



CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR

**GRADE IONOSFÉRICA PARA APLICAÇÕES EM
POSICIONAMENTO E NAVEGAÇÃO COM GNSS**

Tese de Doutorado

**Presidente Prudente
2010**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR

**GRADE IONOSFÉRICA PARA APLICAÇÕES EM
POSICIONAMENTO E NAVEGAÇÃO COM GNSS**

**Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Ciências Cartográficas da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da
UNESP, para obtenção do título de Doutor
em Ciências Cartográficas.**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo de Oliveira
Camargo**

**Presidente Prudente
2010**

A228g Aguiar, Claudinei Rodrigues de.
Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS / Claudinei Rodrigues de Aguiar. - Presidente Prudente : [s.n], 2010
xiii, 256 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Orientador: Paulo de Oliveira Camargo

Banca: Paulo de Oliveira Camargo, Aluir Porfírio Dal Poz, Marcelo Tomio Matsuoka, Edvaldo Simões da Fonseca Junior, Mauricio Alfredo Gende

Inclui bibliografia

1. GNSS. 2. Ionosfera. 3. Tempo Real. I. Autor. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

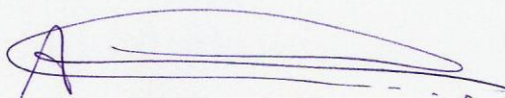
CDD 621.71

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

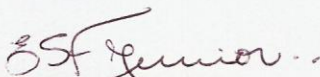
Orientador



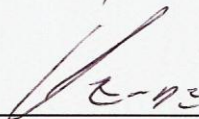
Prof. Dr. ALUIR PORFÍRIO DAL POZ
(FCT/UNESP)



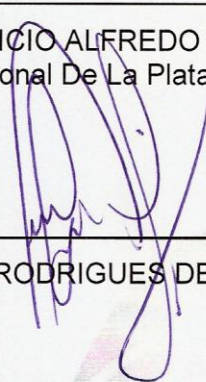
Prof. Dr. MARCELO TOMIO MATSUOKA
Universidade Federal de Rio Grande do Sul



Prof. Dr. EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JUNIOR
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



Prof. Dr. MAURICIO ALFREDO GENDE
Universidade Nacional De La Plata/Argentina



CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 20 DE SETEMBRO DE 2010

RESULTADO: APROVADO

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa, Michele Carvalho de Aguiar, pelo apoio e incentivo. Pela compreensão pelos momentos de dedicação aos estudos.

Ao meu filho, José Lucas Carvalho de Aguiar, minha inspiração e minha força. Pelos simples sorrisos que coloreem a minha vida.

Aos meus pais, José Rodrigues de Aguiar (em memória) e Sebastiana da Costa Aguiar, pelo incentivo, exemplo de conduta e pela luta de toda uma vida para que eu tivesse acesso à educação. Pai, você conseguiu!

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à DEUS, por esta presente na minha vida e da minha família.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo, pela oportunidade, incentivo e confiança.

Aos professores Dr. João Francisco Galera Monico e Dr. Aluir Porfirio Dal Poz e ao pesquisador Francisco Azpilicueta, pelas valiosas sugestões no exame de qualificação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro nessa pesquisa, sob a forma de bolsa de demanda social e reserva técnica. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro, por meio do Edital Universal.

Aos professores do Departamento de Cartografia e do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, pela competência e qualidade de ensino proporcionado aos alunos. Aos funcionários da FCT que de forma direta ou indireta contribuíram no desenvolvimento dessa Tese.

Ao GEGE (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial), pelos ensinamentos e proveitosas discussões nas tardes de sexta-feira. Aos companheiros nos estudos e discussões sobre a ionosfera, William Rodrigo Dal Poz e Marcelo Tomio Matsuoka. Ao amigo Marco Aurélio de Oliveira Silva e a todos os amigos do PPGCC, pelas discussões, conversas, momentos de descontração e ajuda.

Ao IBGE, pelo fornecimento dos dados GNSS das estações da RBMC/RIBaC. Ao Laboratório de Geodésia Espacial (LGE) da FCT/UNESP, que disponibiliza dados da Rede GNSS do Estado de São Paulo em tempo real. Ao IGS (Serviço GNSS Internacional), pelo fornecimento das efemérides, e ao NRCan (Departamento de Recursos Naturais do Canadá), pela cópia do software GPSPACE e sua documentação.

Aos professores do CELSA, local onde estudei da pré-escola até o 3º Colegial (1985 a 1996), pelos ensinamentos que formaram uma base sólida, que permitiu o meu ingresso na Universidade sem a necessidade de um curso pré-vestibular.

Aos amigos da minha cidade, ao Nino (Tio Nino), pelos mais de 20 anos de amizade. Aos primos-irmãos André e Rozeane pela amizade sincera, pelos momentos de descontração e pelo apoio incondicional.

Aos meus pais, José (em memória) e Sebastiana, que sempre me incentivaram e me apoiaram, pela luta e esforço que fizeram para que eu me dedicasse aos estudos. Ao meu

afilhado Marcos Paulo, companheiro “Santista”. Meu pai que nesta reta final, não está presente para ver o resultado daquilo que ele humildemente plantou, mas sei que ele está orgulhoso. Por fim, a minha esposa, Michele, e ao meu filho, José Lucas, por sempre estarem comigo em todos os momentos. A minha esposa, pela paciência e compreensão pelos momentos importantes que não estive presente, e que apesar das dificuldades sempre acreditou, apoiou e confiou em mim, e meu filho, que simplesmente não tenho como expressar aqui a sua importância na minha vida.

EPÍGRAFE

"Sempre que te perguntarem se podes fazer um trabalho, responde que sim e te ponhas em seguida a aprender como se faz."

F. Roosevelt

"A descoberta consiste em ver o que todo mundo viu e pensar o que ninguém pensou."

A. Szent-Gyorgyi

RESUMO

O efeito da ionosfera é a maior fonte de erro sistemático nos sinais transmitidos pelos satélites do GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), o qual afeta principalmente a acurácia do posicionamento e navegação pelo GNSS quando se utiliza de receptores de simples frequência. Este erro sistemático é diretamente proporcional ao TEC (Conteúdo Total de Elétrons) presente ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência deste sinal. Devido à natureza dispersiva da ionosfera, o TEC pode ser determinado a partir das observáveis coletadas com receptores GNSS de dupla frequência, possibilitando o monitoramento e a modelagem da ionosfera. Atualmente, os usuários de receptores de simples frequência podem corrigir o erro sistemático devido à ionosfera utilizando modelos como o de Klobuchar, o NeQuick, os GIMs (Mapas Globais da Ionosfera), entre outros. Neste trabalho é apresentado um método para gerar uma Grade Ionosférica (GI) e seu nível de confiança (GIVE), a fim de melhorar a acurácia em aplicações de posicionamento e navegação pelo GNSS, além de fornecer uma ferramenta que possa ser utilizada na área de estudos da ionosfera. Para a geração da GI também é apresentado um método de decomposição da camada ionosférica em subcamadas, a fim de minimizar o impacto do gradiente espacial do TEC na modelagem em regiões equatoriais. Para o controle de qualidade das observações é proposto um método baseado em arcos de satélites. A GI é avaliada em períodos de alta e de baixa atividade solar e sob a influência de uma intensa tempestade ionosférica. A GI também foi analisada no pós processamento e no processamento em tempo real, além de ser avaliada na região brasileira e na América do Sul e Central. Os resultados mais significativos foram observados no período de alta atividade solar, quando a utilização da grade ionosférica no posicionamento por ponto em tempo real chegou a proporcionar uma melhora média na acurácia de 20,79 % em planimetria e 81,40% em altimetria. Para o mesmo período, no posicionamento por ponto pós processado a melhora na acurácia chegou à 79,33% em planimetria e 95,03% em altimetria. Os resultados também mostram que a eficiência da GI e do GIVE é fortemente afetada pela densidade e distribuição das estações de referência utilizadas.

palavras-chave: GNSS. Ionosfera. Posicionamento e navegação GNSS. Grade ionosférica. GIVE.

ABSTRACT

The effect of the ionosphere is the largest error source on the L band signals broadcasted by GNSS (Global Navigation Satellite Systems) satellites, which mainly affects the accuracy of GNSS positioning and navigation when a single frequency receiver is used. The systematic error due to the ionosphere is directly proportional to TEC (Total Electron Content) along the signal path and inversely proportional to the square of the transmitting frequency. Due to the ionosphere's dispersive nature, TEC can be determined with dual frequency GNSS measurements, allowing the modeling and monitoring of the ionosphere. Currently, users of single frequency receivers can correct the systematic error due to the ionosphere using models such as Klobuchar, the NeQuick the GIMs (Global Ionosphere Maps), and others. This work presents a proposed method to generate an Ionospheric Grid (GI) and Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE), which can be used to improve the accuracy on applications of GNSS positioning and navigation, as well as provide a tool that can be used in the ionosphere studies area. Also is presented a stratification method of ionosphere layer in sub-layers, with the objective of mitigating the impact of the spatial gradient of TEC on equatorial regions modeling. For quality control of the observations is proposed a method based on each satellite arcs. The GI is tested in periods of high and low solar activity and under the influence of an intense ionospheric storm. The performance of the GI is also examined in post processing and real-time processing, as well as it's evaluated in the Brazil area and Central and South America area. The most significant results were observed in the period of high solar activity, when the use of ionospheric corrections from GI, this one provided an improvement in accuracy of real time point positioning, of 20,79% in planimetry, and 81,40% in altimetry. For the same period, the improvement in accuracy of the pos processed point positioning results was about 79,33% and 95,03%, respectively, in planimetry and altimetry. The results also show that the GI and GIVE efficiency is strongly affected by density and distribution of the reference stations used.

key-words: GNSS. Ionosphere. GNSS navigation and positioning. Ionosphere grid. GIVE.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 – Fluxo solar F10.7 e número de manchas solares..... | 43 |
| Figura 2 – Ponto ionosférico observado e IGP's vizinhos..... | 63 |
| Figura 3 – Bandas utilizadas no RNSS..... | 77 |
| Figura 4 – Áreas aproximadas de cobertura e de serviço do SBAS. | 82 |
| Figura 5 – Conceito do QZSS..... | 89 |
| Figura 6 – Redes de referência compostas de receptores GNSS de dupla frequência. | 95 |
| Figura 7 – Tendência interfrequência provocada pelo não sincronismo na modulação do sinal. | 106 |
| Figura 8 – Raio de busca de IPPs. | 111 |
| Figura 9 – Valores de VTEC observado na passagem do satélite. | 114 |
| Figura 10 – Controle de qualidade na GI..... | 115 |
| Figura 11 – Perfil de densidade de elétrons gerado usando o IRI-2001. | 117 |
| Figura 12 – Subcamadas da ionosfera | 118 |
| Figura 13 – Geometria para a decomposição do caminho ionosférico..... | 120 |
| Figura 14 – Influência da altitude geométrica do receptor na função de mapeamento. | 121 |
| Figura 15 – Influência da altitude geométrica do receptor na projeção do atraso ionosférico observado. | 121 |
| Figura 16 – Mapa de TEC a partir do modelo de fina camada da ionosfera. | 123 |
| Figura 17 – Mapa de TEC a partir do modelo de decomposição do caminho ionosférico (02:00 TU)..... | 124 |
| Figura 18 – Mapa de TEC a partir do modelo de decomposição do caminho ionosférico (18:00 TU)..... | 125 |
| Figura 19 – Pontos ionosféricos observados em cada subcamada. | 126 |
| Figura 20 – Mapa da posição dos satélites em suas órbitas..... | 127 |
| Figura 21 – Mapa da passagem dos satélites GPS sobre o Brasil. | 128 |
| Figura 22 – Fluxograma do aplicativo GS..... | 134 |
| Figura 23 – Impacto da distribuição das estações da RBMC/RIBaC sobre a grade ionosférica. | 136 |
| Figura 24 – Impacto da distribuição das estações da RBMC/RIBaC e REDE GNSS SP sobre a grade ionosférica..... | 139 |
| Figura 25 – Impacto da distribuição das estações da REDE GNSS SP sobre a grade ionosférica. | 142 |

| | |
|--|-----|
| Figura 26 – Impacto da distribuição das estações da RBMC-IP sobre a grade ionosférica. | 144 |
| Figura 27 – Impacto da distribuição das estações da REDE GNSS SP e da RBMC-IP sobre a grade ionosférica. | 146 |
| Figura 28 – Impacto da distribuição das estações com espaçamento médio de 100 km, sobre a grade ionosférica. | 148 |
| Figura 29 – Impacto da distribuição das estações com espaçamento médio de 250 km, sobre a grade ionosférica. | 149 |
| Figura 30 – Impacto da distribuição das estações com espaçamento médio de 600 km, sobre a grade ionosférica. | 150 |
| Figura 31 – Fluxo solar F10.7 para o período de 1997 a 2009. | 153 |
| Figura 32 – Índices Dst e F10.7 para Dez/2001. | 154 |
| Figura 33 – Índices Dst e F10.7 para Abr/2002. | 154 |
| Figura 34 – Índice F10.7 para outubro e novembro de 2003. | 155 |
| Figura 35 – Índice Dst para a tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. | 155 |
| Figura 36 – Tendência interfrequência dos receptores estimada com os dados de Dez/2001. | 160 |
| Figura 37 – Tendência interfrequência dos receptores estimada com os dados de Abr/2002. | 160 |
| Figura 38 – Tendência interfrequência dos receptores estimada com os dados de Out/2003. | 161 |
| Figura 39 – Discrepância entre os valores de tendência interfrequências estimados e aqueles fornecidos pelo JPL. | 167 |
| Figura 40 – Grades ionosféricas em diferentes altitudes (19/Dez/2001 – 20:00 TU). | 169 |
| Figura 41 – Grade ionosférica gerada a partir da composição das grades ionosféricas em diferentes altitudes (19/Dez/2001 – 20:00 TU). | 169 |
| Figura 42 – Grade ionosférica e GIVE (Dez/2001) – (17-18 UT). (Continua ...) | 171 |
| Figura 43 – Grade ionosférica e GIVE (Abr/2002) – (17-18 UT). (Continua ...) | 173 |
| Figura 44 – Grade ionosférica e GIVE (Out/2003) – (17-18 UT). (Continua ...) | 175 |
| Figura 45 – Tendência interfrequência dos receptores GNSS estimada para 11/05/2006. .. | 178 |
| Figura 46 – VTEC relativo e absoluto (Mai/2006). | 179 |
| Figura 47 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 1°x1° para a América do Sul e Central (Mai/2006). | 181 |

| | |
|--|-----|
| Figura 48 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 2,5°x2,5° para a América do Sul e Central (Mai/2006). | 182 |
| Figura 49 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 5°x5° para a América do Sul e Central (Mai/2006). | 183 |
| Figura 50 – GIVE para as grades com resolução de 1°, 2,5° e 5°. | 185 |
| Figura 51 – VTEC relativo e absoluto (Nov/2009). | 186 |
| Figura 52 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 1°x1° com dados da RBMC-IP e da REDE GNSS SP obtidos via NTRIP (Nov/2009). | 187 |
| Figura 53 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 2,5°x2,5° com dados da RBMC-IP e da REDE GNSS SP obtidos via NTRIP (Nov/2009). | 188 |
| Figura 54 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 5°x5° com dados da RBMC-IP e da REDE GNSS SP obtidos via NTRIP (Nov/2009). | 189 |
| Figura 55 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 352 de 2001. | 191 |
| Figura 56 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 91 de 2002. | 191 |
| Figura 57 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 302 de 2003. | 192 |
| Figura 58 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 131 de 2006. | 193 |
| Figura 59 – Configuração das estações da RBMC utilizadas no processamento (Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003). | 194 |
| Figura 60 – Configuração das estações na América do Sul e Central utilizadas no processamento (Mai/2006). | 195 |
| Figura 61 – Configuração das estações RBMC-IP e REDE GNSS SP utilizadas no processamento (Nov/2009). | 195 |
| Figura 62 – Comparação entre o I_{UEPP} e o $I_{DGrd_r2.5}$ para Dez/2001. | 197 |
| Figura 63 – Comparação entre o I_{UEPP} e o $I_{SCam_r2.5}$ para Dez/2001. | 197 |
| Figura 64 – Discrepância entre os valores de I_{UEPP} e o $I_{DGrd_r2.5}$ para Dez/2001. | 198 |
| Figura 65 – Discrepância entre os valores de I_{UEPP} e o $I_{SCam_r2.5}$ para Dez/2001. | 199 |
| Figura 66 – Gráfico das discrepâncias entre os valores de I_{UEPP} e o $I_{DGrd_r2.5}$ para Dez/2001 em função do ângulo de elevação. | 200 |
| Figura 67 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação UEPP – Dez/2001. | 210 |
| Figura 68 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação UEPP – Abr/2002. | 210 |

| | |
|---|-----|
| Figura 69 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação UEPP – Out/2003. | 210 |
| Figura 70 – Discrepâncias em altitude geométrica para as estações CFAG, MARA e PPTE – Mai/2006. | 211 |
| Figura 71 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação PPTE – Nov/2009. | 211 |
| Figura 72 – Discrepâncias em planimetria para a estação UEPP – Dez/2001. | 213 |
| Figura 73 – Discrepâncias em planimetria para a estação UEPP– Abr/2002. | 213 |
| Figura 74 – Discrepâncias em planimetria para a estação UEPP– Out/2003. | 213 |
| Figura 75 – Discrepâncias em planimetria para as estações CFAG, MARA e PPTE – Mai/2006. | 214 |
| Figura 76 – Discrepâncias em planimetria para a estação PPTE – Nov/2009. | 214 |
| Figura 77 – Disponibilidade temporal das observações para a geração da GI no período de alta atividade solar. | 218 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Classificação de perturbações magnéticas a partir do índice Dst..... | 42 |
| Tabela 2 – Limites de alerta da integridade GNSS. | 74 |
| Tabela 3 – Performance exigida para o sinal. | 75 |
| Tabela 4 – Potencial operacional dos sistemas de aumento do GNSS. | 76 |
| Tabela 5 – Tipo de serviço SBAS. | 81 |
| Tabela 6 – Sinais planejados para o QZSS. | 90 |
| Tabela 7 – Configuração para as subcamadas ionosféricas. | 118 |
| Tabela 8 – Resumo dos processamentos para análise da densidade de redes ativas disponíveis no Brasil. | 135 |
| Tabela 9 – Configuração da rede em função da resolução da grade ionosférica | 151 |
| Tabela 10– Resumo dos dados utilizados nos experimentos. | 157 |
| Tabela 11– Dados observados para o período analisado em 2001..... | 158 |
| Tabela 12– Dados observados para o período analisado em 2002..... | 158 |
| Tabela 13– Dados observados para o período analisado em 2003..... | 158 |
| Tabela 14– Tendência interfrequência dos receptores. | 162 |
| Tabela 15– Tendência interfrequência dos satélites (Dez/2001). | 164 |
| Tabela 16– Tendência interfrequência dos satélites (Abr/2002)..... | 165 |
| Tabela 17– Tendência interfrequência dos satélites (Out/2003)..... | 166 |
| Tabela 18– Denominação dos processamentos..... | 196 |
| Tabela 19– Discrepância e EMQ para a grade ionosférica de 5°x5° (Dez/2001)..... | 201 |
| Tabela 20– Resultados obtidos para Dez/2001. | 202 |
| Tabela 21– Resultados obtidos para Abr/2002. | 203 |
| Tabela 22– Resultados obtidos para Out/2003..... | 204 |
| Tabela 23– Resultados obtidos para Mai/2006. | 206 |
| Tabela 24– Resultados obtidos para Nov/2009..... | 207 |
| Tabela 25– EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Dez/2001. | 216 |
| Tabela 26– EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Abr/2002. | 216 |
| Tabela 27– EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Out/2003..... | 217 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 28 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Mai/2006. | 219 |
| Tabela 29 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Nov/2009..... | 220 |
| Tabela 30 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Dez/2001..... | 222 |
| Tabela 31 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Abr/2002. | 222 |
| Tabela 32 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Out/2003. | 222 |
| Tabela 33 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Mai/2006..... | 223 |
| Tabela 34 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Nov/2009. | 223 |

Lista de Siglas

| | |
|-------------|---|
| AAIM | – <i>Aircraft Autonomous Integrity Monitoring</i> |
| ABAS | – <i>Aircraft-Based Augmentation System</i> |
| AFLR | – <i>Battlespace Environment Division of the Air Force Research Laboratory</i> |
| ALDAR | – <i>Algoritmo de Leitura Dinâmica de Arquivos RINEX</i> |
| APV | – <i>Approach with Vertical guidance</i> |
| ARNS | – <i>Aeronautical Radionavigation Services</i> |
| AS | – <i>Selective Availability</i> |
| BNC | – <i>BKG Ntrip Client</i> |
| C/A | – <i>Coarse Acquisition</i> |
| CCI | – <i>Com Correção do efeito da Ionosfera</i> |
| CDGPS | – <i>Canada Wide Differential GPS</i> |
| CHAMP | – <i>CHAllenging Minisatellite Payload</i> |
| CICERO | – <i>Community Initiative for Continuing Earth Radio Occultation</i> |
| CME | – <i>Coronal Mass Ejection</i> |
| CNES | – <i>Centre National d'Estudes Spatiales</i> |
| CNS/ATM | – <i>Comunicação, Navegação, Vigilância / Gerenciamento do Tráfego Aéreo</i> |
| CODE | – <i>Center for Orbit Determination in Europe</i> |
| COSMIC | – <i>Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate</i> |
| COSPAR | – <i>COmmitee on SPAce Research</i> |
| CSA | – <i>Channel of Standard Accuracy</i> |
| CWAAS | – <i>Canada WAAS</i> |
| DCB | – <i>Differential Code Bias</i> |
| DECEA | – <i>Departamento de Controle do Espaço Aéreo</i> |
| DGPS | – <i>Differential GPS</i> |
| DoD | – <i>United States Department of Defense</i> |
| DORIS | – <i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i> |
| Dst | – <i>Disturbance Storm-Time</i> |
| EGNOS | – <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i> |
| EMQ | – <i>Erro Médio Quadrático</i> |
| ESA | – <i>European Spatial Agency</i> |
| ESOC | – <i>European Space Operations Centre</i> |
| EUROCONTROL | – <i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i> |
| FAA | – <i>Federal Aviation Administration</i> |
| FAS | – <i>Final Approach Segment</i> |
| FCT/UNESP | – <i>Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista</i> |
| FD | – <i>Fault Detection</i> |
| FDE | – <i>Fault Detection and Exclusion</i> |
| GAGAN | – <i>Indian GPS Aided GEO Augmented Navigation</i> |

| | |
|---------|--|
| GAS | – <i>GPS Analysis Software</i> |
| GBAS | – <i>Ground Based Augmentation System</i> |
| GEO | – <i>Geoestacionário</i> |
| GI | – <i>Grade Ionosférica</i> |
| GIM | – <i>Global Ionosphere Map</i> |
| GIVE | – <i>Grid Ionospheric Vertical Error</i> |
| GLONASS | – <i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> |
| GMT | – <i>Generic Map Tools</i> |
| GNSS | – <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| GPS | – <i>Global Positioning System</i> |
| GPS-MET | – <i>Global Positioning System-Meteorology</i> |
| GPSpace | – <i>GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides</i> |
| GRACE | – <i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i> |
| GRAS | – <i>Ground-Based Regional Augmentation System</i> |
| GRSAS | – <i>Australian Regional Augmentation System</i> |
| GS | – <i>Grid Simulator</i> |
| GSBAS | – <i>Global SBAS</i> |
| GSD | – <i>Geodetic Survey Division</i> |
| HL | – <i>Horizontal Local</i> |
| HPL | – <i>Horizontal Protection Level</i> |
| ICA | – <i>Ionospheric Correction Algorithm</i> |
| ICAO | – <i>International Civil Aviation Organization</i> |
| IFB | – <i>Interfrequency Bias</i> |
| IGP | – <i>Ionosphere Grid Point</i> |
| IGS | – <i>International GNSS Service</i> |
| ILS | – <i>Instrument Landing System</i> |
| IONEX | – <i>IONosphere map EXchange</i> |
| IPP | – <i>Ionospheric Pierce Point</i> |
| IRI | – <i>International Reference Ionosphere</i> |
| ISC | – <i>Inter-Signal Correction</i> |
| ITRF | – <i>International Terrestrial Reference Frame</i> |
| ITU | – <i>International Telecommunication Union</i> |
| JAXA | – <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i> |
| JCAB | – <i>Japan's Ministry of Land, Infrastructure and Transport</i> |
| JPL | – <i>Jet Propulsion Laboratory</i> |
| LAAS | – <i>Local Area Augmentation System</i> |
| LEO | – <i>Low Earth Orbiting</i> |
| LMLS | – <i>Microwave Landing System</i> |
| MMQ | – <i>Método dos Mínimos Quadrados</i> |
| MSAS | – <i>Multifunctional Transport Satellite-based Augmentation System</i> |
| NASA | – <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| NDB | – <i>Non-Directional Beacon</i> |
| NOAA | – <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> |
| NPA | – <i>Non-precision approach</i> |

| | |
|-----------------|--|
| NRCan | – <i>Natural Resources Canada</i> |
| NTRIP | – <i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i> |
| PA CAT-I | – <i>Precision Approach Category-I</i> |
| PIM | – <i>Parameterized Ionospheric Model</i> |
| PPS | – <i>Precise Positioning Service</i> |
| PRARE | – <i>Precise Range and Range Rate Experiment</i> |
| PRISM | – <i>Parameterized Real-Time Ionospheric Specification Model</i> |
| PVT | – <i>Position, Velocity and Time</i> |
| PZ-90 | – <i>Parametry Zemli 1990</i> |
| QZSS | – <i>Quasi-Zenith Satellite System</i> |
| RAIM | – <i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i> |
| RBMC | – <i>Rede Brasileira de Moniramento Contínuo</i> |
| REDE GNSS SP | – <i>Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo</i> |
| RIBaC | – <i>Rede INCRA de Bases Comunitárias</i> |
| RINEX | – <i>Receiver INdependent EXchange format</i> |
| RNAV | – <i>Area Navigation</i> |
| RNSS | – <i>Radionavigation-Satellite Services</i> |
| ROT | – <i>Rate of Change of TEC</i> |
| ROTI | – <i>Rate Of TEC Index</i> |
| RSS | – <i>Root Sum Square</i> |
| RTCM | – <i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i> |
| SAC-C | – <i>Satellite de Aplicaciones Científicas-C</i> |
| SARPs | – <i>Standards and Recommended Practices</i> |
| SBAS | – <i>Satellite Based Augmentation System</i> |
| SCI | – <i>Sem Correção do efeito da Ionosfera</i> |
| SCINTMON | – <i>Scintillation Monitor</i> |
| SFU | – <i>Solar Flux Unit</i> |
| SIRGAS | – <i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i> |
| SISCEAB | – <i>Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro</i> |
| SNT | – <i>SBAS Network Time</i> |
| SPS | – <i>Standard Positioning Service</i> |
| TEC | – <i>Total Electron Contents</i> |
| TECU | – <i>TEC Units</i> |
| T _{GD} | – <i>Time Group Delay</i> |
| TOPEX/Poseidon | – <i>Ocean Topography Experiment</i> |
| TU | – <i>Tempo Universal</i> |
| UDER | – <i>User Differential Range Error</i> |
| UIRE | – <i>User Ionospheric Range Error</i> |
| UIVE | – <i>User Ionospheric Vertical Error</i> |
| UNB | – <i>University of New Brunswick</i> |
| UPC | – <i>Polytechnical University of Catalonia</i> |
| URSI | – <i>International Union of Radio Science</i> |
| UTC | – <i>Universal Time Coordinated</i> |
| VDB | – <i>VHF Data Broadcast</i> |

| | |
|--------|---|
| VHF | – <i>Very High Frequency</i> |
| VNAV | – <i>Baro Vertical Navigation</i> |
| VOR | – <i>VHF Omnidirectional Range</i> |
| VPL | – <i>Vertical Protection Level</i> |
| VTEC | – <i>Vertical TEC</i> |
| WAAS | – <i>Wide Area Augmentation System</i> |
| WADGPS | – <i>Wide Area DGPS</i> |
| WAGE | – <i>Wide Area GPS Enhancement</i> |
| WGS-84 | – <i>World Geodetic System of 1994</i> |
| WNT | – <i>WAAS Network Time</i> |
| WRC | – <i>World Radiocommunication Conferences</i> |
| WRE | – <i>Wide-Area Receiver Equipament</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 25 |
| 1.1 | Objetivos..... | 29 |
| 1.2 | Motivação | 30 |
| 1.3 | Conteúdo do Trabalho | 31 |
| 2 | A IONOSFERA E SEUS EFEITOS NOS SINAIS GNSS..... | 33 |
| 2.1 | Impacto da Ionosfera sobre os Sinais GNSS | 34 |
| 2.1.1 | Índice de refração da ionosfera..... | 34 |
| 2.1.2 | Atraso de grupo e avanço da fase | 36 |
| 2.1.3 | Cintilação..... | 39 |
| 2.2 | Índice Dst e F10.7..... | 41 |
| 2.3 | Equipamentos Terrestres de Sondagem da Ionosfera..... | 43 |
| 2.4 | Sondagem da Ionosfera a partir de Satélites..... | 45 |
| 2.4.1 | Missão TOPEX/Poseidon..... | 46 |
| 2.4.2 | Sistema DORIS..... | 46 |
| 2.4.3 | Missões CHAMP, COSMIC e CICERO | 47 |
| 2.5 | Modelos Empíricos | 48 |
| 2.5.1 | Modelo Broadcast..... | 49 |
| 2.5.2 | Modelo NeQuick | 50 |
| 2.5.3 | Modelo LPIM (<i>La Plata Ionospheric Model</i>) | 51 |
| 2.5.4 | Modelo IRI (<i>International Reference Ionosphere</i>)..... | 51 |
| 2.5.5 | Modelo PIM (<i>Parameterized Ionospheric Model</i>) | 52 |
| 3 | REPRESENTAÇÃO ANÁLITICA DA IONOSFERA | 53 |
| 3.1 | Modelo do Ponto Ionosférico e Função de Mapeamento | 54 |
| 3.2 | Modelos Bidimensionais | 55 |
| 3.2.1 | Função de modelagem série de Fourier..... | 56 |
| 3.2.2 | Função de modelagem harmônico esférico | 57 |
| 3.2.3 | Função de modelagem polinomial..... | 58 |
| 3.2.4 | Função de modelagem série de Taylor | 58 |
| 3.2.5 | Modelo Tridimensional (Tomografia)..... | 59 |
| 3.3 | Modelos do IGS..... | 60 |
| 3.4 | Modelagem baseada em Grade Ionosférica..... | 61 |
| 3.4.1 | Técnicas usadas para a interpolação da grade ionosférica..... | 61 |
| 3.4.2 | Cálculo do Erro da Grade Ionosférica Vertical (GIVE) | 65 |
| 3.4.3 | Cálculo do GIVE para o WAAS..... | 67 |
| 3.5 | Modelagem sobre uma Rede WADGPS: Estado Atual no Brasil | 69 |
| 4 | SISTEMAS DE AUMENTO DO GNSS | 71 |
| 4.1 | Especificações Estabelecidas pela ICAO | 73 |
| 4.2 | Sistema de Aumento Baseado em Instrumentos a bordo da Aeronave (ABAS)..... | 77 |
| 4.3 | Sistema de Aumento Baseado em Satélites (SBAS) | 79 |
| 4.3.1 | Integridade | 83 |
| 4.3.2 | Definição do modelo estocástico da correção ionosférica..... | 83 |
| 4.3.3 | WAAS | 85 |
| 4.3.4 | Outros exemplos de SBAS | 87 |
| 4.4 | Sistema de Aumento Baseado em Estações Terrestre (GBAS)..... | 90 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.5 | Sistema de Aumento Regional Baseado em Estações Terrestres (GRAS)..... | 92 |
| 5 | IMPLEMENTAÇÃO DA GRADE IONOSFÉRICA (GI)..... | 93 |
| 5.1 | Arquitetura da Rede GNSS Ativa..... | 94 |
| 5.2 | Observáveis GPS | 96 |
| 5.3 | Cálculo do Atraso Ionosférico Utilizando Observáveis GPS | 98 |
| 5.4 | Correção da tendência interfrequência $P(Y)_{L1-C/A}$ | 103 |
| 5.5 | Determinação da tendência interfrequência..... | 105 |
| 5.6 | Geração e Interpolação da Grade Ionosférica..... | 109 |
| 5.7 | Controle de Qualidade dos Dados | 113 |
| 5.8 | Função de Mapeamento | 117 |
| 5.9 | Cálculo do GIVE | 129 |
| 6 | ANÁLISE DO IMPACTO DA DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA NA GI..... | 132 |
| 6.1 | Aplicativo GS (<i>Grid Simulator</i>) | 132 |
| 6.2 | Predição para processamento de dados <i>off-line</i> | 135 |
| 6.3 | Predição para processamento de dados <i>on-line</i> | 140 |
| 6.4 | Análise de distribuição adequada para as estações de referência para suporte a um SBAS | 147 |
| 7 | GRADE IONOSFÉRICA: PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 152 |
| 7.1 | Dados Utilizados nos Experimentos | 152 |
| 7.2 | Determinação da Tendência Interfrequência | 159 |
| 7.3 | Grade Ionosférica e GIVE | 168 |
| 7.3.1 | Grade de atraso ionosférico e GIVE gerados com os dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003 | 170 |
| 7.3.2 | Grade de atraso ionosférico e GIVE gerados para a América do Sul e Central | 177 |
| 7.3.3 | Grade de atraso ionosférico e GIVE gerados com dados de Nov/2009 | 185 |
| 7.3.4 | A grade ionosférica como ferramenta para geração de mapas de VTEC | 190 |
| 7.4 | Integridade da Grade Ionosférica..... | 193 |
| 7.5 | Posicionamento por Ponto a partir da Correção com a Grade Ionosférica..... | 208 |
| 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 226 |
| 8.1 | Considerações Finais e Conclusões | 226 |
| 8.2 | Recomendações | 231 |
| | REFERÊNCIAS | 234 |
| | APÊNDICE A – Fluxograma do algoritmo da GI..... | 248 |
| | APÊNDICE B – Arquivo RINEX 3.00 | 249 |
| | ANEXO A – Dados de entrada e saída das principais funções do WAAS | 250 |

1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) vem sendo cada vez mais utilizado em diversos segmentos da comunidade, e definitivamente tornou-se uma importante ferramenta para a comunidade científica. Além das aplicações relacionadas diretamente à obtenção de posições tridimensionais, o GNSS firmou-se como uma importante ferramenta para o monitoramento de parâmetros da atmosfera, com destaque à troposfera e à ionosfera.

É importante salientar que quando se utiliza a nomenclatura GNSS está-se referindo a sistemas tais como o GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnay Sputnikovaya Sistema* – Sistema Global de Navegação por Satélite), Galileo, Compass, entre outros, além dos Sistemas de Aumento.

Em aplicações onde se exige um nível melhor de precisão é essencial o uso de receptores de dupla frequência. No entanto, os receptores de uma frequência também são utilizados em trabalhos de posicionamento e, principalmente, navegação GNSS. Atualmente, é limitado o número de aplicações onde se obtém resultados satisfatórios com receptores de uma frequência, pois, os resultados obtidos com este tipo de receptor são afetados por diversos erros sistemáticos. Dentre estes erros sistemáticos se destaca a influência da ionosfera, que por sua vez passou a ser a principal fonte de erro na navegação e no posicionamento por GPS, após a desativação da técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva). A magnitude do erro sistemático devido à ionosfera é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Contents* – Conteúdo Total de Elétrons) na camada ionosférica, ou seja, ao número de elétrons presente ao longo do caminho percorrido pelo sinal, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência deste sinal.

A formação da ionosfera está intimamente associada à radiação solar incidente na atmosfera terrestre e, com menor grau de importância, à radiação cósmica (HARGREAVES, 1992). Consequentemente, o problema principal é que o TEC varia no tempo e espaço, em razão do fluxo de ionização solar, ângulo zenital do sol, atividade geomagnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, hora local e localização geográfica (LEICK, 1995); sendo, portanto de difícil modelagem. Se o valor do TEC fosse constante, ou tivesse variação regular, os efeitos causados pela ionosfera seriam de fácil determinação.

Considerando que os satélites do GNSS transmitem mais de um sinal na banda L, que no caso dos satélites GPS são denominados de L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) e L5 (1176,45 MHz), e que a ionosfera apresenta característica dispersiva, é possível eliminar o efeito de primeira ordem ou estimar o TEC no caminho dos sinais transionosféricos utilizando-se de técnicas de combinação das observáveis GPS obtidas com receptores de, no mínimo, dupla frequência. Por outro lado, para receptores de uma frequência não é possível eliminar o efeito devido à ionosfera por meio deste tipo de combinação linear. Para a correção deste efeito no posicionamento por ponto e no posicionamento relativo, os usuários de receptores de simples frequência podem utilizar os modelos ionosféricos, sejam eles regionais ou globais (AGUIAR, 2005; CAMARGO, 1999, KLOBUCHAR, 1987).

No Brasil, devido à necessidade de se ter uma estratégia mais efetiva na correção do efeito da ionosfera, Camargo (1999) iniciou-se os estudos para o desenvolvimento de um modelo da ionosfera denominado Mod_Ion, para aplicar correções ionosféricas, em observações de receptores GNSS de simples frequência, num pós processamento. Nesse modelo a ionosfera é analiticamente representada pela série do tipo Fourier. O Mod_Ion permite calcular o erro sistemático devido à ionosfera na portadora L_1 , bem como o TEC. A avaliação do Mod_Ion pode ser encontrada em Aguiar et al. (2003), Camargo (1999), Camargo, Monico e Ferreira (2000), Matsuoka (2003), entre outros.

A partir do Mod_Ion, foi desenvolvido o modelo ionosférico Mod_Ion_FK (CAMARGO, 2001; AGUIAR, 2005), no qual os coeficientes são calculados utilizando o algoritmo do filtro de Kalman, permitindo que o mesmo seja usado em aplicações em tempo real. A função de modelagem usada pelo Mod_Ion foi substituída por uma série de Fourier bidimensional e o controle de qualidade foi adaptado para tempo real.

A performance do Mod_Ion_FK foi avaliada por meio do posicionamento por ponto, utilizando dados GPS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e os resultados mostraram uma melhora de até 92% na qualidade do posicionamento. Vários experimentos foram realizados com o Mod_Ion_FK e se encontram em Aguiar (2005), Aguiar e Camargo (2006a, 2006b), Aguiar e Camargo (2005).

A correção do efeito da ionosfera em tempo real, bem como de outros erros sistemáticos envolvidos no posicionamento, deu um grande salto nos últimos anos, principalmente devido ao surgimento dos conceitos de aumento dos sistemas de navegação. Com o avanço da tecnologia de posicionamento global, a mesma vem sendo cada vez mais aplicada em diversos níveis da navegação aérea, terrestre e marítima. No entanto, principalmente, para a navegação aérea, os sistemas de posicionamento global (GPS e

GLONASS) não fornecem alguns requisitos básicos para garantir a segurança dos usuários. Dentre estes requisitos pode-se citar a garantia de continuidade, disponibilidade, integridade e acurácia (ICAO, 2009). Assim, vem sendo desenvolvido os Sistemas de Aumento, que a partir da integração e processamento de dados de diferentes sistemas de navegação, o mesmo fornece informações adicionais de correção de erros, disponibilidade, continuidade e integridade.

Nos últimos anos várias pesquisas vêm sendo realizadas para melhorar a performance do GPS em tempo real, bem como a utilização deste para estudos da dinâmica da atmosfera terrestre. Dentre os diversos trabalhos pode-se citar: Aguiar (2005), Blanch, Walter e Enge (2004), El Gizawy (2003), Fortes (2002), Hansen et al. (2000), Hansen (2002), Liao (2000), Konno et al. (2006), Liu (2004), Moon (2004), Seo (2010), Skone (1998), entre outros.

A correção do efeito da ionosfera em tempo real, bem como de outros erros sistemáticos envolvidos no posicionamento, pode ser aplicada utilizando *Wide Area Differential GPS* (WADGPS) (FRAILE, 1995). O WADGPS foi desenvolvido visando reduzir as deficiências inerentes ao DGPS, sem a necessidade de estabelecer um grande número de estações. Entretanto, tanto no DGPS quanto no WADGPS, conforme o usuário do sistema se afasta da estação de referência os erros na observável GPS se tornam diferentes daqueles estimados na estação de referência, isto é conhecido por decorrelação espacial (KLOBUCHAR et al., 1995). Assim, em regiões equatoriais, como o caso do Brasil, onde há alto gradiente de TEC, a decorrelação espacial ionosférica entre o usuário e a estação de referência degrada a acurácia do posicionamento rapidamente.

Para aplicações do GNSS em navegação aérea, por exemplo, foi desenvolvido um método de correção utilizando o SBAS (*Satellite Based Augmentation System* – Sistema de Aumento Baseado em Satélites), dentre os quais pode-se citar o sistema norte americano denominado de WAAS (*Wide Area Augmentation System*) (WAAS, 2001), o qual é baseado no WADGPS, e tem como vantagem os benefícios econômicos e segurança proporcionada ao usuário (HANSEN et al., 2000; CANAVITSAS; ASSIS; AMENDOLA; 2004).

Assim como no DGPS e no WADGPS, o potencial de uso do WAAS na solução de navegação também é limitado devido ao efeito ionosférico diferencial (KLOBUCHAR et al., 1995; POWELL; WALTER, 2010). Em seu trabalho, Hansen et al. (2000) fazem uma análise da correlação ionosférica para o WAAS em períodos de baixa e alta atividade ionosférica. Lejeune e El-Arini (2004) pesquisaram um algoritmo alternativo para

gerar uma grade ionosférica baseada no estimador MMSE (*Minimum Mean Square Error*), onde concluíram que os resultados não foram satisfatórios sob condições operacionais. Pullen, Enge e Parkinson (1995) apresentaram um modelo de propagação de erro da grade ionosférica pela projeção linear da matriz covariância, permitindo ao usuário predizer a acurácia sobre a área coberta pelo WAAS. Blanch, Walter e Enge (2003) apresentam o cálculo do GIVE usando o método de “krigagem”. Powell e Walter (2010) apresentam um estudo do Clima Espacial (*Space Weather*) e seus efeitos sobre os sinais GNSS, no SBAS e nos vôos de inspeção, Seo (2010) apresenta um estudo do efeito da cintilação ionosférica no WAAS, onde é considerada a modernização do GPS ao utilizar o novo sinal L5 para melhorar a performance do receptor GPS sob influência da cintilação.

Deve-se salientar que estes trabalhos têm como caso de estudo regiões ionosféricas (médias e altas latitudes) com características diferentes daquela sob a qual o Brasil está localizado. Grande parte do Brasil localiza-se sob a região ionosférica de baixa latitude, também conhecida por região equatorial. Nesta região a ionosfera apresenta características particulares, tais como a anomalia equatorial, a ocorrência de bolhas ionosféricas ou bolhas de plasma, anomalia do atlântico sul, entre outros (HARGREAVES, 1992; FEDRIZZI, 2003; RODRIGUES, 2003, WEBSTER, 1993), que devem ser consideradas para a modelagem e correção do seu efeito no posicionamento e navegação com GNSS.

O estado da arte na modelagem da ionosfera está em desenvolver e/ou aprimorar métodos capazes de fornecer aos usuários do GNSS correções ionosféricas confiáveis, em tempo real e utilizando estruturas simples de transmissão de dados. Como já mencionado, dentro desta necessidade e com o surgimento dos sistemas de apoio à navegação, tal como os SBASs, esforços estão voltados em fornecer informações de correção do erro sistemático da ionosfera utilizando uma estrutura de grade regular de pontos. Além disto, esforços também vêm sendo direcionados para corrigir a limitação na performance (ICAO, 2006; POWELL; WALTER, 2010; SEO, 2010) dos atuais métodos de geração de grade em regiões equatoriais.

Logo, este trabalho apresenta um método para estimar o atraso ionosférico e seu nível de confiança, considerando as peculiaridades da região equatorial, a fim de compensar o efeito sistemático da ionosfera sobre a observável L_1 e fornecer informações de integridade, utilizando o conceito de grade ionosférica. Além disto, o método apresentado também pode ser utilizada para a geração de mapas de TEC em tempo real ou pós-processado.

Como resultado final do estudo da estimação do atraso ionosférico em uma Grade Ionosférica (GI), chegou-se a algumas estratégias que apresentaram resultados promissores. A

fim de minimizar a influência do gradiente espacial do TEC, o qual é o maior fator limitante da função de modelagem que considera a aproximação da ionosfera como uma fina camada, uma função de decomposição da camada ionosférica em subcamadas é utilizada para a geração da GI. Desenvolveu-se um algoritmo computacional capaz de estimar o atraso ionosférico vertical em uma grade (GI) que pode ser atualizada continuamente, onde cada IGP (*Ionosphere Grid Point* – Ponto da Grade Ionosférica) representa o efeito sistemático ionosférico estimado pelos pontos ionosféricos mais próximos, bem como estimar os valores do GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error* – Erro Vertical da Grade Ionosférica). Outro ponto de destaque é que para se determinar o atraso ionosférico em cada IGP a função de interpolação é definida de forma dinâmica, onde a função peso depende do número de pontos ionosféricos disponíveis para a geração da grade. Também é apresentada uma estratégia para o controle de qualidade, onde o mesmo é realizado de forma independente para cada arco de satélite.

Neste trabalho foram utilizados dados GPS de dupla frequência, coletados por estações de referência que pertencem à RBMC e RIBaC (Rede INCRA de Bases Comunitárias), que atualmente estão integradas. Os dados da RBMC/RIBaC foram utilizados no processamento *off-line*, ou seja, no pós processamento. Para o processamento *on-line* (tempo real), foram utilizados dados coletados pelas estações da REDE GNSS SP (Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo), qual disponibiliza seus dados em tempo real. No processamento *on-line* também foram utilizadas 26 estações da RBMC que estão disponibilizando seus dados em tempo real, estas estações compõem a denominada RBMC-IP. A GI também foi analisada na América do Sul e Central, utilizando estações que fazem parte da rede IGS (*International GNSS Service* – Serviço GNSS Internacional) e outras que fazem parte da realização do SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método para gerar grades ionosféricas e GIVE, para suporte às aplicações de posicionamento e navegação com GNSS, a fim de melhorar a qualidade da correção do atraso ionosférico na medida de pseudodistância do usuário de receptores de simples frequência. Assim, pretende-se contribuir com a melhora

da acurácia da solução de posição para usuários de sistemas tais como o SBAS ou no posicionamento absoluto ou relativo utilizando a tecnologia GNSS.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- implementar algoritmo para estimar o atraso ionosférico em uma grade ionosférica;
- estimar os valores do limite de erro residual para cada IGP e gerar o GIVE;
- analisar a resolução espacial e temporal da grade ionosférica;
- avaliar a acurácia da correção do efeito sistemático da ionosfera utilizando a Grade da Ionosfera; e
- criar uma ferramenta para fornecer Mapas Ionosféricos para o Brasil (MIB) e fornecer uma nova fonte de dados para outras áreas de estudo, como por exemplo, o estudo da ionosfera ou de propagação de ondas.

1.2 Motivação

Atualmente, a acurácia na determinação do TEC e modelagem da ionosfera em tempo real, para WADGPS (*Wide Area Differential GPS* – GPS Diferencial para Área Ampla), SBAS e GBAS (*Ground Based Augmentation System* – Sistema de Aumento Baseado em Estações Terrestres), tem sido de grande interesse internacional. A modelagem da ionosfera em tempo real pode ser muito útil, principalmente para aplicações em navegação de precisão e posicionamento geodésico utilizando receptores de simples frequência, bem como mostrar o comportamento da ionosfera.

Para a aviação civil são utilizados receptores GNSS de simples frequência (ICAO, 2005), o que torna imprescindível o uso de modelos ionosféricos para o posicionamento preciso em tempo real, nas etapas da navegação aérea, e, principalmente, no suporte aos procedimentos operacionais de navegação das aeronaves. Nesse tipo de aplicação os sistemas de posicionamento global (GPS e GLONAS) são componentes de um sistema maior, por exemplo, o SBAS, que neste caso específico é denominado de WAAS nos Estados Unidos, CWAAS (*Canada WAAS*) no Canadá, MSAS (*Multifunctional Transport Satellite-based*

Augmentation System) no Japão, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) na Europa, entre outros.

A maioria das pesquisas para correção do atraso ionosférico para os usuários do GNSS foram realizadas em regiões cuja ionosfera tem características diferentes daquela presente na região brasileira (região equatorial). Um estudo de um modelo de grade ionosférica na região equatorial foi realizado por Skone (2000), da Universidade de Calgary, onde a autora obteve resultados que mostram que deve ser elaborado um método para gerar uma grade representativa da ionosfera equatorial. Em termos de Brasil, a pesquisa desenvolvida neste trabalho, onde foi implementado um método para fornecer grade ionosférica e informação de integridade ao usuário, é pioneira, tendo em vista que não foram desenvolvidos trabalhos neste sentido.

Além disto, informações confiáveis sobre os processos de mudança do clima global e a constante necessidade de melhorar a predição do estado atmosférico em escalas de tempo a curto e médio prazo, são somente possíveis com base em registro de dados globais e regionais e em modelagem que represente exatamente os parâmetros do estado atmosférico com alta resolução espacial e temporal. O GNSS é uma poderosa ferramenta para a meteorologia operacional e para o monitoramento de importantes parâmetros da atmosfera. Um exemplo da aplicação do GNSS no monitoramento da atmosfera terrestre é a rápida expansão do número de satélites LEO (*Low Earth Orbiting*) transportando instrumentos GPS para medidas de rádio ocultação, tal como os satélites das missões CHAMP (*CHAllenging Minisatellite Payload*), SAC-C (*Satellite de Aplicaciones Cientificas-C*) e GPS-MET (*Global Positioning System-Meteorology*).

1.3 Conteúdo do Trabalho

Esta Tese teve seu conteúdo dividido em 8 capítulos. No segundo capítulo, são apresentados os efeitos da ionosfera sobre os sinais GNSS. Além disto, são descritos alguns equipamentos terrestres que realizam medidas da ionosfera, bem como alguns satélites que possuem sensores capazes de extrair informações sobre esta camada. Ainda no segundo capítulo são brevemente tratados os modelos empíricos da ionosfera, mais utilizados atualmente.

No terceiro capítulo, algumas funções de modelagem utilizadas para representar a ionosfera de forma analítica são apresentadas. Neste capítulo também é apresentada a modelagem tridimensional da ionosfera, os modelos usados pelos grupos de trabalho do IGS e uma revisão sobre as principais formas de geração de grades ionosféricas usadas atualmente, contemplando também a geração do GIVE.

No quarto capítulo são apresentados os conceitos envolvidos nos sistemas de aumento, bem como os principais sistemas atualmente utilizados por diversos países. Neste capítulo são tratadas as especificações definidas pela ICAO (*International Civil Aviation Organization* – Organização Internacional da Aviação Civil).

No quinto capítulo é tratada a proposta de implementação da GI, abrangendo a estrutura da rede de estações de referência para o desenvolvimento da GI, bem como as equações envolvidas para obter a medida do atraso ionosférico. Também são apresentados os principais problemas na medida do atraso ionosférico utilizando as observáveis GNSS, bem como as soluções propostas para a GI. Ainda são tratados alguns fatores que devem ser considerados na GI, tais como a calibração da tendência interfrequência dos satélites e receptores, aproximação da ionosfera como uma fina camada de altitude média fixa, função de mapeamento, entre outros.

No capítulo sexto são apresentados alguns experimentos para verificar o impacto da atual distribuição das redes de referência no processo de geração da grade ionosférica. Além disto, mostra a estrutura do algoritmo GS (*Grid Simulator* – Simulador de Grade), desenvolvido para realizar a simulação da grade ionosférica e a influência das estações de referência sobre cada célula da grade.

No sétimo capítulo são descritos os experimentos, os resultados e as diversas análises que foram realizadas nesta pesquisa.

Finalmente, no capítulo oito são apresentadas as conclusões, as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

2 A IONOSFERA E SEUS EFEITOS NOS SINAIS GNSS

No posicionamento utilizando GNSS, para as mais diversas aplicações, os usuários têm a sua disposição vários tipos de receptores, que podem ser classificados de modo geral como receptores de simples ou dupla frequência. Uma nova classe está surgindo e é composta por receptores de tripla frequência, devido à modernização do GPS e com o novo sistema Galileo.

A classe de receptores de dupla frequência se tornou uma importante ferramenta para obter informações da ionosfera, que podem ser utilizadas tanto em modelos ionosféricos como na geração de mapas ionosféricos, bem como em estudos relacionados à Geofísica Espacial, tais como estudos do comportamento espacial e temporal da densidade de elétrons, da cintilação ionosférica, das bolhas ionosféricas, das tempestades geomagnéticas, da atividade solar, entre outros.

A atmosfera terrestre pode ser descrita, para propósitos práticos, como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas a Terra, e que apresentam diferentes propriedades físicas e químicas (HARGREAVES, 1992). Para fins desta pesquisa, pode-se adotar a divisão da atmosfera com respeito à propagação de ondas eletromagnéticas, em troposfera e ionosfera, pois ao se propagarem nestes meios, as ondas sofrem diferentes influências.

Adicionalmente, se o foco for apenas a ionosfera, como no caso deste trabalho, é apropriado considerar a divisão da atmosfera com respeito à ionização, em neutrosfera e ionosfera. Pois, a magnitude do erro devido à ionosfera sobre os sinais GNSS depende diretamente do TEC, que por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera.

A ionosfera está localizada em uma região da atmosfera terrestre entre aproximadamente 50 e 1000 km de altura. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois, a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera. A ionosfera é caracterizada por apresentar uma alta densidade de elétrons livres capazes de afetar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites GPS, GLONASS e Galileo. A formação da ionosfera está intimamente associada à radiação solar incidente na atmosfera terrestre e, com menor grau de importância, à radiação cósmica. Consequentemente, o comportamento desta região depende da hora local, do ângulo zenital solar, da latitude, da estação do ano e do nível de atividade solar (FEDRIZZI, 1999).

Aqui não serão apresentadas em detalhe as características da ionosfera, tais como processo de fotoionização, divisões da camada da ionosfera, fatores que causam variação do TEC, anomalia equatorial, entre outros. Mais informações sobre este assunto podem ser encontradas em Bothmer e Daglis (2007), Davies (1990), Fedrizzi (1999, 2003), McNamara (1991), Yamashita (1999).

2.1 Impacto da Ionosfera sobre os Sinais GNSS

Quando ondas de rádio na banda L, de sistemas de navegação, tais como o GPS, viajam através da ionosfera, estas estão sujeitas a um atraso no tempo de viagem e mudanças na polarização, fase e amplitude. Este impacto ionosférico é devido ao efeito dos elétrons livres sobre os sinais de rádio (STOLLE et al., 2003).

Com enfoque neste trabalho, um dos parâmetros mais importantes e que caracteriza a camada da ionosfera é o índice de refração. Conhecer o índice de refração da ionosfera é essencial quando se estudam os possíveis efeitos da ionosfera sobre a propagação dos sinais GNSS (EL GIZAWY, 2003; LIAO, 2000). A partir do efeito de refração sobre estes sinais é possível obter o TEC ao longo do caminho percorrido pelo sinal. Por outro lado, o efeito da cintilação ionosférica sobre um sinal transionosférico é um indicador da presença de irregularidades ionosféricas.

2.1.1 Índice de refração da ionosfera

Como mencionado anteriormente, devido à natureza dispersiva da ionosfera, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende de sua frequência. Os principais efeitos deste meio anisotrópico sobre os sinais GNSS são o atraso de grupo na modulação do sinal e o avanço na fase portadora.

A propagação de onda através de um meio é caracterizada pelo índice de refração, e pode ser expresso como:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade da onda no meio.

Como a ionosfera é um meio não homogêneo, o índice de refração da fase (n_f) em uma determinada localização na ionosfera pode ser expresso pela fórmula de Appleton-Hartree (SHKAROFSKY, 1961):

$$n_f^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

onde:

$$X = n_e e^2 / \epsilon_0 m \omega^2 = f_N^2 / f^2;$$

$$Y_L = eB \cos \theta / m \omega = f_H \cos \theta / f;$$

$$Y_T = eB \sin \theta / m \omega = f_H \sin \theta / f;$$

$$Z = f_v / f;$$

$$\omega = 2\pi f;$$

i - número imaginário;

n_e - densidade de elétrons (el/m^3);

f_N - frequência de elétrons no plasma (MHz);

f - frequência da onda de rádio (MHz);

e - carga do elétron, $-1,602 \times 10^{-19}$ (coulomb);

ϵ_0 - permissividade do espaço livre, $8,854 \times 10^{-12}$ (farads/m);

B - densidade do fluxo do campo magnético da Terra (T);

M - massa do elétron, $9,107 \times 10^{-31}$ kg;

θ - ângulo entre a direção da normal da onda e o campo magnético;

f_v - frequência de colisão dos elétrons com partículas pesadas (MHz); e

f_H - girofrequência do elétron (MHz).

Considerando somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, a equação 2 pode ser simplificada desprezando os termos Y_T , Y_L e Z . Assim, o índice de refração em um meio

anisotrópico pode ser aproximado por $n_f^2 = 1 - X$ (FEDRIZZI, 2003). Lembrando que X pode ser escrito na forma $X = f_N^2 / f^2$ e considerando que a frequência de plasma, na ionosfera, raramente excede 20 MHz (KLOBUCHAR, 1996) e, portanto, $f \gg f_N$, é possível obter uma expressão simplificada a partir da seguinte expansão em série binomial (FEDRIZZI, 2003; HARGREAVES, 1992):

$$n_f = \sqrt{1 - X} = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{n_e e^2}{2m\epsilon_0 (2\pi)^2 f^2}. \quad (3)$$

Substituindo os valores das constantes e , m e ϵ_0 na equação 3, o índice de refração da fase pode ser dado por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2}, \quad (4)$$

portanto, o índice de refração da fase depende principalmente da densidade de elétrons (n_e) e da frequência (f) da onda de rádio.

O índice de refração de grupo pode ser derivado da relação com o índice de refração da fase, tal que (SKONE, 1998):

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} = \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) + \frac{80,6 f n_e}{f^3} = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2}. \quad (5)$$

Analisando as equações 4 e 5 nota-se que o índice de refração de grupo sempre é maior do que o índice de refração da fase. Isto faz com que, na propagação dos sinais GNSS, ocorra um atraso na velocidade de grupo e um avanço na fase, provocando um aumento nas distâncias obtidas a partir do código, e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade, respectivamente.

2.1.2 Atraso de grupo e avanço da fase

As medidas GNSS de pseudodistância e de fase da portadora são estimadas com base na suposição de que a velocidade e o comprimento de onda do sinal são iguais aos valores válidos para uma onda eletromagnética propagando-se no vácuo. Porém, devido às propriedades físicas da ionosfera, o índice de refração da ionosfera tem um valor não unitário. As velocidades da fase e de grupo podem ser obtidas como (MOON, 2004; SEEBER, 1993, 2003; SKONE, 1998):

$$v_f = \frac{c}{n_f} = \frac{c}{1 - \frac{40,3n_e}{f^2}} \approx c \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \right), \text{ e} \quad (6)$$

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{1 + \frac{40,3n_e}{f^2}} \approx c \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \right), \quad (7)$$

onde n_f e n_g são dados, respectivamente, pelas equações 4 e 5 e c é a velocidade da luz no vácuo.

A distância (S) entre o satélite (s) e a antena receptora (r), considerando apenas o erro devido à ionosfera, é definida por (LEICK, 1995):

$$S = \int_r^s n \, ds, \quad (8)$$

onde n representa, de forma genérica, o índice de refração para a fase ou grupo. A distância medida (S) é influenciada pelo índice de refração da ionosfera e a integral é estendida ao longo do caminho do sinal. A distância geométrica (ρ) entre o satélite e a antena receptora isenta de erro é definida como:

$$\rho = \int_r^s ds. \quad (9)$$

Assim, o erro devido à refração ionosférica (I_r^s) é dado por:

$$I_r^s = \int_r^s n \, ds - \int_r^s ds. \quad (10)$$

Substituindo os índices de refração da fase (4) e do grupo (5) na equação 10, obtêm-se os erros sistemáticos devido à ionosfera para a fase da portadora ($I_{f_r}^s$) e para os sinais modulados pelo código ($I_{g_r}^s$). Desta forma, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_{f_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \right) ds - \rho, \quad (11)$$

ou

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (12)$$

e, para os sinais modulados pelo código, ou seja para a pseudodistância, tem-se:

$$I_{g_r}^s = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \right) ds - \rho, \quad (13)$$

ou

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (14)$$

onde a quantidade $\int_r^s n_e ds$ caracteriza a quantidade de elétrons livres em uma coluna com seção transversal de 1 m^2 ao longo do caminho (S) percorrido pelo sinal, e que representa o TEC. Assim, a magnitude do erro na distância é uma função do TEC ao longo do caminho do sinal (LEICK, 1995):

$$\text{TEC} = \int_r^s n_e ds. \quad (15)$$

A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado (el/m^2). Substituindo a equação 15 nas equações 12 e 14, obtêm-se o erro devido à refração ionosférica para a fase da portadora e para os sinais modulados pelo código em função do TEC e da frequência (KOMJATHY, 1997):

$$\Delta\phi_r^s = I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (16)$$

$$\Delta\rho_r^s = I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (17)$$

A refração ionosférica relacionada com o código (I_{gr}^s) é usualmente denominada de atraso de grupo ou atraso ionosférico. De acordo com as equações 16 e 17, percebe-se que o erro devido à refração ionosférica, seja ela incidente sobre a fase da portadora ou sobre os sinais modulados pelo código, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera. Nota-se, ainda, que a magnitude do erro na distância é igual para as medidas de pseudodistância e fase, mas com sinais opostos.

2.1.3 Cintilação

As cintilações ionosféricas são rápidas variações aleatórias na fase e amplitude do sinal GNSS recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera (CONKER et al., 2000; EL GIZAWY, 2003; WEBSTER, 1993).

Em 1946 foram observadas, pela primeira vez, flutuações irregulares de curto período de tempo na intensidade da radiação na banda de rádio (64 MHz) emitida pela estrela Cygnus (HEY; PARSONS; PHILLIPS, 1946). Após o lançamento do primeiro satélite artificial em 1957, tornou-se possível observar cintilações ionosféricas em sinais emitidos por rádio-transmissores a bordo de satélites (RODRIGUES, 2003).

Períodos de cintilação estão associados à existência de regiões com pequena escala de irregularidades na densidade de elétrons na camada ionosférica. Estes padrões de irregularidades podem se mover através da ionosfera. A severidade dos efeitos da cintilação está relacionada à densidade de elétrons e ao tamanho dos padrões de irregularidades ionosféricas.

Segundo Skone (2000), os efeitos mais intensos da cintilação ionosférica ocorrem nas regiões de baixa latitude geomagnética (± 10 até ± 20 graus), nas regiões onde ocorrem as auroras (65 até 75 graus de latitude geomagnética), e na região que envolve a capa polar (latitudes geomagnéticas maiores que 75 graus). Cintilações que ocorrem nas regiões de altas

latitudes (região auroral) e na região equatorial surgem de distintos fenômenos físicos. Na região auroral, a ocorrência da cintilação é devida às tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas. No caso da região equatorial, a cintilação está relacionada mais diretamente com a anomalia equatorial. As cintilações que ocorrem na região equatorial possuem um maior impacto na performance de rastreamento dos receptores do que na região de altas latitudes (SKONE, 2000). A cintilação na região equatorial também poder ser provocada pela ocorrência de bolhas ionosféricas ou bolhas de plasma, as quais são grandes regiões na ionosfera que apresentam uma redução da densidade de plasma ionosférico (HARGREAVES, 1992)

No Brasil, as ocorrências de cintilações são mínimas de abril até agosto, e máximas de setembro a março. Os horários diários de cintilação mais intensos são limitados à uma hora, após o pôr do Sol, até aproximadamente à meia noite local (CAMPOS et al., 1993).

A cintilação ionosférica tem o potencial de afetar todos os serviços GPS, incluindo o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS – *Standard Positioning Service*) e o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS - *Precise Positioning Service*), no rastreamento de receptores de simples e dupla frequência, tanto no posicionamento por ponto como no relativo (FU et al., 1999), bem como afetar os serviços do GLONASS.

Devido à cintilação, a fase nas portadoras L_1 e L_2 pode mudar significativamente entre duas épocas consecutivas. A mudança rápida na frequência do sinal recebido, associada aos efeitos de cintilação na fase, pode provocar a perda do sinal pelo sistema dos receptores GNSS (BOTHMER; DAGLIS, 2007; EL GIZAWY, 2003). A cintilação da fase pode ser detectada usando dados contínuos de dupla frequência com a série temporal da Taxa do Índice de TEC (ROTI – *Rate Of TEC Index*), bem como usando dados de receptores de simples ou dupla frequências capazes de permitir o cálculo de índices tais como S_4 e σ_ϕ . Cientistas têm usado com sucesso a rede GNSS do IGS para detectar as cintilações ionosféricas usando os índices S_4 e σ_ϕ (PI¹ et al, 1999 apud LIAO, 2000).

No Brasil, o monitoramento da cintilação ionosférica é realizado a partir da rede de receptores de simples frequência do sistema SCINTMON (*Scintillation Monitor*) (DE PAULA et al., 2008). Além disto, vem sendo realizados estudos em cooperação entre pesquisadores do Brasil, Reino Unido e Itália, à respeito do efeito da cintilação ionosférica na qualidade do posicionamento com o GNSS (AQUINO et al., 2009; SILVA et al., 2010)

¹ PI, X.Q., NANDI, S.; STOWERS, D.A.; MARCIN, M.R, LINDQWISTER, U.J., MOORE, A.W.; FORT, D.N.; KLOBUCHAR, J.A. Development of Ionospheric Scintillation Monitoring System Using Receivers of the IGS Global GPS Network, In: *ION 55th Annual Meeting*, Cambridge, MA, 28-30 June, 1999.

Durante os eventos de cintilação, a performance do rastreamento em L_1 é menos afetada que o rastreamento em L_2 . A perda do sinal em L_2 afeta fortemente aplicações onde são necessárias observações de dupla frequência. Estas aplicações dependem, portanto, da natureza dispersiva da ionosfera, conseqüentemente, torna-se necessário monitorar as cintilações ionosféricas. No entanto, o desempenho do rastreio dos receptores GNSS não depende somente da atividade da cintilação ionosférica, mas também da capacidade de rastreamento destes receptores. Pesquisas têm mostrado que este desempenho pode variar significativamente entre receptores, sob idênticas condições de cintilação ionosférica (SEO, 2010; SKONE, 2000).

2.2 Índice Dst e F10.7

O nível de atividade da ionosfera pode ser classificado por meio de índices geomagnéticos que constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (MENVIELLE, 1998). Estes índices são importantes para correlacionar a magnitude dos efeitos da ionosfera sobre os sinais GNSS, em função do nível de atividade geomagnética e solar.

Na região equatorial, na qual o Brasil se encontra, o mais importante índice para classificação da atividade geomagnética é o Dst (*Disturbance Storm-Time*). O índice Dst (dado em nano Tesla - nT) representa a intensidade da atividade geomagnética e desta forma, é utilizado para conhecer a severidade das tempestades magnéticas (FONSECA JUNIOR, 2002) e as medidas magnetométricas são obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999). É a partir desse parâmetro que se define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. Logo antes do início da tempestade, o índice apresenta um pico de intensidade que é conhecido por fase inicial ou início súbito. Após esse pico, desenvolve-se a fase principal da tempestade que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice. Após alcançar o mínimo, o índice começa a subir de valor, cuja fase é conhecida como fase de recuperação, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999). A classificação das tempestades de acordo com o índice Dst é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de perturbações magnéticas a partir do índice Dst.

| Índice | Classificação |
|---|----------------------|
| $-50 \text{ nT} \leq \text{Dst} < -30 \text{ nT}$ | Fraca |
| $-100 \text{ nT} \leq \text{Dst} < -50 \text{ nT}$ | Moderada |
| $-250 \text{ nT} \leq \text{Dst} < -100 \text{ nT}$ | Intensa |
| $\text{Dst} < -250 \text{ nT}$ | muito intensa |

Fonte: Fedrizzi (2003).

Além dos índices utilizados para medir a atividade geomagnética, também existem índices que classificam o nível da atividade solar, dentre os quais pode-se citar o índice de fluxo solar de 10 cm, denominado de F10.7. Este índice também é muito útil para análise dos dados relacionados ao estudo da ionosfera. O F10.7 é uma medida do nível de ruído gerado pelo Sol no comprimento de onda de 10,7 cm. Este índice tem sido usado como informação de entrada em muitos modelos ionosféricos como um substituto para a radiação solar que produz fotoionização na ionosfera terrestre (ARAGÓN-ÁNGEL et al., 2005; AIAA, 2010; FOUKAL, 1998). O modelo de Klobuchar utiliza o F10.7 para determinar o conjunto de coeficientes que são transmitidos nas mensagens de navegação do GPS.

A emissão de radiação do sol num comprimento de onda de 10,7 cm é bem correlacionada com o número de manchas solares. A Figura 1 apresenta um gráfico das medidas do índice F10.7 e do número de manchas solares, para o ano de 2000, fornecidas pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). O número de mancha solar é definido pela contagem do número individual das manchas solares, bem como do número de grupos de manchas solares e deve ser reduzido a uma escala padrão considerando as diferenças de técnicas e equipamentos entre os observatórios. Entretanto, o fluxo de radiação de 10,7 cm pode ser medido de forma mais rápida e fácil, e tem substituído o número de mancha solar como índice de atividade solar (IPS, 2009).

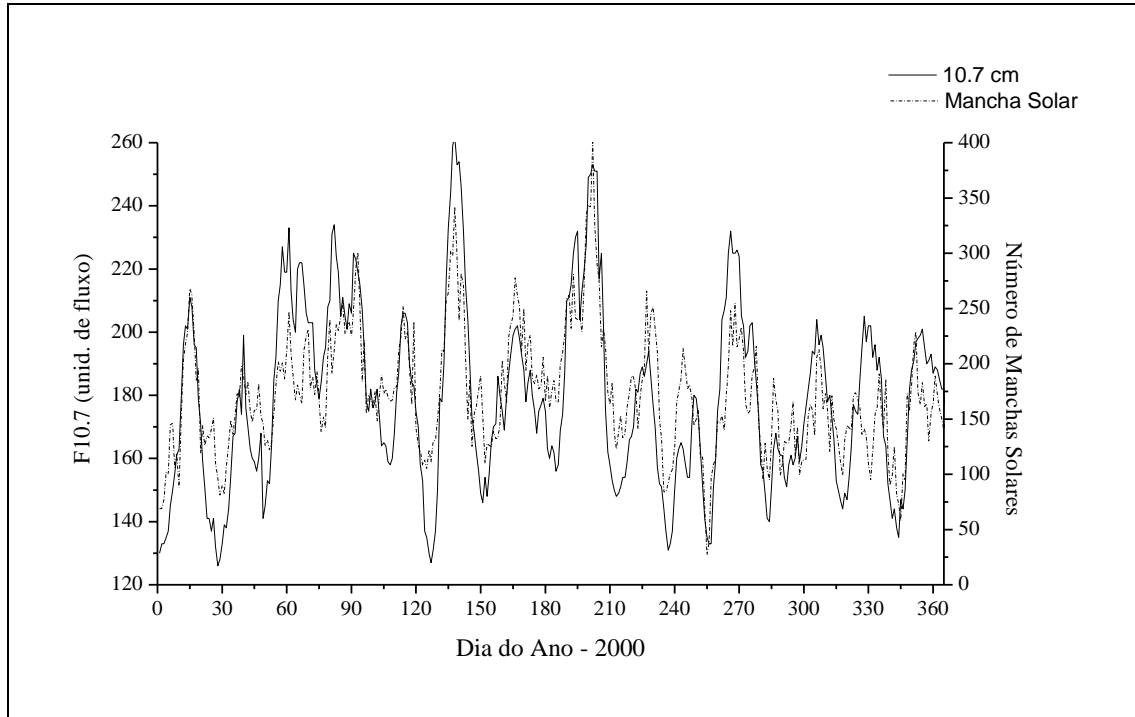


Figura 1 – Fluxo solar F10.7 e número de manchas solares.

Apesar de o F10.7 e o número de mancha solar indicarem a atividade solar, estes têm escalas diferentes. A conversão entre números de mancha solar (R) e o fluxo (F) pode ser realizada utilizando o par de equações (IPS, 2009).

$$\begin{aligned} F &= 67,0 + 0,572R + (0,0575R)^2 - (0,0209R)^3 \\ R &= 1,61FD - (0,0733FD)^2 + (0,0240FD)^3 \end{aligned} \quad (18)$$

com $FD = F - 67,0$.

O F10.7 pode ser usado como um índice diário ou uma média sobre longos períodos para registrar as tendências na atividade solar. O valor do fluxo de 10,7 cm é dado em Unidades de Fluxo Solar (SFU – *Solar Flux Unit*, $10^{-22} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) e normalmente é uma média mensal ou anual. Algumas vezes é calculada a média para 90 dias.

2.3 Equipamentos Terrestres de Sondagem da Ionosfera

A determinação da altura da camada ionosférica pela emissão de um pulso de radio frequência não modelado, verticalmente, é uma das técnicas que pode ser utilizada para

determinar as características ionosféricas. Esta altura verdadeira não pode ser determinada diretamente, logo a mesma é determinada por uma altura virtual a qual é função da frequência, da densidade de elétrons e da força do campo geomagnético (KOMJATHY, 1997).

As ondas de rádio também podem ser emitidas num ângulo oblíquo. A lei dos secantes estabelece a relação entre a frequência incidente na vertical e a incidente na oblíqua, dando a base teórica para o uso do radar de espalhamento oblíquo (*oblique backscatter radar*). Relações entre as frequências incidentes na vertical e na oblíqua, e alturas verdadeira e virtual podem ser encontradas em Davies (1990).

A ionossonda emite pulsos de onda eletromagnética na vertical, varrendo da baixa frequência para a alta, tipicamente de 1 a 25 MHz. Estas ondas são refletidas pela ionosfera. Então a medida do tempo entre a transmissão e a recepção dos sinais fornece informação sobre a altura da camada ionosférica para uma determinada frequência. Assim, a partir dos sinais retornados são gerados os ionogramas, que fornecem a relação entre a frequência e a altura virtual da camada ionosférica refrativa. A partir dos ionogramas podem ser obtidos os valores das alturas virtuais das camadas ionosféricas E, F1 e F2, das frequências críticas foE, foF1 e foF2, os perfis de densidade de elétrons, entre outros. Frequência crítica é o nome dado a frequência máxima de uma onda eletromagnética necessária para que esta seja refletida numa determinada camada ionosférica. A frequência crítica é denominada de acordo com a camada particular em que a mesma penetra (foE, foF1 e foF2) (MCNAMARA, 1991). Os equipamentos mais atuais recebem o nome de Digissonda (Radar de Sondagem Ionosférica Digital).

Segundo Komjathy (1997), o radar de espalhamento oblíquo emite ondas de rádio num ângulo oblíquo à ionosfera. Assim uma série de pulsos curtos de radio frequência é refratada pela ionosfera e espalhados de modo não uniforme na superfície terrestre. Algumas das ondas incidentes na ionosfera são retornadas ao longo do mesmo caminho (*backscatter*), detectadas e amplificadas no receptor.

Além dos instrumentos já citados, tem-se o radar de espalhamento incoerente (*Incoherent Scatter*) o qual é considerado uma das mais poderosas técnicas, baseadas em instrumentos terrestres, para estudos da ionosfera e as interações com a atmosfera superior, magnetosfera e meio interplanetário (KOMJATHY, 1997). O princípio também é baseado na detecção e estudo de um alvo a partir da transmissão de uma onda de rádio na direção deste alvo e observar a onda refletida. Como a energia dispersada por cada elétron é bem conhecida, a potência do eco recebido da ionosfera mede o número de elétrons no volume dispersado e

assim, a densidade de elétrons. A amplitude do espectro mede a temperatura da ionosfera, e a forma do espectro é uma função da taxa de temperatura do elétron e íon. Um deslocamento no espectro também pode ser detectado pelo radar, a partir do qual pode ser inferida a velocidade dos elétrons e íons (HAYSTACK, 2008).

2.4 Sondagem da Ionosfera a partir de Satélites

Como já mencionado, os sistemas de satélites que compõem o GNSS, se tornaram em uma das mais importantes ferramentas nos estudos da ionosfera. Além das aplicações relacionadas ao monitoramento da ionosfera, a influência dispersiva da ionosfera nos sinais GNSS permite determinar o erro propagado para as observáveis, a partir de medidas realizadas com receptores de dupla frequência. Ainda, através de métodos de modelagem usando funções analíticas, pode-se minimizar a influência deste efeito sobre os dados de usuários de receptores GNSS de simples frequência.

Além dos satélites do GNSS, há uma série de outros satélites com tecnologia que permitem medir a densidade de elétrons na ionosfera, tais como:

- o TOPEX/Poseidon (*Ocean Topography Experiment*) desativado em 2005, cuja missão teve continuação com o lançamento dos satélites Jason 1, em 2001, e Jason 2, em 2008;
- o PRARE (*Precise Range and Range Rate Experiment*) em operação desde 1995; e
- o DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) o qual é um instrumento que está em operação a bordo de vários satélites, tais como a série SPOT, o Jason, ENVISAT e Cryosat.

Além destes, pode-se citar outros satélites LEO, em operação, que carregam instrumentos GPS para medidas de rádio ocultação, tais como os satélites das missões GPS-MET, SAC-C, CHAMP e GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), e das missões mais recentes, COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*), e CICERO (*Community Initiative for Continuing Earth Radio*

Occultation) cujos primeiros satélites estão previstos para serem lançados em 2010 e a previsão de início da operação do sistema é para 2011.

2.4.1 Missão TOPEX/Poseidon

A missão TOPEX/Poseidon (T/P) surgiu de um esforço conjunto entre a Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA – *National Aeronautics and Space Administration*) e a Agência Espacial da França (CNES – *Centre National d’Etudes Spatiales*), para estudos oceanográficos. Os dados da missão também são utilizados para estudos relacionados as marés oceânicas, geodinâmica, geodésia, altura das ondas do oceano e velocidade do vento.

A posição do satélite, que está a aproximadamente 1330 km de altura, é determinada com acurácia da ordem de 10 cm e é obtida a partir dos dados de um receptor GPS de dupla frequência a bordo do satélite. O T/P carrega a bordo: receptor GPS de dupla frequência, radar altimétrico de simples e dupla frequência, estrutura refletora de *laser*, radiômetro de micro-ondas TOPEX e receptor DORIS de dupla frequência (AZPILICUETA, 2006). A partir dos dados do radar altimétrico de dupla frequência pode-se calcular medidas acuradas do TEC sobre os oceanos, e que podem ser utilizadas como informações externas aos modelos ionosféricos para comparação e avaliação da modelagem, bem como do TEC obtido por observações GPS (AZPILICUETA et al., 2006; ORÚS et al., 2003).

Em dezembro de 2001 foi lançado o satélite Jason-1 que trata-se de uma continuação da missão T/P. Os instrumentos carregados pelo Jason-1 são atualizações do seu antecessor T/P. Em junho de 2008 foi lançado o satélite Jason-2.

2.4.2 Sistema DORIS

O DORIS é um sistema Francês, o qual é baseado na medida acurada do deslocamento Doppler de sinais de rádio frequência emitidos por estações terrestres. As medidas são feitas na frequência de 2 GHz para o Doppler e na frequência de 401,25 MHz para correção ionosférica. Assumindo que as medidas em ambas frequências são iguais, exceto para o efeito da ionosfera, este pode ser deduzido a partir destas medidas e a correção

ionosférica ser aplicada às medidas de 2 GHz. Estas correções podem ser associadas ao TEC (KOMJATHY, 1997). O sistema DORIS está a bordo da série de satélites SPOTs de sensoriamento remoto, e dos satélites TOPEX/Poseidon e Jason.

Segundo Komjathy (1997), comparações em escala global mostraram que o nível de concordância entre o TEC obtido pelos dados do DORIS e o modelo IRI-95 chega ao nível de 2,5 TECU (TEC *units* – unidades de TEC).

2.4.3 Missões CHAMP, COSMIC e CICERO

O satélite Alemão LEO-CHAMP, para aplicações e pesquisas geofísicas, foi lançado da Rússia, Plesetsk, com o foguete COSMOS, em 15 de julho de 2000 (GFZ, 2008).

As medidas do CHAMP são usadas para determinar os campos de gravidade e magnético da Terra, e para produzir informações precisas sobre a temperatura vertical, umidade e distribuição da densidade de elétrons em escala global, usando a técnica de rádio ocultação GPS (GPS-RO). Essa técnica de sondagem da atmosfera com GPS oferece grande potencial para pesquisa atmosférica e ionosférica, melhorando as previsões do tempo, monitoramento espacial do tempo (clima) e detecção da mudança do clima.

O potencial desta técnica de sondagem foi demonstrado a primeira vez pelo experimento pioneiro do U.S. Americano GPS-MET, juntamente com o satélite Argentino SAC-C e que sucedeu o GPS-MET. As medidas de ambos os satélites e a infra-estrutura melhorada (em relação ao GPS-MET) para a recepção, transferência, análise e fornecimento de dados de rádio ocultação GPS, trouxeram significativo progresso à técnica de rádio ocultação.

As medidas GPS a bordo do CHAMP são processadas automaticamente resultando em produtos de dados ionosféricos que são oferecidos para a comunidade mundial de usuários via GFZ Potsdam (GFZ, 2008)

De modo geral, na sondagem ionosférica utilizando dados CHAMP a ionosfera pode ser dividida em duas partes: a ionosfera abaixo da órbita do CHAMP (*bottom side*), da qual o perfil é gerado a partir de dados de rádio ocultação, e a ionosfera acima da órbita do CHAMP (*top side*), a qual é perfilada utilizando dados recebidos pela antena GPS (*upward looking*) acima do CHAMP.

Com o amadurecimento da técnica de radio ocultação novos projetos estão em desenvolvimento, com o objetivo de ampliar os estudos e conhecimentos das Ciências da Terra e do Clima Global. Em relação aos estudos da ionosfera podem-se citar os projetos mais recentes COSMIC e CICERO.

O COSMIC é um projeto desenvolvido através de esforços conjuntos entre Estados Unidos e Taiwan. Este projeto consiste de seis satélites que foram lançados em 2005 e têm previsão de permanecerem em operação por cinco anos. Cada satélite é equipado com receptores GPS, projetados pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) da NASA, usados para aplicação da técnica de rádio ocultação GPS. Atualmente são obtidos, aproximadamente, 1500 perfis por dia utilizando esta constelação de satélites.

Para o projeto CICERO está prevista uma composição de 100 micro-satélites LEO, equipados com receptores que permitam realizar a radio ocultação GPS e Galileo (GNSS-RO). Outra técnica, denominada de *GPS Surface Reflection*, também será utilizada nos estudos da atmosfera terrestre e no sensoriamento remoto da superfície. Dentre os produtos pretendidos pelo CICERO destacam-se: perfis da pressão atmosférica, temperatura e umidade, com alta acurácia; mapas tridimensionais da distribuição de elétrons na ionosfera; e uma variedade de medidas de propriedades dos oceanos e do gelo. As principais aplicações destes dados serão a predição do estado atmosférico, as pesquisas climáticas e o monitoramento do espaço atmosférico. Em sua fase inicial, com uma constelação de 20 satélites, o CICERO deverá entrar em operação em 2011 (GEOOPTICS, 2009).

2.5 Modelos Empíricos

Dentre os modelos empíricos mais utilizados e pesquisados pode-se citar o modelo climatológico IRI (*International Reference Ionosphere*) e o modelo teórico PIM (*Parameterized Ionospheric Model*). Os mesmos já sofreram várias modificações. Entre os modelos empíricos mais utilizados cita-se também o modelo *Broadcast*, o qual é o mais conhecido dentro da comunidade de usuários do GPS, cujos coeficientes são transmitidos nas mensagens de navegação.

2.5.1 Modelo Broadcast

O modelo matemático envolvido na correção do efeito da ionosfera no GPS, cujos coeficientes são transmitidos com as mensagens de navegação, foi desenvolvido por Klobuchar (1987) para atender, especificamente, os usuários de receptores GPS de simples frequência. O modelo *Broadcast*, também conhecido por modelo de Klobuchar ou ICA (*Ionospheric Correction Algorithm* – Algoritmo de Correção Ionosférica), foi baseado no modelo de Bent. É o modelo mais utilizado, pois seus coeficientes são transmitidos com os sinais do GPS e seu algoritmo está implementado nos *softwares* comerciais. Esse modelo permite calcular o atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica para a pseudodistância entre o satélite e o receptor. Os coeficientes do modelo, num total de oito (α_i e β_i , $i = 0, \dots, 3$), são transmitidos pelos satélites como parte das mensagens de navegação (LEICK, 1995). O modelo é limitado a 8 coeficientes devido a limitações no comprimento das mensagens de navegação do GPS (KLOBUCHAR, 1987). Portanto, são válidos para qualquer usuário do sistema GPS, razão pela qual é considerado como um modelo global.

Para descrever a variação da ionosfera durante o dia, o modelo utiliza-se da função co-seno com amplitude máxima às 14:00 horas locais. A amplitude e o período da função co-seno são calculados em função da latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos pelos satélites, representados por um polinômio de terceiro grau. Durante a noite, o atraso ionosférico em L_1 é considerado constante e igual a 5 nanosegundos, que equivale, aproximadamente, a 1,5 m ou 9,24 unidades de TEC (TECU), sendo que $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ (KLOBUCHAR, 1987).

O algoritmo empregado no modelo de Klobuchar para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L_1 , além dos oitos coeficientes, utiliza a latitude, a longitude geodésica da estação, o azimute, o ângulo de elevação do satélite e o tempo GPS da época de observação. A sequência detalhada deste algoritmo pode ser encontrada em Klobuchar (1987).

De acordo com a literatura, o modelo compensa aproximadamente 50-60% do atraso ionosférico total em regiões de latitudes médias (AGUIAR et al., 2003; LEICK, 1995; MATSUOKA; CAMARGO, 2002). Este modelo pode satisfazer em geral aplicações de navegação de baixa precisão.

Os coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação são atualizados a cada 10 dias pelo Controle Principal do GPS ou com maior frequência quando há mudanças

significativas no valor médio de 5 dias do fluxo solar dentro do período de 10 dias. Estes coeficientes são determinados como função do dia do ano e do fluxo solar de 10.7 cm (F10.7) (NWRA, 2007).

O modelo de Klobuchar é baseado num total de 370 conjuntos de 8 coeficientes (GIM, 2009; WALSH, 2007). A escolha de um conjunto particular dos coeficientes do modelo de Klobuchar, transmitidos nas mensagens de navegação, é baseado no dia do ano e na média dos números do fluxo solar observados nos cinco últimos dias. Um ano é dividido em 37 períodos de 10 dias (37 grupos). Cada período é representado por 10 diferentes níveis de atividade solar. Os níveis de atividade solar (10 grupos) são separados pelos seguintes números de fluxo solar, em unidades de fluxo: 75, 100, 120, 140, 155, 170, 185, 200, 215 e 230. A atividade solar menor do que 75 unidades de fluxo é classificada no nível 1 e maior do que 230 unidades de fluxo é classificada no nível 10 (KOMJATHY, 2000; KOMJATHY; LANGLEY, 1995).

O CODE (*Center for Orbit Determination in Europe* – Centro Europeu para a Determinação de Órbita) também gera os oito coeficientes para o modelo de Klobuchar usando os Mapas Globais da Ionosfera (GIMs – *Global Ionosphere Map*) calculados a partir de dados GPS, e distribuem estes coeficientes como um produto ionosférico adicional (MEMARZADEH; MAREL, 2006). O modelo com os coeficientes gerados pelo CODE é conhecido por Klobuchar-Style (GIM, 2009).

2.5.2 Modelo NeQuick

Assim como o GPS, o Galileo também fornecerá suporte para usuários de receptores de simples frequência fornecendo um modelo de correções ionosféricas. O modelo de correção da ionosfera adotado pelo Galileo é o modelo de densidade de elétrons tridimensional NeQuick, desenvolvido por *Abdus Salam ICTP* (Itália) e pela *Unniversity of Graz* (Áustria) (MEMARZADETH; MAREL, 2006; MEMARZADETH, 2009; RADICELLA, 2009). Este modelo é baseado no modelo DGR (Di Giovanni - Radicella) (DI GIOVANNI; RADICELLA, 1990).

A construção do modelo tridimensional do modelo NeQuick é baseada nas características das camadas ionosféricas E, F1 e F2. Como parâmetros de entrada o modelo necessita da localização, do tempo e do índice de atividade solar F10.7 ou do número médio

de manchas solares R12. A atividade solar é modelada por um polinômio de segunda ordem, dado por $Az(\mu) = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2$, onde Az é o nível efetivo de ionização, μ é a latitude Dip² modificada (MODIP) e a_0 , a_1 e a_2 são os parâmetros do NeQuick que são transmitidos nas mensagens de navegação do Galileo (MEMARZADETH, 2009; RADICELLA, 2009; OS-SIS-ICD, 2010). Segundo a documentação OS-SIS-ICD (2010), o modelo ionosférico corrige 70% do efeito da ionosfera sobre os sinais E5a, E5b, E6 e E1 transmitidos pelos satélites do Galileo. Atualmente, este modelo possui uma nova versão, denominada de NeQuick 2.

2.5.3 Modelo LPIM (*La Plata Ionospheric Model*)

Além da determinação de um referencial geodésico geocêntrico, o SIRGAS também tem promovido a instalação de centros de análises da ionosfera. Dentro deste contexto, o Centro de Análise Ionosférica do SIRGAS, localizado na Universidade Nacional de La Plata, produz mapas horários de VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção Vertical) desde 2005, para a região de cobertura da rede SIRGAS. Estes mapas ionosféricos são conhecidos como SIRGAS-UNLP e são calculados utilizando o modelo LPIM (SIRGAS, 2010).

O LPIM consiste num algoritmo para o cálculo de mapas de VTEC, baseado em observações coletadas de estações GPS de referência. Diariamente são utilizadas, aproximadamente, 50 estações GPS gerar os mapas regionais de VTEC. Neste modelo a ionosfera é representada utilizando os harmônicos esféricos. Deve-se destacar também que este modelo utiliza a latitude MODIP (AZPILICUETA, 2006; AZPILICUETA, BRUNINI, RADICELLA, 2006).

2.5.4 Modelo IRI (*International Reference Ionosphere*)

O IRI é um modelo empírico climatológico, o qual é baseado na parametrização de uma grande quantidade de dados ionosféricos coletados num longo período de tempo. A partir desta série temporal de dados é possível realizar a parametrização de termos como

² Dip se refere à inclinação magnética.

atividade solar, variação sazonal e variações em função da latitude geográfica, longitude e hora local.

Este modelo faz parte de um projeto internacional financiado pelo COSPAR (*COmmitee on SPAce Research*) e pela URSI (*International Union of Radio Science*). A primeira versão do IRI foi disponibilizada em 1978, a qual foi seguida por varias edições melhoradas em 1986, 1990, 1995 e 2001. A versão mais atual disponível deste modelo é a de 2007 (<http://iri.gsfc.nasa.gov/>). A formulação do IRI é descrita em detalhes em Bilitza (1990). Para uma determinada localização, data e hora, o IRI descreve a densidade de elétrons, temperatura do íon, a composição de íon em altitude no intervalo de 50 a 2000 km, bem como o TEC. As principais fontes de dados para o IRI são a rede mundial de ionosondas, os radares *Incoherent Scatter*, e vários outros instrumentos a bordo de satélites e foguetes (BILITZA; REINISCH, 2008).

2.5.5 Modelo PIM (*Parameterized Ionospheric Model*)

Segundo Komjathy (1997), o PIM foi desenvolvido a partir de quatro modelos físicos considerando a camada da ionosfera e a latitude, ou seja, um modelo da camada F em baixa latitude, um modelo da camada F em latitude média, um modelo da camada E combinando baixa e média latitudes, e finalmente um modelo para as camadas E e F em alta latitude. Este modelo foi desenvolvido pela *Computation Physics, Inc.* e foi financiado pela *Battlespace Environment Division of the Air Force Research Laboratory* (AFRL) (CPI, 2009).

Diferentemente do IRI, o qual é baseado na climatologia empírica, o PIM é baseado na climatologia teórica e fornece perfis de parâmetros ($Fo2$, $hmF2$, TEC), perfis da composição de íon e densidade de elétrons a partir de modelo numérico baseado na física para várias condições geofísicas. A partir do PIM foi desenvolvido um modelo para aplicação em tempo real denominado de PRISM (*Parameterized Real-Time Ionospheric Specification Model*). O PRISM utiliza o PIM com dados obtidos de fontes espaciais e terrestres para atualizar o modelo climatológico em tempo quase real. Para a localização e condições geofísicas especificadas pelo usuário, o PIM produz perfis de densidade de elétrons para altitudes entre 90 e 2500 km (CPI, 2009).

3 REPRESENTAÇÃO ANÁLITICA DA IONOSFERA

Como já mencionado, a ionosfera afeta os sinais GPS no seu trajeto entre o satélite e o receptor, provocando um atraso no grupo (código) e um avanço na fase da portadora. Isto resulta num aumento nas distâncias obtidas a partir do código e numa diminuição nas obtidas pela fase da portadora de uma mesma quantidade, mas de sinais opostos. Este efeito é proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência.

De modo geral, Klobuchar e Kunches (2001) classificam as correções de acordo com a porcentagem de correção do atraso ionosférico obtida e cita os principais modelos dentro desta classificação:

- **0%:** sem correção do atraso ionosférico;
- **50%:** utiliza o Algoritmo de Correção Ionosférica (ICA – *Ionospheric Correction Algorithm*) projetado para corrigir aproximadamente 50% (RMS) do atraso ionosférico e composto por 8 coeficientes. Este é o modelo *Broadcast* (Klobuchar) e pode ser aplicado em tempo real;
- **75%:** modelo ionosférico que exige muitos coeficientes, tais como o IRI e o modelo de Bent, ambos disponíveis na Internet e não podem ser aplicados em tempo real;
- **90%:** utilizando correções ionosféricas do WAAS, que são transmitidas como parte das mensagens de aumento WAAS. Estas correções fornecem dados de atraso ionosférico próximo do tempo real, obtidos a partir de uma rede de referência WAAS. A correção é de apenas 90% devido à necessidade de interpolar os valores do atraso inclinado (direção satélite/receptor) do usuário a partir de uma grade ($5^{\circ} \times 5^{\circ}$) de valores de atraso vertical; e
- **99%:** usa receptor de dupla frequência para remover o atraso ionosférico. Este método mede diretamente o atraso ionosférico inclinado para cada satélite observado e não envolve modelos computacionais e interpolações.

Assim, diferentes métodos estão disponíveis para determinar o erro devido à ionosfera e então minimizá-lo nas medidas GPS. Vários métodos e modelos ionosféricos foram desenvolvidos para a determinação e representação do TEC na ionosfera, e assim permitir a correção da refração ionosférica na portadora L_1 dos receptores GPS de uma frequência. A quantificação deste efeito pode ser feita através de:

- coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação, utilizando o modelo *Broadcast* ou modelo de Klobuchar;
- coeficientes de modelos de representação analítica da ionosfera, estimados a partir de redes de estações de referência;
- cálculo do TEC a partir de observações coletadas com receptores GPS de dupla frequência; e
- sensores orbitais a bordo de satélites tal como o TOPEX/POSEIDON, para medidas sobre os oceanos.

3.1 Modelo do Ponto Ionosférico e Função de Mapeamento

O modelo do ponto ionosférico considera que a ionosfera é aproximada por uma fina camada localizada a uma altura média que pode variar de 300 a 450 km. O modelo que relaciona o atraso ionosférico na direção satélite/receptor (I_r^s) ao atraso na vertical (I^v), também denominado de função de mapeamento geométrico padrão, é dado por (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001):

$$I_r^s = \frac{I^v}{\cos(z^s)} = sf(z^s)I^v, \quad (19)$$

onde $sf(z^s)=1/\cos(z^s)$ e z^s representa o ângulo zenital do caminho do sinal calculado no ponto em que este atravessa a camada ionosférica (IPP) à um plano de altitude média h_m . O valor de z^s é obtido de acordo com a seguinte equação (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001):

$$\text{sen}(z_r^s) = \frac{r_m}{r_m + h_m} \text{sen}(z_r^s), \quad (20)$$

onde r_m é o raio médio da Terra, h_m representa a altura média da ionosfera e z é a distância zenital do satélite calculada em função do ângulo de elevação (el) do satélite ($z_r^s = 90^\circ - (el)_r^s$).

3.2 Modelos Bidimensionais

De modo geral os modelos bidimensionais podem ser classificados em modelos baseados em grade e modelos baseados em funções analíticas.

Para os modelos baseados em grade vários algoritmos foram desenvolvidos devido às diferentes formas de ponderação (BLANCH, 2003; LIAO, 2000; SKONE, 1998). Dentre os modelos baseados em funções pode-se citar aqueles que usam função polinomial (KOMJATHY, 1997), harmônicos esféricos (SCHAER, 1999), série de Fourier (AGUIAR, 2005; CAMARGO, 1999), entre outros. Em Matsuoka (2003), essas 3 funções matemáticas de modelagem, bem como a série de Taylor, foram testadas e comparadas. Os resultados desses experimentos no posicionamento por ponto mostraram que as funções série de Fourier, de Taylor e a polinomial foram as mais eficazes na correção do erro sistemático devido à ionosfera na direção vertical, proporcionando uma melhora média na acurácia da ordem de 28% para a posição horizontal e de 67% para a posição vertical (MATSUOKA, 2003).

Uma característica comum destes modelos é que eles mapeiam as medidas do atraso ionosférico inclinado para uma fina camada ionosférica localizada entre 300 e 450 km de altitude. A hipótese deste modelo é que toda a densidade de elétrons está concentrada numa fina camada ou numa única casca e que o atraso ionosférico ocorre nesta fina camada.

Os coeficientes das funções de modelagem apresentadas a seguir, podem ser estimados utilizando ajustamento pelos mínimos quadrados em lote ou filtro de Kalman.

3.2.1 Função de modelagem série de Fourier

Camargo (1999) e Georgiadiou (1994) modelam, diretamente, o erro vertical devido à ionosfera na portadora L_1 (I_1^v), a partir de uma série do tipo Fourier. Camargo (1999) desenvolveu o modelo regional da ionosfera Mod_Ion. Este modelo é uma modificação do modelo de Georgiadiou (1994). A modificação consistiu na separação das tendências dos equipamentos (receptores e satélites). Devido à natureza periódica do efeito da ionosfera, Camargo (1999) utiliza a seguinte série do tipo Fourier para modelar a correção ionosférica na direção da vertical:

$$I^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=6} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} + a_{n*2+3} B^s h^s. \quad (21)$$

As variáveis (a_1, a_2, \dots, a_{15}) são os coeficientes da série. A variável B^s representa a latitude geográfica do ponto ionosférico e a variável h^s é dada por (CAMARGO, 1999):

$$h^s = \frac{2\pi}{T} (t - 14^h), \quad (22)$$

onde T representa o período de 24 horas e t a hora local do ponto sub-ionosférico.

Aguiar (2005) implementou a estimativa em tempo real (Mod_Ion_FK), iniciada por Camargo (2001). Este modelo é uma modificação do modelo de Camargo (1999). A modificação foi realizada na função de modelagem e na implementação do algoritmo do filtro de Kalman (KALMAN, 1960; TEUNISSEN, 1990) com controle de qualidade utilizando o processo *data-snooping*.

A função de modelagem utilizada em Aguiar (2005) trata-se de duas séries do tipo Fourier, perpendiculares entre si:

$$I^v = a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=4} \{a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)\} + a_{n*2+3} h^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+10}}^{m=4} \{a_j \cos(i B^s) + a_{j+1} \sin(i B^s)\}. \quad (23)$$

As variáveis (a_1, a_2, \dots, a_{19}) são os coeficientes da série. Nota-se que esta função está modelando o atraso ionosférico em longitude e em latitude. No modelo dinâmico foram implementados os processos *random-constant*, *random-walk* e *Gauss-Markov*. Mais detalhes pode ser encontrado em Aguiar (2005).

Em Aguiar (2005) e Camargo (1999), o erro devido à ionosfera é obtido em função do atraso ionosférico vertical (I^v), por meio da função de mapeamento geométrico padrão (equação 19).

3.2.2 Função de modelagem harmônico esférico

Kee e Yun (1998) utilizam o harmônico esférico para representar o atraso ionosférico na direção vertical (I_1^v):

$$I^v = \sum_{n=0}^t \left\{ \sum_{m=0}^n [C_{nm} \cos(mt) + S_{nm} \sin(mt)] P_{nm}(\sin(\phi_{mIP})) \right\}, \quad (24)$$

onde:

- n e m - respectivamente, o grau e a ordem da função de Legendre;
- C_{nm} e S_{nm} - coeficientes da função que devem ser estimados;
- t - hora local do ponto ionosférico normalizada entre 0 e 2π ;
- $P_{nm}(X)$ - polinômio de Legendre; e
- ϕ_{mIP} - latitude geomagnética do ponto ionosférico.

Schaer (1999) também utiliza harmônicos esféricos para modelar a ionosfera, porém com algumas modificações em relação a equação 24:

$$VTEC = \sum_{n=0}^n \left\{ \sum_{m=0}^m [C_{nm} \cos(m\zeta) + S_{nm} \sin(m\zeta)] P_{nm}(\sin(m\phi_{mIP})) \right\}, \quad (25)$$

onde ζ é a longitude geomagnética do ponto ionosférico. Observa-se que Schaer (1999) modela o TEC na direção vertical. Para obter os valores em I^v , basta aplicar a relação dada pela equação 16 ou 17.

3.2.3 Função de modelagem polinomial

Outro tipo de função para modelar o atraso ionosférico é a função polinomial. Komjathy (1997) propôs um modelo ionosférico onde a função é dada por:

$$I_{rs}^v(t_k) = a_{0,rs}(t_k) + a_{1,rs}(t_k)d\lambda_{rs} + a_{2,rs}(t_k)d\phi_{rs}, \quad (26)$$

onde:

- a_0, a_1 e a_2 - coeficientes para aproximação linear espacial do atraso ionosférico e devem ser determinados;
- $d\lambda_{rs}$ - diferença entre a longitude do ponto sub-ionosférico e a longitude do sol médio; e
- $d\phi_{rs}$ - diferença entre a latitude geomagnética do ponto sub-ionosférico e a latitude geomagnética da estação.

3.2.4 Função de modelagem série de Taylor

Liao (2000) apresenta um modelo baseado na expansão da série de Taylor, para descrever o VTEC:

$$VTEC = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} E_{nm} (\phi - \phi_0)^n (\lambda - \lambda_0)^m, \quad (27)$$

onde:

- φ e λ - latitude e longitude geomagnéticas do ponto ionosférico;
- φ_0 e λ_0 - coordenadas de origem da expansão da série;
- n_{\max} e m_{\max} - determinam a ordem máxima da expansão bidimensional da série de Taylor em latitude e longitude; e
- E_{nm} - coeficientes da série de Taylor e que devem ser estimados.

3.2.5 Modelo Tridimensional (Tomografia)

Devido algumas limitações dos modelos que consideram a ionosfera como uma fina camada, têm sido propostos os modelos tomográficos (BLANCH; WALTER; ENGE, 2004; HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2001; LIU, 2004; MITCHELL et al., 1997; RIUS; RUFFINI; CUCURULL, 1997). A tomografia reconstrói o perfil de densidade de elétrons na ionosfera a partir das medidas inclinadas. A partir da decomposição da equação 15 em duas partes $N_0(\lambda, \phi, h)$ e $\delta N_e(\lambda, \phi, h)$, Liu (2004) apresenta uma expressão considerando um perfil de densidade de elétrons:

$$TEC = \int_r^s N_e(\lambda, \phi, h) ds = \int_r^s N_0(\lambda, \phi, h) ds + \int_r^s \delta N_e(\lambda, \phi, h) ds, \quad (28)$$

onde:

- $N_e(\lambda, \phi, h)$ - função da densidade ionosférica de elétrons na posição (λ, ϕ, h) ;
- (λ, ϕ, h) - três componentes da posição espacial, representando a longitude no sistema solar fixo, a latitude geomagnética e altitude, respectivamente;
- $N_0(\lambda, \phi, h)$ - valor aproximado representando a parte conhecida de $N_e(\lambda, \phi, h)$; e
- $\delta N_e(\lambda, \phi, h)$ - correção aplicada à $N_0(\lambda, \phi, h)$.

O valor aproximado de $N_0(\lambda, \phi, h)$ pode ser obtido a partir de dados históricos da densidade de elétrons ou a partir da saída de modelos empíricos, tal como o perfil obtido pelo modelo IRI-2007. Para determinar a correção $\delta N_e(\lambda, \phi, h)$, Liu (2004) aplica o modelo tomográfico baseado em *voxel* e uma função de harmônicos esféricos:

$$\delta N_e(\lambda, \phi, h) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|M|}^M [a_{nk}^m \cos(m\lambda) + b_{nk}^m \sin(m\lambda)] P_{nm}(\cos \phi) Z_k(h), \quad (29)$$

onde:

$Z_k(h)$ - função ortogonal empírica, cujos dados da densidade de elétrons na ionosfera podem ser obtidos a partir de modelos ionosféricos tal como o IRI;

a_{nk}^m, b_{nk}^m - coeficientes do modelo a serem estimados;

K - maior ordem da função ortogonal empírica; e

M - maior ordem da função de harmônicos esféricos.

3.3 Modelos do IGS

O IGS tem um grupo de trabalho para desenvolver modelos para serem utilizados na geração de Mapas Globais da Ionosfera (GIM). Quatro centros de análise do IGS produzem estimações do GIM no formato IONEX, um padrão desenvolvido pela comunidade IGS. As agências que contribuem com o IGS são (IGS, 2009):

- CODE – *Center for Orbit Determination in Europe (Switzerland)*: no modelo do CODE, o TEC é modelado por uma expansão em harmônicos esféricos até grau e ordem 15, referido a uma estrutura de referência geomagnética solar. Os parâmetros da ionosfera, a cada 2 horas, são obtidos a partir de medidas da fase da portadora da rede global do IGS (GIM, 2009);
- ESOC – *European Space Operations Centre (Germany)*: para modelar a ionosfera o ESOC utiliza um modelo bi-dimensional considerando a ionosfera como uma única camada, bem como um modelo baseado no perfil 3D de Chapman, com uma integração vertical usando uma função exponencial do tipo Gauss (IONMON, 2003);

- JPL – *Jet Propulsion Laboratory (USA)*: no JPL os GIMs são gerados a cada hora, diariamente. A ionosfera é modelada numa estrutura de referência geomagnética solar usando *splines* bi-cúbicas numa grade esférica. O filtro de Kalman é usado para resolver, simultaneamente, a tendência instrumental L_1 - L_2 e o atraso vertical nos pontos de uma grade ionosférica. Os parâmetros são modelados como um processo estocástico (IARS, 2009); e
- UPC – *Polytechnical University of Catalonia (Spain)*: na UPC um modelo tomográfico estocástico é usado e a ionosfera é dividida em duas camadas. As altitudes limites são de 59-739 Km e de 739-1419 Km (UPC, 2009).

Os arquivos IONEX contêm os valores de TEC em forma de grade, em incrementos de 2 horas, com um espaçamento de $2,5^\circ$ em latitude por 5° em longitude. A avaliação dos mapas de TEC do IGS pode ser encontrada em diversos trabalhos, dentre os quais pode-se citar: Armendariz, Matsuoka e Camargo (2009), Azpilicueta (2006), Hernández-Pajares et al. (2009), Matsuoka e Camargo (2007), Ovstedal (2002), entre outros.

3.4 Modelagem baseada em Grade Ionosférica

3.4.1 Técnicas usadas para a interpolação da grade ionosférica

Talvez a modelagem de grade mais conhecida, usando rede de estações de referência, é a modelagem sobre rede WADGPS, com destaque ao sistema americano WAAS. Além do exemplo do WAAS, vários trabalhos vêm sendo realizados a fim de aplicar modelos baseados em grade: Blanch (2003), Gao e Liu (2002), Liu (2001), Liu (2004), Mueller e Davis (1998), Sarma, Prasad e Madhu (2006), entre outros.

Gao e Liu (2002) utilizando a modelagem de grade, onde a ionosfera é considerada como uma fina camada e a grade com espaçamento de $3^\circ \times 3^\circ$, relacionam o atraso

ionosférico inclinado do ponto ionosférico ao atraso vertical dos 4 IGP vizinhos, pela seguinte equação:

$$I_r^s = \text{sf}(\text{el}') \sum_{k=1}^4 (I^v)_k p_k, \quad (30)$$

onde I_r^s é a medida do atraso ionosférico e $\text{sf}(\text{el}') = 1/\text{sen}(\text{el}')$ é a função de mapeamento considerando o ângulo zenital do satélite ($\text{el}' = 90 - z'^s$). O parâmetro $(I^v)_k$ denota o atraso ionosférico vertical do k -ésimo IGP que é ponderado pela função peso p_k , a qual é usada para projetar $(I^v)_k$ no ponto ionosférico do usuário.

Assim como a função de mapeamento, a escolha da função peso (p_k) é algo arbitrário. Os algoritmos podem ser baseados na média ponderada pelo inverso da distância, inverso do quadrado da distância (KOMJATHY, 1997) interpolação bilinear, spline bicúbica, funções de peso multiquádrica (SKONE, 1998), entre outros.

Uma fórmula semelhante à equação 30 para estimar o atraso ionosférico vertical dos IGP também é usada por Skone (1998):

$$\text{TEC}_r^s(t_j) = \frac{1}{\text{sf}(\text{el}')} \sum_{k=1}^4 W_k(t_j) \times \text{VTEC}_k(t_j) + b^s + B_r + \varepsilon_{\text{TEC}}, \quad (31)$$

onde a ionosfera é modelada a partir de medidas de $\text{TEC}_r^s(t_j)$ no ponto ionosférico (IPP³ – *Ionospheric Pierce Point*), na época t_j ; $\text{VTEC}_k(t_j)$ é o valor do atraso vertical dos quatro pontos do grade que circunvizinham IPP; $W_k(t_j)$ é a função peso que determina a contribuição de cada IGP para determinar o atraso ionosférico do ponto ionosférico do usuário; b e B são, respectivamente, as tendências interfrequência dos satélites e receptores; e o termo ε_{TEC} refere-se ao ruído nas medidas de TEC.

Para a função peso Skone (1998) utiliza a interpolação multiquádrica que foi incluída nas especificações do WAAS em 1994, dada por (WAAS, 2001):

³ O cálculo da latitude e da longitude geográfica do IPP pode ser encontrado em Matsuoka, 2007, Moon (2004), Skone (1998), WAAS (2001), entre outros.

$$\begin{aligned}
W_1 &= W(1-t, 1-u) \\
W_2 &= W(1-t, u) \\
W_3 &= W(t, u) \\
W_4 &= W(t, 1-u) \\
W(t, u) &= t^2 u^2 (9 - 6t - 6u + 4tu) \\
u &= (\phi' - \phi_1) / (\phi_4 - \phi_1) \\
t &= (\lambda' - \lambda_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)
\end{aligned} \tag{32}$$

Os parâmetros envolvidos na equação 32 podem ser observados na Figura 2.

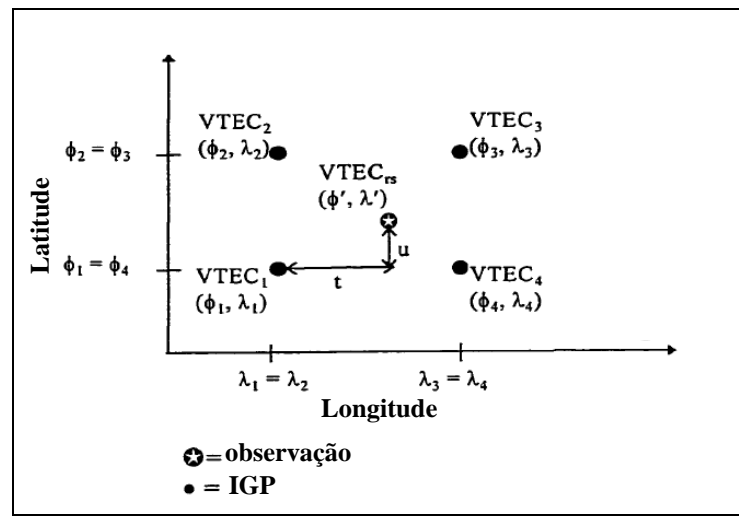


Figura 2 – Ponto ionosférico observado e IGP vizinhos.

Fonte: Adaptada de WAAS (2001).

Skone (1998) utiliza o filtro de Kalman e os valores do $VTEC_k(t_{j+1})$ são estimados num processo estocástico no tempo, aplicando-se *Gauss-Markov* de primeira ordem:

$$VTEC_k(t_{j+1}) = e^{-\beta(\Delta t)} VTEC_k(t_j) + w(t_j). \tag{33}$$

Komjathy (1997) usa uma função semelhante e o atraso ionosférico para os pontos da grade pode ser calculado a partir da equação 26. Para cada estação IGS, Komjathy (1997) estima os três coeficientes (a_0 , a_1 e a_2) utilizando o filtro de Kalman. Após a estimação dos coeficientes associados a cada estação, é realizada uma interpolação para estimar o atraso ionosférico em pontos de grade regularmente espaçados. Este processo é realizado, pela UNB (*University of New Brunswick*), para gerar mapas de VTEC regional, com espaçamento $1^\circ \times 1^\circ$,

e global, com espaçamento de 5°x5°. Como função peso Komjathy (1997) utiliza o inverso do quadrado da distância para determinar os valores de VTEC para os IGP:

$$\text{VTEC}_i = \frac{\sum_{j=1}^4 \frac{1}{d_j^2} \text{VTEC}_j}{\sum_{j=1}^4 \frac{1}{d_j^2}}, \quad (34)$$

onde:

VTEC_i - VTEC calculado para o i-ésimo IGP;

VTEC_j - VTEC calculado com base nos coeficientes do modelo ionosférico (equação 26) para a j-ésima estação IGS; e

d_j - distância entre a estação IGS(j) e IGP(i).

Alguns pesquisadores também têm adotado o método *kriging* para os modelos baseados em grade, dentre os quais pode-se citar Blanch (2003), Blanch, Walter e Enge (2003, 2004), Wielgosz, Grejner-Brzezinska e Kashani (2003).

Em termos de SBAS, o modelo usado para a propagação do atraso ionosférico no WAAS e no MSAS é semelhante à função dada pela equação 26, e é denominado de “ajuste do plano” (*planar fit*) de primeira ordem (BLANCH, WALTER, ENGE, 2004; SAKAI et al., 2004).

Uma etapa importante para a geração da grade ionosférica é a definição dos IPPs que serão utilizados no processo de interpolação. Para determinar os IPPs que são utilizados para estimar o atraso ionosférico do IGP, definiu-se um raio de busca (R_{\max}) a partir do IGP. A maioria dos pesquisadores tem adotado $R_{\max} = 2100$ km, assim como o WAAS e o MSAS. Além do raio, também é definido o número mínimo (N_{\min}) de IPPs. No caso do WAAS se $N_{\min} < 10$, o “ajuste do plano” não é realizado e o IGP é configurado como “não monitorado” (SAKAI et al., 2004). Segundo Blanch (2003), se dentro do R_{\max} conter mais de 30 medidas de IPPs o raio de busca é reduzido para conter no máximo 30 medidas. No entanto, o raio de busca não deve ser menor do que 800 km.

Deve-se salientar que quando se utiliza a grade ionosférica, tem-se uma grande quantidade de informações a serem transmitidas aos usuários, enquanto que nos modelos que não baseados em grade são transmitidos somente os coeficientes das funções de modelagem.

Assim, o formato das correções ionosféricas disponíveis por meio de grade é limitado pela mensagem de correção transmitida em sistemas de aumento tal como o SBAS.

Além disto, este tipo de modelagem é muito utilizado para a geração de mapas do TEC, podendo-se citar os produtos gerados pelo IGS e os diversos centros que compõem o grupo de trabalho de ionosfera do IGS.

3.4.2 Cálculo do Erro da Grade Ionosférica Vertical (GIVE)

Chao (1997) utiliza o método dos mínimos quadrados ponderado e calcula o atraso ionosférico do IGP (I_G) e o GIVE aplicando as expressões:

$$I_G = \frac{\sum_{i=1}^k \left(I_i \frac{1}{\sigma_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \right)} e \quad (35)$$

$$GIVE = 3,29 \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \right)}, \quad \text{para } 99,9\%, \quad (36)$$

onde 3,29 é o valor obtido da tabela de distribuição normal para a probabilidade de 99,9% e σ_i é a variância da i -ésima observação de atraso ionosférico, dada por (CHAO, 1997):

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_{PS}^2 + \sigma_{IFB}^2}{sf(el)^2} [1 + 0,3e^{-(el/40)^2}], \quad (37)$$

onde a variância σ_i^2 é dada pela soma da variância resultante da combinação linear das pseudodistâncias suavizadas $\left(\sigma_{PS}^2 = \frac{\sigma_{PS1}^2 + \sigma_{PS2}^2}{\gamma - 1} \right)$ e da variância da estimativa das tendências interfrequências do satélite s e do receptor r ($\sigma_{IFB}^2 = \sigma_{IFBs}^2 + \sigma_{IFBr}^2$), e é ponderado pelo ângulo de elevação do satélite. Se todas as observações de atraso ionosférico (I_i) fossem distribuídas regularmente, o ajuste considerando o inverso das variâncias como peso poderia ser utilizada para a geração do modelo. Na prática as medidas de atraso ionosférico são distribuídas irregularmente. Logo, Chao (1997) apresenta uma expressão para considerar a variação diária da ionosfera, dada pela relação:

$$\hat{I}_i = I_i \frac{I_{\text{Nominal,G}}}{I_{\text{Nominal,i}}}, \quad (38)$$

onde \hat{I}_i é o atraso ionosférico normalizado, $I_{\text{Nominal,i}}$ é a medida do atraso ionosférico na posição i do IPP e $I_{\text{Nominal,G}}$ é a medida na posição do IGP, ambas obtidas por um modelo nominal. Esta relação permite escalar as medidas de atraso ionosférico para o transporte da posição do IPP para o IGP desejado, por meio da dependência em latitude e longitude do modelo nominal. Chao (1997) utiliza o modelo ionosférico de Klobuchar como modelo nominal. Assim, a variância da medida deve ser acrescentada do erro inerente ao modelo nominal (CHAO, 1997):

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{\Delta}, \quad (39)$$

onde Δ depende da distância de correlação da ionosfera. Logo, as equações 35 e 36 são reescritas como (CHAO, 1997):

$$I_G = I_{\text{Nominal,G}} \left[\frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{I_i}{I_{\text{Nominal,i}}} \right) \frac{1}{\varepsilon_i^2}}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\varepsilon_i^2} \right)} \right] e \quad (40)$$

$$\text{GIVE} = 3,29 / \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\varepsilon_i^2} \right). \quad (41)$$

De modo geral, se o GIVE for calculado corretamente, a diferença entre o atraso ionosférico interpolado e o atraso ionosférico verdadeiro para o usuário deve ser (BLANCH, 2003; CHAO, 1997):

$$E\{I_{\text{usuário}} - I_{\text{verdadeiro}}\}^2 \leq \sum_{i=1}^4 w_i \sigma_{g,i}^2, \quad (42)$$

onde w_i é a função peso da interpolação e $\sigma_{g,i}$ é a variância do i -ésimo IGP usado para o cálculo do atraso ionosférico do usuário ($I_{\text{usuário}}$).

3.4.3 Cálculo do GIVE para o WAAS

No WAAS o cálculo do GIVE é um pouco diferente do método usado por Chao (1997). O WAAS possui dois grupos de receptores WRE_1 (*Wide-Area Receiver Equipament*) e WRE_2 . As observações coletadas pelos receptores do primeiro grupo são utilizadas para gerar a grade ionosférica. Os dados coletados com os receptores do segundo grupo são utilizados, juntamente com a grade ionosférica calculada a partir dos dados do primeiro grupo de receptores, para gerar o GIVE (CONKER et al., 1997).

Segundo Conker et al. (1997), o cálculo da grade ionosférica e do GIVE é realizado com lote de 5 minutos de observações, a uma taxa de 10 segundos, o que resulta num total de 30 observações para cada combinação satélite/receptor. Assim, para o cálculo do GIVE se tem $m = 30$ valores de erro (1 a cada 10 segundos) para cada sequência de IPP medido por cada receptor.

O cálculo do GIVE é realizado para cada IGP com a condição de que existam no mínimo 3 quadrantes circunvizinhos (cada quadrante é formado por 4 IGPs) e cada quadrante deve ter no mínimo 1 sequência de IPP. Caso contrário, o GIVE é configurado como “não disponível” e o usuário não poderá calcular o erro da correção. O valor do erro vertical da correção da grade para cada IPP é dado por (CONKER et al., 1997):

$$e_{vi}(t) = \hat{D}_{vi}(t) - D_{vi}(t), \quad (43)$$

onde $\hat{D}_{vi}(t)$ é o atraso ionosférico no i -ésimo IPP do segundo grupo de receptores, na época t , calculado a partir da grade ionosférica gerada pelos dados do primeiro grupo de receptores. $D_{vi}(t)$ é o valor de referência (ou verdadeiro) do atraso ionosférico no IPP do segundo grupo de receptores, calculado a partir das observações coletadas pelos mesmos.

Para cada sequência de IPP observado no período de 5 minutos é definida uma tolerância dada pelo erro limite E_{vi} (CONKER et al., 1997):

$$E_{vi} = |\bar{e}_{vi}(t)| + g_{(\alpha;p;m)} S_{vi}, \quad (44)$$

com,

$$\bar{e}_{vi} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m e_{vi}(t_k) \quad (45)$$

$$S_{vi} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (\bar{e}_{vi}(t_k) - e_{vi}(t_k))^2}, \quad (46)$$

onde $m = 30$ para o caso do processamento de 5 minutos de observações coletadas a cada 10 segundos, e $g_{(\alpha;p;m)} = 5,43$ para o nível de confiança $\alpha = 0,999$, proporção $p = 0,999$ e o tamanho da amostra $m = 30$. O valor de $g_{(\alpha;p;m)}$ é obtido a partir do método descrito em Odeh e Owen⁴ (1980 apud CONKER et al., 1997), o qual é uma função de α e p considerando uma população distribuída normalmente.

Em seguida, o erro absoluto da grade \hat{e}_v , no IGP_p é dado pela interpolação (CONKER et al., 1997):

$$\hat{e}_v(IGP_p) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{sen}(el_i)}{d_{ip}} \right) |e_{vi}(t_m)|}{\sum_{k=1}^n \frac{\text{sen}(el_k)}{d_{kp}}}, \quad (47)$$

onde o erro no ponto p da grade ionosférica (IGP_p) é dado pela interpolação do erro calculado nos n IPP vizinhos ao IGP_p , e a distância entre o IPP e o IGP é dada por d_{ip} . Na equação 47 observa-se também que a interpolação é ponderada pelo ângulo de elevação do satélite (el).

Finalmente, o GIVE é calculado pela soma do erro absoluto no ponto da grade, do limite de erro máximo e da compensação na quantização do atraso ionosférico vertical no IGP (CONKER et al., 1997):

$$GIVE(IGP_p) = \hat{e}(IGP_p) + \max_i \{E_{vi}\} + \frac{q_u}{2}, \quad (48)$$

⁴ ODEH, R. E.; OWEN, D. B. *Tables for Normal Tolerance Limit, Sampling Plans, and Screening*. New York: Marcel Dekker, 1980.

onde $q_u = 0,0625$ m é um fator de escala para compensação, aplicado aos valores de atraso ionosférico dos IGPs transmitidos pelo WAAS aos usuários. Segundo Conker et al. (1997) esta compensação é necessária devido à restrições no tamanho das mensagens transmitidas pelo WAAS.

3.5 Modelagem sobre uma Rede WADGPS: Estado Atual no Brasil

Como mencionado anteriormente, o WADGPS trata-se de um SBAS e é caracterizado por uma rede esparsa de estações de monitoramento. As estimativas do erro sistemático devido à ionosfera são calculadas usando observações de cada estação da rede WADGPS e então, uma grade de correções ionosféricas é formada e transmitida aos usuários para correção no seu posicionamento local. Vários serviços WADGPS estão em operação ou em desenvolvimento nos Estados Unidos, Europa, Japão, Austrália e Índia, respectivamente: WAAS, EGNOS, MSAS, *Australian Regional Augmentation System* (GRSAS) e *Indian GPS Aided GEO Augmented Navigation* (GAGAN). O Canadá também desenvolveu um serviço WADGPS referido como *Canada Wide Differential GPS* (CDGPS).

No Brasil, o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) estabeleceu as ações para a consecução do Plano Nacional de Implementação dos Sistemas CNS/ATM (Comunicação, Navegação, Vigilância / Gerenciamento do Tráfego Aéreo), visando assegurar uma transição segura e oportuna na atualização do SISCEAB (Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro) tendo em vista o Plano Global de Implementação CNS/ATM da ICAO (*International Civil Aviation Organization* – Organização Internacional da Aviação Civil). Dentre os produtos principais que compõem a estrutura do Programa de Transição, o DECEA dá destaque à implantação do SBAS e do GBAS, bem como a solução da ionosfera (DECEA, 2003).

Devido às limitações do sistema, o SBAS ainda não pode ser utilizado em operações de precisão, como, por exemplo, o pouso de uma aeronave, mas pode ser utilizado em operações de orientação de rota de voo, o que proporcionará sensível economia de combustível. Também é notável a redução nos custos de manutenção, comparando os sistemas de aumento, com os despendidos nos sistemas terrestres hoje existentes (CANAVITSAS; ASSIS; AMENDOLA, 2004).

Segundo Canavitsas, Assis e Amendola (2004), nos estudos da ICAO há um consenso de que a expansão e manutenção dos radioauxílios utilizados na navegação aérea, tais como o NDB (*Non-Directional Beacon*), o VOR (*VHF Omnidirectional Range*) e o ILS (*Instrument Landing System*), implica em custos economicamente inviáveis, visando o aumento significativo de tráfego aéreo.

Em uma cooperação entre países da América do Sul, desde 2001 vêm sendo realizados estudos para analisar a viabilidade da implementação de um SBAS para a região sul americana. Entretanto, os resultados dos vôos de teste de avaliação da viabilidade de implantação de um SBAS no Brasil, realizados de 2002 a 2004 no Rio de Janeiro (DECEA, 2006; ICAO, 2006), mostraram que o impacto ionosférico sobre os sinais GNSS não permite que se garanta a integridade para as aproximações de não precisão (NPA) e com guia vertical (APV), segundo os requisitos estabelecidos pela ICAO (2009).

Assim, o DECEA vem trabalhando em cooperação com a FAA (*Federal Aviation Administration* – Administração Federal de Aviação) no protótipo de um GBAS, denominado de Sistema de Aumento de Área Local (LAAS – *Local Area Augmentation System* – Sistema de Aumento Local) (DECEA, 2006; ICAO, 2006).

4 SISTEMAS DE AUMENTO DO GNSS

Nos últimos anos o uso de tecnologia de posicionamento por satélite cresceu rapidamente, principalmente devido aos avanços tanto na tecnologia espacial quanto na tecnologia dos equipamentos receptores (celulares, relógios, receptores geodésicos, entre outros). Uma tendência mundial é o desenvolvimento de sistemas baseados no GNSS para serem utilizados como auxílio em procedimentos de navegação (área, marítima e terrestre).

Dentre os GNSS dá-se destaque ao (ICAO, 2005; 2009):

- GPS do qual deve ser usado o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS), em L_1 ;
- GLONASS do qual deve ser usados o Canal de Acurácia Padrão (CSA – *Channel of Standard Accuracy*), em L_1 ; e
- Galileo sistema europeu de posicionamento global, totalmente civil e está em fase de desenvolvimento.

Por motivos de limitação dos sistemas de posicionamento, tal como o GPS e GLONASS, em aplicações como na navegação aérea os mesmos não podem ser utilizados como único método de navegação. Dentre os fatores limitantes pode-se destacar que, atualmente, nenhum dos sistemas proporciona integridade, ou seja, a garantia de transmitir de forma rápida e automática uma advertência de falha no sistema e que o mesmo deixou de funcionar adequadamente.

Para viabilizar a utilização destes sistemas de posicionamento global (GPS e GLONASS) com respeito a aspectos como disponibilidade, continuidade, integridade e acurácia, para que possam ser utilizados como sistemas principais ou auxiliares em aplicações de navegação, o serviço de navegação GNSS é fornecido usando a combinação de vários elementos instalados na superfície, nos satélites e/ou a bordo de aeronaves. Este conjunto de elementos é chamado de Sistemas de Aumento (ICAO, 2009). O conceito de Sistemas de Aumento do GNSS engloba os sistemas de aumento que envolve a tecnologia de posicionamento global, tal como:

- Sistema de Aumento Baseado em Instrumentos a bordo da Aeronave – ABAS (*Aircraft-Based Augmentation System*): trata-se de um sistema que

combina as informações de vários instrumentos aeronáuticos e monitoram o *status* dos satélites GNSS;

- Sistema de Aumento Baseado em Satélite – SBAS: proporcionam satélites auxiliares de telecomunicações e estações terrestres de referência, com funções específicas que complementam os GNSSs, tornando-os aptos para a navegação de rota e para procedimentos de aproximação da pista. Como exemplo pode-se citar o WAAS, EGNOS, MSAS, entre outros;
- Sistema de Aumento Baseado em Estações Terrestres – GBAS: é um sistema que utiliza somente estações terrestres. Pode citar como exemplo o LAAS, que são sistemas de curto alcance tendo sua área de cobertura na localidade do aeroporto e são utilizados basicamente como apoio aos procedimentos de pouso da aeronave.
- Sistema de Aumento Regional Baseado em Estações Terrestres – GRAS (*Ground-Based Regional Augmentation System*): é um tipo de GBAS, onde o usuário recebe informações diretamente a partir de um grupo de estações terrestres que cobrem uma região.

Nos últimos anos houve um grande avanço no desenvolvimento dos sistemas de aumento do GNSS, impulsionado principalmente pela necessidade de modernização dos sistemas de navegação empregados na aviação. A utilização destes sistemas de aumento na navegação aérea é padronizada pela Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO – *International Civil Aviation Organization*). A ICAO é uma agência das Nações Unidas que foi criada em 1944. Esta agência é responsável por sistematizar os princípios e técnicas adotadas na navegação aérea internacional, bem como promover o planejamento e desenvolvimento do transporte aéreo internacional garantindo um crescimento ordenado e seguro. Mais detalhes sobre a ICAO podem ser encontrados em ICAO (2010).

O Aumento do GNSS pode ser entendido como um método para melhorar alguns atributos dos sistemas de navegação, tais como a acurácia, confiabilidade e disponibilidade, por meio da integração de informações externas nos processos de cálculos envolvidos na navegação, bem como disponibilizar informações de integridade do sistema. Em alguns sistemas de aumento, por exemplo, estas informações externas são transmitidas como informações adicionais de fontes de erros, tais como erro do relógio, erro de órbita, atraso ionosférico, entre outros.

4.1 Especificações Estabelecidas pela ICAO

A ICAO produziu vários documentos com o intuito de padronizar os procedimentos e as tecnologias utilizadas na navegação. Dentre estes documentos, o ICAO (2009) contempla os Padrões e Práticas Recomendadas (SARPs – *Standards and Recommended Practices*) para a utilização dos elementos do GNSS.

Como complemento o ICAO (2009) utiliza o Documento n. 9849 (ICAO, 2005), que se trata de um manual para a utilização do GNSS. O propósito do ICAO (2005) é fornecer informação para auxiliar os países à implantarem operações com GNSS. O manual é destinado aos fornecedores de serviços de navegação aérea, responsáveis pela operação dos componentes do GNSS, e às agências regulatórias, responsáveis pela aprovação do uso do GNSS em operações de voo.

Segundo a ICAO (2009) o serviço de navegação GNSS deve ser fornecido usando várias combinações dos elementos GPS, GLONASS, ABAS, SBAS, GBAS, GRAS e o receptor da aeronave. Ainda, considerando a referência de tempo e espaço, as informações de posição fornecidas pelo GNSS devem ser expressas no datum de referência geocêntrico WGS-84 (*World Geodetic System 1994*) e a referência temporal deve ser o Tempo Universal Coordenado (UTC – *Universal Time Coordinated*). No caso de utilizar o GLONASS, deve-se realizar a conversão do sistema PZ-90 (*Parametry Zemli 1990*) para WGS-84.

Para introduzir um novo serviço de navegação o sistema deve ser avaliado pelos critérios essenciais (ICAO, 2005): a acurácia, a integridade, a continuidade e a disponibilidade.

A acurácia é a diferença entre a posição estimada e a posição verdadeira da aeronave. Os sistemas estacionários baseados em estações terrestres, tal como o VOR e o ILS, têm erros com característica de repetibilidade, logo sua performance pode ser medida por um curto período de tempo (durante um voo de inspeção, por exemplo) e é assumido que a acurácia do sistema não se altera após o teste. Entretanto, os erros envolvidos no GNSS podem se alterar num período de horas, devido à fatores como a mudança na geometria dos satélites, efeitos da ionosfera, entre outros. Assim, enquanto os erros podem variar rapidamente para um sistema sem aumento, para o SBAS e GBAS os erros envolvidos variam lentamente no tempo.

A integridade (incluindo tempo de alerta) é a medida da confiança, a qual pode ser colocada no lugar da precisão da informação fornecida pelo sistema. A integridade inclui a habilidade do sistema de avisar ao usuário quando o mesmo não deve ser usado para uma determinada operação ou fase do voo. O nível necessário de integridade para cada operação é estabelecido pelo limite de alerta horizontal e vertical especificado nos padrões definidos pela ICAO. A Tabela 2 apresenta os limites para alertar ao piloto sobre a integridade do GNSS, para as operações do tipo:

- a) em rota (oceânica/continental – baixa densidade);
- b) em rota (continental);
- c) em rota, fase terminal;
- d) Aproximação não precisa (NPA – *Non-precision approach*), partida;
- e) Aproximação com guia Vertical-I (APV-I – *Approach with Vertical guidance-I*);
- f) Aproximação com guia Vertical-II (APV-II);
- g) Aproximação precisa Categoria-I (PA CAT-I – *Precision Approach Category-I*).

Tabela 2 – Limites de alerta da integridade GNSS.

| Operação: | Em rota Oceânica | Em rota Continental | Terminal | NPA | APV-I | APV-II | PA CAT-I |
|--|---------------------|------------------------|----------|---------|---------|--------|-----------|
| Limite de Alerta Horizontal | 7,4 km | 7,4 – 3,7 km | 1,85 km | 556 m | 40 m | 40 m | 40 m |
| Limite de Alerta Vertical | N/A | N/A | N/A | N/A | 50 m | 20 m | 10 – 15 m |
| Tempo Máximo para Alertar | 5 min. | 5 min. | 15 seg. | 10 seg. | 10 seg. | 6 seg. | 6 seg. |

Fonte: ICAO (2005).

A continuidade é dada pela capacidade do sistema em realizar sua função sem interrupção, durante a operação desejada. A continuidade é expressa como uma probabilidade, e deve ser a maior probabilidade para que um serviço permaneça disponível durante todo procedimento de aproximação por instrumento. A ocorrência de alertas no sistema de navegação devido à uma detecção de falha, por exemplo, constitui uma falha na continuidade.

Finalmente, a disponibilidade de um serviço é um período de tempo no qual o sistema está fornecendo simultaneamente a continuidade, a integridade e a acurácia exigidos. A disponibilidade do GNSS é afetada pelo movimento dos satélites em relação à área de cobertura e pelo longo período de tempo para o restabelecimento do satélite após um evento de falha. Mais informações sobre disponibilidade e confiabilidade podem ser encontradas no Anexo F do Volume I em ICAO (2009).

Para as operações mencionadas anteriormente, a ICAO (2009) também estabelece a performance exigida para o sinal (Tabela 3).

Tabela 3 – Performance exigida para o sinal.

| Operações | Acurácia horizontal 95% | Acurácia Vertical 95% | Integridade | Tempo de alerta | Continuidade | Disponibilidade |
|----------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------|---|------------------------|
| Em rota | 3,7 km | N/A | $1 \cdot 10^{-7}/h$ | 5 min. | $1 \cdot 10^{-4}/h$ a $1 \cdot 10^{-8}/h$ | 0,99 a 0,99999 |
| Em rota, terminal | 0,74 km | N/A | $1 \cdot 10^{-7}/h$ | 15 seg. | $1 \cdot 10^{-4}/h$ a $1 \cdot 10^{-8}/h$ | 0,99 a 0,99999 |
| NPA e partida | 220 m | N/A | $1 \cdot 10^{-7}/h$ | 10 seg. | $1 \cdot 10^{-4}/h$ a $1 \cdot 10^{-8}/h$ | 0,99 a 0,99999 |
| APV – I | 220 m | 20 m | $1 \cdot 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximação | 10 seg. | $1 \cdot 8 \cdot 10^{-6}$ em 15 seg. | 0,99 a 0,99999 |
| APV – II | 16 m | 8 m | $1 \cdot 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximação | 6 seg. | $1 \cdot 8 \cdot 10^{-6}$ em 15 seg. | 0,99 a 0,99999 |
| CAT – I | 16 m | 6 m a 4 m | $1 \cdot 2 \cdot 10^{-7}$ por aproximação | 10 seg. | $1 \cdot 8 \cdot 10^{-6}$ em 15 seg. | 0,99 a 0,99999 |

Fonte: ICAO (2009).

Para o SBAS e GBAS o monitoramento de integridade é executado pela comparação contínua dos níveis de proteção horizontal (HPL – *Horizontal Protection Level*) e vertical (VPL – *Vertical Protection Level*), obtidos a partir dos sinais de aumento e de medidas de pseudodistância, com o limite de alerta para a atual fase do voo. Quando o limite horizontal ou vertical é excedido um alerta é dado ao piloto. Além disto, o sistema terrestre do SBAS monitora cada satélite e envia a mensagem “não use” se o satélite tem problema de integridade, ou a mensagem “não monitorado” se o satélite não está visível pelo sistema terrestre. O satélite com a mensagem “não use” não pode ser usado sob nenhuma circunstância, enquanto o satélite com a mensagem “não monitorado” pode ser utilizado na checagem da integridade do SBAS.

A Tabela 4 apresenta um resumo do potencial do ABAS, SBAS e GBAS, em atender as necessidades de navegação para as principais fases de voo.

Tabela 4 – Potencial operacional dos sistemas de aumento do GNSS.

| Operação: | Em rota Oceânica | Em rota Continental | Terminal | NPA | APV-I | APV-II | PA CAT-I | PA CAT-II | PA CAT-III | Superfície do Aeroporto |
|---|---------------------|------------------------|----------|-----|-------|--------|----------|-----------|------------|----------------------------|
| ABAS | | | | | | | | | | |
| SBAS | | | | | | | | | | |
| GBAS | | | | | | | | | | |
| GBAS (Serviço de Posicionamento) | | | | | | | | | | |

Fonte: ICAO (2005).

Os elementos do GNSS (GPS, GLONASS, SBAS, GBAS) e suas frequências são definidos no SARPs, sendo que as operações dos elementos do GNSS são inteiramente baseadas na disponibilidade do serviço de radionavegação aeronáutica (ARNS – *Aeronautical Radionavigation Services*), protegido para a banda de 1559 – 1610 MHz. Mesmo com a evolução do GNSS esta banda será necessária e protegida.

Com a evolução do GNSS será necessário o uso de novas bandas, assim a ITU WRC 2000 (*International Telecommunication Union – World Radiocommunication Conferences*) alocou um espectro adicional para aplicações de serviços de radionavegação baseados em satélite (RNSS – *Radionavigation-Satellite Services*). Estas aplicações incluem o uso das bandas 1164 – 1215 MHz, 1260 – 1300 MHz, e 5000 – 5150 MHz. As bandas nas quais os serviços RNSS são disponíveis ou planejadas para serem usadas pelo GNSS, bem como algumas informações a respeito da natureza de sua locação nas regulamentações de rádio da ITU, são apresentadas na Figura 3.

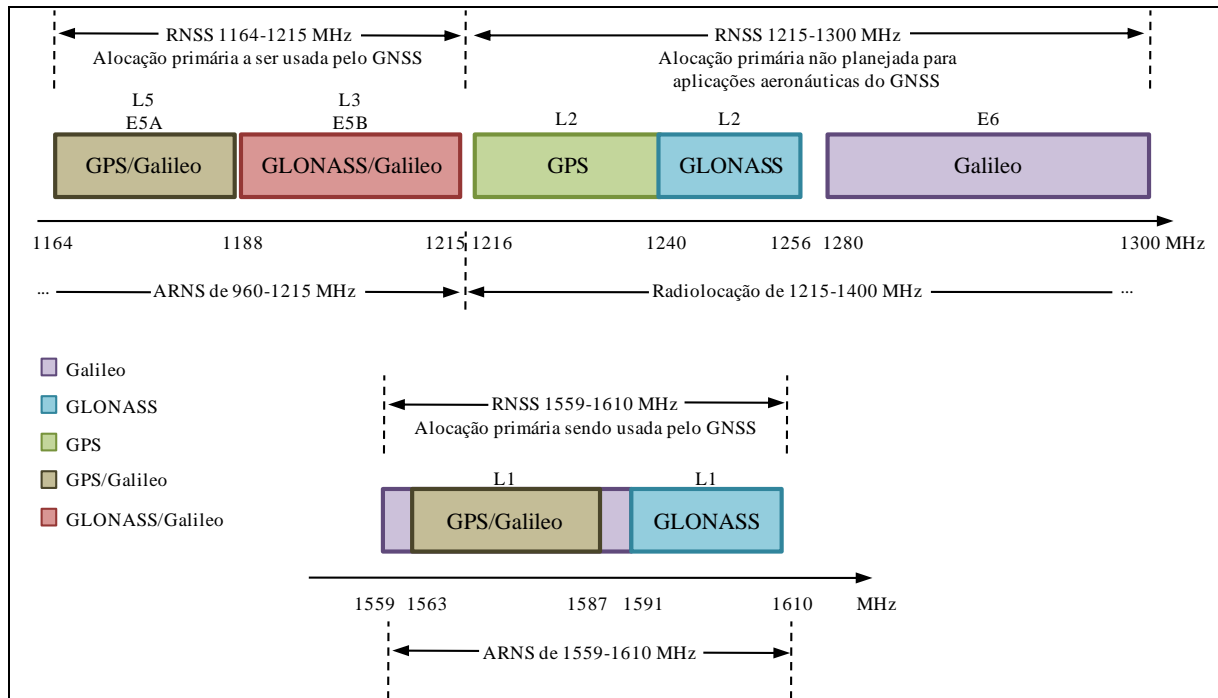


Figura 3 – Bandas utilizadas no RNSS.

Fonte: Adaptada de ICAO (2005).

Além dos pontos tratados nesta seção o Documento 9849 (ICAO, 2005), que trata do manual de utilização do GNSS, também descreve a implementação do GNSS na navegação aérea, onde são tratados temas como: planejamento e organização; procedimento para desenvolvimento do sistema; gerenciamento do espaço aéreo; serviços de informação aeronáutica; análise de segurança do sistema; aprovações operacionais e certificação; relatório de interferência/anomalia; e plano de transição.

4.2 Sistema de Aumento Baseado em Instrumentos a bordo da Aeronave (ABAS)

O termo ABAS inclui o aumento e/ou integração das informações GNSS com informações a bordo da aeronave. Este aumento ou integração é necessário para assegurar a performance, em termos de acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade, de acordo com os limites estabelecidos pela ICAO.

A técnica mais comum de ABAS é o RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring* – Monitoramento Autônomo de Integridade do Receptor), o qual utiliza medidas redundantes de distância, de no mínimo cinco satélites, para detectar falhas (FD – *Fault*

Detection), ou seja, detectar a presença de erro significativo na posição para um dado modo de voo e alertar o piloto. Outra técnica ABAS envolve a integração do GNSS com outros sensores a bordo da aeronave.

Para o uso do GPS como guia no oceano e em áreas remotas, o sistema não deve ter somente a habilidade de detectar as falhas (FD), mas também de excluir os satélites e continuar a fornecer a guiagem. Este processo é conhecido como FDE (*Fault Detection and Exclusion* – Detecção de Falha e Exclusão) e necessita de um mínimo de seis satélites para executar a exclusão de um satélite da solução de navegação e, mesmo assim, continuar com a função de navegação sem interrupção.

No algoritmo RAIM/FDE são utilizados como dados de entrada o desvio padrão do ruído medido, a geometria, bem como as probabilidades máximas permissíveis para um falso alerta e uma falha na detecção. O algoritmo tem como saída o nível de proteção horizontal (HPL), o qual é o raio de um círculo centrado na posição verdadeira da aeronave que é garantido conter a posição horizontal indicada, dentro dos requisitos de integridade.

Algumas aeronaves com sistema de navegação inercial utilizam outra técnica ABAS, a qual envolve a integração do GNSS com os dados inerciais. A combinação do GNSS FD, ou FDE, com um moderno sistema inercial de navegação, fornece melhora a disponibilidade da integridade do GNSS para todas as fases do voo.

Logo, o ABAS requer o uso de uma das seguintes técnicas para garantir a performance de um GNSS não aumentado, um receptor GNSS básico, e/ou do sistema de navegação da aeronave (ICAO, 2005):

- RAIM, uma técnica que usa informações GNSS redundantes para fornecer dados de integridade do GPS;
- AAIM (*Aircraft Autonomous Integrity Monitoring* – Monitoramento Autônomo de Integridade da Aeronave), o qual usa informações de sensores a bordo da aeronave para fornecer dados de integridade do GPS; e
- Integração do GNSS com outros sensores para fornecer um sistema de navegação da aeronave com performance melhorada.

O receptor GNSS é um dos elementos básicos do ABAS e deve ser capaz de proporcionar no mínimo um RAIM FD, ou um RAIM FDE. Dependendo da classificação do

receptor, o mesmo pode ser utilizado em uma ou mais das seguintes fases do voo: em rota, terminal e aproximação não precisa.

Com relação ao RAIM, existem dois tipos de eventos que podem causar um alerta. O primeiro ocorre quando não há satélites suficientes com boa geometria no campo de visada. Pois, mesmo a posição estimada sendo acurada, a função de integridade do receptor, ou seja, a habilidade de detectar um satélite com falha é perdida. O segundo evento que pode provocar um alerta ocorre quando há a detecção de um satélite com falha

O AAIM usa a redundância das posições estimadas a partir dos vários sensores, incluindo o GNSS, para fornecer a integridade que deve ser no mínimo equivalente ao RAIM. Um exemplo é usar um sistema inercial de navegação ou outro sensor a bordo da aeronave como um verificador da integridade dos dados GPS, quando o RAIM não estiver disponível, mas a informação de posicionamento do GPS continua e deve ser validada.

4.3 Sistema de Aumento Baseado em Satélites (SBAS)

O SBAS foi projetado para melhorar a navegação utilizando a constelação de satélites GPS e GLONASS. O SBAS é basicamente um serviço WADGS (*Wide-Area Differential GPS*) para os usuários dentro de uma área de cobertura, normalmente, continental. Este sistema de aumento fornece informações adicionais às práticas de navegação por meio de mensagens transmitidas por satélites de telecomunicações. Tais sistemas são compostos por uma rede de estações de referência terrestres, as quais são equipadas com receptores de dupla frequência que rastreiam os satélites GNSS. A partir do rastreamento dos satélites GNSS e de medidas de fatores ambientais (pressão, temperatura, entre outros), mensagens com informações adicionais de correção são criadas e enviadas a um ou mais satélites geoestacionários (GEOs).

Um SBAS aumenta os sistemas de navegação fornecendo informações de correção, integridade e dados de distância, via satélites geoestacionários. Este sistema deve incluir (ICAO, 2005; 2009):

- a) rede terrestre de estações de referência que monitoram os sinais dos satélites;

- b) estações *master* que coletam e processam dados das estações de referência e geram as mensagens SBAS;
- c) estações *uplink* que enviam as mensagens para satélites geoestacionários;
- d) transponders a bordo dos satélites para transmitir as mensagens SBAS na frequência L_1 do GPS; e
- e) receptores SBAS.

A infra estrutura terrestre inclui as estações de processamento e monitoramento, as quais recebem os dados dos satélites e calcula a integridade, as correções e as distâncias. Os satélites SBAS recebem estas informações e as transmitem para os receptores SBAS a bordo das aeronaves, e este determina a posição e o tempo a partir dos satélites GPS, GLONASS e do satélite SBAS geoestacionário. Os receptores SBAS do usuário recebem os dados de distância e de correção e aplicam estas informações para determinar a integridade e melhorar a acurácia da posição obtida.

O sistema terrestre do SBAS mede a pseudodistância entre os satélites e um receptor SBAS com posição conhecida, então o sistema fornece correções separadas de erros de efemérides, de relógio e devido à ionosfera, e o usuário aplica um modelo de atraso troposférico.

O SBAS pode dar suporte a operações de APV e PA CAT-I. Segundo a ICAO há dois níveis de APV: APV-I que pode ser suportado pelo SBAS ou pelo ABAS com Baro-VNAV (*Baro Vertical Navigation* – Navegação Vertical Baroaltimétrica); e APV-II que requer o uso do SBAS. Quase todas as operações que utilizam o SBAS têm um aumento significativo de segurança.

Este sistema também dá suporte a todas as operações RNAV (*Area Navigation*) em rota, permitindo a aeronave seguir o caminho de vôo mais eficiente entre dois aeroportos.

Como o SBAS pode ser implantado de diferentes formas, para evitar problemas na navegação aérea, a ICAO define regras para a implantação do mesmo e para o formato e frequência que as mensagens devem ser transmitidas. Assim, embora a arquitetura de vários SBASs seja diferente, as mensagens são transmitidas no mesmo formato, na mesma frequência, e assim estes vários sistemas são interoperáveis a partir da perspectiva do usuário.

Outra situação que pode ocorrer é a sobreposição da cobertura dos SBASs, o que torna possível um sistema monitorar e enviar mensagens de correção e integridade para satélites geoestacionários de outro sistema, melhorando a disponibilidade por meio de fontes

adicionais de medidas de distâncias. Este procedimento não requer interconexão entre os SBASs.

Os SARPs permitem três níveis de SBAS, os quais são resumidos na Tabela 5. Nesta tabela é apresentado o tipo de serviço, a correção que deve ser fornecida e o mais alto nível de serviço que pode ser suportado pelo tipo de SBAS.

Tabela 5 – Tipo de serviço SBAS.

| Tipo de serviço SBAS | Correções | Mais alto nível de serviço suportado |
|--|---------------------------------|---|
| Status do Satélite GNSS | Sem correções | NPA |
| Correções Diferenciais Básicas | Efemérides e relógio | APV-I |
| Correções Diferenciais Precisas | Efemérides, relógio e ionosfera | Aproximação precisa CAT-I |

Fonte: ICAO (2005).

O *Status* do Satélite GNSS é o serviço de menor custo entre os tipos de SBAS, o qual requer poucas estações de referência e uma simples estação mestra que fornece somente a integridade. O serviço Correções Diferenciais Básicas requer um número maior de estações de referência e uma estação mestra mais complexa, pois a mesma deve transmitir correções de relógio e de efemérides para suporte à APV-I. Já o serviço Correções Diferenciais Precisas necessita de maior quantidade de estações de referência para modelar a ionosfera e fornecer correções ionosféricas além das correções do relógio e de efemérides.

Os sistemas como o WAAS, EGNOS e MSAS são SBAS do tipo Correções Diferenciais Precisas. Neste tipo de serviço o SBAS monitora os sinais GPS e GLONASS usando uma rede terrestre de estações de referência, distribuída por uma área extensa. Estas estações retransmitem os dados para uma central de processamento, a qual avalia a qualidade do sinal e calcula as correções. Para cada satélite GPS ou GLONASS, o SBAS estima o erro nos parâmetros das efemérides transmitidas e relógio dos satélites, e transmite as correções.

Estas mensagens de correção e a mensagem de integridade são transmitidas, por satélites SBAS geoestacionários numa órbita fixa sobre o equador, na mesma frequência do GPS L₁. Os satélites SBAS também fornecem sinais similares aos do GPS, para medida de distância. Estes sinais podem ser recebidos somente por receptores GNSS capazes de rastrear os satélites geoestacionários do SBAS. Estas características garantem a integridade, melhoram a disponibilidade e fornecem a performance necessária para operações APV e de aproximação precisa CAT-I.

Com relação aos efeitos da ionosfera, o SBAS usa medidas de dupla frequência para estimar o atraso ionosférico e transmitir correções aplicáveis em pontos de grade ionosférica pré-determinados. A partir das mensagens recebidas, o receptor GNSS com SBAS interpola os valores dos pontos da grade ionosférica para calcular a correção ionosférica ao longo de sua linha de visada para cada satélite.

Além das correções de atraso ionosférico, de relógio e de efemérides, o SBAS estima e transmite parâmetros que informam as incertezas nas correções. O Erro na Distância Diferencial do Usuário (UDER – *User Differential Range Error*) descreve a incerteza nas correções de efemérides e de relógio para a medida de distância. O GIVE, para cada ponto da grade ionosférica, descreve a incerteza nas correções ionosféricas a partir do ponto da grade. O receptor SBAS combina estas estimativas de erros com as estimativas de incertezas de suas medidas de pseudodistâncias e de seu modelo troposférico, para calcular o modelo de erro da solução de navegação.

Também é importante fazer uma distinção entre área de cobertura e área de serviço SBAS (Figura 4). A primeira é definida pela área de cobertura do satélite geostacionário. A segunda é uma área estabelecida pelo Estado, o qual é responsável por designar os tipos de operações que podem ser suportados dentro de uma área específica de serviço.

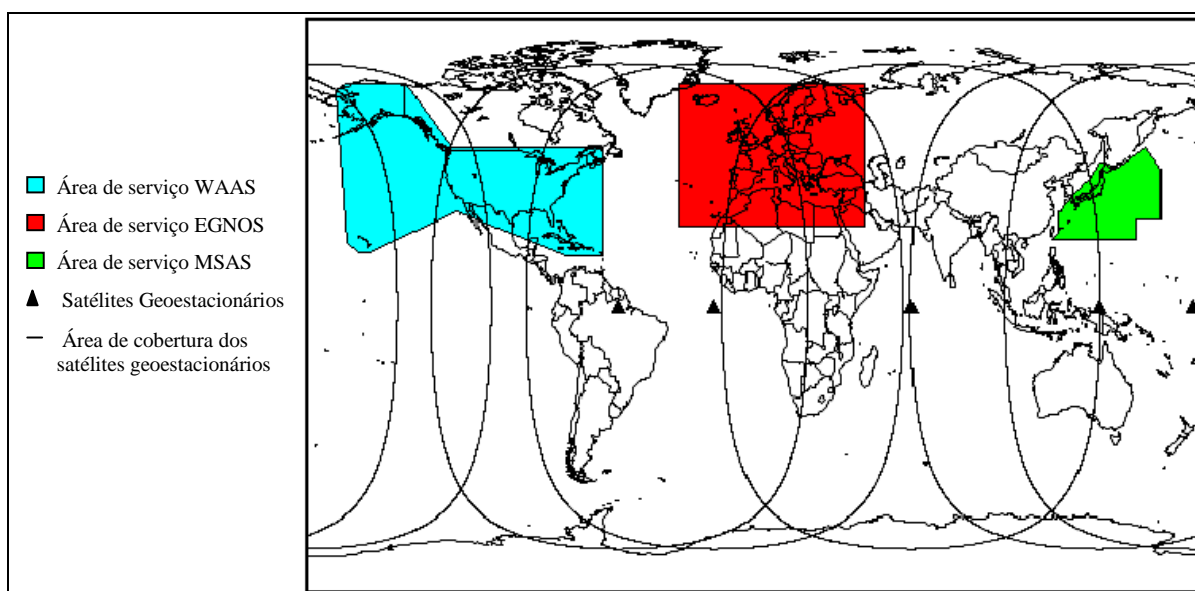


Figura 4 – Áreas aproximadas de cobertura e de serviço do SBAS.

Fonte: Adaptada de ICAO (2009).

Com relação às medidas de distância, excluindo os efeitos atmosféricos, o erro destas medidas a partir dos satélites SBAS não deve ultrapassar 25 metros (95%), sendo que a taxa deste erro não deve exceder 2 metros por segundo. A transmissão dos sinais SBAS é realizada em uma portadora com frequência de 1575,42 MHz, com polarização circular à direita. A diferença entre o Tempo da Rede SBAS (SNT – *SBAS Network Time*) e o tempo GPS não deve exceder 50 nanosegundos (ICAO, 2009).

4.3.1 Integridade

Com relação à integridade o procedimento é complexo, pois alguns elementos de integridade são determinados dentro do sistema terrestre do SBAS e então transmitidos, e outros elementos são determinados dentro do equipamento SBAS a bordo da aeronave.

Para os serviços *Status* do Satélite e Correções Diferenciais Básicas a incerteza do erro de efemérides e de relógio é determinada pelo sistema terrestre do SBAS. Esta incerteza é modelada pela variância, de distribuição normal com média zero, a qual descreve o UDRE para cada medida de distância após aplicar as correções, excluindo os efeitos atmosféricos e erros do receptor.

Para o serviço de correções diferenciais precisas, a incerteza para a correção ionosférica é determinada e é modelada pela variância a qual descreve o erro ionosférico residual na distância do usuário em L_1 (UIRE – *User Ionospheric Range Error*), para cada distância após a aplicação das correções ionosféricas. Esta variância é determinada a partir de um modelo ionosférico e do GIVE.

4.3.2 Definição do modelo estocástico da correção ionosférica

Segundo a ICAO (2009), quando são aplicadas correções ionosféricas baseadas nas transmissões SBAS, o modelo estocástico da correção ionosférica do usuário (σ_{UIRE}^2) é dado por:

$$\sigma_{UIRE}^2 = F_{PP}^2 \times \sigma_{UIVE}^2, \quad (49)$$

onde F_{PP}^2 é a função de mapeamento geométrica padrão e σ_{UIVE}^2 é dado por:

$$\sigma_{UIVE}^2 = \sum_{n=1}^{4 \text{ ou } 3} W_n \sigma_{n, \text{ionogrid}}^2, \quad (50)$$

usando o peso dos pontos ionosféricos (W_n) e os pontos da grade selecionados para a correção. Observe que o somatório considera a possibilidade de 4 ou 3 pontos de grade circunvizinhos ao ponto ionosférico do usuário. Para cada ponto da grade ionosférica, $\sigma_{ionogrid}^2$ é calculado por:

$$\sigma_{ionogrid}^2 = \begin{cases} (\sigma_{GIVE} + \varepsilon_{iono})^2, & \text{se } RSS_{iono} = 0 \text{ (Mensagem tipo 10)} \\ (\sigma_{GIVE}^2 + \varepsilon_{iono}^2), & \text{se } RSS_{iono} = 1 \text{ (Mensagem tipo 10)} \end{cases}. \quad (51)$$

Pela equação 51 observa-se que o espaço reservado, na mensagem SBAS tipo 10, para a raiz da soma do quadrado (RSS – *Root Sum Square*) dos resíduos ionosféricos pode assumir dois valores: 0 quando as correções residuais são somadas, ou 1 quando as correções residuais são a raiz da soma dos quadrados. O termo ε_{iono} da equação 51 é dado por:

$$\varepsilon_{iono} = C_{iono_step} \left\lfloor \frac{t - t_{iono}}{I_{iono}} \right\rfloor + C_{iono_ramp}(t - t_{iono}) \quad (52)$$

onde: t é o instante atual; t_{iono} é o instante de transmissão, no satélite geoestacionário, do primeiro bit da mensagem de correção ionosférica; $\left\lfloor \frac{t - t_{iono}}{I_{iono}} \right\rfloor$ é o maior inteiro menos $(t - t_{iono})/I_{iono}$; I_{iono} é o intervalo mínimo de atualização das mensagens de correção ionosférica; C_{iono_step} é o salto na diferença entre sucessivos valores de atraso ionosférico da grade; e C_{iono_ramp} é a taxa de alteração das correções ionosféricas.

Quando as correções ionosféricas não são baseadas naquelas transmitidas pelo SBAS, a equação 49 passa a ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_{\text{UIRE}}^2 = \text{MAX} \left\{ \left(\frac{T_{\text{iono}}}{5} \right)^2, (F_{\text{pp}} \tau_{\text{vert}})^2 \right\}, \quad (53)$$

onde:

T_{iono} - atraso ionosférico estimado por um modelo (Klobuchar ou outros modelos);

F_{pp} - a função de mapeamento geométrica padrão;

$$\tau_{\text{vert}} = \begin{cases} 9 \text{ m}, & 0^\circ \leq |\phi_{\text{pp}}| \leq 20^\circ \\ 45 \text{ m}, & 20^\circ < |\phi_{\text{pp}}| \leq 55^\circ; \text{ e} \\ 6 \text{ m}, & 55^\circ < |\phi_{\text{pp}}| \end{cases}$$

ϕ_{pp} - latitude do ponto ionosférico.

4.3.3 WAAS

No WAAS, operado pela FAA, cada estação de referência mede o atraso ionosférico para todos os satélites visíveis a um ângulo de elevação maior do que 20° , usando receptores GPS de dupla frequência. Os atrasos ionosféricos e a localização dos pontos ionosféricos de todas as estações de referência são enviados para uma estação *master* em tempo real. Na estação *master* os dados são coletados e é realizada uma combinação de todas as informações da ionosfera obtidas a partir das estações de referência. Em seguida são estimados os valores do atraso ionosférico vertical para cada nó de uma grade imaginária com espaçamento de $5^\circ \times 5^\circ$ fixada na esfera ionosférica.

Os valores do atraso vertical e as posições (latitude e longitude) dos IGP são transmitidos aos usuários dentro da área de cobertura da rede, via satélite de comunicação geostacionário. O usuário calcula então o atraso ionosférico vertical para o ponto ionosférico, de cada satélite observado, a partir de métodos de interpolação que usam os atrasos verticais dos 4 IGPs vizinhos aos pontos ionosféricos do usuário. Finalmente, o atraso inclinado, na direção receptor/satélite, é calculado pelo produto do atraso ionosférico vertical e da função de mapeamento adotada. Mais detalhes podem ser encontrados em Liao (2000) e Skone (1998).

A informação fornecida para cada IGP consiste de uma estimativa do atraso ionosférico vertical e o limite de erro residual, conhecido como Erro Vertical da Grade

Ionosférica (GIVE) (CONKER et al., 1997). Um GIVE representa uma estimativa de 99,9% da distribuição do erro do atraso ionosférico pós-correção para usuários dos IPPs na vizinhança do IGP.

Tendo como principais objetivos, fornecer integridade, acurácia, disponibilidade e continuidade do serviço GPS SPS, o WAAS possui 8 funções primárias para realizar estes objetivos. Os principais objetivos de cada uma destas funções são (WAAS, 2001):

- **Função 1:** esta função recebe dados de todas os satélites que realizam o serviço de navegação (geoestacionários e GPS) e os parâmetros necessários para determinar o atraso troposférico. Também são coletados dois conjuntos independentes de dados, sendo um para as Funções 2 e 5, e um para a Função 6. Esta função também verifica a razoabilidade dos dados coletados.
- **Função 2:** com o objetivo de determinar as correções ionosféricas, esta função deve receber medidas diferenciais do código em L_1 e L_2 , a partir da Função 1, e determinar correções precisas do atraso ionosférico em termos de atraso vertical em uma grade de pontos ionosféricos, bem como calcular o GIVE.
- **Função 3:** esta função recebe dados dos satélites GPS e geoestacionários para determinar a posição, velocidade, *offset* do relógio e desvio dos satélites. Além disto, esta função gera o almanaque e as efemérides dos satélites geoestacionários.
- **Função 4:** esta função é responsável por determinar correções precisas de efemérides e do relógio dos satélites, a partir de dados de órbita e navegação obtidos dos satélites GPS e geoestacionários, no campo de visada.
- **Função 5:** a partir de dados de navegação dos satélites GPS e geoestacionários, esta função determina a integridade dos satélites e das correções ionosféricas e, periodicamente, fornece avisos quando as correções ionosféricas ou algum satélite não devem ser usados para a navegação, ou se algum satélite ou ponto da grade ionosférica não pode ser monitorado por algum motivo.
- **Função 6:** para executar a verificação independente dos dados, esta função verifica, de forma independente, a integridade de todos os

dados fornecidos aos usuários do WAAS antes da transmissão e valida os mesmos. Esta verificação dos dados é realizada pelo processo de comparação com dados obtidos de observações independentes, ou pelo processo de combinação com as observações independentes e o resultado é comparado ao resultado esperado.

- **Função 7:** esta função fornece medidas de distância assim como o GPS e dados de correção e de integridade aos usuários, por meio da transmissão de distância e mensagens WAAS.
- **Função 8:** a fim de realizar a manutenção e operação do sistema, para assegurar a funcionalidade e performance deste no suporte aos principais objetivos do WAAS, esta função controla, monitora e mantém o WAAS. O WAAS deve ser capaz de operar de forma autônoma, sem a intervenção humana.

Os principais dados de entrada e saída para cada uma das 8 funções mencionadas, são apresentados no Anexo A.

4.3.4 Outros exemplos de SBAS

Dentre as várias implementações de SBAS, pode citar: WAAS, EGNOS, MSAS, WAGE (*Wide Area GPS Enhancement* – Otimização do GPS para Área Ampla), QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System* – Sistema de Satélites Quase Zenitais), StarFire, OmniStar, entre outros.

O EGNOS é um SBAS desenvolvido pela ESA (*European Spatial Agency* – Agência Espacial Européia), Comissão Européia e pela EUROCONTROL (*European Organisation for the Safety of Air Navigation* – Organização Européia para a Segurança da Navegação Aérea). Este sistema foi planejado para dar suporte, com respeito a confiabilidade e acurácia dos sinais, aos sistemas GPS, GLONASS e Galileo. Trata-se de um sistema composto por três satélites geoestacionários e pelas estações terrestres de referência, o qual é similar ao americano WAAS e ao MSAS, operado pelo JCAB (*Japan's Ministry of Land,*

Infrastructure and Transport – Ministério Japonês do Transporte, Infraestrutura e da Terra). Mais informações sobre o EGNOS podem ser encontradas em EGNOS (2009).

O WAGE operado pelo DoD (*United States Department of Defense* – Departamento de Defesa dos Estados Unidos) é para uso militar e de receptores autorizados. Este é um método para aumentar a acurácia horizontal usando o código P(Y), por meio de dados adicionais de correções nas medidas de distância, transmitidos nas mensagens de navegação. O WAGE é disponível somente para o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS) ou código P(Y).

O *StarFire* é um sistema comercial WADGPS desenvolvido pelo grupo *John Deere*. Este sistema transmite informações adicionais de correção. As correções de órbita e de relógio dos satélites são calculadas a partir de uma rede global de receptores de dupla frequência, as quais são transmitidas via satélite Inmarsat⁵ diretamente para os receptores *Star Fire*TM, resultando num sistema global (GSBAS – *Global SBAS*) (NAVCOM, 2010).

Outros exemplos de sistemas comerciais são o *Starfix* DGPS (*Differential GPS* – GPS Diferencial), *SeaStar*, *AirStar* e *OmniSTAR*, operados pela companhia Fugro. O *StarFix* DGPS *System* fornece correções diferenciais para observações GNSS calculadas a partir de estações GNSS de referência e transmitidas via satélites de comunicação. Este sistema possui cerca de 80 estações de referência instaladas pelo mundo e as correções são transmitidas aos usuários via quatro satélites Inmarsat. O *SeaStar* é um serviço para posicionamento diferencial GNSS e fornece correções DGPS para aplicações de posicionamento dinâmico e aplicações marítimas. O *AirSTAR* oferece informações redundantes, acuradas e em tempo real para aplicações de navegação aérea, com disponibilidade de 24 horas por dia, todos os dias do ano. A redundância do *AirSTAR* é realizada devido a obtenção de soluções a partir de uma rede terrestre com mais de 100 estações de referência e 2 correções independentes de relógio e órbita dos satélites. A redundância também é realizada no segmento de satélite do *AirSTAR*, onde para cada região são transmitidos dados de dois satélites geoestacionários. Finalmente, o *OmniSTAR* é um WADGPS que utiliza satélites geoestacionários para transmitir correções para o código em L₁ e para a fase em L₁ e L₂ (FUGRO, 2010).

O Japão também propôs um sistema que atualmente está em fase de implantação. O QZSS está sendo desenvolvido em cooperação entre a JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) e a NOAA. O QZSS é um sistema regional de três satélites para a

⁵ A Inmarsat trata-se de uma companhia internacional de telecomunicações a qual fornece serviços de telefonia e de transmissão de dados por todo o globo, por meio de 20 satélites de telecomunicações geosíncronos (www.inmarsat.com).

medida de tempo e para a melhora do desempenho do GNSS no Japão. O primeiro satélite deve ser lançado em 2010 e o sistema deve estar totalmente operacional em 2013 (JAXA, 2010).

Este programa consiste de três satélites em órbita, um satélite reserva em terra e um segmento terrestre de operações. O QZSS fornecerá serviços de comunicação móvel, de transmissão de sinais e complemento do GPS, além dos serviços de aumento (KAJII, 2003). Este sistema trata-se de uma constelação de três satélites em órbita, dos quais, a qualquer hora, ao menos um estará posicionado próximo ao zênite sobre o Japão. Assim os usuários podem receber sinais de comunicação e de posicionamento de um satélite próximo ao zênite, sem obstruções devido, por exemplo, às montanhas e edificações (Figura 5). A constelação de satélites está projetada para ter o mesmo período orbital dos satélites geoestacionários. Os satélites estarão dispostos em diferentes planos orbitais, possibilitando a característica de sempre haver um satélite próximo ao zênite (JAXA, 2010).

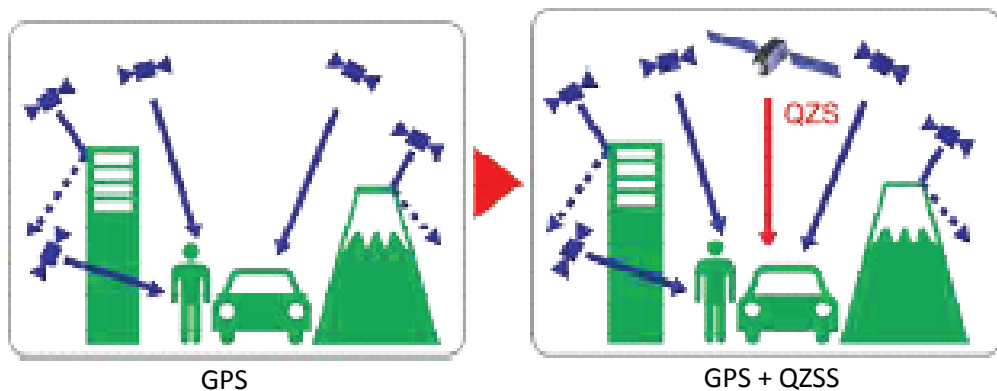


Figura 5 – Conceito do QZSS.

Fonte: Kogure (2007).

O QZSS foi projetado para melhorar a acurácia do posicionamento quando utilizado com o GPS. Este sistema prevê instrumentos a bordo dos satélites, capazes de gerar e transmitir sinais de posicionamento compatíveis com os sinais da modernização do GPS (Tabela 6), bem como estações de rastreo terrestre responsáveis por estimar o tempo e a posição orbital dos satélites (KOGURE, 2007). Além disto, o QZSS também foi projetado para transmitir sinais de correção e informação da disponibilidade do GPS, a fim de aumentar a acurácia e a confiabilidade do posicionamento.

Tabela 6 – Sinais planejados para o QZSS.

| Sinal | Frequência Central | Observação |
|--|--------------------|---|
| L ₁ -C/A | 1575,42 MHz | – Compatibilidade e interoperabilidade com os sinais existentes e com as futuras modernizações do GPS |
| L1C | | |
| L2C | 1227,6 MHz | |
| L5 | 1176,45 MHz | |
| L1-SAIF (<i>Submeter-class Augmentation with Integrity Function</i>) | 1575,42 MHz | – Compatibilidade com GPS-SBAS – WADGPS |
| | | – Sinal experimental |
| LEX | 1278,75 MHz | – Compatibilidade com sinal E6 do Galileo |

Fonte: Kogure (2007).

4.4 Sistema de Aumento Baseado em Estações Terrestre (GBAS)

O GBAS monitora os sinais GPS e/ou GLONASS nas proximidades do aeroporto e transmite mensagens, relevantes localmente, de integridade, correções de pseudodistância e dados FAS (*Final Approach Segment* – Segmento de Aproximação Final), via VDB (*VHF Data Broadcast* – Transmissão de Dados em VHF), para a aeronave dentro de um raio pré determinado. Uma única estação GBAS pode fornecer guiagem para até 49 operações de aproximação de precisão, dentro de sua área de cobertura VDB, podendo ser utilizado em operações em várias pistas e até mesmo em mais que um aeródromo (ICAO, 2009).

Os sinais GBAS são transmitidos com polarização horizontal (GBAS/H) ou elíptica (GBAS/E – recomendado). A maioria das aeronaves é equipada com antenas receptoras de sinais polarizados horizontalmente, a qual pode receber tanto sinais GBAS/H quanto GBAS/E. Em algumas aeronaves são instaladas antenas polarizadas verticalmente, as quais estarão limitadas às instalações que utilizam equipamentos GBAS/E.

Os sinais GNSS GBAS incluem (ICAO, 2009):

- sinais de navegação dos satélites GNSS;

- VDB transmitido a partir da estação terrestre para o sub-sistema da aeronave;
- a distância transmitida a partir da estação terrestre para o sub-sistema da aeronave, para aumentar a disponibilidade e continuidade do serviço; e
- a distância do satélite geoestacionário SBAS, quando disponível.

Segundo a ICAO (2009) o GBAS fornece dois tipos de serviços: o serviço de aproximação de precisão e o serviço de posicionamento GBAS. O serviço de aproximação de precisão fornece o desvio de orientação para segmentos de aproximação final, enquanto o serviço de posicionamento GBAS fornece informação de posição horizontal para suporte à operação RNAV em área de terminal.

Conforme os padrões do GNSS, o sub-sistema terrestre do GBAS pode apresentar três configurações:

- uma para suporte somente a aproximação de precisão CAT-I;
- uma para suporte a aproximação de precisão CAT-I e transmitir parâmetros adicionais de erros de efemérides; e
- uma para suporte a aproximação de precisão CAT-I e serviço de posicionamento GBAS, enquanto transmite os parâmetros adicionais de erros de efemérides.

Segundo o ICAO (2005), critérios estão sendo desenvolvidos para o GBAS ser utilizado como suporte a outras aplicações, tal como a aproximação de precisão CAT-II e CAT-III e navegação de superfície.

Para os padrões da aviação, o GBAS deve fornecer como dados de saída, no mínimo, uma posição, velocidade e tempo (PVT – *Position, Velocity and Time*). O PVT, baseado no GBAS, para aplicações de alta acurácia requer a integridade horizontal e a estação terrestre transmissora indica a região dentro da qual as correções diferenciais podem ser usadas.

Devido à estratégia de transição da ICAO, a qual permite a combinação de diferentes sistemas para fornecer serviços de aproximação de precisão, a indústria tem desenvolvido receptores multi-modo. Este tipo de receptor pode suportar operações de

aproximação de precisão baseadas em ILS, MLS (*Microwave Landing System* – Sistema Terrestre de Microondas) e GNSS (GBAS e SBAS) (ICAO, 2005).

4.5 Sistema de Aumento Regional Baseado em Estações Terrestres (GRAS)

O GRAS trata-se de uma combinação dos conceitos de sistemas de aumento baseados em satélites e em estações terrestres (SBAS e GBAS), a fim de assegurar a utilização do GNSS como suporte às necessidades da navegação civil.

Esta técnica é parecida com o SBAS, pois usa uma rede terrestre de estações de referência para monitorar o GPS e uma central de processamento para calcular e gerar as informações de correção diferencial e de integridade do mesmo. Entretanto, ao invés destas informações serem transmitidas via satélites geoestacionários, o GRAS envia a mensagem SBAS das estações terrestre para um local de verificação e a mensagem é reformatada e retransmitida no formato GBAS, numa banda de 108 – 117,975 MHz (ICAO, 2009).

Assim como no GBAS, cada local transmite dados via sinal VHF (*Very High Frequency* – Frequência Muito Alta) num determinado espaço de tempo. Os usuários podem utilizar um receptor GPS/GRAS para obter os dados de aumento do GPS para operações em rota, bem como em operações de aproximação ou de partida na área do terminal, dependendo da cobertura da rede VHF.

O GRAS pode trazer benefícios em áreas onde os satélites geoestacionários não são disponíveis ou quando se tem um custo muito elevado para a transmissão de dados SBAS.

5 IMPLEMENTAÇÃO DA GRADE IONOSFÉRICA (GI)

O conceito básico da GI é que a área a ser modelada seja coberta por uma malha regular de pontos. Na GI inicialmente é assumido que o TEC está concentrado numa fina lâmina ionosférica, onde uma malha de pontos de grade (IGP) é pré-definida e os pontos são distribuídos uniformemente.

O primeiro passo para a GI, é converter todas as medidas de atraso ionosférico para a direção vertical, em cada ponto ionosférico (IPP) observado pela estação de referência, usando a função de mapeamento geométrico padrão. Em seguida, gerar um modelo do atraso ionosférico vertical a partir de todas as medidas dos IPPs e estimar o atraso ionosférico vertical e seu limite de confiança (GIVE) para cada IGP. O grande problema é que as medidas são distribuídas espacialmente de forma irregular, tornando-se mais complexo determinar a confiança das medidas, principalmente em períodos de ocorrência de irregularidades na ionosfera, onde o gradiente espacial e temporal são acentuados.

Construída a GI e o GIVE, o usuário aplica o processo inverso para a correção do atraso ionosférico. A partir de 4 IGPs circunvizinhos é feita a interpolação para a posição do IPP do usuário. No caso de SBAS, tal como o WAAS, é recomendada a interpolação multiquádrica (seção 3.4.1). A partir da interpolação da GI e do GIVE, o usuário obtém a correção do atraso ionosférico vertical e o erro do atraso ionosférico vertical do usuário (UIVE – *User Ionospheric Vertical Error*) para cada satélite observado. Finalmente, o usuário poderá aplicar a função de mapeamento para converter as correções e o limite de confiança da direção vertical para a direção satélite/receptor.

Este trabalho é um esforço pioneiro no Brasil, onde a proposta é desenvolver um algoritmo para gerar uma grade ionosférica que seja compatível com as necessidades de um SBAS, ou seja, que a correção do atraso ionosférico e o modelo estocástico sejam disponibilizados ao usuário em tempo real e em forma de grade. Alguns testes com modelos de grade já foram realizados no Brasil, por uma pesquisadora canadense (SKONE, 2000). No entanto, nestes testes também se concluiu que são necessárias mais investigações para modelos de grade na região equatorial.

É importante salientar que este trabalho resultou no aplicativo computacional denominado GI (Grade Ionosférica), no qual foi implementada todos os métodos descritos nesta seção, permitindo o processamento dos dados tanto no modo *off-line* quanto no modo *on-line*. Para o desenvolvimento do aplicativo GI foi utilizada a linguagem de programação

Fortran. O fluxograma do processamento executado pelo algoritmo deste aplicativo é apresentado no Apêndice A.

5.1 Arquitetura da Rede GNSS Ativa

Nos últimos anos, o GNSS tem se tornado a principal ferramenta para medidas da ionosfera, fornecendo dados que são utilizados como entrada em modelos analíticos e na geração de mapas ionosféricos. Para tanto é importante que se tenha uma rede composta de receptores de dupla frequência.

O conceito básico para o desenvolvimento e implementação da grade ionosférica, tal como o que está sendo proposto, é que as medidas sejam feitas em uma rede terrestre de estações GNSS de referência. Estas estações de referência devem ter receptores GNSS de dupla frequência e antenas com posição conhecida com acurácia, em um ambiente de baixo multicaminho. No Brasil, pode-se citar as redes RBMC (<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>), RIBaC (<http://ribac.inra.gov.br/ribac/>), que atualmente estão integradas (FORTES et al., 2009), e a REDE GNSS SP (<http://gege.fct.unesp.br/>), as quais se enquadram nas condições mínimas de estrutura exigidas para o desenvolvimento da grade. No capítulo 6 é apresentado um estudo da densidade e distribuição das estações de referência.

Para a execução deste trabalho tem-se à disposição as estações de referência que pertencem a RBMC, que atualmente conta com mais de 70 estações, incluindo as estações da RIBaC. Juntas a RBMC e a RIBaC terão mais de 80 receptores GNSS de dupla frequência. A RBMC possui 26 estações que disponibilizam os dados em tempo real, estas estações compõem a RBMC-IP. Para as estações da RBMC/RIBaC que ainda não disponibilizam seus dados em tempo real, os processamentos serão realizados no modo *off-line*, ou seja, como será utilizado o filtro de Kalman a estimativa será feita época por época, porém, somente após o fechamento dos arquivos RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*).

A REDE GNSS SP (Projeto FAPESP – nº 2004/03384-5, 2004/09235-1 e 2006/04008-2), também será utilizada. Uma vez que seus dados podem ser obtidos em tempo real, os processamentos poderão ser realizados no modo *off-line* ou *on-line*. No processamento *on-line* as estimativas são realizadas em quase tempo real, ou seja, assim que uma época de observação é obtida pelo receptor o processamento ocorre quase no mesmo

instante. Atualmente, a REDE GNSS SP é composta por 10 estações, sendo que algumas destas estações também fazem parte da RBMC, e a estação PPTE, localizada em Presidente Prudente, também faz parte da RBMC-IP.

Além destas redes, pode-se obter dados de outras regiões na América do Sul a partir de estações de referência da Rede IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>) e de outras estações que compõem as redes nacionais, tais como aquelas que fizeram parte da realização do SIRGAS (<http://www.sirgas.org/>).

As redes RBMC/RIBaC, RBMC-IP e REDE GNSS SP (Figura 6) são compostas por receptores de dupla frequência que rastreiam satélites GPS e algumas estações rastreiam GPS e GLONASS.

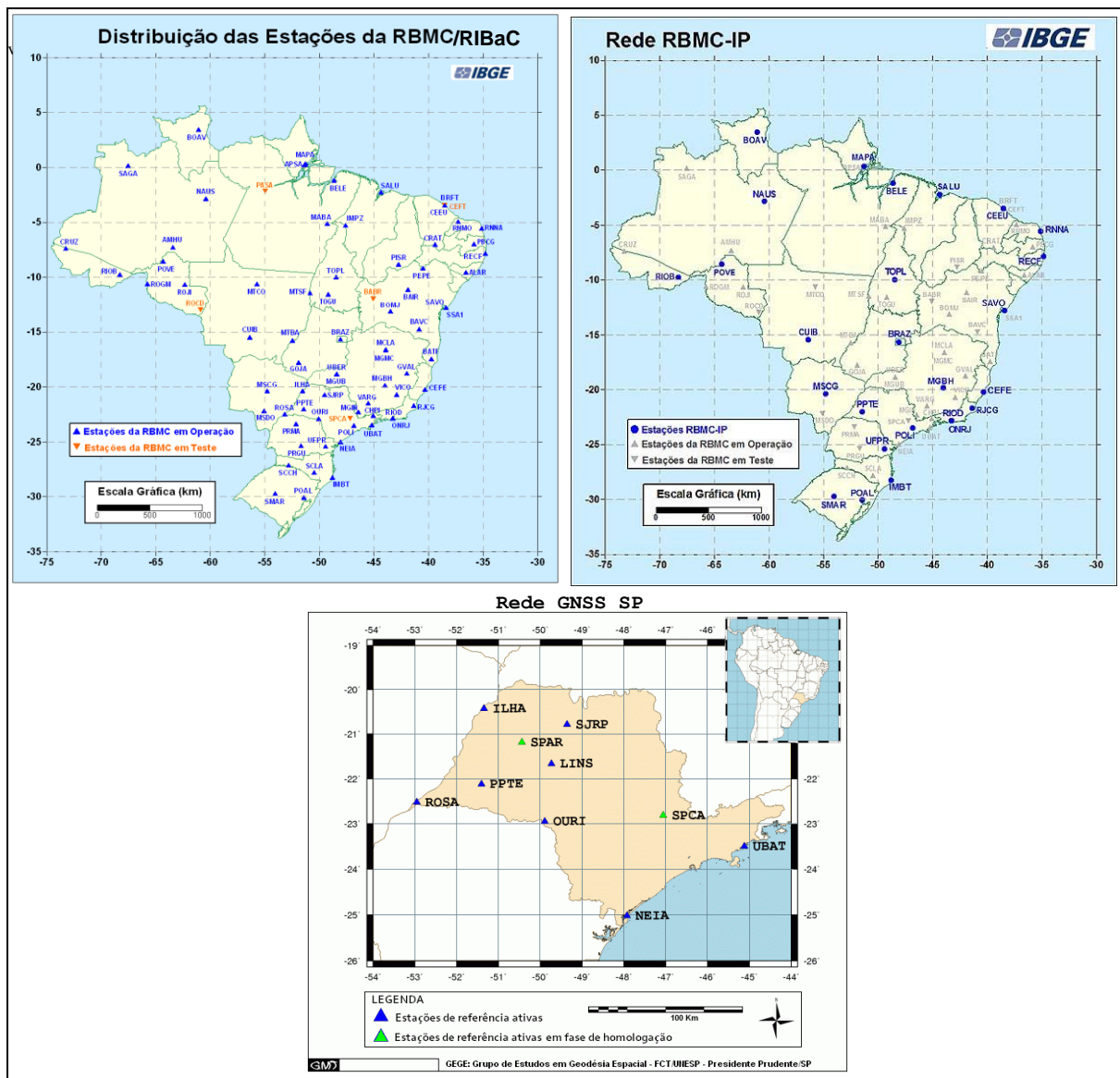


Figura 6 – Redes de referência compostas de receptores GNSS de dupla frequência.

Os dados das redes RBMC/RIBaC podem ser obtidos diretamente na página do IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/>) ou no endereço <ftp://geoftp.ibge.gov.br/>.

A REDE GNSS SP e a RBMC-IP transmitem os dados em tempo real utilizando o protocolo de transporte NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). O NTRIP é um protocolo para fluxo de dados GNSS na Internet. Trata-se de um protocolo genérico baseado no http, com um padrão RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) projetado para propagar dados de correção diferencial ou outros tipos de fluxo de dados GNSS para usuários estacionários ou móveis através da internet. É possível baixar, diretamente, os dados dos receptores GNSS da REDE GNSS SP e da RBMC-IP em um computador conectado à internet, utilizando um dos programas que estão disponíveis na *NTRIP Homepage*. Para o desenvolvimento deste trabalho está sendo utilizado o programa BNC (*BKG Ntrip Client – Cliente Ntrip BKG*). Mais detalhes sobre o NTRIP estão disponíveis em http://igs.ifag.de/index_ntrip.htm.

O aplicativo BNC permite: obter fluxo de dados GNSS em tempo real, disponível por meio do protocolo de transporte NTRIP; gerar arquivos RINEX em alta taxa, para suporte em aplicações de pós-processamento e próximo a tempo real; e/ou transferência de observações sincronizadas época por época, por meio de um IP para suporte em tempo real aos instrumentos GNSS.

É importante citar que no decorrer do trabalho poderá ser notado que os experimentos, estudos e desenvolvimentos são baseados nas observáveis do GPS, que é o sistema mais utilizado atualmente e o qual, considerando a estrutura de receptores disponíveis, as observáveis são obtidas mais facilmente. Assim, deve-se enfatizar que apesar dos estudos serem baseados em dados GPS, os mesmos são aplicáveis aos demais sistemas do GNSS.

5.2 Observáveis GPS

O tipo de observação fornecida por um receptor GPS depende do tipo de técnica de rastreamento. Os receptores semi-*codeless* ou *codeless* obtêm medidas nas portadoras L_1 e L_2 , o que permite a sua utilização para a determinação do erro devido à ionosfera a partir da combinação linear das observáveis obtidas em ambas as portadoras. Seeber (1993) destaca

quatro tipos de observáveis: a pseudodistância, as diferenças de pseudodistâncias a partir da contagem integrada Doppler, a fase da onda portadora; e as diferenças do tempo de viagem do sinal a partir das medições interferométricas, chamada de medida Doppler.

Destes quatro tipos de observáveis GPS, duas são mais importantes e utilizadas no cálculo do erro sistemático devido à ionosfera: a pseudodistância obtida a partir do código, e a fase de batimento da onda portadora, também referida como fase da onda portadora ou simplesmente fase da portadora. A partir da pseudodistância e da fase da portadora pode-se obter uma observável que atualmente, devido ao ruído menor e não ser necessária a solução da ambiguidade, é muito utilizada para obter medidas do atraso ionosférico, trata-se da pseudodistância suavizada pela fase da portadora.

As observáveis pseudodistância (P) e fase da portadora (ϕ) entre o receptor (r) e satélite (s), nas portadoras L_1 e L_2 , podem ser expressas como⁶:

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{1r}^s + cS_{P1}^s + cR_{P1r} + T_r^s + dm_{P1} + \epsilon_{P1r}^s, \quad (54)$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{2r}^s + cS_{P2}^s + cR_{P2r} + T_r^s + dm_{P2} + \epsilon_{P2r}^s, \quad (55)$$

$$\lambda\phi_{1r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{1r}^s + cS_{\phi1}^s + cR_{\phi1r} + T_r^s + dm_{\phi1} + \lambda_1 N_{1r}^s + \epsilon_{\phi1r}^s, \quad (56)$$

$$\lambda\phi_{2r}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{2r}^s + cS_{\phi2}^s + cR_{\phi2r} + T_r^s + dm_{\phi2} + \lambda_2 N_{2r}^s + \epsilon_{\phi2r}^s, \quad (57)$$

onde:

- ρ_r^s - distância geométrica entre a antena receptora e o satélite, cujas coordenadas estão implícitas neste termo;
- dt^s e dt_r - respectivamente, os erros dos relógios do satélite (no instante de transmissão) e do receptor (no instante de recepção) em relação ao sistema de tempo GPS (t_{GPS}). A unidade destes erros é dada em segundos e pode ser obtida em metros multiplicando-os pela constante da velocidade da luz no vácuo ($c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s);
- I_{1r}^s - erro sistemático devido à ionosfera na frequência L_1 ;
- I_{2r}^s - erro sistemático devido à ionosfera na frequência L_2 ;
- T_r^s - erro sistemático devido à refração troposférica;
- S_p e S_ϕ - tendência devido ao atraso de *hardware* do satélite, em unidade de segundos;

⁶ Os subscritos 1 e 2 referem-se, respectivamente, às frequências L_1 e L_2

- R_p e R_ϕ - tendência devido ao atraso de *hardware* do receptor, em unidade de segundos;
- N_r^s - ambiguidades inteiras na observável da fase, obtida em unidades de comprimento pré multiplicando pelo comprimento de onda da fase portadora;
- dm_p - efeito de multicaminho na pseudodistância;
- dm_ϕ - efeito de multicaminho na fase da portadora, de ordem muito menor do que dm_p ($dm_p \gg dm_\phi$); e
- ε_p e ε_ϕ - erros aleatórios, ruídos da observação e demais erros sistemáticos não modelados.

Nota-se nas equações 56 e 57 que devido ao avanço sofrido pela observável fase da onda portadora, ao atravessar a ionosfera, o efeito deste comporta-se de maneira oposta ao caso das equações 54 e 55 da pseudodistância, que por sua vez, sofre um retardo. Tal fato fica evidenciado pelo sinal negativo do erro sistemático devido à ionosfera (I_r^s), pois um avanço na fase provoca uma diminuição na distância obtida a partir da mesma.

5.3 Cálculo do Atraso Ionosférico Utilizando Observáveis GPS

Diferentes métodos podem ser aplicados para determinar as correções do atraso ionosférico e então remover o efeito da ionosfera dos sinais GPS. A partir de combinações entre as observáveis GPS é possível determinar o erro devido à ionosfera na portadora L_1 ou L_2 , tendo em vista que estes sinais transionosféricos possuem informações desta camada da atmosfera.

A principal técnica para correção do efeito da refração ionosférica é baseada em medidas da pseudodistância ou da fase da portadora obtidas por receptores de dupla frequência. Logo, o atraso ionosférico absoluto em L_1 é estimado utilizando a combinação linear livre da geometria das observáveis de pseudodistância (equações 54 e 55), da seguinte forma:

$$I_{1r}^s = \frac{(P_2 - P_1)_r^s}{\gamma - 1} - \frac{c(ds_p^s + dr_p)}{\gamma - 1} - \frac{(dm_{p2} - dm_{p1} + \varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p1})_r^s}{\gamma - 1}, \quad (58)$$

com,

$$\gamma = (f_{L1} / f_{L2})^2 = (1575,42 / 1227,60)^2 = (77 / 60)^2 \cong 1,647, \quad (59)$$

onde:

- I_{1r}^s - atraso ionosférico em unidade de metros na portadora L_1 , na direção satélite/receptor (*slant*);
- $ds_p^s = \frac{(S_{p2} - S_{p1})^s}{\gamma - 1}$ - tendência diferencial do código (DCB – *Differential Code Bias*) em L_1 para o satélite s , em unidade de segundos. Os valores desta tendência (ds_p^s), já projetados para L_1 , são transmitidos nas mensagens de navegação com o nome de T_{GD} (*Time Group Delay*) ou podem ser obtidos nos arquivos IONEX (*IONosphere map EXchange*) disponibilizados pelos diversos centros do IGS. De acordo com o IS-GPS-200D (2004) este termo é totalmente cancelado quando é calculada a observação *ion-free*⁷ (livre da geometria);
- $dr_p = \frac{(R_{p2} - R_{p1})_r}{\gamma - 1}$ - DCB em L_1 para o receptor r , em unidade de segundos. ds_p^s e dr_p ocorrem devido à diferentes caminhos percorridos pelo código em L_1 e L_2 no hardware dos satélites e dos receptores, bem como o não sincronismo na modulação destes sinais; e
- γ - constante que permite converter para L_1 ou L_2 , os erros dependentes da frequência do sinal.

Nota-se que na combinação livre da geometria (equação 58) o atraso ionosférico obtido é afetado pelo multicaminho e ruído de ambas observáveis utilizadas no processo. Uma forma de diminuir a influencia do termo referente ao ruído das observáveis é utilizar as pseudodistâncias em L_1 e L_2 suavizadas pela fase da onda portadora. Assim o último termo do lado direito da equação 58 diminui significativamente, e na prática acaba sendo desprezado.

⁷ A *ion-free* é uma observável resultante da combinação linear entre as observáveis GPS, a qual permite eliminar os efeitos da ionosfera de primeira ordem. Detalhes sobre esta observável podem ser encontrados em MONICO (2008).

Com relação ao multicaminho, na maioria dos trabalhos este termo também é desprezado quando se utiliza a pseudodistância suavizada pela fase.

Na equação 58 também se observa que os erros devidos ao não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, o erro das efemérides e da refração da troposfera são desprezados, pois estes efeitos contaminam cada uma das medidas efetuadas, em ambas as frequências, da mesma maneira em unidades de distância. Assim, na diferenciação os mesmos são cancelados, não comprometendo o resultado do método.

Para a fase da onda portadora pode-se reescrever a equação do avanço ionosférico absoluto sobre a portadora L_1 como:

$$I_{1r}^s = \frac{(\phi_2 - \phi_1)_r^s}{\gamma - 1} - c \frac{(ds_\phi^s + dr_\phi)}{\gamma - 1} - \frac{(\lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1)_r^s}{\gamma - 1} - \frac{(dm_{\phi 2} - dm_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 2} - \varepsilon_{\phi 1})_r^s}{\gamma - 1}, \quad (60)$$

onde:

$ds_\phi^s = \frac{(S_{\phi 2} - S_{\phi 1})^s}{\gamma - 1}$ - atraso de hardware da fase em L_1 para o satélite s , em unidade de segundos; e

$dr_\phi = \frac{(R_{\phi 2} - R_{\phi 1})_r}{\gamma - 1}$ - atraso de hardware da fase em L_1 para o receptor r , em unidade de segundos. Os termos ds_p^s ou ds_ϕ^s , e dr_p ou dr_ϕ , são denominados genericamente como tendência interfrequência L_1 - L_2 dos satélites e dos receptores, respectivamente.

A medida obtida pela equação 60 é mais precisa do que a obtida pela equação 58, no entanto é uma medida ambígua devido ao termo de ambiguidade (número de ciclos inteiros) das observações da fase da portadora. Na prática os termos referentes ao multicaminho e ao ruído da combinação linear das observações de fase são desprezados, pois comparando-se com a equação 58 a relação é dada como $(\varepsilon_{\phi 2} - \varepsilon_{\phi 1})_r^s \ll (\varepsilon_{p 2} - \varepsilon_{p 1})_r^s$ e $(dm_{\phi 2} - dm_{\phi 1})_r^s \ll (dm_{p 2} - dm_{p 1})_r^s$. Por outro lado, apesar das medidas obtidas pelas pseudodistâncias serem ruidosas, estas não contém termos ambíguos.

As equações 58 e 60 permitem obter, respectivamente, o atraso e o avanço ionosférico absoluto na direção satélite/receptor e é dependente do ângulo de elevação do satélite. Com o propósito de padronizar as observações de atraso ou avanço ionosférico, estas

medidas são projetadas na direção vertical usando uma função de mapeamento, designada também de fator de inclinação (*slant factor*) (KOMJATHY, 1997), no qual a ionosfera é considerada como uma fina camada de altitude fixa. Inicialmente, a função de mapeamento a ser utilizada nesta pesquisa será a função de mapeamento geométrico padrão ($\text{sf}(z')$) que depende do ângulo zenital do satélite (z'), dado pela equação 19.

Na seção 5.8 são apresentadas algumas limitações em se considerar a ionosfera como uma fina camada de altura fixa, bem como da função de mapeamento dada pela equação 19.

As equações de observações utilizadas na GI são baseadas na combinação linear livre da geometria. Logo, a partir da equação 58 e da relação dada pela equação 19, para as pseudodistâncias (P_{1r}^s, P_{2r}^s) originais ou suavizadas pela fase da portadora, o modelo de observação pode ser expresso por:

$$\frac{(P_2 - P_1)_r^s}{\gamma - 1} = \text{sf}(z')_r^s I_1^v + c \frac{ds_p^s}{\gamma - 1} + c \frac{dr_p}{\gamma - 1} + \frac{(dm_{p2} - dm_{p1} + \varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p1})_r^s}{\gamma - 1}. \quad (61)$$

A equação 65 é utilizada para o cálculo do atraso ionosférico vertical (I^v) na portadora L_1 . Como pode ser visto a combinação linear livre da geometria das observáveis GPS permitem o cálculo do atraso ionosférico corrompido pelas tendências interfrequências dos satélites e dos receptores, pelo multicaminho e pelo ruído da observável. Este atraso corrompido pelos diversos erros também é denominado de atraso ionosférico relativo. Em termos de análise do comportamento espacial e temporal da camada ionosférica estes erros não influenciam significativamente e podem ser desprezados. Por outro lado, para a modelagem, a aplicação de correção nas observáveis GNSS e a determinação do TEC absoluto, estes erros devem ser tratados cuidadosamente, pois afetam diretamente na acurácia do modelo ionosférico e da correção.

Para a fase da portadora o modelo de observação é expresso por:

$$\frac{(\phi_2 - \phi_1)_r^s}{\gamma - 1} = -\text{sf}(z')_r^s I_1^v + c \frac{ds_\phi^s}{\gamma - 1} + c \frac{dr_\phi}{\gamma - 1} + \frac{(\lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1)_r^s}{\gamma - 1} + \frac{(dm_{\phi 2} - dm_{\phi 1} + \varepsilon_{\phi 2} - \varepsilon_{\phi 1})_r^s}{\gamma - 1}. \quad (62)$$

No lado direito da equação 62 aparece a diferença entre as ambiguidades $(\lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1)_r^s$, sendo este termo diferente para cada passagem do satélite e para cada vez

que ocorrem perdas de ciclos. Embora o erro sistemático ionosférico estimado a partir da fase da portadora permita obter melhor precisão do que a obtida com a pseudodistância, tem-se em contrapartida que o número de incógnitas é maior, devido às ambiguidades e às perdas de ciclos (CAMARGO, 1999). Observa-se ainda que devido à qualidade da observação em relação à equação 61, os termos referentes ao multicaminho e ruído são desprezados.

Devido ao problema da solução de ambiguidade para a fase da portadora, serão utilizadas as observáveis de pseudodistância, obtidas a partir dos códigos C/A (*Coarse Acquisition* – Fácil Aquisição), $P(Y)_{L1}$ (quando disponível) e $P(Y)_{L2}$. Como já mencionado anteriormente, para minimizar a influência do termo referente ao ruído da observação, e com base na análise feita em Aguiar (2005), Camargo (1999) e Matsuoka (2003) são utilizadas as pseudodistâncias suavizadas pela fase da onda portadora, por se tratar de observáveis mais precisas e menos ruidosas que as pseudodistâncias originais. Este procedimento minimiza também a influência do termo do multicaminho.

Para a combinação linear entre as pseudodistâncias suavizadas pela fase da portadora (PS_{1r}^s, PS_{2r}^s), o modelo de observação é expresso por:

$$\frac{(PS_{2r}^s - PS_{1r}^s)}{\gamma - 1} = sf(z')_r^s I_1^v + c \frac{ds_p^s}{\gamma - 1} + c \frac{dr_p}{\gamma - 1}. \quad (63)$$

As observáveis de pseudodistâncias suavizadas a serem utilizadas são obtidas utilizando a técnica proposta por Jin (1996), a qual foi utilizada por Camargo (1999) e Aguiar (2005).

Nas equações apresentadas até agora, o valor do atraso ionosférico é obtido em unidade de metros, pois é a unidade de interesse para aplicar as correções nas observáveis GNSS. No entanto, para o monitoramento e estudos do comportamento da ionosfera é interessante quantificar o atraso em densidade de elétrons na ionosfera, assim o I^v pode ser relacionado ao VTEC por:

$$I_i^v = \frac{40,3}{f_i^2} \text{VTEC}, \quad (64)$$

onde a frequência f é dada em unidade de Hz e $i = L_1, L_2$. Considerando que 1 unidade de TEC (TECU) é igual a 10^{16} elétrons/m², o valor de VTEC em TECU pode ser obtido aplicando a seguinte relação:

$$\text{VTEC} = \frac{(f_i)^2 I_i^v}{40,3 \times 10^{16}} = \frac{(f_i)^2 I_i^s}{40,3 \times 10^{16} \sin^2(z')_r} [10^{16} \text{ el/m}^2]. \quad (65)$$

Pela equação 65 verifica-se que 1 unidade de TEC (TECU) ao longo do caminho do sinal GPS pode provocar um atraso de aproximadamente 16,2 cm em L_1 e de 26,7 cm em L_2 .

Nos últimos anos várias pesquisas também vêm sendo realizadas para melhorar a performance do GNSS em tempo real, bem como a utilização deste para estudos da dinâmica da atmosfera terrestre. Dentre os diversos trabalhos pode-se citar: Aguiar (2005), El Gizawy (2003), Hajj et al. (2002), Kee e Yun (1998), Lejeune e El-Arini (2004), Liao (2000), Lin (1997), Liu (2001), Liu (2004), Lu (1991), Moon (2004), Scherliess et al. (2002), Skone (1998, 2000), Wu et al. (1996), entre outros.

5.4 Correção da tendência interfrequência $P(Y)_{L1}$ -C/A

Como já mencionado, as observáveis dependem do tipo de técnica de rastreamento e processamento do sinal adotado pelo receptor. Quando se trabalha com redes de estações de referência, em muitos casos estas redes são compostas por diferentes tipos de receptores e que utilizam diferentes técnicas de rastreamento do sinal, tal como ocorre com receptores *codeless* e *semi-codeless*. Este problema é acentuado em períodos de modernização de uma rede de estações ou quando se processa dados de estações de referência com diferentes modelos de receptores.

Assim, considerando tipos diferentes de receptores GPS pode-se ter à disposição dois tipos diferentes de observações do código em L_1 , o código C/A e/ou o código $P(Y)_{L1}$. Logo, três situações distintas podem ocorrer quando se está processando as pseudodistâncias obtidas com um determinado tipo de receptor: ter disponível somente a pseudodistância

obtida pelo código $P(Y)_{L1}$; ter disponível somente a pseudodistância obtida pelo código C/A; ou ter disponíveis as pseudodistâncias obtidas tanto pelo código $P(Y)_{L1}$, como pelo C/A.

O que ocorre na prática é que vários receptores fornecem a pseudodistância medida no código $P(Y)_{L1}$, ou $P(Y)_{L1}$ e C/A. Neste trabalho, quando isto ocorrer, sempre será utilizada a medida obtida pelo código $P(Y)_{L1}$, pois trata-se de uma observação mais precisa do que aquela advinda do código C/A. No entanto, quando for utilizado receptores que fornecem pseudodistâncias medidas somente pelo código C/A, será necessário aplicar uma correção nesta medida para corrigir a tendência em relação as demais observações utilizadas no processamento.

A correção no código C/A é necessária devido a uma tendência diferencial entre os sinais $P(Y)_{L1}$ e C/A, denominada no IS-GPS-200D de $ISC_{L1C/A}$. Logo, além da tendência interfrequência L_1 - L_2 , quando se utiliza o código C/A deve-se corrigir a tendência $P(Y)_{L1}$ -C/A, normalmente designada de P1-C1. Os valores de correção P1-C1 não são transmitidos nas mensagens de navegação e não são conhecidos em tempo real, porém são determinados por alguns centros do IGS (JPL e CODE, por exemplo).

Atualmente, o IGS recomenda a utilização dos valores estimados pelo CODE. Estes valores são calculados a partir de observações realizadas com vários tipos de receptores, e apresenta um valor diferente para cada satélite. Para a correção dos arquivos RINEX foi desenvolvida uma ferramenta denominada de “cc2noncc”, o qual torna medidas do código C/A/ $P(Y)_{L2}$ consistentes com $P(Y)_{L1}$ / $P(Y)_{L2}$, aplicando a correção da tendência P1-C1. Este programa está disponível em <https://goby.nrl.navy.mil/IGStime/>.

Contudo, foi criado um algoritmo, denominado de “p1c1cor”, para detectar as observações do código C/A e corrigi-las da tendência diferencial P1-C1. Os valores da tendência P1-C1 utilizados pelo p1c1cor são obtidos junto aos arquivos denominados de P1C1.dcb, que estão disponíveis na página do CODE (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>). Estes valores são dados em unidades de nano segundos.

Deve-se salientar que existem dois tipos de arquivos P1C1.dcb que podem ser utilizados. Um tipo diz respeito aos arquivos que contém estimativas mensais do P1-C1 fornecidas pelo CODE. Outro tipo de arquivo contém a estimativa histórica dos DCB para C1-P1, a qual é processada e disponibilizada aos usuários somente quando uma variação considerada significativa é detectada ou quando novas estações de referência e/ou satélites entram no processamento. Os valores contidos neste último tipo de arquivo são recomendados

pelo IGS aos usuários. Portanto, neste trabalho serão adotados estes arquivos, cuja última atualização ocorreu em 25/11/07 (igsmail 5662 - igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2007/).

De modo geral, a equação de correção do código C1 (C/A) pode ser escrita como (NACHO, 2008):

$$C1_{\text{corr}} = C1 + \frac{DCB_{C1P1}}{3,335641}, \quad (66)$$

onde $C1_{\text{corr}}$ é o código C1 (C/A) corrigido da tendência diferencial em relação ao código P1 ($P(Y)_{L1}$), em unidade de metros, e DCB_{C1P1} são os valores de DCB para C1-P1 fornecidos pelo CODE em unidade de nanosegundos e para serem utilizados na equação 66, devem ser convertidos para metros. Os valores de DCB_{C1P1} são fornecidos para cada satélite e em valores absolutos, este DCB varia de 0,018 a 2,269 ns. Desta forma, uma rede de receptores de diferentes tipos pode ser utilizada de forma consistente.

5.5 Determinação da tendência interfrequência

Segundo o IS-GPS-200D (2004) o atraso de grupo devido ao equipamento é definido como sendo o atraso entre o sinal medido no centro de fase da antena de um satélite específico e o emitido na fonte da frequência abordo do satélite. Este atraso é constituído de um termo de tendência e uma incerteza. O termo de tendência não afeta os usuários, pois este é incluído nos parâmetros de correção do relógio transmitidos nas mensagens de navegação. A incerteza (variação) efetiva do atraso de grupo não deve ultrapassar 3,0 ns (0,89 m) a 2σ (IS-GPS-200D, 2004).

O atraso diferencial de grupo entre os sinais emitidos L_1 e L_2 , ou seja, entre $P(Y)_{L1}$ (ou P1) e $P(Y)_{L2}$ (ou P2), entre $P(Y)_{L1}$ e C/A (ou C1), e entre $P(Y)_{L1}$ e L2C, é especificado como consistindo de uma componente aleatória adicionada de uma tendência. A média das diferenças é definida como a componente de tendência e pode ser positiva ou negativa. Para um dado satélite o valor absoluto não deve ultrapassar 15,0 ns (4,5 m). O desvio padrão em torno da média não deve exceder 3,0 ns (0,89 m) a 2σ (IS-GPS-200D, 2004). Estas componentes de tendência do atraso diferencial de grupo podem ser corrigidas aplicando-se os parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação, designados de T_{GD} ,

para o atraso diferencial entre os sinais $P(Y)_{L1}$ e $P(Y)_{L2}$, e ISC (*Inter-Signal Correction* – Correção Entre-Sinais), para o atraso diferencial entre os sinais $P(Y)_{L1}$ e C/A ou $P(Y)_{L1}$ e L2C. Logo, a tendência interfrequência dos satélites é denominada formalmente pelo NAVSTAR-GPS como atraso diferencial de grupo (T_{GD}). Desde abril de 1999 os valores transmitidos nas mensagens de navegação têm sido fornecidos pelo JPL, com uma acurácia de 0,5 ns (0,15 m) (HEGARTY; POWERS; FONVILLE, 2005).

O atraso diferencial de grupo, conhecido comumente por tendência interfrequência (IFB – *Interfrequency Bias*), também é denominado por alguns autores como tendência no tempo do sinal ou tendência diferencial do código (DCB). De modo geral, são várias fontes que podem causar esta tendência na propagação do sinal. Para o caso dos satélites, as duas fontes mais comentadas são a tendência devido à sincronização imperfeita na modulação dos sinais do código C/A e P(Y), e devido ao diferentes caminhos analógicos percorridos pelos sinais GNSS individuais desde sua geração até a antena do satélite (HEGARTY; POWERS; FONVILLE, 2005). A Figura 7 ilustra a tendência interfrequência provocada pelo não sincronismo na modulação do sinal.

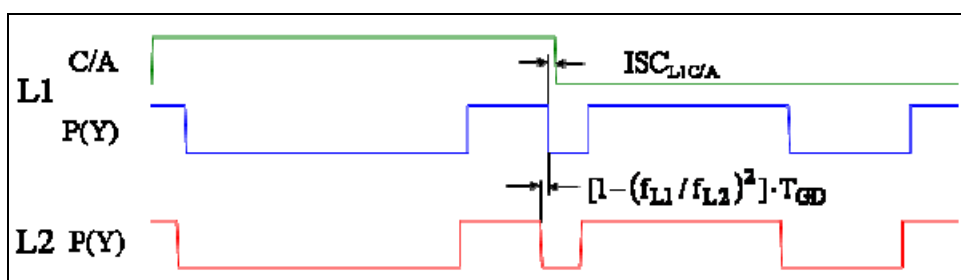


Figura 7 – Tendência interfrequência provocada pelo não sincronismo na modulação do sinal.
Fonte: Hegarty, Powers e Fonville (2005).

Para usuários que utilizam o código C/A, além do atraso diferencial do grupo deve ser feita a correção da tendência entre os sinais C/A e $P(Y)_{L1}$. Na Figura 7 esta correção está denominada como $ISC_{L1C/A}$. Apesar desta componente estar prevista no relatório do IS-GPS-200D, seus valores ainda não são transmitidos nas mensagens de navegação.

Os receptores também introduzem tendências adicionais ao atraso de grupo resultante da combinação antena/cabo/receptor. O sinal recebido viaja do centro de fase da antena, passa por um cabo, passa pelos componentes analógicos, e finalmente, após a digitalização, os correlatores são usados para estimar o tempo de recepção do sinal (HEGARTY; POWERS; FONVILLE, 2005). A tendência devido ao equipamento do usuário é denominada de DCB do receptor ou de tendência interfrequência do receptor.

Para se obter o TEC absoluto é necessário conhecer as tendências interfrequências dos satélites e dos receptores. Pode-se citar dois métodos para a determinação da tendência interfrequência: a calibração dos receptores em laboratório utilizando um equipamento capaz de realizar a medida do atraso diferencial entre os sinais; ou a calibração a partir da modelagem das observações coletadas por uma rede de receptores de dupla frequência. O problema da calibração em laboratório é que são poucos lugares que possuem o equipamento capaz de medir a tendência interfrequência, e além da combinação antena/cabo/receptor a temperatura também influencia na determinação da tendência, o que limitaria o laboratório de calibração a ter as mesmas condições climáticas do local da instalação do receptor. A solução que vem sendo adotada pelos pesquisadores é utilizar uma função analítica para modelar a superfície que representa a ionosfera e considerar termos adicionais referentes às tendências interfrequências dos satélites e dos receptores. Neste método a principal desvantagem é que a estimativa das tendências depende do modelo ionosférico adotado, ou seja, da função analítica.

Para trabalhos em pós-processamento, Camargo (1999) estima as tendências interfrequências utilizando o método da função analítica. Camargo (1999) utiliza a série de Fourier e o ajustamento em lote pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para estimar os coeficientes da função analítica do atraso ionosférico vertical e a tendência interfrequência dos satélites e dos receptores. Entretanto, devido à deficiência de característica, é necessária a injunção da tendência interfrequência de um dos satélites. Azpilicueta (2006) utiliza os harmônicos esféricos para modelar a ionosfera e estima as tendências interfrequências por arco de satélite.

Baseado em Camargo (1999), e assim como em Aguiar (2005), neste trabalho se irá modelar a ionosfera, usando o Mod_Ion_FK, através dos coeficientes de uma função e, conseqüentemente, as tendências interfrequências serão modeladas pelos termos ds e dr (equação 63) e o ajustamento será realizado utilizando o algoritmo do filtro de Kalman. A determinação destes parâmetros é uma tarefa difícil, pois são utilizadas várias aproximações para o cálculo das medidas que compõem o vetor de observações do filtro de Kalman. Dentre as aproximações que influenciam na estimativa destes parâmetros pode-se citar a função de mapeamento geométrica padrão, a altitude da camada ionosférica e a própria função de modelagem da ionosfera.

Nesta etapa, além da série de Fourier já implementada no Mod_Ion_FK (AGUIAR, 2005), também foi implementada uma função quadrática bidimensional (COCO et

al., 1991) para modelar o atraso ionosférico vertical (I^v) local e regionalmente. Para a função quadrática, o atraso ionosférico vertical é expresso como (COCO et al., 1991):

$$I^v(\phi, \theta) = c_1 + c_2\phi + c_3\theta + c_4\phi^2 + c_5\theta^2 + c_6\phi\theta, \quad (67)$$

onde ϕ é latitude do ponto ionosférico, θ é a longitude do ponto ionosférico no referencial solar fixo, e c_1, \dots, c_6 são os coeficientes do modelo ionosférico para aproximação linear do atraso ionosférico a ser estimado, assumindo um processo estocástico de Gauss-Markov de primeira ordem (GELB, 1974; COCO et al., 1991). Assim, aplicando-se a equação 67 em 63, a equação de observação do filtro de Kalman pode ser expressa como:

$$\frac{(PS_2 - PS_1)_r^s}{\gamma - 1} = sf(z')_r^s (c_1 + c_2\phi + c_3\theta + c_4\phi^2 + c_5\theta^2 + c_6\phi\theta) + c \frac{ds_p^s}{\gamma - 1} + c \frac{dr_p}{\gamma - 1}. \quad (68)$$

Para a série de Fourier bidimensional, a equação de observação do filtro de Kalman pode ser expressa como (AGUIAR, 2005):

$$\frac{(PS_2 - PS_1)_r^s}{\gamma - 1} = sf(z')_r^s \left\{ \begin{aligned} & a_1 + a_2 B^s + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+1}}^{n=4} [a_j \cos(i h^s) + a_{j+1} \sin(i h^s)] + a_{n*2+3} h^s + \\ & \sum_{\substack{i=1 \\ j=2i+10}}^{m=4} [a_j \cos(i B^s) + a_{j+1} \sin(i B^s)] \end{aligned} \right\} + c \frac{ds_p^s}{\gamma - 1} + c \frac{dr_p}{\gamma - 1}. \quad (69)$$

As variáveis (a_1, a_2, \dots, a_{19}) são os coeficientes da série. Neste caso, a variável B^s representa a latitude geográfica do ponto ionosférico e h^s a longitude do ponto ionosférico no referencial solar fixo.

Foram escolhidas as duas funções de modelagem apresentadas nas equações 67 e 68, com o intuito de verificar a eficiência de uma função de 2ª ordem e outra de 4ª ordem no processo de calibração, considerando a dimensão da rede de estações de referência, bem como a irregularidade da superfície de cobertura da ionosfera a ser modelada.

A tendência interfrequência dos satélites e receptores é o fator limitante mais importante e que afeta a acurácia das medidas de TEC. O método proposto neste trabalho é aplicar uma das funções descritas acima, em função da área de cobertura da rede de estações, para modelar o atraso ionosférico na direção vertical e estimar simultaneamente as tendências

interfrequências. Assim, no processamento *on-line* ou *off-line*, para cada época de observação são estimados os coeficientes da função e as tendências instrumentais. Na versão anterior do Mod_Ion_FK, era necessário a injeção da tendência interfrequência dos satélites, a partir dos valores obtidos junto aos arquivos IONEX.

Neste trabalho foi realizada uma atualização do Mod_Ion_FK, onde neste método não é necessária a injeção da tendência interfrequência para nenhum dos satélites ou receptores. Entretanto, para auxiliar que as estimativas de tendência interfrequência dos satélites e receptores convirjam para um valor correto, é inserida uma restrição onde a tendência interfrequência dos satélites não deve ultrapassar 15ns, conforme mencionado em IS-GPS-200D (2004). Estimadas as interfrequências, estas são usadas para calcular o atraso ionosférico absoluto dado pela equação 58, e finalmente obtém-se o VTEC absoluto aplicando a equação 65.

É importante salientar que a determinação da tendência interfrequência é um processo que deve ser realizado antes ou simultaneamente a geração da grade ionosférica. Uma opção é realizar este com dados de um dia anterior aos dados usados para gerar a grade ionosférica. Esta latência não deve afetar o resultado da grade ionosférica, pois as tendências interfrequências são estáveis para longos períodos de tempo (COCO et al. 1991; SARDÓN; RIUS; ZARROA, 1994), podendo não variar por dias e até um mês. Outra opção é realizar a determinação da tendência interfrequência simultaneamente ao processo de geração da grade ionosférica, ou seja, determinação *online*. Assim, o algoritmo da GI e o do Mod_Ion_FK devem ser executados simultaneamente. Este método pode ter o inconveniente de possíveis instabilidades no processo de calibração e afetar a acurácia da grade ionosférica.

5.6 Geração e Interpolação da Grade Ionosférica

Considerando que as medidas de atraso ionosférico são esparsas e irregularmente espaçadas, a análise destes dados necessita de um modelo numérico que permita amostrá-los em uma grade regular. Existem vários métodos de interpolação que podem ser utilizados para a geração desta grade, dentre os quais pode-se citar: krigagem; interpolação bilinear; interpolação multiquádrica; interpolação por redes neurais; entre outros. Entretanto, quanto mais sofisticado é o método de interpolação maior é o custo computacional, o que inviabiliza a relação custo/benefício de alguns destes métodos para aplicações em tempo real.

Numa tentativa de atender as condições de continuidade, disponibilidade e integridade, neste trabalho é proposto um método de interpolação adaptativo, ou seja, a partir do número de IPPs medidos será definida uma função para ajustar uma superfície e então determinar o valor do atraso ionosférico do IGP, bem como do erro do IGP. Deste modo, tendo-se n observações será definida uma função com c coeficientes, onde $c < n$.

Para $n > 7$, será usada a função quadrática onde o atraso ionosférico vertical do IPP (I_{IPP}^V) é expresso como:

$$I_{IPP}^V(t_k) = a_0^{t_k} + a_1^{t_k} d\varphi + a_2^{t_k} d\lambda + a_3^{t_k} d\varphi^2 + a_4^{t_k} d\lambda^2 + a_5^{t_k} d\varphi d\lambda, \quad (70)$$

onde φ é a diferença entre a latitude do IPP e a latitude do IGP, λ é a diferença entre a longitude do IPP e a longitude do IGP no *frame* de referência solar fixo, e a_0, \dots, a_5 são os coeficientes do modelo ionosférico para aproximação do atraso ionosférico a ser estimado.

Caso seja observado $5 \leq n \leq 7$ IPPs, para garantir um mínimo de dois graus de liberdade, a equação 70 sofre uma simplificação e passa a ajustar um plano com aproximação de primeira ordem:

$$I_{IPP}^V(t_k) = a_0^{t_k} + a_1^{t_k} d\lambda + a_2^{t_k} d\varphi, \quad (71)$$

onde:

- a_0, a_1 e a_2 - coeficientes para aproximação linear espacial do atraso ionosférico e devem ser determinados;
- $d\lambda_{rs}$ - diferença entre a longitude do IPP e a longitude do IGP; e
- $d\varphi_{rs}$ - diferença entre a latitude do IPP e a latitude do IGP.

Nas equações 70 e 71, verifica-se que o valor do atraso ionosférico do IGP (I_{IGP}^V) é dado pelo coeficiente a_0 . Para $2 \leq n \leq 4$ será utilizada a expressão:

$$I_{IGP}^V(t_k) = a_0^{t_k} = \sum_{i=1}^n (I_{IPP}^V)_i p_i, \quad (72)$$

onde $I_{IGP}^V(t_k)$ denota o atraso ionosférico vertical do IGP na época k . O parâmetro I_{IPP}^V é a medida do atraso ionosférico na vertical do i -ésimo IPP, corrigido das tendências interfrequências, que é ponderado pela função peso p_k , a qual é usada para projetar I_{IPP}^V no IGP. A função peso adotada será o inverso do quadrado da distância, assim a equação 72 é reescrita como:

$$I_{IGPi}^V(t_k) = a_0^{t_k} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j^2} I_{IPPj}^V(t_k)}{\sum_{j=1}^4 \frac{1}{d_j^2}}, \quad (73)$$

onde d_j é a distância entre o IPP j e o IGP i .

Se $n = 1$, então é adotado o critério do vizinho mais próximo, ou seja, $I_{IGP}^V = I_{IPP}^V$ mais próximo, sendo que este ponto será configurado como “não use”. A idéia deste procedimento é permitir que para os processos em épocas futuras, tenha-se um valor inicial aproximado. Se $n = 0$ então o IGP é configurado como “não monitorado”.

Para determinar os IPPs que são utilizados para estimar o atraso ionosférico do IGP, defini-se um raio de busca (R_{max}) a partir do IGP (Figura 8). Como já mencionado, o WAAS usa $R_{max} = 2100$ km. Como o comportamento temporal e espacial da ionosfera na região equatorial apresenta maiores gradientes, neste trabalho será adotado um R_{max} menor do que o usado no WAAS. Assim, o R_{min} será o raio de busca inicial, que não deve ser menor do que 250 km., e o mesmo poderá ser ampliado até um $R_{max} = 1000$ km.

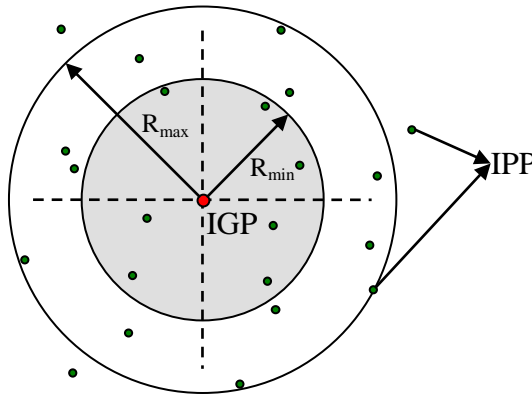


Figura 8 – Raio de busca de IPPs.

Observe que nas equações de observação para a geração da grade, os atrasos ionosféricos já devem estar corrigidos das tendências interfrequências, as quais são determinadas usando o método descrito na seção 5.5.

Neste trabalho é proposto um método de predição baseado em um ajuste linear o atraso ionosférico estimado em cada IGP. Para o ajuste são utilizados os valores dos IGPs estimados dentro de uma janela de 5 minutos, sendo que esta janela é atualizada (deslocada) assim que uma nova estimativa torna-se disponível.

Neste conceito, a predição do atraso ionosférico considera uma variação linear no tempo, dada por:

$$I_{IGP}^v(t_k) = a + b(t_k - t_0), \quad (74)$$

onde:

a e b - coeficientes para aproximação linear espacial do atraso ionosférico e devem ser determinados;

t_k - instante k da estimativa do IGP dentro da janela de 5 minutos; e

t_0 - origem do tempo, ou seja, a época da janela de dados.

Também está implementada a predição utilizando um polinômio, onde o comportamento temporal do atraso ionosférico é considerado não linear:

$$I_{IGP}^v(t_k) = a + b_1(t_k - t_0) + b_2(t_k - t_0)^2. \quad (75)$$

Após a estimação dos parâmetros da função de predição, é calculado o atraso ionosférico predito para cada IGP. A partir dos IGPs preditos, finalmente, é gerada a grade ionosférica predita e o usuário pode estimar a correção do atraso ionosférico para as suas observáveis. Como se sabe, os satélites movimentam em suas órbitas e, consequentemente, os pontos ionosféricos observados também se movimentam. Neste método, na predição do atraso ionosférico de cada IGP está implícita a movimentação dos IPPs circunvizinhos.

Existem algumas possibilidades para a utilização da GI em tempo real, pela perspectiva de um usuário de receptor GNSS de simples frequência. Dentre estas possibilidades, serão analisadas duas: aplicar as correções a partir da GI e dos coeficientes de predição, onde cada IGP terá o valor de atraso ionosférico estimado na época t_0 e um conjunto

de coeficientes para a sua predição; outra possibilidade é fornecer a GI estimada e a GI predita e o usuário aplicar uma GI interpolada para a época de interesse.

5.7 Controle de Qualidade dos Dados

É importante salientar que nesta seção é proposto um método inédito para o controle de qualidade dos dados utilizados para a geração de uma grade ionosférica.

Esta etapa consiste em aplicar uma técnica de controle de qualidade para excluir do processamento somente dados que foram afetados por perdas de ciclo, multicaminho ou ruído. Esta técnica deve considerar o máximo gradiente espacial e temporal da ionosfera para diferenciar se possíveis instabilidades provocadas por observação com erro ou por uma condição de distúrbio na ionosfera. Assim, se o ajustamento não passar no teste estatístico e o problema é devido à observação, e esta deverá ser rejeitada. Se o problema for considerado consequente de um distúrbio ionosférico, a observação não poderá ser rejeitada, pois a mesma contém informações sobre a condição ionosférica na região do ponto ionosférico desta observação.

Neste ponto, é importante salientar que a preocupação não é apenas minimizar os resíduos, mas tornar o modelo estocástico o mais realístico possível, para que o usuário tenha ciência da variância da correção ionosférica. Assim, se em uma determinada região tem-se discrepância de uma observação em relação às demais, isto pode ser reflexo do comportamento ionosférico local, o qual pode ser considerado a partir do relaxamento do modelo estocástico das estimativas da GI.

A solução proposta neste trabalho para minimizar este problema, é aplicar o teste estatístico *t-student* sobre as observações no período de rastreo de cada satélite, ou seja, o teste será aplicado para cada arco (Figura 9) de passagem dos satélites, individualmente.

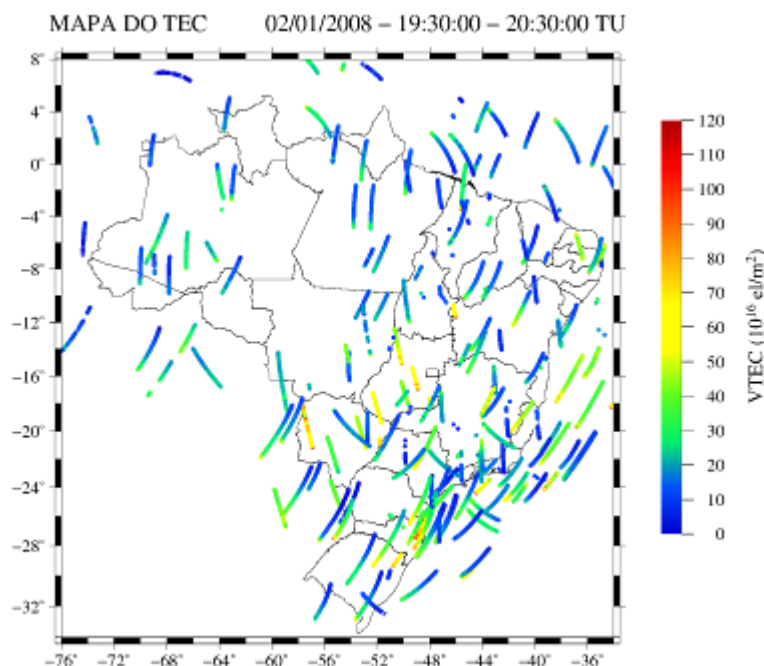


Figura 9 – Valores de VTEC observado na passagem do satélite.

A Figura 10 apresenta uma ilustração do método de controle de qualidade proposto neste trabalho. Na figura são apresentados os IPPs, circunvizinhos ao IGP, observados na passagem de 4 satélites. A magnitude do atraso ionosférico calculado para cada IPP está sendo representada pela variação de cor do ponto. Considerando que na passagem do satélite são realizadas observações consecutivas da época t_k até a época t_{k+n} , e considerando que estas se decorrelacionam no tempo em função do gradiente temporal e espacial da ionosfera e do ângulo de elevação dos satélites, será utilizada uma janela máxima de 5 minutos (= 300 segundos) ou com máximo de 30 observações consecutivas, para detectar possíveis inconsistências nas mesmas. É importante salientar que em função do intervalo de amostragem dos dados a janela poderá ter um número maior ou menor de observações. Por exemplo, a uma taxa de coleta de 1 segundo tem-se 300 observações em 5 minutos, e com uma taxa de coleta de 15 segundos tem-se 30 observações em 5 minutos. Sendo assim, quando se tiver um taxa de amostragem de 1 segundo, o comprimento máximo da janela será de 30 segundos, se por outro lado tem-se uma taxa de amostragem de 20 segundos a janela terá um comprimento de 5 minutos com um total de 15 observações. O mínimo de observações será igual a 5, desta forma a menor taxa de amostragem que poderá ser adotada no processo de controle de qualidade será de uma observação a cada 60 segundos. Para cada arco de satélite, a janela de observações sofre um deslocamento sempre que uma nova observação estiver disponível, assim a época origem da janela passa de t_k para t_{k+1} .

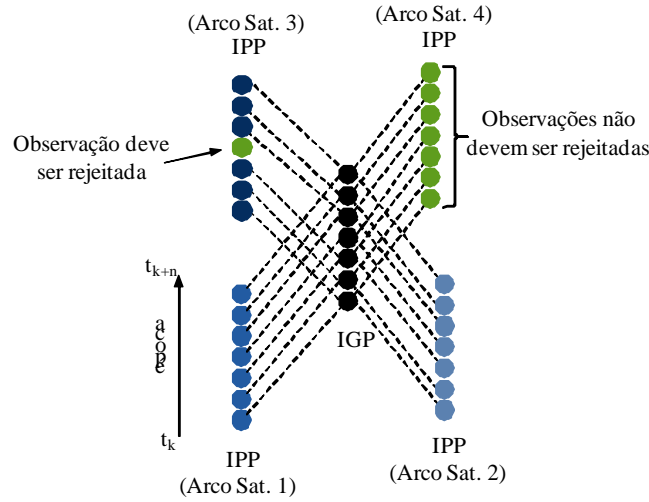


Figura 10 – Controle de qualidade na GI.

No exemplo da Figura 10 é mostrado que uma nova observação não passa no controle de qualidade somente se a mesma for discrepante em relação às demais observações pertencentes ao arco do satélite. Ainda na Figura 10, ao realizar uma comparação entre o atraso ionosférico observado no arco de passagem do satélite 4 com o observado pelos demais satélites, observa-se uma discrepância daquelas observações com as demais. Entretanto, as medidas consecutivas do satélite 4 são semelhantes entre si, mostrando que na região destes IPPs pode estar havendo um comportamento ionosférico localizado, logo estas observações não devem ser rejeitadas no processo de controle de qualidade.

O primeiro passo é a definição do tamanho da janela (t_j) de observações, a qual depende da taxa de amostragem dos dados (dt) e do tamanho máximo da janela ($t_{j_{\max}}$) que para este trabalho foi definido como sendo igual a 5 minutos (300 segundos), conforme já mencionado. Assim tem-se a seguinte condição:

$$t_j = \begin{cases} t_{j_{\max}}, & \text{se } 5 \leq \frac{t_{j_{\max}}}{dt} \leq 30 \\ 30 * dt, & \text{se } \frac{t_{j_{\max}}}{dt} \geq 30 \end{cases}. \quad (76)$$

Para a implementação desta técnica é utilizado o teste estatístico baseado na tabela de distribuição *t-student*, o qual é usado para calcular o intervalo de confiança para a média populacional (μ), em função da média (m) e da variância (S) amostral (GHILANI; WOLF, 2006). Considerando que a taxa de mudança do TEC (ROT – *Rate of Change of TEC*) pode

ser usada para análise de perdas de ciclo (AGUIAR, 2005), bem como para medidas de distúrbios na ionosfera (EL GIZAWY, 2003), o processo de controle de qualidade será baseado nos valores de ROT obtidos a partir das observações que compõem a janela de análise. O ROT é calculado pela razão entre a diferença entre duas medidas consecutivas de atraso ionosférico e o intervalo de amostragem (dt) dos dados, ou seja, $ROT = (I_{k+1} - I_k)/dt$. Uma das vantagens de se utilizar o ROT é que vários erros sistemáticos são cancelados, dentre os quais cita-se a influência das tendências interfrequências.

Desta forma, a partir das observações da janela de análise é então calculado o valor médio do ROT (\overline{ROT}) e sua respectiva variância (σ_{ROT}^2). Logo, considerando um nível de confiança de 99,9% ($\alpha = 0,0005$), tem-se que uma nova observação (I_{n+1}) será rejeitada se o ROT calculado estiver fora do intervalo de confiança, dado por:

$$\overline{ROT} - t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\sigma_{ROT}^2}{\sqrt{n}} < ROT < \overline{ROT} + t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\sigma_{ROT}^2}{\sqrt{n}}, \quad (77)$$

onde n é o número de observações de ROT obtidas a partir da janela de análise.

Deve-se salientar que no caso da rejeição de uma observação, a mesma não é totalmente descartada. As observações rejeitadas são armazenadas numa janela auxiliar, denominada janela de rejeição, a qual tem capacidade de armazenar 5 observações consecutivas. Quando a janela de rejeição é preenchida com 5 observações consecutivas, é realizada a análise estatística utilizando esta janela, ou seja, a sexta observação será comparada à janela de rejeição. Se esta observação não for rejeitada na análise estatística, a janela de rejeição passa a ser a nova janela de análise. Este procedimento permite um reajuste do processo de controle de qualidade quando ocorrer um distúrbio ionosférico, que se mantém por um determinado período de tempo. No caso deste trabalho o distúrbio passa a ser considerado no processo após 5 observações consecutivas, contadas a partir do início do distúrbio. Estudos devem ser realizados com o intuito de aprimorar este procedimento no controle de qualidade e, consequente, diminuir o tempo necessário para se detectar que determinadas variações nas observações são decorrentes da atividade ionosférica.

5.8 Função de Mapeamento

A aproximação adotada no modelo do atraso ionosférico na vertical também é uma fonte de erro. Este modelo é uma simplificação onde a ionosfera é descrita como uma fina camada, com uma altura média e usa uma função para converter medidas de atraso na direção inclinada para a direção vertical. Dois fatos importantes desta aproximação devem ser destacados.

Um fato se refere a assumir que a ionosfera tem altura e espessura constantes. Deve-se destacar que a altura do pico de densidade de elétrons na ionosfera varia em função da taxa de ionização. A Figura 11 mostra o perfil de densidade de elétrons gerado usando o modelo empírico IRI-2001, para a região de Presidente Prudente, contemplando um dia de alta taxa de produção de elétrons (solstício de verão) e um dia de baixa taxa de produção (solstício de inverno), para o ano de alta atividade solar (ano de 2000).

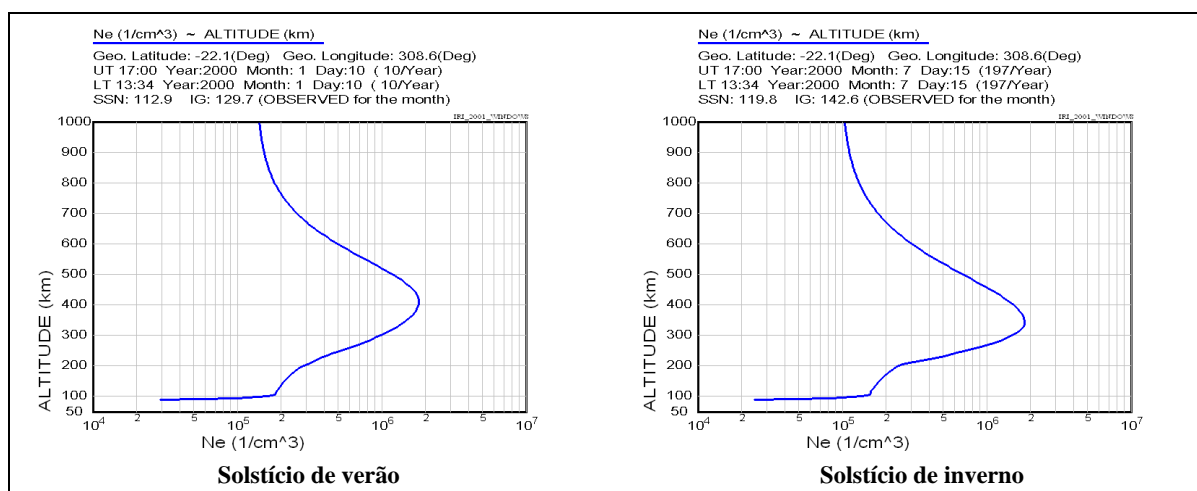


Figura 11 – Perfil de densidade de elétrons gerado usando o IRI-2001.

Pela Figura 11, pode-se observar que, para as 17:00 TU (Tempo Universal), no solstício de verão a altitude do pico de densidade de elétrons é de aproximadamente 400 km, enquanto que no solstício de inverno a altitude diminui para 350 km. Esta variação na altitude também ocorre durante o dia.

Outro fato diz respeito a função de mapeamento que não considera gradientes espaciais na distribuição de elétrons na camada da ionosfera. Este também é um fator limitante, principalmente, na região equatorial onde são observados altos gradientes, tanto espacial quanto temporal.

Uma solução alternativa proposta neste trabalho é a possibilidade de usar múltiplas grades com altitudes diferentes. Assim a camada da ionosfera seria estratificada em vários níveis de altitude, onde cada nível tem um fator de contribuição no atraso ionosférico observado, e a soma dos fatores de todos os níveis deve ser igual a 1 (um) o que equivale a 100% da área abaixo da curva de densidade de elétrons.

Para melhor entender, a Figura 12 mostra um exemplo da camada ionosférica sendo estratificada em 4 subcamadas, onde a cada subcamada é atribuído um fator de contribuição (f_c) ao atraso ionosférico observado.

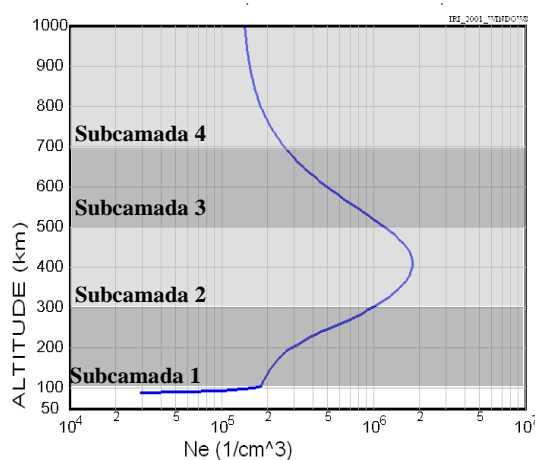


Figura 12 – Subcamadas da ionosfera

Baseado no perfil da distribuição aproximada da densidade de elétrons foi considerado as subcamadas ionosféricas e respectivos fatores de contribuição, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Configuração para as subcamadas ionosféricas.

| Subcamada | Altura média da subcamada (km) | Fator de contribuição (f_c) |
|------------------|---------------------------------------|---|
| 1 | 200 | 0,17 |
| 2 | 400 | 0,50 |
| 3 | 600 | 0,23 |
| 4 | 850 | 0,10 |

Os valores do f_c apresentados na Tabela 7 foram obtidos a partir do cálculo aproximado da área abaixo da curva de densidade elétrons, para cada subcamada definida. Deve-se enfatizar que esta divisão em subcamadas trata-se de uma proposta inicial para

verificar se é observada alguma melhora no modelo de projeção do atraso ionosférico para a direção vertical. Assim, as subcamadas não foram definidas baseadas nas camadas da ionosfera, as mesmas foram definidas baseadas na geometria aproximada definida pelo perfil da curva de densidade de elétrons. Os primeiros resultados apresentados no capítulo 7 mostram que quando são observados maiores gradientes espaciais de TEC, o modelo de grade decomposta apresenta melhor desempenho do que o modelo simples camada comumente adotado. Baseado nestes resultados é coerente afirmar que trabalhos futuros devem ser direcionados para realizar a subdivisão da ionosfera, adotando modelos físicos que considerem o comportamento diário das camadas D, E, F1 e F2. Pois, a decomposição da ionosfera em subcamadas mostrou-se como uma solução alternativa a fim de minimizar as deficiências inerentes à função de mapeamento.

A partir da subdivisão da camada da ionosfera, o ângulo zenital do satélite, calculado no ponto ionosférico, é obtido pela equação:

$$\text{sen}(Z'_i{}^s)_r = \frac{r_m + h_r}{r_m + h_i} \text{sen}(Z_r{}^s) \quad (78)$$

onde $i=1,...,n$ é o identificador da subcamada e a altitude média da subcamada i é dada por h_i . Na equação 76 observa-se que a altitude geométrica do receptor h_r também é considerada. Pode-se observar que a equação 76 é uma modificação da equação 20. A Figura 13 ilustra as quantidades envolvidas na equação 76.

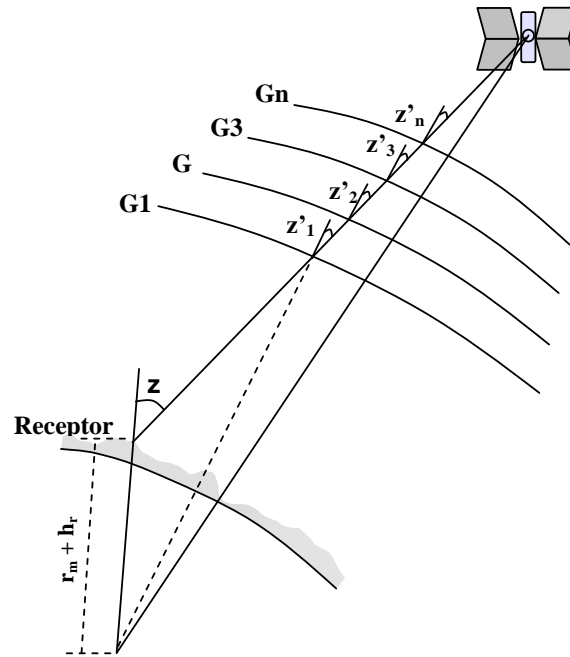


Figura 13 – Geometria para a decomposição do caminho ionosférico.

Assim, o atraso ionosférico vertical do ponto ionosférico observado, em uma dada subcamada (i) pode ser calculado por:

$$I_i^v = \text{fc}(i) \cos(z_i^{ts})_r I_r^s. \quad (79)$$

Nesta etapa são apresentados alguns experimentos realizados considerando o modelo de decomposição do caminho ionosférico proposto neste trabalho. Com relação ao termo referente a altitude geométrica do receptor (h_r) na equação 76, foi realizada análise considerando um receptor localizado a uma altitude geométrica de 1000 metros. No Brasil, tem-se várias estações de referência a uma altitude geométrica próxima dos 1000 metros, dentre estas cita-se a antena do receptor da estação BRAZ da RBMC/RIBaC que está à uma altitude de 1106,02 metros. A Figura 14 apresenta a diferença entre os valores da função de mapeamento sem considerar a altitude geométrica do receptor ($\text{sf}(h_{r0})$) e considerando a altitude ($\text{sf}(h_{r1000})$).

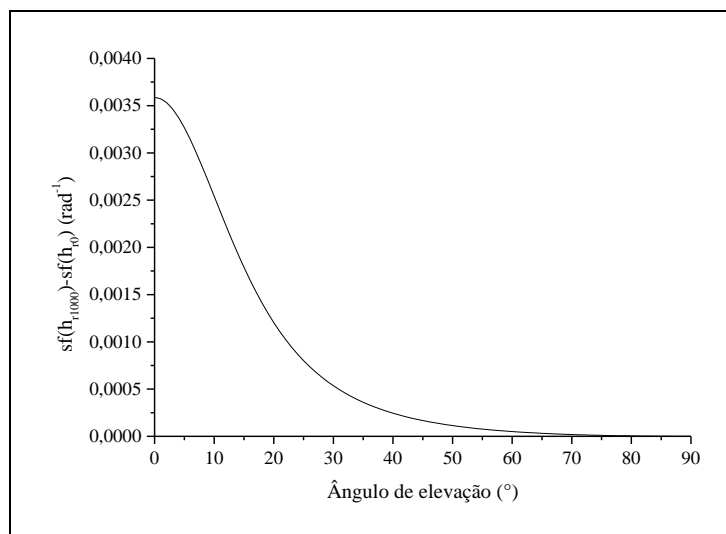


Figura 14 – Influência da altitude geométrica do receptor na função de mapeamento.

Na Figura 14 pode-se observar que a discrepância entre os valores é maior para ângulos de elevação menores. Para se ter uma idéia do impacto deste comportamento no cálculo do atraso ionosférico, foi realizada uma análise da projeção de um atraso ionosférico de 50 m na direção satélite/receptor para a vertical, e a projeção de um atraso de 16,2 m da vertical para a direção satélite/receptor, para um receptor a uma altitude h_r de 1000 m ($sf(h_{r1000})$) e também desconsiderando esta informação ($sf(h_{r0})$). Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 15.

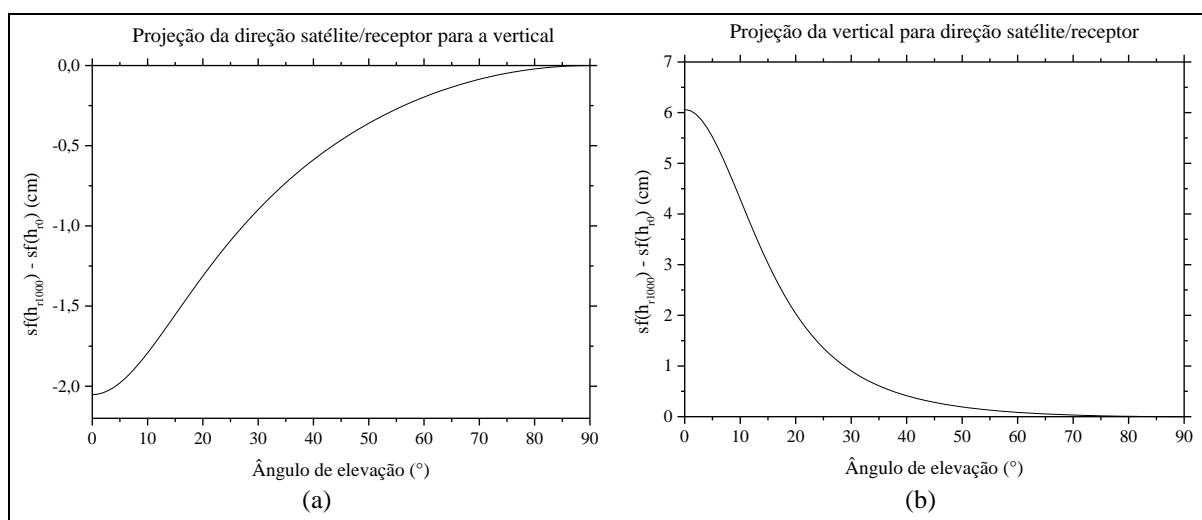


Figura 15 – Influência da altitude geométrica do receptor na projeção do atraso ionosférico observado.

Na Figura 15 (a) observa-se a influência da altitude do receptor no cálculo do atraso ionosférico vertical. Nesta figura, para um atraso ionosférico de 50 m há uma diferença,

aproximada, de 1,9 cm para satélites com ângulo elevação de 10° , e para satélites com ângulo de elevação de 30° esta diferença é de aproximadamente 1 cm. Este resultado mostra que é importante considerarmos a altitude geométrica do receptor na função de mapeamento, pois se considerarmos a medida do atraso ionosférico usando a combinação de observações de pseudodistância suavizada, o erro devido à esta aproximação pode ser maior do que a precisão da observação obtida. Além disto, os valores negativos do gráfico da Figura 15 (a), mostra uma superestimação dos valores de atraso ionosférico vertical, quando não se considera a altitude do receptor.

Já na Figura 15 (b) pode-se observar a influência da altitude do receptor na projeção do atraso ionosférico vertical para a direção satélite/receptor. Neste caso, foi considerado um atraso vertical de 16,2 m, que equivale a um atraso inclinado de 50 m. O gráfico b mostra que a diferença no atraso ionosférico calculado pode chegar a aproximadamente 5 cm, para satélites com ângulo de elevação de 10° , e 1 cm para satélites com ângulo de elevação de 30° . Os valores positivos do gráfico mostram que a uma subestimação dos valores de atraso ionosférico inclinado, quando não se considera a altitude do receptor.

Nos dois gráficos apresentados na Figura 15, também pode-se observar que o erro ao não considerar a altitude do receptor é maior para satélites com ângulo de elevação baixo, e este erro diminui para ângulos de elevação maiores. Estes resultados mostram que quando comparado à precisão, melhor do que 2 cm, das observações suavizadas pela fase da portadora, o erro cometido ao não se considerar a altitude do receptor é significativo. A magnitude deste erro varia em função de parâmetros como a altitude do receptor, ângulo de elevação do satélite e magnitude do atraso ionosférico a ser projetado.

Para a análise do modelo de decomposição da camada da ionosfera, inicialmente é apresentado o mapa do TEC considerando o modelo que considera a ionosfera como uma fina camada (Figura 16).

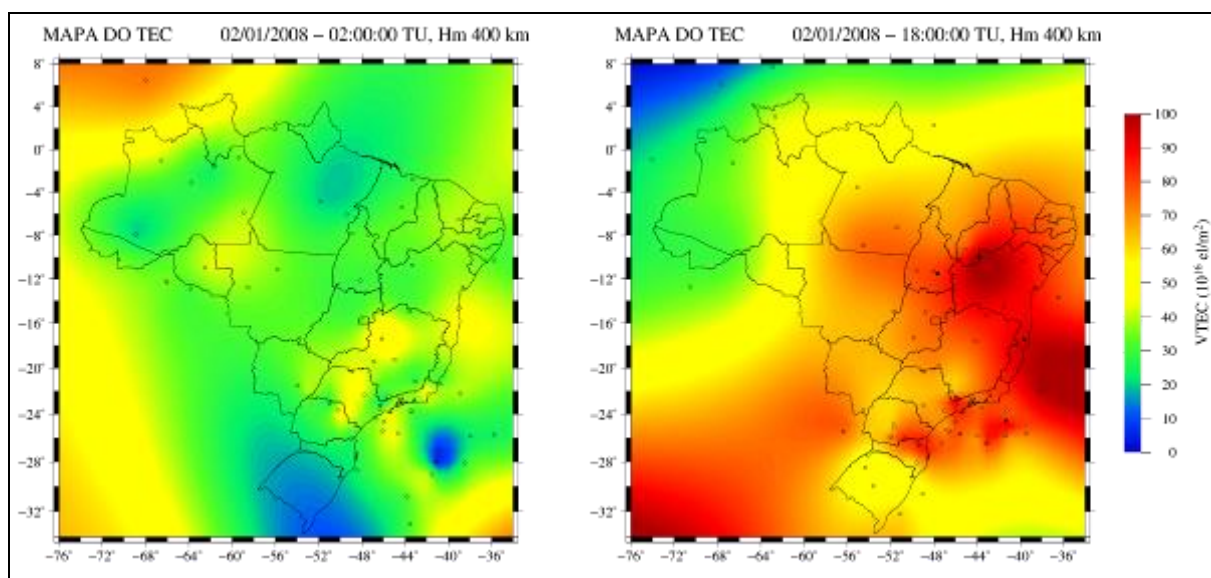


Figura 16 – Mapa de TEC a partir do modelo de fina camada da ionosfera.

Na Figura 16 são apresentados os mapas de TEC na ionosfera para as 2:00 e 18:00 TU, num dia de baixa atividade solar com índice F10.7 igual a 70 unidades de fluxo, também classificado como geomagneticamente calmo, com índice Dst médio de 4 nT. Estes mapas são resultados da integração da quantidade de TEC no caminho do sinal GPS, para uma fina camada a uma altura de 400 km.

Os resultados obtidos para o mesmo conjunto de dados, mas considerando a camada ionosférica decomposta em 4 subcamadas, podem ser verificados nos mapas das Figuras 17 e 18.

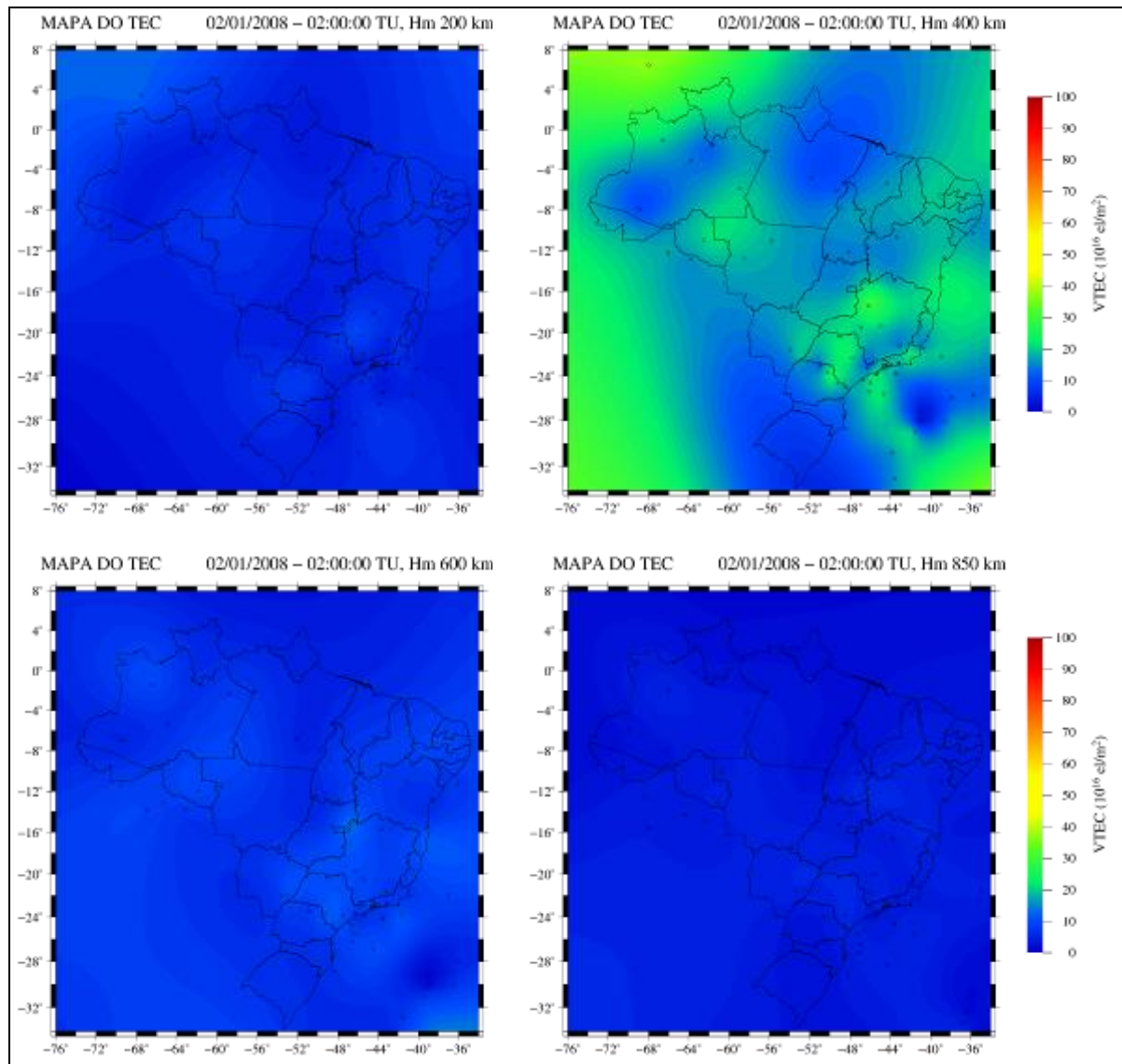


Figura 17 – Mapa de TEC a partir do modelo de decomposição do caminho ionosférico (02:00 TU).

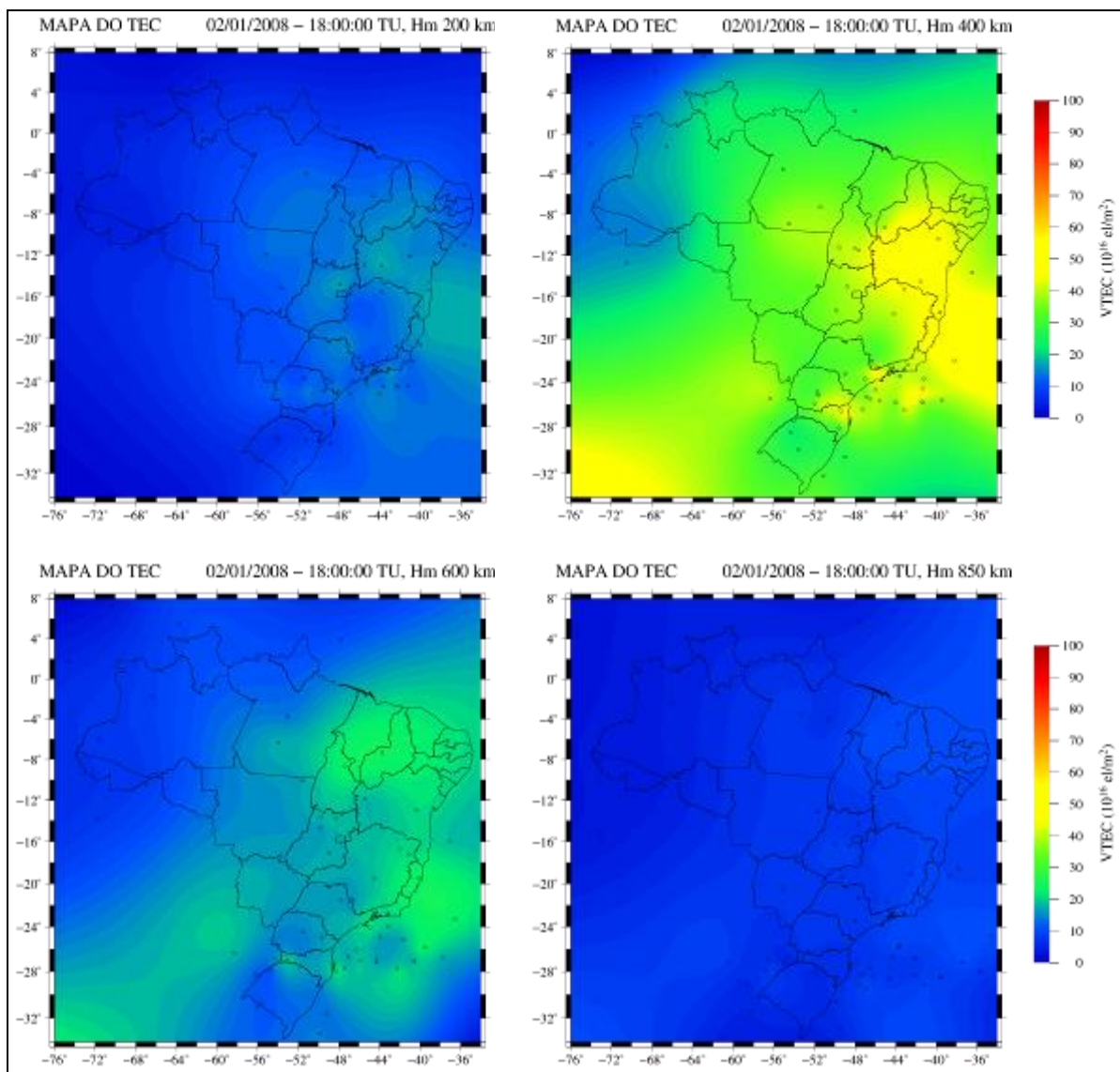


Figura 18 – Mapa de TEC a partir do modelo de decomposição do caminho ionosférico (18:00 TU).

As Figuras 17 e 18 mostram os mapas de TEC e os pontos ionosféricos observados às 2:00 e 18:00 TU, respectivamente. Deve salientar, que foram escolhidos estes horários (2:00 e 18:00 TU), pois nestes são observados altos gradientes espaciais e valores do VTEC, o que facilita a visualização das diferenças entre os mapas de VTEC para cada subcamada. Pelas figuras pode-se verificar que, neste experimento, a camada da ionosfera foi decomposta em quatro subcamadas com alturas médias de 200, 400, 600 e 850 km, conforme ilustrado na Figura 12. Aplicando-se o modelo de decomposição do caminho ionosférico foi possível calcular o atraso ionosférico decomposto em subcamadas com diferentes alturas. Nos mapas apresentados nas Figuras 17 e 18, pode-se verificar que o modelo proposto considera que a subcamada que apresenta a maior concentração de elétrons é aquela localizada a uma

altura média de 400 km, e a que apresenta menor concentração está numa altura média de 850 km. Nota-se ainda que o maior gradiente espacial da ionosfera ocorre na subcamada localizada à 400 km de altura, principalmente nos horários próximos à 18:00 TU (~ 15:00 Horas Local - HL), quando ocorre a anomalia equatorial.

Além dos fatores relacionados à densidade de elétrons em cada subcamada, nas Figuras 17 e 18 também pode ser observado que em cada subcamada o ponto ionosférico observado apresenta diferentes coordenadas de latitude e longitude. Esta característica do modelo de decomposição pode ser verificada numa amostra de pontos ionosféricos obtidos às 2:00 TU, conforme ilustrado na Figura 19.

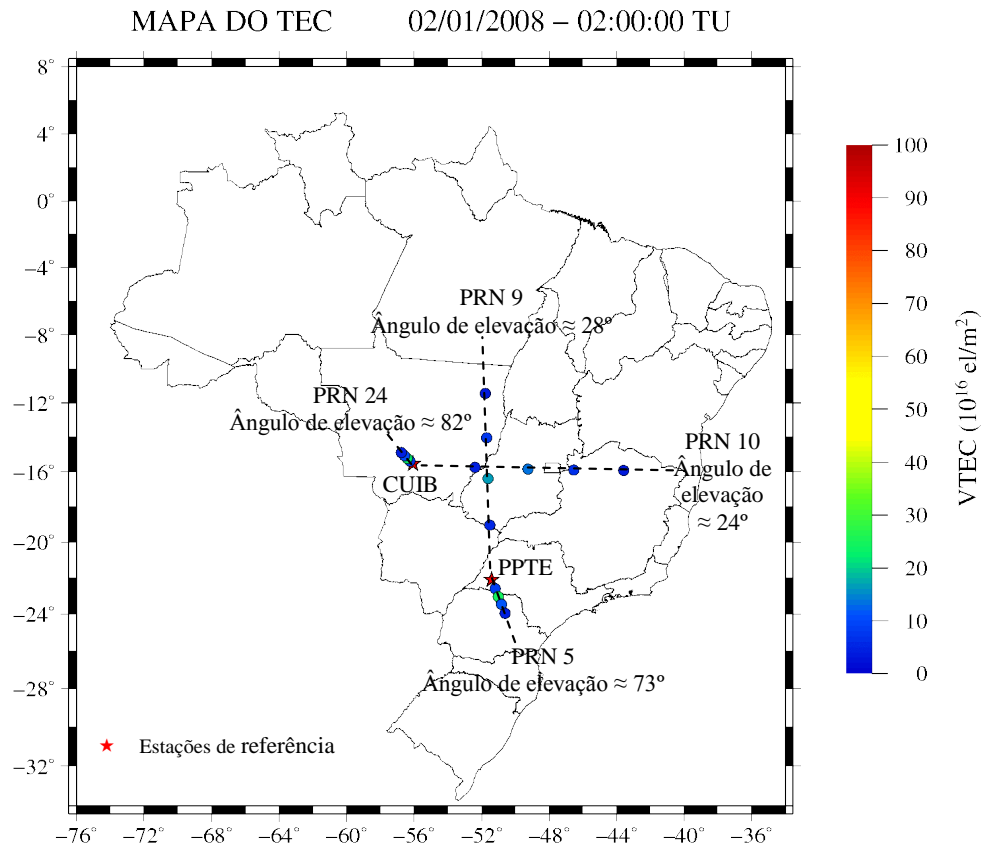


Figura 19 – Pontos ionosféricos observados em cada subcamada.

A Figura 19 mostra a posição dos pontos ionosféricos observados em cada subcamada, pelas estações PPTE e CUIB. Na figura, observa-se os satélites 5 e 9 rastreados pela estação PPTE e os satélites 10 e 24 rastreados pela estação CUIB. Para cada combinação receptor/satélite são medidos 4 pontos ionosféricos (1 ponto para cada subcamada). Para cada estação de referência, a figura apresenta um exemplo da localização dos pontos ionosféricos observados por satélites com baixo ângulo (CUIB/PRN10 $\cong 24^\circ$; PPTE/PRN9 $\cong 28^\circ$) e com

alto ângulo (CUIB/PRN24 \cong 82°; PPTE/PRN5 \cong 73°) de elevação. Observa-se ainda que para cada combinação receptor/satélite, o ponto ionosférico mais próximo da estação está localizado na primeira subcamada e o ponto mais distante está na quarta subcamada ionosférica.

Na Figura 19 pode-se verificar que no cálculo do atraso ionosférico para satélites com ângulos de elevação altos (PRNs 24 e 5) os resultados obtidos com a função de mapeamento, que considera toda a camada ionosférica como uma fina camada, não são afetados significativamente pelo gradiente espacial do TEC, pois, os sinais transmitidos pelos satélites atravessam a camada da ionosfera com um ângulo próximo ao zênite. Este fato pode ser verificado pelos pontos ionosféricos com coordenadas de latitude e longitude próximas, apesar de estarem em diferentes alturas. Quando o ângulo de elevação do satélite é baixo (PRNs 9 e 10), pode-se verificar que os pontos ionosféricos observados em diferentes camadas estão em regiões significativamente diferentes, tornando o modelo de simples camada da ionosfera limitado pelo gradiente espacial da ionosfera, principalmente em regiões de baixa latitude, como é o caso do Brasil e de outros países situados próximos ao equador ou em regiões de latitude baixa.

Considerando a necessidade de se saber mais sobre o impacto da função de mapeamento geométrica padrão sobre a modelagem da ionosfera, bem como o impacto do modelo de decomposição da ionosfera, seria interessante obter medidas da ionosfera o mais próximo possível da vertical. Para isto, foi realizada uma análise das órbitas dos satélites GPS que passam sobre o Brasil (Figura 20).

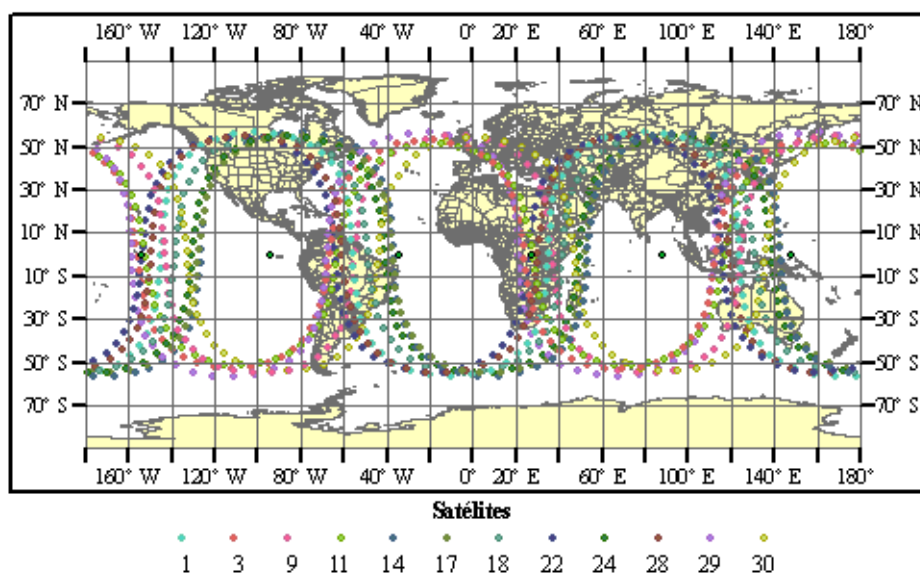


Figura 20 – Mapa da posição dos satélites em suas órbitas.

A Figura 20 mostra o trajeto dos satélites do GPS que passam sobre o Brasil. As posições destes satélites em suas órbitas foram obtidas a partir dos arquivos de efemérides precisas, disponibilizados pelo IGS. A Figura 21 mostra em detalhe a passagem destes satélites sobre o Brasil.

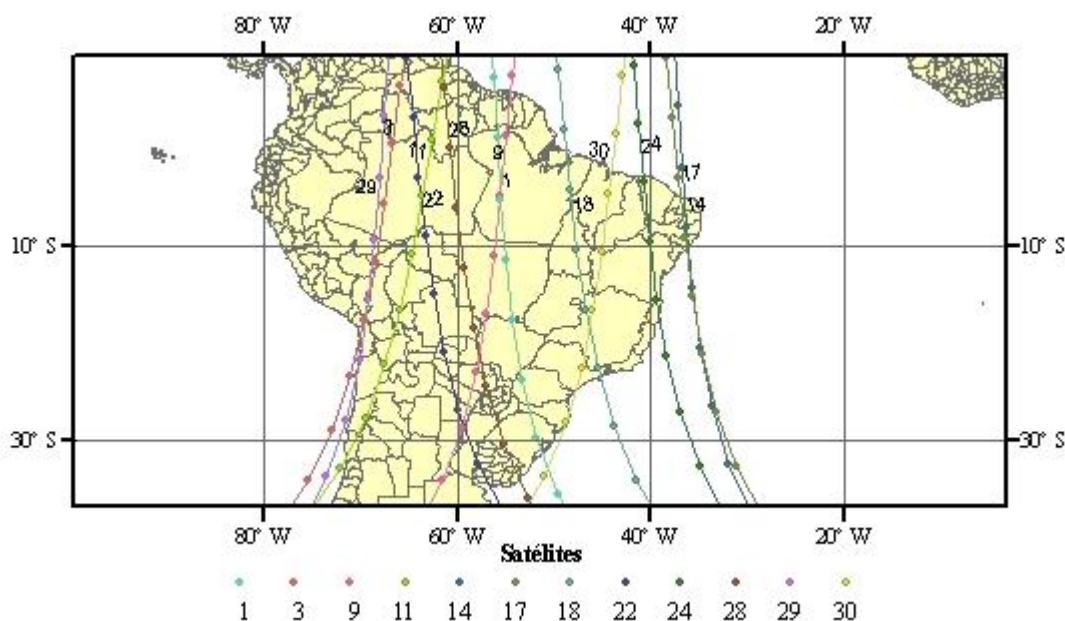


Figura 21 – Mapa da passagem dos satélites GPS sobre o Brasil.

Na Figura 21 apresenta o trajeto dos satélites em suas órbitas. Este tipo de análise é útil no planejamento para a instalação de estações de referência em locais estratégicos. No processo de densificação das redes ativas é importante considerar as órbitas dos satélites, principalmente, para aplicações em modelagem da ionosfera. A partir da Figura 21 é possível definir localizações estratégicas de novas estações de referência a serem implantadas no Brasil, para realizar estudos relacionados à modelagem da ionosfera, como por exemplo, realizar análises de funções de mapeamento usadas para projetar o atraso ionosférico na direção vertical.

Neste trabalho, sugere-se que algumas estações sejam implantadas sob o trajeto dos satélites, ou seja, estas estações devem estar o mais próximo possível da linha sobre a superfície terrestre, definida pela intersecção do plano orbital do satélite com esta superfície. Esta condição garante que, durante o rastreamento do satélite, em algum momento haverá um período de observação com o satélite próximo ao zênite do receptor. As observações realizadas neste período permitirão obter o atraso ionosférico com menor influência das funções de mapeamento. Além disto, será possível obter medidas diretas de atraso

ionosférico, praticamente na vertical. Estes valores de atraso ionosférico poderiam ser utilizados como injeções para melhorar o processo de modelagem da ionosfera e de estimação das tendências interfrequências.

No capítulo 6 também são apresentados alguns estudos realizados sobre a atual distribuição das redes ativas disponíveis no Brasil e a resolução espacial da grade ionosférica.

5.9 Cálculo do GIVE

Como pôde ser observado neste capítulo, os primeiros passos para gerar um modelo baseado em grade ionosférica é analisar os componentes de erros nas medidas do atraso ionosférico, de modo que os mesmos possam ser eliminados ou propagados de forma apropriada no processamento dos dados para se obter os limites de confiança da grade ionosférica.

Várias são as fontes de erros que afetam os valores de atraso ionosférico obtido. A fim de minimizar este problema foi proposta uma técnica de controle de qualidade aplicado por arco de satélite, conforme descrito na seção 5.7.

A calibração da tendência interfrequência (IFB) dos satélites e dos receptores deve ser realizada, pois estes parâmetros afetam diretamente a acurácia das estimativas do atraso ionosférico. O processo de calibração também inclui o ruído do processo de estimação. Assim, a confiança da IFB calibrada é propagada para o GIVE e é obtida a partir do resíduo do processo de estimação da IFB.

Assim, o cálculo do GIVE será realizado pelo processo de propagação de erros que resultará no vetor das variâncias dos valores de atraso ionosférico, estimados para cada IGP. No primeiro passo, para o processo de propagação de erros será utilizada a equação 40, apresentada por Chao (1997):

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_{PS}^2 + \sigma_{IFB}^2}{sf(el)^2} [1 + 0,3e^{-(el/40)^2}].$$

Observa-se nesta equação que a função de mapeamento na direção vertical, também é considerada. Para as diversas camadas, basta substituir a equação 20 pela equação

76. O cálculo do GIVE é realizado então considerando a variância da i -ésima observação de atraso ionosférico, conforme foi apresentado na equação 36:

$$\text{GIVE} = 3,29 / \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \right), \quad \text{para } 99,9\%.$$

Ao se considerar a simplificação da ionosfera como uma fina camada também são introduzidos erros, cuja magnitude depende do gradiente da ionosfera. Quanto maior for o gradiente da ionosfera maior será o erro, pois a função de mapeamento não considera este fator. Assim, com o intuito de minimizar o impacto desta simplificação, foi proposto uma decomposição da camada ionosférica e gerar grades ionosféricas em diferentes altitudes (seção 5.8). Assim, ao aplicar a propagação de erros considerando a decomposição da camada ionosférica, tem-se que a variância do atraso ionosférico observado na j -ésima (σ_j^2) subcamada é dado por:

$$(\sigma_i^2)_j = f c_j^2 \sigma_i^2 \quad (80)$$

onde $f c_j$ é o fator de contribuição da j -ésima subcamada, conforme apresentado na Tabela 7.

Outra alteração proposta neste trabalho é considerar o gradiente espacial da ionosfera no processo de calculo do GIVE. Assim, os valores da variância do ponto observado $(\sigma_i^2)_j$ podem ser projetados, considerando a decorrelação espacial, no processo de estimação da variância do IGP. Este fator de degradação deve então considerar a distância dos pontos ionosféricos utilizados no processo de estimação do atraso ionosférico do IGP, bem como considerar um fator de gradiente espacial do TEC o qual permite obter um indicativo da decorrelação espacial dos dados. Assim, tem-se que o modelo estocástico pode sofrer um relaxamento aplicando a seguinte relação (CHAO, 1997):

$$\varepsilon_j^2 = \frac{(\sigma_i^2)_j}{\Delta}, \quad (81)$$

com,

$$\Delta = [(a_1 dx)^2 + (a_2 dy)^2]^{1/2}, \quad (82)$$

onde os coeficientes a_1 e a_2 representam o gradiente espacial da ionosfera, respectivamente, nas direções x e y . Estes coeficientes podem ser obtidos por meio do ajuste de um polinômio considerando todas as observações circunvizinhas ao IGP. Os termos dx e dy , na equação 80, representam as distâncias entre os pontos ionosféricos observados e o IGP.

Assim, tem-se que a confiança, do atraso ionosférico vertical, estimada para cada IGP é dada por:

$$\text{GIVE} = 3,29 / \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\varepsilon_j^2} \right), \quad \text{para } 99,9\% . \quad (83)$$

6 ANÁLISE DO IMPACTO DA DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA NA GI

Durante o desenvolvimento deste trabalho, notou-se a importância de se ter um parâmetro referente ao impacto da distribuição da rede de estações sobre os resultados obtidos com a GI. Para a execução deste tipo de análise foi desenvolvido um aplicativo denominado GS (*Grid Simulator* – Simulador de Grade).

6.1 Aplicativo GS (*Grid Simulator*)

Para o desenvolvimento do GS partiu-se do pressuposto que se conhecem as coordenadas das estações de referência, bem como as coordenadas dos satélites GPS, obtidas das efemérides precisas do IGS.

Tendo em vista que os satélites possuem órbitas com planos fixos, logo, a trajetória diária do satélite terá variações insignificantes para a análise a ser realizada. Assim, a partir das posições dos receptores e dos satélites é possível fazer uma predição diária das posições dos pontos ionosféricos na grade ionosférica.

O GS é um aplicativo desenvolvido em linguagem Fortran 95, usando o método de programação orientado a objeto. Este aplicativo é composto por 6 classes de objetos, responsáveis por processos como:

- ✓ leitura de arquivos de efemérides precisas e leitura das coordenadas das estações de referência;
- ✓ cálculo das posições dos satélites em intervalos de tempo pré definidos;
- ✓ cálculo das coordenadas (latitude e longitude) dos pontos ionosféricos;
- ✓ conversão do sistema de coordenadas da grade para um sistema de células (pixel) georreferenciadas;
- ✓ varredura da incidência de pontos ionosféricos preditos sobre cada célula e contagem da densidade de pontos sobre a mesma; e

✓ análise estatística.

Juntamente com o GS são utilizados dois aplicativos de distribuição gratuita, o GMT (*Generic Map Tools*), disponível em <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, e o *Image Magick*, disponível em <http://www.imagemagick.org/>. O GMT é um pacote de software que permite gerar mapas, no formato *Postscript* com alta qualidade, e em diversas projeções. O *ImageMagick* é uma suíte de aplicativos utilizado para criar, editar ou compor imagens. Assim, o GS também é composto por bibliotecas do GMT e do *ImageMagick*.

Neste trabalho o aplicativo GS é responsável pela análise da distribuição das estações de referência. Em seguida é gerada a base cartográfica digital contendo as informações de densidade da grade utilizando bibliotecas do GMT. Finalmente é utilizada uma biblioteca do *ImageMagick*, que permite a conversão do formato *Postscript* para outros formatos, como por exemplo o GIF, e assim é possível gerar a visualização dos dados em um formato comumente utilizado. A Figura 22 mostra fluxograma do processo realizado pelo GS.

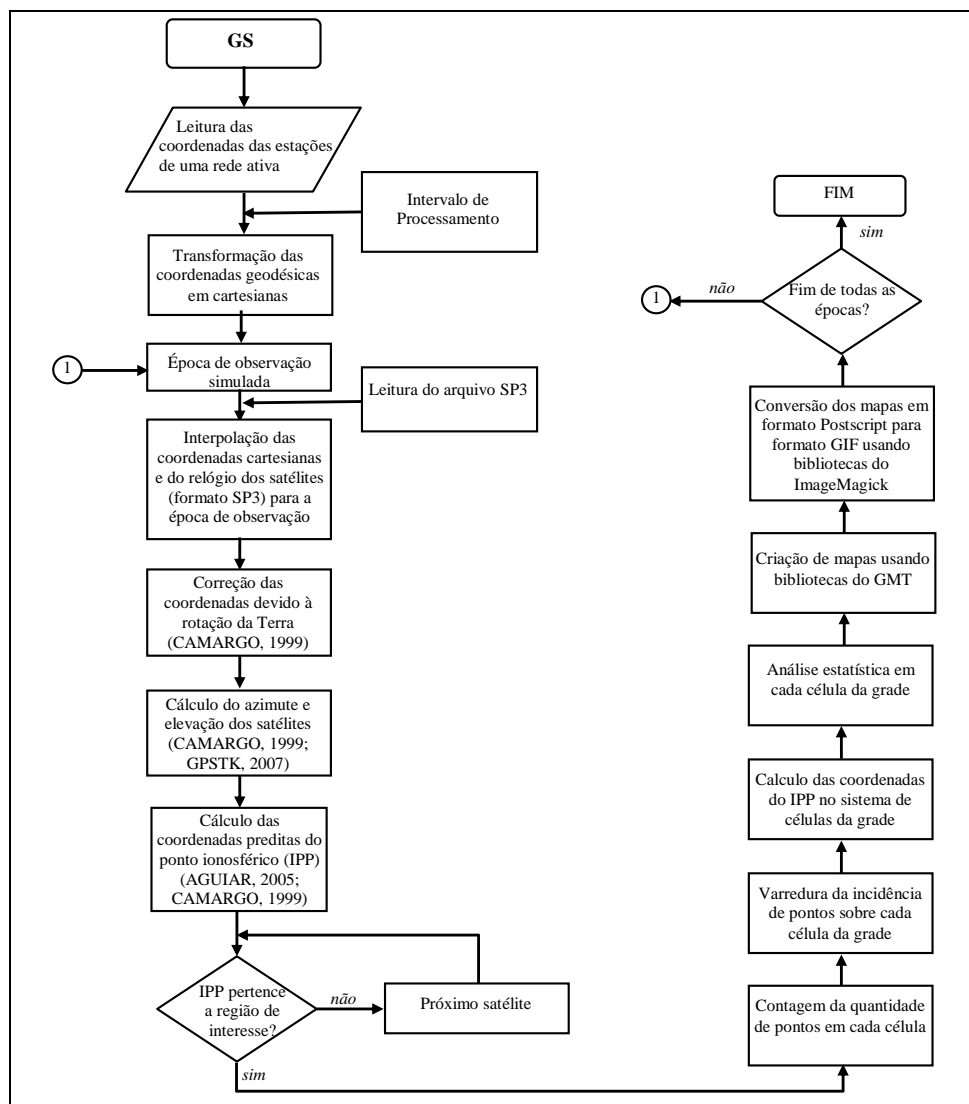


Figura 22 – Fluxograma do aplicativo GS.

É importante salientar que a interpolação, para a época de interesse, das coordenadas cartesianas e do relógio dos satélites, é realizada utilizando subrotinas do GAS (*GPS Analysis Software*), o qual está disponível na Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT/UNESP (STEWART; FFOULKES-JONES; OCHIENG, 1994).

Para a simulação dos pontos ionosféricos observados, utilizados para a geração da grade, foram simuladas observações com intervalo de 15 segundos, ângulo de elevação acima de 15° e grades com resoluções de 1°x1°, 2,5°x 2,5° e 5°x5°. Foi considerada a grade em uma altura média de 400 km.

Para a simulação foram experimentadas cinco configurações diferentes de redes, a partir das redes ativas disponíveis no Brasil. Portanto, considerando as três resoluções de grade e as cinco possibilidades de configuração da rede, neste experimento foram analisadas quinze combinações (Tabela 8) para a simulação da grade ionosférica.

Tabela 8 – Resumo dos processamentos para análise da densidade de redes ativas disponíveis no Brasil.

| Rede de Referência | Qtde de Estações | Resolução da Grade |
|--------------------------------------|------------------|--------------------|
| RBMC/RIBaC | 60 | 1° x 1° |
| | | 2,5° x 2,5° |
| | | 5° x 5° |
| RBMC-IP Tempo Real | 22 | 1° x 1° |
| | | 2,5° x 2,5° |
| | | 5° x 5° |
| REDE GNSS SP Tempo Real | 7 | 1° x 1° |
| | | 2,5° x 2,5° |
| | | 5° x 5° |
| REDE GNSS SP e RBMC-IP Tempo Real | 29 | 1° x 1° |
| | | 2,5° x 2,5° |
| | | 5° x 5° |
| REDE GNSS SP Tempo Real e RBMC/RIBaC | 67 | 1° x 1° |
| | | 2,5° x 2,5° |
| | | 5° x 5° |

6.2 Predição para processamento de dados *off-line*

No processamento da RBMC/RIBaC foram utilizadas 60 estações de referência, incluindo aquelas que fornecem dados em tempo real e aquelas cujos dados são obtidos após o fechamento de um lote de 24 horas de observação. Os resultados deste processo são apresentados nos gráficos da Figura 23.

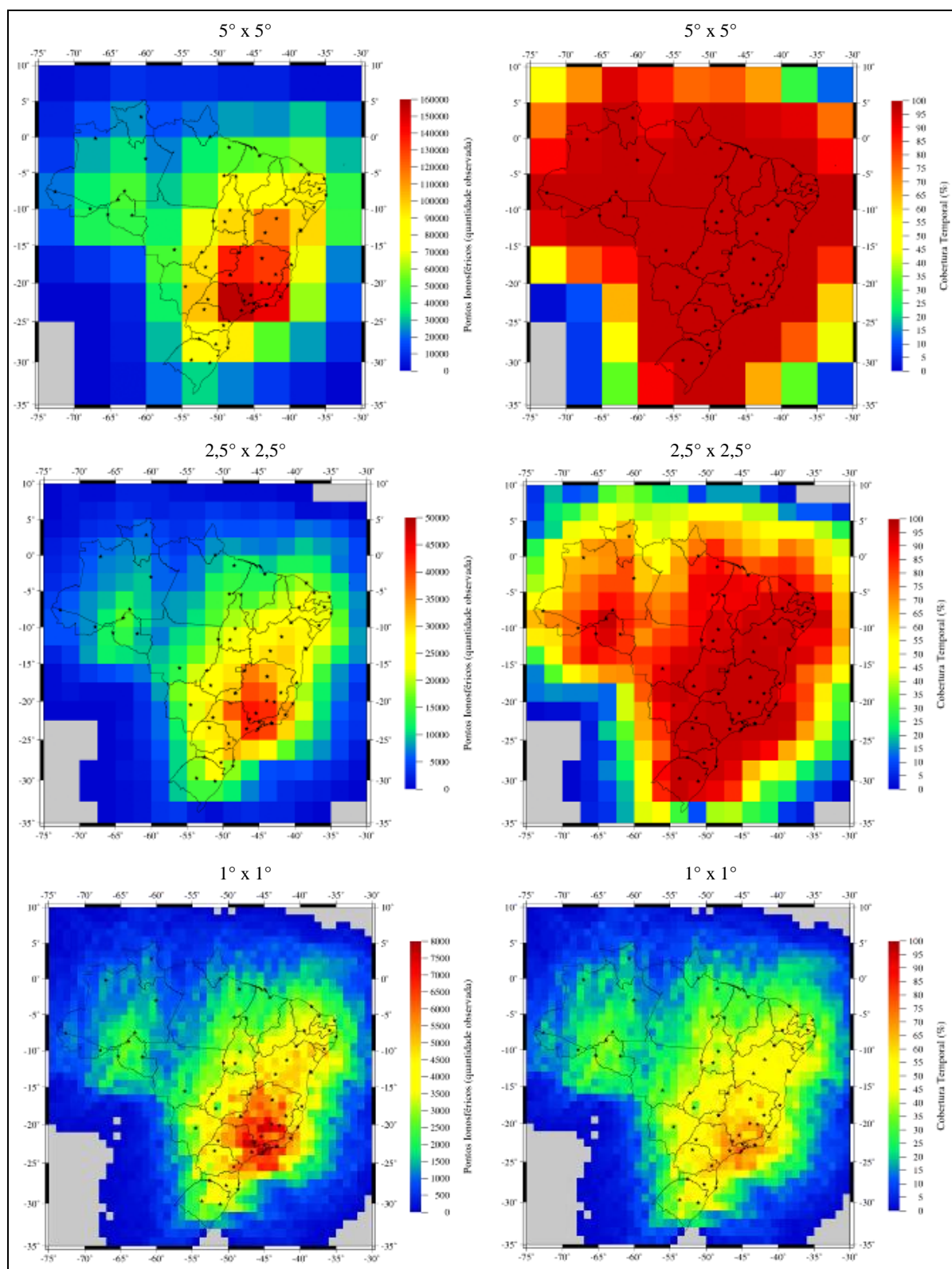


Figura 23 – Impacto da distribuição das estações da RBMC/RIBaC sobre a grade ionosférica.

Na Figura 23, os gráficos do lado esquerdo mostram a quantidade de pontos ionosféricos incidentes em cada célula da grade, em um período de 24 horas. Os gráficos do lado direito mostram a cobertura temporal de cada célula da grade, ou seja, mostra o período

em que há pelo menos um ponto ionosférico incidente em cada célula, para o período de 24 horas. Os gráficos localizados na parte superior da figura mostram a análise para uma grade com espaçamento de 5° em latitude e 5° em longitude, na parte central são apresentados os resultados para grade com espaçamento de $2,5^\circ$ em latitude e $2,5^\circ$ em longitude, e finalmente na parte inferior da figura são apresentados os resultados para a grade com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$. Este padrão de figura também será adotado para as análises subsequentes. Os pixels em tons de cinza mostram células da grade onde não há disponibilidade de dados.

Observando-se os gráficos do lado esquerdo da Figura 23 nota-se que um maior número de pontos ionosféricos estarão disponíveis na região sudeste do país, em uma latitude geomagnética média de $-19,0^\circ$, onde a RBMC/RIBaC é mais densa. Verifica-se ainda que a densidade de pontos ionosféricos diminui consideravelmente a medida que se afasta para as outras regiões do país, principalmente na região norte onde a rede apresenta poucas estações e esta situação torna-se mais crítica com o aumento da resolução espacial da grade. Este problema na região norte deverá ser amenizado com a expansão da RBMC/RIBaC.

Os gráficos da quantidade de pontos ionosféricos a serem utilizados no cálculo do IGP, não dão idéia da disponibilidade temporal de pontos observados em cada célula. Este é um fator importante para minimizar o vetor dos resíduos em cada IGP estimado, tendo em vista que se houver, em cada época, pelo menos uma observação próxima do IGP, esta observação será altamente correlacionada com o mesmo, considerando um certo raio com baixo gradiente espacial.

Logo, a análise da disponibilidade temporal dos dados é apresentada nos gráficos do lado direito da Figura 23. Nestes gráficos, para uma grade de $5^\circ \times 5^\circ$, nota-se que quase todas as células que cobrem o Brasil terá pelo menos um ponto ionosférico observado em mais de 98% do tempo, ou seja, dentro de um período de 24 horas a célula da grade terá pelo menos um ponto a ser observado na vizinhança durante aproximadamente 23,5 horas.

Observa-se ainda que com o aumento da resolução espacial da grade esta disponibilidade temporal diminui gradativamente, chegando a aproximadamente 70%, na melhor situação, em algumas células numa grade de $1^\circ \times 1^\circ$. Isto significa que das 24 horas de observação, em apenas 16,8 horas (melhor situação) haverá pelo menos um ponto ionosférico observado nas proximidades do IGP. Nas regiões de pior desempenho, a cobertura temporal chega a valores menores que 5%, ou seja, um período de observação de aproximadamente 1,20 horas. Para a grade de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, o período de disponibilidade varia de aproximadamente 40% (9,6 horas) à 97% (23,2 horas).

Dos resultados apresentados na Figura 23, pode-se concluir que utilizando as 60 estações da RBMC/RIBaC pode-se obter uma cobertura temporal em torno de 98% em quase todo o território nacional, quando se utiliza uma grade com resolução de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$. Ao se utilizar uma grade de $2,5^{\circ}$ de resolução espacial, tem-se uma cobertura temporal em torno de 97% em uma parte reduzida do território nacional e maior parte tem uma cobertura acima de 70%. Para a resolução espacial de 1° apenas uma pequena área na região sudeste do país é coberta durante 70% do tempo.

Também se conclui que para a configuração atual da RBMC/RIBaC, a disponibilidade de dados seria garantida em aproximadamente 98% do período de processamento, em quase todo território nacional, utilizando-se uma grade com resolução espacial de 5° . No entanto, esta resolução pode ser um fator limitante na acurácia dos valores do atraso ionosférico dos IGP's devido ao gradiente ionosférico espacial.

Foi realizado também o processamento considerando as estações da RBMC/RIBaC e da REDE GNSS SP, simultaneamente, cujos resultados são apresentados nos gráficos da Figura 24.

Observando-se os gráficos do lado esquerdo da Figura 24 nota-se que houve um aumento na quantidade de pontos ionosféricos que estarão disponíveis na região sudeste do país. Este aumento é consequência da densidade de estações da RBMC/RIBaC em conjunto com as estações da REDE GNSS SP.

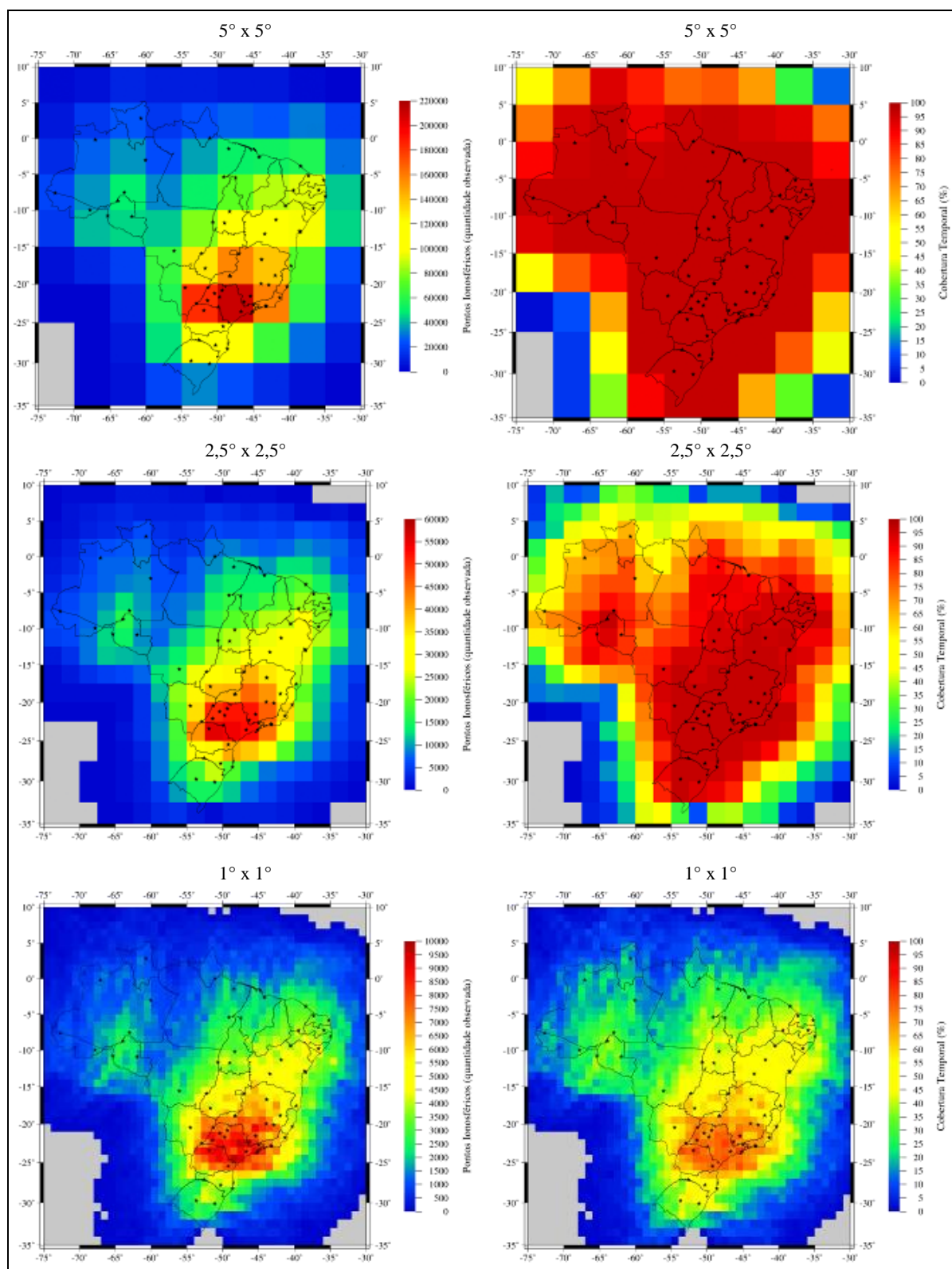


Figura 24 – Impacto da distribuição das estações da RBMC/RIBaC e REDE GNSS SP sobre a grade ionosférica.

Com relação a disponibilidade temporal de pontos observados em cada célula, pode-se verificar nos gráficos do lado direito da Figura 24, que esta disponibilidade tem um aumento médio, em relação à Figura 23, em torno de 0,5%, somente na região sudeste, para a

grade com resolução de 5° . Este pequeno aumento parece ser insignificante, mas já é uma grande contribuição rumo aos 100% de cobertura temporal, pois com a inserção das estações da REDE GNSS SP a cobertura temporal média passou de 98% para 98,5%, em algumas áreas na região sudeste.

Para a grade de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, o período de disponibilidade aumenta de 97% para 97,5% em algumas células sobre a região sudeste, e observa-se ainda que há um aumento de células com cobertura temporal acima de 95%.

Com o aumento da resolução espacial da grade para 1° , torna-se facilmente perceptível a influência positiva da inserção das estações da REDE GNSS SP no processamento. Observa-se que em algumas células a disponibilidade temporal de pontos ionosféricos passou de 70% para 80%, ou seja, de 16,8 horas para 19,2 horas de cobertura temporal. Além disto, pode-se verificar um aumento significativo de células na região sudeste com cobertura temporal média de 70%, quando comparado com os gráficos da Figura 23.

Dos resultados apresentados nas Figuras 23 e 24, pode-se concluir que, considerando a configuração atual das redes disponíveis no Brasil, a densificação da rede de referência terá maior impacto quando se utilizam grades ionosféricas com resolução espacial maior do que $2,5^\circ$.

6.3 Predição para processamento de dados *on-line*

Nesta etapa do experimento foi realizado o processamento simulando os pontos ionosféricos observados em tempo real, utilizando 7 estações que compõem a REDE GNSS SP e as 22 estações da rede RBMC-IP que fornecem dados em tempo real.

Foram realizados três processamentos: considerando apenas as estações da REDE GNSS SP (Figura 25); considerando apenas as estações da RBMC-IP em tempo real (Figura 26); e considerando as estações das duas redes (Figura 27).

Nos gráficos da Figura 25, pode-se verificar a região de influência das estações que compõem a REDE GNSS SP. Pelos gráficos do lado esquerdo da Figura 25 nota-se que uma quantidade maior de pontos estarão disponíveis na região sudeste do país, numa latitude geomagnética média de $-13,0^\circ$, onde a REDE GNSS SP tem maior impacto. Comparando este resultado com aquele observado na Figura 23, onde a maior influência da RBMC/RIBaC está na latitude geomagnética média de $-19,0^\circ$, pode-se concluir que no modo de processamento

off-line usando a REDE GNSS SP e a RBMC/RIBaC a área de maior cobertura destas será entre as latitudes geomagnéticas de $-13,0^{\circ}$ a $-19,0^{\circ}$, permitindo deste modo uma maior cobertura, na região sudeste, do pico sul da anomalia equatorial. A descrição da anomalia equatorial pode ser encontrada em Fedrizzi (2003), Matsuoka (2007), Rodrigues (2003), entre outros.

Verifica-se ainda que a densidade de pontos ionosféricos diminui consideravelmente fora da região sudeste e que a REDE GNSS SP contribui com a observação de pontos ionosféricos em várias regiões do país.

A análise da disponibilidade temporal dos dados é apresentada nos gráficos do lado direito da Figura 25. Nestes gráficos, para uma grade de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, nota-se que quase todo o estado de São Paulo e metade do estado do Paraná terão pelo menos um ponto ionosférico observado em mais de 98% das vezes, ou seja, dentro de um período de 24 horas a célula da grade terá pelo menos um ponto a ser observado na vizinhança durante aproximadamente 23,5 horas.

Para a grade de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, o período de disponibilidade varia de aproximadamente 5% (1,2 horas) à 93% (22,3 horas). Observa-se ainda que com o aumento da resolução espacial da grade a disponibilidade temporal diminui gradativamente, chegando a aproximadamente 60%, na melhor situação, em algumas células na grade de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Isto significa que das 24 horas de observação, em apenas 14,4 horas haverá pelo menos um ponto ionosférico observado nas proximidades do IGP. Nas regiões de pior desempenho, a cobertura temporal chega a valores menores que 5%, ou seja, um período de observação menor do que aproximadamente 1,2 horas.

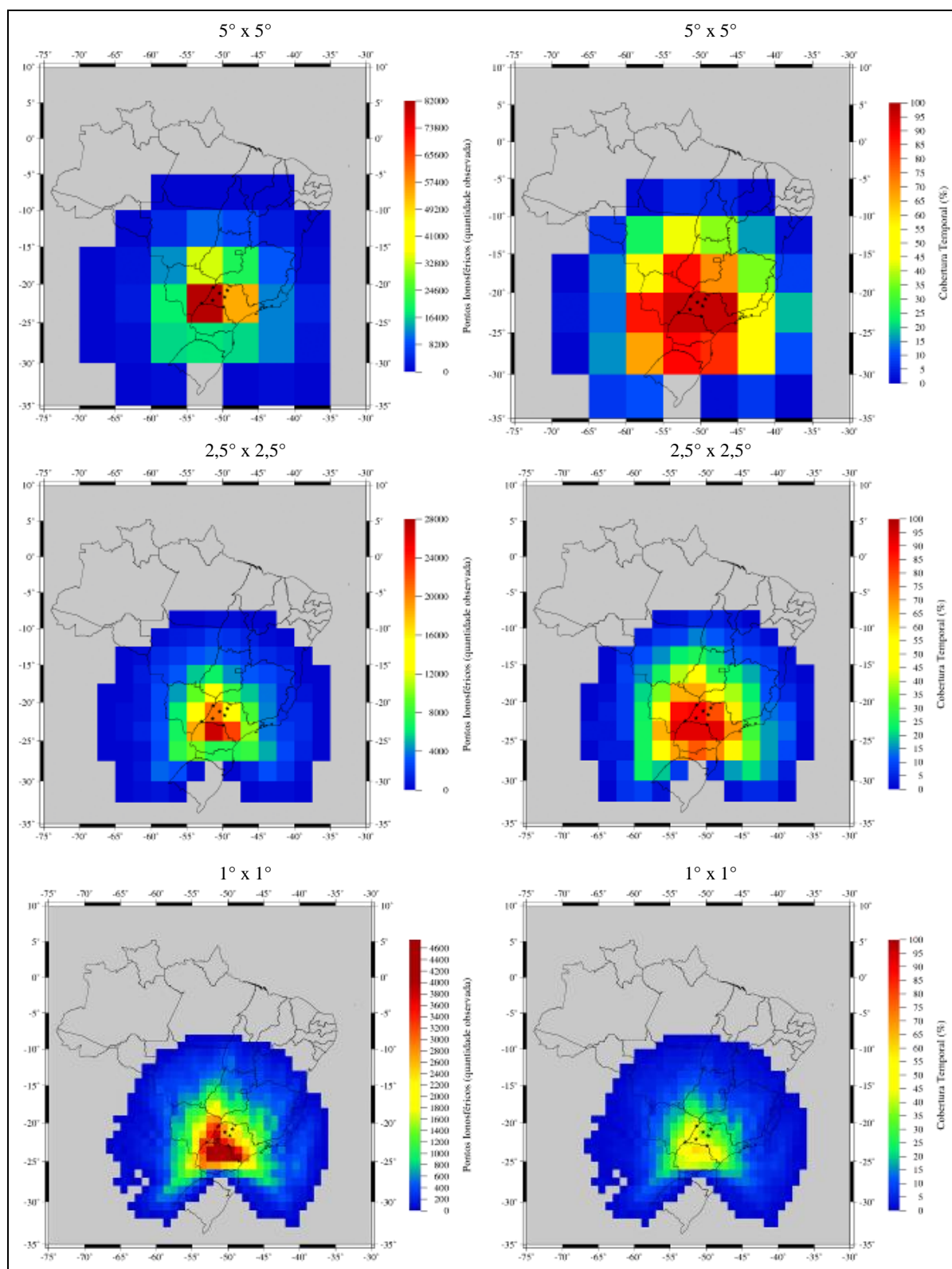


Figura 25 – Impacto da distribuição das estações da REDE GNSS SP sobre a grade ionosférica.

Dos resultados apresentados na Figura 25, pode-se dizer que para uma grade ionosférica de 5° de resolução espacial, obtém-se uma disponibilidade temporal de dados de aproximadamente 98%, no estado de São Paulo. Entretanto, para grades com resolução

espacial maior, a densidade da REDE GNSS SP não é suficiente para uma cobertura temporal de 24 horas sobre o estado de São Paulo. De modo geral, estes resultados mostram a importância da REDE GNSS SP na modelagem da ionosfera sobre sua circunvizinhança.

A Figura 26 mostra os resultados obtidos com a simulação utilizando apenas as estações da RBMC-IP, que disponibilizam dados em tempo real. Nos gráficos da Figura 26, pode-se verificar que a composição atual da RBMC-IP em tempo real permite realizar observações de pontos ionosféricos sobre todo o território nacional, principalmente ao leste da região sudeste, devido à presença de um número maior de estações.

Com relação à disponibilidade temporal dos dados, na Figura 26 verifica-se que, para uma grade de 5° de resolução espacial, quase toda a região brasileira terá um ponto ionosférico observado em 95% das vezes, o que equivale a 22,8 horas de observação.

Para a grade de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, o período de disponibilidade varia de aproximadamente 25% (6 horas), no pior caso, a 95% (22,8 horas), na melhor situação. Observa-se ainda que aproximadamente 70% da região brasileira tem uma cobertura temporal entre aproximadamente 50% e 80% do tempo.

Com relação à grade de 1° de resolução espacial, nota-se que a célula com melhor cobertura temporal de dados apresenta um período de observação de aproximadamente 50%, ou seja, nesta célula haverá no mínimo um ponto ionosférico observado durante aproximadamente 12 horas. Nas demais células da grade, que cobrem a região brasileira, a disponibilidade temporal dos dados varia entre, aproximadamente, 3% e 48%.

Dos resultados apresentados na Figura 26, pode-se concluir que as estações da RBMC-IP permitirão uma melhor cobertura temporal de dados para a geração da GI em tempo real, utilizando uma grade ionosférica de $5^\circ \times 5^\circ$. No entanto, estudos futuros devem ser realizados para verificar o quanto o gradiente espacial da ionosfera irá degradar a acurácia da GI.

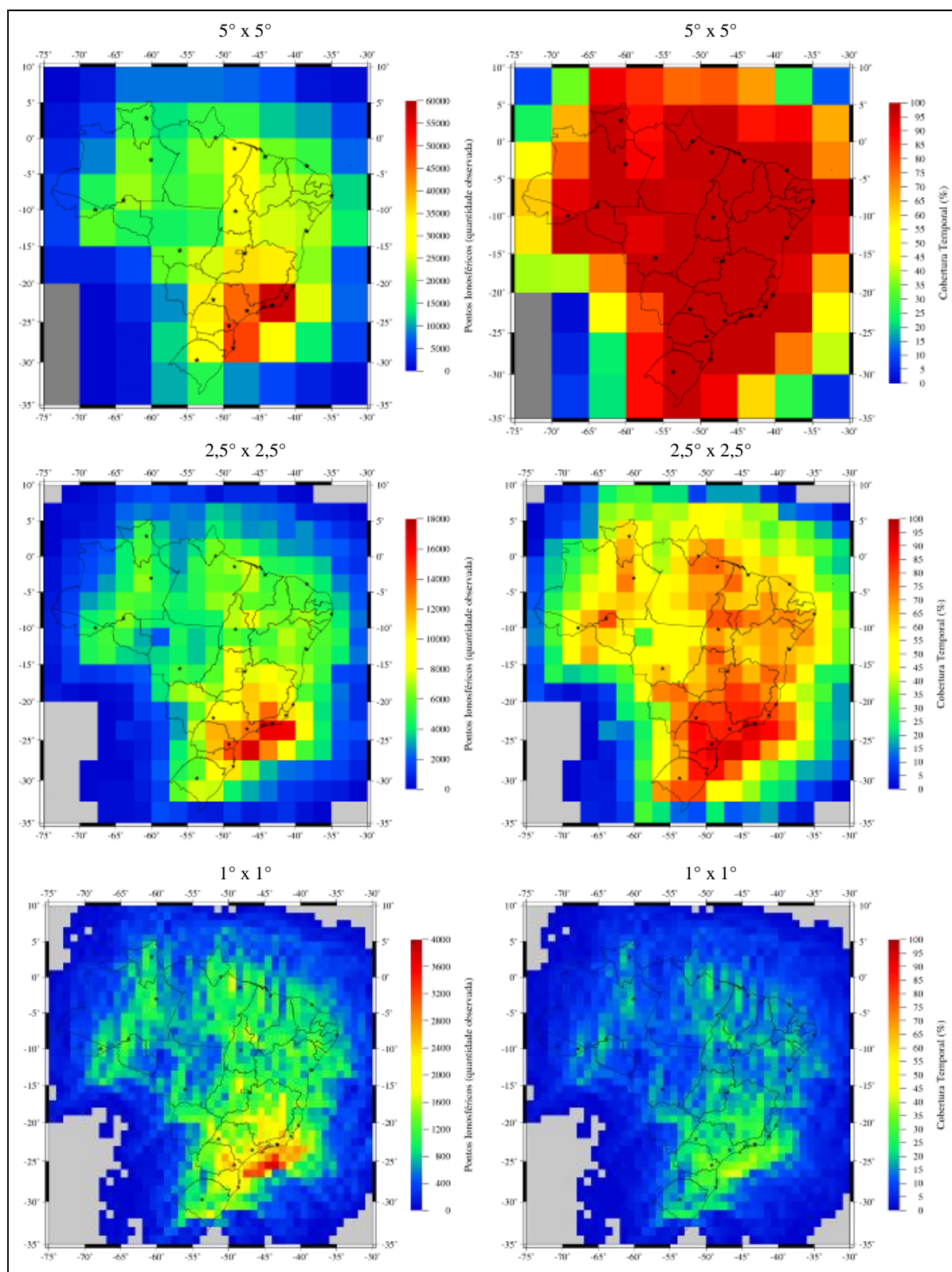


Figura 26 – Impacto da distribuição das estações da RBMC-IP sobre a grade ionosférica.

Finalmente, a Figura 27 mostra os resultados obtidos para a simulação utilizando um combinado das estações em tempo real da RBMC-IP e da REDE GNSS SP, num total de 29 estações.

Nos gráficos do lado esquerdo da Figura 27 observa-se o aumento na quantidade de pontos ionosféricos que serão observados no período de 24 horas, principalmente na região sudeste, devido à atual configuração de ambas as redes. Já nos gráficos do lado direito da mesma figura, para uma grade ionosférica de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, quase toda a região brasileira terá um ponto ionosférico observado em 95% do tempo, e na região sob influência da REDE GNSS SP esta cobertura chega a aproximadamente 98% do tempo.

Para a grade de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$, o período de disponibilidade varia de aproximadamente 25% (6 horas), no pior caso, a 97% (23,3 horas), na melhor situação. Observa-se ainda que teve um aumento das regiões com cobertura temporal de dados entre 80% e 95%.

Na grade com resolução espacial de 1° , a célula com melhor cobertura temporal de pontos ionosféricos apresenta um período de observação de aproximadamente 67% do tempo, ou seja, nesta célula haverá no mínimo um ponto ionosférico observado durante 16 horas. Nas demais células da grade, que cobrem a região brasileira, a disponibilidade temporal dos dados varia entre, aproximadamente, 3% e 50%.

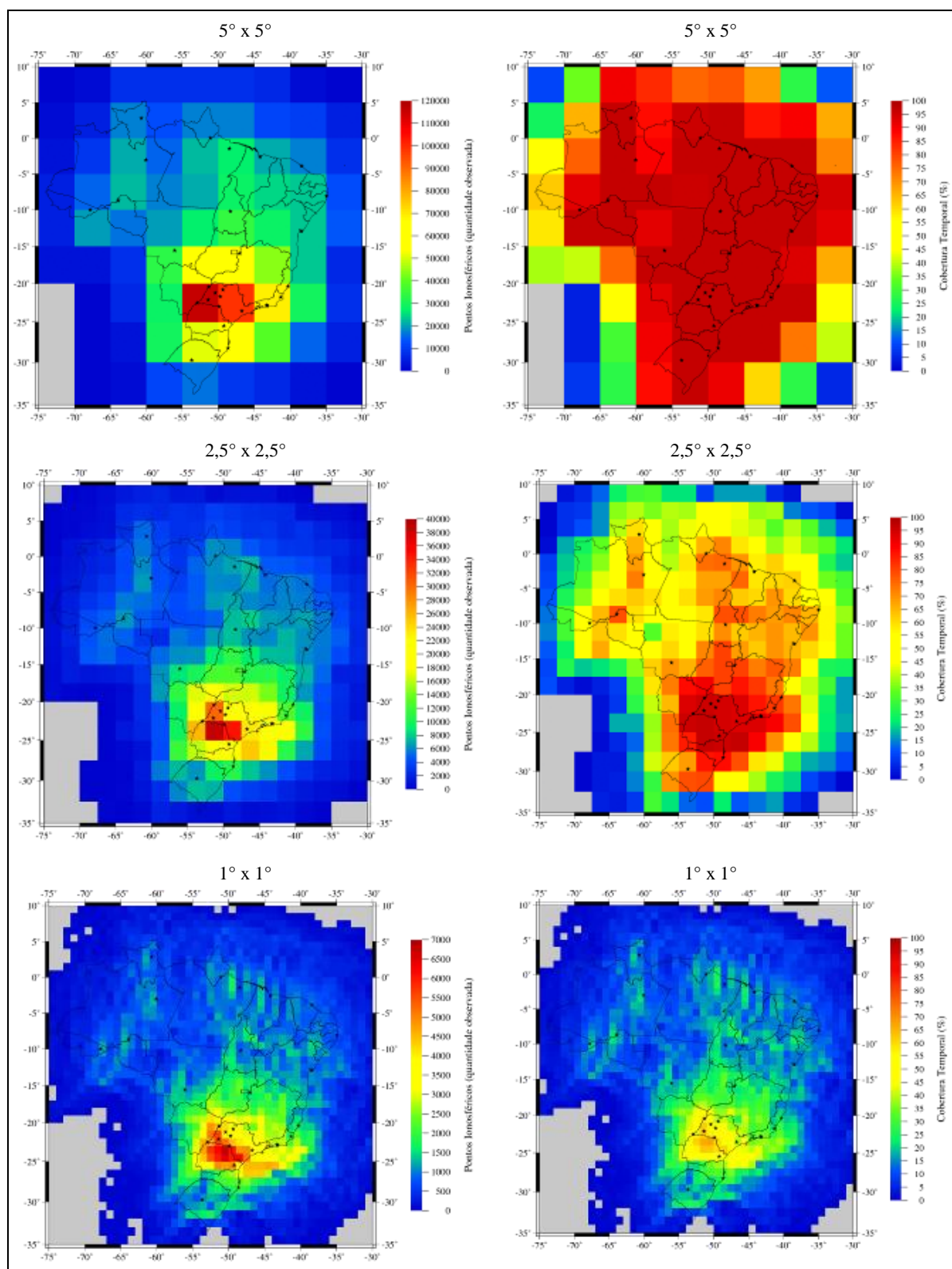


Figura 27 – Impacto da distribuição das estações da REDE GNSS SP e da RBMC-IP sobre a grade ionosférica.

Os resultados apresentados pelas Figuras 25, 26 e 27, mostram que na modelagem da ionosfera em tempo real, os melhores resultados devem ser esperados na região sudeste, devido à configuração das redes analisadas.

Das análises realizadas nos experimentos apresentados neste capítulo, pode-se verificar também a influência da distância entre as estações de referências sobre os resultados obtidos.

Uma análise considerando a distância média entre as estações das redes ativas disponíveis no Brasil, para uma grade ionosférica com resolução de $5^\circ \times 5^\circ$, mostra que o espaçamento entre as estações de aproximadamente 600 km é suficiente para uma cobertura temporal próxima a 100%.

Para a grade ionosférica com resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ um espaçamento entre as estações de referência de aproximadamente 250 km garante uma cobertura temporal acima de 97%.

Para uma grade com resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ o espaçamento médio de 100 km entre as estações de referência permitiu uma cobertura temporal de aproximadamente 80%. Logo, para uma cobertura temporal próxima a 100% deve-se pensar em estações de referência com espaçamento menor do que 100 km, para garantir que em cada célula com 1° de resolução tenha pelo menos um ponto ionosférico observado em cada instante, durante todo o período de observação.

6.4 Análise de distribuição adequada para as estações de referência para suporte a um SBAS

Os estudos realizados nas seções anteriores mostram que a distribuição das estações de referência tem impacto direto na disponibilidade de dados para a geração da grade ionosférica.

Um dos grandes problemas observados na modelagem da ionosfera, utilizando uma rede GNSS ativa, é a distribuição irregular das estações de referência. Assim, baseado nos resultados obtidos e nas análises, foi realizado um planejamento para a melhor distribuição das estações de referência, considerando a resolução da grade ionosférica. A Figura 28 mostra os resultados obtidos para a simulação utilizando estações com espaçamento médio de 100 km.

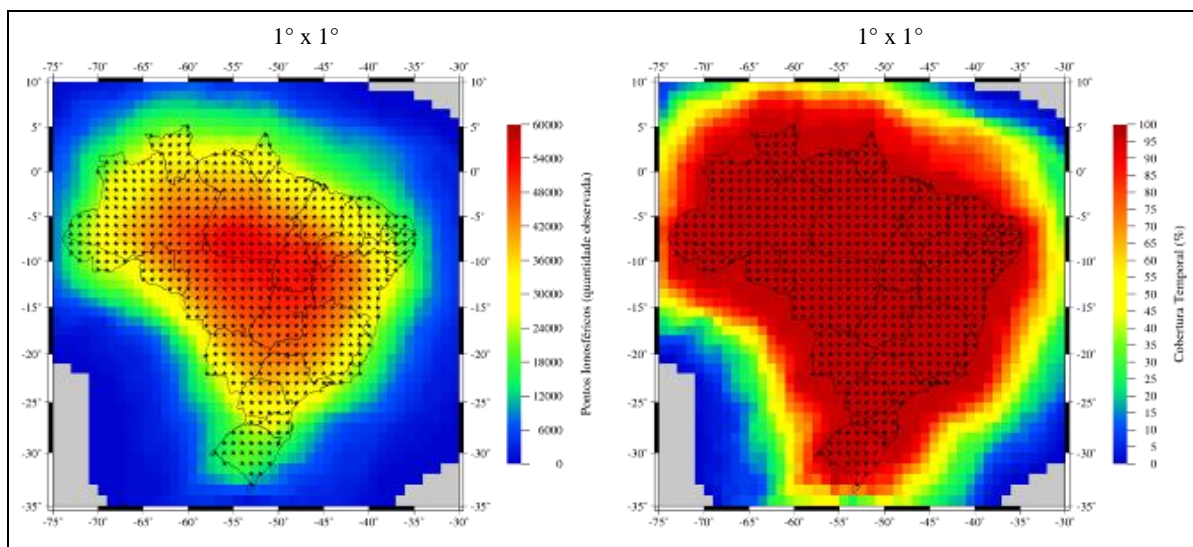


Figura 28 – Impacto da distribuição das estações com espaçamento médio de 100 km, sobre a grade ionosférica.

Na Figura 28 se pode verificar que uma rede planejada com estações espaçadas em aproximadamente 100 km é suficiente para se ter uma cobertura temporal superior a 97%, em todo o território nacional, considerando uma grade ionosférica com 1° de resolução. Isto equivale em ter pontos ionosféricos observados em cada célula da grade por um período superior a 23,3 horas. Observa-se também que o maior número de observações estará disponível na região central do país, e estas observações diminuem sistematicamente em direção as bordas da rede, no entanto a disponibilidade temporal dos dados se mantém homogênea sobre toda área de cobertura da rede. A análise para as grades com resolução superior a 1° não foi realizada, pois os resultados apresentados na Figura 28 mostram que esta configuração de rede satisfaz a cobertura para a grade com resolução de 1° e, consequentemente, satisfaz a cobertura para grades com resolução de 2,5° e 5°.

A Figura 29 mostra os resultados obtidos para a simulação utilizando estações com espaçamento médio de 250 km. Nos gráficos do lado esquerdo da figura observa-se a maior quantidade de pontos a serem observados na região central da área de cobertura da rede. Já nos gráficos do lado direito da mesma figura, para uma grade ionosférica de 2,5°x2,5°, quase toda a região brasileira terá um ponto ionosférico observado acima de 98% (23,5 horas) do tempo.

Na grade com resolução espacial de 1°, as células com melhor cobertura temporal de pontos ionosféricos apresentam um período de observação de aproximadamente 89% do tempo, ou seja, nesta célula haverá no mínimo um ponto ionosférico observado durante 21,3 horas. Na média, na área de cobertura da rede, a disponibilidade temporal dos dados é de

aproximadamente 69% (16,5 horas), e nos piores casos a cobertura temporal será em torno de 45% (10,5 horas).

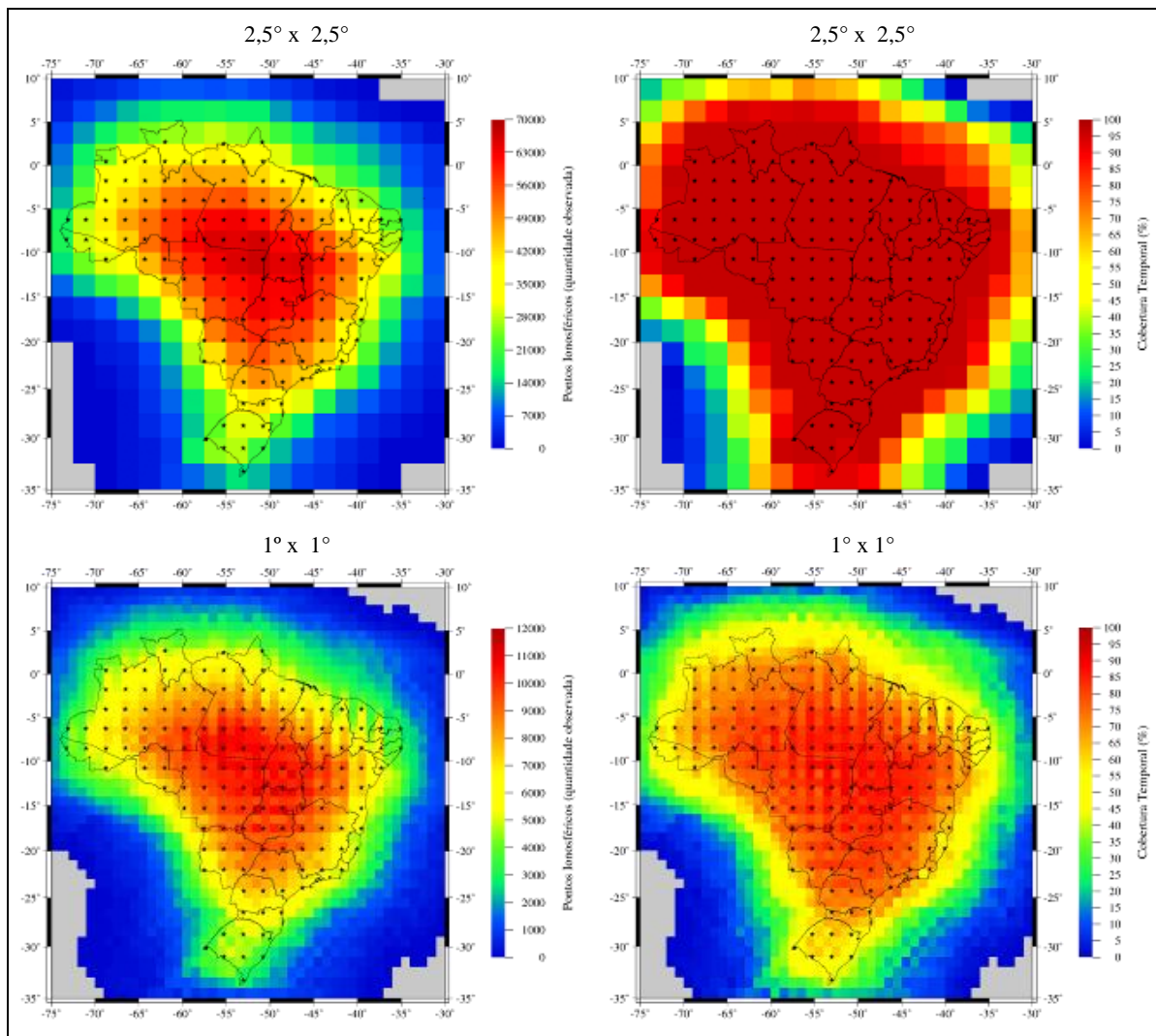


Figura 29 – Impacto da distribuição das estações com espaçamento médio de 250 km, sobre a grade ionosférica.

Pelos resultados mostrados na Figura 29 observa-se que para uma grade com resolução de 2,5° é mais adequada uma rede de estações com distribuição homogênea, espaçadas, de aproximadamente, 250 km. No entanto, com o aumento da resolução da grade a disponibilidade temporal diminui.

A Figura 30 mostra os resultados obtidos para a simulação utilizando estações com espaçamento médio de 600 km.

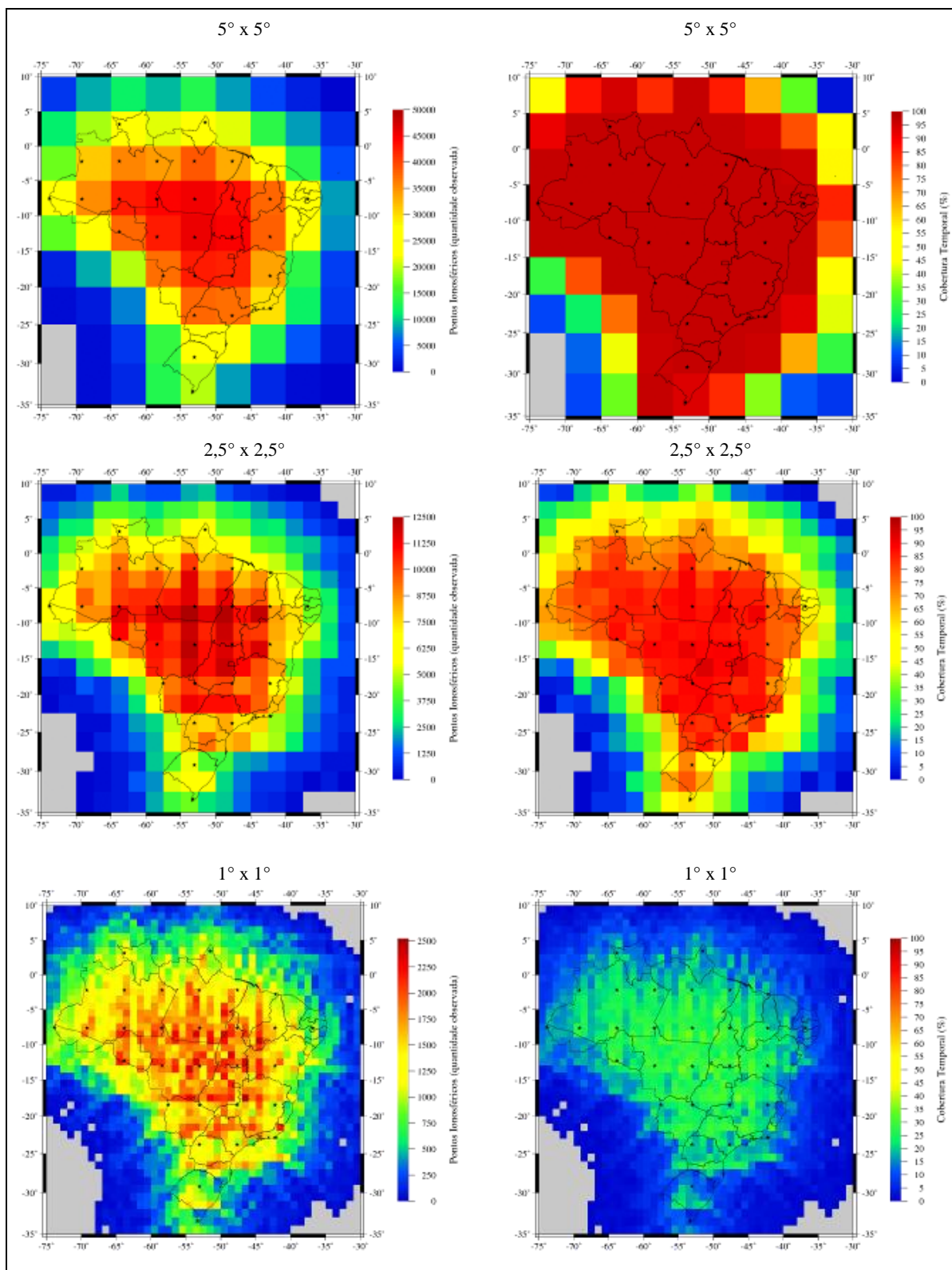


Figura 30 – Impacto da distribuição das estações com espaçamento médio de 600 km, sobre a grade ionosférica.

Com relação à disponibilidade temporal de pontos observados em cada célula, pode-se verificar nos gráficos do lado direito da Figura 30, que esta disponibilidade está

acima de 98% (23,5 horas) em quase todo o território nacional, para a grade com resolução de 5°, sendo que a cobertura temporal no pior caso é de 93% (22,3 horas).

Para a grade de 2,5°x2,5°, o período de disponibilidade em algumas células chega a 93% (22,3 horas), e observa-se ainda que em todo território nacional há uma disponibilidade média de dados de, aproximadamente, 73% (17,5 horas).

Na grade com resolução espacial de 1°, a célula com melhor cobertura temporal de pontos ionosféricos apresenta um período de observação de aproximadamente 36% do tempo, ou seja, haverá no mínimo um ponto ionosférico observado durante 8,6 horas. No pior caso, a disponibilidade média dos dados é de aproximadamente 15% (3,6 horas).

Como pode ser observado nos gráficos apresentados, a distribuição e a distância entre as estações de referência têm impacto direto sobre a modelagem da ionosfera, bem como na geração da grade ionosférica. Os resultados estão sendo analisados em função do objetivo de gerar uma grade ionosférica. No entanto, uma rede com distribuição planejada e homogênea é importante não somente para a modelagem da ionosfera, mas também é importante para ser utilizada como estrutura básica de um SBAS, além de outras aplicações tal como o mapeamento, determinação de campo de velocidade, entre outros.

A partir das análises realizadas pode-se definir a configuração de rede mais adequada para as diferentes resoluções da grade da ionosfera. A Tabela 9 apresenta a configuração de rede indicada para gerar grades ionosféricas com resoluções de 1°, 2,5° e 5°, bem como a quantidade de estações necessárias para a implantação da rede.

Tabela 9 – Configuração da rede em função da resolução da grade ionosférica

| Distância entre Estações | Resolução da Grade Ionosférica | Número de Estações |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 100 km | 1°x1° | 724 |
| 250 km | 2,5°x2,5° | 148 |
| 600 km | 5°x5° | 30 |

Com base na quantidade de estações de referência, também se pode fazer uma análise de custos para a implantação de uma rede GNSS ativa. Os resultados mostram a importância de se ter estações implantadas de forma planejada e com distribuição homogênea. A partir destes resultados pode-se observar que a distribuição planejada das estações tem tanta importância quanto à densificação da rede. É importante destacar também a dificuldade em instalar as estações em locais adequados em termos de acesso, segurança e infra-estrutura. Estes fatores limitantes são mais acentuados na região norte do país.

7 GRADE IONOSFÉRICA: PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os experimentos foram realizados de duas formas: uma considerando os dados coletados num período de alta atividade solar do ciclo 23, portanto trata-se de um processamento *off-line*; e outra utilizando dados em tempo real o que permitiu realizar o processamento *on-line*, bem como analisar a utilização da grade ionosférica em aplicações de navegação. Para o processamento dos dados no modo *on-line* foi utilizado o algoritmo ALDAR (Algoritmo de Leitura Dinâmica de Arquivos RINEX), desenvolvido no decorrer deste trabalho, o qual é utilizado como um módulo dentro do algoritmo da GI. O fluxograma do processamento dos dados no aplicativo desenvolvido é apresentado no Apêndice A. Vale salientar também que no algoritmo da GI foi implementada uma subrotina para, se necessário, atualizar o arquivo RINEX do usuário para a versão 3.0, na qual a correção da ionosfera pode ser adicionada como uma pseudo observável, conforme exemplo apresentado no Apêndice B. Logo, além do método proposto, este trabalho também resultou no software GI, desenvolvido a partir da linguagem de programação Fortran 95.

7.1 Dados Utilizados nos Experimentos

A primeira etapa deste experimento tratou da seleção dos dados para o processamento. Como os primeiros dados em tempo real começaram a ser transmitidos a partir de dezembro de 2006 pela REDE GNSS SP, a avaliação da grade da ionosfera através do processamento dos dados em tempo real (*online*) pôde ser feita somente com dados coletados no período de baixa atividade solar, na fase inicial do ciclo solar 24.

Para se ter uma análise da grade nos períodos de alta atividade solar, foi necessária a seleção de dados no último período de alta atividade solar, no ciclo 23. Logo, para definir os dias a serem processados foi realizada uma análise em função do índice de fluxo solar F10.7 (Figura 31).

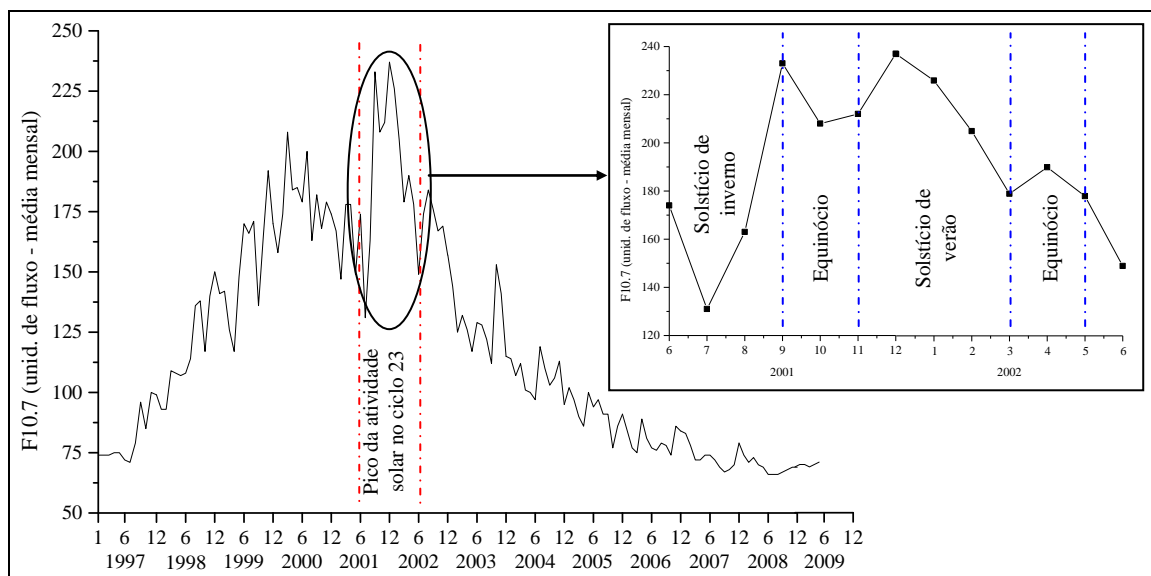


Figura 31 – Fluxo solar F10.7 para o período de 1997 a 2009.

Na Figura 31 verifica-se que o pico na atividade solar ocorreu no segundo semestre de 2001 e no primeiro semestre de 2002, o qual pode ser facilmente visualizado no gráfico ampliado. A figura também apresenta a classificação das estações do ano de acordo com suas características. Baseado nestas características optou-se por processar dados do solstício de verão e do equinócio. Para o solstício de verão foi escolhido uma semana no mês de dezembro/2001 (Dez/2001), no qual a atividade solar foi máxima com F10.7 médio igual a 237. Para o equinócio foi escolhido o mês de abril/2002 (Abr/2002), cujo índice F10.7 médio foi de 190.

A segunda etapa da escolha dos dados foi verificar uma sequência de dias com atividade solar homogênea e geomagneticamente calmo, respectivamente, para o mês de Dez/2001 e Abr/2002. Para isto foram realizadas análises dos índices F10.7 e Dst para estes meses (Figuras 32 e 33).

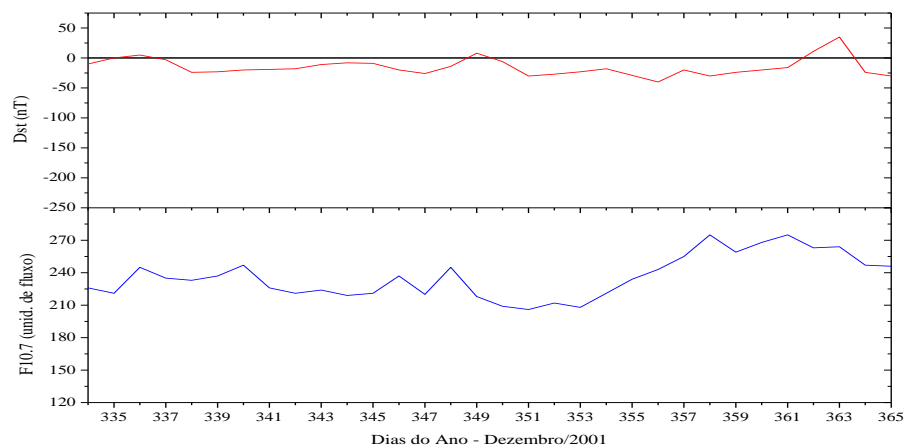


Figura 32 – Índices Dst e F10.7 para Dez/2001.

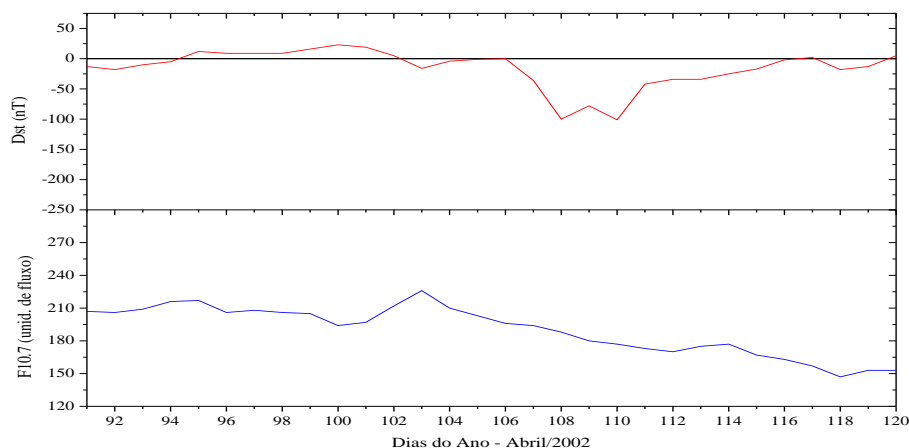


Figura 33 – Índices Dst e F10.7 para Abr/2002.

Na Figura 32 pode-se verificar que apesar de Dez/2001 ter apresentado alta atividade solar, não houve ocorrências de atividades geomagnéticas intensas, ou seja, não houve tempestades geomagnéticas. Assim, como dados representativos do solstício de verão foram escolhidos os dias do ano 352 a 361, em 2001, totalizando 10 dias a serem analisados. Estes dias foram escolhidos, pois os mesmos apresentam níveis parecidos de atividade solar e são classificados como dias geomagneticamente calmos.

Analisando a Figura 33 verifica-se a ocorrência de tempestade geomagnética moderada com fase inicial entre os dias 106 e 107, cuja fase de recuperação se estendeu até o dia 116. Logo, para o equinócio foram escolhidos os dias do ano 91 a 100, em 2002. Estes dias foram escolhidos utilizando o mesmo critério adotado anteriormente, ou seja, os dias devem apresentar atividade solar semelhante e serem classificados como dias geomagneticamente calmos.

Como foi observado, os dias a serem analisados são classificados como dia geomagneticamente calmos, ou seja, não houve ocorrência de tempestades geomagnéticas intensas. Para se ter uma análise do processamento dos dados sob a influência de uma tempestade geomagnética foram escolhidos dados coletados no período da tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 (dia do ano: 302). A escolha dos dias a serem processados, cujos dados estão sob a influência desta tempestade geomagnética, foi baseada nos índices F10.7 (Figura 34) e, principalmente, Dst (Figura 35).

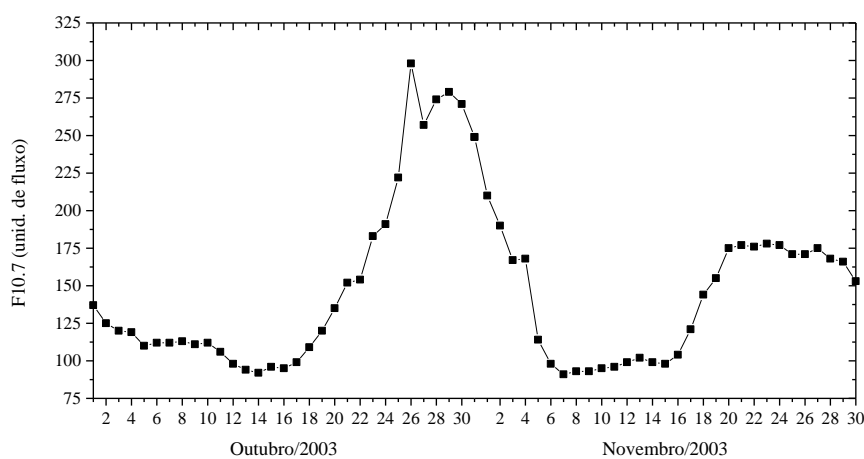


Figura 34 – Índice F10.7 para outubro e novembro de 2003.

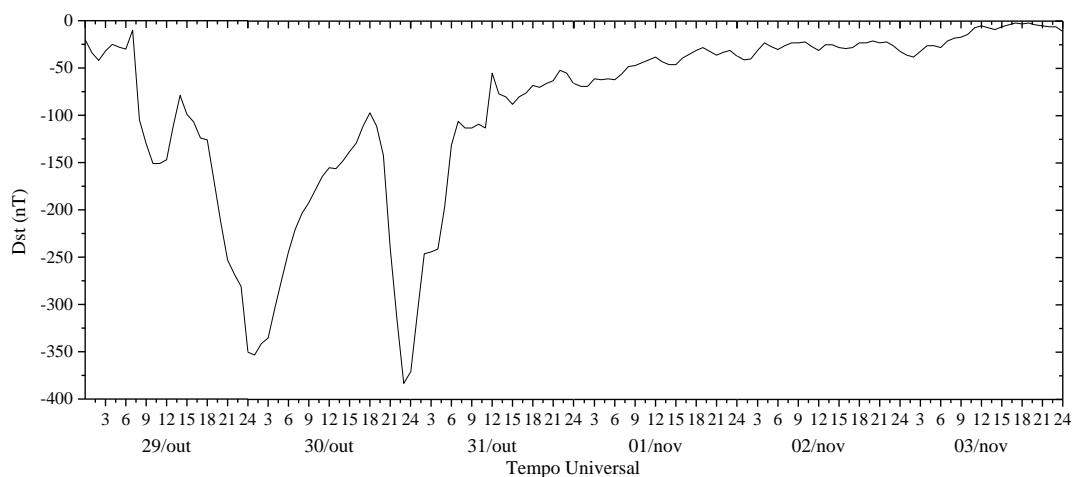


Figura 35 – Índice Dst para a tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003.

Pela Figura 34, pode-se verificar que, nos dias próximos ao dia da tempestade geomagnética, há um aumento significativo da atividade solar. A tempestade geomagnética de 29/10/2003 foi consequência de uma intensa explosão solar (*solar flare*) que ocorreu diretamente na direção da Terra, aumentando o fluxo de radiação eletromagnética além da

ocorrência de uma ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*). Como pode ser observado, na Figura 35, com a chegada da CME, por volta das 06:00 TU (03:00 HL), iniciou-se uma tempestade geomagnética cujo índice Dst atingiu um valor mínimo de -353 nT. A partir deste índice verifica-se a ocorrência de duas tempestades geomagnéticas muito intensas no dia 29 e 30 de outubro de 2003 (ver classificação apresentada na Tabela 1). Baseado nesta análise foram selecionados os dias de 29/10/2003 até 03/11/2003, ou seja, os dias do ano 302 à 307. Um estudo mais detalhado sobre esta tempestade pode ser encontrado em Matsuoka (2007).

Entretanto, um fator limitante para a análise nos períodos mencionados é a quantidade de estações GNSS disponíveis no Brasil, que nos processamentos não ultrapassaram 14 estações.

Para se realizar uma análise com um número maior de estações e também aplicar a grade ionosférica em toda a América do Sul e Central, foi usado um conjunto de dados para 11/05/2006 (dia do ano: 131). Estes dados foram coletados num período de baixa atividade solar ($F_{10.7} = 76$) e geomagneticamente calmo ($Dst = -12$ nT).

Para a análise da grade ionosférica em tempo real, foram utilizados dados das estações da RBMC-IP e da REDE GNSS SP, coletados no dia 21/11/2009 (dia do ano: 326). A Tabela 10 apresenta um resumo dos dados que serão utilizados nos experimentos.

Tabela 10 – Resumo dos dados utilizados nos experimentos.

| Mês | Dia do ano | F10.7 médio (unid. de fluxo) | Dst médio (nT) | Estação do ano |
|--------------------------------|------------|---------------------------------|---|-----------------------|
| Dez/2001 | 352 | 212 | -27 | Solstício de verão |
| | 353 | 208 | -23 | |
| | 354 | 221 | -18 | |
| | 355 | 234 | -29 | |
| | 356 | 243 | -40 (fraca atividade geomagnética) | |
| | 357 | 255 | -20 | |
| | 358 | 275 | -30 (fraca atividade geomagnética) | |
| | 359 | 259 | -24 | |
| | 360 | 268 | -20 | |
| | 361 | 275 | -16 | |
| Abr/2002 | 91 | 207 | -13 | Equinócio |
| | 92 | 206 | -18 | |
| | 93 | 209 | -10 | |
| | 94 | 216 | -5 | |
| | 95 | 217 | 12 | |
| | 96 | 206 | 9 | |
| | 97 | 208 | 9 | |
| | 98 | 206 | 9 | |
| | 99 | 205 | 16 | |
| | 100 | 194 | 23 | |
| Out/2003 – Nov/2003 | 302 | 279 | -128 (intensa atividade geomagnética) | Equinócio |
| | 303 | 271 | -211 (intensa atividade geomagnética) | |
| | 304 | 249 | -117 (intensa atividade geomagnética) | |
| | 305 | 210 | -46 (fraca atividade geomagnética) | |
| | 306 | 190 | -27 | |
| | 307 | 167 | -14 | |
| Mai/2006 | 131 | 76 | -12 | Equinócio |
| Nov/2009 | 326 | 73 | -3 | Equinócio |

Considerando os dias a serem processados, a disponibilidade de dados observados pelas estações de referência é apresentada nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – Dados observados para o período analisado em 2001.

| Estações | Dias do Ano 2001 | | | | | | | | | |
|----------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 |
| BOMJ | X | X | X | | | | | | | |
| BRAZ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| CUIB | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| FORT | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| IMPZ | | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| MANA | X | | | X | | X | X | X | X | |
| PARA | X | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| POAL | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| RECF | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| RIOD | | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| SALV | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| SMAR | | | | | | | | | | |
| UEPP | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| VICO | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

Tabela 12 – Dados observados para o período analisado em 2002.

| Estações | Dias do Ano 2002 | | | | | | | | | |
|----------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
| BOMJ | | | | | | | | | | |
| BRAZ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| CUIB | X | X | | | | | | | | X |
| FORT | X | X | X | X | X | | X | X | X | X |
| IMPZ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| MANA | | | | | | | | | | |
| PARA | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| POAL | X | X | X | | X | X | X | X | X | X |
| RECF | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| RIOD | X | X | X | | | | | | X | X |
| SALV | X | X | | X | X | X | X | X | X | X |
| SMAR | | X | | | | | | X | | |
| UEPP | X | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| VICO | X | X | X | X | X | X | | X | X | X |

Tabela 13 – Dados observados para o período analisado em 2003.

| Estações | Dias do Ano 2003 | | | | | |
|----------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 |
| BOMJ | X | X | X | X | X | X |
| BRAZ | X | X | X | X | X | X |
| CRAT | X | X | X | X | X | X |
| CUIB | X | | X | X | X | X |
| FORT | X | X | X | X | | X |
| IMPZ | X | X | X | X | X | X |
| MANA | | | | | | |
| PARA | X | X | X | X | X | X |
| POAL | X | X | X | X | | |
| RECF | X | X | X | X | X | X |
| RIOD | X | X | X | X | X | |
| SALV | X | X | X | X | X | X |
| SMAR | X | X | X | X | X | X |
| UEPP | X | X | X | X | X | X |
| VICO | X | X | X | X | X | X |

7.2 Determinação da Tendência Interfrequência

Para a realização dos experimentos o primeiro passo consistiu na determinação das tendências interfrequências, ou tendência diferencial do código (DCB), dos receptores e satélites usados na análise da grade ionosférica. Nesta etapa o processo foi realizado conforme descrito na seção 5.5 (equação 69), ou seja, sem a necessidade de injeção da tendência interfrequência dos satélites a partir de valores obtidos dos arquivos IONEX, e para isto foram realizadas atualizações nas subrotinas do Mod_Ion_FK e estas foram chamadas dentro do algoritmo da GI. Nesta etapa foram usadas as observáveis GPS coletadas a cada 15 segundos e máscara de elevação de 30°.

Alguns testes foram realizados com máscara de elevação de 15°, 20° e 30°, nos quais os resultados com máscara de elevação de 30° apresentaram uma melhora, em torno de 50%, do desvio padrão das estimativas de tendência interfrequência. Isto ocorre, pois as observações, que são rejeitadas para ângulos de elevação menores do que 30°, são mais ruidosas e apresentam maiores efeitos de multicaminho. Além disto, quanto menor for o ângulo de elevação maior é o erro da função de mapeamento utilizada, pelo modelo da ionosfera, para projetar o atraso ionosférico na direção vertical.

Os processamentos foram realizados considerando as estimativas dos coeficientes do modelo e das tendências interfrequências do dia anterior como as melhores estimativas disponíveis. Logo, as mesmas compuseram o vetor do estado inicial do filtro de Kalman para o processamento do dia subsequente.

As Figuras 36, 37 e 38 apresentam o comportamento dos valores de tendência interfrequência dos receptores, estimados instante por instante a partir dos dados coletados, respectivamente, em dezembro de 2001, abril de 2002 e outubro de 2003, em unidade de nano segundo (ns).

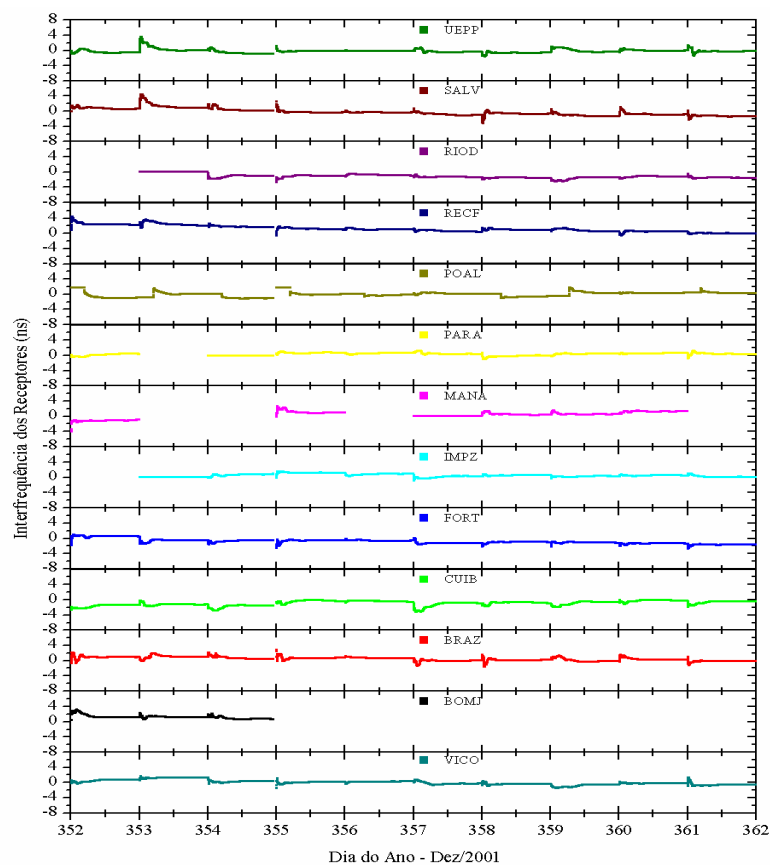


Figura 36 – Tendência interfrequência dos receptores estimada com os dados de Dez/2001.

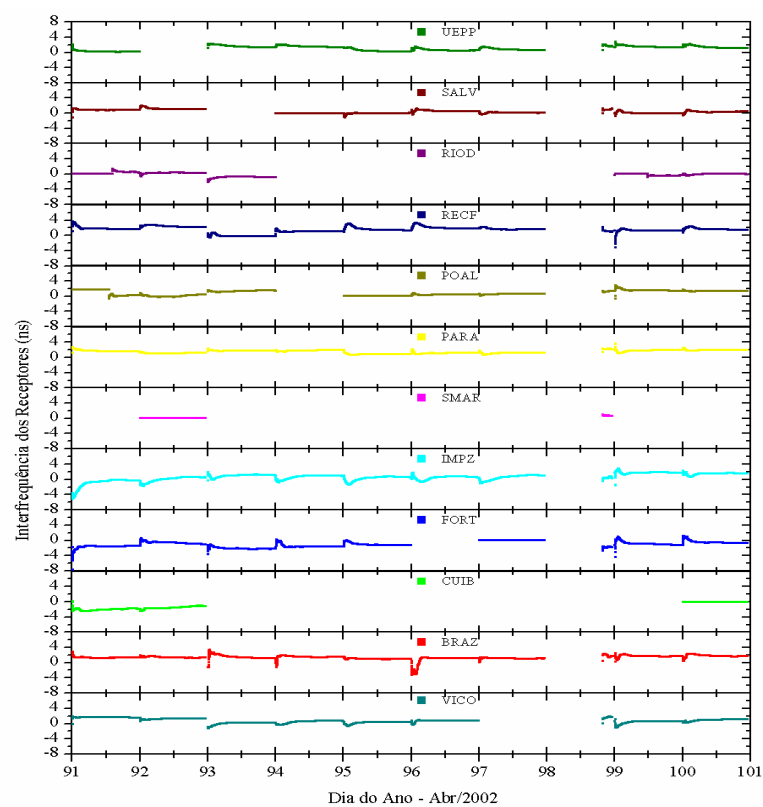


Figura 37 – Tendência interfrequência dos receptores estimada com os dados de Abr/2002.

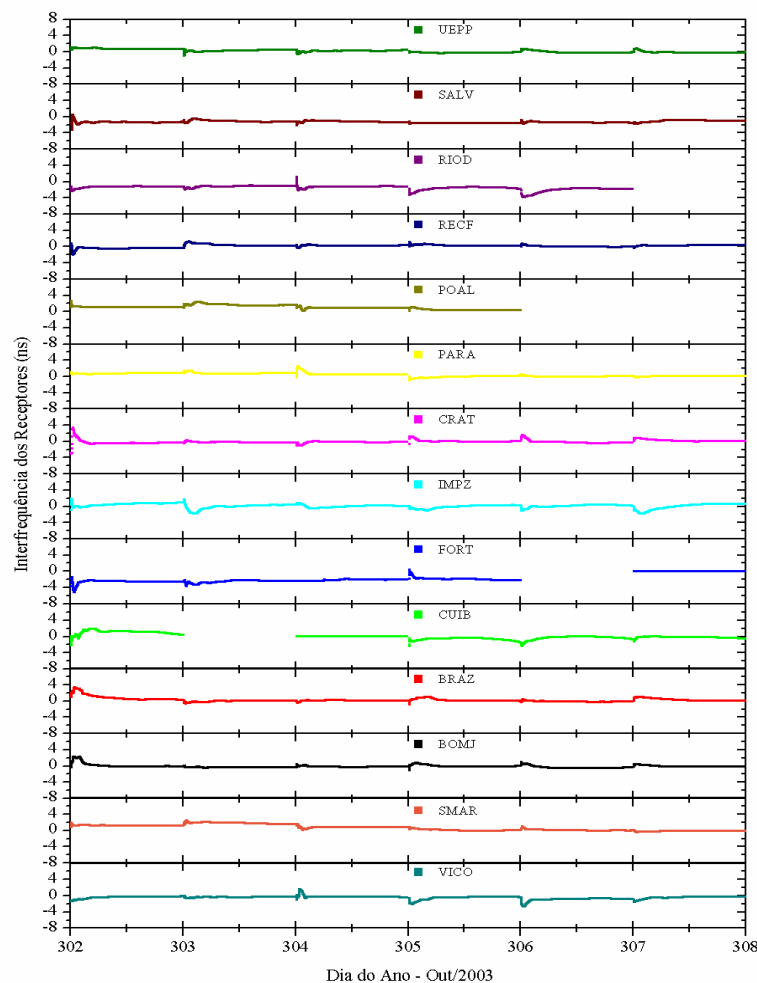


Figura 38 – Tendência interfrequência dos receptores estimada com os dados de Out/2003.

Nas Figuras 36, 37 e 38 pode-se verificar os valores das tendências estimadas para 10 dias em Dez/2001, 10 dias em Abr/2002 e 6 dias em Out/2003. Observando estas figuras é detectada a natureza constante das tendências interfrequências, por períodos de dias. Neste experimento se conclui que a mesma pode ser considerada constante por período de tempo superior a 10 dias, desde que a variância destas estimativas seja considerada no processo de propagação de erros. Segundo o Coco et al. (1991) e Sardón, Rius e Zarroa (1994) a tendência interfrequência dos satélites e receptores podem permanecer constantes, ao nível de 1 ns, por períodos de dias e até meses. Em vários estudos realizados (MA; MARUYAMA, 2003; SARDON; RIUS; ZARRAOA, 1994; SASIBHUSHANA RAO, 2007; WILSON; MANNUCCI, 1993), os mesmos encontram uma variação dia-a-dia, da tendência interfrequência dos satélites e dos receptores, entre 0,20 – 1,50 ns, ou 0,06 – 0,45 m, ou 0,37 – 2,77 TECU (1 ns corresponde a aproximadamente 1,85 TECU, na portadora L_1 do GPS).

Nestas figuras nota-se ainda alguns saltos no início de cada dia de processamento. Estes saltos devem-se ao fato de que no início das estimativas diárias a matriz variância dos

valores aproximados sofre um relaxamento. Pode ser observado também que as estimativas tendem a se estabilizarem após o processamento de um período de, aproximadamente, 30-40 minutos de dados observados. Tendo em vista que as estimativas das tendências interfrequências dependem do modelo da ionosfera, é importante salientar que este tempo para convergir os valores estimados pode ser maior ou menor, dependendo do comportamento da ionosfera no início do processo.

A Figura 38 mostra um comportamento estável mesmo sob a influência de uma intensa atividade geomagnética, isto ocorre devido a entrada de valores aproximados para as tendências interfrequências, obtidos de processamentos de dias anteriores. Considerando, que no modelo dinâmico do filtro de Kalman os termos referentes às tendências são considerados constantes, as variações temporais nos dados decorrentes do comportamento da ionosfera são absorvidas somente pelos coeficientes do modelo da ionosfera.

Os valores médios de tendência interfrequência dos receptores para cada conjunto de dados processado (Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003) são apresentados na Tabela 14.

| Tabela 14 – Tendência interfrequência dos receptores. | | | | | | |
|---|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Estações | Dez/2001 | | Abr/2002 | | Out/2003 | |
| | \bar{dr} (ns) | $\bar{\sigma}_{dr}$ (ns) | \bar{dr} (ns) | $\bar{\sigma}_{dr}$ (ns) | \bar{dr} (ns) | $\bar{\sigma}_{dr}$ (ns) |
| BOMJ | 3,196 | 0,004 | | | -0,767 | 0,003 |
| BRAZ | 1,051 | 0,004 | 4,035 | 0,007 | 0,374 | 0,003 |
| CRAT | | | | | -0,639 | 0,003 |
| CUIB | -2,545 | 0,004 | -3,577 | 0,001 | 0,002 | 0,003 |
| FORT | -2,506 | 0,009 | -3,612 | 0,018 | -5,524 | 0,019 |
| IMPZ | 1,409 | 0,003 | 2,157 | 0,011 | 0,454 | 0,004 |
| MANA | 0,882 | 0,003 | | | | |
| PARA | 0,967 | 0,003 | 4,555 | 0,006 | 0,973 | 0,003 |
| POAL | -0,455 | 0,139 | 2,392 | 0,463 | 2,854 | 0,002 |
| RECF | 3,368 | 0,004 | 4,122 | 0,009 | 0,137 | 0,004 |
| RIOD | -3,342 | 0,003 | -0,277 | 1,010 | -4,287 | 0,002 |
| SALV | -1,225 | 0,004 | 1,147 | 0,007 | -3,974 | 0,015 |
| SMAR | | | 0,952 | 0,004 | 1,746 | 0,003 |
| UEPP | -0,852 | 0,004 | 3,177 | 0,006 | 0,231 | 0,003 |
| VICO | -0,096 | 0,003 | 1,928 | 0,007 | -1,270 | 0,003 |

Analisando a Tabela 14 e o comportamento dos valores estimados (Figuras 36, 37 e 38), os resultados obtidos mostram que as tendências interfrequências podem ser constantes por períodos de dias, ou até meses conforme a literatura, mas é importante que estes valores sempre sejam atualizados com o conjunto de dados mais recente.

De um conjunto de dados para outro, alguns receptores (BRAZ, UEPP, PARA e SALV) apresentaram maior variação nos valores das tendências interfrequências, em torno de 2,0 a 4,0 ns. Nestes casos, estudos complementares devem ser realizados para verificar tal comportamento, citando-se que neste período não houve nenhum tipo de alteração (antena, receptor, *firmware*) no histórico destas estações.

Conforme os resultados obtidos, se pode concluir que para o processamento em tempo real é adequado trabalhar com as últimas estimativas diárias das tendências interfrequências e respectiva variância, e adotá-los como valores aproximados no filtro de Kalman para o processamento do dia atual. Assim, ocorrências como perdas de ciclo, tempestades geomagnéticas e cintilação, que podem causar instabilidades momentâneas, não afetam as estimativas das tendências interfrequências.

Os valores médios de tendência interfrequência dos satélites para os conjuntos de dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003 são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 15, 16 e 17. Os valores de tendência interfrequência e correspondente desvio padrão são apresentados, respectivamente, na segunda e terceira colunas das tabelas. Para uma análise comparativa, na quarta coluna destas tabelas também são apresentados os valores obtidos pelo centro de processamento JPL da NASA, os quais são transmitidos nas mensagens de navegação do GPS. As diferenças entre os valores estimados pelo Mod_Ion_FK e aqueles fornecido pelo JPL são apresentadas na última coluna das tabelas. Seguindo os padrões adotados internacionalmente, todos os valores são dados em unidade de nano segundo.

Tabela 15 – Tendência interfrequência dos satélites (Dez/2001).

| PRN | \bar{d}_s (ns) | $\bar{\sigma}_{ds}$ (ns) | $\bar{d}_{s_{JPL}}$ (ns) | $\bar{d}_s - \bar{d}_{s_{JPL}}$ (ns) |
|----------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,686 | 0,006 | -1,367 | 2,053 |
| 2 | 1,141 | 0,002 | -2,398 | 3,539 |
| 3 | 1,608 | 0,014 | -0,672 | 2,280 |
| 4 | 0,624 | 0,025 | 0,311 | 0,313 |
| 5 | 1,715 | 0,007 | -0,525 | 2,240 |
| 6 | 1,293 | 0,005 | -0,307 | 1,600 |
| 7 | 1,361 | 0,013 | -2,104 | 3,465 |
| 8 | 0,741 | 0,002 | -0,981 | 1,722 |
| 9 | 1,269 | 0,009 | 0,237 | 1,032 |
| 10 | 1,493 | 0,005 | -1,570 | 3,063 |
| 11 | 1,231 | 0,012 | 3,858 | -2,627 |
| 13 | -0,138 | 0,001 | 3,802 | -3,940 |
| 14 | 0,775 | 0,011 | 2,721 | -1,946 |
| 15 | 1,791 | 0,005 | -1,939 | 3,730 |
| 17 | 1,710 | 0,007 | -1,560 | 3,270 |
| 18 | 0,848 | 0,007 | 2,630 | -1,782 |
| 20 | 1,900 | 0,008 | | |
| 21 | 1,778 | 0,007 | -2,093 | 3,871 |
| 22 | 0,930 | 0,010 | -0,960 | 1,890 |
| 23 | 1,694 | 0,009 | -1,840 | 3,534 |
| 24 | 1,685 | 0,011 | -2,511 | 4,196 |
| 25 | 1,447 | 0,008 | 1,156 | 0,291 |
| 26 | 0,682 | 0,011 | 0,391 | 0,291 |
| 27 | 0,392 | 0,002 | -0,349 | 0,741 |
| 28 | 0,178 | 0,003 | 2,949 | -2,771 |
| 29 | 0,832 | 0,006 | 1,079 | -0,247 |
| 30 | 0,585 | 0,003 | 1,763 | -1,178 |
| 31 | 1,208 | 0,007 | 0,283 | 0,925 |
| Discrepância Média: | | | | $1,094 \pm 2,287$ |

Tabela 16 – Tendência interfrequência dos satélites (Abr/2002).

| PRN | \bar{d}_s (ns) | $\bar{\sigma}_{ds}$ (ns) | $\bar{d}_{s_{JPL}}$ (ns) | $\bar{d}_s - \bar{d}_{s_{JPL}}$ (ns) |
|----------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0,902 | 0,004 | -1,368 | 2,270 |
| 2 | 1,048 | 0,006 | -2,396 | 3,444 |
| 3 | 0,902 | 0,004 | -0,785 | 1,687 |
| 4 | 0,327 | 0,010 | 0,506 | -0,179 |
| 5 | 0,857 | 0,002 | -0,754 | 1,611 |
| 6 | 0,802 | 0,002 | -0,325 | 1,127 |
| 7 | 1,264 | 0,005 | -2,175 | 3,439 |
| 8 | 0,754 | 0,005 | -0,880 | 1,634 |
| 9 | 1,020 | 0,002 | -0,038 | 1,058 |
| 10 | 1,423 | 0,006 | -1,985 | 3,408 |
| 11 | 0,060 | 0,005 | 4,236 | -4,176 |
| 13 | -0,191 | 0,013 | 3,836 | -4,027 |
| 14 | 0,106 | 0,005 | 3,103 | -2,997 |
| 15 | 1,229 | 0,003 | -1,789 | 3,018 |
| 17 | 1,269 | 0,010 | -1,845 | 3,114 |
| 18 | 0,255 | 0,010 | 3,060 | -2,805 |
| 20 | 0,769 | 0,003 | | |
| 21 | 1,123 | 0,004 | -1,982 | 3,105 |
| 22 | 0,869 | 0,003 | -0,890 | 1,759 |
| 23 | 1,292 | 0,002 | -1,673 | 2,965 |
| 24 | 1,179 | 0,003 | -2,610 | 3,789 |
| 25 | 0,680 | 0,001 | 1,250 | -0,570 |
| 26 | 0,504 | 0,005 | 0,268 | 0,236 |
| 27 | 0,671 | 0,004 | -0,676 | 1,347 |
| 28 | 0,133 | 0,006 | 3,239 | -3,106 |
| 29 | 0,454 | 0,006 | 0,766 | -0,312 |
| 30 | 0,004 | 0,048 | 1,625 | -1,621 |
| 31 | 0,770 | 0,004 | 0,281 | 0,489 |
| Discrepância Média: | | | | $0,729 \pm 2,454$ |

Tabela 17 – Tendência interfrequência dos satélites (Out/2003).

| PRN | \bar{ds} (ns) | $\bar{\sigma}_{ds}$ (ns) | \bar{ds}_{JPL} (ns) | $\bar{ds} - \bar{ds}_{JPL}$ (ns) |
|----------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1 | 1,505 | 0,001 | -1,743 | 3,248 |
| 2 | 3,600 | 0,004 | -2,738 | 6,338 |
| 3 | 2,691 | 0,006 | -0,989 | 3,680 |
| 4 | 1,424 | 0,008 | -0,006 | 1,430 |
| 5 | 2,500 | 0,002 | -1,106 | 3,606 |
| 6 | 2,463 | 0,005 | -0,644 | 3,107 |
| 7 | 2,079 | 0,003 | -2,650 | 4,729 |
| 8 | 1,881 | 0,001 | -1,147 | 3,028 |
| 9 | 2,040 | 0,002 | -0,287 | 2,327 |
| 10 | 2,947 | 0,003 | -2,352 | 5,299 |
| 11 | 1,938 | 0,008 | 3,569 | -1,631 |
| 13 | 0,660 | 0,001 | 3,426 | -2,766 |
| 14 | 1,517 | 0,005 | 2,894 | -1,377 |
| 15 | 2,997 | 0,011 | -2,205 | 5,202 |
| 16 | 2,426 | 0,004 | | |
| 17 | 2,520 | 0,003 | 2,426 | 0,094 |
| 18 | 1,522 | 0,003 | -3,170 | 4,692 |
| 20 | 1,763 | 0,001 | 2,894 | -1,131 |
| 21 | 1,741 | 0,002 | 0,602 | 1,139 |
| 22 | | | 3,821 | -3,821 |
| 23 | 2,455 | 0,006 | -0,942 | 3,397 |
| 24 | 2,248 | 0,005 | -2,948 | 5,196 |
| 25 | 1,980 | 0,013 | 0,169 | 1,811 |
| 26 | 2,092 | 0,004 | 0,438 | 1,654 |
| 27 | 1,647 | 0,001 | -1,126 | 2,773 |
| 28 | 1,130 | 0,007 | 2,438 | -1,308 |
| 29 | 1,881 | 0,004 | 0,947 | 0,934 |
| 30 | 1,619 | 0,003 | 1,549 | 0,070 |
| 31 | 2,420 | 0,008 | -0,077 | 2,497 |
| Discrepância Média: | | | | $1,936 \pm 2,642$ |

Analisando as Tabelas 15, 16 e 17, os valores estimados mostram a natureza constante das tendências interfrequências dos satélites. Pelos resultados apresentados verifica-se que as mesmas podem ser consideradas constantes durante dias. Uma comparação entre os resultados de Dez/2001, Abr/2002 e Dez/2003 mostra que as tendências interfrequências dos satélites apresentaram variação de 0,01 a 2,55 ns, num período de 12 meses. Analisando os valores apresentados pelo JPL, os mesmos mostram variação, no período de 12 meses, de 0,02 a 4,27 ns. Nos períodos analisados, os dados da JPL apresentaram uma maior variabilidade, de 4,2 e 4,7 ns, respectivamente, para os satélites PRN 17 e 22.

Comparando os valores de tendência interfrequência dos satélites obtidos pelo método usado neste trabalho, com os valores fornecidos pelo JPL, podem ser observadas as discrepâncias dos valores obtidos por ambos os métodos (Figura 39).

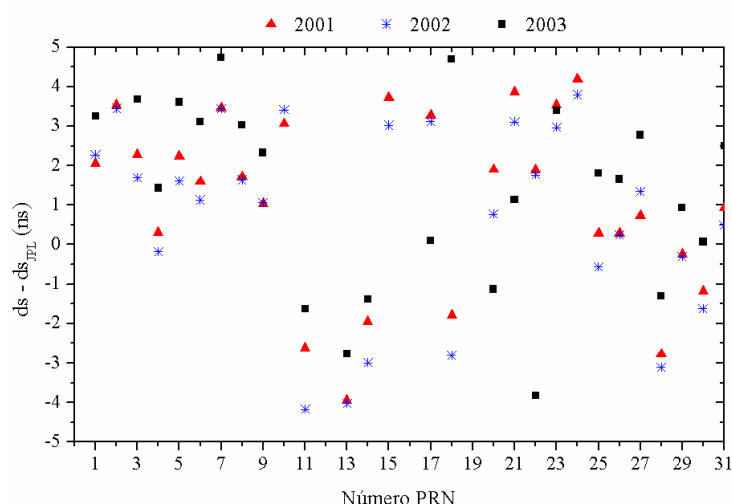


Figura 39 – Discrepância entre os valores de tendência interfrequências estimados e aqueles fornecidos pelo JPL.

Pela Figura 39 pode-se observar que as maiores discrepâncias observadas atingiram aproximadamente 5,0 ns (1,5 m). É importante salientar que estas diferenças nos valores estimados devem-se principalmente:

- ao modelo ionosférico usado: ambos os métodos utilizam o filtro de Kalman, entretanto, neste trabalho a ionosfera é modelada pela série de Fourier, enquanto o JPL utiliza *splines* bi-cúbicas;
- as restrições aplicadas ao processo de estimação: no método aplicado neste trabalho a injeção é que o valor de tendência

interfrequência dos satélites não deve ultrapassar 15 ns, conforme o documento IS-GPS-200D (2004). Já o JPL usa uma injeção onde a soma das tendências interfrequências de todos os satélites é igual a zero; e

- à rede de estações: neste trabalho foi utilizada uma rede com um número limitado de 15 estações distribuídas no território brasileiro, e o JPL utiliza uma média de 100 estações distribuídas por todo o globo.

A partir dos valores de tendência interfrequência dos satélites e receptores é então possível calcular o atraso ionosférico absoluto, para cada ponto ionosférico observado, e finalmente gerar a grade ionosférica.

7.3 Grade Ionosférica e GIVE

Nesta etapa são apresentados, em forma de visualização gráfica, os resultados obtidos a partir do método de geração de GI e GIVE proposto neste trabalho.

Os valores de atraso ionosférico absoluto, utilizados na geração da grade ionosférica, foram obtidos após a correção da tendência interfrequência dos satélites e receptores, estimados conforme apresentado na seção 7.2. As variâncias das tendências interfrequências foram propagadas e consideradas no modelo estocástico para a geração da GIVE.

O aplicativo desenvolvido permite, além da saída em arquivos ASCII, gerar a visualização gráfica da grade ionosférica, ou seja, gerar os mapas da ionosfera, a cada instante de observação ou a partir de médias horárias. Para a discussão desta seção, são apresentados alguns mapas gerados a partir da média horária, pois de outra forma, considerando observações coletadas a cada 15 segundos, se teria 5760 mapas para cada dia de processamento.

Para esta análise a grade ionosférica foi gerada por meio da técnica de decomposição da camada ionosférica proposta na seção 5.8 (Figuras 40 e 41). A mesma técnica foi aplicada para a geração da GIVE.

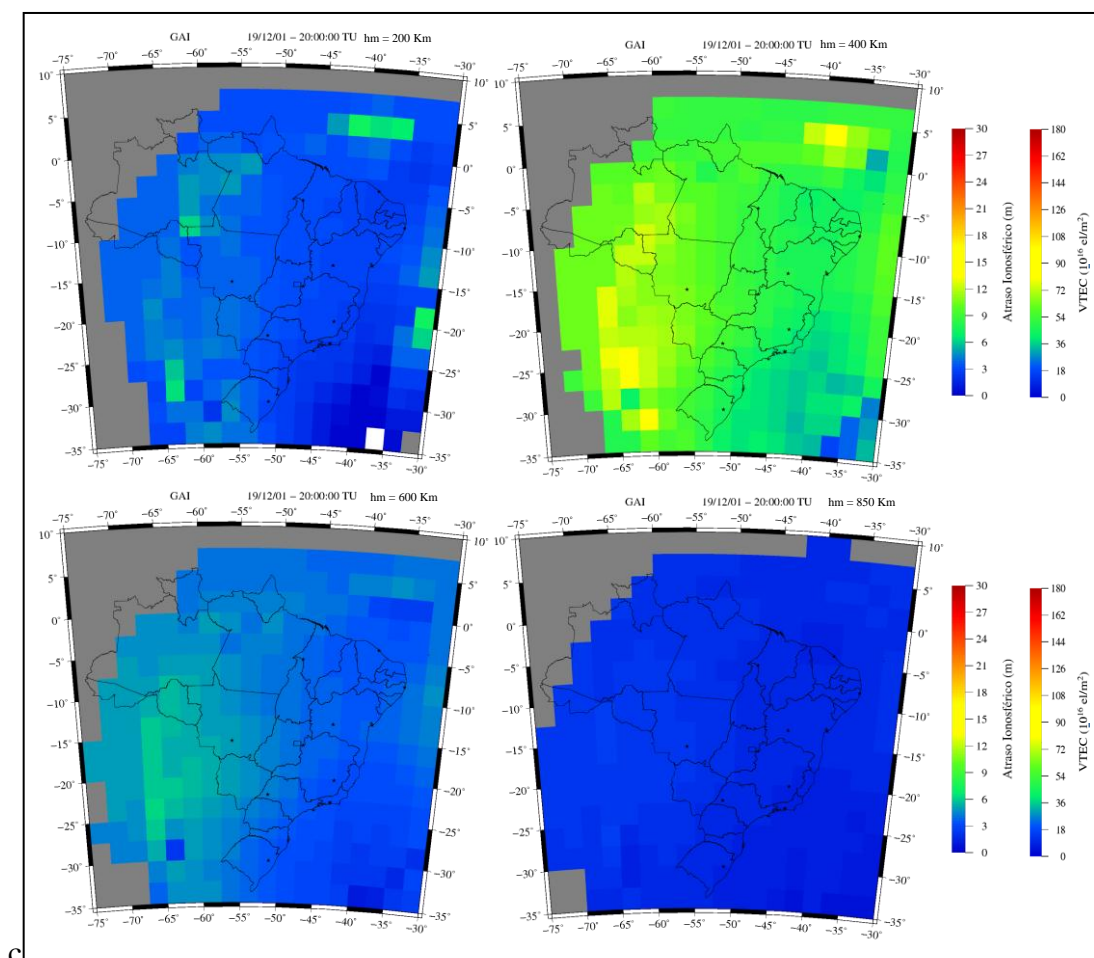


Figura 40 – Grades ionosféricas em diferentes altitudes (19/Dez/2001 – 20:00 TU).

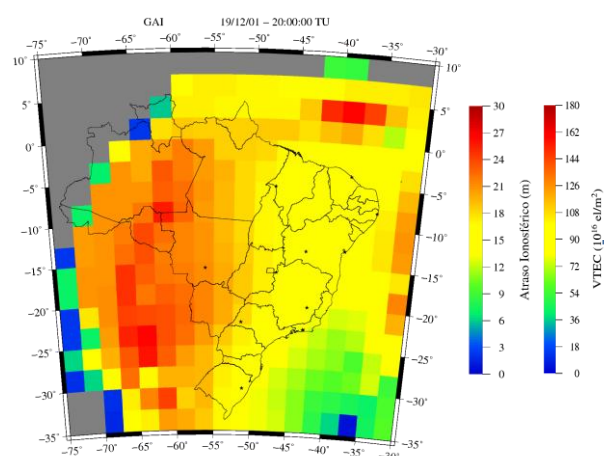


Figura 41 – Grade ionosférica gerada a partir da composição das grades ionosféricas em diferentes altitudes (19/Dez/2001 – 20:00 TU).

Nas Figuras 40 e 41 são apresentadas um exemplo do método aplicado para a geração de uma grade ionosférica para as 20:00 TU, com $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de resolução, utilizando dados do dia 353 de 2001. Os pontos pretos nos mapas representam a localização das estações

utilizadas no processamento. As células (ou quadriculas) na cor cinza representam regiões onde, dentro dos critérios de interpolação já mencionados, não houve observação de pontos ionosféricos para estimar o atraso ionosférico do IGP. Como se trata de valores de correção de atraso ionosférico a serem disponibilizados aos usuários do GNSS, os mesmos estão na unidade padrão de correção, em metros. Entretanto, estas grades também podem ser utilizadas para estudos do comportamento da ionosfera, neste caso a unidade padrão é TECU. Assim, os mapas apresentados nas Figuras 40 e 41 não sofrem alteração na visualização, simplesmente há uma mudança de escala (um metro equivale a aproximadamente 6,1586 TECU).

7.3.1 Grade de atraso ionosférico e GIVE gerados com os dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003

Assim como na seção anterior, por questão de demonstração e discussão do algoritmo da GI, aqui também são apresentados os mapas gerados a partir da média horária da grade ionosférica. Lembrando que estes mapas podem ser gerados em tempo real ou pode-se gerar mapas médios a partir de qualquer intervalo (1, 2, ..., 5, ..., 10, ..., 60, ..., 120, ... minutos). Considerando que o método de geração da grade é sistemático, neste trabalho será analisado os resultados para a média horária das 17:00 as 18:00 TU (14:00 as 15:00 HL), pois se trata de um horário em que ocorre o primeiro pico da anomalia equatorial, permitindo assim uma melhor visualização do gradiente espacial do TEC, bem como da performance do método proposto neste trabalho. Deve-se salientar que, devido ao número e à distribuição de estações de referência disponíveis, optou-se em apresentar os resultados em grades com resolução de 2,5° em latitude e 2,5° em longitude. A grade ionosférica e o GIVE gerados são apresentados nas Figuras 42, 43 e 44.

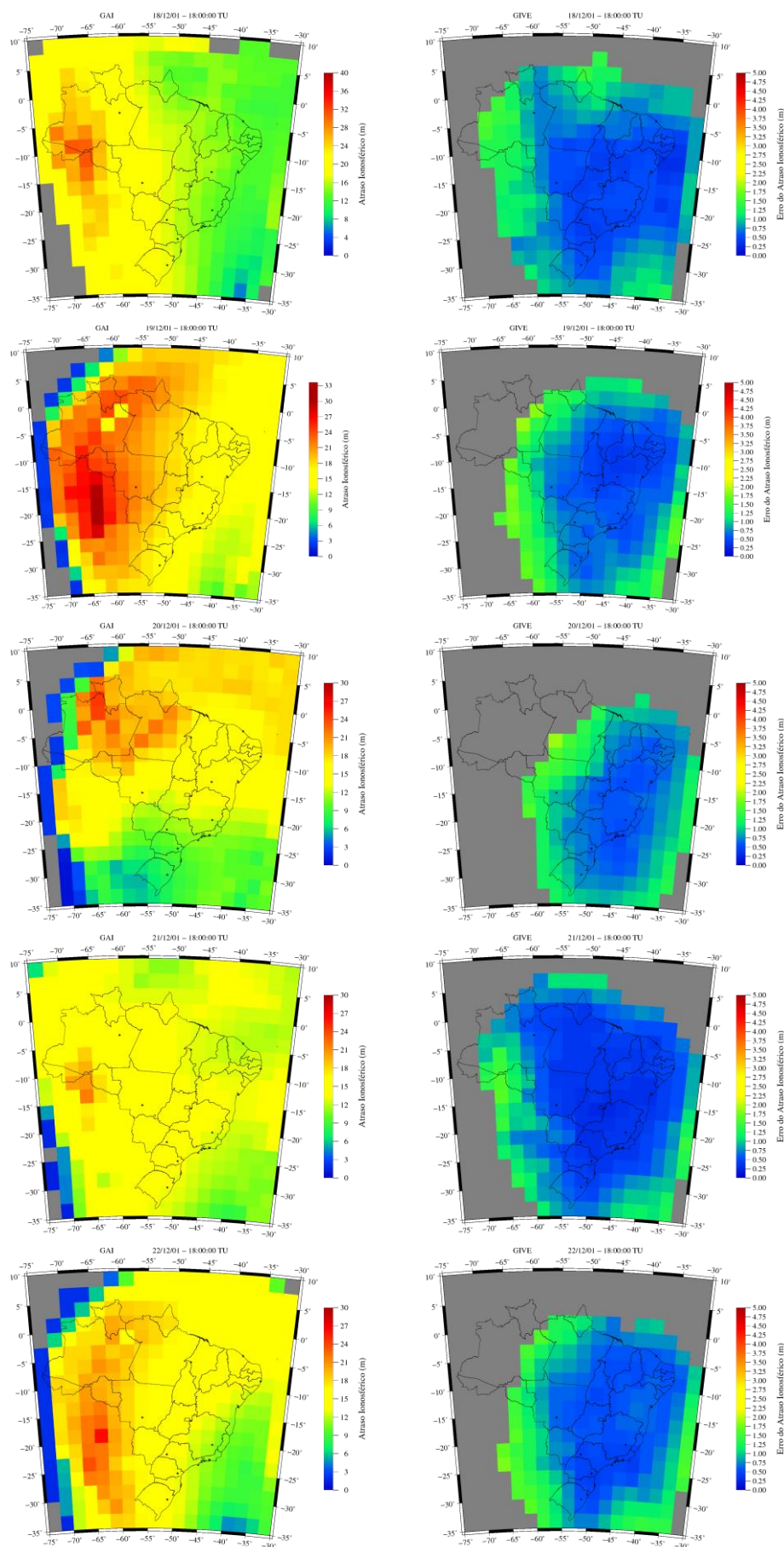
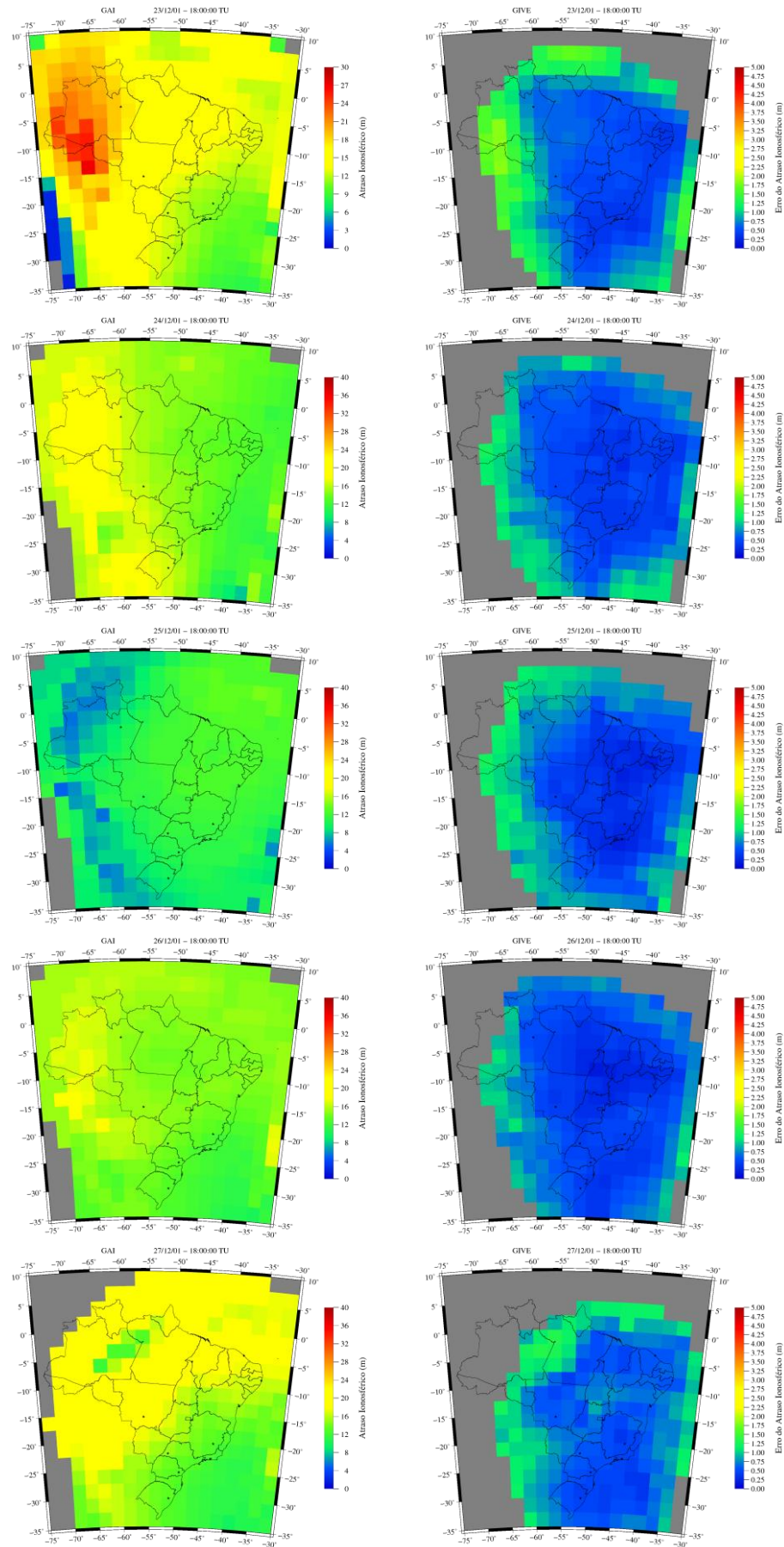


Figura 42 – Grade ionosférica e GIVE (Dez/2001) – (17-18 UT). (Continua ...)



(Continuação ...) Figura 42 – Grade ionosférica e GIVE (Dez/2001) – (17-18 UT).

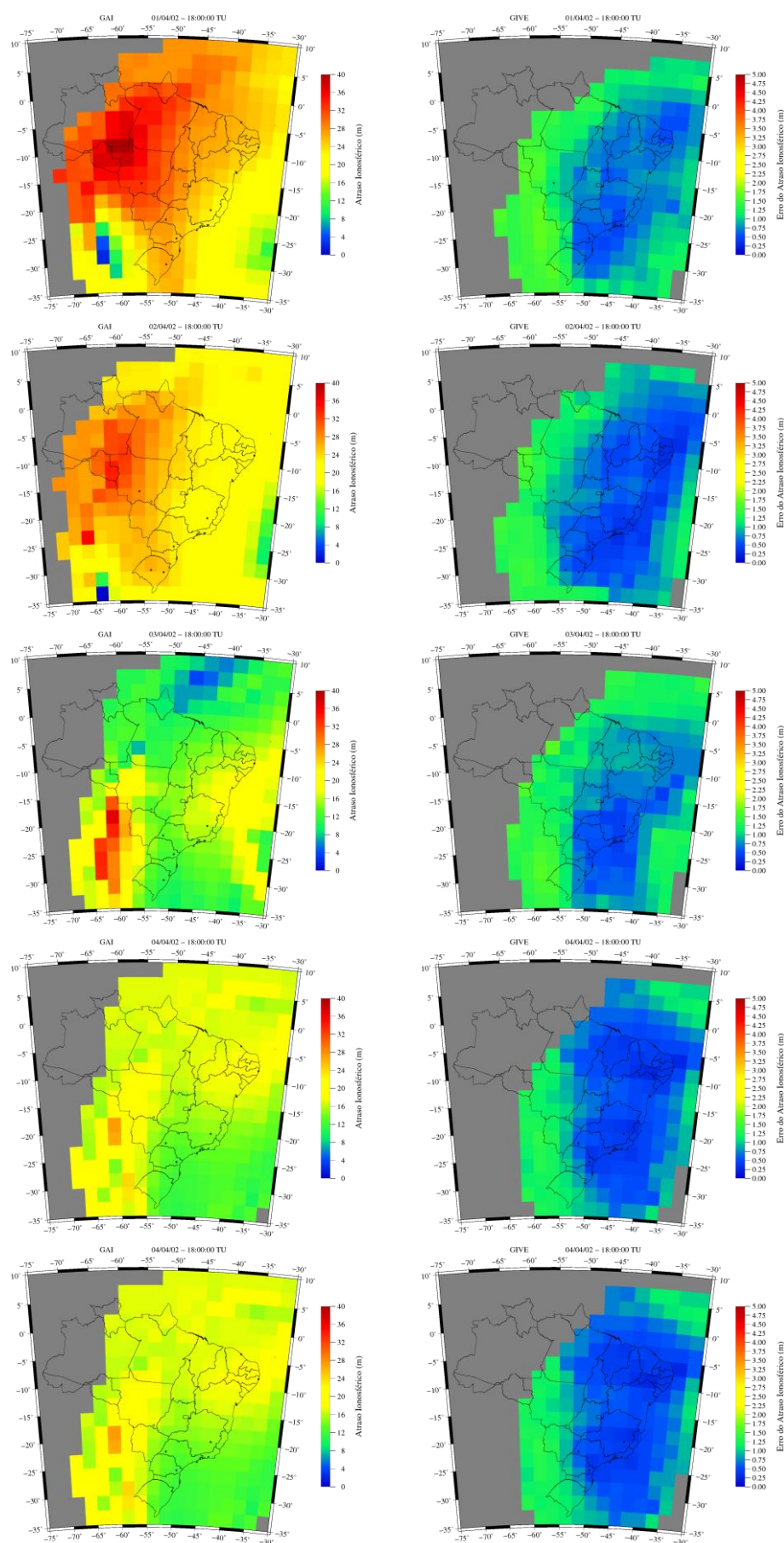
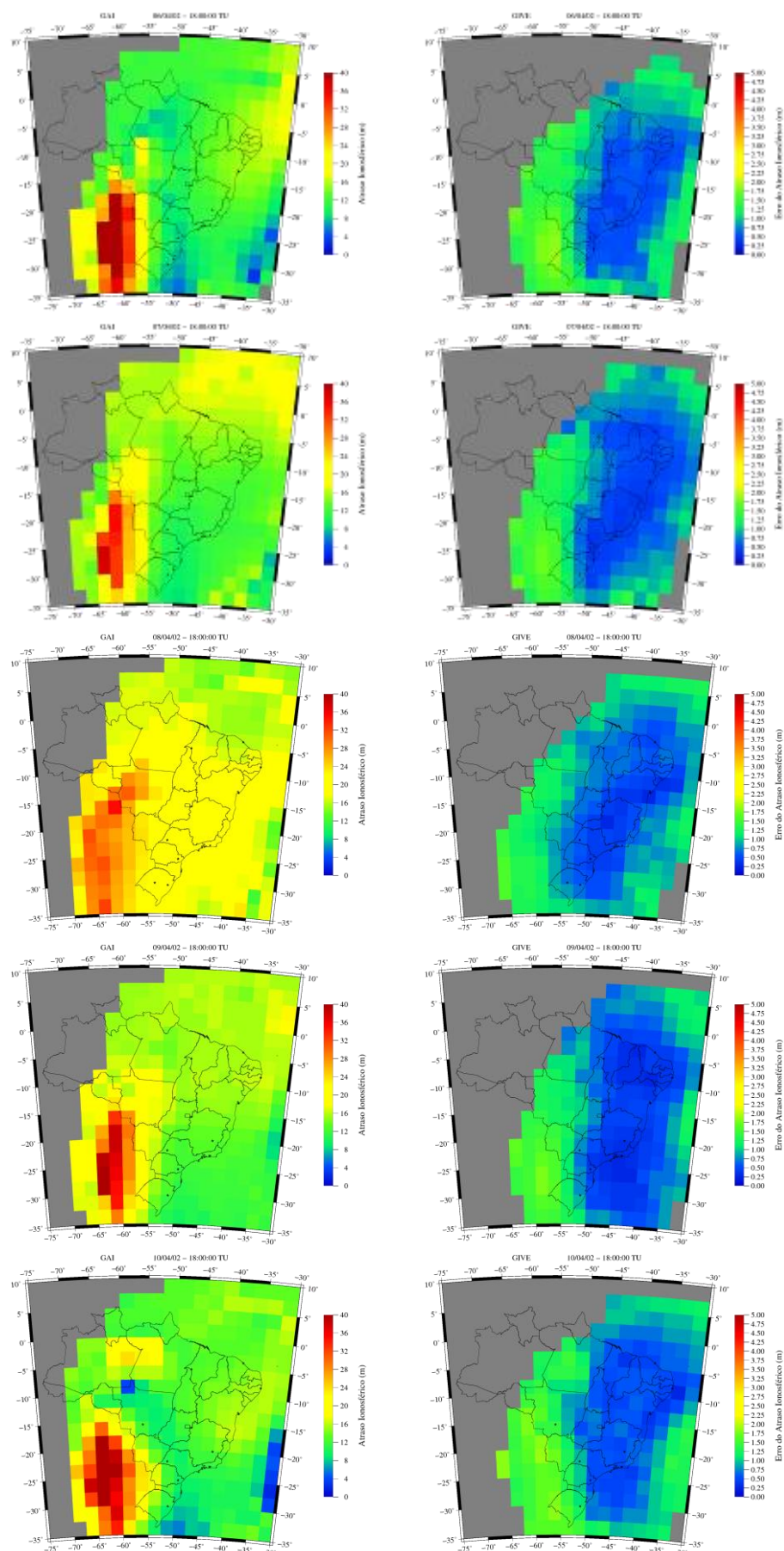


Figura 43 – Grade ionosférica e GIVE (Abr/2002) – (17-18 UT). (Continua ...)



(Continuação ...) Figura 43 – Grade ionosférica e GIVE (Abr/2002) – (17-18 UT).

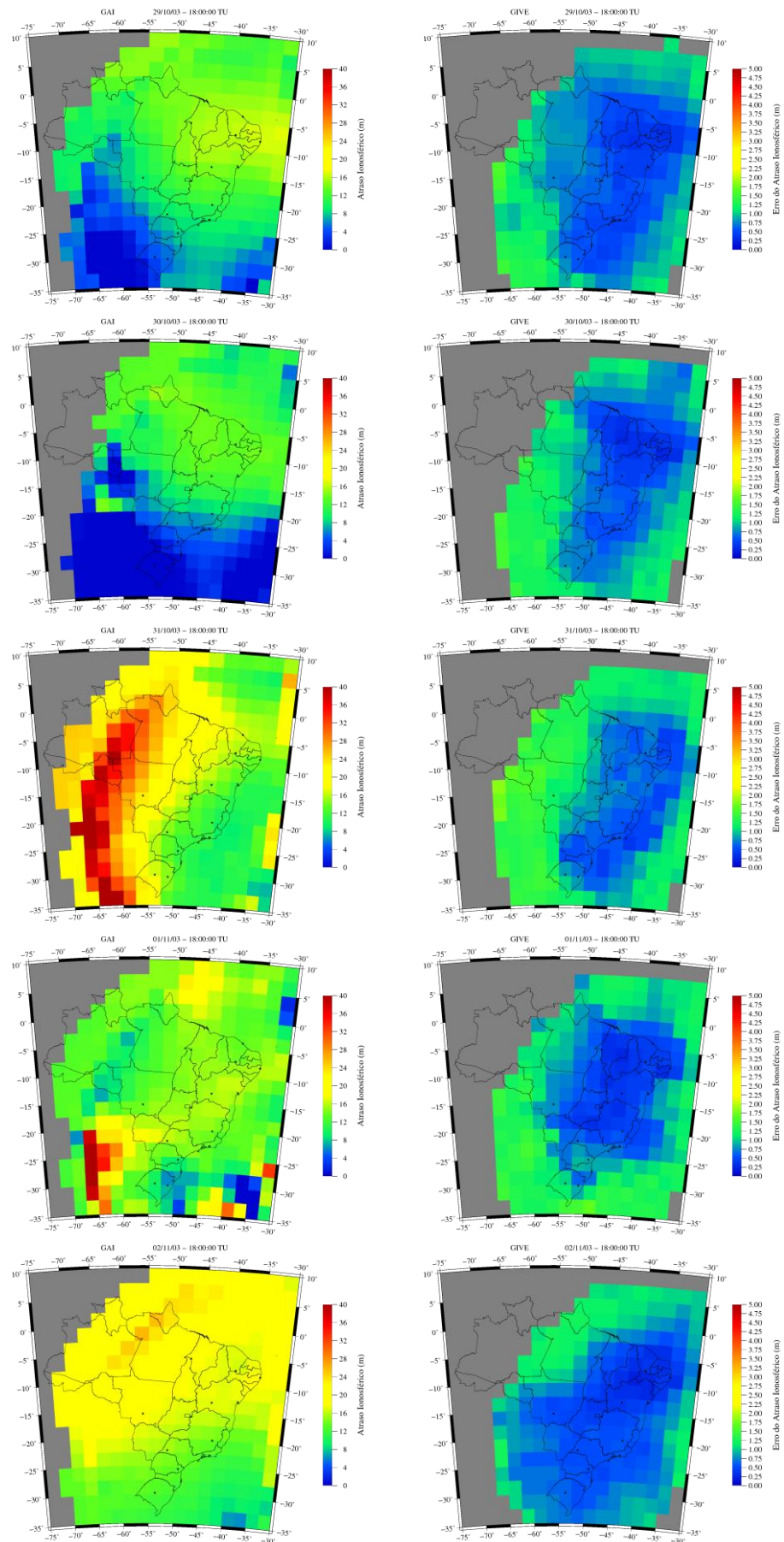
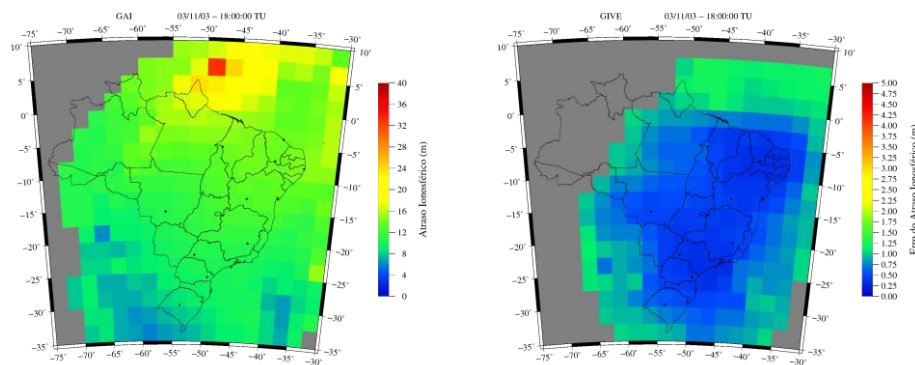


Figura 44 – Grade ionosférica e GIVE (Out/2003) – (17-18 UT). (Continua ...)



(Continuação ...) Figura 44 – Grade ionosférica e GIVE (Out/2003) – (17-18 UT).

Nos mapas apresentados nas Figuras 42, 43 e 44 tratam da representação gráfica da grade ionosférica e seu respectivo erro (GIVE) a um nível de confiança de 99,99%. É importante salientar que o IGP, para o qual o atraso ionosférico foi estimado, está localizado no ponto central de cada célula representada. Nos mapas que representam a grade do atraso ionosférico (GAI) vertical, as células na cor cinza representam os IGPs que não tiveram estimados os valores de atraso ionosférico, devido à ausência de pontos ionosféricos observados dentro dos limites do raio de busca. Já nos mapas que representam o erro do atraso ionosférico vertical (GIVE), as células na cor cinza podem ser devido à: 1) o valor de atraso ionosférico do IGP não foi estimado, devido à ausência de pontos ionosféricos observados dentro do raio de busca, e consequentemente o erro desta estimativa também não foi calculado; 2) apesar de se ter estimado o atraso ionosférico do IGP, o erro desta estimativa não está disponível, pois não foi utilizado um número de pontos suficiente para se realizar uma análise estatística confiável.

Uma limitação importante que deve ser destacada é que o conjunto de dados disponíveis para o período analisado teve uma cobertura limitada devido ao baixo número de estações GNSS disponíveis no Brasil, nos anos de 2001, 2002 e 2003. O número de estações disponíveis para o processamento variou de 9 a 14. Consequentemente, verifica-se nos mapas do GIVE (Figuras 42, 43 e 44) que as estimativas de atraso ionosférico, principalmente na região norte do país, não possuem pontos ionosféricos observados suficientes para se determinar um intervalo de confiança.

Outra característica, observada nos mapas da GIVE, é que as estimativas mais precisas do atraso ionosférico estão localizadas na área central de cobertura da rede de estações, onde os valores para o período analisado variam de poucos milímetros até, aproximadamente, 75,0 cm. A medida que se afasta da área central em sentido às bordas, o erro das estimativas aumentam gradativamente. Este comportamento se deve ao fato de na

área central de cobertura se ter disponível uma quantidade maior de pontos ionosféricos observados com o satélite num ângulo de elevação mais elevado, enquanto que à medida que se aproxima das bordas, o número de pontos ionosféricos observados diminui e os mesmos começam a ser obtidos de satélites com baixos ângulos de elevação.

Portanto, os IGP's, que estão localizados nas bordas da rede de estações e que não possuem seu respectivo erro na GIVE, não possuem um intervalo de confiança e, conseqüentemente, a qualidade das correções aplicadas a partir destes IGP's não é conhecida.

7.3.2 Grade de atraso ionosférico e GIVE gerados para a América do Sul e Central

Como pôde ser observada na seção anterior, devido ao baixo número de estações e sua distribuição, a grade ionosférica gerada cobre parte do país e, com base no GIVE, o erro cometido ao aplicar a correções a partir desta grade é conhecido para uma área ainda menor.

Nesta seção é realizada uma análise usando dados de estações distribuídas pela América do Sul e Central, sendo que algumas também fazem parte da rede do IGS, num total de 52 estações. Os dados foram coletados no dia 11 de maio de 2006 (dia do ano: 131).

Para este conjunto de dados, como trata-se de apenas um dia de processamento, as tendências interfrequências foram estimadas época por época, sem a utilização de valores obtidos de processamento de dias anteriores. A tendência interfrequência dos receptores é apresentada na Figura 45.

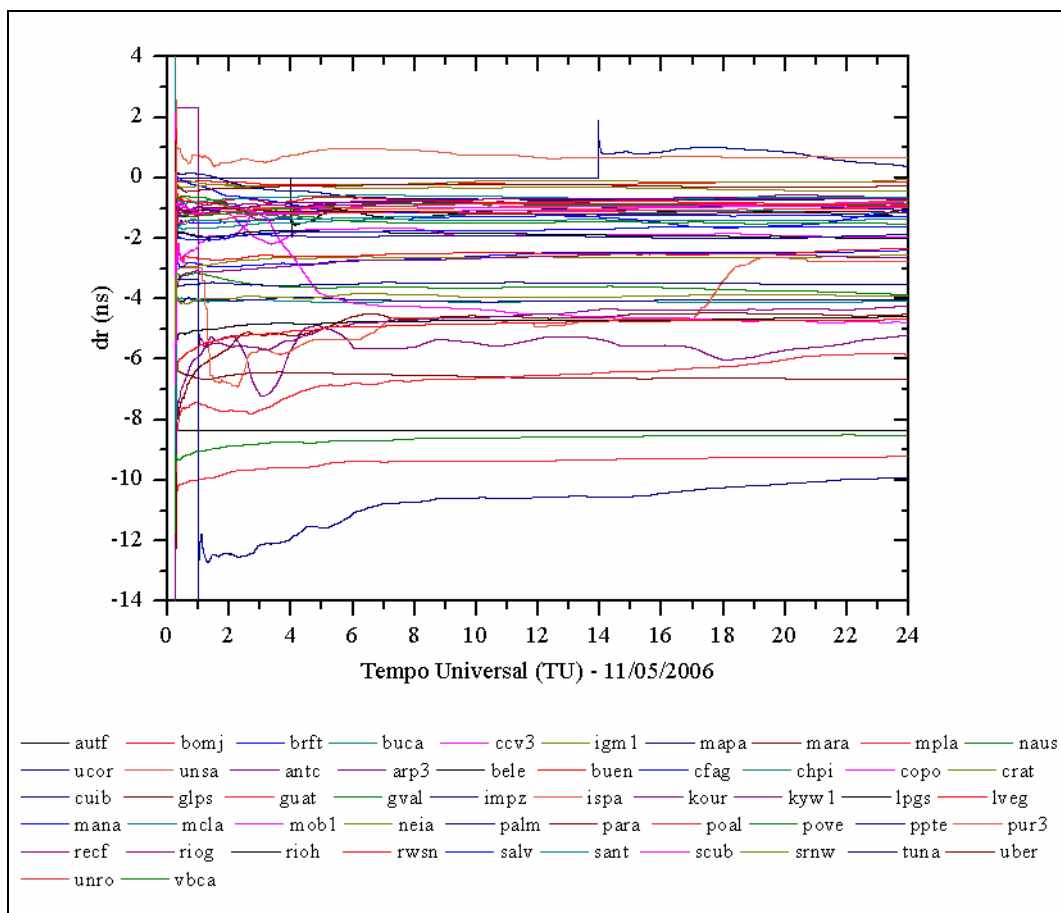


Figura 45 – Tendência interfrequência dos receptores GNSS estimada para 11/05/2006.

Pela Figura 45 pode-se observar que as estimativas estabilizam rapidamente e mantêm a natureza constante, conforme o esperado. A partir das tendências interfrequências dos satélites e dos receptores pode-se calcular então os valores de atraso ionosférico e, consequentemente, os valores do VTEC absoluto. Os gráficos da Figura 46 apresentam os valores de VTEC relativos, ou seja, afetados pelas tendências interfrequências, e os valores absolutos obtidos época por época, simultaneamente à determinação dos valores das tendências interfrequências dos satélites e dos receptores.

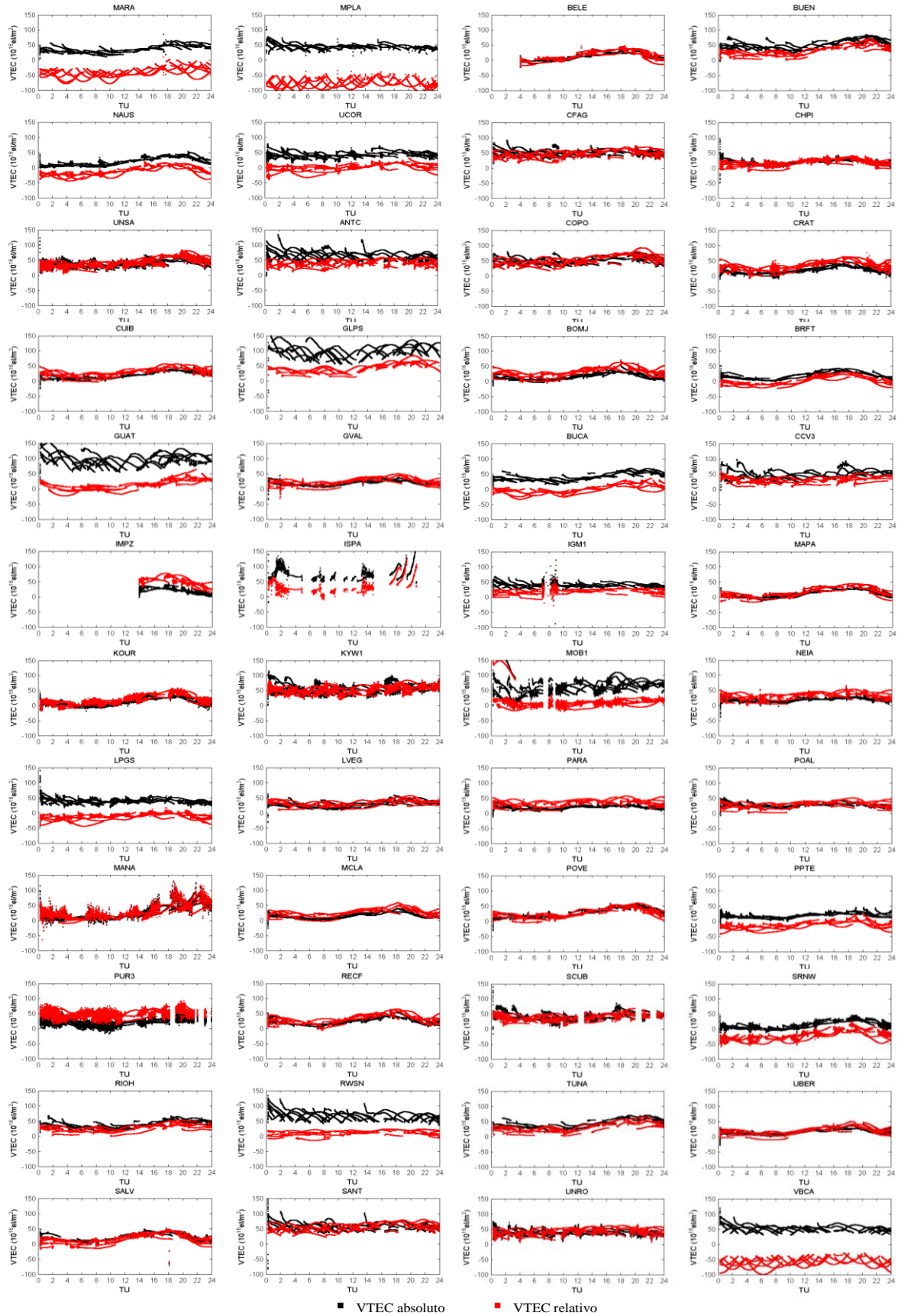


Figura 46 – VTEC relativo e absoluto (Mai/2006).

Nos gráficos da Figura 46 pode-se verificar que após o processo de calibração são obtidos valores de VTEC absoluto. Esta característica é mais perceptível em dados coletados em períodos de baixa atividade solar, pois o erro do atraso ionosférico é menor que o erro devido à tendência interfrequência, fazendo com que os valores de atraso e de VTEC sejam negativos. No período de alta atividade solar este comportamento é pouco perceptível, pois normalmente o erro do atraso ionosférico é maior do que aquele provocado pela tendência interfrequência, resultando em valores de atraso e de VTEC sejam positivos. Na Figura 46, os dados das estações analisadas foram coletados em período de baixa atividade solar, logo nota-se que o valor médio de VTEC é em torno de 60-70 TECU.

A partir dos valores de VTEC absoluto foi realizada a estimação do atraso ionosférico para o IGP e então gerada a grade de atraso ionosférico e o GIVE. As Figuras 47, 48 e 49 apresentam as grades de atraso ionosférico e seu correspondente GIVE, para as 8, 12, 16 e 20 TU (aproximadamente 5, 9, 13 e 17 HL), para as resoluções $1^\circ \times 1^\circ$, $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ e $5^\circ \times 5^\circ$, respectivamente. As estações estão representadas pelos pontos pretos nos mapas.

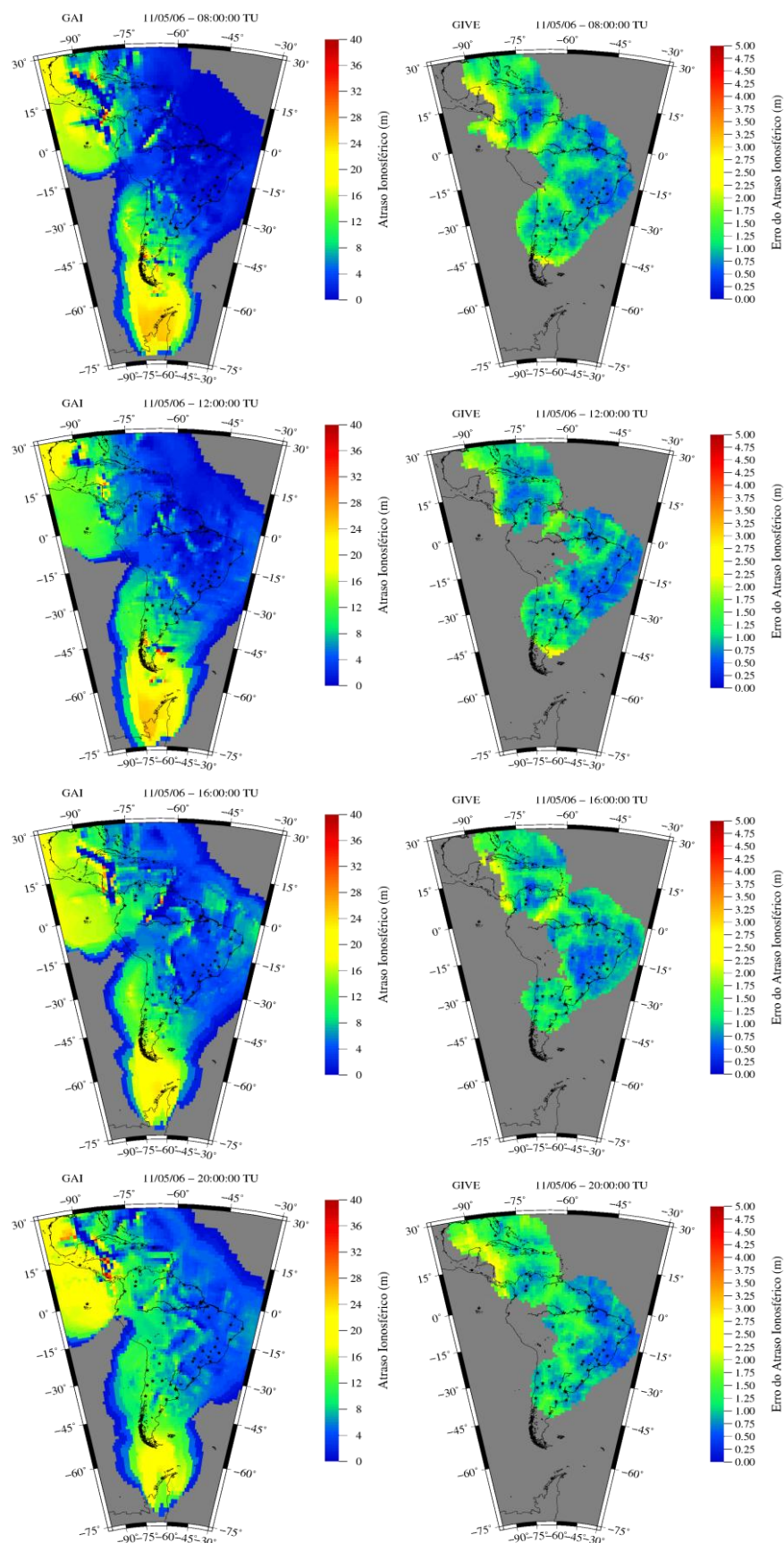


Figura 47 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$ para a América do Sul e Central (Mai/2006).

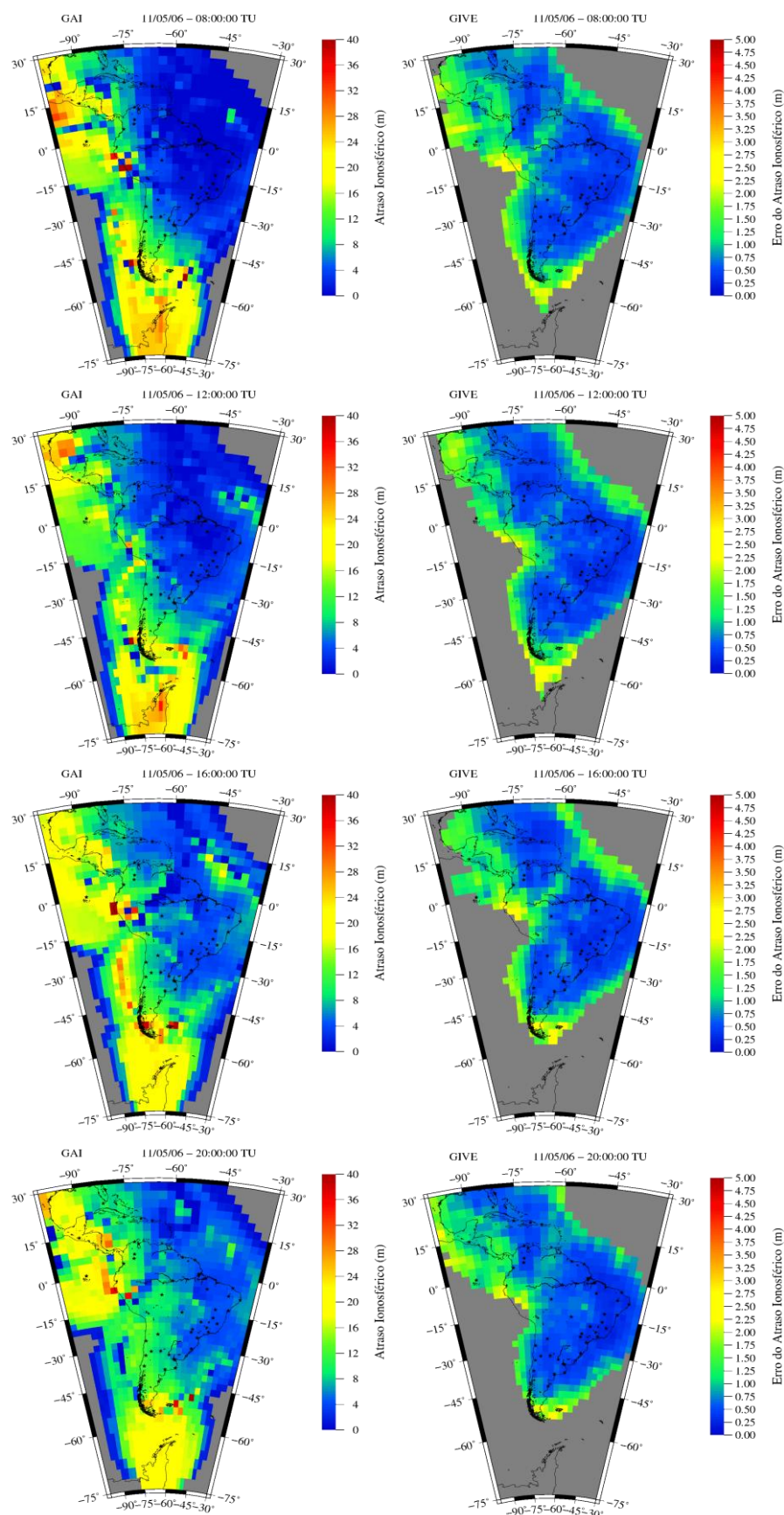


Figura 48 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ para a América do Sul e Central (Mai/2006).

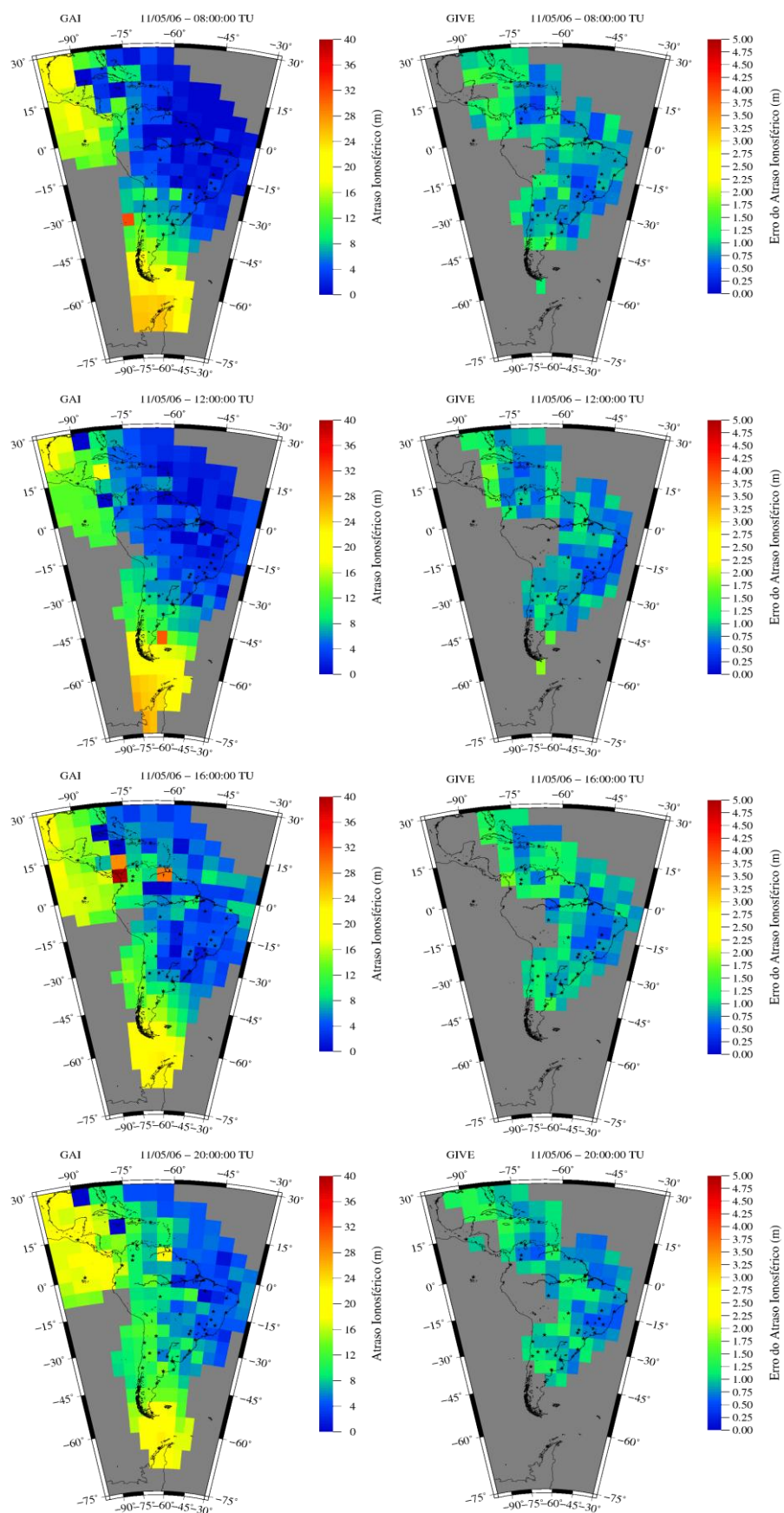


Figura 49 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 5°x5° para a América do Sul e Central (Mai/2006).

Nas Figuras 47, 48 e 49 são apresentados os resultados obtidos para o processamento *off-line*, das observações realizadas pelas estações de referência distribuídas na América do Sul e Central. Analisando os resultados, pode-se verificar que quando se utiliza a grade com resolução de 5°, apenas os gradientes espaciais com dimensões maiores do que 5° são representados, ou seja, há uma suavização dos gradientes espaciais de dimensões menores. À medida que a resolução da grade aumenta, até chegar a 1°, se observa que a representação da variabilidade espacial do atraso ionosférico melhora consideravelmente. Entretanto, ao observar o GIVE é notado que a resolução da grade ionosférica, em termos de confiabilidade, é limitada pela distribuição da rede de estações de referência e pelo número de pontos ionosféricos disponíveis para o cálculo do atraso ionosférico no IGP.

Este comportamento pode ser verificado claramente ao analisar o GIVE das 12 TU (9 HL), para as resoluções de 1°, 2,5° e 5° (Figura 50). Para a grade com resolução de 1° observa-se que ao norte da América do Sul não estão disponíveis as estimativas do erro do atraso ionosférico. Neste experimento, esta região é caracterizada por um número reduzido de estações de referência. Logo, a não disponibilidade do GIVE deve-se ao fato de não haver um número suficiente de pontos ionosféricos para estimar a qualidade do atraso ionosférico, calculado para um IGP em uma grade com resolução de 1°. Para a grade com resolução de 2,5° pode-se verificar que foi possível a estimativa da GIVE para toda a área de cobertura da rede de estações.

Finalmente, numa análise da grade com resolução de 5°, assim como da grade de 1°, nota-se algumas regiões onde o GIVE não pode ser estimado. Isto ocorre, principalmente, devido aos IPPs observados apresentarem valores discrepantes em função do gradiente espacial, o que resulta em uma alta incerteza para o valor de atraso ionosférico estimado para um determinado IGP, assim, o correspondente GIVE fica configurado como não disponível.

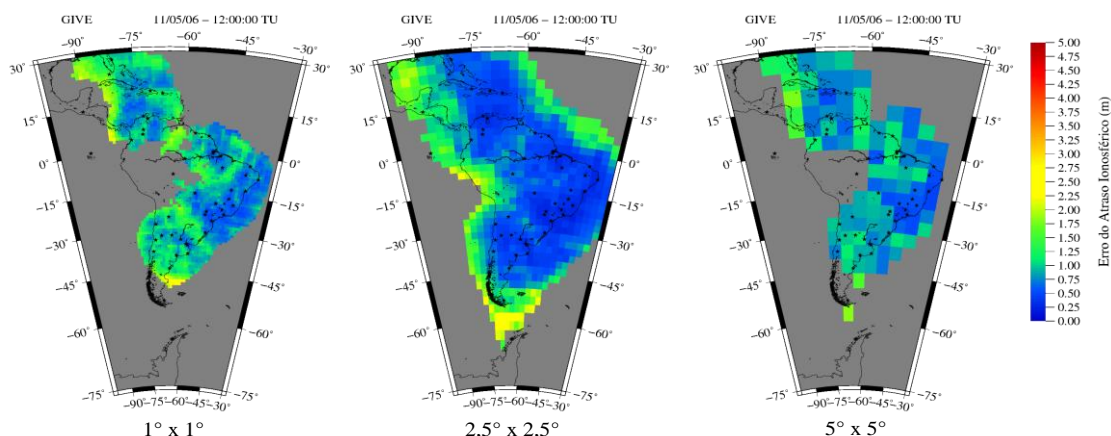


Figura 50 – GIVE para as grades com resolução de 1°, 2,5° e 5°.

Para a configuração da rede de estações de referência usada neste experimento, pode-se concluir que a grade ionosférica com resolução de 2,5° x 2,5° possibilita a utilização da grade com seu respectivo erro em toda a América do Sul e Central, tornando-se a opção mais indicada. Observa-se ainda que, quando se tem um número maior de estações, a grade ionosférica com resolução de 1° pode ser usada. Os resultados apresentados estão em conformidade com aqueles obtidos no capítulo 6.

7.3.3 Grade de atraso ionosférico e GIVE gerados com dados de Nov/2009

Nesta seção é realizada uma análise do método para a geração da grade ionosférica proposta neste trabalho, usando dados recentes das estações da RBMC-IP e da REDE GNSS SP, que transmitem as medidas das observáveis em tempo real, via protocolo de transporte NTRIP. Neste experimento foram utilizados dados de 29 estações, coletados no dia 22/11/2009 (dia do ano: 326), no período de baixa atividade solar e num dia em de atividade ionosférica calma.

Para este conjunto de dados, como se trata de apenas um dia de processamento *on-line*, as tendências interfrequências foram estimadas em tempo real. Os mapas da Figura 51 apresentam os valores de VTEC calculados antes e após a correção da tendência interfrequência dos satélites e dos receptores.

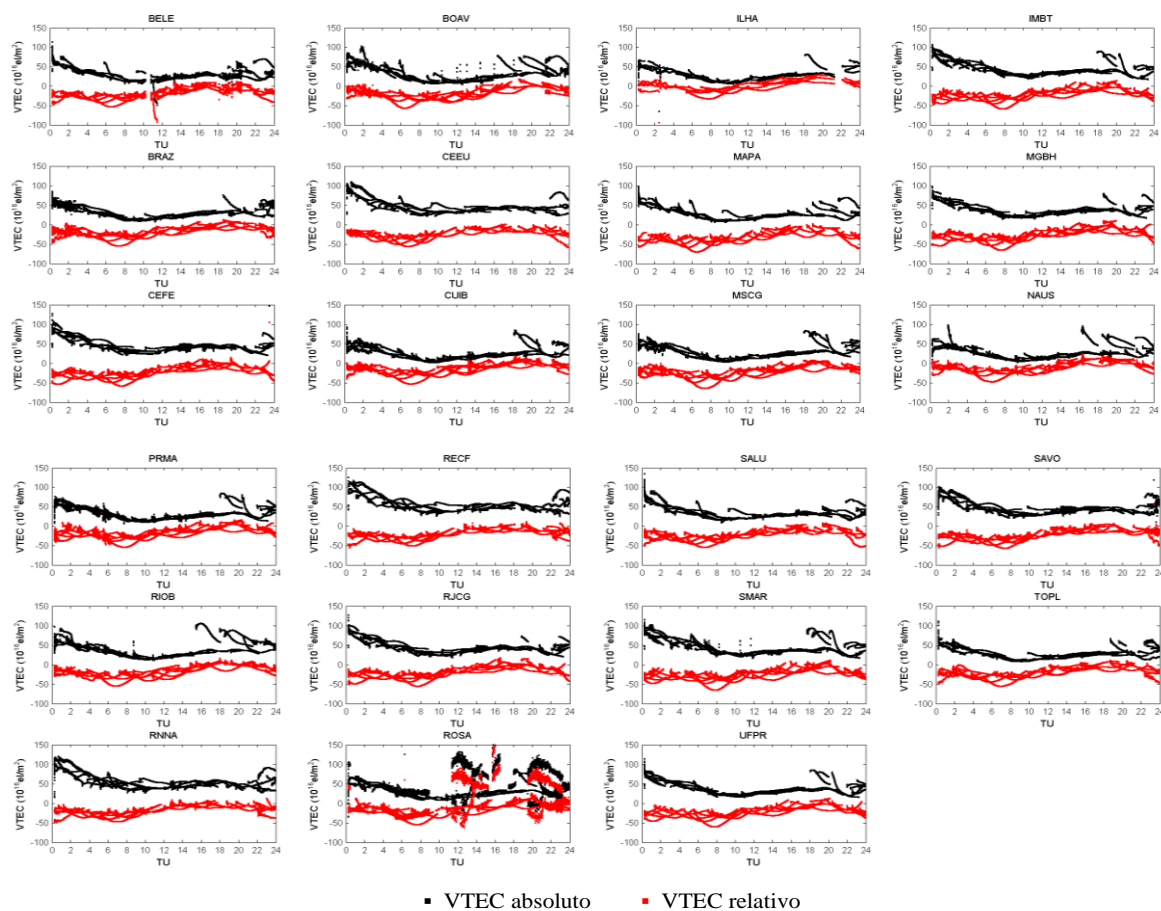


Figura 51 – VTEC relativo e absoluto (Nov/2009).

Nos gráficos da Figura 51, como os dados das estações analisadas foram coletados em período de baixa atividade solar, logo nota-se que o valor médio de VTEC é em torno de 30-45 TECU. Para se ter outra fonte de comparação, nos mapas ionosféricos do CODE, o valor médio do VTEC foi de 42,6 TECU. Deve-se salientar que no cálculo deste valor médio, não foram consideradas as primeiras horas de processamento devido às instabilidades no início das estimativas das tendências interfrequências dos satélites e dos receptores. Também nota-se que o processamento da estação ROSA apresentou resultados instáveis a partir das 11:00 TU, sendo necessários mais estudos para verificar o que ocorreu. A partir das estimativas dos valores de VTEC absoluto foram geradas a grade ionosférica e o GIVE.

A grade de atraso ionosférico e seu correspondente GIVE, para as 8, 12, 16 e 20 TU (aproximadamente 5, 9, 13 e 17 horas local), para as resoluções $1^\circ \times 1^\circ$, $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ e $5^\circ \times 5^\circ$, são apresentadas respectivamente nas Figuras 52, 53 e 54.

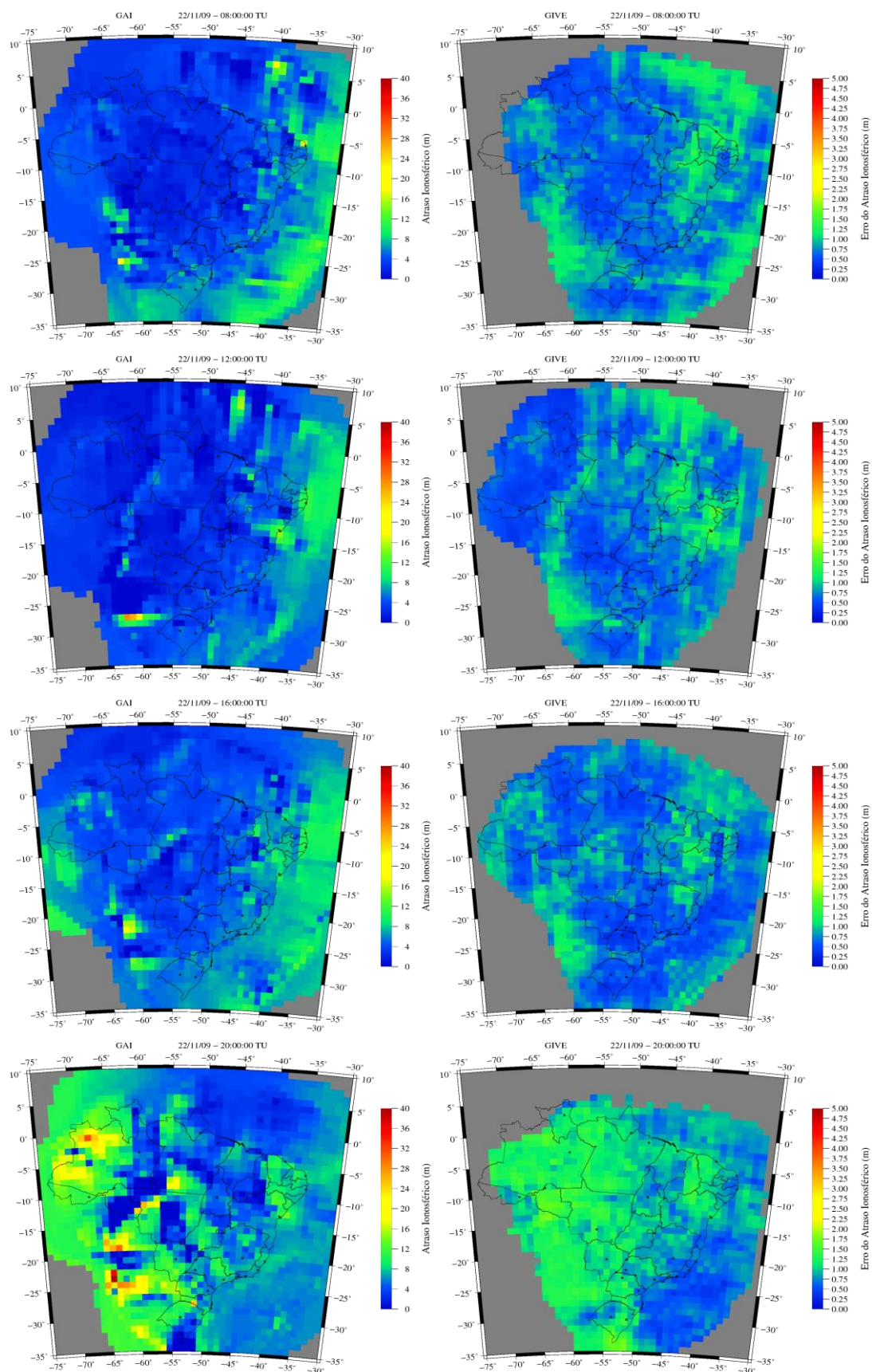


Figura 52 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$ com dados da RBMC-IP e da REDE GNSS SP obtidos via NTRIP (Nov/2009).

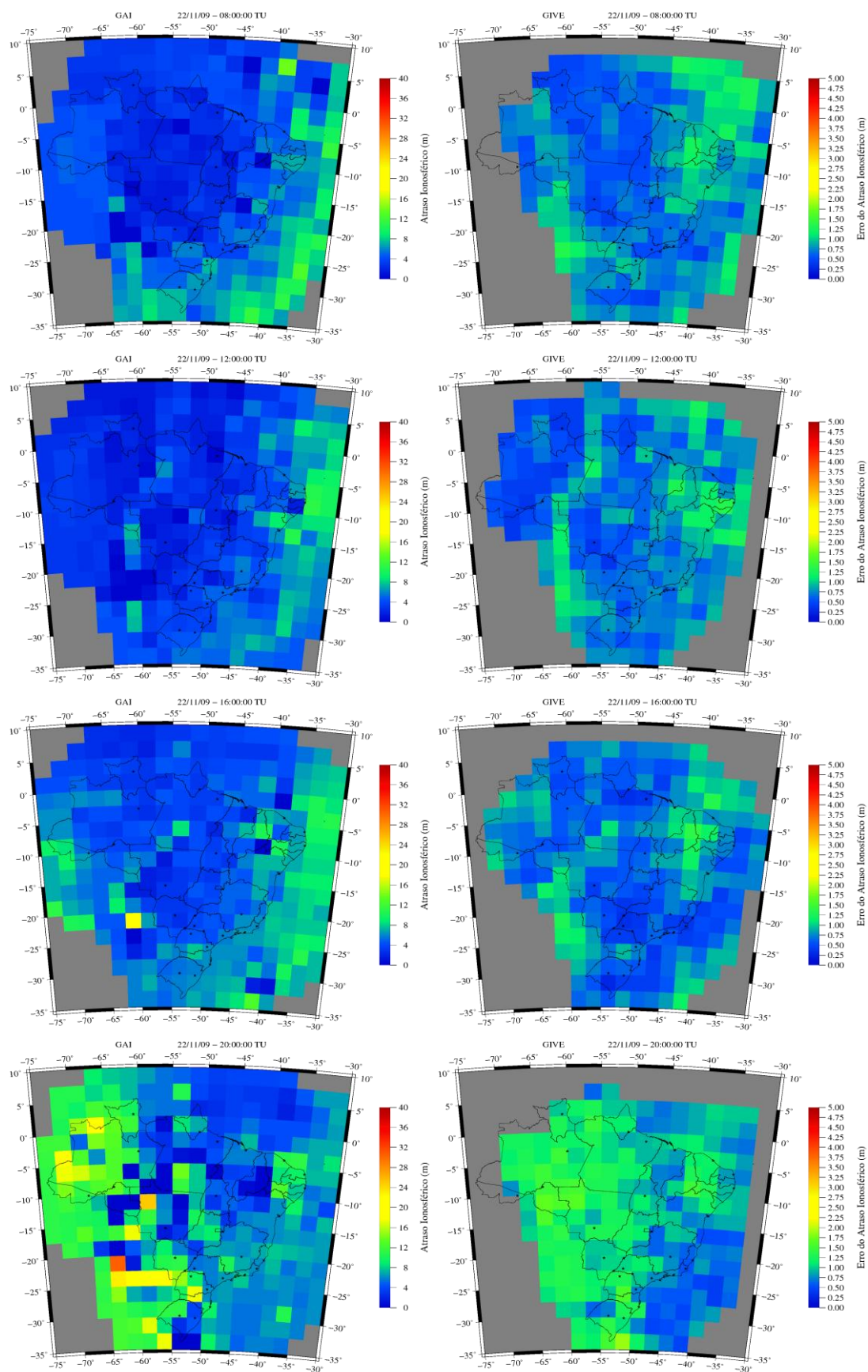


Figura 53 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ com dados da RBMC-IP e da REDE GNSS SP obtidos via NTRIP (Nov/2009).

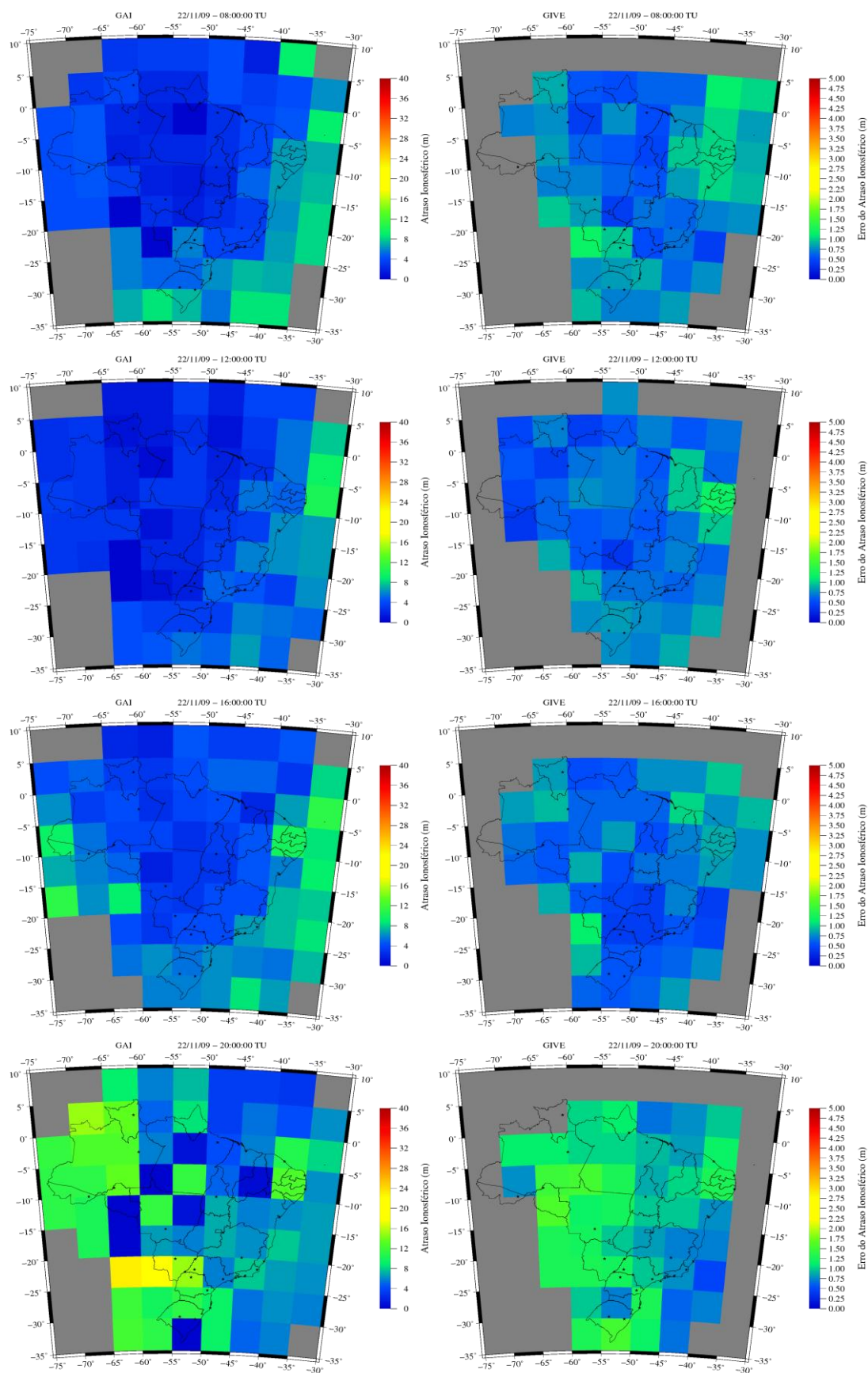


Figura 54 – Grade de atraso ionosférico e GIVE com resolução de 5°x5° com dados da RBMC-IP e da REDE GNSS SP obtidos via NTRIP (Nov/2009).

Os mapas das Figuras 52, 53 e 54 mostram que, usando apenas as estações que disponibilizam dados em tempo real, já é possível obter uma cobertura total do país com a grade de atraso ionosférico. Entretanto, ao analisar os mapas referentes ao GIVE, pode-se verificar que para uma parte da região norte do país o erro da grade ionosférica não está disponível, problema este que pode ser resolvido com o aumento de estações de referência disponibilizando dados em tempo real, naquela região.

7.3.4 A grade ionosférica como ferramenta para geração de mapas de VTEC

A partir dos IGPs, podem ser interpolados valores de atraso ionosférico para qualquer posição dentro da área de cobertura da rede de estações de referência. Dentro das aplicações da grade de atraso ionosférico, pode se destacar duas: a grade pode ser utilizada para corrigir o erro sistemático devido ao atraso ionosférico, nas observáveis GNSS, em operações de posicionamento ou navegação; a grade pode ser utilizada para criar uma superfície, a partir de métodos de interpolação, e então gerar mapas de VTEC em tempo real ou em pós processamento, sendo uma importante ferramenta para estudos e monitoramento da ionosfera.

Nesta seção é apresentada a potencialidade da grade de atraso ionosférico, como ferramenta para os estudos a respeito desta camada, bem como o seu monitoramento quando utilizado o processamento *on-line*. Alguns mapas, para os valores médios das 17-18 TU, resultantes do processamento dos dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003 são apresentados nas Figuras 55, 56 e 57, respectivamente. Nestas figuras são apresentados os resultados obtidos para o primeiro dia de cada lote de processamento.

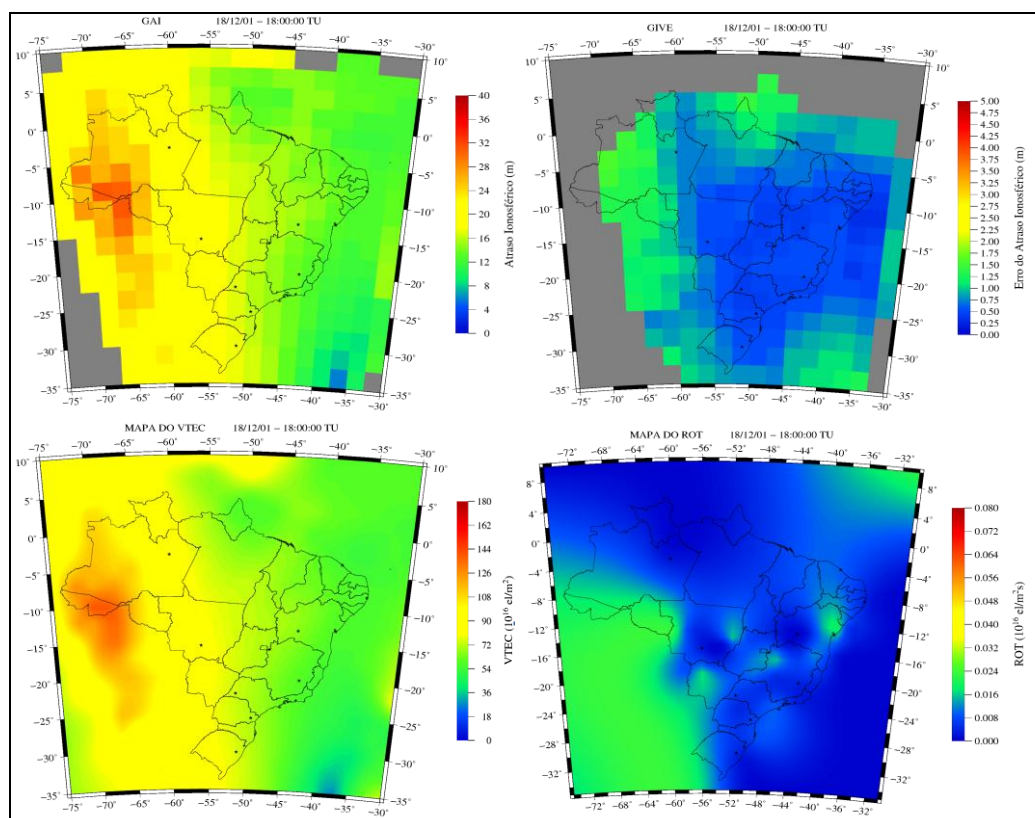


Figura 55 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 352 de 2001.

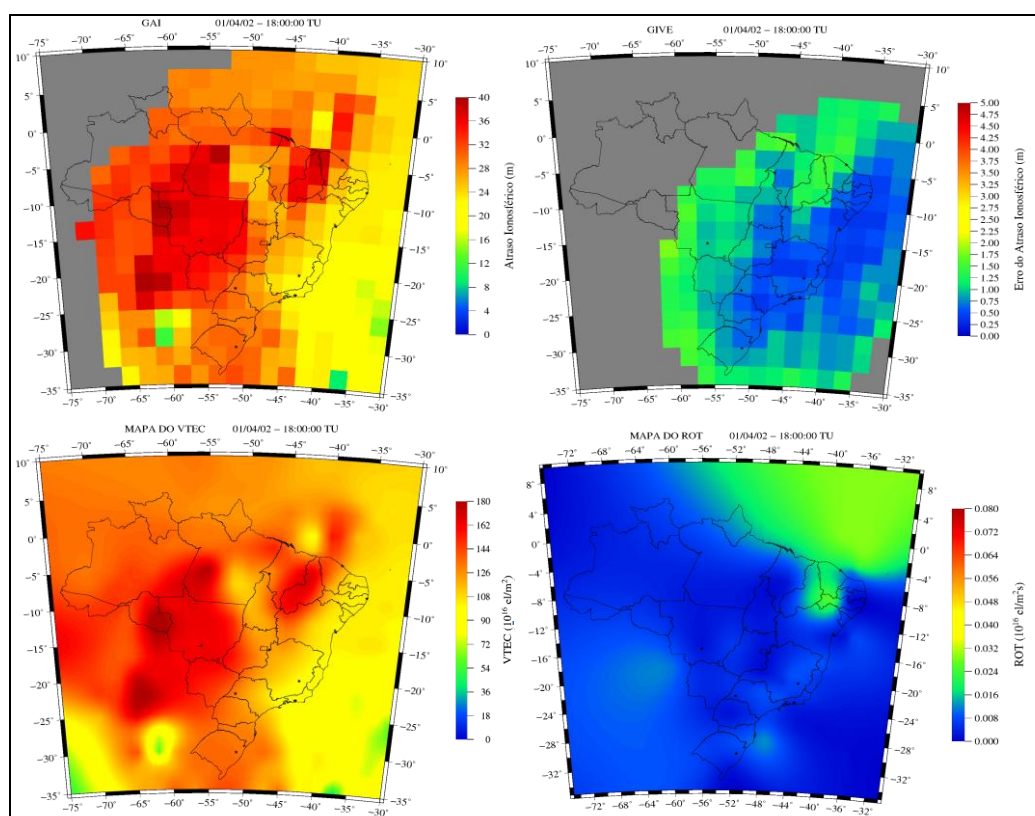


Figura 56 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 91 de 2002.

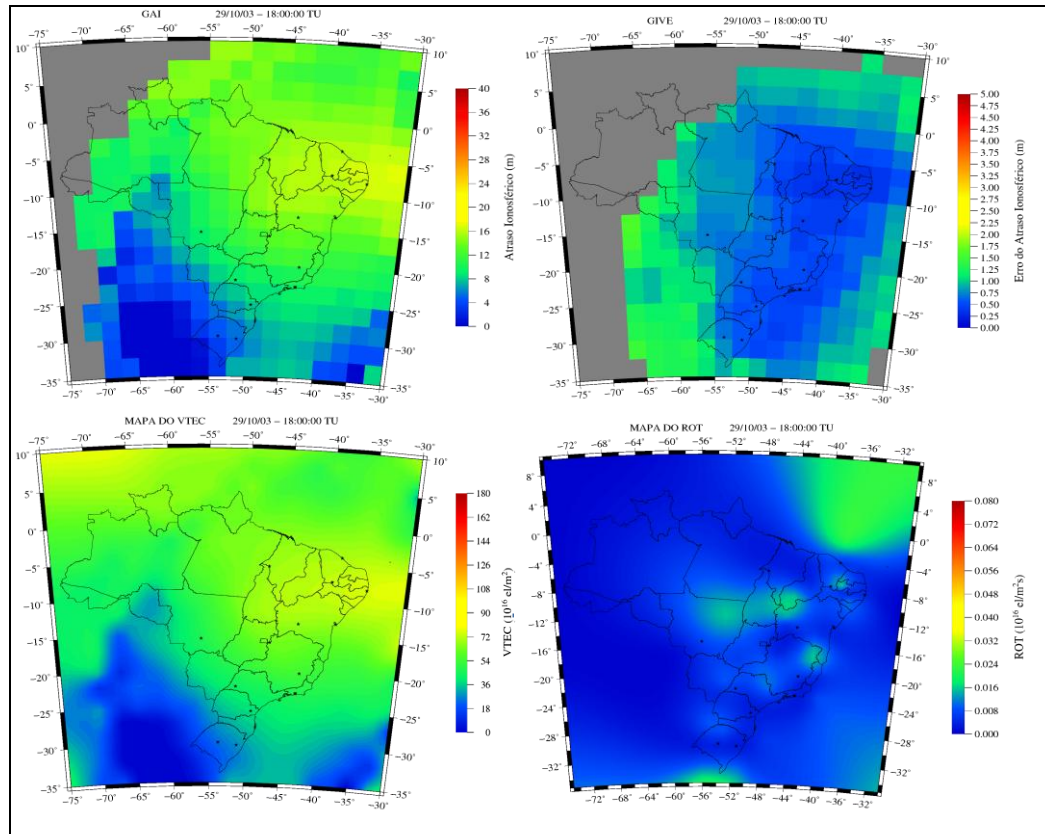


Figura 57 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 302 de 2003.

Nas Figuras 55, 56 e 57 são apresentados a grade de atraso ionosférico (superior esquerdo), o GIVE (superior direito), o mapa de VTEC gerado a partir da grade (inferior esquerdo) e o mapa do ROT (inferior direito). Os mapas foram gerados a partir da grade ionosférica com resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Nota-se também que a grade de atraso ionosférico, utilizada para corrigir as observáveis GNSS do usuário, é apresentada em unidades de metros. Já o mapa de VTEC, utilizado para estudos e representação da ionosfera, é apresentado em TECU. A partir destes resultados pode-se verificar a aplicação do método proposto neste trabalho no monitoramento da ionosfera em tempo quase real. Deve-se esclarecer que apesar dos resultados serem baseados em um processamento *off-line*, com dados de 2001, 2002 e 2003, os mesmos resultados são esperados para os processamentos *on-line*, tendo em vista que a estimação dos valores foi realizada época por época.

O processamento também foi aplicado para os dados coletados sobre a América do Sul e Central. Os mapas para os valores médios das 17-18 TU, resultantes do processamento destes dados são apresentados na Figura 58.

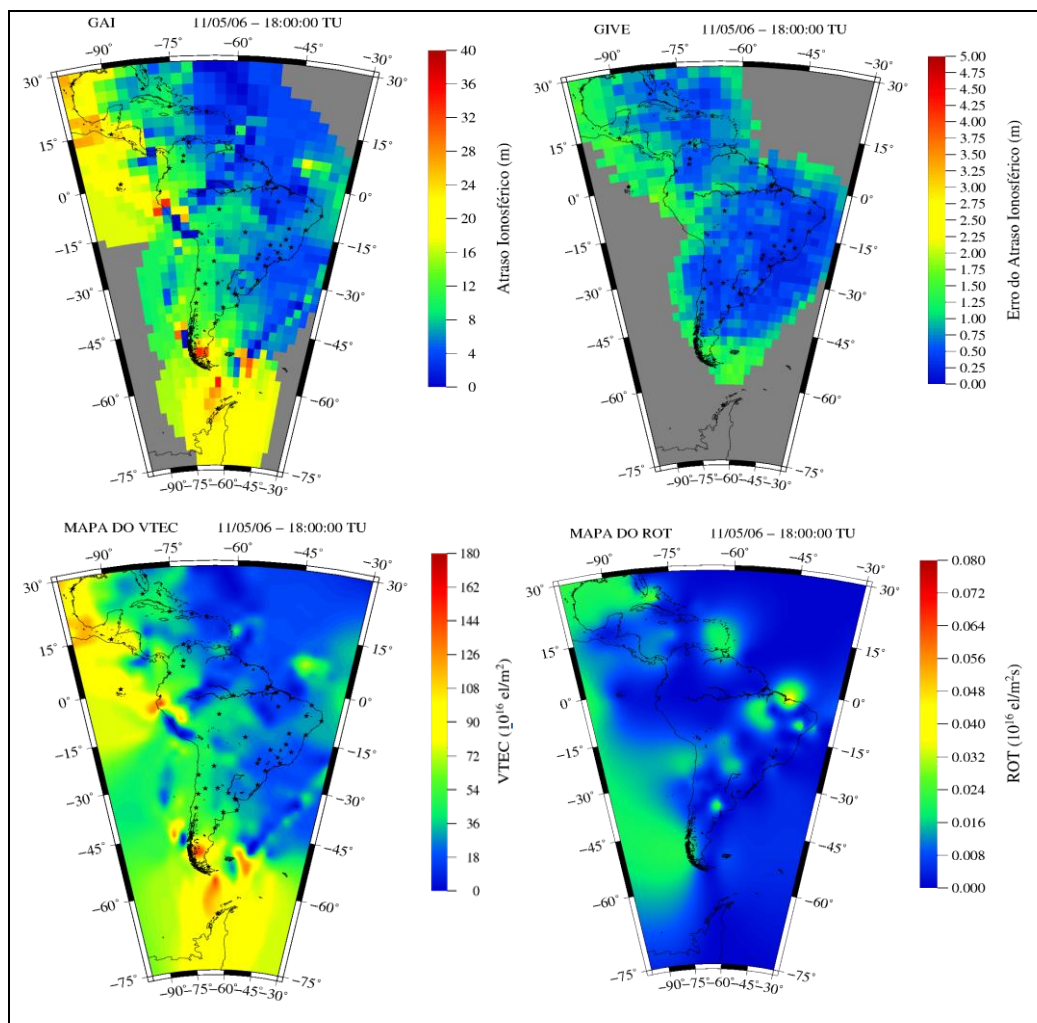


Figura 58 – Grade de atraso ionosférico, GIVE, mapa de VTEC e ROT para as 17-18 TU do dia 131 de 2006.

A Figura 58 mostra que o algoritmo da GI pode ser aplicado em outras regiões além do Brasil, tal como a América do Sul e Central. Além disto, conforme pode ser visto nos mapas apresentados, é importante salientar que no algoritmo foi implementado a função para gerar mapas do ROT, o que viabiliza o estudo da variabilidade espacial e temporal da ionosfera. Os mapas do ROT também podem ser gerados num pós processamento ou em tempo real.

7.4 Integridade da Grade Ionosférica

Nesta etapa é analisada a qualidade da grade ionosférica, considerando a discrepância do valor de atraso ionosférico estimado a partir da grade em relação a um valor

adotado como referência, bem como se a discrepância está dentro do limite determinado a partir do GIVE. Para isto, um receptor é excluído do processo de geração da grade ionosférica e do GIVE. O receptor escolhido para ser excluído do processamento foi o da estação UEPP (22,12°S, 51,40°W). Logo, este receptor é utilizado para simular o receptor do usuário, considerando que o mesmo coleta dados de dupla frequência, e este fato permite analisar a discrepância entre o atraso estimado a partir da grade e o atraso de referência (observado), calculado a partir da combinação linear das observações de dupla frequência coletadas na estação em questão.

Para a análise de integridade, as demais estações de referência foram utilizadas para gerar a grade ionosférica e o GIVE. Em seguida, usando o receptor do usuário (estação UEPP) foi calculado o atraso ionosférico para todos os IPPs observados. Para o mesmo IPP também foi calculado o atraso ionosférico a partir da interpolação dos valores fornecidos pela grade ionosférica, e também foi propagado o erro a partir do GIVE, usando o método de interpolação apresentado pela equação 32. Desta forma, pode-se fazer uma comparação do atraso ionosférico observado e o calculado a partir da grade, bem como verificar se a discrepância entre estes valores está dentro dos limites estabelecidos a partir do GIVE. A Figura 59 apresenta a distribuição das estações utilizadas no processamento dos dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003. As Figuras 60 e 61 apresentam a distribuição das estações para o processamento dos dados de Mai/2006 e Nov/2009, respectivamente.



Figura 59 – Configuração das estações da RBMC utilizadas no processamento (Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003).

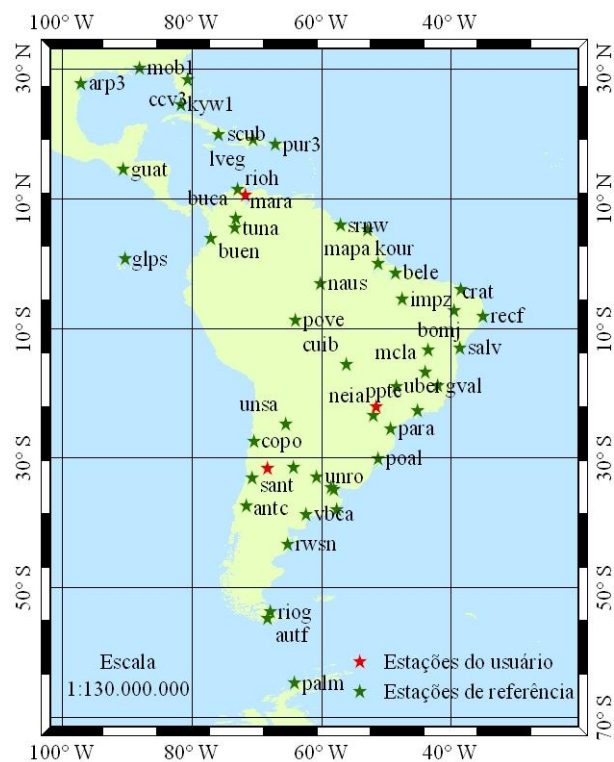


Figura 60 – Configuração das estações na América do Sul e Central utilizadas no processamento (Mai/2006).

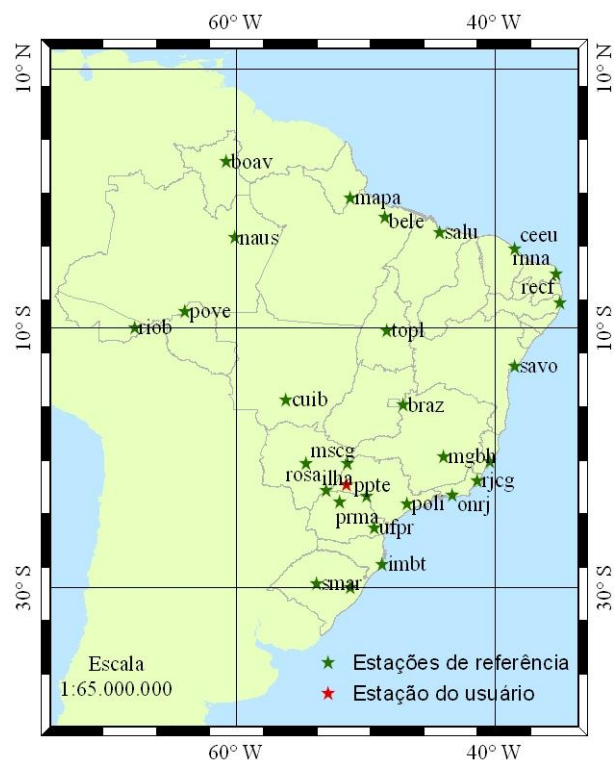


Figura 61 – Configuração das estações RBMC-IP e REDE GNSS SP utilizadas no processamento (Nov/2009).

Deve-se salientar que o atraso observado pelo usuário também deve estar corrigido da tendência interfrequência dos satélites e do receptor. Assim, primeiramente o receptor da estação UEPP foi processado com toda a rede de estações, com o intuito de determinar o atraso instrumental para o conjunto receptor/cabo/antena. Após este procedimento, o receptor UEPP foi excluído e os dados foram reprocessados novamente para gerar a grade ionosférica e o GIVE. Para a análise da GI na América do Sul e Central, também foram utilizadas as estações CFAG, na Argentina, e MARA, na Venezuela, para simular o receptor do usuário, conforme apresentado na Figura 60.

Neste experimento, foram realizados vários processamentos para diferentes configurações, as quais estão resumidas na Tabela 18.

Tabela 18 – Denominação dos processamentos.

| Nomenclatura do processo | Grade ionosférica | Resolução da Grade |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------|
| SCam_r1 | | 1° x 1° |
| SCam_r2.5 | SCam (simples camada da ionosfera) | 2,5° x 2,5° |
| SCam_r5 | | 5° x 5° |
| DGrd_r1 | | 1° x 1° |
| DGrd_r2.5 | DGrd (com decomposição da grade) | 2,5° x 2,5° |
| DGrd_r5 | | 5° x 5° |

O atraso ionosférico obtido a partir das observações realizadas pela estação UEPP, é identificado como I_{UEPP} , o qual é considerado o valor “verdadeiro” do atraso ionosférico. Já, o atraso ionosférico obtido a partir da interpolação dos valores da grade ionosférica é identificado pelo tipo de processamento descrito na Tabela 18, como por exemplo, I_{SCam_r1} para o atraso obtido a partir de uma grade com resolução de 1° e considerando a aproximação de simples camada da ionosfera.

Devido à grande quantidade de dados processados, aqui são apresentados alguns resultados que são representativos do que foi observado em todos os processamentos. As Figuras 62 e 63 apresentam o atraso calculado a partir das observáveis da estação UEPP (I_{UEPP}) e o calculado a partir da grade ionosférica. Também é apresentado o desvio padrão desta correção, definido pela interpolação dos valores do GIVE. Nas figuras são apresentados os resultados obtidos com alguns satélites, de modo a contemplar os comportamentos observados nos outros satélites que não estão presentes nos gráficos. Os resultados apresentados nas Figuras 62 e 63 foram obtidos utilizando a grade ionosférica com resolução

de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, usando o método de decomposição da grade ionosférica ($I_{DGrd_r2.5}$) e o método de simples camada ($I_{SCam_r2.5}$), respectivamente.

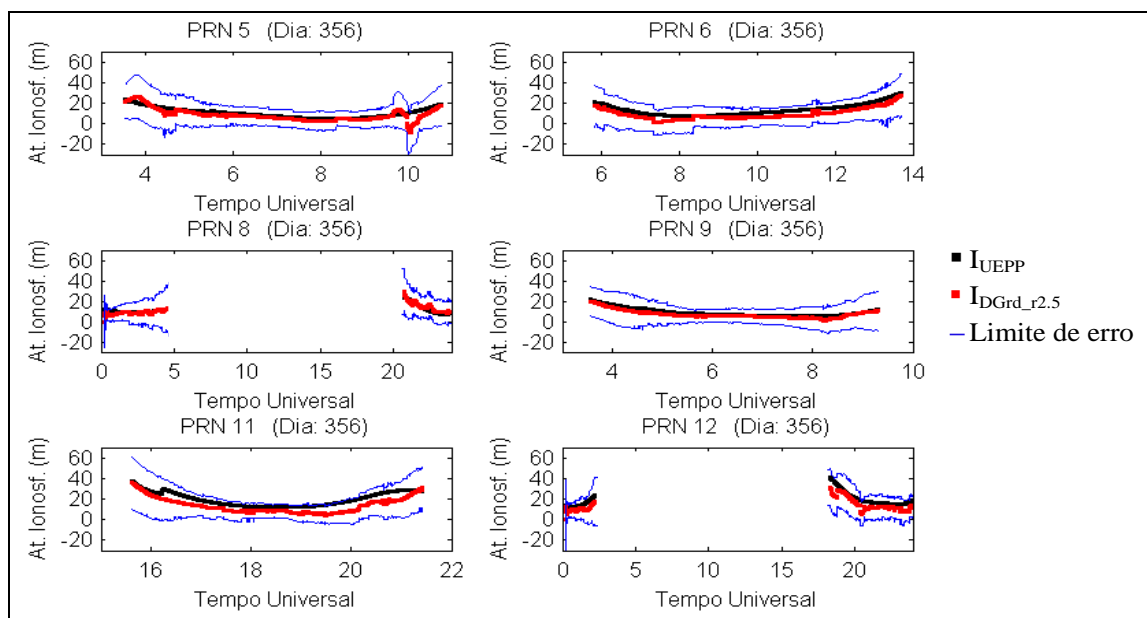


Figura 62 – Comparação entre o I_{UEPP} e o $I_{DGrd_r2.5}$ para Dez/2001.

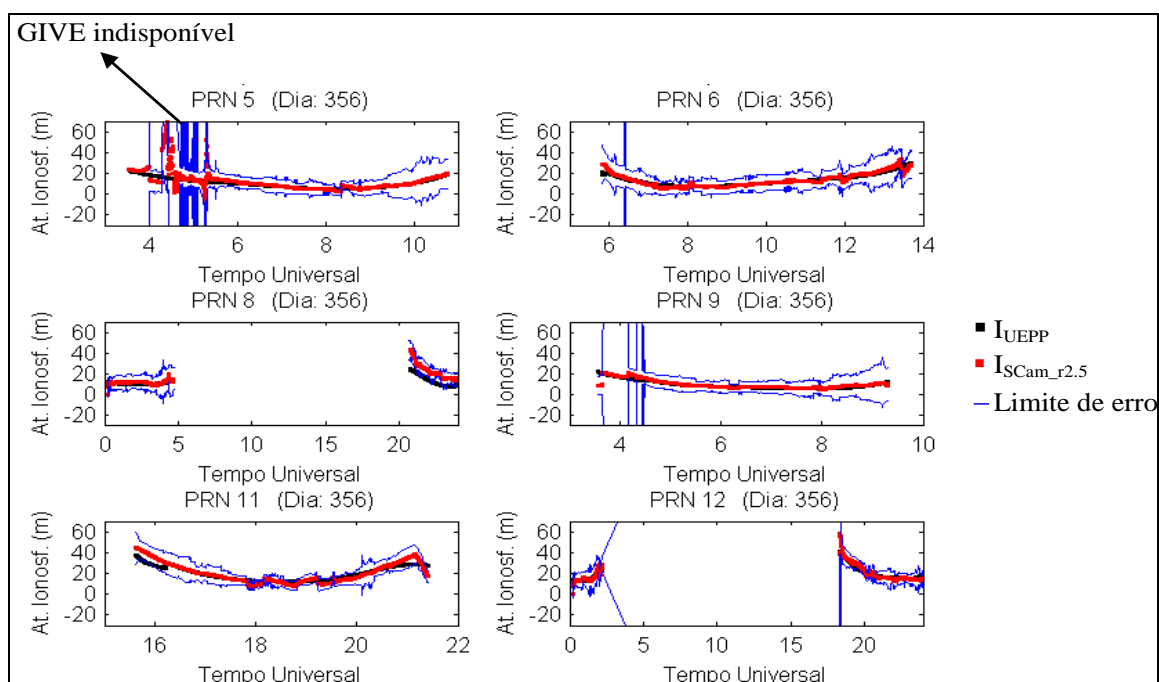


Figura 63 – Comparação entre o I_{UEPP} e o $I_{SCam_r2.5}$ para Dez/2001.

Pelas Figuras 62 e 63 pode-se verificar que o limite do erro da correção do atraso ionosférico é maior, quando se utiliza o método de decomposição da grade ionosférica. Por outro lado, os resultados mostram que quando se usa o modelo de simples camada a GI é mais afetada pelo gradiente espacial do TEC. Nos gráficos esta limitação pode ser observada nos

momentos em que, devido ao aumento na incerteza do atraso ionosférico estimado, os valores do erro obtidos pelo GIVE aumentaram consideravelmente. Isto significa que para um determinado instante ou intervalo de tempo, o GIVE não está disponível. Este comportamento está bem representado nos gráficos para os satélites PRNs 5, 6 e 9, na Figura 63. O mesmo comportamento não ocorre quando se utiliza o modelo de decomposição da grade, conforme apresentado na Figura 62.

Com relação aos valores de atraso ionosférico, pelas Figuras 62 e 63 nota-se que as estimativas obtidas a partir da grade ionosférica estão próximas aos valores observados. Isto pode ser verificado pelo comportamento das curvas de atraso ionosférico, traçadas nos gráficos. Desta análise, pode-se concluir que a grade está conseguindo representar o comportamento espacial e temporal do atraso ionosférico.

Alguns pontos desta análise merecem destaque. Dentre estes, pode-se verificar no gráfico do satélite PRN 8 (Figura 63), a partir das 20:00 TU, e no gráfico do satélite PRN 11 (Figura 62), que a curva do atraso ionosférico estimado tem a mesma forma da curva do atraso ionosférico observado, entretanto há um deslocamento entre estas. Este tipo de comportamento pode ser decorrente do processo de determinação da tendência interfrequência. Entretanto, mais estudos devem ser realizados a este respeito.

As discrepâncias entre o valor de atraso observado e estimado, para cada satélite, são apresentadas nas Figuras 64 e 65.

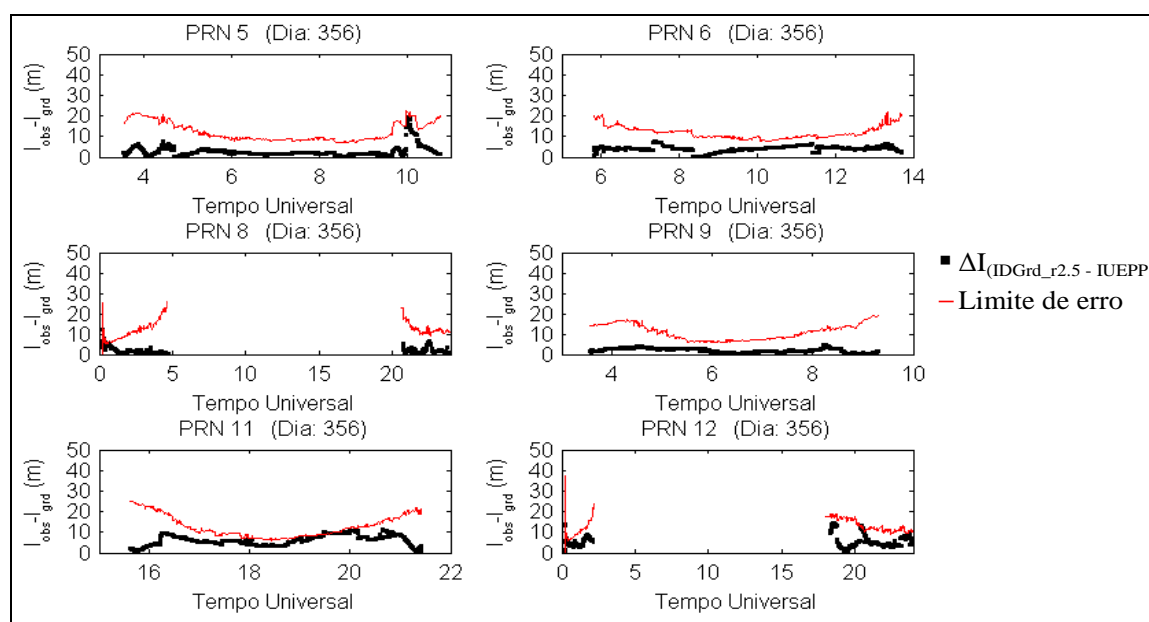


Figura 64 – Discrepância entre os valores de I_{UEPP} e o $I_{DGrd_r2.5}$ para Dez/2001.

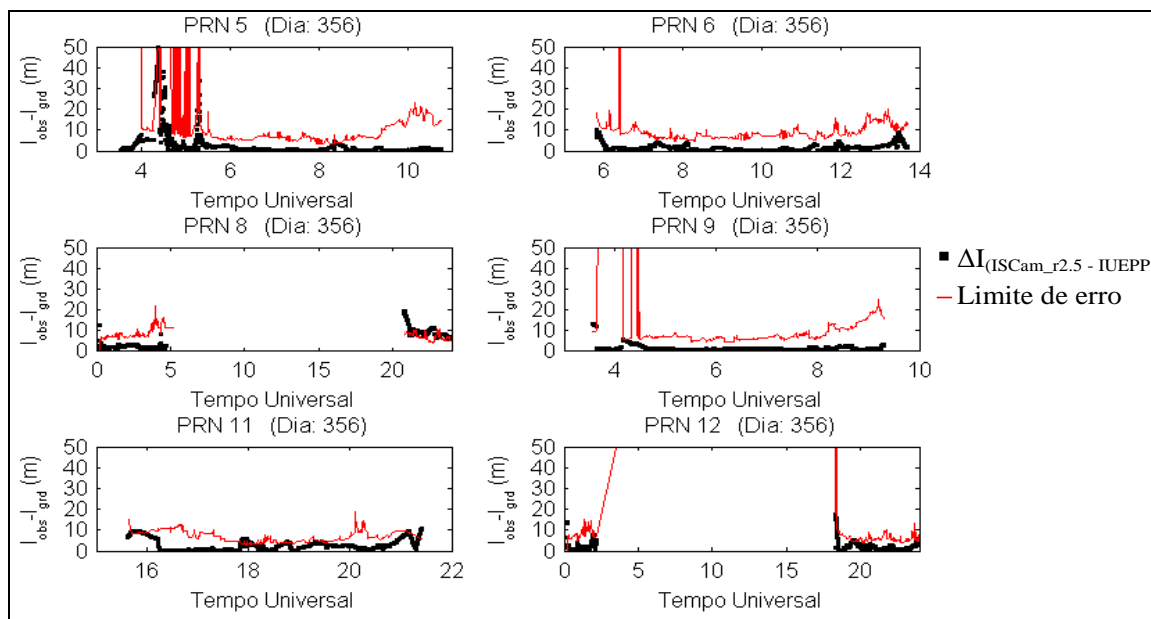


Figura 65 – Discrepância entre os valores de I_{UEPP} e o $I_{SCam_r2.5}$ para Dez/2001.

As discrepâncias apresentadas nas Figuras 64 e 65 foram obtidas pela diferença entre o valor do atraso ionosférico observado (valor “verdadeiro”) e o valor interpolado a partir da grade. O limite de erro apresentado nas figuras foi obtido a partir do GIVE e representa o limite máximo das discrepâncias, com uma probabilidade de 99,9%.

Analisando as Figuras 62, 63, 64 e 65 nota-se que para o PRN 5, há uma instabilidade no atraso ionosférico obtido a partir da grade. Numa análise inicial pode-se detectar que este comportamento ocorreu devido ao baixo número de IPPs usados para estimar o atraso do IGP. Outra característica importante é que esta ocorrência foi detectada no GIVE, conforme pode ser observado nas figuras. Mais estudos devem ser realizados com o intuito de corrigir este tipo de comportamento. Resultados semelhantes aos observados nestas figuras, também foram observados nos demais dias de processamento, para as grades com resoluções de 1°, 2,5° e 5°.

Considerando que o atraso ionosférico observado também contém incertezas, principalmente, quando os satélites estão com baixo ângulo de elevação, é importante uma análise da discrepância entre o atraso de referência (I_{UEPP}) e o atraso estimado a partir da grade ionosférica, em função do ângulo de elevação. Nesta etapa os resultados foram analisados considerando: todas as observações do $I_{UEPP} - I_{DGrd_r2.5}$; discrepâncias observadas para ângulos acima de 20° ($I_{UEPP > EI(20^\circ)} - I_{DGrd_r2.5 > EI(20^\circ)}$); e discrepâncias observadas para ângulos acima de 30° ($I_{UEPP > EI(30^\circ)} - I_{DGrd_r2.5 > EI(30^\circ)}$). As discrepâncias são apresentadas na Figura 66.

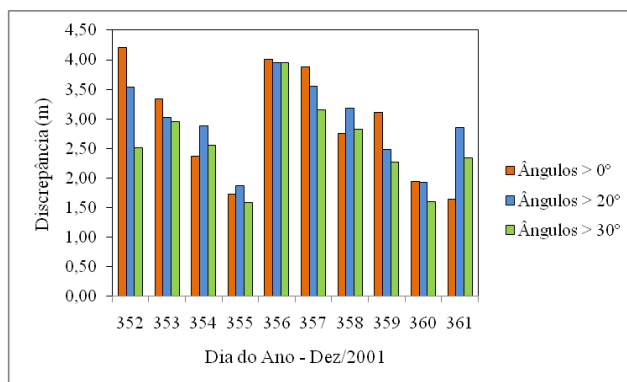


Figura 66 – Gráfico das discrepâncias entre os valores de I_{UEPP} e o $I_{DGrd_r2.5}$ para Dez/2001 em função do ângulo de elevação.

A Figura 66 mostra a discrepância média obtida a partir das discrepâncias calculadas para todos os satélites observados, para cada dia de processamento. Pela figura pode-se observar que as discrepâncias entre o atraso ionosférico observado e o estimado, diminuem à medida que o ângulo de elevação dos satélites aumenta. Entretanto, este comportamento não foi observado para os dias 354, 358 e 361 devido ao pouco tempo de observação de alguns satélites para os ângulos de elevação mais altos.

Para se ter uma análise estatística dos resultados obtidos, foram executadas as seguintes etapas:

- i. para cada dia de processamento, em cada conjunto de dados (Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003), foi calculada a discrepância entre o atraso ionosférico estimado e o observado para cada satélite, época por época;
- ii. para se ter um indicativo da acurácia, a partir das discrepâncias calculadas época por época, para cada satélite, durante todo o arco de passagem do mesmo, foi calculado um valor de discrepância médio e o EMQ (Erro Médio Quadrático);
- iii. em cada dia de processamento foram observados em média 28 satélites. Assim, a partir das discrepâncias médias calculadas para cada satélite, e seus respectivos EMQ, foi calculada uma média ponderada da discrepância para cada dia de processamento, conforme exemplo na Tabela 19. Logo, esta discrepância média, obtida para cada dia de processamento, representa um valor global

das discrepâncias observadas por todos os satélites, num determinado dia;

Tabela 19 – Discrepância e EMQ para a grade ionosférica de 5°x5° (Dez/2001).

| Dia do Ano | Discrepâncias (m) | EMQ (m) |
|-----------------------|------------------------------|--------------------|
| 352 | 3,95 | 1,73 |
| 353 | 3,41 | 4,46 |
| 354 | 3,58 | 1,47 |
| 355 | 2,15 | 0,98 |
| 356 | 2,06 | 0,85 |
| 357 | 2,83 | 1,26 |
| 358 | 3,14 | 3,85 |
| 359 | 3,22 | 1,14 |
| 360 | 1,96 | 1,11 |
| 361 | 2,50 | 2,17 |

- iv. enfim, a partir da discrepância média diária e seu respectivo EMQ, foi calculado uma discrepância média para cada conjunto de dados.

Os resultados obtidos do processamento do conjunto de dados de Dez/2001, Abr/2002, Out/2003, Mai/2006 e Nov/2009 são resumidos respectivamente nas Tabelas 20, 21, 22, 23 e 24, as quais apresentam os valores médios das discrepâncias e respectivo EMQ, a média do limite de erro obtido a partir do GIVE e a integridade. Nas tabelas estes resultados são apresentados considerando: a grade ionosférica com resolução de 1°, 2,5° e 5°; o ângulo de elevação das observações; e os modelos de simples camada da ionosfera e de decomposição da grade ionosférica. As linhas das tabelas correspondentes ao “erro limite” apresentam a média aritmética do erro do atraso ionosférico, calculado a partir do GIVE. Os valores correspondentes à integridade representam a porcentagem de vezes em que a discrepância, entre o atraso ionosférico observado e o estimado, permaneceu dentro do erro limite estabelecido a partir do GIVE.

Iniciando a análise pelos resultados obtidos para os dados de Dez/2001 (Tabela 20), verifica-se que para todas as resoluções de grade ionosférica as discrepâncias entre o atraso ionosférico verdadeiro e o estimado, bem como o correspondente EMQ, foram menores quando se utiliza o modelo de simples camada da ionosfera. Este fato ocorre devido principalmente à combinação de dois fatores: o baixo número de estações de referência e menor gradiente espacial do TEC para o período analisado. Entretanto, pela análise da

integridade o modelo estocástico é mais realístico quando se utiliza a grade ionosférica decomposta, sendo que a integridade variou de 98,81%, na pior situação, à 99,92%, na melhor situação. Já para a grade utilizando o modelo de simples camada, a integridade variou de 91,13% à 98,03%. Pode-se concluir que para os dados de Dez/2001 a melhor opção de processamento é a SCam_r5. Entretanto, se o usuário não pode abrir mão da integridade a melhor opção de processamento é a DGrd_r5, na qual o nível de confiança estimado para as correções esteve correto 99,92% das vezes.

Tabela 20 – Resultados obtidos para Dez/2001.

| Modelo | Resolução | 1° x 1° | | | 2,5° x 2,5° | | | 5° x 5° | | |
|------------------|------------------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | Âng. de Elevação | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° |
| Processamento | | SCam_r1 | | | SCam_r2.5 | | | SCam_r5 | | |
| Simples Camada | Discrepância (m) | 2,93 | 2,30 | 1,99 | 2,64 | 2,11 | 1,78 | 2,57 | 2,01 | 1,69 |
| | EMQ (m) | 1,03 | 0,64 | 0,48 | 0,91 | 0,72 | 0,61 | 0,78 | 0,49 | 0,35 |
| | Erro limite (m) | 9,03 | 8,20 | 7,24 | 10,32 | 8,58 | 7,26 | 10,36 | 9,56 | 8,36 |
| | Integridade (%) | 91,13 | 92,73 | 93,45 | 94,43 | 95,71 | 97,22 | 95,25 | 96,57 | 98,03 |
| Processamento | | DGrd_r1 | | | DGrd_r2.5 | | | DGrd_r5 | | |
| Grade Decomposta | Discrepância (m) | 4,33 | 3,94 | 3,70 | 3,84 | 3,49 | 3,21 | 3,93 | 3,61 | 3,26 |
| | EMQ (m) | 2,18 | 1,98 | 1,87 | 1,30 | 1,18 | 1,09 | 1,32 | 1,22 | 1,11 |
| | GIVE (m) | 12,48 | 10,75 | 9,49 | 12,86 | 11,05 | 9,81 | 12,85 | 11,02 | 9,82 |
| | Integridade (%) | 99,20 | 99,40 | 99,74 | 98,90 | 98,81 | 99,03 | 99,75 | 99,77 | 99,92 |

Ainda na Tabela 20, analisando a grade em função da sua resolução e considerando o melhor resultado obtido combinando discrepância, EMQ e integridade, pode-se verificar que para ambos os modelos analisados a melhor performance foi obtida para a grade com resolução de 5°. Este fato se deve principalmente à densidade de estações de referência utilizadas no experimento, bem como o espaçamento entre estas estações. Estes resultados estão de acordo com as simulações realizadas no capítulo 6. Outro fato que pode ser observado é que há uma melhora significativa nos valores de discrepância, EMQ e integridade, para o processamento dos dados observados com ângulos > 0° e > 30° quando se utiliza o modelo de simples camada. Quando se utiliza o modelo de grade decomposta esta melhora tem menor magnitude. Esta característica observada mostra que o modelo de grade decomposta sofre menor influência do gradiente espacial do TEC, e este comportamento também é observado nas Tabelas 21, 22, 23 e 24.

Os resultados obtidos para Abr/2002 (Tabela 21) mostram que o melhor desempenho, considerando a discrepância, o EMQ e a integridade, foi obtido para o processamento DGrd_r5. Em termos de discrepância, o menor valor observado foi para o modelo de simples camada usando o processo SCam_r2.5 e considerando apenas observações

acima de 30° de elevação. Por outro lado, a integridade da grade quando se usou a decomposição foi 10,45% melhor.

Tabela 21 – Resultados obtidos para Abr/2002.

| Modelo | Resolução | 1° x 1° | | | 2,5° x 2,5° | | | 5° x 5° | | |
|------------------|------------------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | Âng. de Elevação | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° |
| Processamento | | SCam_r1 | | | SCam_r2.5 | | | SCam_r5 | | |
| Simples Camada | Discrepância (m) | 5,03 | 3,94 | 3,07 | 6,89 | 3,27 | 2,89 | 5,57 | 4,39 | 3,51 |
| | EMQ (m) | 3,07 | 1,92 | 1,15 | 6,21 | 1,55 | 1,36 | 4,01 | 2,62 | 1,71 |
| | GIVE (m) | 9,55 | 7,83 | 5,64 | 10,75 | 7,30 | 5,23 | 15,53 | 8,48 | 5,59 |
| | Integridade (%) | 77,51 | 80,91 | 84,75 | 77,19 | 80,40 | 85,58 | 76,42 | 79,90 | 82,90 |
| Processamento | | DGrd_r1 | | | DGrd_r2.5 | | | DGrd_r5 | | |
| Grade Decomposta | Discrepância (m) | 4,86 | 4,29 | 3,84 | 4,76 | 4,08 | 3,66 | 4,41 | 3,71 | 3,21 |
| | EMQ (m) | 2,24 | 1,96 | 1,74 | 1,63 | 1,39 | 1,24 | 1,51 | 1,26 | 1,09 |
| | GIVE (m) | 13,34 | 11,75 | 10,54 | 13,50 | 11,82 | 10,51 | 13,36 | 11,88 | 10,64 |
| | Integridade (%) | 95,04 | 94,99 | 94,73 | 94,94 | 95,98 | 96,03 | 95,30 | 97,8 | 99,09 |

Na Tabela 21 observa-se que, ao contrário do que foi apresentado na Tabela 20, o modelo de decomposição da grade ionosférica proporcionou melhores resultados, em termos de discrepância, EMQ e integridade, quando comparado ao modelo de simples camada, principalmente, para o processamento dos dados com baixo ângulo de elevação e para a grade com resolução de 5°. Num primeiro momento os resultados apresentados para Dez/2001 e Abr/2002 deveriam ser semelhantes, pois a configuração da rede de estações de referência permaneceu praticamente a mesma. Entretanto, nos meses próximos aos equinócios são observados maiores valores de TEC e maiores gradientes espaciais, conforme pode ser observado nas Figuras 55 e 56, bem como nos estudos realizados por Matsuoka (2007).

A análise da integridade, na Tabela 21 mostra que o modelo estocástico é mais realístico quando se utiliza a grade ionosférica decomposta, sendo que a integridade variou de 94,73%, na pior situação, à 99,09%, na melhor situação. Já para a grade utilizando o modelo de simples camada, a integridade variou de 76,42% à 85,58%. Pode-se concluir que para os dados de Abr/2002 a melhor opção de processamento é a DGrd_r5.

Os resultados da aplicação da GI no processamento dos dados rastreados sob a influência de uma forte tempestade magnética são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados obtidos para Out/2003.

| | Resolução | 1° x 1° | | | 2,5° x 2,5° | | | 5° x 5° | | |
|------------------|------------------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | Âng. de Elevação | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° |
| Processamento | | SCam_r1 | | | SCam_r2.5 | | | SCam_r5 | | |
| Simples Camada | Discrepância (m) | 3,93 | 3,55 | 3,59 | 4,12 | 3,63 | 3,39 | 3,23 | 2,94 | 2,85 |
| | EMQ (m) | 1,79 | 1,62 | 1,64 | 1,90 | 1,48 | 1,30 | 1,19 | 1,01 | 0,95 |
| | GIVE (m) | 9,14 | 5,45 | 3,22 | 9,91 | 7,85 | 7,01 | 10,08 | 7,80 | 7,27 |
| | Integridade (%) | 86,97 | 93,90 | 95,28 | 94,57 | 88,06 | 86,42 | 95,34 | 90,43 | 91,06 |
| Processamento | | DGrd_r1 | | | DGrd_r2.5 | | | DGrd_r5 | | |
| Grade Decomposta | Discrepância (m) | 3,86 | 3,40 | 3,10 | 3,35 | 3,10 | 2,76 | 3,17 | 2,89 | 2,61 |
| | EMQ (m) | 2,75 | 2,41 | 2,21 | 1,51 | 1,39 | 1,24 | 1,42 | 1,29 | 1,17 |
| | GIVE (m) | 12,30 | 10,67 | 9,52 | 12,51 | 10,81 | 9,2 | 12,43 | 10,68 | 9,54 |
| | Integridade (%) | 95,92 | 96,45 | 96,51 | 97,32 | 97,41 | 97,55 | 98,25 | 98,12 | 98,47 |

Na Tabela 22 verifica-se que o melhor desempenho considerando a discrepância, o EMQ e a integridade, foi obtido para o processamento DGrd_r5. Estes resultados mostram que sob condições de distúrbio na ionosfera, o modelo de decomposição da grade sofre menos influência da variação temporal e espacial do TEC. Com relação a integridade, pode-se verificar que o modelo de simples camada foi mais afetado pela condição de distúrbio na ionosfera, sendo seu melhor valor igual à 95,28%, ou seja, em 95,28% das vezes a discrepância, entre o atraso ionosférico de referência e o atraso ionosférico estimado a partir da GI, ficou dentro do limite de erro obtido a partir do GIVE. Para o modelo de grade decomposta a integridade chegou à 98,47%.

Ao analisar as Tabelas 20, 21 e 22 pode-se verificar que os melhores resultados foram obtidos a partir da grade ionosférica com resolução espacial de 5°. Considerando a densidade e a distribuição das estações de referência utilizadas no processamento, os resultados mostram-se de acordo com as simulações realizadas no capítulo 6.

Outra característica que é confirmada nos resultados das Tabelas 20, 21 e 22 é que a eficiência da grade ionosférica, para uma determinada resolução, não depende apenas da densidade e distribuição das estações de referência, mas depende também do gradiente espacial do TEC. Este comportamento é observado ao comparar as discrepâncias obtidas para as grades com resolução de 2,5° e 5°, para ambos os modelos testados. Nesta comparação verifica-se que a diferença entre as discrepâncias para o processamento SCam_r2.5 e SCam_r5 é de aproximadamente $4,15 \pm 1,31\%$, $24,95 \pm 8,13\%$ e $18,85 \pm 2,84\%$, respectivamente para os dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003. Já a diferença entre as discrepâncias obtidas com os processamento DGrd_2.5 e DGrd_r5 fica em torno de $2,45 \pm 0,94\%$, $9,57 \pm 2,51\%$ e $5,86 \pm 0,79\%$, respectivamente para os dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003.

Estes valores mostram que, para ambos os modelos testados (SCam e DGrd), a diferença de desempenho das grades com resolução de 2,5° e 5° foi menor para os dados de Dez/2001, período em que foi observado menor gradiente espacial do TEC quando comparado aos períodos de Abr/2002 e Out/2003, os quais por sua vez apresentou uma maior diferença de desempenho da grade em função da resolução adotada.

A GI também foi testada usando uma rede de estações distribuídas pela América do Sul e Central, usando dados coletados em Mai/2006. A distribuição das estações usadas nesta etapa do experimento está apresentada na Figura 60. Para analisar a GI em diferentes regiões, a análise de integridade foi realizada para três estações localizadas em diferentes regiões na América do Sul, sendo elas: CFAG (31,6°S; 68,2°W), localizada na Argentina; PPTE (22,1°S; 51,4°W), antiga UEPP, localizada no Brasil; e MARA (10,6°N; 71,6°W), localizada na Venezuela. Os resultados da aplicação da GI no processamento destes dados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados obtidos para Mai/2006.

| | Resolução | 1° x 1° | | | 2,5° x 2,5° | | | 5° x 5° | | |
|-------------------------|------------------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | Âng. de Elevação | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° |
| Processamento | | SCam_r1 | | | SCam_r2.5 | | | SCam_r5 | | |
| Simples Camada (CFAG) | Discrepância (m) | 3,32 | 3,20 | 2,71 | 3,72 | 3,04 | 2,57 | 3,49 | 2,85 | 2,36 |
| | EMQ (m) | 1,30 | 1,19 | 0,99 | 1,35 | 1,22 | 0,99 | 1,23 | 1,10 | 0,88 |
| | GIVE (m) | 9,28 | 7,83 | 7,19 | 14,77 | 8,11 | 7,46 | 17,12 | 10,18 | 7,69 |
| | Integridade (%) | 49,58 | 58,33 | 70,00 | 49,42 | 58,81 | 69,57 | 51,38 | 59,54 | 70,94 |
| Simples Camada (MARA) | Discrepância (m) | 4,59 | 4,43 | 4,06 | 4,57 | 4,41 | 4,02 | 4,55 | 4,40 | 4,01 |
| | EMQ (m) | 1,13 | 1,19 | 1,08 | 1,03 | 1,09 | 1,01 | 1,06 | 1,13 | 1,07 |
| | GIVE (m) | 10,56 | 10,19 | 9,65 | 10,56 | 10,20 | 9,60 | 10,26 | 9,93 | 9,27 |
| | Integridade (%) | 92,03 | 93,58 | 94,54 | 92,71 | 94,39 | 95,77 | 93,22 | 94,27 | 95,60 |
| Simples Camada (PPTE) | Discrepância (m) | 2,90 | 2,08 | 1,71 | 2,86 | 2,04 | 1,68 | 2,78 | 1,98 | 1,62 |
| | EMQ (m) | 3,52 | 3,56 | 2,61 | 3,50 | 3,54 | 2,57 | 3,49 | 3,57 | 2,62 |
| | GIVE (m) | 12,22 | 10,75 | 9,89 | 13,13 | 10,71 | 9,79 | 13,25 | 10,73 | 9,82 |
| | Integridade (%) | 95,08 | 96,72 | 97,13 | 96,20 | 97,01 | 97,32 | 96,11 | 96,98 | 97,09 |
| Processamento | | DGrd_r1 | | | DGrd_r2.5 | | | DGrd_r5 | | |
| Grade Decomposta (CFAG) | Discrepância (m) | 2,28 | 1,66 | 1,40 | 2,07 | 1,44 | 1,18 | 2,54 | 2,23 | 2,12 |
| | EMQ (m) | 0,81 | 0,76 | 0,69 | 0,74 | 0,65 | 0,59 | 0,69 | 0,76 | 0,79 |
| | GIVE (m) | 11,33 | 9,66 | 8,82 | 11,31 | 9,62 | 8,70 | 11,38 | 9,60 | 8,58 |
| | Integridade (%) | 99,89 | 99,91 | 99,89 | 99,83 | 99,92 | 99,91 | 99,95 | 99,95 | 99,94 |
| Grade Decomposta (MARA) | Discrepância (m) | 2,45 | 2,33 | 2,07 | 2,44 | 2,35 | 2,08 | 3,67 | 3,59 | 3,35 |
| | EMQ (m) | 0,84 | 0,85 | 0,83 | 0,80 | 0,83 | 0,85 | 1,00 | 1,06 | 1,10 |
| | GIVE (m) | 14,09 | 13,30 | 11,98 | 14,07 | 13,25 | 11,91 | 13,66 | 13,04 | 11,72 |
| | Integridade (%) | 99,81 | 99,79 | 99,73 | 99,73 | 99,7 | 99,6 | 99,71 | 99,68 | 99,56 |
| Grade Decomposta (PPTE) | Discrepância (m) | 3,11 | 2,48 | 2,08 | 3,05 | 2,46 | 2,07 | 3,06 | 2,54 | 2,18 |
| | EMQ (m) | 3,51 | 3,53 | 2,60 | 3,47 | 3,55 | 2,61 | 3,53 | 3,56 | 2,61 |
| | GIVE (m) | 13,93 | 11,02 | 9,75 | 13,91 | 11,04 | 9,76 | 14,01 | 11,21 | 9,98 |
| | Integridade (%) | 97,91 | 98,06 | 98,08 | 97,88 | 98,00 | 97,97 | 97,77 | 97,87 | 97,82 |

Na Tabela 23 pode-se verificar que para as estações CFAG e MARA os melhores resultados em termos de discrepância, EMQ e integridade foram obtidos para o processamento DGrd_r1 e DGrd_r2.5. Observa-se ainda que para todos os processamentos com grade decomposta, a integridade ficou acima de 99% para as referidas estações. Já, para o modelo de simples camada, a integridade, para as mesmas estações, variou de 49,42 a 95,60%.

Outra característica que pode ser observada nos resultados obtidos para as estações CFAG e MARA, é que as grades com resoluções de 1° e de 2,5° apresentam resultados próximos, e os piores desempenhos são observados nas grades com 5° de resolução. Estes resultados são consequência do maior número de estações usadas no

processamento, principalmente, nas proximidades das estações analisadas no experimento, conforme pode ser observa na Figura 60.

Com relação à estação PPTE, ainda na Tabela 23, nota-se que os resultados em termos de discrepância e EMQ, foram melhores quando se utilizou o modelo de simples camada. Entretanto, a integridade foi melhor para o processamento utilizando a grade decomposta. Considerando a semelhança da distribuição das estações de referência na vizinhança da PPTE, em relação à distribuição observada na vizinhança das estações CFAG e MARA, e também por se tratar de um período de baixa atividade solar, esperava-se um resultado semelhante aos observados para as estações CFAG e MARA. Num primeiro momento verificou-se a saúde e o estado dos satélites utilizados no processamento, não sendo constatado nenhum tipo de problema com os mesmos. Assim, mais estudos devem ser realizados para verificar tal comportamento.

Finalmente, na Tabela 24 são apresentados os resultados do processamento dos dados obtidos em tempo real, via protocolo NTRIP. Deve-se salientar que foi realizado um processamento *on-line* dos dados, utilizando a estratégia DGrd_2.5. Este processamento *on-line* teve uma duração aproximada de 14 horas. Em seguida, realizou-se o processamento *off-line* dos arquivos, ou seja, as mesmas 14 horas foram processadas após a aquisição de 24 horas de dados. Como se esperava, os resultados dos processamentos *on-line* e *off-line* foram os mesmos. Assim, a Tabela 24 apresenta os resultados do processamento *off-line* dos dados de Nov/2009, para as várias estratégias analisadas, contemplando as 24 horas do dia.

Tabela 24 – Resultados obtidos para Nov/2009.

| | Resolução | 1° x 1° | | | 2,5° x 2,5° | | | 5° x 5° | | |
|------------------|------------------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | Âng. de Elevação | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° | > 0° | > 20° | > 30° |
| Processamento | | SCam_r1 | | | SCam_r2.5 | | | SCam_r5 | | |
| Simples Camada | Discrepância (m) | 1,98 | 1,46 | 1,13 | 1,96 | 1,49 | 1,18 | 2,00 | 1,46 | 1,18 |
| | EMQ (m) | 2,26 | 2,50 | 1,92 | 2,27 | 2,55 | 1,92 | 2,28 | 2,53 | 1,94 |
| | GIVE (m) | 16,61 | 12,82 | 12,01 | 16,53 | 12,73 | 11,11 | 16,02 | 12,47 | 10,96 |
| | Integridade (%) | 92,99 | 93,02 | 93,09 | 93,29 | 93,08 | 93,14 | 93,08 | 93,28 | 93,32 |
| Processamento | | DGrd_r1 | | | DGrd_r2.5 | | | DGrd_r5 | | |
| Grade Decomposta | Discrepância (m) | 2,58 | 2,18 | 1,82 | 2,60 | 2,18 | 1,81 | 2,63 | 2,16 | 1,75 |
| | EMQ (m) | 2,21 | 2,58 | 2,15 | 2,22 | 2,58 | 2,04 | 2,22 | 2,50 | 1,93 |
| | GIVE (m) | 14,64 | 11,47 | 10,16 | 14,58 | 11,37 | 10,07 | 14,66 | 11,46 | 10,11 |
| | Integridade (%) | 98,74 | 98,62 | 98,38 | 98,66 | 98,63 | 98,36 | 98,53 | 98,6 | 98,39 |

Pela Tabela 24 verifica-se uma melhora nos resultados obtidos para ambos os modelos analisados, quando comparados aos resultados obtidos para Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003. Isto pode ser devido ao maior número de estações nas proximidades da estação

PPTE. Outro fator que também teve impacto nos resultados é devido aos dados de Nov/2009 terem sido coletados em período de baixa atividade solar.

Os resultados da Tabela 24 mostram que a melhor estratégia de processamento, em termos de discrepância e EMQ, foi a SCam_r1. Para a integridade, o processamento utilizando a grade decomposta apresentou melhores resultados. De modo geral, pode-se verificar que em períodos de baixa atividade solar os melhores resultados são obtidos com o modelo de simples camada, tendo em vista que são observados menores valores de TEC e baixo gradiente espacial.

Das análises realizadas nesta seção pode-se concluir que a resolução de grade adequada para o processamento, depende da densidade e distribuição das estações de referência, bem como do comportamento espacial e temporal do TEC. Para uma rede com baixo número de estações, como no caso dos processamentos para Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003, os melhores resultados são obtidos usando grades ionosféricas com 5° de resolução. Outro fato que ficou evidenciado é que os modelos de simples camadas e de grade decomposta apresentaram resultados similares para ângulos de elevação acima de 20°, por outro lado, para baixos ângulos de elevação o modelo de grade decomposta sofreu menos influência do gradiente espacial do TEC. Além disto, em períodos de alto gradiente espacial do TEC e sob condições de distúrbios na ionosfera, os melhores resultados são obtidos ao aplicar a grade decomposta. Para períodos de baixa atividade solar e de baixo gradiente espacial do TEC o modelo de simples camada pode ser usado.

7.5 Posicionamento por Ponto a partir da Correção com a Grade Ionosférica

Nesta etapa do trabalho a performance da GI foi avaliada no posicionamento por ponto (absoluto), utilizando a pseudodistância advinda do código C/A, com os dados GPS da estação UEPP (atual PPTE) corrigidos do efeito da ionosfera. Baseado nos resultados apresentados na seção 7.4 e a fim de adotar uma única estratégia para a comparação dos resultados, foi escolhida a estratégia de processamento DGrd_r5 para a análise da correção dos dados de Dez/2001, Abr/2002, Out/2003, Mai/2006 e Nov/2009. Para a análise da GI na América do Sul e Central, utilizando os dados de Mai/2006, além de usar a PPTE o posicionamento por ponto também foi avaliado nas estações CFAG e MARA. É importante

lembrar que os dados analisados contemplam dias de alta atividade solar, de ocorrência de tempestade geomagnética e de baixa atividade solar.

Para se avaliar a melhora da qualidade no posicionamento, as coordenadas geodésicas (φ, λ, h) foram comparadas com as consideradas verdadeiras da estação UEPP/PPTE, MARA e CFAG, para cada instante no posicionamento por ponto. Foi realizado o posicionamento por ponto com os dados sem a correção da ionosfera e com a correção utilizando a grade ionosférica no processamento *off-line*, pois dessa forma, pode-se analisar a melhora dos resultados após a correção do erro sistemático devido à ionosfera utilizando a GI. É importante salientar também que as observáveis do usuário foram corrigidas do atraso ionosférico somente quando estava disponível o GIVE, para pelo menos 3 IGP's circunvizinhos ao IPP do usuário.

O posicionamento por ponto foi processado com o *software* GPSPACE (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*) Versão 3.3, desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*) (NRCan, 2000). No caso em questão, adotaram-se como “verdade de terreno”, as coordenadas no referencial geodésico que está associado às efemérides precisas, ou seja, até 04 de novembro de 2006 estas efemérides adotam o ITRF2000 (*International Terrestrial Reference Frame 2000*) e a partir desta data é adotado o ITRF2005. Em suma, as coordenadas geodésicas (φ, λ, h) estimadas em cada instante de observação foram comparadas com os valores considerados verdadeiros, para os seguintes casos:

- sem a correção do efeito da ionosfera (SCI); e
- com a correção do efeito da ionosfera a partir da grade decomposta, com resolução de 5° (CCI- I_{DGrd_r5}).

Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP) um valor menor ou igual a 7. Foram consideradas apenas as pseudodistâncias observadas com ângulo de elevação acima de 10 graus, e a precisão das mesmas foi adotada como sendo 3 m. Para o processamento também foram utilizadas as efemérides precisas, fornecidas pelo IGS, e as correções do relógio dos satélites geradas pela GSD/NRCan. Estes procedimentos visam minimizar a influência dos diversos erros sistemáticos, deixando apenas o erro devido à influência da ionosfera. Desta forma, a seguir é apresentada a análise da posição planimétrica e altimétrica após a correção do efeito da ionosfera usando a GI.

As Figuras 67 a 71 mostram o comportamento diário das discrepâncias em altitude geométrica, durante as 24 horas de observação para cada dia analisado em Dez/2001, Abr/2002, Out/2003, Mai/2006 e Nov/2009, respectivamente. Deve-se lembrar que as discrepâncias, neste experimento, foram calculadas para cada instante de observação simulando assim o resultado posicional após a correção da ionosfera em tempo real. Como as discrepâncias são calculadas pela diferença entre as coordenadas verdadeiras e aquelas obtidas com ou sem a correção do erro sistemático da ionosfera, estas discrepâncias também podem ser entendidas como o erro nas componentes altimétrica e planimétrica.

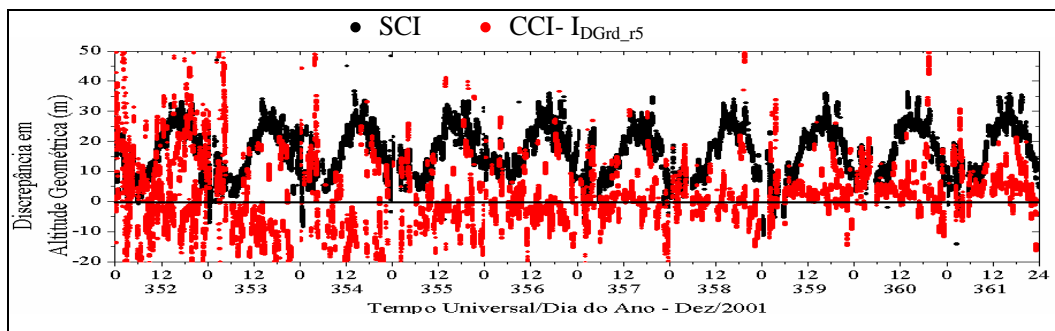


Figura 67 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação UEPP – Dez/2001.

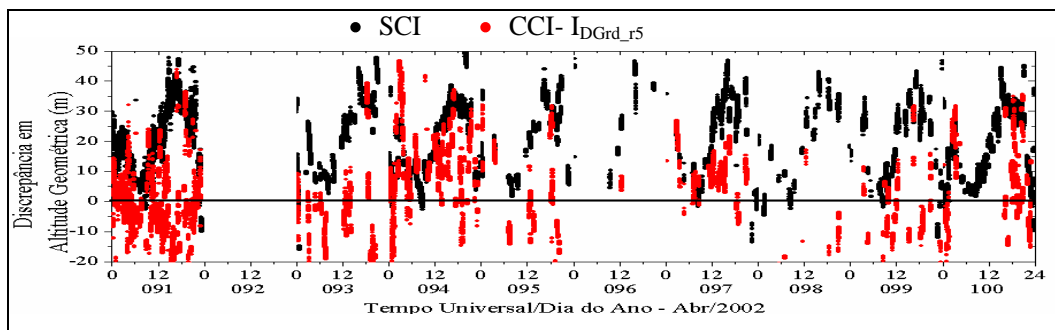


Figura 68 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação UEPP – Abr/2002.

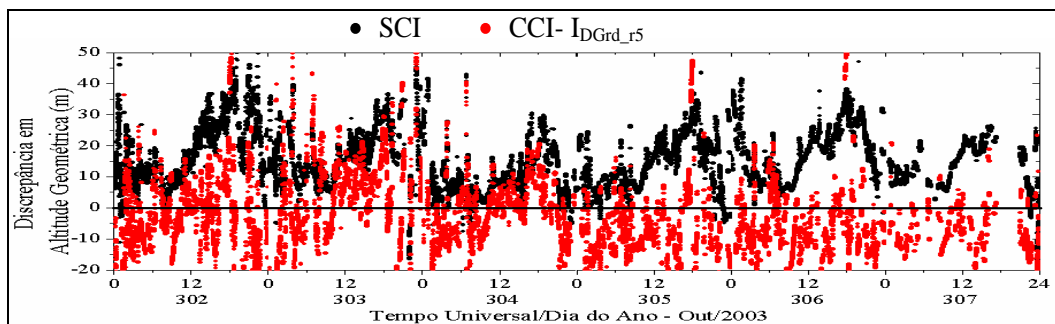


Figura 69 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação UEPP – Out/2003.

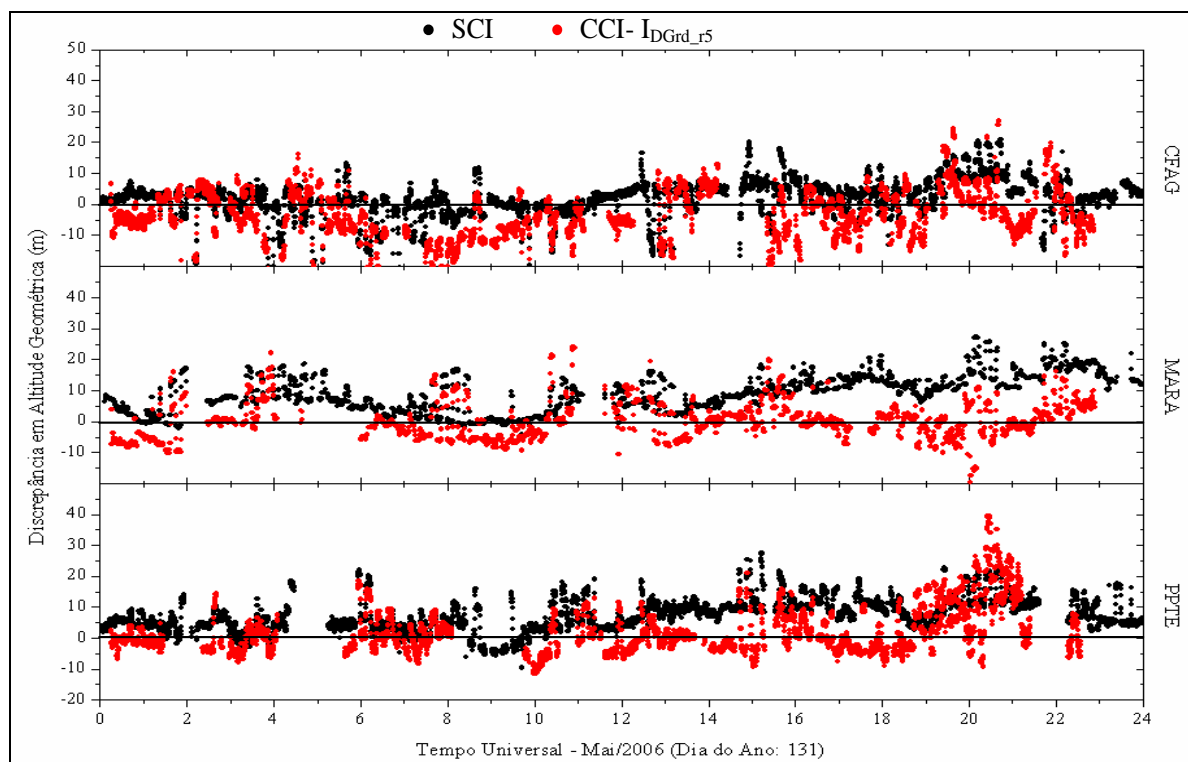


Figura 70 – Discrepâncias em altitude geométrica para as estações CFAG, MARA e PPTE – Mai/2006.

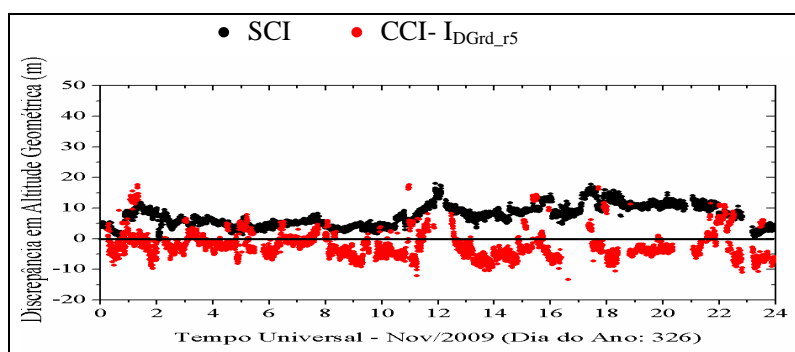


Figura 71 – Discrepâncias em altitude geométrica para a estação PPTE – Nov/2009.

É importante salientar que os períodos sem dados de discrepâncias nos gráficos são devido ao *software* GPSPACE não ter estimado as coordenadas das estações analisadas, quando o GDOP assumiu valores acima de 7 ou quando as observações foram rejeitadas pelo controle de qualidade. Com relação ao excesso de saltos no gráfico da Figura 68, referente à Abr/2002, pode ser decorrente de algum problema no rastreamento da estação. Assim, para o período de alta atividade solar as análises foram baseadas principalmente nos resultados obtidos para os dados de Dez/2001 e Out/2003.

Observando o comportamento dos SCI das Figuras 67 a 71, verifica-se a que a influência da ionosfera no posicionamento por ponto está bem representada pela variação

diária da discrepância em altitude geométrica. Quanto aos resultados $CCI_I_{DGrd_r5}$, observa-se ainda que após a correção do erro sistemático devido à ionosfera, em alguns períodos do dia as discrepâncias ficam menores. Nos gráficos também pode ser verificado que a GI está detectando e corrigindo a variação diária da ionosfera, tornando as discrepâncias nulas.

Entretanto, pode-se verificar que em alguns momentos os resultados $CCI_I_{DGrd_r5}$ são piores do que aqueles advindos da técnica SCI, principalmente nos horários próximos às 00:00 TU (21:00 HL). Este tipo de comportamento é observado principalmente para os dados de Dez/2001 e Out/2003, que são, respectivamente, períodos de alta atividade solar e de ocorrência de intensa tempestade geomagnética. Nestes horários também são observados maiores valores de discrepância em altimetria, os quais coincidem com os horários da intensificação da anomalia equatorial após o pôr do Sol, que por sua vez ocorre principalmente nos meses de equinócio e solstício de verão (AGUIAR, CAMARGO, 2007; BATISTA, 2003; MATSUOKA, 2007). Outro ponto que pode ser observado é que no dia da intensa tempestade geomagnética (dia 302, em Out/2003) tem-se uma assinatura de que a forte influência da ionosfera se estende até as primeiras horas do dia seguinte. Além disto, há a influência da cintilação ionosférica, cuja ocorrência tem forte correlação com a anomalia equatorial. Em Aguiar (2005) também é verificado que os resultados obtidos com o Mod_Ion_FK também tem a performance afetada após o pôr do Sol.

Para os resultados de Out/2003 (Figura 69) observa-se ainda que as discrepâncias após a correção com a estratégia $CCI_I_{DGrd_r5}$ tendem a se estabilizar abaixo da linha zero do gráfico, mostrando um deslocamento que pode ser reflexo das correções da tendência interfrequência no processo de geração da grade ionosférica. Outra possibilidade para este comportamento é que o mesmo pode ser devido à densidade de estações usadas na geração da GI, tendo em vista que para os dados de Mai/2006 (Figura 70), onde havia um maior número de estações de referência nas proximidades das estações do usuário, as discrepâncias permaneceram próximas ao eixo zero. Assim, mais investigações devem ser realizadas para identificar a causa deste tipo de comportamento.

A seguir, as Figuras 72 a 76 mostram o comportamento diário das discrepâncias em planimetria, para os dias analisados.

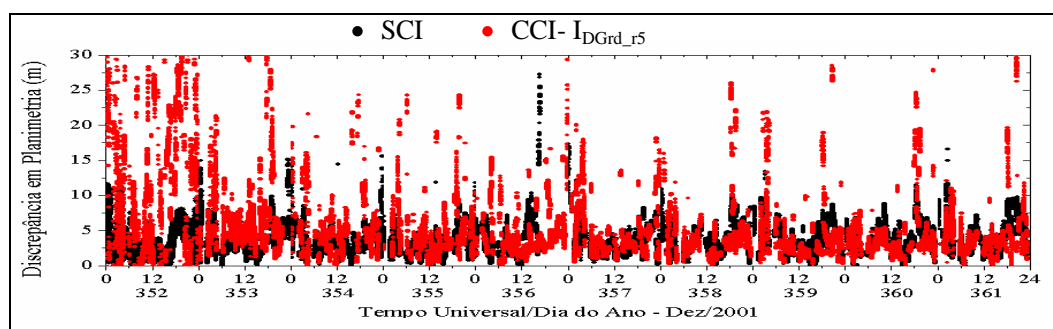


Figura 72 – Discrepâncias em planimetria para a estação UEPP – Dez/2001.

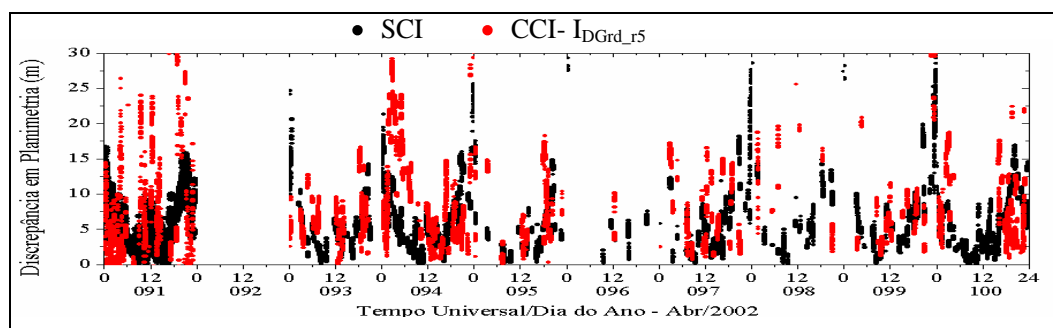


Figura 73 – Discrepâncias em planimetria para a estação UEPP– Abr/2002.

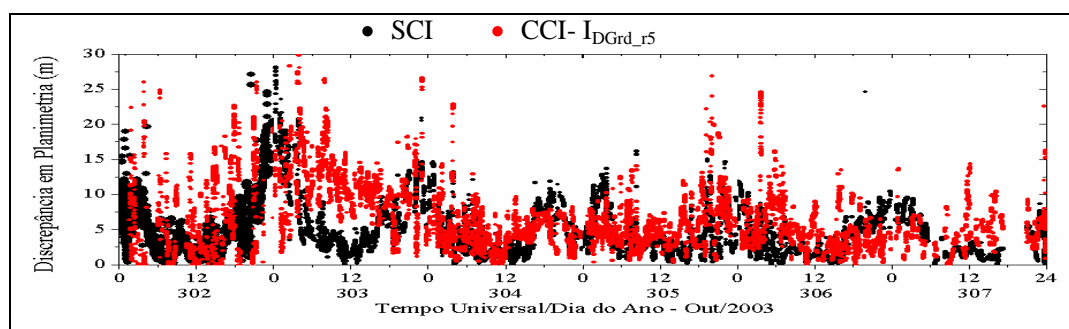


Figura 74 – Discrepâncias em planimetria para a estação UEPP– Out/2003.

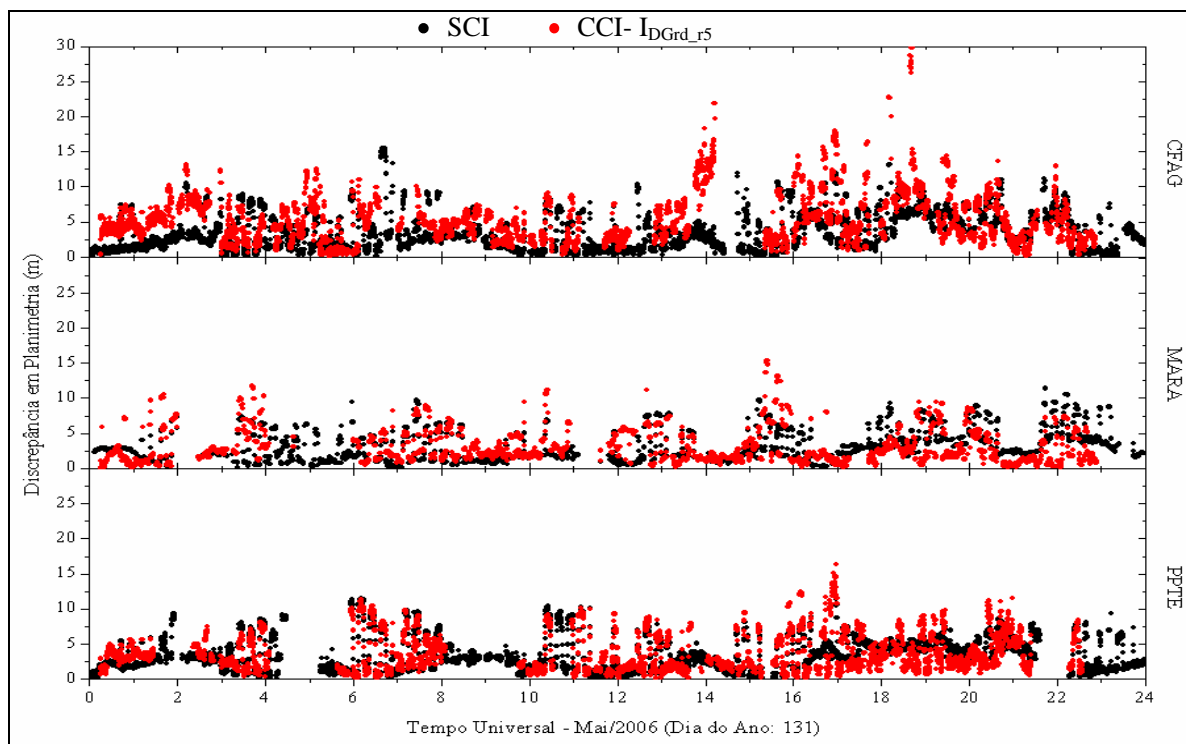


Figura 75 – Discrepâncias em planimetria para as estações CFAG, MARA e PPTE – Mai/2006.

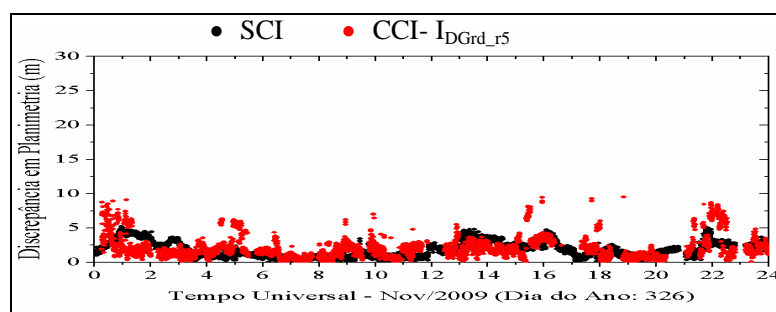


Figura 76 – Discrepâncias em planimetria para a estação PPTE – Nov/2009.

Analisando os resultados da estratégia SCI, nos gráficos das Figuras 72 a 76, observa-se que o erro devido à ionosfera tem menor influência em planimetria do que em altimetria, ou seja, os resultados mostram que este erro sistemático tem maior influência nas determinações da altitude geométrica. Deve-se salientar que esta maior correlação da ionosfera com a altitude geométrica é esperada e este é um comportamento já detectado e analisado em Aguiar (2005), Camargo (1999), Dal Poz (2005), Matsuoka (2003, 2007), entre outros.

Ainda com respeito à estratégia SCI, verifica-se que a determinação planimétrica apresenta as maiores discrepâncias nas primeiras horas da madrugada e nos horários após o pôr do Sol. Pelos resultados apresentados nota-se que este comportamento é mais perceptível em períodos de alta atividade solar (Figura 72 e 73), sendo acentuado sob a ocorrência de

tempestades geomagnéticas (Figura 74). Estes resultados mostram que a planimetria é mais afetada pelo segundo pico da anomalia equatorial, bem como pelos efeitos da cintilação ionosférica que é comum nestes horários.

Analisando as discrepâncias em planimetria após a correção com a estratégia CCI- I_{DGrd_r5} , observa-se que não houve melhora significativa nas determinações planimétricas. Isto ocorre devido à planimetria ser menos afetada pelos efeitos da ionosfera, tendo como consequência que a melhora obtida em planimetria é menor do que a obtida em altitude geométrica. Além disto, nas discrepâncias planimétricas pode-se observar que em alguns momentos os resultados CCI- I_{DGrd_r5} são piores do que os resultados SCI, principalmente, para os dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003 (Figuras 72, 73 e 74). Para este mesmo conjunto de dados verifica-se que as discrepâncias altimétricas (Figuras 67, 68 e 69) apresentam maior dispersão em torno do valor médio. Esta limitação nos resultados da GI pode ser decorrente da combinação de três fatores: alta atividade solar, má distribuição e baixo número de estações de referência usadas no processamento. Vale salientar que Matsuoka (2007), usando os mapas de VTEC do CODE, também observou que em períodos após o pôr do Sol nos meses próximos aos equinócios e verão, em alguns casos os resultados foram piores do que os advindos da estratégia SCI.

Já para o processamento CCI- I_{DGrd_r5} dos dados em período de baixa atividade solar, verifica-se que há uma redução da dispersão em torno da média, tanto para as discrepâncias planimétricas (Figuras 75 e 76) quanto para as altimétricas (Figuras 70 e 71). Entretanto, deve-se salientar que apesar deste comportamento ter sido observado em período de baixa atividade solar, houve um aumento significativo do número de estações usadas no processamento, que passou de um número médio de 10 estações em Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003, para 49 estações em 2006 e 28 estações (tempo real) em 2009.

Para se ter uma idéia da melhora obtida no posicionamento por ponto após a correção do atraso ionosférico usando a estratégia CCI- I_{DGrd_r5} , a seguir são apresentadas as análises da acurácia do posicionamento em termos de discrepância média e EMQ. Para se analisar a performance da GI, os resultados obtidos após a correção do atraso ionosférico são comparados com os resultados obtidos aplicando o Mod_Ion_FK e também usando a estratégia SCI.

Neste momento a análise é dividida em duas etapas nas quais inicialmente foi analisado a performance da GI em tempo real, em função das determinações posicionais em cada instante de observação. Em seguida é apresentada a análise da melhora do posicionamento por ponto considerando as 24 horas de observação para cada dia processado.

Para analisar a performance da GI em tempo real os valores de discrepâncias foram calculados época por época, para cada período de 24 horas em cada dia nos conjuntos de dados processado, e então foram determinados os valores mínimo, máximo e médio, para a planimetria e altimetria. Assim, para os conjuntos de dados que apresentam vários dias, tal como Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003, foram calculadas as médias dos valores mínimo, máximo e médio das discrepâncias e seus respectivos desvios padrão. As discrepâncias em planimetria representam a resultante calculada a partir das discrepâncias em latitude e em longitude.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 25 a 29, as quais também apresentam o valor médio, em termos de porcentagem, na melhora da acurácia do posicionamento por ponto. Deve-se esclarecer que os resultados de discrepâncias apresentados nestas tabelas representam o EMQ para a planimetria e altimetria, pois, os valores de discrepâncias foram calculados por época e em relação às coordenadas da estação fixadas como verdadeiras. Logo, o EMQ indica a acurácia da posição estimada para uma época qualquer de observação com relação à posição conhecida das estações CFAG, MARA e UEPP/PPTE, com uma probabilidade de 68,3% (1σ).

Tabela 25 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Dez/2001.

| Época por Época | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) |
| 2001 | | | | | | |
| Mínimo | 0,08 ± 0,05 | 0,48 ± 0,72 | 0,20 ± 0,22 | 1,18 ± 1,94 | 0,45 ± 1,40 | 0,01 ± 0,01 |
| Máximo | 22,47 ± 15,96 | 21,36 ± 14,84 | 31,04 ± 9,61 | 37,50 ± 5,25 | 28,25 ± 11,42 | 47,66 ± 14,85 |
| Médio | 3,65 ± 0,30 | 3,41 ± 0,62 | 3,90 ± 0,60 | 17,01 ± 1,04 | 9,02 ± 6,04 | 8,41 ± 3,92 |
| Melhora (%) | | 6,51 ± 20,50 | -6,79 ± 19,43 | | 46,99 ± 36,55 | 50,53 ± 24,09 |

Tabela 26 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Abr/2002.

| Época por Época | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|--------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) |
| 2002 | | | | | | |
| Mínimo | 0,14 ± 0,08 | 0,96 ± 1,10 | 0,99 ± 1,01 | 0,69 ± 1,43 | 0,69 ± 1,18 | 0,81 ± 1,48 |
| Máximo | 26,76 ± 5,97 | 30,53 ± 20,53 | 28,18 ± 14,48 | 47,87 ± 4,42 | 39,67 ± 21,17 | 44,61 ± 18,54 |
| Médio | 6,02 ± 0,74 | 5,42 ± 1,61 | 7,12 ± 0,89 | 22,35 ± 3,42 | 10,10 ± 5,30 | 13,32 ± 5,23 |
| Melhora (%) | | 9,95 ± 19,75 | -18,32 ± 9,20 | | 54,82 ± 26,9 | 40,41 ± 26,13 |

Tabela 27 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Out/2003.

| Época por Época 2003 | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|--------------------------------|--------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|---------------|-----------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) |
| Mínimo | 0,07 ± 0,06 | 0,18 ± 0,20 | 0,28 ± 0,40 | 0,22 ± 0,35 | 0,15 ± 0,31 | 0,01 ± 0,01 |
| Máximo | 33,28 ± 33,35 | 24,99 ± 16,57 | 34,53 ± 14,84 | 62,86 ± 48,57 | 68,79 ± 48,48 | 75,76 ± 43,40 |
| Médio | 4,56 ± 1,16 | 4,01 ± 1,06 | 4,66 ± 1,08 | 15,31 ± 3,04 | 8,98 ± 2,53 | 9,87 ± 1,99 |
| Melhora (%) | | 12,16 ± 13,03 | -2,13 ± 5,84 | | 41,31 ± 20,33 | 35,54 ± 13,59 |

Iniciando a análise pelos resultados obtidos para o período de alta atividade solar e sob condições de tempestade ionosférica, apresentados nas Tabelas 25, 26 e 27, observa-se que em planimetria os melhores resultados foram obtidos com o Mod_Ion_FK e em altimetria a acurácia foi melhor com a GI para Dez/2001. Os resultados mostram ainda que na média a aplicação da GI degradou a acurácia em planimetria, sendo a degradação máxima de $18,32 \pm 9,20\%$, observada em Abr/2002. Já na altimetria, para todo o período de alta atividade solar a aplicação da GI melhorou a acurácia em altitude geométrica, onde o melhor resultado foi observado em Dez/2001, o qual apresentou uma melhora de $50,53 \pm 24,09\%$. Considerando todos os dias processados em Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003, a melhora média da acurácia chegou a ser de até 20,79% em planimetria e 81,40% em altimetria, e o pior resultado foi uma degradação de 49,92% em planimetria e de 18,33% em altimetria.

De modo geral, nestes períodos analisados a GI apresentou uma deficiência com relação aos resultados em planimetria, onde o melhor resultado foi uma melhora média de acurácia de apenas 20,79%, contra 43,83% do Mod_Ion_FK. Com relação à componente altimétrica as melhoras médias foram mais expressivas, chegando à 81,40% com a GI, contra 84,25% com o Mod_Ion_FK. Esta melhora em altimetria representou uma redução do EMQ de 30,77 m com a estratégia SCI, para 5,72 m com a estratégia CCI-I_{DGrd_r5} e para 4,85 m aplicando o Mod_Ion_FK.

Mais uma vez as análises vêm confirmando o que já foi observado nos resultados anteriores, ou seja, em termos de acurácia a GI apresentou melhor desempenho em altimetria do que em planimetria, fato que já era esperado, pois a ionosfera contribui mais com a degradação da qualidade do posicionamento em altimetria do que em planimetria. Assim, quando se aplica a correção do atraso (pseudodistância) ou avanço (fase da portadora) ionosférico o maior impacto desta correção é percebido na componente altimétrica.

Os resultados mostram uma limitação no potencial de uso da GI para o período de alta atividade solar. Com base na análise do GIVE, isto ocorre devido ao baixo número de estações de referência que, consequentemente, resulta em um baixo número de IPPs

disponíveis para a geração da GI, que devem estar dentro de um limite estabelecido pelo raio de busca, o qual limita a utilização apenas dos IPPs próximos a um determinado IGP. Para se ter uma idéia, considerando as quatro estações de referência circunvizinhas à estação UEPP, uma está a aproximadamente 440 km e as demais estão a uma distância acima de 830 km. Desta forma, vale destacar que nos momentos em que a GI chegou a degradar a qualidade do posicionamento, o GIVE não estava disponível e consequentemente a observável do usuário não foi corrigida do atraso ionosférico. Outro fato observado é que mesmo com o GIVE disponível, em alguns casos a qualidade do posicionamento não apresentou melhora significativa ou foi até degradado, pois o IPP do usuário localizou-se em região de borda e não havia um mínimo de 3 IGPs, para realizar a interpolação e determinar a correção do atraso ionosférico.

O problema da disponibilidade do GIVE está diretamente relacionado a densidade e a distribuição das estações de referência, conforme apresentado na Figura 77.

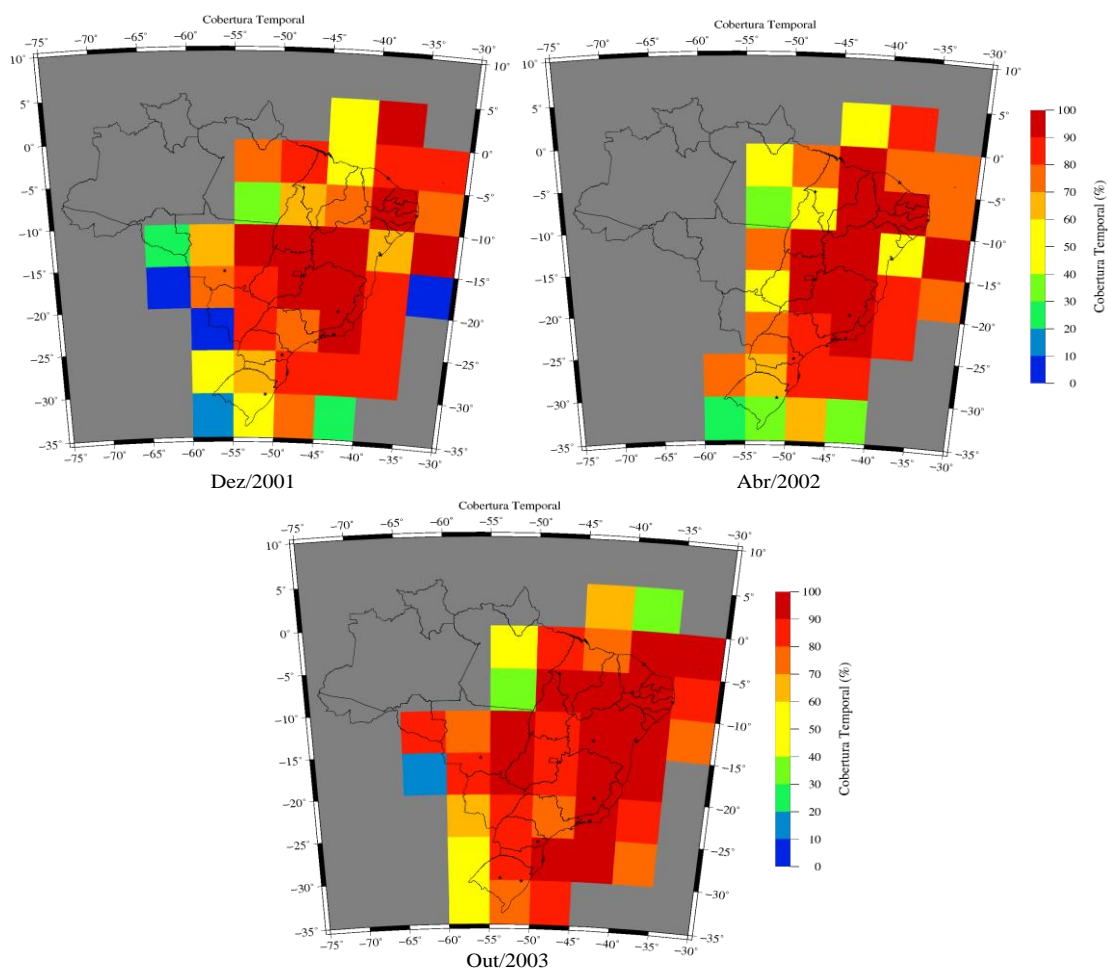


Figura 77 – Disponibilidade temporal das observações para a geração da GI no período de alta atividade solar.

A Figura 77 apresenta a cobertura média de todos os dias analisados no conjunto de dados de Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003. Nesta figura pode-se verificar que na região circunvizinha a estação UEPP, a cobertura temporal das células varia de 10% a 90%. Isto significa que na célula com cobertura temporal de 10%, das 24 horas de observação houveram IPPs rastreados nesta célula durante apenas 2,4 horas e 21,6 horas, para a célula com cobertura temporal de 90%. Na média a disponibilidade de observações ficou em 70%. Considerando que a geração do GIVE está diretamente relacionada a disponibilidade de observações para o cálculo do IGP, na média o mesmo esteve disponível durante, aproximadamente, apenas 16,8 horas. Estes dados indicam que a soma dos instantes em que ao longo do dia o GIVE esteve indisponível, ou configurado como IGP não monitorando, resulta num total de aproximadamente 7,2 horas. Consequentemente, nestes instantes as observáveis do usuário não foram corrigidas do atraso ionosférico.

Os resultados obtidos para o período de baixa atividade solar são apresentados nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Mai/2006.

| Época por Época 2006 | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------|----------------------------------|-------------------|---------------|----------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd} r5) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd} r5) |
| Estação CFAG (Argentina) | | | | | | |
| Mínimo | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Máximo | 15,52 | 20,63 | 33,22 | 32,08 | 48,63 | 49,71 |
| Médio | 3,41 ± 2,62 | 4,02 ± 2,35 | 5,34 ± 3,61 | 5,03 ± 4,67 | 9,35 ± 6,60 | 7,18 ± 5,58 |
| Melhora (%) | | -17,91 | -56,78 | | -86,03 | -42,94 |
| Estação MARA (Venezuela) | | | | | | |
| Mínimo | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Máximo | 11,41 | 9,85 | 15,31 | 27,41 | 22,17 | 24,24 |
| Médio | 3,00 ± 2,19 | 2,99 ± 2,28 | 2,92 ± 2,45 | 9,08 ± 5,85 | 4,70 ± 3,14 | 4,54 ± 3,85 |
| Melhora (%) | | 0,33 | 2,66 | | 48,28 | 50,05 |
| Estação PPTE (Brasil) | | | | | | |
| Mínimo | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Máximo | 11,49 | 24,62 | 16,36 | 27,45 | 22,71 | 39,41 |
| Médio | 3,43 ± 2,38 | 3,42 ± 3,29 | 3,32 ± 2,71 | 7,70 ± 4,78 | 3,61 ± 3,53 | 5,30 ± 5,48 |
| Melhora (%) | | 0,31 | 3,23 | | 53,14 | 31,18 |

Tabela 29 – EMQ e valor médio da melhora obtida na acurácia do posicionamento por ponto – Nov/2009.

| Época por Época 2009 | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|--------------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------------|-------------------|-------------|-----------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) |
| Mínimo | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,31 | 0,01 | 0,01 |
| Máximo | 5,75 | 5,11 | 9,52 | 18,03 | 11,45 | 17,69 |
| Médio | 1,77 ± 1,13 | 1,34 ± 0,90 | 1,70 ± 1,65 | 7,46 ± 3,41 | 3,69 ± 1,94 | 4,05 ± 2,73 |
| Melhora (%) | | 24,35 | 3,73 | | 50,53 | 45,75 |

Na Tabela 28 podem ser analisados os resultados para o processamento usando uma rede de estações de referência distribuídas pela América do Sul e Central, usando dados coletados em Mai/2006. Já a Tabela 29 apresenta os resultados obtidos ao usar a GI gerada a partir das estações da RBMC-IP, usando dados coletados em Nov/2009. Pelas Tabelas 28 e 29 os resultados mostram que após a aplicação da correção ionosférica (CCI-I_{DGrd_r5}), a melhora média da acurácia foi menos expressiva do que as melhoras obtidas em períodos de alta atividade solar, o que já era esperado, pois, como a influência da ionosfera tem maior magnitude no período de alta atividade solar, outros erros sistemáticos passam a ter um nível de significância maior na degradação da acurácia do posicionamento por ponto, no período de baixa atividade solar.

A partir da Tabela 28 observa-se que tanto o Mod_Ion_FK quanto a GI degradaram os resultados do posicionamento por ponto para a estação CFAG, localizada em Coronel Fontana na Argentina. Numa análise inicial foi detectado que parte dos IPPs do usuário caíram em região de borda da GI e o GIVE não estava disponível. Outra possibilidade é uma falha na calibração da tendência interfrequência de um ou mais receptores das estações de referência próximas à estação CFAG. Mais estudos devem ser realizados a fim de detectar a causa de tal comportamento.

Ainda na Tabela 28, para as estações MARA e PPTE o Mod_Ion_FK e a GI melhoraram a qualidade do posicionamento por ponto. Pode-se verificar, com relação à determinação planimétrica, que a GI proporcionou uma melhora média na acurácia de aproximadamente 2,66% para a estação MARA e 3,23% para a PPTE, contra respectivamente 0,33% e 0,31% quando aplicado o Mod_Ion_FK. Já para a componente altimétrica a GI proporcionou uma melhora de 50,05% para a estação MARA e 31,18% para a PPTE, contra respectivamente 48,28% e 53,14%, quando aplicado o Mod_Ion_FK. Observa-se que o desempenho da GI foi melhor para a estação MARA, onde há uma estação de referência à aproximadamente 150 km de distância. Para a estação PPTE, a qual a GI proporcionou uma melhora menor, a estação de referência mais próxima está localizada a aproximadamente 440

km de distância. Além disto, deve-se salientar que estas estações estão em regiões geográficas diferentes e, conseqüentemente, a ionosfera também apresenta diferentes comportamentos e efeitos sobre estas estações. Assim, torna difícil afirmar se a diferença na melhora proporcionada pela GI é em função da distância das estações de referência ou do comportamento local da ionosfera. Este último indicaria uma limitação no método de geração da grade ionosférica.

Para os dados de Nov/2009, os resultados apresentados na Tabela 29 mostram um melhor desempenho do Mod_Ion_FK, quando comparado aos resultados obtidos pela GI. Em termos de componente planimétrica a GI proporcionou uma melhora de acurácia de aproximadamente 3,73% e o Mod_Ion_FK proporcionou 24,35% de melhora. Para a altimetria os resultados foram próximos, sendo 45,75% de melhora obtida ao usar a GI e 50,53% com o Mod_Ion_FK. Nestes resultados não foram observadas degradações na qualidade do posicionamento. Numa breve análise do GIVE, pôde-se verificar que na região da estação PPTE, o mesmo teve uma disponibilidade média acima de 95%, ou seja, durante aproximadamente 22,8 horas havia disponibilidade da informação da qualidade da GI e esta pôde ser utilizada para a correção do atraso ionosférico.

Nas análises anteriores ficou evidente que a performance da GI é fortemente limitada pela densidade e distribuição das estações de referência, fatores estes que são refletidos diretamente no GIVE. Numa análise realizada pôde-se detectar que em vários momentos o IGP próximo do IPP do usuário não estava disponível, pois este caiu numa região de baixa disponibilidade de informação para a geração da GI. Conseqüentemente, as correções não foram geradas devido ao GIVE apresentar informação de IGP não monitorado. Este tipo de problema também foi detectado e analisado no capítulo 6, conforme apresentado na Figura 27. Logo, pode-se verificar que a acurácia do posicionamento por ponto do usuário é afetada pela disponibilidade da GI e do GIVE. Por fim estes resultados mostram mais uma vez que não basta apenas ter um número maior de estações de referência, mas estas devem estar distribuídas de forma homogênea por toda a área de cobertura da grade ionosférica, para que se garanta a disponibilidade e, conseqüentemente, a continuidade, a integridade e a acurácia do serviço de correção do atraso ionosférico.

Com relação ao pós processamento, as Tabelas 30 a 34 apresentam os resultados obtidos na análise da acurácia do posicionamento por ponto, em termos de componente planimétrica e altimétrica, a partir da comparação da coordenada verdadeira da estação do usuário com a coordenada média obtida após o processamento de 24 horas de dados. Este tipo de análise é adequada quando o receptor do usuário está operando no modo estático, bem

como permite ter uma idéia geral dos resultados obtidos durante o período de 24 horas, ou seja, pode-se verificar se os resultados apresentados anteriormente são refletidos nesta visão geral para o período de 24 horas de estimação.

Nas Tabelas 30 a 34 os indicadores de acurácia são apresentados pelos valores de desvio padrão, EMQ e discrepância, bem como a melhora obtida (em %) após a correção do atraso ionosférico usando o Mod_Ion_FK e a GI. O desvio padrão da posição média indica a dispersão das determinações numa dada época em torno da média, com uma probabilidade de 68,3% (1σ). O EMQ indica a dispersão das determinações em uma época em torno do valor verdadeiro, com uma probabilidade de 68,3% (1σ). A discrepância fornece a diferença entre a posição média obtida após 24 horas de observação e a posição verdadeira. Considerando que em Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003 foram processados grupos de vários dias, as Tabelas 30, 31 e 32 apresentam os valores médios de desvio padrão, EMQ, discrepância e melhora, bem como os correspondentes desvios padrão.

Tabela 30 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Dez/2001.

| 24 Horas | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|----------------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| 2001 | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) |
| Desvio Padrão | 3,60 ± 1,28 | 3,58 ± 1,08 | 5,94 ± 0,90 | 8,00 ± 0,62 | 5,51 ± 2,10 | 9,87 ± 3,05 |
| EMQ | 6,81 ± 8,36 | 5,14 ± 2,32 | 6,12 ± 0,83 | 18,82 ± 0,79 | 10,37 ± 6,57 | 10,71 ± 2,48 |
| Discrepância | 1,71 ± 2,23 | 1,12 ± 0,47 | 1,06 ± 0,49 | 17,01 ± 1,00 | 8,22 ± 7,05 | 3,16 ± 2,19 |
| Melhora (%) | 34,54 ± 40,96 38,19 ± 41,53 | | | 51,70 ± 42,58 81,43 ± 12,17 | | |

Tabela 31 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Abr/2002.

| 24 Horas | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|----------------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| 2002 | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) |
| Desvio Padrão | 6,42 ± 1,09 | 7,39 ± 4,99 | 9,20 ± 3,99 | 11,71 ± 1,25 | 8,44 ± 4,61 | 12,29 ± 5,10 |
| EMQ | 7,78 ± 1,27 | 8,61 ± 5,57 | 10,58 ± 4,39 | 25,80 ± 4,27 | 12,30 ± 6,06 | 16,04 ± 6,38 |
| Discrepância | 4,30 ± 0,99 | 2,57 ± 1,66 | 3,77 ± 1,38 | 22,83 ± 4,88 | 7,79 ± 5,86 | 9,04 ± 6,20 |
| Melhora (%) | 40,21 ± 39,46 12,36 ± 29,83 | | | 65,87 ± 27,11 60,40 ± 28,52 | | |

Tabela 32 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Out/2003.

| 24 Horas | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| 2003 | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI-I _{DGrd_r5}) |
| Desvio Padrão | 5,40 ± 1,44 | 3,38 ± 1,20 | 5,91 ± 1,55 | 8,16 ± 1,05 | 6,92 ± 2,29 | 10,50 ± 2,47 |
| EMQ | 5,55 ± 1,40 | 4,90 ± 1,06 | 6,97 ± 2,77 | 17,14 ± 2,75 | 10,68 ± 2,50 | 12,12 ± 2,71 |
| Discrepância | 1,22 ± 0,16 | 1,20 ± 0,35 | 1,26 ± 0,41 | 15,02 ± 2,85 | 7,31 ± 3,69 | 5,32 ± 3,07 |
| Melhora (%) | 1,14 ± 23,80 -3,35 ± 25,08 | | | 51,38 ± 26,62 64,57 ± 22,33 | | |

Tabela 33 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Mai/2006.

| 24 Horas | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|---------------------------------|--------------------|--------------|------------------------------|-------------------|----------------|------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) |
| 2006 | | | | | | |
| Estação CFAG (Argentina) | | | | | | |
| Desvio Padrão | 3,54 | 3,95 | 5,35 | 6,35 | 7,16 | 7,96 |
| EMQ | 4,16 | 4,60 | 6,30 | 6,69 | 11,07 | 8,55 |
| Discrepância | 2,18 | 2,36 | 3,34 | 2,10 | 8,44 | 3,13 |
| Melhora (%) | | -8,25 | -53,32 | | -301,90 | -49,05 |
| Estação MARA (Venezuela) | | | | | | |
| Desvio Padrão | 2,97 | 3,42 | 3,60 | 5,90 | 5,38 | 5,81 |
| EMQ | 3,84 | 3,96 | 4,06 | 11,08 | 5,42 | 5,83 |
| Discrepância | 2,43 | 1,98 | 1,86 | 9,38 | 0,64 | 0,45 |
| Melhora (%) | | 18,33 | 23,34 | | 93,18 | 95,20 |
| Estação PPTE (Brasil) | | | | | | |
| Desvio Padrão | 3,47 | 4,08 | 4,16 | 5,04 | 4,64 | 7,78 |
| EMQ | 3,98 | 4,39 | 4,39 | 8,92 | 4,64 | 8,07 |
| Discrepância | 1,96 | 1,60 | 1,40 | 7,36 | 0,07 | 2,15 |
| Melhora (%) | | 18,15 | 28,50 | | 99,05 | 70,79 |

Tabela 34 – Indicadores de acurácia do posicionamento por ponto – Nov/2009.

| 24 Horas | EMQ em Planimetria | | | EMQ em Altimetria | | |
|---------------|--------------------|--------------|------------------------------|-------------------|--------------|------------------------------|
| | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) | SCI | Mod_Ion_FK | GI (CCI- $I_{DGrd\ rs}$) |
| 2009 | | | | | | |
| Desvio Padrão | 1,84 | 1,52 | 2,67 | 3,38 | 2,13 | 4,29 |
| EMQ | 2,06 | 1,52 | 2,73 | 8,02 | 4,08 | 4,67 |
| Discrepância | 0,90 | 0,11 | 0,57 | 7,28 | 3,48 | 1,84 |
| Melhora (%) | | 88,04 | 37,11 | | 52,20 | 74,73 |

As Tabelas 30, 31 e 32 apresentam os resultados dos dados coletados em período de alta atividade solar, sendo Dez/2001, Abr/2002 e Out/2003, respectivamente. Os resultados para o período de baixa atividade solar são apresentados nas Tabelas 33 e 34, sendo respectivamente Mai/2006, usando estações de referência distribuídas pela América do Sul e Central, e Nov/2009, usando dados da RBMC-IP e REDE GNSS SP.

No período de alta atividade solar (Tabelas 30, 31 e 32) verifica-se que a GI melhorou a acurácia do posicionamento por ponto tanto em planimetria, quanto em altimetria, em comparação com a estratégia SCI. Ao comparar os resultados da GI com os do Mod_Ion_FK, observa-se que em média, considerando os três períodos analisados, o Mod_Ion_FK foi 9,5% mais eficiente do que a GI, na melhora da acurácia planimétrica. Já em termos de altimetria, em média a GI foi 12,5% mais eficiente do que o Mod_Ion_FK. Em Dez/2001 a GI chegou a proporcionar uma melhora média, de $38,19 \pm 40,96\%$, na acurácia da componente planimétrica, que corresponde a uma redução do erro de $1,71 \pm 2,23$ m para $1,06 \pm 0,49$ m. Em altimetria o melhor desempenho também foi observado no conjunto de dados de Dez/2001, onde a GI proporcionou uma melhora média de $81,43 \pm 12,17\%$, que em unidade

métrica corresponde a uma redução do erro em altimetria de $17,01 \pm 1,00$ m para $3,16 \pm 2,19$ m.

Os valores, apresentados nas Tabelas 30, 31 e 32, são médias calculadas a partir dos resultados considerando todos os dias processados. Assim, em termos de análise por dia, o melhor desempenho diário da GI foi uma melhora de 79,33% em planimetria, num dia de Dez/2001, que corresponde a uma redução do erro de $8,02 \pm 30,77$ m para $1,66 \pm 5,52$ m, e uma melhora de 95,03% em altimetria, num dia de Abr/2002, que corresponde a uma redução de $20,93 \pm 23,52$ m para $1,04 \pm 11,09$ m.

No período de baixa atividade solar (Tabelas 33 e 34) nota-se que o problema identificado com a estação CFAG, conforme já discutido anteriormente, também é observado no resultado do processamento de 24 horas, desta forma esta estação será excluída das análises a seguir. Para as demais estações analisadas nestes períodos, observa-se que os modelos ionosféricos aplicados melhoram a acurácia do posicionamento por ponto. O melhor resultado apresentado pela GI em termos de planimetria foi observado na estação PPTE em Nov/2009, onde a correção do atraso ionosférico melhorou a acurácia em 37,11%, que corresponde a uma redução do erro de 0,90 m para 0,57 m. Já na altimetria o melhor desempenho da GI foi observado na estação MARA em Mai/2006, onde a grade ionosférica proporcionou uma melhora de 95,20%, a qual corresponde uma redução do erro de 9,38 m para 0,45 m.

Outro fato que pode ser observado nos resultados apresentados nas Tabelas 30, 31, 32, 33 e 34, é que os comportamentos instáveis da GI apresentados anteriormente na análise época por época, devido aos vários fatores já discutidos, também são refletidos nos valores de desvio padrão e EMQ da análise de 24 horas, que em alguns momentos apresentam uma alta dispersão das discrepâncias em torno, respectivamente, da coordenada média estimada e da coordenada verdadeira.

Em suma, a GI foi avaliada em período de alta atividade solar, sob condições de tempestade ionosférica e em período de baixa atividade solar, por meio da aplicação das correções do atraso ionosférico nos dados coletados com a estação UEPP/PPTE, a qual está localizada numa região sob grande influência da atividade ionosférica. A GI também foi analisada em uma extensa região, cobrindo toda a América do Sul e parte da América Central. Nos experimentos pode-se verificar que a correção do atraso ionosférico utilizando a GI proporciona uma melhora na qualidade do posicionamento por ponto em tempo real, que chegou a aproximadamente 20,79% em planimetria e 81,40% em altimetria, e no pós processamento cujo resultado mais expressivo foi uma melhora de aproximadamente 79,33%

em planimetria e 95,20% em altimetria. Observou-se ainda que a maior influência da ionosfera está na determinação da componente altimétrica, e consequentemente a maior eficiência na aplicação da GI foi observada nesta componente.

Além disto, constatou-se que a eficiência das correções do atraso ionosférico é fortemente afetada pela distribuição e pelo número das estações de referência utilizadas na geração da GI e do GIVE. Entretanto, a limitação de desempenho foi observada em período de alta atividade solar, quando também coincidiu que havia um baixo número de estações de referência. Neste período foram detectadas degradações no posicionamento por ponto de até de 49,92% em planimetria e de 18,33% em altimetria. Já no período de baixa atividade solar o desempenho da GI melhorou, mas, por outro lado, o número de estações de referência aumentou consideravelmente. Assim, neste momento não se pode afirmar se o desempenho da GI é mais afetado pelo nível de atividade solar ou pela quantidade e distribuição das estações de referência. Assim, para se ter uma análise mais precisa, a GI e o GIVE devem ser avaliados no próximo pico da atividade solar no ciclo 24, quando também se terá uma maior quantidade de estações de referência rastreando os sinais GNSS.

É importante salientar que a acurácia das correções fornecidas pela GI também é afetada pela tendência interfrequência dos satélites e receptores, além de fatores como disponibilidade, continuidade e integridade da GI, se os IPPs do usuário estão localizados em região de borda, entre outros. Nos resultados apresentados, pôde-se verificar uma forte correlação entre os resultados do posicionamento por ponto e a qualidade da GI, fornecida pelo GIVE.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Considerações Finais e Conclusões

Nos últimos anos o GNSS se tornou uma importante ferramenta para diversos tipos de aplicações. Nas atividades mais cotidianas, a comunidade civil utiliza informações espaciais fornecidas pelo GNSS. Dentro da comunidade científica, a consolidação desta tecnologia é demonstrada pelas inúmeras aplicações, nas mais variadas áreas do conhecimento, em que este sistema é utilizado como ferramenta primária ou auxiliar.

Com o intuito de melhorar os resultados de posicionamento, na década de 90 iniciaram no Brasil os estudos relacionados aos efeitos da ionosfera sobre os sinais GNSS, dentre os quais pode-se citar o trabalho pioneiro de Camargo (1999). Em contra partida, com o amadurecimento desta tecnologia, e a expansão das redes geodésicas ativas, o GNSS também passou a ser utilizado para medir parâmetros da atmosfera, com destaque à troposfera e à ionosfera, e tornou-se uma importante ferramenta nos estudos para compreender a dinâmica da atmosfera terrestre.

No Brasil, nos últimos 4 anos novas perspectivas surgiram, no que diz respeito a melhorar a qualidade da estimação da posição do usuário durante um procedimento de navegação, bem como no monitoramento da ionosfera em tempo real. Isto devido à pioneira REDE GNSS SP e, posteriormente, a RBMC-IP, as quais disponibilizam os dados de suas estações de referência em tempo real, utilizando o protocolo de transporte NTRIP. Nos primeiros trabalhos iniciados por Camargo (1999), foi desenvolvido o modelo regional da ionosfera Mod_Ion, o qual representa a ionosfera de forma analítica a partir da série de Fourier. No Mod_Ion os parâmetros são estimados utilizando o MMQ em lote, sendo portanto destinado à aplicações em modo de pós processamento. Com a necessidade de se ter um modelo em tempo real, mais eficaz do que o modelo de Klobuchar, Camargo (2001) e Aguiar (2005) adaptaram o Mod_Ion para aplicações em tempo real, utilizando o processo de estimação pelo filtro de Kalman. Estas séries de pesquisas que já vêm sendo realizadas há algum tempo culminaram neste trabalho, onde foi proposto um método para gerar uma representação da ionosfera em forma de grade, bem como disponibilizar o nível de confiança desta grade por meio do GIVE.

Logo, o trabalho apresentado nesta tese é uma consequência dos estudos realizados por Camargo (1999, 2001) e Aguiar (2005), também tendo como base os trabalhos de Chao (1997), Fonseca Junior (2002), Fortes (2002), Komjathy (1997), Liao (2000), Liu (2004), Matsuoka (2003), Schaer (1999), Skone (1998), entre outros. A idéia da grade ionosférica surgiu da necessidade em fornecer as correções do atraso ionosférico num padrão semelhante ao utilizado em sistemas de aumento, ou seja, os usuários recebem correções em forma de uma malha de pontos regularmente espaçados.

Outro fato relevante, devido às características da ionosfera em regiões de baixa latitude, foi a necessidade de se ter um forma de modelar a ionosfera localmente, e não por meio de um ajuste global das observações, como ocorre quando se utilizam funções de modelagem.

Deve-se destacar que este é um trabalho pioneiro no Brasil, onde se procurou dar os primeiros passos para fornecer uma grade ionosférica e o seu nível de confiança, a fim de permitir ao usuário obter informações a respeito da ionosfera em tempo real, e utilizá-las em aplicações de posicionamento, navegação e estudos da ionosfera. É importante salientar também, que este trabalho resultou em um aplicativo (GI) que gera a grade ionosférica e o GIVE, bem como a visualização gráfica dos resultados (mapas) em tempo real.

Além disto, para a leitura dos arquivos RINEX que são disponibilizados via protocolo NTRIP, foi desenvolvido o algoritmo ALDAR, que é executado como um módulo da GI e do Mod_Ion_FK. Vale lembrar que somente após o início deste trabalho é que foi possível obter dados das estações GNSS em tempo real. Assim, apesar de ter sido desenvolvido em trabalhos anteriores, o algoritmo do Mod_Ion_FK passou por várias alterações para poder executar o módulo do ALDAR, bem como ser compatível com o algoritmo da GI, possibilitando assim a execução destes de forma integrada.

Uma alteração importante realizada no algoritmo do Mod_Ion_FK está relacionada à determinação das tendências interfrequências dos satélites. Na versão anterior do Mod_Ion_FK era necessário injuncionar os valores das tendências interfrequências, a partir dos valores fornecidos nos arquivos IONEX. Na versão atual, pode-se escolher a injunção a partir dos arquivos IONEX, ou usar apenas uma restrição conforme já tratado no capítulo 5.

Com relação ao método para a geração de grade ionosférica proposto neste trabalho, alguns pontos devem ser destacados. A geração da GI predita é baseada num ajuste linear em função da época origem da janela de predição, do intervalo de atualização e do atraso ionosférico observado durante 5 minutos em cada IGP. Quando se trata de função de

interpolação para determinar o atraso ionosférico do IGP, normalmente são utilizadas funções pesos fixas. Entre as funções peso mais utilizadas pode-se citar o inverso da distância e ajuste do plano. Um diferencial deste trabalho é que esta função não é fixa, ou seja, dependendo da quantidade de IPPs circunvizinhos ao IGP é que se define a função peso mais adequada. Outro ponto que merece destaque é que para amenizar a falta de informações iniciais após uma falha na disponibilidade da grade, também é utilizado o vizinho mais próximo para determinar o atraso do IGP quando há apenas um IPP em sua vizinhança. Desta forma a informação deste único IPP pode ser utilizada como a melhor informação disponível, numa época posterior, para o vetor estado inicial do filtro de Kalman, sendo que neste caso a falta de confiança é inserida a partir do relaxamento do modelo estocástico. Também foi proposto um controle de qualidade baseado apenas nas observações consecutivas, realizadas em cada arco de satélite individualmente. Para minimizar a limitação da função de mapeamento geométrica padrão, a qual permite projetar o atraso ionosférico para a direção vertical, também foi proposta a decomposição da grade ionosférica.

Antes da análise do método proposto para a geração da GI, foram realizados experimentos para verificar o impacto da distribuição das estações de referência sobre o processo de geração de uma grade. Para a execução desta etapa do trabalho foi necessário o desenvolvimento do aplicativo GS, o qual permite simular a disponibilidade de informações para gerar uma grade, a partir de uma dada distribuição de estações de referência. Estes experimentos foram apresentados no capítulo 6, onde foram analisadas grades com resoluções de 1°, 2,5° e 5°, considerando as estações da RBMC/RIBaC, RBMC-IP e REDE GNSS SP, bem como considerando uma rede simulada de estações planejada com distribuição homogênea sobre o território nacional. Destes experimentos pode-se concluir que devido ao número de estações, à distribuição não homogênea e ao grande espaçamento entre estas, no Brasil deve-se adotar uma grade com resolução máxima de 5° e ainda assim fatores como disponibilidade, continuidade, integridade e acurácia não são garantidos durante 24 horas por dia.

A primeira etapa para a análise da GI consistiu na escolha dos dados a serem processados, de modo a realizar a análise utilizando dados coletados em diversos dias e em diferentes períodos da atividade solar. Para o período de alta atividade solar foram processados dez dias de dados em Dez/2001 e dez dias de dados em Abr/2002. Para a análise da performance da GI sob a influência de uma intensa tempestade geomagnética, foram utilizados dados coletados durante 6 dias em Out/2003. O desempenho da GI também foi avaliado no período de baixa atividade solar, sendo processado um dia de dados coletados por

estações de referência distribuídas por toda a América do Sul e parte da América Central, em Mai/2006. A utilização do Mod_Ion_FK e da GI com o módulo ALDAR também foi analisada a partir do processamento dos dados da RBMC-IP e REDE GNSS SP coletados em Nov/2009.

Nesta fase de análise da grade ionosférica o primeiro experimento consistiu na avaliação das alterações realizadas no Mod_Ion_FK, no que diz respeito à determinação da tendência interfrequência dos satélites e receptores. Este tipo de análise é importante, pois a acurácia das tendências interfrequências fornecidas pelo Mod_Ion_FK tem impacto direto na acurácia da GI. Os resultados mostram que os valores de tendência interfrequência apresentam uma característica constante por um longo período de tempo, o que está em conformidade com a literatura. Pôde-se observar que o processo de estimação da tendência interfrequência pelo filtro de Kalman demorou em média 30-40 minutos para se estabilizar, sendo que como estas estimativas dependem do modelo da ionosfera, este tempo de convergência pode ser maior ou menor, dependendo do comportamento da ionosfera no início do processo.

O segundo experimento foi a avaliação da GI e do GIVE em termos de disponibilidade, em função da resolução e das estações de referência. De modo geral, verificou-se o que havia sido previsto na simulação usando o GS, ou seja, o número de estações de referência é o maior fator limitante na performance da GI e do GIVE. Outra característica, observada a partir dos mapas de GIVE, é que as estimativas mais precisas da GI estão localizadas na área central de cobertura da rede de estações, e a medida que se afasta desta área em direção às bordas, o erro das estimativas aumenta gradativamente. Nas regiões de bordas da GI pôde-se notar também que apesar dos IGPs terem sido estimados, o GIVE não foi fornecido e, conseqüentemente, a qualidade das correções aplicadas a partir destes IGPs não é conhecida. Em termos de processamento em tempo real, analisando as estações da RBMC-IP e da REDE GNSS SP conclui-se que já é possível obter uma cobertura total do país com a grade de atraso ionosférico. Entretanto, os mapas do GIVE mostram que para uma parte da grade ionosférica o erro não está disponível, principalmente na região norte do país. Este problema pode ser resolvido com a densificação de estações de referência.

No terceiro experimento foi realizada a análise da integridade da GI. Nesta etapa, uma estação de referência foi escolhida para simular a estação do usuário e então foi calculado o atraso ionosférico para cada IPP observado. Para o mesmo IPP também foi calculado o atraso ionosférico a partir da GI e também foi propagado o erro a partir do GIVE. Inicialmente, as análises compararam a integridade da GI usando as resoluções de 1, 2,5 e 5°,

bem como usando a função de mapeamento que considera a ionosfera como uma fina camada e usando o método de decomposição da ionosfera em subcamadas. Desta análise também pode-se concluir que a resolução de grade adequada para o processamento, depende da densidade e distribuição das estações de referência, bem como do comportamento espacial e temporal do TEC. Para uma rede com baixo número de estações de referência, os melhores resultados foram obtidos usando a GI com 5° de resolução. Para os dados analisados em período de baixa atividade solar (Mai/2006 e Nov/2009), quando havia um número maior de estações de referência, os resultados da GI com 2,5° de resolução foram um pouco melhores do que aqueles advindos da grade com 5°. Conclui-se também que para ângulos de elevação acima de 20°, o desempenho da GI ao usar o modelo de simples camada ou o de grade decomposta apresenta resultados similares, entretanto, para ângulos com baixa elevação o modelo de grade decomposta sofre menos influência do gradiente espacial do TEC. Em períodos sob condições de distúrbios na ionosfera, também é recomendável o uso do modelo de grade decomposta. Já em período de baixa atividade solar e baixo gradiente espacial do TEC o modelo de simples camada foi mais eficiente.

No quarto e último experimento o desempenho da GI foi analisado, através do posicionamento por ponto, utilizando os dados GPS da estação UEPP/PPTE no período de baixa atividade solar, também foram utilizados dados das estações CFAG e MARA, sem (SCI) e com a correção do erro sistemático devido à ionosfera. Baseado nos resultados apresentados nos experimentos anteriores, para realizar estas análises, adotou-se a GI com 5° de resolução e o modelo de grade decomposta.

Após a escolha da estratégia de processamento (CCI_I_{DGrd_r5}), a performance da GI foi avaliada em termos de acurácia do posicionamento por ponto em tempo real e pós processado. A análise da acurácia foi baseada nas soluções do posicionamento por ponto a cada instante. As correções utilizando a GI foram efetuadas somente quando o GIVE estava disponível e indicava o intervalo de confiança da GI com 99,9% de probabilidade. Nos instantes em que o GIVE não garantia a qualidade da GI, a correção não foi aplicada. Também foi realizada a análise considerando a acurácia na posição obtida após cada 24 horas de dados processados. De modo geral, conclui-se que a GI melhora a acurácia do posicionamento por ponto, principalmente em relação à componente altimétrica. Na análise de época por época, teve dias em que a GI chegou a proporcionar uma melhora média de 81,40% em altimetria, que corresponde a uma redução do erro de 30,77 m para 5,72 m, e de 20,79% em planimetria, que corresponde a uma redução do erro de 3,76 m para 2,98 m. Já na análise da posição média obtida após 24 hora de processamento, o GI proporcionou uma melhora de

até 95,20% em altimetria, que corresponde a uma redução do erro médio de 9,38 m para 0,45 m, e de 79,33% em planimetria, que equivale a uma redução do erro médio de 8,02 m para 1,66 m. Entretanto, em alguns momentos a GI degradou significativamente a qualidade do posicionamento, principalmente, nos horários após o pôr do Sol, nas primeiras horas da madrugada, quando os IPPs caíram em região de bordas e também devido a interrupções na disponibilidade dos IGP's em algumas regiões, este último em função da distribuição das estações de referência. É importante salientar que nos períodos em que a qualidade do posicionamento foi degradada, o GIVE não estava disponível ou apresentava um erro muito alto para o atraso ionosférico estimado para o IGP da GI.

Destas análises conclui-se que a GI e o GIVE têm grande potencial de uso tanto para aplicações de posicionamento e navegação GNSS, quanto para estudos da ionosfera. Conclui-se também que a eficiência das correções do atraso ionosférico é fortemente afetada pela distribuição e pelo número das estações de referência utilizadas na geração da GI, fato este que tem impacto direto no GIVE. Além disto, a acurácia destas correções também é afetada pela tendência interfrequência dos satélites e receptores. Fatores como disponibilidade, continuidade, integridade e acurácia da GI também afetam significativamente a qualidade do posicionamento e navegação do usuário, sendo que os experimentos mostraram que estes fatores são diretamente influenciados pela geometria dos satélites e pela densidade e forma de distribuição das estações de referência.

Do que foi exposto, pode-se concluir que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados e cumpridos.

8.2 Recomendações

Como mencionado anteriormente, no Brasil este trabalho é o primeiro passo em termos de geração de grade ionosférica e GIVE, utilizando principalmente os conceitos já estabelecidos para aplicações compatíveis com os SBASs. Entretanto, devido às limitações operacionais algumas dificuldades foram observadas, dentre as quais pode-se citar a geração do GIVE. Pelas análises realizadas pôde-se verificar que em alguns momentos o GIVE subestima a qualidade da correção e em outros esta qualidade é superestimada. Este é um fator decorrente do método utilizado para a geração do GIVE, que no caso deste trabalho, como já apresentado no capítulo 5, foi aplicado apenas a propagação de erros. Já em

estruturas implantadas para atender um SBAS, há redundância de estações de referência. Esta redundância de estações é utilizada na determinação do erro da grade ionosférica e então gera-se o GIVE. Assim, recomenda-se que seja realizado um estudo específico para melhorar o processo de geração do GIVE e torná-lo mais realístico.

A partir da análise dos resultados, das dificuldades observadas, da experiência adquirida e tendo em vista que este foi apenas um passo inicial, as seguintes recomendações são feitas:

- Direcionar esforços para desenvolver um método de determinação da tendência interfrequência dos satélites e receptores, de modo que estes parâmetros sejam independentes da função de modelagem da ionosfera. Atualmente, todos os processos de determinação destas tendências são realizados simultaneamente à estimação dos coeficientes da função de modelagem da ionosfera. Assim, a qualidade destas determinações depende da eficiência da função em modelar a ionosfera e, além disto, fisicamente estes erros sistemáticos são independentes e possuem diferentes fontes;
- Realizar estudos do comportamento da GI e do GIVE exclusivamente voltados ao efeito da cintilação ionosférica, da anomalia equatorial e do pico pré-inversão, presentes na região brasileira, a fim de analisar e melhorar as funções utilizadas para a interpolação da GI, bem como dos modelos de propagação de erros usados na geração do GIVE;
- Investigar e analisar outras possibilidades para o modelo de decomposição da camada ionosférica;
- Implantar projeto específico para o desenvolvimento de algoritmos. Durante o trabalho observou-se que se gasta muito tempo no desenvolvimento de algoritmos. Esta dificuldade pode ser atenuada a partir da implantação de um projeto em rede, para o desenvolvimento de bibliotecas para processamento de dados GNSS;
- Otimizar o algoritmo da GI para executar os processamentos em menor tempo. No processo mais “pesado”, para a grade decomposta, com resolução de 1°, usando 49 estações de referência, a execução do Mod_Ion_FK e da GI demorou aproximadamente 0,5 segundo para determinar as tendências interfrequências e gerar 29400 IGP por instante. Isto significa que para processar 24 horas de dados coletados a uma taxa de rastreo de 1 segundo, o

tempo estimado de processo é de 12 horas, o que pode ser considerado um tempo de processamento alto. Este processamento foi realizado em um notebook com processador Intel Core2 Duo T5750 2.0 Ghz e com memória RAM DDR2 de 2GB;

- Desenvolver um SIG (Sistema de Informações Geográficas) para o gerenciamento, organização, processamento e armazenamento de dados em massa. Atualmente, observa-se que há muita dificuldade numa análise temporal dos dados devido à dificuldade em acessar, processar e analisar uma grande quantidade de dados; e
- Fornecer as informações da ionosfera, bem como as correções aos usuários, em tempo real. O algoritmo da GI já gera gráficos, mapas e arquivos contendo o atraso ionosférico dos IGPs. Inicialmente, estas informações podem ser fornecidas aos usuários via internet.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O.; MATSUOKA, M. T.; DAL POZ, W. R.. Determinação do Erro Sistemático na Pseudodistância devida à Ionosfera: avaliação da performance do Mod_Ion e do modelo de Klobuchar. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2003. vol.3, p.119-132.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Análise da performance do Modelo da Ionosfera (Mod_Ion_FK) no posicionamento por ponto em tempo real. In: *XXII Congresso Brasileiro de Cartografia*, 22, 2005, Macaé. 2005.

AGUIAR, C. R. *Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): Implementação em Tempo Real*. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Determinação do Erro Sistemático na Pseudodistância Devido à Ionosfera: Avaliação da Performance do Modelo Ionosférico Regional em Tempo Real. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2006a. vol.5.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Modelagem em Tempo Real do Erro Sistemático das Observáveis GPS Devido à Ionosfera. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, n. 1, p.101-120, jan-jun. 2006b.

AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Potencial del GPS en el Estudio de la Deriva Vertical del Plasma de la Ionosfera a partir de las Señales en la Banda L. In: *7th Geomatic Week*, Barcelona, Espanha. 2007.

AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics). Guide to Reference and Standard Ionosphere Models. Reston: AIAA, 2010. Disponível em <<http://spacewx.com/Docs/>>. Acesso em: 27 set. 2010.

AQUINO, M.; MONICO, J. F. G.; DODSON, A. H.; MARQUES, H. A.; FRANCESCHI, G.; ALFONSI, L.; ROMANO, V.; ANDREOTTI, M. Improving the GNSS positioning stochastic model in the presence of ionospheric scintillation. In: *Journal of Geodesy*, v.83, 2009, p.953-966.

ARAGÓN-ÁNGEL, A.; ORÚS, R.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J. Preliminary NeQuick assessment for future single frequency users of GALILEO. In: *Proceeding of the 6th Geomatic Week*, Barcelona, Spain. 2005.

ARMENDARIS, O. C. ; MATSUOKA, M T; CAMARGO, P O . Desempenho do Modelo Global da Ionosfera do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região sul do brasil em período de alta atividade solar. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 2, p.208-223, abr-jun, 2009.

AZPILICUETA, F. *TEC Global Model based on GPS and Satellite Altimetry observations*. 2006. 73 f. Doctorado Tesis – Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

AZPILICUETA, F.; BRUNINI, C.; RADICELLA, S.M. Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude.. *Advances in Space Research.*, v. 38, n. 11, 2006, p.2324-2331.

BATISTA, I. S. *Notas de aula do curso “Introdução à ionosfera e a propagação de ondas” ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista*, 2003.

BILITZA, D. *International Reference Ionosphere 1990*, 1990. 155 f. Relatório NSSDC/WDC-A-R&S 90-22, National Space Science Data Center/World Data Center A for Rockets and Satellites, Greenbelt, Maryland, 1990.

BILITZA, D.; REINISCH, B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* v.42, p. 599-609, 2008.

BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. Adapting Kriging to the WAAS MOPS Ionospheric Grid. In: *2003 National Technical Meeting Proceedings*, Anaheim, California. 2003. Disponível em <<http://waas.stanford.edu>>. Acesso em: 10 out. 2004.

BLANCH, J. *Using Kriging to Bound Satellite Ranging Errors Due to the Ionosphere*. 2003. 130 f. Ph.D. dissertation – Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.

BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. A New Ionospheric Estimation Algorithm for SBAS Combining Kriging and Tomography. In: *Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting*, San Diego, California. 2004.

BOTHMER, V.; DAGLIS, I. A. *Space Weather: Physics and Effects*. New York: Springer-Verlag, 2007. 438p.

CAMARGO, P. O. *Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência*. 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; FERREIRA, L. D. D. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth, Planets and Space*, Japão, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.

CAMARGO, P.O.. *Aplicação do Filtro de Kalman na estimação dos parâmetros de modelo da ionosfera*. 2001, 56p. Relatório trienal de pesquisa desenvolvida em Regime de Dedicação Integral à Docência e à Pesquisa (RDID), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

CAMPOS, M. A.; WANNINGER, L.; SEEBER, G. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: *3º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica – Resumos Expandidos*, Rio de Janeiro/RJ, p.601-604, 1993

CANAVITSAS, A.A.C.; ASSIS, M.S.; AMENDOLA, G.V. Variações dos Sinais GPS na Propagação Transionosférica, Afetando os Futuros Sistemas de Radionavegação Aeronáutica. *Revista Digital Online*, 2004.

CHAO, Y.C. *Real Time Implementation of the Wide Area Augmentation System for the Global Positioning System with an Emphasis on Ionospheric Modeling*. 1997. 140 f. Ph.D. Dissertation – Department Aeronautics and Astronautics, Stanford University.

COCO, D. S., COKER, C., DAHLKE, S. R., CLYNCH, J. R. Variability of GPS satellite differential group delay biases. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v.27, n.6, p.931-938, 1991.

CONKER, R. S., EL-ARINI, M. B., ALBERTSON, T. W., KLOBUCHAR, J. A., DOHERTY, P. H.. Description and Assessment of Real-Time Algorithms to Estimate the Ionospheric Error Bounds for WASS. In: *Journal of The Institute of Navigation*, v.44, n.1, 1997, p.77-87.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Y. *Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/SBAS Availability*. Virginia: The MITRE Corporation, 2000. 63p.

CPI Computational Physics, Inc. Colorado: Parameterized Ionospheric Model, 2009. Disponível em: < <http://www.cpi.com/>>. Acesso em: 27 ago. 2009.

DAL POZ, W. R. *Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas*. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

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

DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). Programa de Transição do SISCEAB para os Sistemas CNS/ATM. 2003 – Comando do Aeronáutica. – on line – Endereço eletrônico: <www.ele.ita.br>. Acesso em: 18 out. 2004.

DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). Programa de Transição do SISCEAB para os Sistemas CNS/ATM. 2006 – Comando do Aeronáutica. PCA 351-3 – on line – Endereço eletrônico: <<http://www.aer.mil.br>>. Acesso em: 09 set. 2008.

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*. Nottingham, 2008. Disponível em: <http://www.nottingham.ac.uk/iessg/public/2008_iono_workshop/De_Paula.pdf>. Acesso em 26 jun. 2010.

DI GIOVANNI, G.; RADICELLA, S. M. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*, Elsevier Science, v. 10, n. 11, p. 27-30, 1990.

EGNOS. European Geostationary Navigation Overlay Service. Online, 2009. Disponível em: <<http://www.esa.int/esaNA/egnos.html>>. Acesso em: 20 jan. 2010.

EL GIZAWY, M. L. *Development of an Ionosphere Monitoring Technique Using GPS Measurements for High Latitude GPS Users*. 2003. 173 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

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

FEDRIZZI, M. *Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS*. 2003. 223 f. 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*. 2002. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FORTES, L. P. S. *Optimizing the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning*. 2002. 354 f. Ph.D. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20158, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

FORTES, L. P. S.; COSTA, S. M. A.; ABREU, M. A.; JÚNIOR, N. J. M.; SILVA, A. L.; LIMA, M. A. A.; BARBOSA, K.; GOMES, E.; MONICO, J. F. G.; SANTOS, M. C.; TÊTREAUULT, P. Plano de Expansão e Modernização das Redes Ativas RBMC/RIBaC. *Actas XXIV Reunión Científica de la AAGG*, 2009. p.194-200.

FU, W. X.; HAN, S.; RIZOS, C.; KINGHT, M.; FINN, A. Some Results on the Nonparametric Statistics of GPS Signal Scintillation. In: *Int. Symp. on GPS: Application to Earth Sciences & Interaction with Other Space Geodetic Techniques*, Tsukuba, Japan, 18-22 October, 1999.

FUGRO. Survey Services: Satellite Positioning. Online, 2010. Disponível em: <<http://www.fugro.com/survey/satellite/intro.asp>>. Acesso em: 22 fev. 2010.

GAO, Y.; LIU, Z. Z. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. *Journal of Global Positioning Systems*, v.1,n.1, jul. 2002. p.18-24.

GELB, A.; KASPER, J.F.; NASH, R.A.; PRICE, C.F.; SUTHERLAND, A.A. *Applied Optimal Estimation*. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press, 1974. 374p.

GEOOPTICS. Online, 2009. Disponível em: <http://geooptics.com/GeoOptics/_Frames.html>. Acessado em: 19 set. 2009.

GEORGIADIOU, Y. Modelling the ionosphere for an active control network of GPS stations. *LGR-Series - Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, Delft University of Technology, n.7, 1994.

GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam). Online, 2008. Disponível em: <<http://www.gfz-potsdam.de>>. Acesso em: 15 mar. 2008.

Ghilani, C. D; Wolf, P. R. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 640p.

GIM – Global Ionosphere Maps by CODE. Universität Bern: CODE (Center for Orbit Determination in Europe) online, 2009. <<http://www.aiub.unibe.ch/>>. Acesso em: 01 set. 2009.

GPSTK, GPS Tool Kit. Online, 2007. Disponível em: <www.gpstk.org>. Acesso em: 10 jan. 2007.

HAJJ, G. A.; WILSON, B. A., WANG, C.; PI, X. Ionospheric Data Assimilation by Use of the Kalman Filter. In: *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands. 2002. Disponível em: <<http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p1226.pdf>>. Acesso em: dez. 2003.

HANSEN, A.J. Tomographic Estimation of the Ionosphere using Terrestrial GPS Sensors. 2002. 200 f. Ph.D. Dissertation – Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, EUA.

HANSEN, A., BLANCH, J., WALTER, T., ENGE, P. Ionospheric Correlations Analysis for WAAS: Quiet and Stormy. In: *13TH International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS-2000* – CD ROM, Salt Lake City, Utha, Sept. 19-22, 2000.

HARGREAVES, J. K. *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere*. Cambridge: Cambridge Press, 1992. 420p.

HAYSTACK Observatory. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology online, 2008. Disponível em: <<http://www.haystack.edu/midas/inscal.html>>. Acesso em: 10 mar. 2008.

HEGARTY, C.; POWERS, E.; FONVILLE, B. Accounting for Timing Biases Between GPS, Modernized GPS, and Galileo Signals. In: *36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting*, Washington, D.C., 2005, p.307-318.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.M.; SANZ, J.; COLOMBO, O.L. Tomographic modeling of GNSS ionospheric corrections: Assessment and real-time applications. In: *Proceedings of The ION GPS'2001*, Salt Lake City, Sept. 11-14, 2001, p. 2507-2515.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J.M.; SANZ, J.; ORUS, R.; GARCIA-RIGO, A.; FELTENS, J.; KOMJATHY, A.; SCHAEER, S. C.; KRANKOWSKI, A. The IGS VTEC

maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, v.83, n.3-4, 2009, p.263-275.

HEY, J. S.; PARSONS, S. J.; PHILLIPS, J. W. Fluctuations in cosmic radiation at radiofrequencies. *Nature*, v. 158, p. 234-234, 1946.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *GPS Theory and Practice*. 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.

IARS Ionospheric and Atmospheric Remote Sensing. NASA: JPL online, 2009. Disponível em: < <http://iono.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 01 set. 2009.

ICAO. Aeronautical Telecommunications Annex 10-SARPs, Radio Navigation Aids. Disponível em: <www.icao.int/>. Acesso em: 12 jul. 2009.

ICAO. International Civil Aviation Organization. Online, 2010. Disponível em: < www.icao.int/>. Acesso em: 12 mar. 2010.

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

ICAO. Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. (Doc 9849), 2005. Disponível em: < www.icao.int/>. Acesso em: 12 jul. 2009.

IGS (International GNSS Service) online, 2009. Disponível em: <www.igs.ensg.ign.fr>. Acesso em: 24 out. 2009.

IONMON ESOC Ionosphere Monitoring Facility. ESA(European Space Agency): ESOC online, 2003. Disponível em: <<http://nng.esoc.esa.de/gps/ionmon.html>>. Acesso em: 20 out. 2009.

IPS Radio and Space Services. Australian: The Australian Space Weather Agency online, 2009. Disponível em: <<http://www.ips.gov.au/>>. Acesso em: 31 ago. 2009.

IS-GPS-200D. *Interface Specification: NAVSTAR Global Positioning System*, 2004. 193 f. Revision D, NAVSTAR GPS Joint Program Office, El Segundo, USA, dec. 2004.

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). Satellites and Spacecraft. Online, 2010. Disponível em: < http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index_e.html>. Acesso em: 22 fev. 2010.

JIN. X.X. *Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results*. 1996. PhD Thesis – Delft University of Technology, Delft.

KAJII, M. Complement and Augmentation of GPS from a Quasi-Zenith Orbit. In: *Satellite Navigation Systems: Policy, Commercial and Technical Interaction - Proceedings of an International Symposium*. Strasbourg, France, 26-28 may. 2003, p.37-44.

KALMAN, R.E.. A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Journal of Basic Engineering*, v.82D, Mar. 1960, p.35-45.

KEE, C.; YUN, D. Development of Real-Time SNUDGPS via Ionospheric and Tropospheric Corrections. In: *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS-98* – CD ROM, Nashville, Tennessee, sept.15-18, 1998.

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

KLOBUCHAR, J. A., DOHERTY, P. H., EL-ARINI, M. B. Potencial Ionospheric Limitations to GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS). *Journal of The Institute of Navigation*, v.42, n.2, 1995, p.353-370.

KLOBUCHAR, J. A.; KUNCHES, J. M. Eye on the Ionosphere: Correction Methods for GPS Ionospheric Range Delay. *GPS Solutions*, v.5, n.2, 2001, p.91-92.

KOGURE, S. QZSS/MSAS Status. In: *47th Meeting*, Fort Worth, Texas, sept. 25, 2007.

KOMJATHY, A.; LANGLEY, R. B. Assessment of Two Methods to Provide Ionospheric Range Error Corrections for Single-Frequency GPS Users. In: *XXI General Assembly of IUGG*, 2-14 July 1995, Boulder, Colorado, U.S.A.

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.

KOMJATHY, A. Comunicação por email com Manuel Hernandez-Pajares do group of Astronomy & GEomatics, UPC/gAGE. *Publicação eletrônica* [mensagem pessoal]. 2000.

KONNO, H.; PULLEN, S.; RIFE, J.; ENGE, P. Ionosphere Monitoring Methodology for Hybrid Dual-Frequency LAAS. In: *ION Institute of Navigation Global Navigation Satellite Systems Conference*, Fort Worth, TX, sept. 2006.

LEICK, A. *GPS Satellite Surveying*, New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

LEJEUNE, R.; EL-ARINI, M. B. An Ionospheric Grid Algorithm for WAAS Based on the Minimum Mean Square Error Estimator. In: *International Ionosphere Effects Symposium*. 2004. Disponível em: <www.mitrecaasd.org/liberary/general/index.efm>. Acesso em: 10 out. 2004.

LIAO, X. *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. 2000. 120 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20143, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LIN, L. S. A Novel Approach to Improving the Accuracy of Real-Time Ionospheric Delay Estimation Using GPS, In: *Proceedings of The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-97*, Kansas City, Sept. 16-19, 1997, p.169-178.

LIU, G.C. *Ionosphere Weighted Global Positioning System Carrier Phase Ambiguity Resolution*. 2001. 172 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20155, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LIU, Z. *Ionosphere Tomographic Modeling and Applications Using Global Positioning System (GPS) Measurements*. 2004. 304 f. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LU, G. *Quality control for differential kinematic GPS positioning*. 1991. 102 f. Ph.D. Thesis – Department Surveying Engineering, UCGE Report n° 20042, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

MA, G.; MARUYAMA, T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Annales Geophysicae*, v. 21, p. 2083-2093, 2003.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando o modelo de Klobuchar e o regional da ionosfera: avaliação da performance no posicionamento por ponto. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2002. vol.2, p.20-40.

MATSUOKA, M. T. *Avaliação de Funções para Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS*. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

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.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção Ionosférica utilizando os Mapas Globais do TEC do IGS: Avaliação do posicionamento por ponto na região brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 13, n. 2, p.253-270, jul-dez. 2007.

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

MENVIELLE, M. The Geomagnetic Índices: derivation, meaning, and availability. In: ESA Workshop on Space Weather, 1., 1998, Noordwijk. *Electronic Proceedings*, Noordwijk: ESA, 1998. Disponível em: <http://www.esa-spaceweather.net/spweather/workshops/proceedings_w1/POSTER3/menvielle22.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2007.

MEMARZADEH, Y.; MAREL, H. V. D. A comparison between NeQuick-derived and measured slant ionospheric delay from GPS data. In: *Proceedings of The European Navigation Conference*, Manchester, The UK, may 8-10, 2006.

MEMARZADEH, Y. *Ionospheric modeling for precise GNSS applications*. 2009. 208 f. Ph.D. Thesis – Delft institute of Earth Observation and Space systems (DEOS), Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.

MITCHELL, C. N.; KERSLEY, L.; HEATON, J. A. T.; PRYSE, S. E. Determination of the vertical electron-density profile in ionospheric tomography: experimental results. *Annales Geophysicae*, EGS Springer-Verlag, v. 15, p. 747-752, 1997.

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

MOON, Y. *Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National And Regional GPS Networks in Canada*. 2004. 103 f. Ph.D. Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

MUELLER, T., DAVIS, P. Real-Time WADGPS Ionospheric Correction Filter, In: *Proceedings of the National Technical Meeting "Navigation 2000"*, Long Beach, California, January 21-23, 1998, p.753-761.

NACHO, R. New CC2NONCC (v6.1). Online, 2008. Disponível em: <<http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsbmail/2008/msg00150.html>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

NAVCOM. The Star Fire Network. Online, 2010. Disponível em: <www.navcomtech.com/StarFire/>. Acesso em: 22 fev. 2010.

NRCan. *User's Guide – GPSPACE (GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides)*, Canadian Active Control System Operations, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada, 2000. 58p.

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.; JAMES, H.W.. Ionospheric modelling for single frequency users of the Global Positioning System: a status report. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System GPS-90*, The Institute of Navigation, Ottawa, Ontario, Canada, Sept. 1990, p.429-443.

NEWBY, S. P.; LANGLEY, R. B. Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model?, In: *Proceeding of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Columbus, OH, USA, Mar. 16-20, 1992, v.1, p.240-244.

NWRA (NorthWest Research Associates). Space Weather Services. Disponível em: <<http://www.nwra-az.com/spawx/f10.html>>. Acessado em: 26 mar. 2007.

ODIJK, D. *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays*. The Netherlands: Optima Grafische Communicatie, 2002. 242p.

ORÚS, R.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, M. Validation of the GPS TEC Maps with TOPEX Data. *Adv. Space Res.* v. 31, n. 3, p. 621-627, 2003.

OVSTEDAL, O. Absolute positioning with single frequency GPS receivers. *GPS Solutions*. v.5, n.4, p.33-34, 2002.

OS-SIS-ICD. *European GNSS (Galileo) Open Service: Signal in Space Interface Control Document*, 2010. 196 f., European Union, set. 2010.

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.

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

RIUS, A.; RUFFINI, G.; CUCURULL, L. Improving the vertical resolution of ionospheric tomography with GPS occultations. *Geophysical Research Letters*, AGU, v. 24, n. 18, p. 2291-2204, set. 1997.

RODRIGUES, F. S. R.. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SAKAI, T.; MATSUNGA, K.; HOSHINO, K.; WALTER, T. Evaluating Ionospheric Effects on SBAS in the Low Magnetic Latitude Region. In: *Proceedings of the 17th Int'l Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS)*, Logn Beach, CA, sep. 2004, p.1318-1328.

SARDON, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observation. *Radio Science*, v.29, n.3, p.577-586, 1994.

SARMA, A. D.; PRASAD, N.; MADHU, T. Investigation of suitability of grid-based ionospheric models for GAGAN. *Electronic Letters*, v.42, n.8, p.478-479, 2006.

SASIBHUSHANA RAO, G. GPS and receiver instrumental biases estimation using least squares method for accurate ionosphere modeling; *J. Earth Syst. Sci.* v. 116, n. 5, p. 407–411, 2007.

SCHAER, S. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. 205 f. Ph.D. Dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland.

SCHERLIESS, L.; SCHUNK, R. W.; SOJKA, J. J.; THOMPSON, D. C. Development of a Physics-Based Kalman Filter for the Ionosphere in GAIM. In: *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands. 2002. Disponível em: <<http://hawk.iszf.irk.ru/URSI2002/GAabstracts/papers/p1923.pdf>>. Acesso em: dez. 2003.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1993. 531p.

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

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

SHKAROFISKY, I. P. Generalized Appleton-Hartree Equation for Any Degree of Ionization and Application to the Ionosphere. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, v.49, n.12, p.1857-1871, 1961.

SILVA, H. A.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; FRANCESCHI, G.; DODSON, A. Stochastic modelling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point positioning. *Advances in Space Research*. v. 45, p. 1113-1121, 2010.

SIRGAS. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. Online, 2010. Disponível em: <<http://www.sirgas.org>>. Acesso em: 05 out. 2010.

SKONE, S. *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*. 1998. 198 f. Ph.D Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

SKONE, S. Wide Area Ionosphere Modeling at Low Latitudes – Specifications and Limitations. In: *13TH International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS-2000* – CD ROM, Salt Lake City, Utha, Sept. 19-22, 2000.

STOLLE, C.; RAABE, A.; JACOBI, C.; SHLÜTER, S.; JAKOWSKI, N. Ionospheric Tomography using GPS-Data from CHAMP-Occultations. 2003. Disponível em: <www.copernicus.org/EGS/egsga/nice01/programme/abstracts/aai5679.pdf>. Acesso em: nov. 2003.

STWART, M.P.; FFOULKES-JONES, G.H.; OCHIENG, W.Y. *GPS Analysis Software (GAS) Version 2.2 User Manual*. University of Nottingham: IESSG Publication. 1994.

TEUNISSEN, P.J.G. *Dynamische gegevensverwerking I (GE-44) – Inleiding Filtertheorie*. Faculteit der Geodesie - Delft. 1990.

UPC (Polytechnical University of Catalonia). Online, 2009. Disponível em: <<http://gagel.upc.es//>>. Acesso em: 01 set. 2009.

YAMASHITA, C.S. *Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude*. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

WAAS. US Department of Transportation Federal – Federal Aviation Administration Specification for the WAAS. Doc. DTFA01-96-C-0025, 2001.

WALSH, J. F. Ionosphere Effects on GPS. In: 31th Civil GPS Service Interface Committee Meetings. 1996. Disponível em: <<http://www.navcen.uscg.gov/cgsic/meetings/>>. Acesso em: 26 mar 2007.

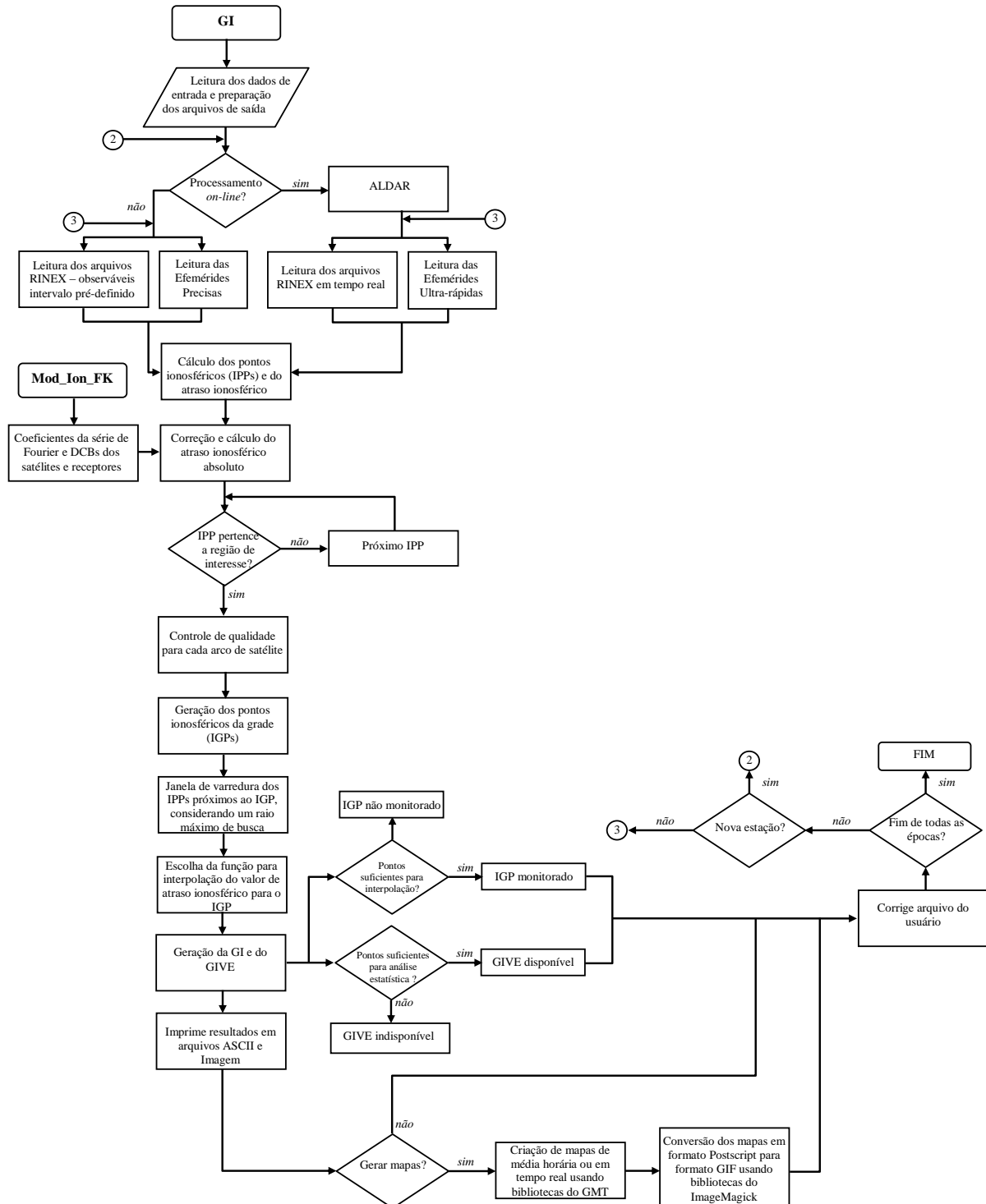
WEBSTER, I.. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. 1993. M.Sc. Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

WIELGOSZ, P.; GREJNER-BRZEZINSKA, D.; KASHANI, I. Regional Ionosphere Mapping with Kriging and Multiquadric Methods. *Journal of Global Positioning Systems*, v. 2, n. 1, p.48-55, 2003.

WILSON, B. D.; MANNUCCI, A. J. *Instrumental Biases in Ionospheric Measurements Derived from GPS Data*. Jet Propulsion Laboratory, Salt Lake City, Utah, 1993

WU, B., NICOLAIDES, P., UPADHYAY, T. N., JENKINS, T. R. Ionospheric Error Compensation for GPS Receivers using Real-Time Ionospheric Model, In: *Proceedings of The 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, Sept. 17-20, 1996, p.575-583.

APÊNDICE A – Fluxograma do algoritmo da GI



APÊNDICE B – Arquivo RINEX 3.00

```

3.00 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE
teqc 2006Apr5 IBGE/DEGED 20060517 20:05:07UTC PGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.20-8|Pentium IV|gcc|Linux|486/DX+ COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
PFTE - RBMC Presidente Prudente MARKER NAME
93900 MARKER NUMBER
Agencia "HOST" IBGE/BRASIL OBSERVER / AGENCY
4427235643 TRIMBLE NetRS Nav 7.32 Sig 3.08 REC # / TYPE / VERS
12379370 ZEPHYR GEODETIC ANT # / TYPE
3687624.3160 -4620818.6050 -2386880.3440 APPROX POSITION XYZ
.0025 .0000 .0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
*** Above antenna height is from mark to BOTTOM OF ANTENNA. COMMENT
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
G 6 L1 C1C L2 C2P D1 I1 # / TYPES OF OBSERV
15.0000 INTERVAL
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
Forced Modulo Decimation to 15 seconds COMMENT
2006 5 11 0 15 30.00000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER

> 2006 05 11 00 15 30.0000000 0 11
G19 -4149007.05547 24412918.11740 -3215653.91743 24412912.94140 3402.53140 28.926
G06 -2327755.23046 24434751.93840 -3113845.06543 24434750.34440 -3313.45340 12.195
G01 -4226972.48146 24708759.37540 -3261285.64843 24708760.66440 3561.67240 13.628
G15 -12078387.95548 21873402.70340 -11001524.87345 21873400.26240 -760.64140 8.577
G03 -19750080.81648 21754779.34440 -15373602.96146 21754777.07440 2607.67240 6.145
G21 -6536456.35047 23206812.07840 -8282896.80744 23206808.03140 -1484.90640 12.449
G22 -25833090.54948 20301682.69540 -20090996.31247 20301678.44140 -798.39140 7.118
G18 -16236952.43347 22295548.83640 -12625674.81745 22295545.77040 -2912.29740 9.200
G07 -27543458.16948 20171733.62540 -21440306.47646 20171731.50440 -1028.46940 6.938
G16 -16190354.00847 22210360.57840 -12587831.95445 22210357.50840 -1941.73440 8.085
G14 -18589081.75148 21880784.55540 -14464697.64845 21880781.48840 2727.06340 6.750
> 2006 05 11 00 15 45.0000000 0 11
G19 -4200044.81746 24403205.48440 -3255423.59543 24403200.32440 3402.10940 34.693
G06 -2278036.63345 24444212.27340 -3075103.31943 24444211.66440 -3315.76640 15.041
G01 -4280410.71546 24698590.45340 -3302925.88843 24698592.59040 3563.29740 15.697
G15 -12066977.07848 21875574.28140 -10992633.27046 21875572.48840 -760.92240 16.292
G03 -19789158.84648 21747342.60940 -15404053.37846 21747341.11340 2602.60940 13.567
G21 -6514182.40547 23211051.21140 -8265540.50644 23211046.96540 -1485.17240 14.111
G22 -25821064.22948 20303971.17240 -20081625.15347 20303966.96140 -805.31240 12.881
G18 -16193253.05447 22303864.60240 -12591623.36345 22303861.48440 -2914.50040 16.060
G07 -27527968.27548 20174681.30540 -21428236.42846 20174679.05540 -1037.01640 11.287
G16 -16161189.54647 22215910.59440 -12565106.40845 22215907.18840 -1947.07840 11.057
G14 -18629950.90348 21873006.70340 -14496543.74145 21873004.58640 2722.00040 8.192
> 2006 05 11 00 16 .0000000 0 11
G19 -4251079.38146 24393493.59440 -3295190.79743 24393489.29340 3402.14140 26.604
G06 -2228281.43146 24453680.50840 -3036333.12043 24453679.03940 -3318.04740 16.443
G01 -4333874.96146 24688415.80540 -3344586.37943 24688418.89540 3565.31340 13.636
G15 -12055563.94347 21877746.30540 -10983739.92445 21877744.09440 -760.93740 13.371
G03 -19828162.36148 21739920.64140 -15434445.71646 21739918.57840 2597.81340 12.393
G21 -6491904.72547 23215290.57040 -8248181.26444 23215286.47340 -1485.23440 14.178
G22 -25808935.55448 20306279.17240 -20072174.24047 20306274.57840 -811.89140 11.159
G18 -16149520.76547 22312186.32040 -12557546.26045 22312182.75040 -2916.51640 14.253
G07 -27512351.40848 20177652.55540 -21416067.44746 20177650.65640 -1045.29740 10.221
G16 -16131944.63947 22221475.79740 -12542318.18145 22221472.96940 -1952.28140 9.013
G14 -18670745.36348 21865244.04740 -14528331.63245 21865241.48440 2717.20340 11.206
> 2006 05 11 00 16 15.0000000 0 11
G19 -4302110.10446 24383783.45340 -3334954.98243 24383778.16440 3402.03140 26.527
G06 -2178489.72046 24463157.02340 -2997534.41343 24463153.46540 -3320.67240 14.116
G01 -4387364.59646 24678238.14840 -3386266.63443 24678240.63340 3566.92240 12.842
G15 -12044148.19747 21879918.55540 -10974844.54346 21879916.56640 -761.14140 16.074
G03 -19867090.77048 21732512.98440 -15464779.53546 21732510.60940 2592.75040 15.425
G21 -6469622.95047 23219530.52340 -8230818.83744 23219526.41040 -1485.51640 15.187
G22 -25796704.53948 20308606.82040 -20062643.57747 20308602.36340 -818.78140 12.839
G18 -16105755.58547 22320514.88340 -12523443.51645 22320511.50040 -2918.78140 16.788
G07 -27496607.40448 20180648.76640 -21403799.39146 20180646.91440 -1053.85940 10.491
G16 -16102619.36147 22227055.82840 -12519467.32945 22227053.12940 -1957.75040 8.995
G14 -18711464.46047 21857495.71940 -14560060.78845 21857492.74640 2712.15640 9.457
> 2006 05 11 00 16 30.0000000 0 11
G19 -4353136.92946 24374072.81340 -3374716.15044 24374068.53940 3401.54740 26.785
G06 -2128661.96746 24472638.09440 -2958707.59843 24472636.31340 -3323.03140 13.462
G01 -4440879.58746 24668054.14140 -3427966.68042 24668056.21540 3568.50040 11.381
G15 -12032729.94047 21882091.42240 -10965947.20745 21882089.25440 -761.37540 10.778
G03 -19905943.86348 21725119.39840 -15495054.68046 21725117.16840 2587.56340 10.438
G21 -6447337.11047 23223771.04740 -8213453.24544 23223766.96540 -1485.92240 14.809
G22 -25784371.64548 20310953.52947 -20053033.52947 20310948.89540 -825.68740 8.875
G18 -16061957.94947 22328849.50840 -12489315.50445 22328845.92240 -2921.06240 12.085
G07 -27480736.55748 20183669.07840 -21391432.49346 20183667.10540 -1062.37540 9.232
G16 -16073214.17347 22232651.32840 -12496554.21445 22232648.51240 -1963.09440 8.134
G14 -18752107.88148 21849761.37540 -14591730.98545 21849758.59840 2707.00040 9.408
> 2006 05 11 00 16 45.0000000 0 11
G19 -4404159.71646 24364363.06340 -3414474.17443 24364359.18840 3401.26640 23.090
G06 -2078798.23546 24482127.98440 -2919852.82443 24482125.13740 -3325.39140 12.141
G01 -4494419.59946 24657865.32840 -3469686.19643 24657868.24240 3569.96940 11.496
G15 -12021309.30648 21884264.52340 -10957048.02545 21884261.97340 -761.54740 10.210

```


ANEXO A – Dados de entrada e saída das principais funções do WAAS.

Neste anexo são apresentados os dados de entrada e de saída das 8 (oito) principais funções executadas pelo WAAS (WAAS, 2001).

Função 1 – Coleta de dados.

| Entrada | Saída |
|---|---|
| a. Observáveis do GPS; b. Observáveis do satélite GEO; c. Observáveis troposféricas; d. Dados de localização do equipamento; e e. Dados de calibração do equipamento. | a. Medidas GPS de pseudodistância L_1 (C/A); b. Medidas diferenciais do código em L_1 e L_2 ; c. Dados de navegação do satélite GPS; d. Dados de pseudodistância L_1 (C/A) do satélite GEO; e. Dados de navegação do satélite GEO; f. Dados troposféricos; g. Posição do centro de fase da antena; h. Dados de tendência diferencial das pseudodistâncias em L_1 e L_2 ; i. Notificação de falha nos dados. |

Função 2 – Determinação de correções ionosféricas.

| Entrada | Saída |
|--|--|
| a. Medidas diferenciais do código em L_1 e L_2 ; b. Tendência das medidas diferenciais L_1/L_2 no receptor; c. Posição do centro de fase da antena d. Dados de navegação dos satélites GPS; e e. Definição da grade ionosférica. | a. Localização dos IGP's; b. Atraso ionosférico vertical para cada IGP; e c. GIVE; |

Função 3 – Determinação da órbita dos satélites.

| Entrada | Saída |
|--|---|
| a. Medidas de pseudodistância L_1 (C/A); b. Medidas diferenciais do código em L_1 e L_2 ; c. Dados de navegação do satélite GPS; d. Medidas de pseudodistância L_1 (C/A) do satélite GEO; e. Dados de navegação do satélite GEO; f. Dados troposféricos; g. Posição do centro de fase da antena; h. Tendência das medidas diferenciais L_1/L_2 no receptor; i. Dados ionosféricos dos satélites GEO; j. Manobra (manual) planejada para o satélite GEO; e k. Manobra (manual) planejada para o satélite GPS. | a. Dados de órbita dos satélites GPS; b. Dados de órbita do satélite GEO; c. Efemérides do satélite GEO; e d. Almanaque do satélite GEO. |

Função 4 – Determinação das correções dos satélites.

| Entrada | Saída |
|--|---|
| a. Medidas de pseudodistância L_1 (C/A); b. Medidas diferenciais do código em L_1 e L_2 ; c. Dados de navegação do satélite GPS; d. Medidas de pseudodistância L_1 (C/A) do satélite GEO; e. Dados de navegação do satélite GEO; f. Dados troposféricos; g. Posição do centro de fase da antena; h. Tendência das medidas diferenciais L_1/L_2 no receptor; i. Dados de órbita do satélite GPS; e j. Dados de órbita do satélite GEO. | a. Correções de longo termo para o satélite; b. Correções de erros de variação rápida; c. UDREs; d. Fator de degradação das correções de erro de variação rápida; e. RMS estimado e verificado para a pseudodistância; f. Parâmetros de degradação da mensagem tipo 10; e g. Matriz covariância do relógio. |

Função 5 – Determinação da integridade dos satélites

| Entrada | Saída |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> a. Dados de navegação do satélite GPS; b. Dados de navegação do satélite GEO; c. Posição do centro de fase da antena; d. Correções de erros de termos longos; e. Correções de erros de variação rápida; f. Posições dos IGP's; g. Atraso ionosférico vertical de cada IGP; h. GIVE; i. UDRE; j. Parâmetros de degradação da mensagem tipo 10; k. Fator de degradação da correção do erro de variação rápida; e l. RMS estimado e verificado para a pseudodistância. | <ul style="list-style-type: none"> a. Dados para gerar mensagens “Não use”; b. Dados para gerar mensagens “Não monitorado”; e c. Lista de satélites que devem estar no campo de visão. |

Função 6 – Verificação independente dos dados.

| Entrada | Saída |
|--|---|
| a. Medidas independentes de pseudodistância L_1 (C/A); b. Medidas, independentes, diferenciais do código em L_1 e L_2 ; c. Medidas independentes de pseudodistância L_1 (C/A) do satélite GEO; d. Dados troposféricos, independentes; e. Dados de navegação do satélite GPS; f. Dados de navegação do satélite GEO; g. Posição do centro de fase da antena; h. Tendência das medidas diferenciais L_1/L_2 no receptor; i. Posição dos IGPs; j. Atraso ionosférico vertical de cada IGP; k. GIVE; l. Dados de órbita do satélite GPS; m. Dados de órbita do satélite GEO; n. Efemérides do satélite GEO; o. Almanaque do satélites GEO; p. Correções de longo termo; q. Correções de erros de variação rápida; r. UDREs; s. Dados para mensagens “Não use”; t. Dados para mensagens “Não monitorado”; u. Fator de degradação das correções de erros de variação rápida; v. RMS da pseudodistância; e w. Parâmetros de degradação das mensagens tipo 10. | a. Mensagens “Não use” e “Não monitorado” para os satélites ou IGPs, verificadas; b. Correções de erros de variação rápida verificadas; c. Correções de termo longo das efemérides e relógios verificadas; d. Posições dos IGPS verificadas; e. Atraso ionosférico dos IGPS verificado; f. Dados da GIVE verificados; g. Dados de efemérides dos satélites GEO verificados; h. Dados de almanaque dos satélites GEO verificados; i. UDREs verificados; j. Fator de degradação da correção do erro de variação rápida, verificado; k. RMS da pseudodistância verificado; e l. Parâmetros de degradação das mensagens tipo 10 verificados. |

Função 7 – Transmissão de mensagens WAAS e de distância.

| Entrada | Saída |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> a. Mensagens, verificadas, de “Não use” e “Não monitorado” para os satélites ou IGPs; b. Correções de erros de variação rápida verificadas; c. Correções de termo longo das efemérides e relógios verificadas; d. Atraso ionosférico dos IGPS verificado; e. Dados da GIVE verificados; f. Dados de efemérides dos satélites GEO verificados; g. Dados de almanaque dos satélites GEO verificados; h. UDREs verificados; i. Posições dos IGPS verificadas; j. Lista de satélites WAAS/GPS; k. <i>Offset</i> do Tempo da Rede WAAS (WNT – <i>WAAS Network Time</i>) em relação ao UTC; l. Fator de degradação das correções do erro de variação rápida; m. RMS da pseudodistância; n. Parâmetros de degradação da mensagem tipo 10; o. Matriz covariância do relógio do satélite. p. Fator de degradação da correção do erro de variação rápida, verificado; q. RMS da pseudodistância verificado; e r. Parâmetros de degradação das mensagens tipo 10 verificados. | <ul style="list-style-type: none"> a. Mensagens WAAS; b. Sinais de distância; e c. Sinal WAAS da qualidade dos parâmetros. |

Função 8 – Subfunção 1: Operação do sistema e coleta de dados de manutenção.

| Entrada | Saída |
|---|---|
| a. Dados de configuração de equipamentos e componentes do WAAS; b. Dados de <i>status</i> dos equipamentos e dos componentes do WAAS; c. Dados de performance dos equipamentos e componentes do WAAS; d. Todas as saídas da Função 6; e. Todas as saídas da Função 1; f. Mensagens WAAS e parâmetros de qualidade do sinal obtidos da Função 7; g. Definição da grade ionosférica; h. Entradas manuais; e i. UTC. | a. Dados de configuração de equipamentos e componentes do WAAS agrupados; b. Dados de <i>status</i> dos equipamentos e dos componentes do WAAS agrupados; c. Dados de performance dos equipamentos e componentes do WAAS agrupados; d. Todas as saídas da Função 6 agrupadas; e. Todas as saídas da Função 1 agrupadas; f. Mensagens WAAS e parâmetros de qualidade do sinal obtidos da Função 7, agrupados; g. Definição da grade ionosférica; h. Lista de satélites GPS/WAAS; i. Entradas manuais agrupadas; e j. UTC. |

Função 8 – Subfunção 2: Controle e monitoramento do sistema.

| Entrada | Saída |
|---|--|
| a. Dados de configuração de equipamentos e componentes do WAAS agrupados; b. Dados de <i>status</i> dos equipamentos e dos componentes do WAAS agrupados; c. Dados de performance dos equipamentos e componentes do WAAS agrupados; d. Dados da Função 6 agrupados; e. Parâmetros de qualidade do sinal WAAS agrupados; Entradas manuais agrupadas; f. UTC; e g. Lista de satélites que devem estar no campo de visada. | a. <i>Display</i> do <i>status</i> , da cobertura e da qualidade do serviço; b. Registro dos dados WAAS e GPS; c. Sistema de alarmes; d. Sistema de alertas; e. Manutenção da priorização dos dados; f. Sistema de dados de configuração; g. Sistema de falha de dados gerado internamente pelos equipamentos ou componentes do WAAS; e h. <i>Offset</i> entre o WNT e o UTC. |

Função 8 – Subfunção 3: Manutenção corretiva.

| Entrada | Saída |
|---|--|
| a. Registros de manutenção; b. Todas as verificações da Função 6 e as saídas de validação; c. Relatórios externos de manutenção; d. Solicitações de reconfiguração; e. Solicitações de verificação de equipamento; f. Dados de configuração de equipamento e componente do WAAS; g. Dados de <i>status</i> de equipamento e componente do WAAS; h. Dados de mudança de configuração do WAAS; i. Dados de mudança de equipamento e componente do WAAS; e j. Dados de alarmes e alertas na ocorrência de falhas. | a. Indicações de falhas; b. Comandos de reconfiguração; c. Comandos de verificação de equipamentos; d. Gravação de dados de manutenção; e. Registros de manutenção; f. Lista das manutenções corretivas prioritárias; g. Comandos de inicialização; e h. Recarregamento dos comandos. |

Função 8 – Subfunção 4: Manutenção periódica.

| Entrada | Saída |
|--|---|
| a. Lista de manutenções periódicas recomendadas pelo fornecedor/fabricante; b. Lista de manutenções corretivas prioritárias; e c. Manutenção periódica aprovada. | a. <i>Display</i> da lista de manutenção; e b. Dados de priorização da manutenção. |

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)