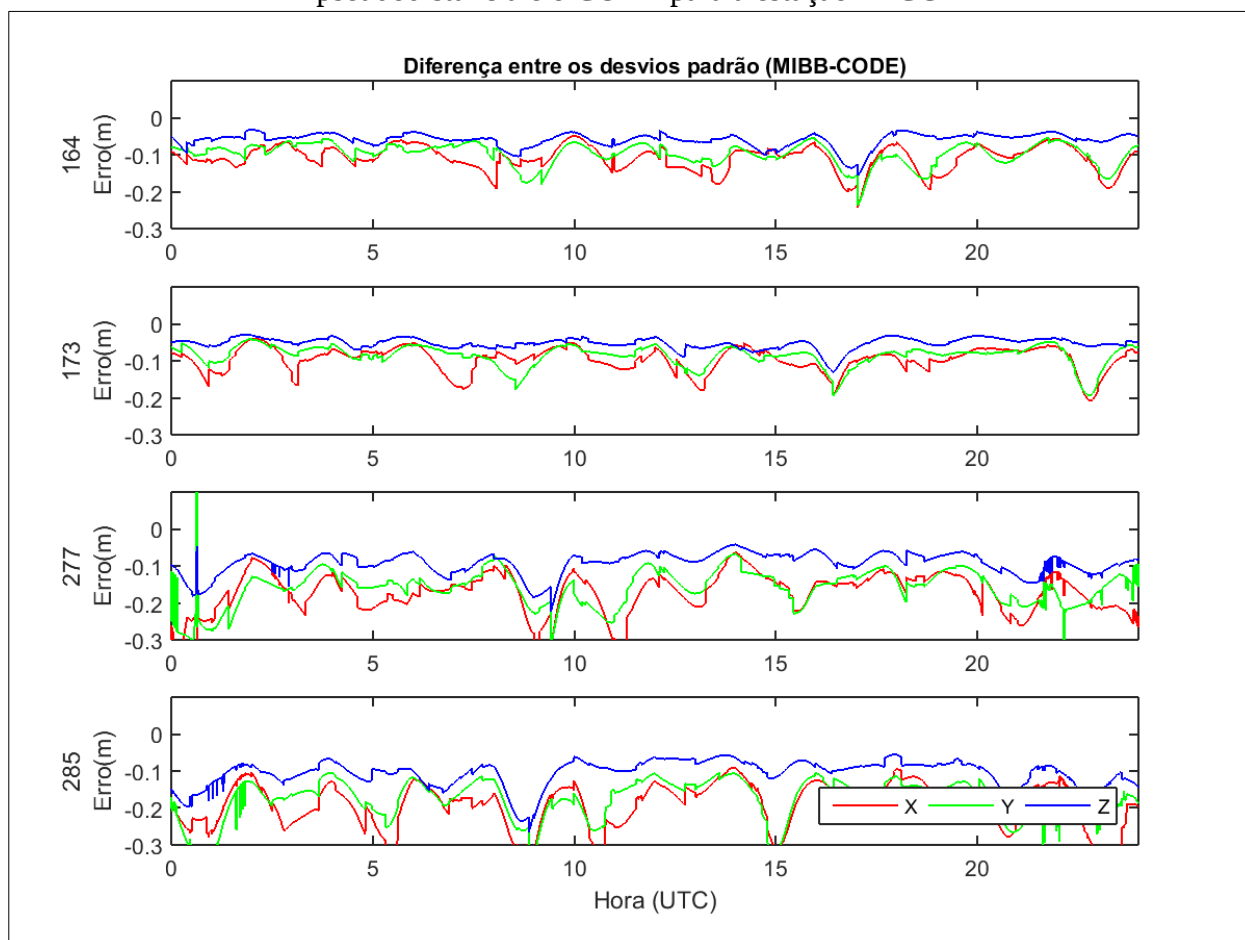
Figura 44- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da pseudodistância e o CODE para a estação PBCG



Na Figura 44 é possível observar que os dias 164/2014 e 173/2014 apresentam as menores diferenças entre as discrepâncias do MIBB e do CODE. Contata-se também que nos dias 277/2014 e 285/2014 há dois momentos em comum entre eles, que são onde as diferenças entre as discrepâncias são maiores: logo após as 15 UTC e depois das 20 UTC.

Já a Figura 45 mostra as diferenças entre os desvios padrão das coordenadas com MIBB e com o CODE para a estação PBCG, no decorrer dos dias 164, 173, 277 e 285 do ano de 2014.

Figura 45- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a pseudodistância e o CODE para a estação PBCG



A componente Y do dia 277/2014 logo após às 0 UTC é a única onde o desvio padrão do MIBB é maior que o desvio padrão do CODE. Além do mais, a componente Z é a que apresenta a menor diferença em todos os dias analisados, exceto no dia 277/2014 em um único momento: entre às 0 e 5 UTC.

A partir dos resultados obtidos e apresentados anteriormente, foi possível observar que as diferenças entre as discrepâncias nas coordenadas ao se aplicar o MIBB e o CODE não apresentam um comportamento padrão. Já em relação as diferenças entre os desvios padrão, na maioria das estações estudadas e nos dias analisados, os valores dos desvios padrão obtidos com o MIBB foram menores quando comparados com os do CODE.

5.5 Comparação dos valores de DCBs do receptor

A partir de estações pertencentes a rede IGS e que foram utilizadas na geração dos MIBBs, foi possível comparar os valores de DCBs e de RMSE (*Root Mean Square Error*- Raiz do Erro Médio Quadrático) dos mesmos. As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de DCBs e de

RMS obtidos pelos MIBBs e os disponibilizados pelo CODE para 14 estações, além da diferença entre os mesmos para os dias 164 e 173, respectivamente.

Tabela 3- Valores de DCBs para o dia 164/2014

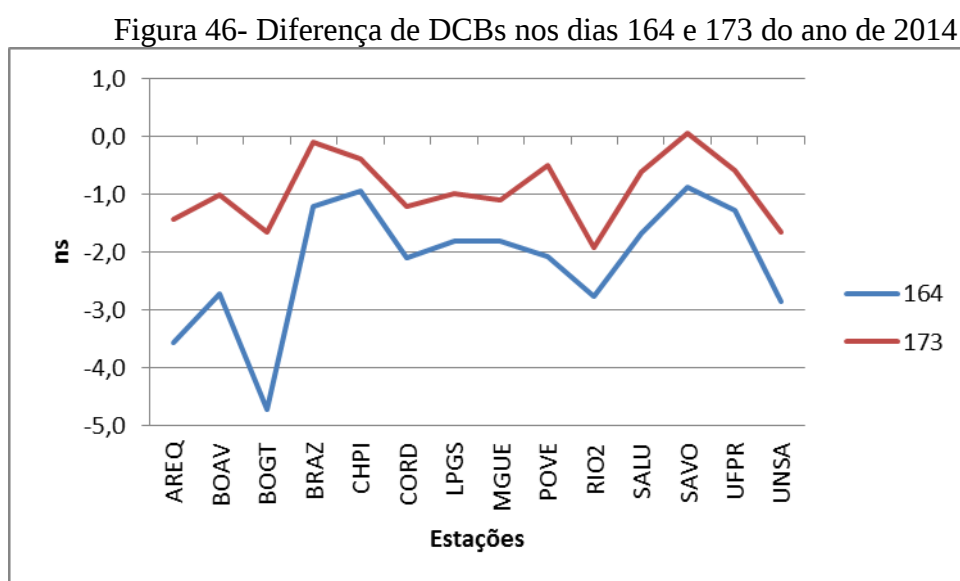
Dia do ano		164				
Estação	País	DCB MIBB (ns)	RMS (ns)	DCB CODE (ns)	RMS (ns)	Diferença (ns)
AREQ	Peru	-4,622	0,037	-1,060	0,040	-3,562
BOAV	Brasil	13,716	0,040	16,451	0,041	-2,735
BOGT	Colômbia	-8,511	0,042	-3,788	0,042	-4,723
BRAZ	Brasil	-16,252	0,038	-15,038	0,039	-1,214
CHPI	Brasil	-2,053	0,037	-1,103	0,040	-0,950
CORD	Argentina	-4,896	0,036	-2,789	0,042	-2,107
LPGS	Argentina	2,498	0,037	4,306	0,044	-1,808
MGUE	Argentina	3,412	0,037	5,237	0,045	-1,825
POVE	Brasil	-1,156	0,038	0,936	0,039	-2,092
RIO2	Argentina	6,479	0,050	9,262	0,051	-2,783
SALU	Brasil	-13,189	0,040	-11,512	0,042	-1,677
SAVO	Brasil	19,495	0,038	20,375	0,041	-0,880
UFPR	Brasil	36,540	0,037	37,820	0,040	-1,280
UNSA	Argentina	-4,254	0,037	-1,399	0,039	-2,855
Média						-2,178

Tabela 4- Valores de DCBs para o dia 173/2014

Dia do ano		173				
Estação	País	DCB MIBB (ns)	RMS (ns)	DCB CODE (ns)	RMS (ns)	Diferença (ns)
AREQ	Peru	-2,762	0,030	-1,328	0,037	-1,434
BOAV	Brasil	14,323	0,033	15,348	0,037	-1,025
BOGT	Colômbia	-5,627	0,035	-3,972	0,038	-1,655
BRAZ	Brasil	-17,831	0,031	-17,730	0,036	-0,101
CHPI	Brasil	-3,522	0,030	-3,125	0,037	-0,397
CORD	Argentina	-4,070	0,030	-2,848	0,039	-1,222
LPGS	Argentina	3,014	0,030	4,012	0,040	-0,998
MGUE	Argentina	4,210	0,030	5,312	0,042	-1,102
POVE	Brasil	-0,239	0,031	0,259	0,036	-0,498
RIO2	Argentina	6,351	0,043	8,280	0,047	-1,929
SALU	Brasil	-13,884	0,033	-13,269	0,039	-0,615
SAVO	Brasil	18,162	0,031	18,106	0,038	0,056
UFPR	Brasil	35,965	0,033	36,567	0,039	-0,602
UNSA	Argentina	-2,835	0,030	-1,175	0,036	-1,660
Média						-0,942

Por meio das Tabelas 3 e 4 é possível notar que as cinco menores diferenças de DCBs no dia 164/2014 são de estações brasileiras, enquanto que no dia 173/2014 foram as seis menores. Em ambos os dias, a estação SAVO foi a que apresentou a menor diferença. Nota-se também que a média das diferenças no dia 164 é mais que o dobro do dia 173. Os resultados mostram que embora o MIBB seja regional, houve coerência nos valores de DCBs obtidos. Além disso, notou-se que em ambos os dias, nas cinco estações analisadas, os RMS dos DCBs dos MIBBs apresentaram valor menor ou igual dos disponibilizados pelo CODE.

Na Figura 46 foram plotados os valores de diferenças dos DCBs para os dias 164 e 173.



Foi possível observar na Figura 46 que a diferença nos valores de DCBs em ambos os dias teve comportamento parecido, embora a amplitude tenha sido diferente. Em todas as estações analisadas o dia 173 apresentou as menores diferenças, enquanto que o dia 164 teve os maiores valores.

As Tabelas 5 e 6 mostram os valores de DCBs e seus respectivos RMS do CODE e do Bernese para os dias 277 e 285, respectivamente, além das diferenças dos mesmos.

Tabela 5- Valores de DCBs para o dia 277/2014

(continua)

Dia do ano		277				
Estação	País	DCB MIBB (ns)	RMS (ns)	DCB CODE (ns)	RMS (ns)	Diferença (ns)
AREQ	Peru	0,334	0,062	1,224	0,052	-0,890
BOAV	Brasil	11,027	0,068	15,149	0,054	-4,122
BOGT	Colômbia	-8,284	0,071	-3,726	0,055	-4,558
BRAZ	Brasil	-19,944	0,063	-18,840	0,052	-1,104

Tabela 5- Valores de DCBs para o dia 277/2014

(conclusão)

Dia do ano		277				
Estação	País	DCB MIBB (ns)	RMS (ns)	DCB CODE (ns)	RMS (ns)	Diferença (ns)
CHPI	Brasil	-2,687	0,063	-2,135	0,052	-0,552
CORD	Argentina	-6,877	0,061	-4,007	0,054	-2,870
LPGS	Argentina	0,569	0,063	2,623	0,056	-2,054
MGUE	Argentina	2,589	0,063	4,460	0,058	-1,871
POVE	Brasil	0,861	0,064	1,647	0,051	-0,786
RIO2	Argentina	6,234	0,092	9,802	0,072	-3,568
SALU	Brasil	-17,485	0,068	-15,301	0,055	-2,184
SAVO	Brasil	17,716	0,065	18,800	0,055	-1,084
UFPR	Brasil	35,653	0,063	37,052	0,051	-1,399
UNSA	Argentina	-4,286	0,062	-0,909	0,050	-3,377
Média						-2,173

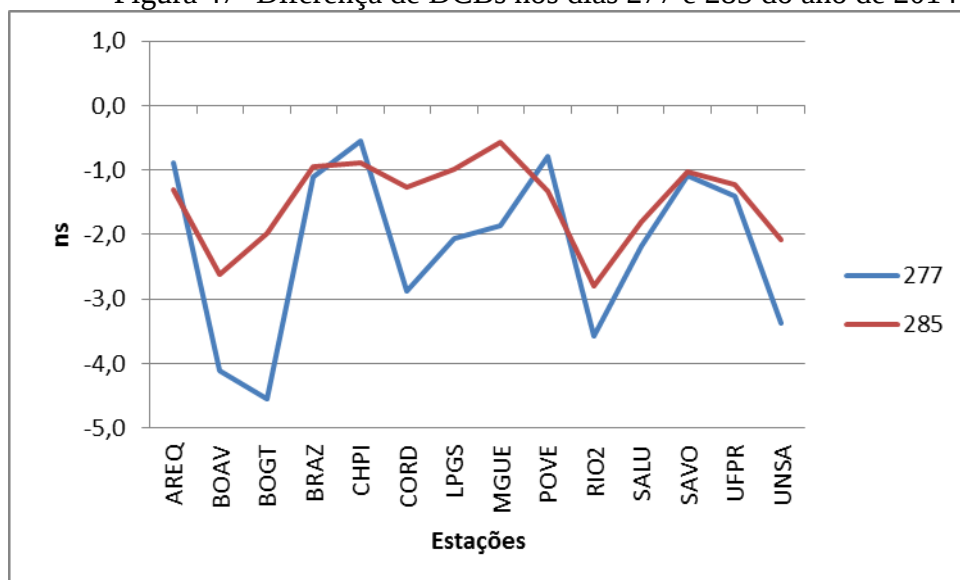
Tabela 6- Valores de DCBs para o dia 285/2014

Dia do ano		285				
Estação	País	DCB MIBB (ns)	RMS (ns)	DCB CODE (ns)	RMS (ns)	Diferença (ns)
AREQ	Peru	-0,339	0,051	0,965	0,051	-1,304
BOAV	Brasil	11,572	0,056	14,184	0,053	-2,612
BOGT	Colômbia	-3,336	0,059	-1,354	0,055	-1,982
BRAZ	Brasil	-20,286	0,052	-19,334	0,051	-0,952
CHPI	Brasil	-3,688	0,052	-2,799	0,051	-0,889
CORD	Argentina	-4,861	0,051	-3,596	0,053	-1,265
LPGS	Argentina	1,772	0,052	2,765	0,055	-0,993
MGUE	Argentina	4,145	0,052	4,708	0,057	-0,563
POVE	Brasil	0,197	0,053	1,530	0,050	-1,333
RIO2	Argentina	7,091	0,076	9,890	0,067	-2,799
SALU	Brasil	-17,932	0,056	-16,121	0,054	-1,811
SAVO	Brasil	17,660	0,053	18,679	0,055	-1,019
UFPR	Brasil	35,591	0,052	36,816	0,050	-1,225
UNSA	Argentina	-1,542	0,051	0,548	0,049	-2,090
Média						-1,488

No que diz a respeito a Tabela 5, as estações CHPI e BOGT foram as que apresentaram a menor (-0,552 ns) e a maior diferença (-4,558 ns), respectivamente. Já na Tabela 6 as estações que tiveram a menor (-0,563 ns) e maior (-2,799 ns) diferença nos valores de DCBs foram a MGUE e a RIO2, respectivamente. Além disso, a média das diferenças no dia 277/2014 foi de -2,173 ns, enquanto que no dia 285/2014 foi de -1,488 ns.

A Figura 47 traz as diferenças nos valores de DCBs nos dias 277/2014 e 285/2014 para as 14 estações analisadas.

Figura 47- Diferença de DCBs nos dias 277 e 285 do ano de 2014



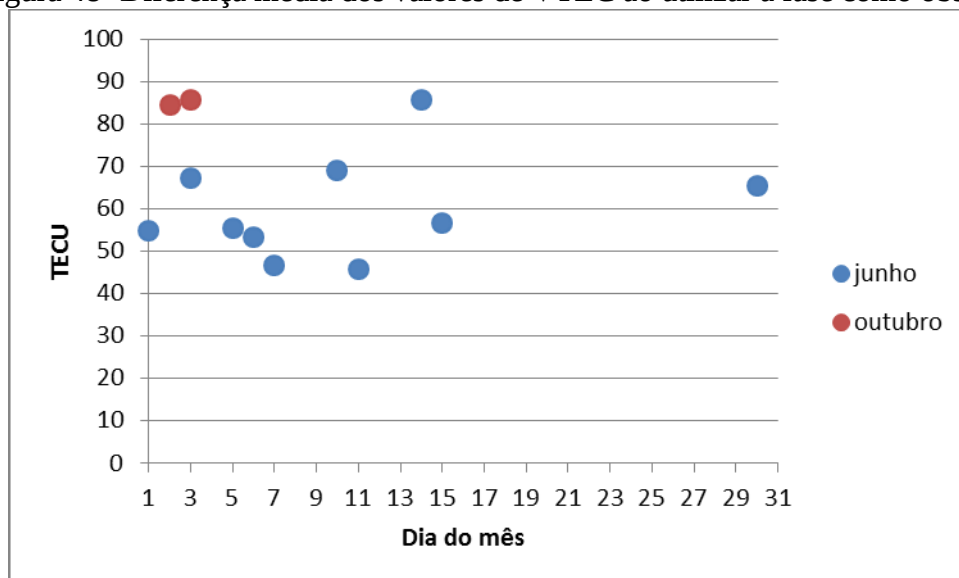
Por meio da Figura 47 é possível observar que as estações BRAZ, SAVO e UFPR apresentaram valores de diferenças muito próximos nos dois dias.

Ao realizar uma análise comparativa entre as diferenças nos valores de DCBs do mês de outubro (Figura 47) com os do mês de junho (Figura 46), é possível notar que enquanto o mês de junho apresenta um padrão entre os dias, em outubro não foi possível observar o mesmo. Em relação a amplitude de diferença, a mesma foi similar em ambos os meses.

5.6 MIBBs obtidos utilizando a observável fase

Por meio do Bernese, gerou-se também MIBBs utilizando somente a fase como observável, porém só foi possível gerar MIBBs para alguns dos dias selecionados. A Figura 48 apresenta a diferença média nos valores de VTEC entre os MIBBs utilizando a fase e o disponibilizado pelo CODE para os dias que foram possíveis gerar os mapas.

Figura 48- Diferença média dos valores de VTEC ao utilizar a fase como observável



Por meio da Figura 48 é possível observar que no mês de junho os dias 14 (DOY 165) e 11 (DOY 162) apresentaram a maior e a menor diferença média, respectivamente. Enquanto que no mês de outubro o dia 3 (DOY 276) e 2 (DOY 275) tiveram a maior e a menor diferença média, respectivamente. A partir disso, os dias 165, 162, 276 e 275 do ano de 2014 foram selecionados para terem seus resultados plotados.

O fato de conseguir gerar mapas para somente alguns dos dias selecionados pode ter ocorrido devido a exclusão observações no módulo MAUPRP e consequentemente resultou em um número de observações insuficientes para o módulo GPSEST gerar o IONEX.

O módulo MAUPRP foi utilizado para detectar e resolver perdas de ciclo, além de remover valores discrepantes. A Tabela 7 traz alguns dados importantes dos dias 274/2014 e 275/2014 que o módulo MAUPRP produz ao final do processamento, sendo que o primeiro dia foi um dos que não foi possível gerar os mapas, enquanto que o segundo teve o IONEX gerado.

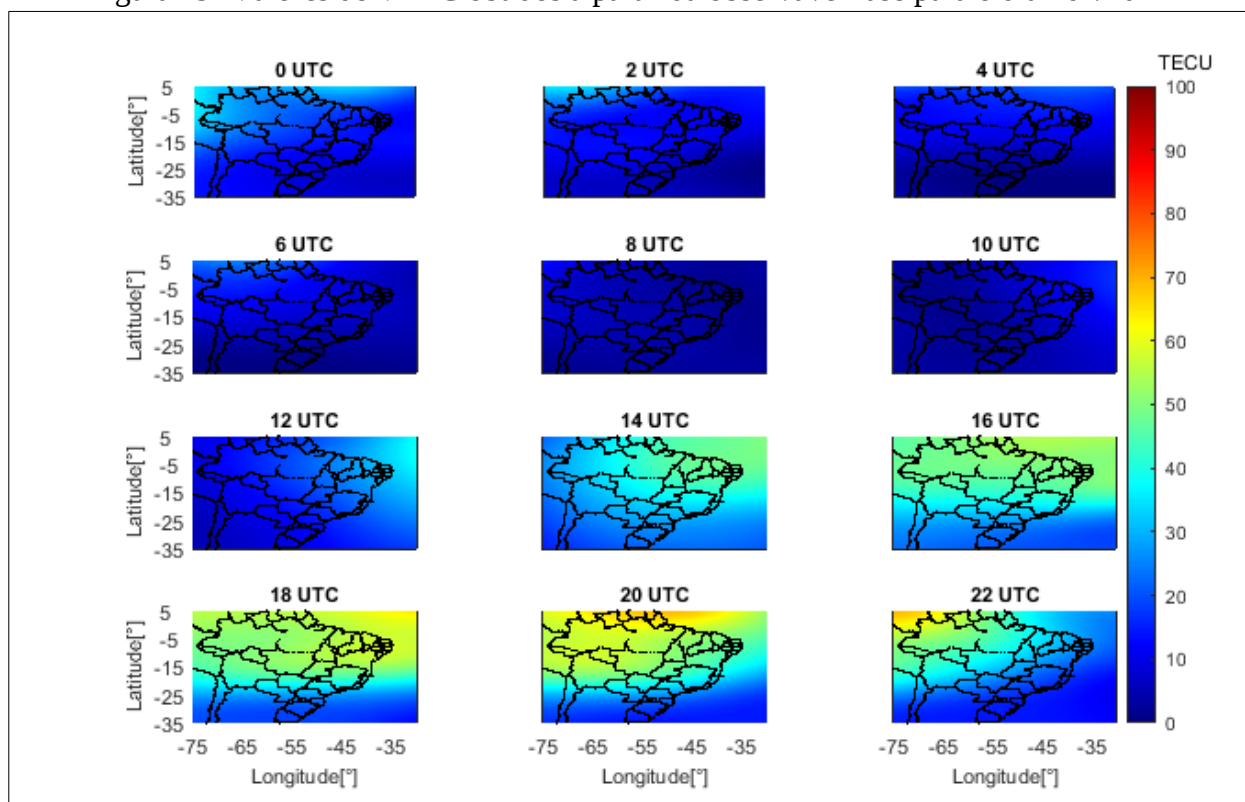
Tabela 7- Comparação entre os dias 274 e 275

Dia	274		275	
Frequência	L1	L2	L1	L2
Número de observações L1 e L2 não emparelhadas	1778	1	480	10
Número de observação com baixo ângulo de elevação	2504	2504	1451	1451
Dados com poucas observações	1795	2.291	768	825
Número de perdas de ciclos aceitas no processamento	10	31	0	6
Áreas novas ou modificadas nesse processamento	2713	2.300	791	635

A partir da Tabela 7 constata-se que há uma grande diferença nos valores entre o dia que o processamento foi realizado e o dia em que não foi possível gerar o mapa. Nota-se que o número de observações com baixo ângulo de observação no dia 274/2014 é quase o dobro do dia 275/2014. Além disso, a quantidade de observações com poucos dados também é muito superior no dia 274/2014, quando comparada com o dia 275/2014. Destaca-se também que a maioria dos dias em que não foi possível gerar os IONEX está concentrada no período de alta atividade ionosférica (mês de outubro), o que indica uma possível correlação com a qualidade das observações.

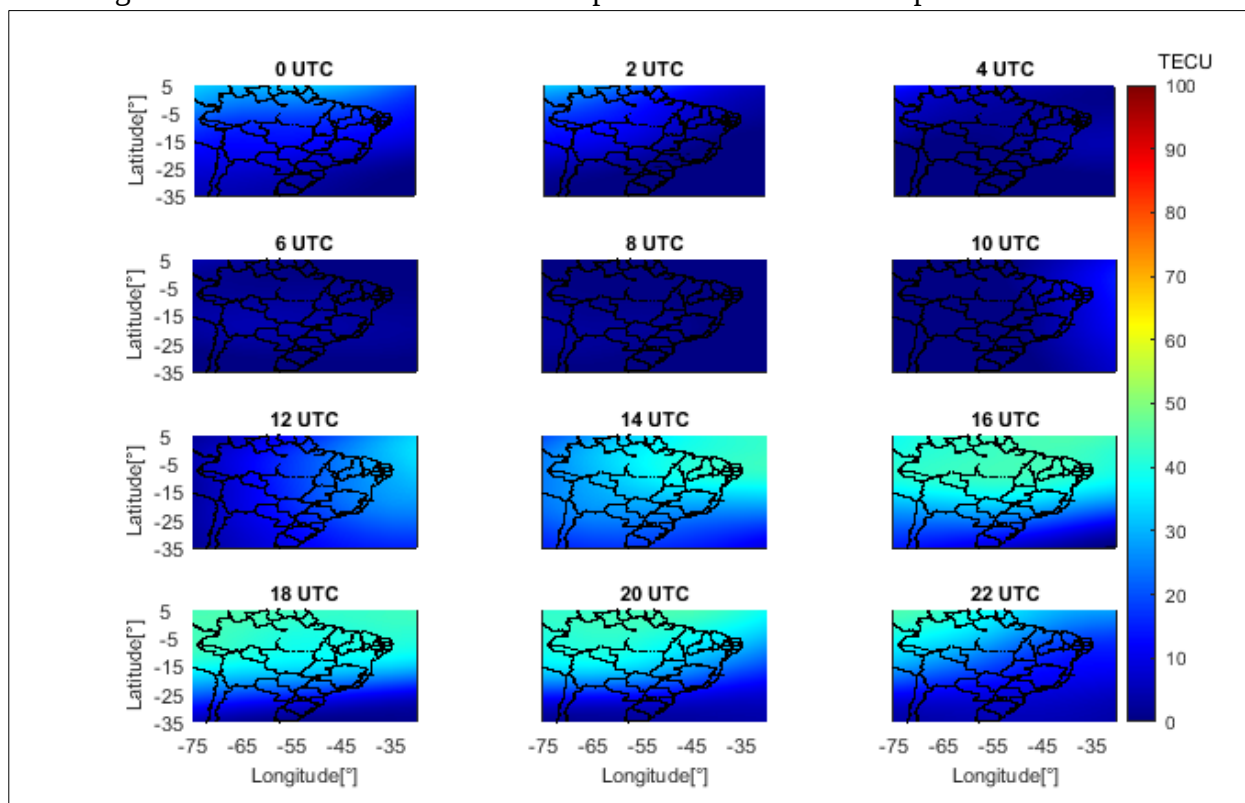
Após isso, foi realizada a plotagem dos valores de VTEC para os dias 162/2014 e 165/2014 do mês de junho, os quais foram os dias que apresentaram a menor e a maior diferença média, respectivamente, quando comparado o mapa do CODE. A Figura 49 apresenta os valores de VTEC obtidos ao utilizar como observável a fase, ao longo do dia 162, a cada duas horas.

Figura 49- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 162/2014



Já a Figura 50 apresenta os valores de VTEC para o dia 165/2014, obtidos por meio do software Bernese.

Figura 50- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 165/2014



Ao realizar uma análise nas Figuras 49 e 50, é possível notar que há uma pequena atividade ionosférica em ambos os dias a partir das 14 UTC, principalmente na região próxima ao equador geomagnético, sendo que no dia 162/2014 essa atividade é maior.

A Figura 51 e a Figura 52 mostram os valores de VTEC para os dias 275/2014 e 276/2014, respectivamente, obtidos através dos processamentos no software Bernese.

Figura 51- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 275/2014

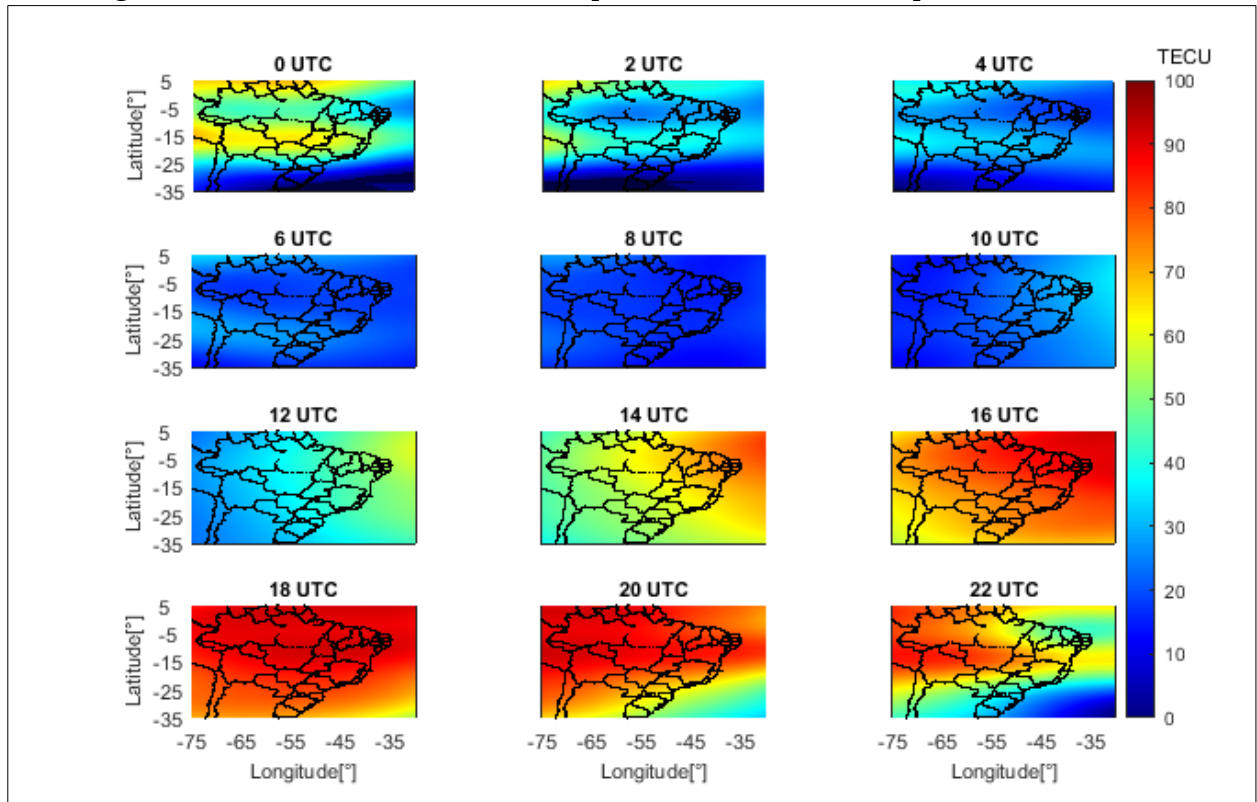
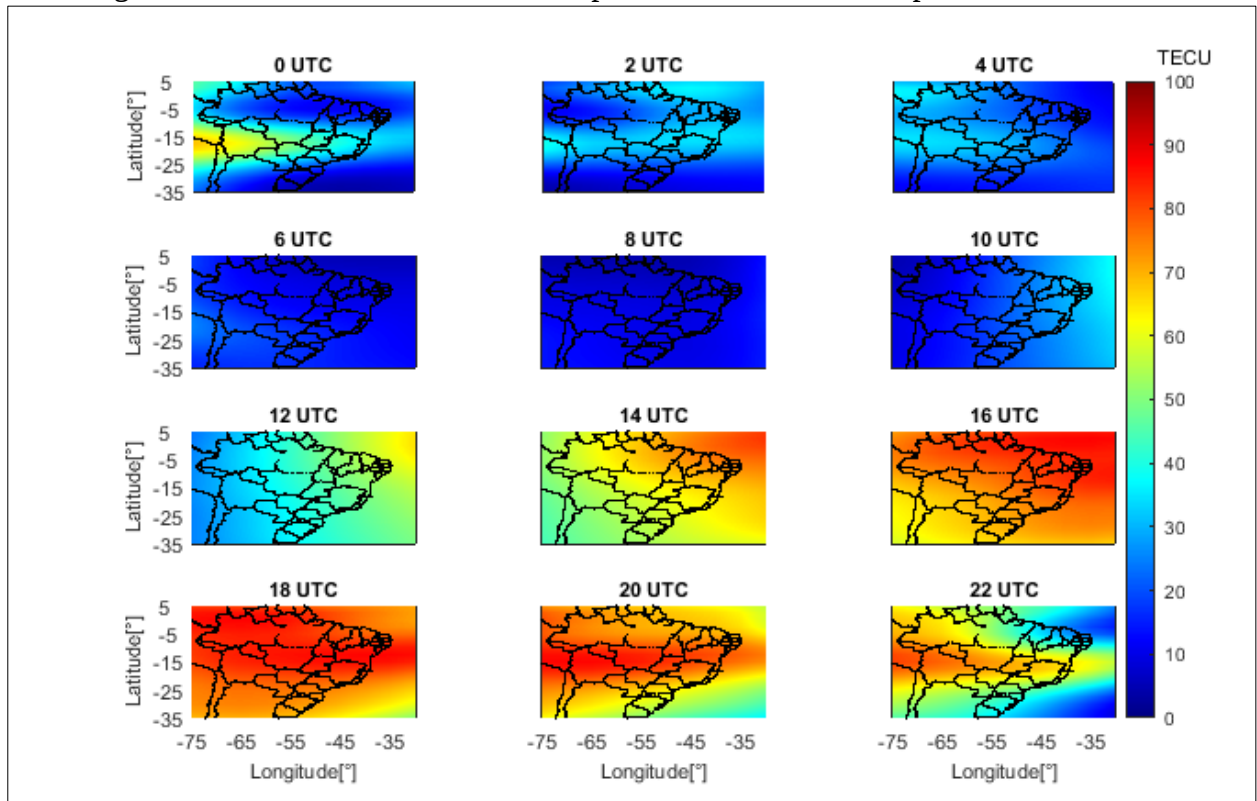


Figura 52- Valores de VTEC obtidos a partir da observável fase para o dia 276/2014



Na Figura 51 é possível observar o efeito fonte durante às 22 e 0 UTC. As Figuras 51 e 52 mostram uma alta atividade ionosférica, principalmente a partir das 14 UTC. Ainda é possível observar o deslocamento da anomalia equatorial sobre o território brasileiro. Além disso, em ambos os dias, às 18 UTC é o horário que se tem os maiores valores de VTEC.

5.6 Comparação entre os mapas ionosféricos ao utilizar a fase

Assim como foi possível comparar o mapa do CODE com o MIBB utilizando a pseudodistância, nesta seção é realizada a comparação dos mapas do CODE com os MIBBs obtidos a partir da fase. Vale enfatizar que foi feito MIBB menos CODE.

As Figuras 53, 54, 55 e 56 mostram as diferenças nos valores de VTEC dos MIBBs, com os obtidos por meio do CODE, para os dias 162/2014, 165/2014, 275/2014 e 276/2014, respectivamente.

Figura 53-Diferença nos valores de VTEC para o dia 162/2014

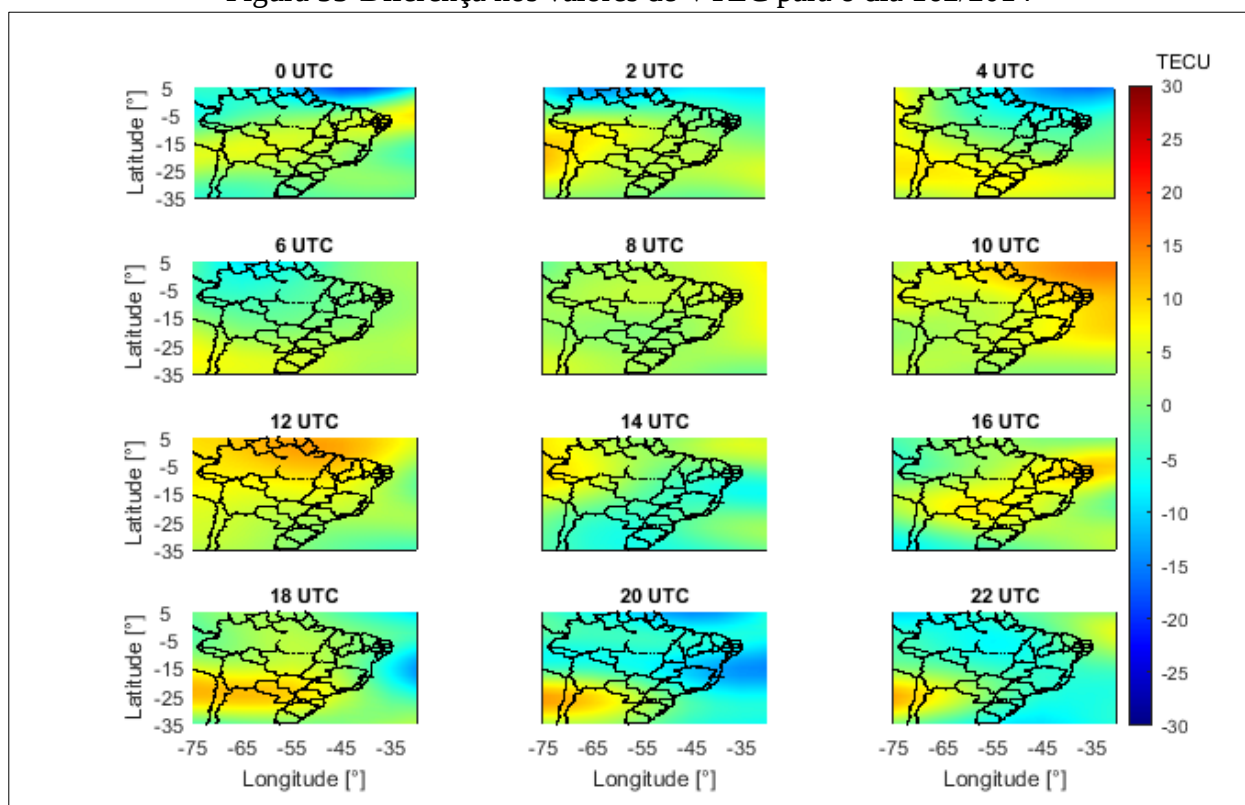


Figura 54-Diferença nos valores de VTEC para o dia 165/2014

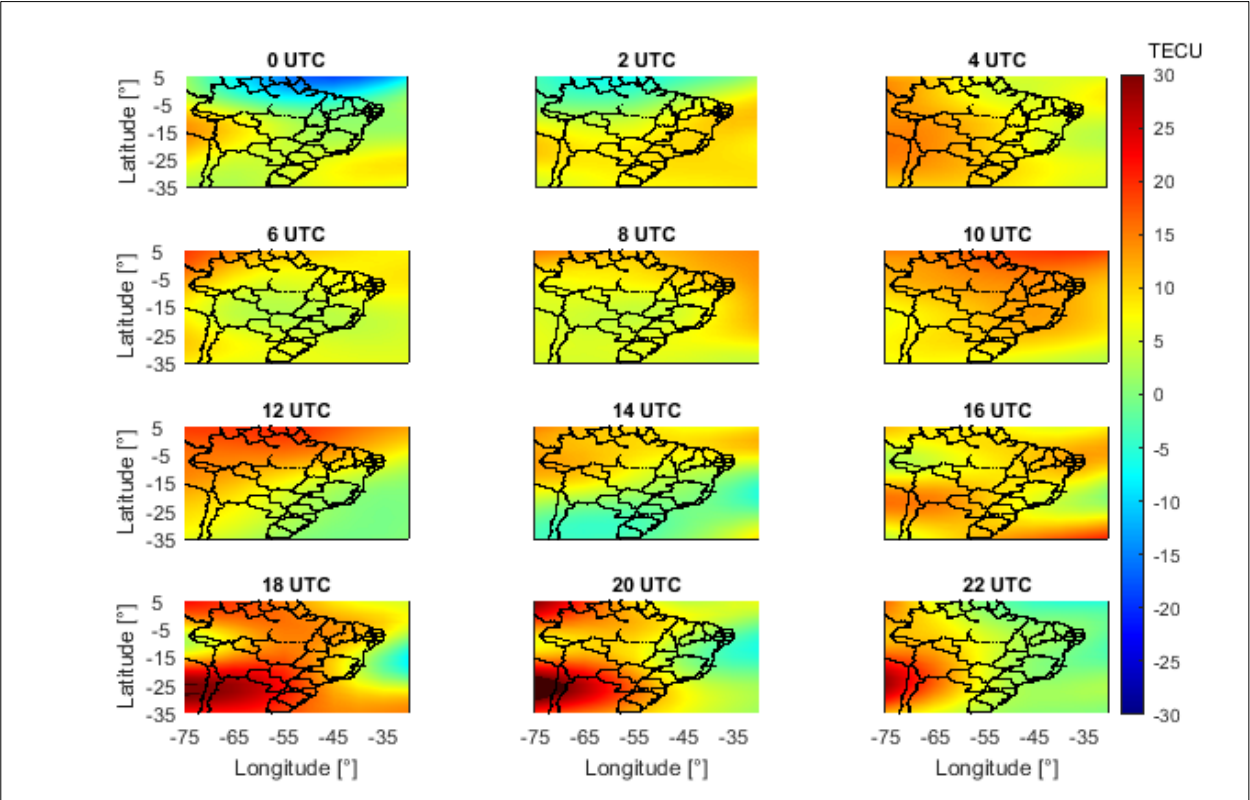


Figura 55-Diferença nos valores de VTEC para o dia 275/2014

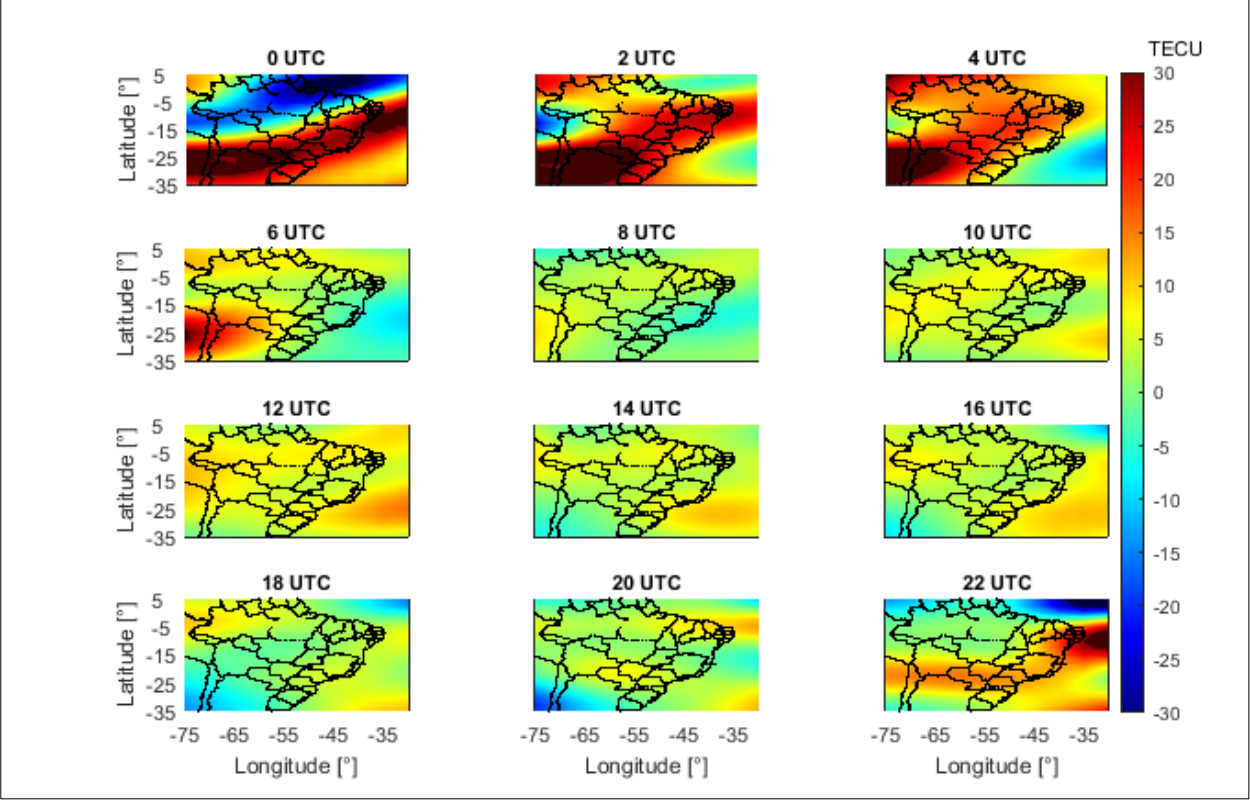
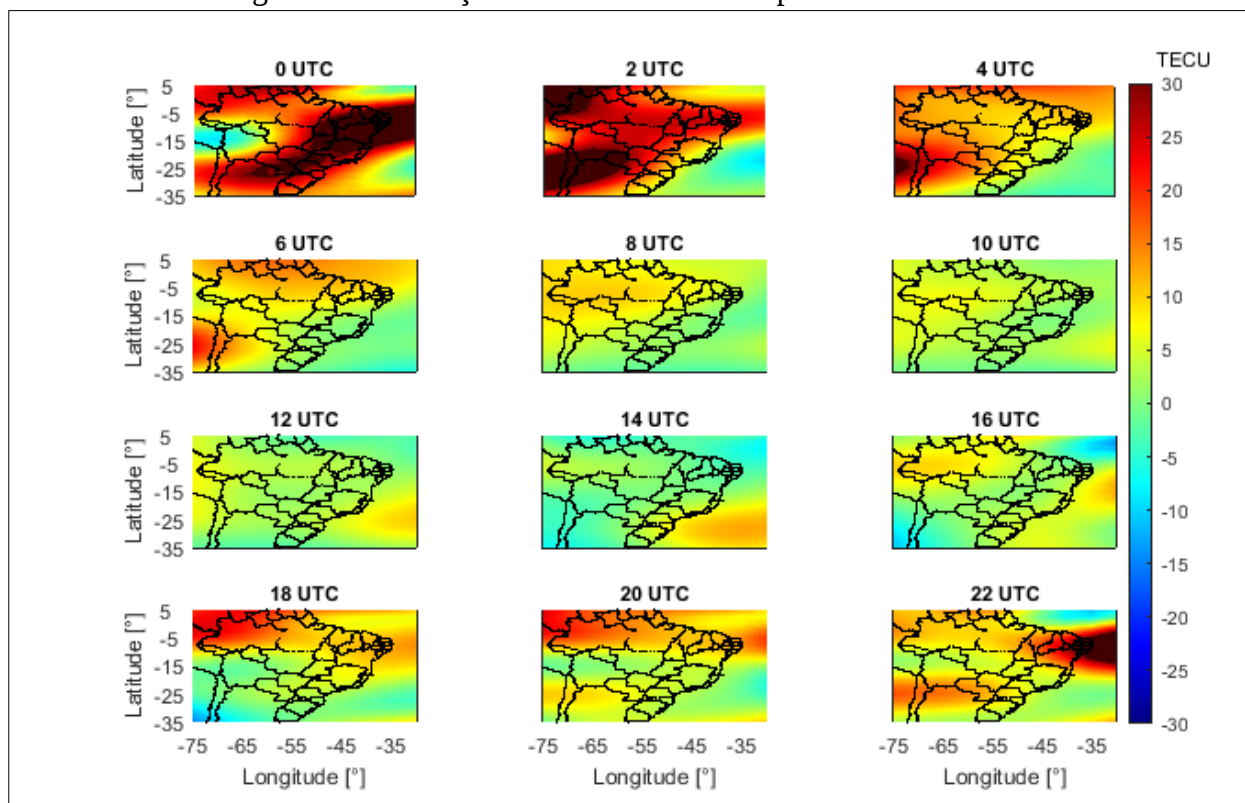


Figura 56-Diferença nos valores de VTEC para o dia 276/2014



No que diz respeito aos dias do mês de junho (162 e 165), observa-se que o dia 165/2014 apresentou as maiores diferenças em todos os horários, quando comparado com o dia 162/2014, sendo que a diferença média de VTEC no dia 165 e 162 foi de aproximadamente 7 TECU e 5 TECU, respectivamente.

Já nos dias do mês de outubro, ambos apresentaram diferenças parecidas, sendo que os horários que tiveram os maiores valores de diferença foram as 0, 2, 4 e 22 UTC, tanto no dia 275/2014 quanto no dia 276/2014. O valor médio de diferença de VTEC nos dias 275/2014 e 276/2014 foi de aproximadamente 8 TECU e 9 TECU, respectivamente.

Além de comparar os MIBBs gerados a partir da observável fase no Bernese com os disponibilizados pelo CODE, foi possível calcular a diferença entre os MIBBs obtidos utilizando a observável fase com os obtidos a partir da pseudodistância, ambos gerados por meio do Bernese, como mostram as Figuras 57, 58, 59 e 60.

Figura 57- Diferença nos valores de VTEC para o dia 162/2014 entre os MIBBs

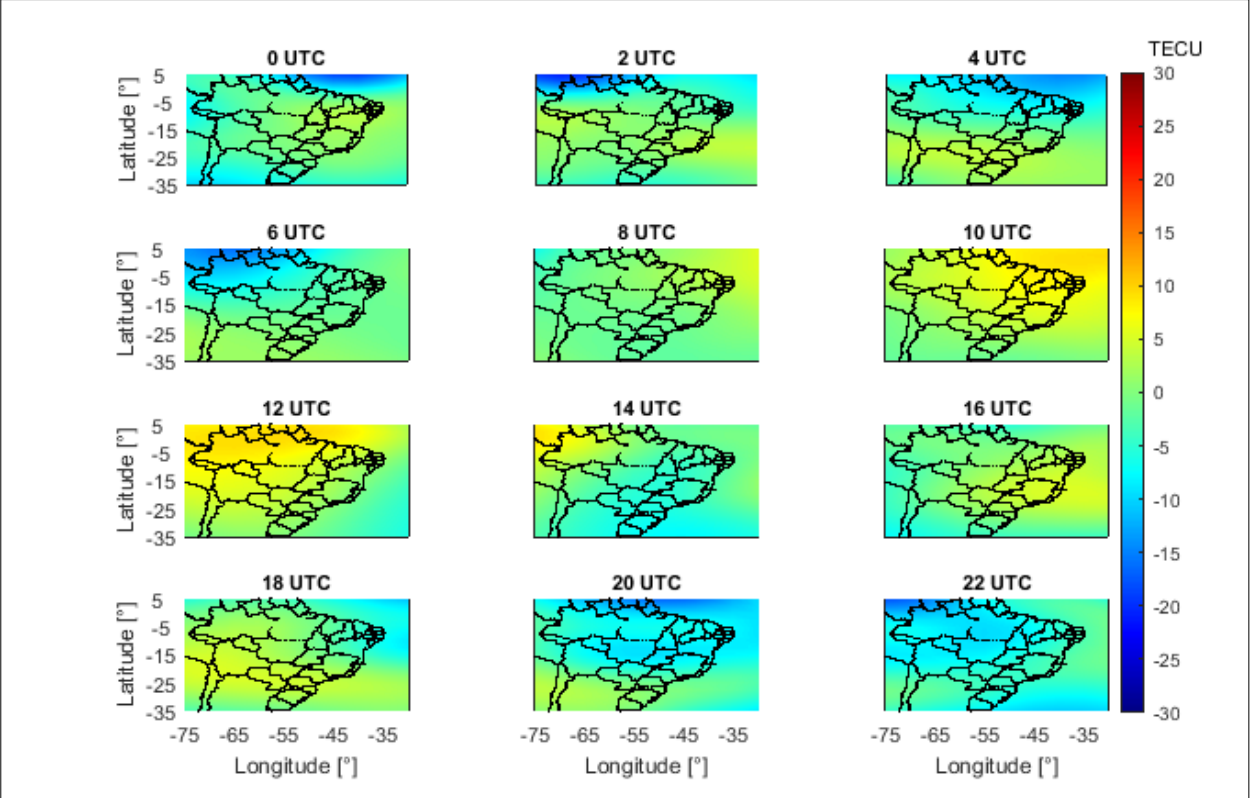


Figura 58- Diferença nos valores de VTEC para o dia 165/2014 entre os MIBBs

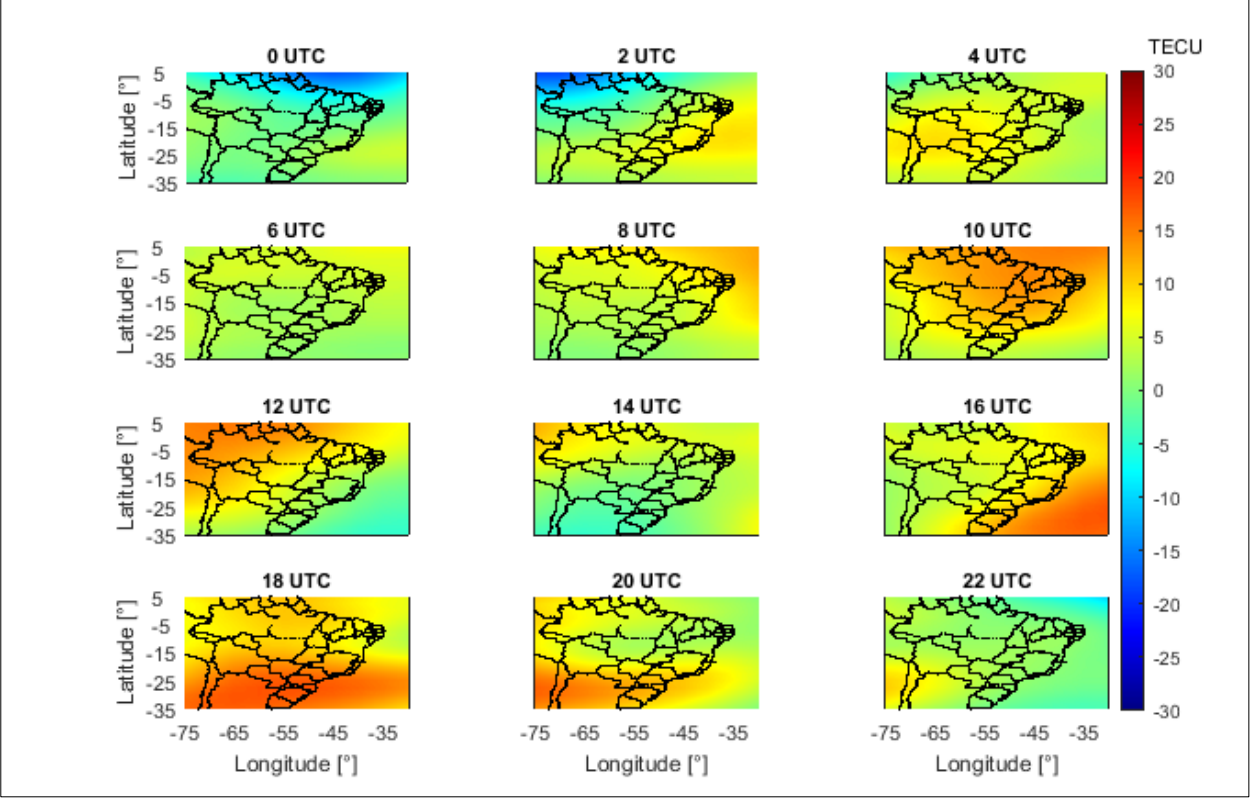


Figura 59- Diferença nos valores de VTEC para o dia 275/2014 entre os MIBBs

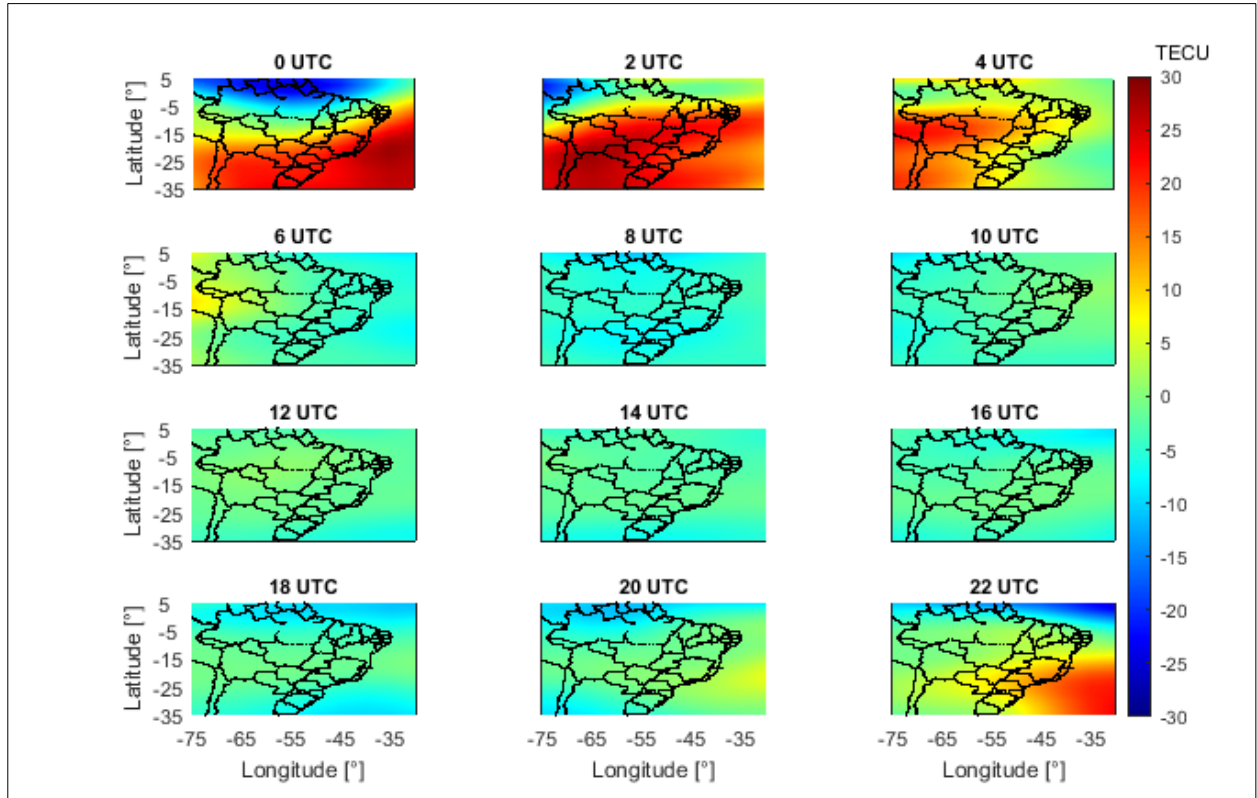
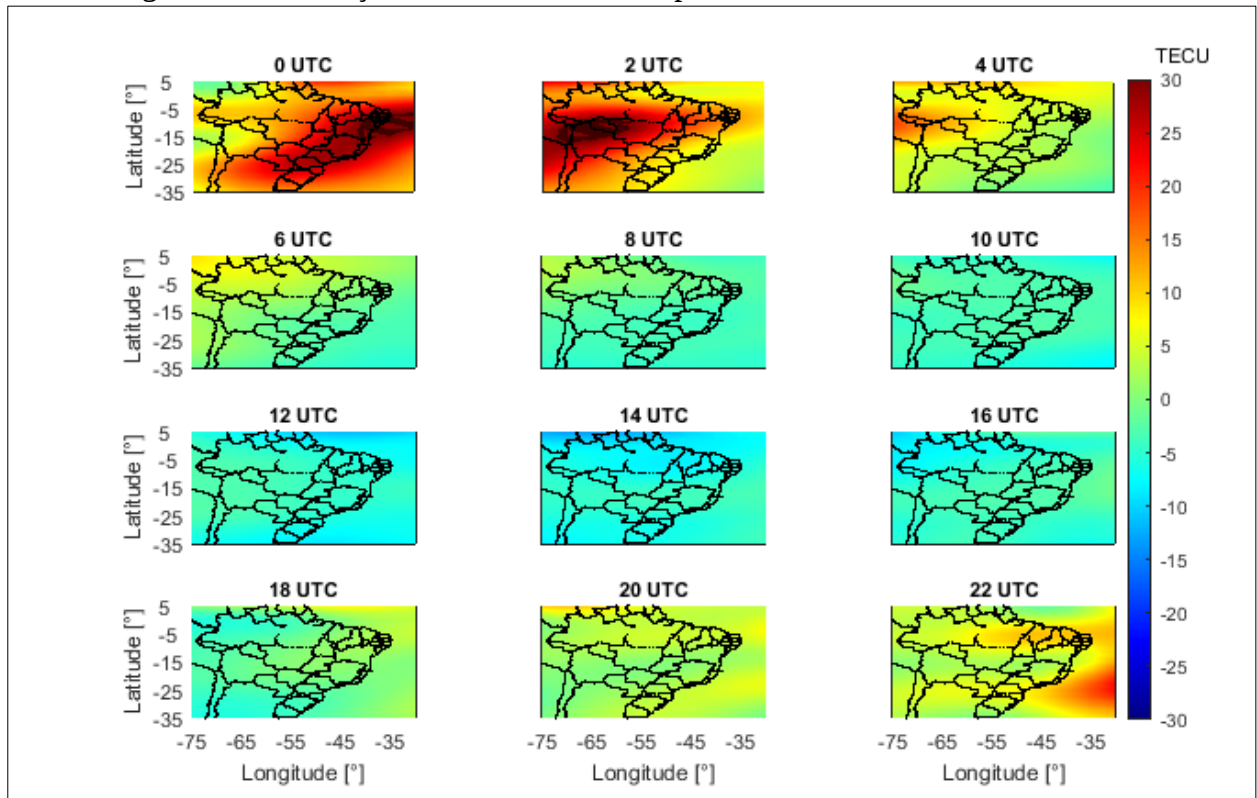


Figura 60- Diferença nos valores de VTEC para o dia 276/2014 entre os MIBBs



No que diz respeito aos dias do mês de junho (Figura 57 e Figura 58) nota-se que o dia 162/2014 apresenta os menores valores de diferenças de VTEC, sendo a diferença média diária de 4 TECU, enquanto que no dia 165/2014 é de 6 TECU.

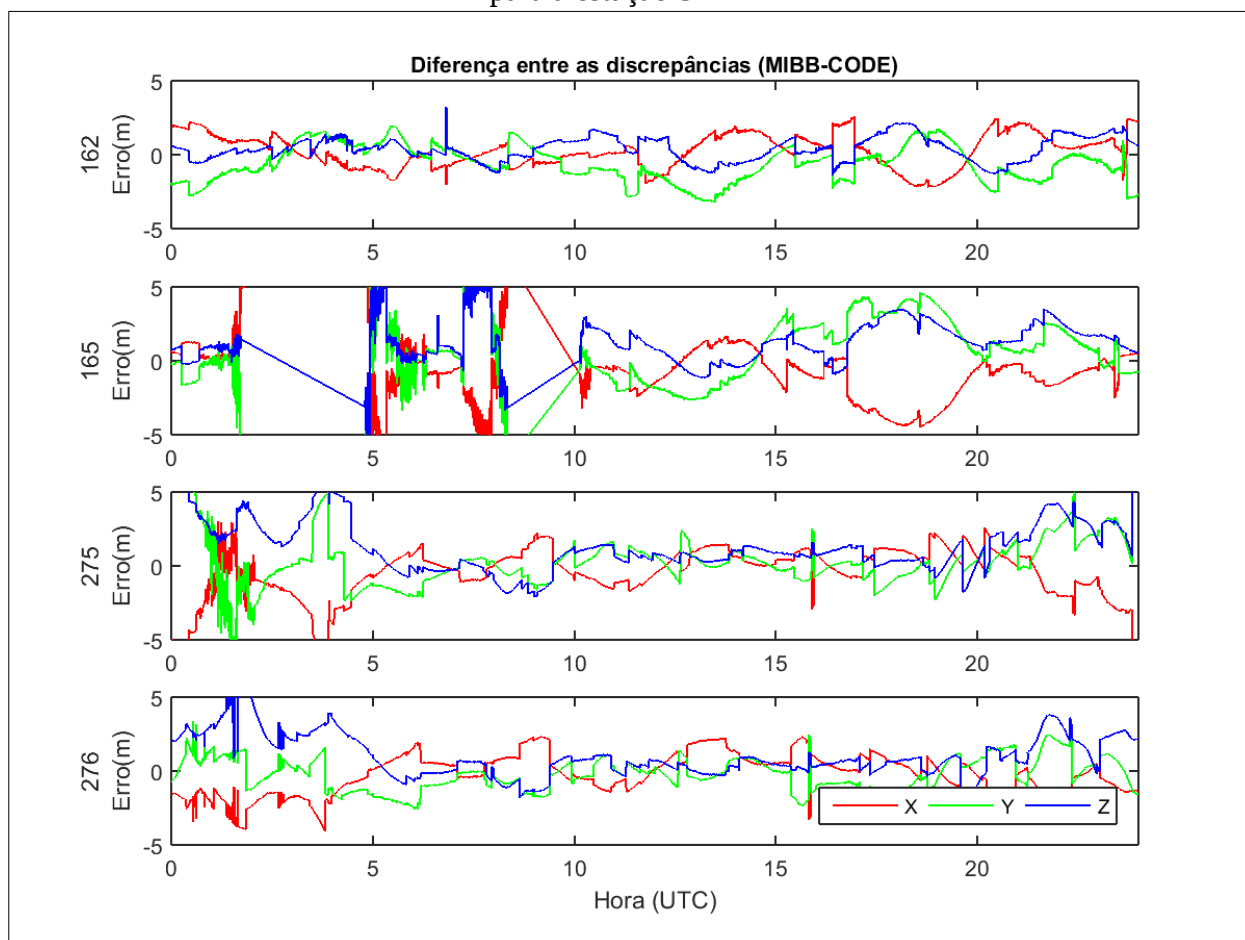
Já os dias do mês de outubro (Figura 59 e Figura 60) apresentaram as maiores diferenças as 0 UTC, 2 UTC, 4 UTC e 22 UTC. Além disso, os dias 275/2014 e 276/2014 apresentaram uma diferença média diária igual: 6 TECU.

5.7 Aplicação dos MIBBs gerados a partir da observável fase no posicionamento por ponto

Os MIBBs obtidos utilizando como observável a fase e os mapas disponibilizados pelo CODE foram aplicados no posicionamento por ponto no modo pós-processado, por meio do software RTKLIB. Por meio do RTKLIB obtiveram-se as discrepâncias das coordenadas ao longo dos dias analisados, utilizando como valor verdadeiro as coordenadas das estações atualizadas para a época 2014,46. Depois, calculou-se a diferença das discrepâncias para as três componentes (X, Y, Z), sendo que para obter os valores de diferenças foi feito MIBB menos CODE. Além do mais, foi calculado também as diferenças entre os desvios padrão das coordenadas do MIBB e os do CODE, nessa sequência.

A Figura 61 apresenta as diferenças entre as discrepâncias das coordenadas na estação SMAR, a qual está localizada na região Sul do país, ao longo dos dias 164, 173, 277 e 285 do ano de 2014.

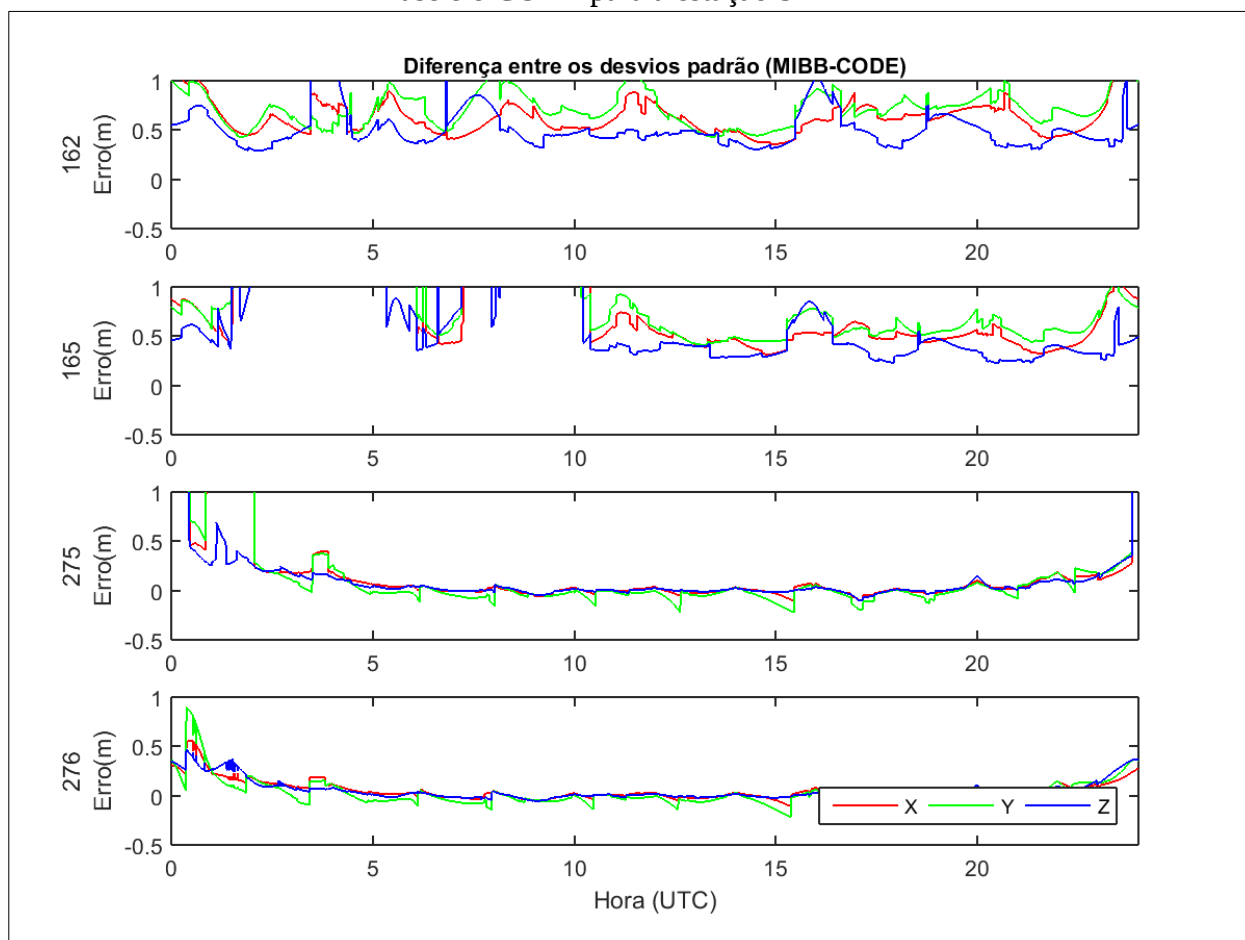
Figura 61- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação SMAR



Nota-se na Figura 61 que o dia 162/2014 é o que apresenta as menores diferenças de discrepâncias. Enquanto que o dia 165/2014 apresenta as maiores diferenças, além disso, é possível identificar uma falta de dados nesse mesmo dia entre as 0 e 5 UTC.

A Figura 62 traz os valores de diferenças entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e o CODE, nos dias 162, 165, 275 e 276, para a estação SMAR.

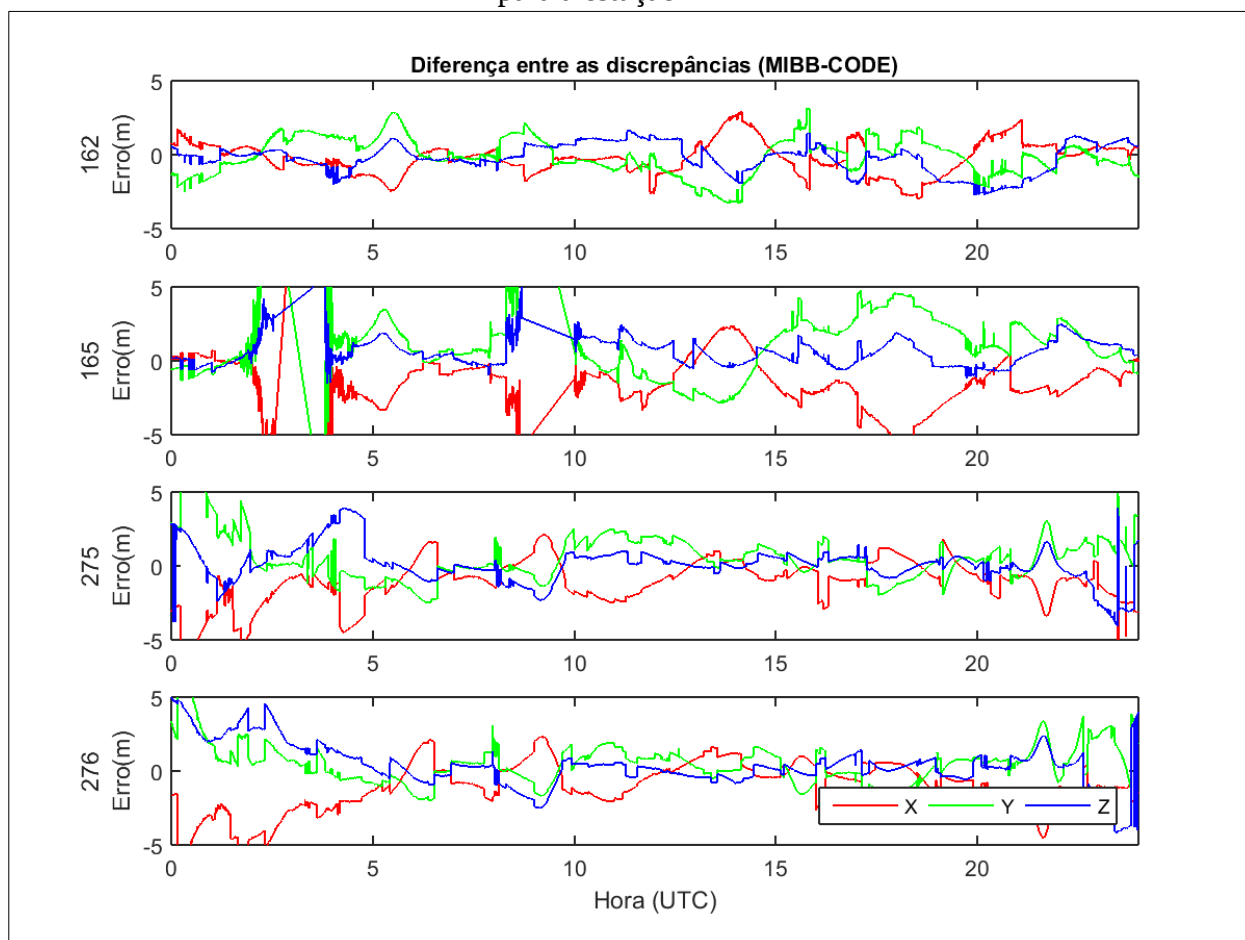
Figura 62- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação SMAR



A partir da Figura 62 é possível notar que nos dias de baixa atividade ionosférica (162/2014 e 165/2014) as diferenças entre os desvios padrão do MIBB e do CODE foram maiores. Vale destacar que o eixo da ordenada nos gráficos foi fixado entre -0,5 m e 1 m, logo valores que não estavam nesse intervalo não foram representados, como é o caso do dia 165/2014 em alguns momentos. Em relação aos dias de alta atividade ionosférica, constatou-se que os desvios padrão obtidos com o MIBB e com o CODE foram muito parecidos, já que os valores de diferenças ficaram muito próximos de zero, principalmente entre as 5 e 20 UTC.

A Figura 63 apresenta as diferenças de discrepâncias nas coordenadas para a estação PPTE, a qual está localizada na região Sudeste do país.

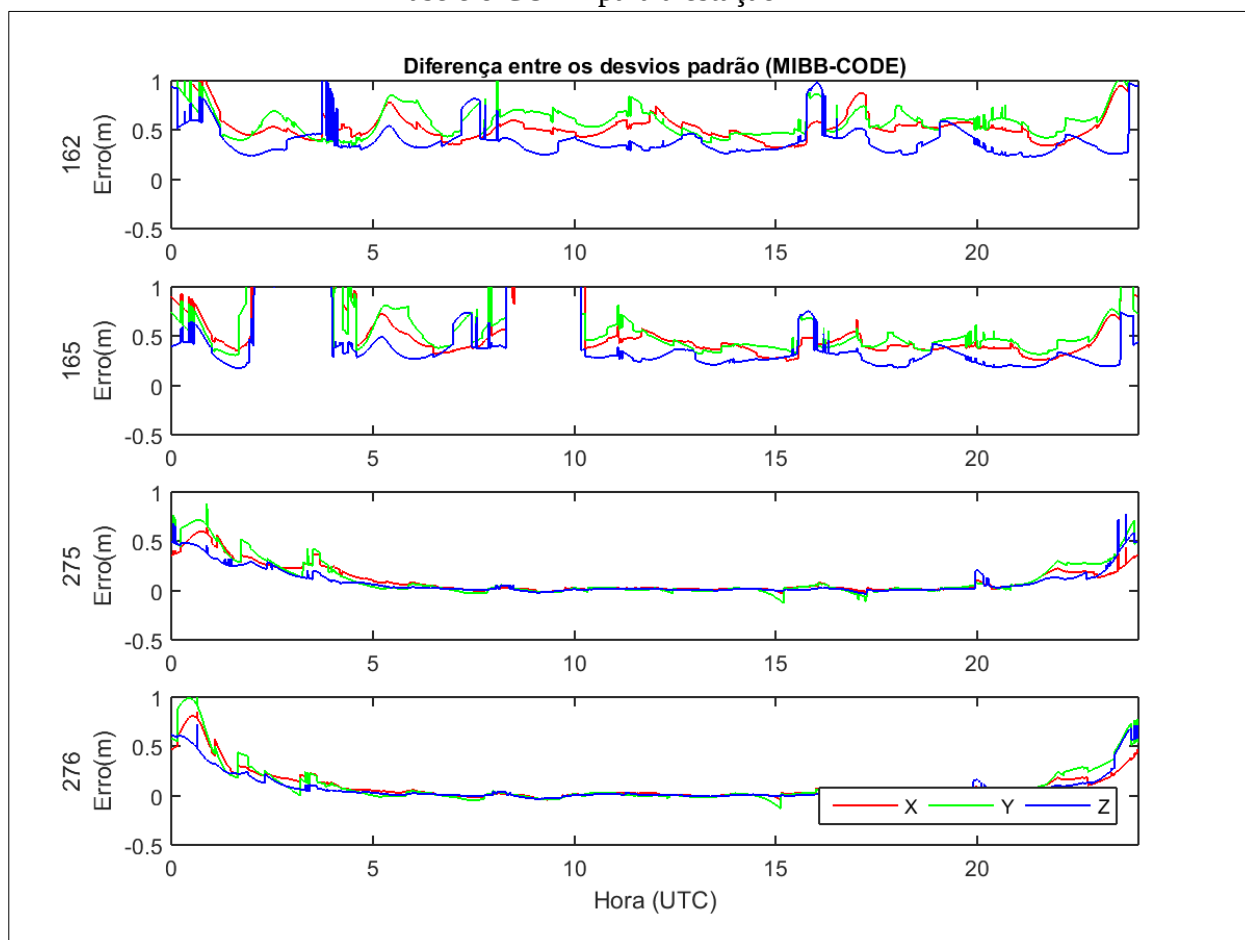
Figura 63- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação PPTE



Por meio da Figura 63 nota-se que o dia 162/2014 é o que possui os menores valores de diferenças, enquanto que o dia 165/2014 apresenta os maiores valores. Em relação aos dias de alta densidade de elétrons, nota-se que as menores diferenças estão entre as 5 e 20 UTC, entretanto os maiores valores são observados entre as 0 e 5 UTC e também após às 20 UTC .

A Figura 64 mostra os valores de diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase como observável e o CODE, para a estação PPTE, durante quatro dias, sendo eles dois dias de baixa e dois dias de alta atividade ionosférica.

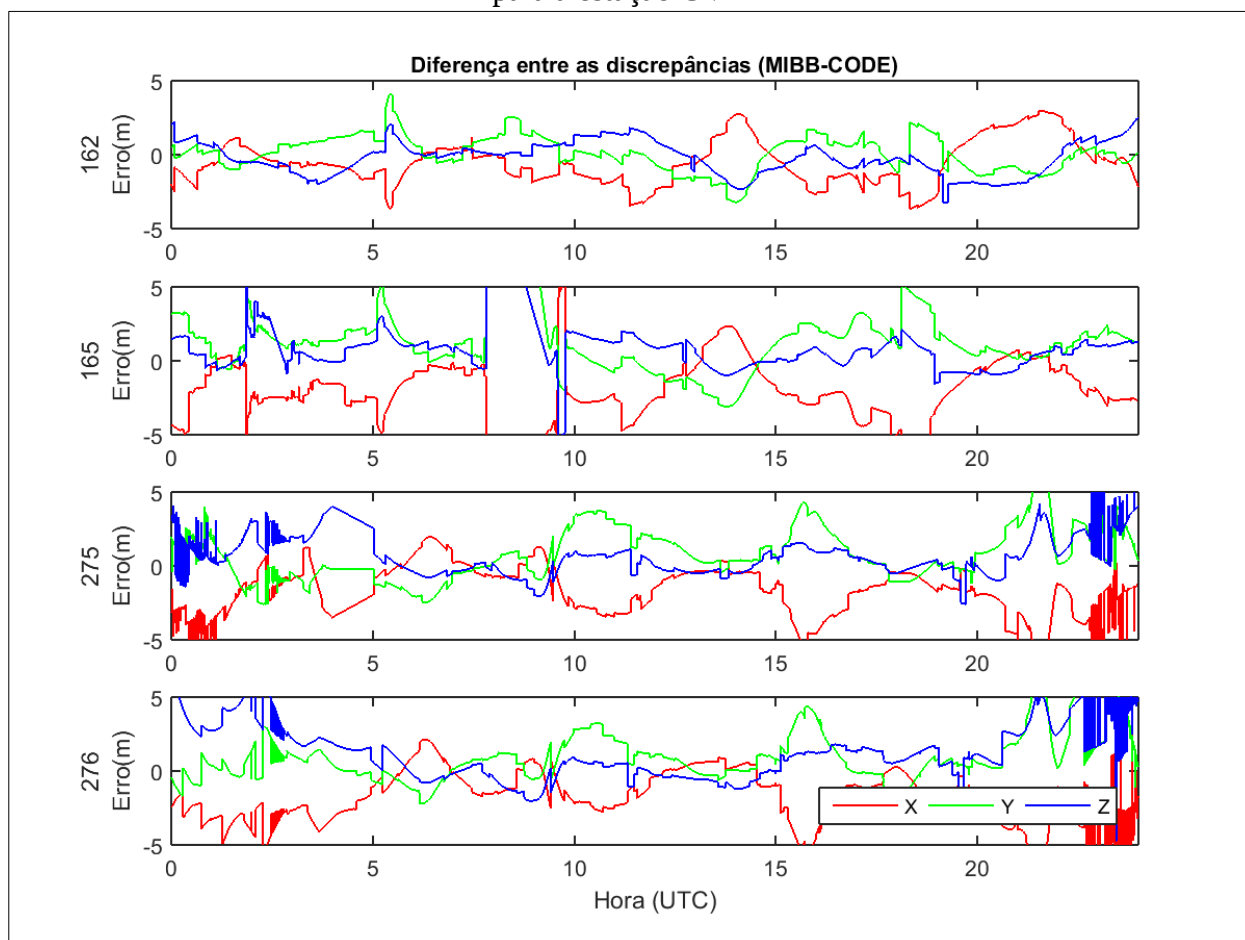
Figura 64- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação PPTE



Por meio da Figura 64 é possível observar que nos dias de alta atividade ionosférica os valores de desvios padrão nas coordenadas obtidas ao utilizar MIBB e o CODE são muito próximos, já que as diferenças estão próximas de 0 m. Diferentemente dos dias de alta atividade ionosférica, os de baixa atividade apresentaram as maiores diferenças.

A Figura 65 mostra as diferenças das discrepâncias nas coordenadas ao utilizar o MIBB e o CODE para a estação GVA1.

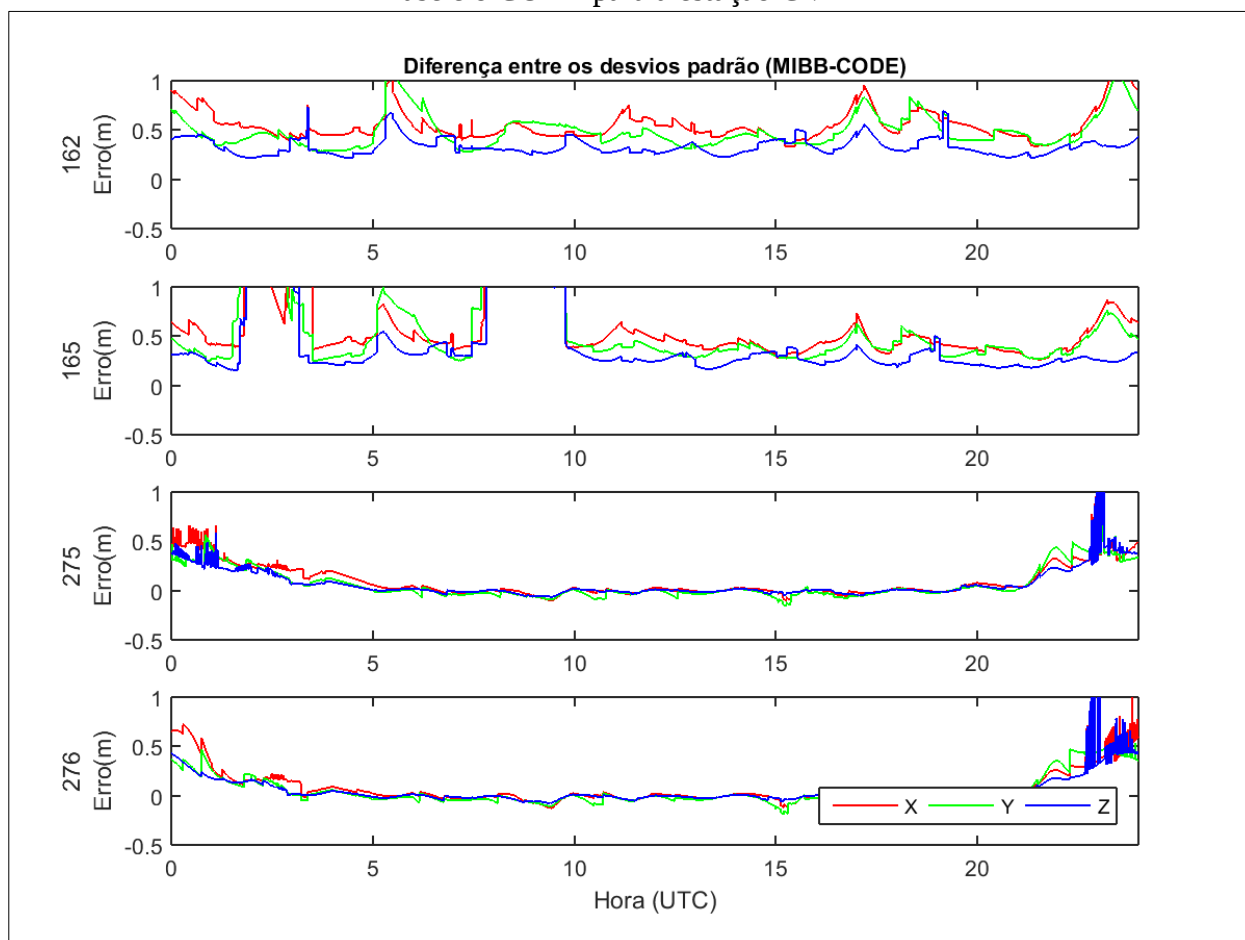
Figura 65- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação GVA1



A partir da Figura 65 observa-se que, principalmente nos dias 275 e 276 as maiores diferenças de discrepâncias são observadas entre as 0 e 5 UTC e posteriormente as 20 UTC em diante. Já o dia 162/2014 é o que apresenta os menores valores de diferenças. Porém, constata-se que nenhuma das componentes teve um comportamento padrão nos dias analisados.

A Figura 66 mostra a diferença entre os desvios padrão obtidos com o MIBB e com o CODE para a estação GVA1.

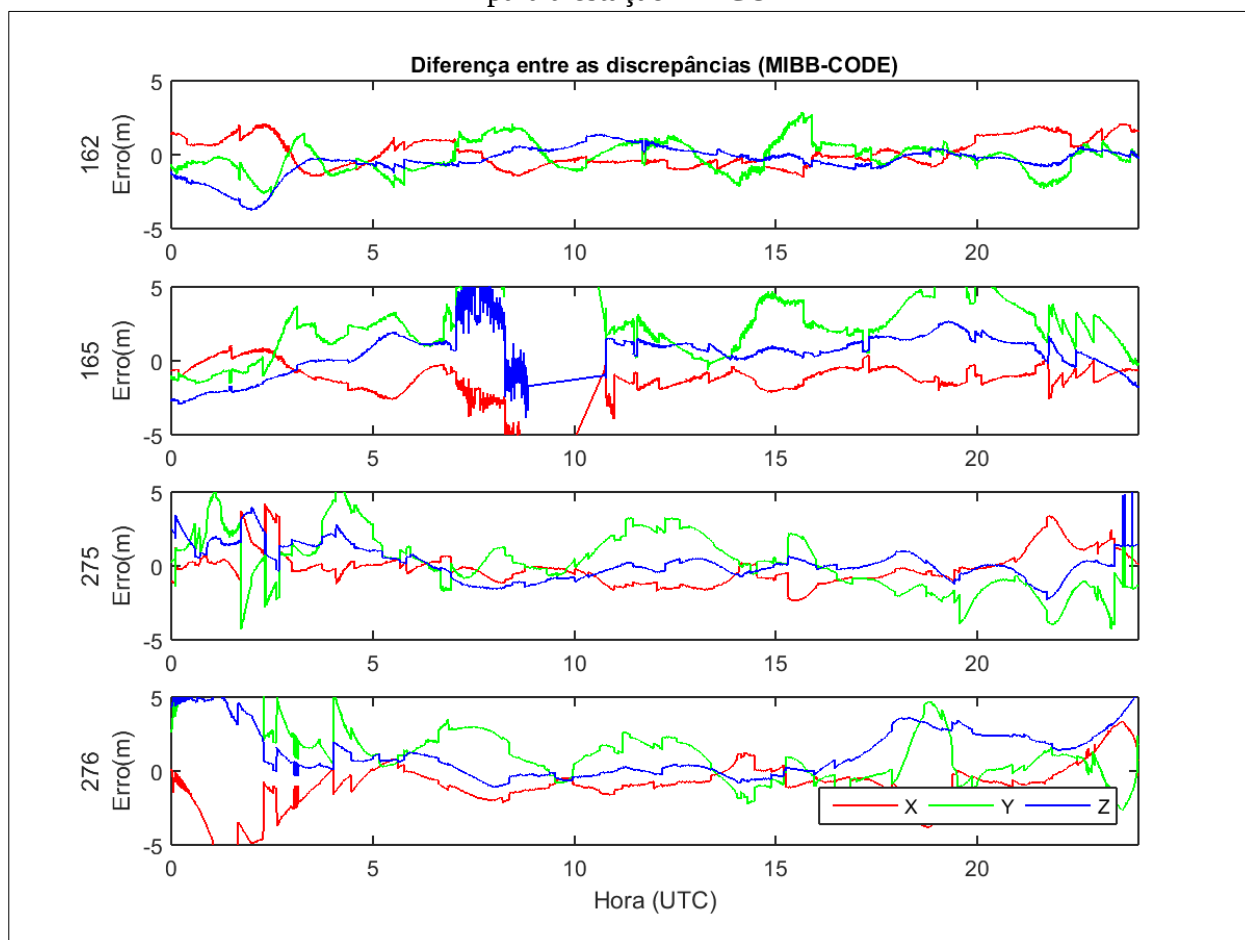
Figura 66- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação GVA1



Nota-se na Figura 66 que nos dias 275 e 276 do ano de 2014, os maiores valores de diferenças estão localizados no início e no final dos gráficos, já os dias 162/2014 e 165/2014 não apresentam o mesmo comportamento.

A Figura 67 mostra as diferenças entre as discrepâncias nas coordenadas ao utilizar o MIBB e o CODE para a estação AMCO.

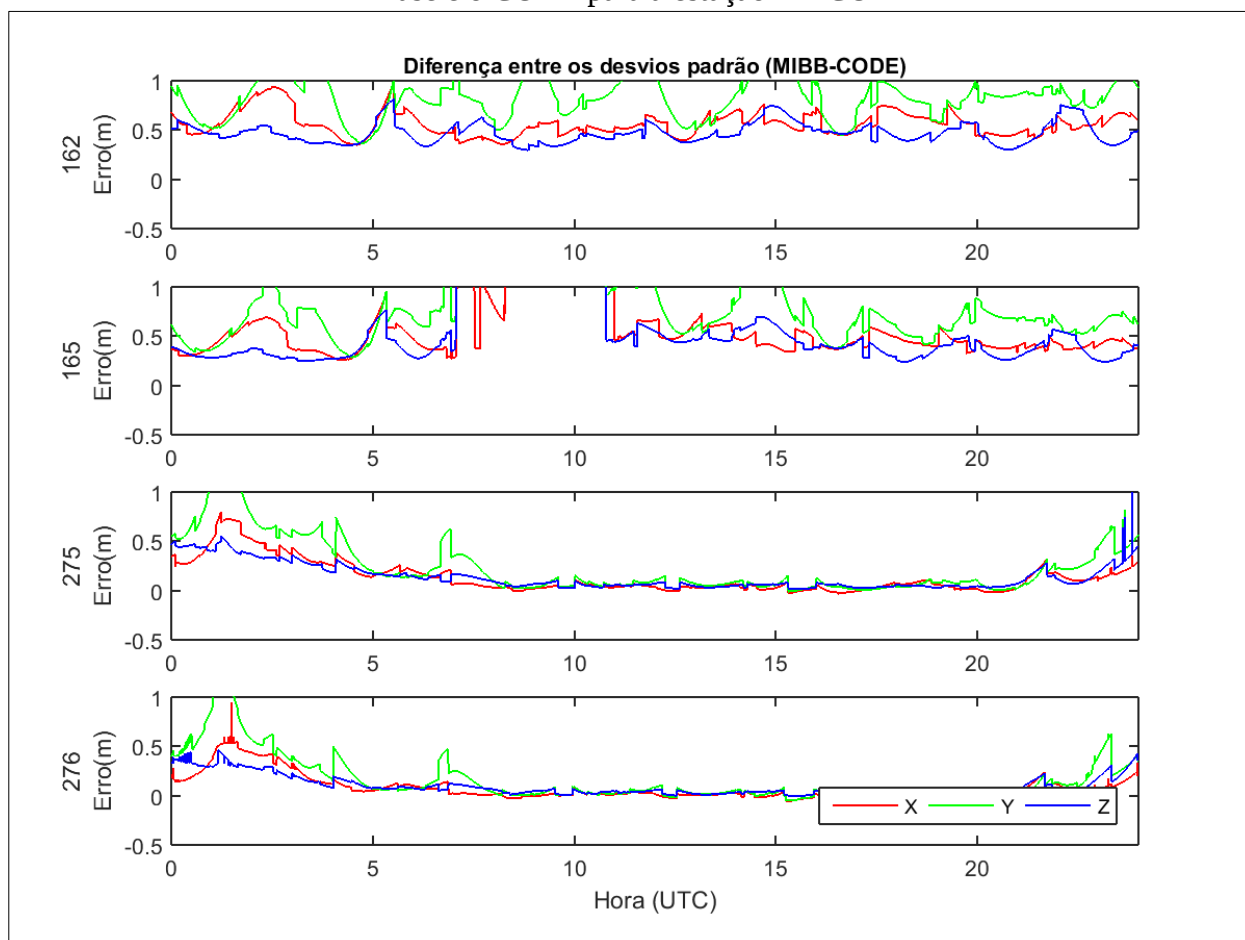
Figura 67- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação AMCO



Por meio da Figura 67 nota-se que o dia 165/2014 apresenta uma falha entre as 5 e 11 UTC. Além disso, o dia 162/2014 teve os menores valores de diferença.

A Figura 68 mostra a diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e com o CODE para a estação AMCO.

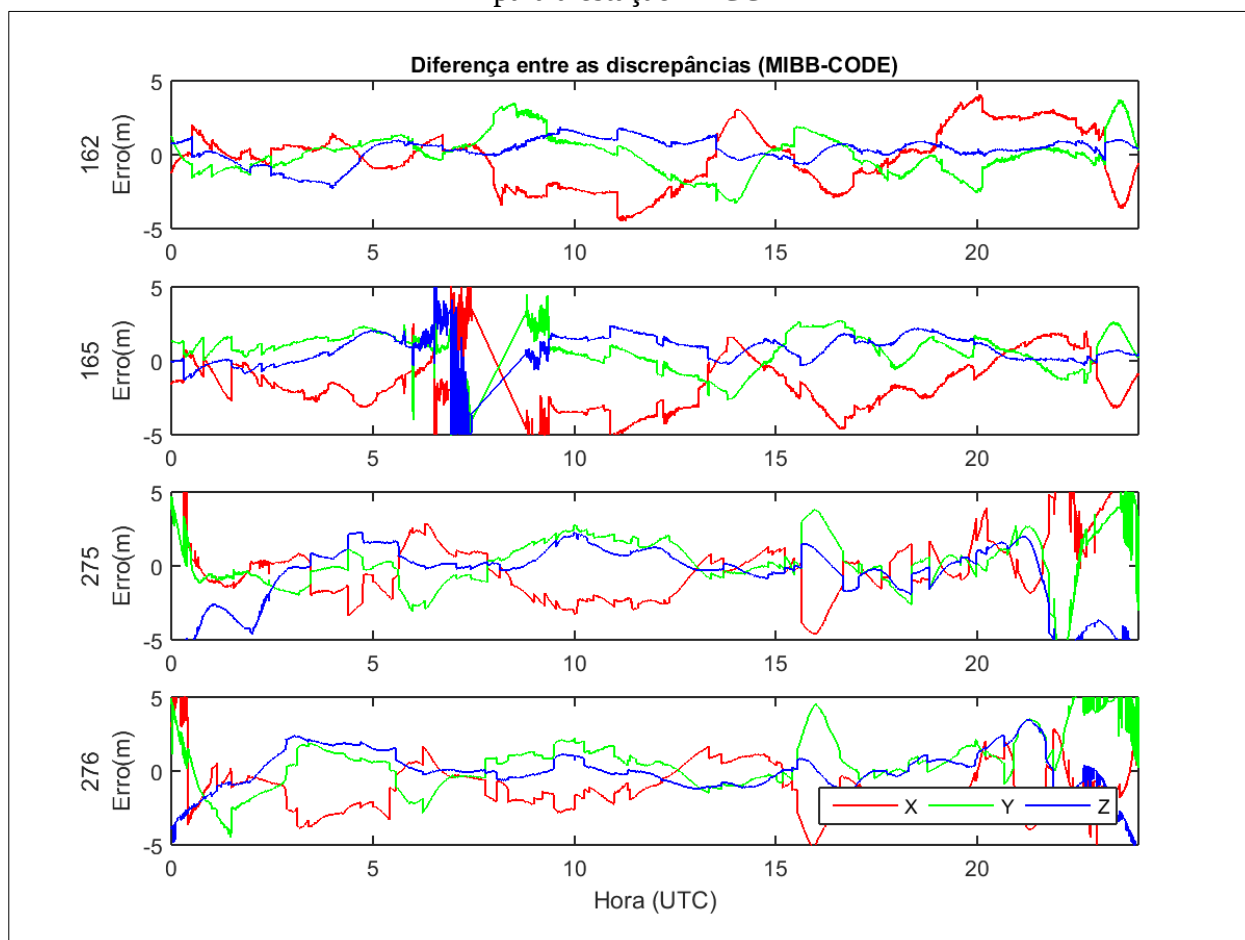
Figura 68- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação AMCO



A partir da Figura 68 é possível observar que nos dias 162/2014 e 165/2014 a componente Y é a que apresenta os maiores valores de diferenças. Os dias 275/2014 e 276/2014 apresentam um comportamento similar entre si, onde as maiores diferenças estão localizadas no início e no fim dos dias.

A Figura 69 apresenta as diferenças entre as discrepâncias nas coordenadas ao utilizar o MIBB e o CODE para a estação PBCG.

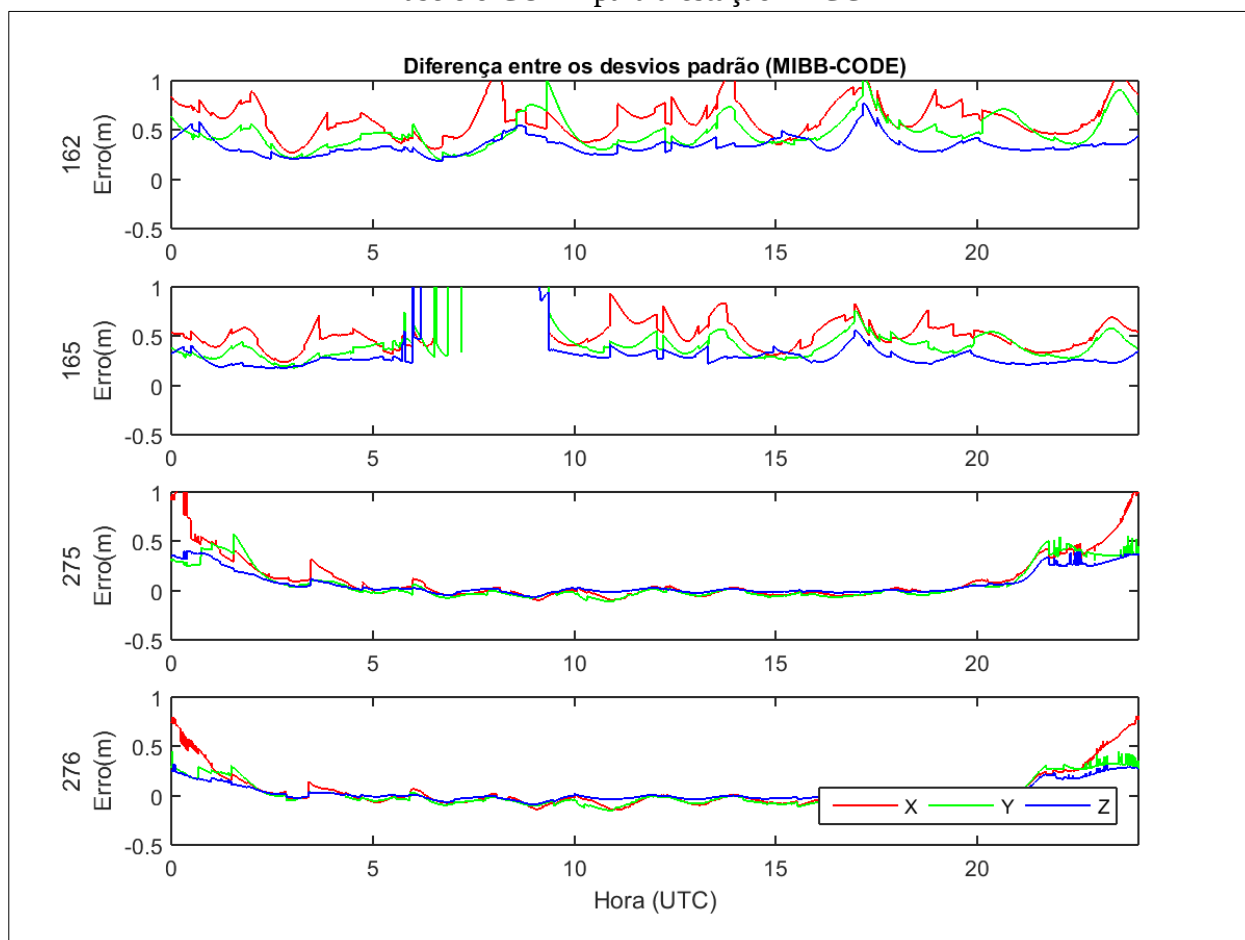
Figura 69- Diferença entre as discrepâncias ao utilizar o MIBB obtido a partir da fase e o CODE para a estação PBCG



Ao realizar uma análise na Figura 69 constata-se que nos dias 275/2014 e 276/2014 a amplitude das diferenças das discrepâncias é maior no começo e no final do dia. Além disso, o dia 165/2014 possui uma falta de dados entre as 5 e as 10 UTC.

Já a Figura 70 apresenta as diferenças entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB e com o CODE, nos dias 162, 165, 275 e 276 do ano de 2014, para a estação PBCG.

Figura 70- Diferença entre os desvios padrão das coordenadas obtidas com o MIBB ao utilizar a fase e o CODE para a estação PBCG



Por meio da Figura 70 observa-se que os dias 162/2014 e 165/2014 apresentam as maiores diferenças, enquanto que os dias 275/2014 e 276/2014 trazem as menores.

Por fim, em relação as diferenças de discrepâncias pôde-se notar que nas 5 estações analisadas, as mesmas não apresentaram um comportamento padrão, além disso, o dia 165/2014 foi o que teve as maiores diferenças.

Já em relação as diferenças de desvios padrão, observou-se que nas cinco estações os dias de baixa atividade ionosférica apresentaram os maiores valores, enquanto que os dias de alta atividade densidade de elétrons tiveram os menores. Além disso, os maiores valores de diferenças puderam ser observados no início e no final dos dias, muito provavelmente devido a cintilação ionosférica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

A cada dia surgem mais atividades em que há a necessidade do homem realizar posicionamento com alta acurácia, logo é de suma importância que a ionosfera seja modelada, já que a mesma é uma das principais fontes de erros no posicionamento. Sendo assim, diversos modelos têm sido desenvolvidos, com o intuito de minimizar os efeitos causados pela ionosfera.

Neste contexto, inicialmente foi realizada uma revisão das principais observáveis do GPS, além de uma revisão de conceitos relacionados a ionosfera na propagação de sinais GNSS, bem como as variações que o TEC pode sofrer. Em seguida, foram apresentadas as principais ferramentas disponíveis utilizadas nacionalmente para o monitoramento da ionosfera. Foi destacado também alguns mapas globais e regionais da ionosfera utilizados a fim de minimizar os efeitos ocasionados pela ionosfera. Posteriormente, foi descrita a metodologia desenvolvida para processamento e análise dos resultados obtidos durante essa pesquisa.

O primeiro processamento realizado no Bernese 5.2 utilizou como observável somente a pseudodistância. De acordo com os resultados obtidos foi possível observar que de fato o mês de junho é um mês de baixa atividade ionosférica, enquanto que o mês de outubro apresentou alta densidade de elétrons, principalmente às 18 horas UTC. Ainda sobre os dias do mês de outubro, foi possível observar o deslocamento da anomalia equatorial de leste para oeste sobre o território brasileiro.

Quando comparado os MIBBs obtidos a partir da pseudodistância, com os mapas disponibilizados pelo CODE, constatou-se que os dias com maior atividade ionosférica foram os que apresentaram as maiores diferenças nos valores de VTEC. Além disso, obteve-se muitos valores negativos, o que indica que os valores disponibilizados pelo CODE são maiores do que os MIBBs.

Posteriormente aplicaram-se os MIBBs e os mapas do CODE no software de RTKLIB, a fim de avaliar ambos no posicionamento nas cinco regiões brasileiras. De acordo com os resultados obtidos, foi possível notar que as diferenças entre as discrepâncias nas coordenadas ao se aplicar o MIBB e o CODE não apresentam um comportamento padrão. Já no que diz respeito as diferenças entre os desvios padrão, na maioria das estações estudadas e nos dias analisados, os valores dos desvios padrão obtidos com o MIBB foram menores quando comparados com os do CODE.

Foi possível comparar também os valores de DCBs (*Differential Code Bias*) gerados pelos MIBBs com os disponibilizados pelo CODE das estações pertencentes a rede IGS, que foram utilizadas na geração dos mapas ionosféricos. Sendo que a diferença média entre os valores de DCBs foi de aproximadamente 1,70 ns.

Gerou-se também MIBBs a partir da observável fase, porém não foi possível gerar os arquivos no formato IONEX para todos os dias selecionados. Isso ocorreu devido ao número de observações ser insuficiente na maioria dos dias. Uma possível razão é o número de observações com baixo ângulo de elevação, além de dados com poucas observações/ qualidade ruim. Sendo que muitas observações foram removidas na etapa de controle de qualidade automatizado do Bernese 5.2.

Mesmo tendo poucos dias de MIBBs obtidos por meio da fase, foi feita a comparação de quatro dias com os mapas disponibilizados pelo CODE. Em relação aos dois dias do mês de junho, foi possível observar que no dia 165 houve os maiores valores de diferenças de VTEC, quando comparado com o dia 162/2014. Enquanto que nos dias do mês de outubro, os horários que tiveram os maiores valores de diferença foram as 0, 2, 4 e 22 UTC, tanto no dia 275/2014 quanto no dia 276/2014.

Em seguida, os MIBBs obtidos com a fase e os do CODE foram aplicados no software de RTKLIB, com o objetivo avaliar a performance dos dois no posicionamento nas cinco regiões do Brasil. A partir dos resultados obtidos, foi possível notar que, as diferenças de discrepâncias nas 5 estações não apresentaram um comportamento padrão, além disso, o dia 165/2014 foi o que teve as maiores diferenças. No que diz respeito as diferenças de desvios padrão, observou-se que nas cinco estações os dias de baixa atividade ionosférica apresentaram os maiores valores, enquanto que os dias de alta atividade densidade de elétrons tiveram os menores. Além disso, os maiores valores de diferenças puderam ser observados no início e no final dos dias.

De maneira geral, pode-se dizer que esta pesquisa contribuiu com o desenvolvimento científico do país, já que a mesma utilizou um software de alta performance, empregado mundialmente, na geração de mapas ionosféricos regionais, os quais apresentaram uma qualidade satisfatória. Além disso, no Brasil ainda não haviam trabalhos que explorassem esse software com a finalidade de gerar mapas ionosféricos.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos e sabendo que ainda há muito o que se explorar quando se trata de um software de alta performance, é possível deixar algumas recomendações e possibilidades para trabalhos futuros:

- Gerar mapas ionosféricos para mais períodos de dados;
- Comparar os MIBBs com outros centros além do CODE;
- Explorar a geração de MIBBs com a observável fase;

REFERÊNCIAS

AIUB. Disponível em: < <https://www.aiub.unibe.ch/> >. Acesso em: jan. 2020.

AGUIAR, C. R. **Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS**. 2010. 256 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

AQUINO, M; MONICO, J. F. G.; DODSON, A.; MARQUES, H. A. Mitigating the effects of ionospheric scintillations on position estimates. In: invited presentation to the 3rd European Space Weather Week, Brussels, 13–17 November, Proceedings... 2006.

BARBOSA NETO, Paulo F. A camada ionosférica F3. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2-3, p. 230-231, 1999.

BERN. *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Astronomical Institute, University of Bern. 2015, 852 p.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CAMPOS, M.A.; WANNINGER, L.; SEEBER, G.. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: III Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica – Resumos Expandidos, Rio de Janeiro/RJ, p.601-604, 7 a 11 de novembro, 1993.

CIGALA/CALIBRA. Disponível em: <<http://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/>>. Acesso em: 14 fev. 2020

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 et al., 2015. Bernese GNSS software version 5.2, Astronomical Institute, University of Bern, 612p.

DAL POZ, W.R. Análise do Modelo regional da ionosfera (Mod_Ion) no período de máxima atividade solar e produção de mapa da ionosfera. Relatório de Iniciação Científica Fapesp - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

DAL POZ, W. R. **Investigações Preliminares Sobre A Influência Do Clima Espacial No Posicionamento Relativo Com GNSS**. 2010. 160p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DAVIES, K. *Ionospheric radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; MUELLA, M. T. H.; CAMPOS, A. A. N.; SMORIGO, P. F.; NETO, A. C. Characteristics of the low latitude ionospheric irregularities

and their effects over GPS signal. Ionospheric scintillation: Scientific Aspects Space Weather and Services Workshop. Nottingham, Proceedings... 2008.

EL GIZAMY, M. L. **Development of an Ionosphere Monitoring Technique Using GPS Measurements for High Latitude GPS Users**. 2003. 173. Msc thesis - Department of geomatics engineering, UCGE report n°20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

FEDRIZZI, Mariangel. Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS. **Revista Brasileira de Geofísica**, 1999, 17.2-3: 221-221.

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

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 176p.

HARGREAVES JK. 1992. The solar-terrestrial environment. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 420 p.

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

IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em : Jun.2019

ICAO. Fifth Coordination Meeting of RLA/00/009 Project – GNSS Augmentation Trials. 2006. 155f. Report RCC/5-RLA/00/09. ICAO, Lima, 2006.

INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/scintec/pt/>>. Acesso em : Jun.2019

IGS. Disponível em: <http://www.igs.org/>. Acesso em: 20.jan.2020.

JAKULSKI, T.; AVEIRO, H.C.; MOOR, L.P.; DENARDINI, C.M.; MURALIKRISHNA, P.; SCHUCH, N.J. Estudo do plasma ionosférico da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) utilizando Riômetros. In: XXI Congresso de iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia: Anais. 2006

KIRCHHOFF, V. W. J. H. Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.

KOMJATHY, A. Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System. 1997. 248 f. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

LANGLEY, R. B. What's in Store for the Next Solar Maximum?. By Anna B.O. Jensen and Cathryn Mitchell. GPS World – Innovation: GNSS and the Ionosphere, 2011. <http://gpsworld.com/innovation-gnss-and-ionosphere-11036/>. Acesso em Jun. 2019.

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, New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 56, n. 1, 2004. pp. 14-27

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.. Correção ionosférica utilizando os mapas globais do TEC do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2007, 13.2.

MATSUOKA, M. T. et al. Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 1, 2013.

MATSUOKA, M. T.. **Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

McNamara, L.F.. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Kriger Publishing Company, 1991. 237p.

MENDONÇA, M. A. M. **Investigando a cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. 2013. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G.. Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

MUELLA, M. T. A. H.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; SMORIGO, P. F. Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum – magnetic quiet and disturbed conditions. *Advances in Space Research*, v. 43, n. 12, p. 1957-1973, June 2009.

OLIVEIRA, A. B. V. Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2003. 167p.

PENHA, J. W. ; ORIHAN, M.. Mapas do efeito ionosférico nas observáveis GPS pelo parâmetro VTEC no declínio do ciclo de manchas solares no Brasil. In: XVI SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu - PR. Anais do 16º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos - SP: MCT/INPE, 2013. p. 1899- 1907.

POWELL, J. D.; WALTER, T. Space Weather: Its Effect on GNSS, DGNSS, SBAS and Flight Inspection. In: *International Flight Inspection Symposium (IFIS)*, Beijing, China, jun. 2010.

RIBEIRO, T. F. K.; DANTAS, V.N.; GODOI, C E. M.; AGUIAR, C. R.. Análise da qualidade do mapa ionosférico IONEX gerado pelo modelo ionosférico GIB no ciclo solar 24. 2017.

RODRIGUES, F. S. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS**. 2003. 175 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, v. 62, n. 15, 1337–1383, Oct. 2000.

SANTOS, P. M. T. **Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileira**. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. 117p.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy*. 2nd. ed. Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SEO, J. *Overcoming Ionospheric Scintillation for Worldwide GPS Aviation*. 2010. 136f. Ph.D Dissertation - Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.

SILVA, H. A. **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2009.

SIRGAS. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/>>. Acesso em : Jun.2019

SKONE, S. Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region. Dissertation PhD in Science, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, 1998. 198p.

SUBIRANA, J.S.; ZORNOZA, J.M.J.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M. *Global Navigation Satellite Systems, Volume I: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communications ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, p 238. 2013.

TAKAHASHI, H., Wrasse, et al. Ionospheric TEC Weather Map Over South America. *Space Weather*, Vol. 14, No. 11, 2016, pp. 937–949. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016SW001474>>. Acesso em: Nov. 2018

TAKASU, Tomoji. RTKLIB ver. 2.4. 2 Manual. **RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning**, p. 29-49, 2013.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. **WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region**. *IEEE*, 2011. Disponível em: <<http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/FG-4.pdf>>. Acesso em: 10 dez.2013.

VANI, B. **Análise da Cintilação Ionosférica no Brasil empregando GNSS e Técnicas de Mineração e Visualização de Dados**. 2014.139f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR query tool. *Computers & Geosciences*, Elsevier, v. 104, p. 125–134, 2017. doi:10.1016/j.cageo.2016.08.022.

WANNINGER, L.. Effects of the equatorial ionosphere on GPS. GPS World, v.4, n.7, p.48-54, Jul. 1993.

WEBSTER, I. A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System. M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canadá. 1993.

APÊNDICE A- SOFTWARE BERNESE

O Bernese *GPS Software* foi lançado em março de 1988 já em sua versão 3.0 pois sucedeu o Bernese *Second Generation GPS Software*. Cinco atualizações da versão 3.0 foram disponibilizadas até que em setembro de 1996 a versão 4.0 foi lançada. Esta última versão apresentou melhorias com relação as versões anteriores, tendo como grandes diferenciais: o aplicativo ADDNEQ, o qual tinha como objetivo gerar uma solução final da rede GPS combinando as várias soluções disponíveis ao nível das equações normais; e o BPE (*Bernese Processing Engine*) que permite a automatização dos processamentos (BERN, 2015).

Já em novembro de 1999 foi lançada a versão 4.2, na qual foram inseridas as observáveis GLONASS nos processamentos junto aos sinais GPS. Além disso, foi possibilitado o uso das observações SLR (*Satellite Laser Ranging*) dos satélites GNSS e foi substituído o ADDNEQ pelo ADDNEQ2 para o cálculo de uma solução final (BERN, 2015).

Todas as versões citadas até o momento trabalhavam por meio de comandos escritos por um usuário baseados em lógica de programação. Com o intuito de facilitar o uso do software, a versão 5.0 do Bernese foi criada em abril de 2004 possuindo uma interface gráfica GUI (*Graphical User Interface*), baseada da biblioteca Qt. Essa versão contou também com o aprimoramento do BPE e a capacidade de determinação de órbitas não somente dos satélites GNSS mas também os LEO (BERN, 2015).

Todas essas atualizações introduziram, além dos descritos, diversos melhoramentos e culminaram no desenvolvimento da última versão disponível atualmente, o Bernese GNSS *Software* 5.2. Alguns destes melhoramentos em destaque são (BERN, 2015):

- aplicativo FODITS que serve para encontrar *outliers* (erros “grosseiros”) e descontinuidades em uma série temporal;
- resolução de ambiguidades GLONASS;
- modelos novos para a troposfera: GMF/GPT e VMF1;
- inclusão dos termos de 2ª e 3ª ordem do erro devido a ionosfera a fim de minimizar a magnitude de seu efeito;
- inclusão das correções da carga atmosférica e do centro de massa para os oceanos.

O Bernese possui grandes vantagens com relação a outros softwares de processamento GNSS. Uma dessas é a possibilidade de customizações que um usuário pode fazer em seus procedimentos, pois, uma vez adquirida a licença do software, tem-se o código aberto para que sejam feitas alterações e atualizações tanto na estrutura do software quanto em procedimentos para o processamento dos dados. São disponibilizados alguns *scripts* de procedimentos padrão

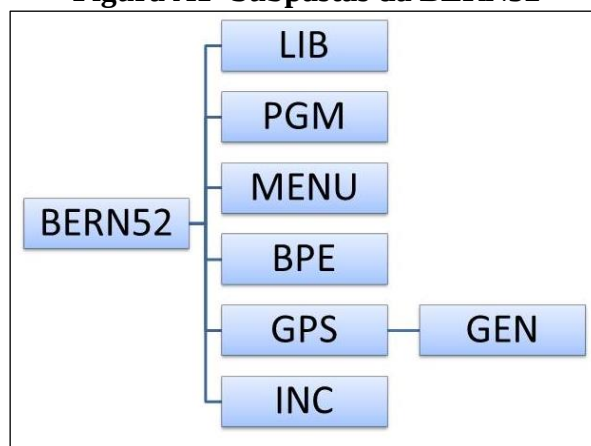
onde o usuário deve introduzir seus dados nas pastas corretas e, com os nomes conforme o padrão do *script*, o software consegue importar todos os dados de forma a executar os processamentos necessários (BERN, 2015). Também é possível criar seus próprios *scripts* de processamento de dados.

O processamento dos dados no Bernese é feito por meio de campanhas sendo cada uma processada individualmente. Nas campanhas são utilizados arquivos de observações GNSS, além de muitos outros arquivos de entrada disponibilizados por diversos centros nacionais e internacionais, como por exemplo: efemérides precisas, parâmetros de orientação da Terra, arquivos de correção dos efeitos atmosféricos, entre outros.

Para entender melhor o processamento de uma campanha, primeiramente é necessário conhecer a estrutura de pastas existentes no Bernese e de suas campanhas, pois cada arquivo deve estar em determinados diretórios para que o software possa selecionar os arquivos corretamente.

Ao instalar o programa tem-se um usuário principal do Bernese além de outros usuários, sendo que dentro de cada usuário são geradas outras três pastas: BERN52, GPSUSER52 e GPSDATA, sendo que cada uma destas pastas será apresentada individualmente na Figura A1, Figura A2 e Figura A3, respectivamente.

Figura A1- Subpastas da BERN52

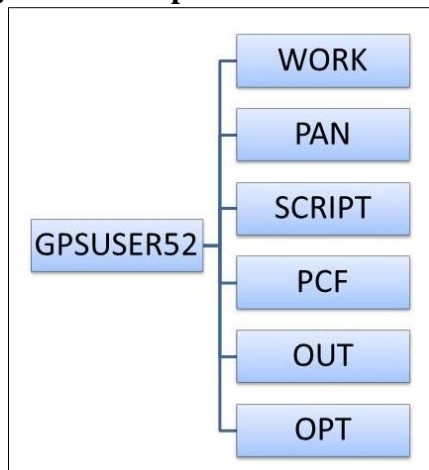


A pasta BERN52 possui diversos códigos fonte escritos em linguagem C++ e Fortran que estão ligados ao funcionamento do programa e suas ações básicas. Para o usuário de processamento de dados a pasta de maior importância é a GPS. Embora existam outras pastas dentro da pasta GPS, destaca-se a pasta GEN.

A pasta GEN contém arquivos gerais que são necessários em diversos aplicativos do Bernese, como: arquivo de calibração das antenas, arquivos de informações dos satélites,

definições de constantes utilizadas; entre outros. Essa pasta está disponível *on-line* no FTP⁷ (*File Transfer Protocol*) do Bernese, pois é constantemente atualizada a fim de que os usuários possam transferir para seus próprios computadores os novos arquivos adicionados e estarem fazendo seus processamentos sob as melhores condições possíveis.

Figura A2- Subpastas da GPSUSER52

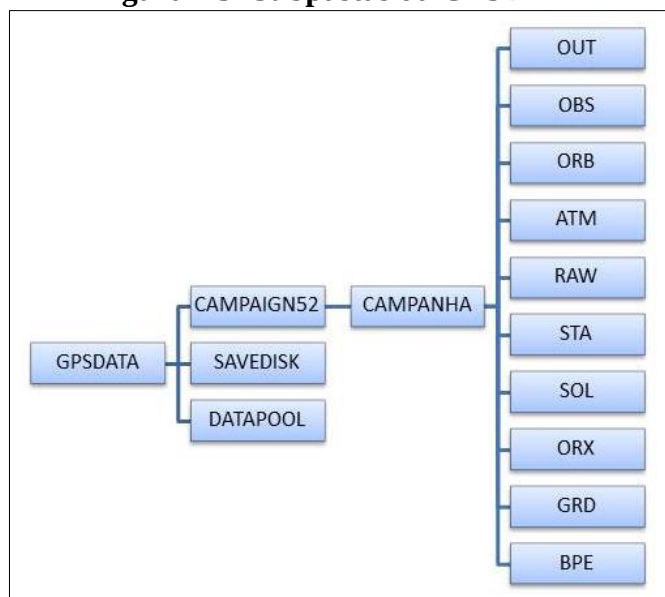


Em relação a pasta GPSUSER52 (Figura A2), destaca-se a subpasta PAN, a qual contém todas as configurações que são utilizadas em cada aplicativo do Bernese. Quando um usuário utiliza o GUI do software e entra em algum aplicativo para escolher suas configurações, na verdade o que é feito é a mudança de informações sobre os arquivos da pasta PAN com o nome do aplicativo que está sendo utilizado.

Os processos automatizados do Bernese, são feitos por meio de arquivos presentes na pasta PCF. São *scripts* informando quais aplicativos o software deve utilizar e a ordem do uso destes aplicativos. Também é possível informar variáveis de ambiente para a escolha da configuração que será utilizada.

Por último tem-se a pasta GPSDATA, a qual é referente as campanhas que serão trabalhadas no Bernese. A subpasta CAMPAIGN52 é a principal, pois nela ficam armazenadas as campanhas e os arquivos referentes aos processamentos das mesmas.

⁷ <http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/GEN/>

Figura A3- Subpastas da GPSDATA

Dentro de cada campanha, existem outras dez pastas, sendo que cada uma delas tem uma finalidade:

- OUT- arquivos reportando os processamentos feitos por cada aplicativo;
- OBS- armazena arquivos de observação dos dados no formato Bernese;
- ORB- armazena arquivos de órbita e ERP;
- ATM- armazena arquivos referentes a troposfera e ionosfera;
- RAW- armazena arquivos RINEX que são utilizados no processamento de dados;
- STA- armazena arquivos relacionados as estações presentes na campanha;
- SOL- arquivos relacionados a solução (NEQ e SINEX);
- ORX- local onde os arquivos RINEX originais devem ser reportados;
- GRD- arquivos de grid; e
- BPE- arquivos gerados do processamento de um script PCF.