

MARCELO TOMIO MATSUOKA

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DA
IONOSFERA NO POSICIONAMENTO POR PONTO COM
GPS: Avaliação na região brasileira**

Tese de Doutorado

MARCELO TOMIO MATSUOKA

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DA
IONOSFERA NO POSICIONAMENTO POR PONTO COM
GPS: Avaliação na região brasileira**

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

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

**Presidente Prudente
Fevereiro/2007**

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
(ORIENTADOR)



PROF. DR. JOÃO FRANCISCO GALERA MÔNICO
(FCT/UNESP)



PROF. DR. MÁRCIO H. O. AQUINO
(IESSG-INGLATERRA)



PROFA. DRA. INEZ STACIARINI BATISTA
(INPE)



PROF. DR. CLAUDIO ANTONIO BRUNINI
(UNIVERSIDAD NACIONAL DE PLATA)



MARCELO TOMIO MATSUOKA

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 28 DE FEVEREIRO DE 2007.

RESULTADO: APROVADO

DEDICATÓRIA

*Aos meus amados pais,
Maria Neli Rodrigues Matsuoka e
Cláudio Takeshi Matsuoka.*

A minha querida esposa Jaqueline.

Ao meu querido filho Matheus.

EPÍGRAFE

“A vida é aquilo que acontece enquanto você faz planos”

John Lennon

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a DEUS. Imaginando esta Tese ser o fechamento de um longo ciclo, gostaria de agradecer todos os professores que tive durante toda a minha vida, nos dois locais que estudei: a querida escola CELSA e a FCT/UNESP. Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo pela confiança, apoio e incentivo. À CAPES, pela bolsa de estudo. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas pelas disciplinas ministradas. Aos professores da Banca Examinadora. Ao Prof. Dr. João Francisco Galera Monico pelos ensinamentos, incentivo e por manter ativo o GEGE. Em especial, agradeço aos pesquisadores da Divisão de Aeronomia do INPE, Dra. Inez Staciarini Batista e Dr. Ivan Jelinek Kantor, que gentilmente ministraram a disciplina “Introdução à ionosfera e a propagação de ondas”, e que foi de suma importância para a realização desta pesquisa. Ao Dr. Luiz Paulo Souto Fortes e Prof. João Francisco Galera Monico pelas contribuições no exame de qualificação. Ao IBGE pelo fornecimento dos dados da RBMC e ao IGS pelos dados GPS da sua rede. À Divisão de Aeronomia do INPE pelo fornecimento dos dados de Digissondas. Ao NRCan pelo fornecimento do software GPSPACE e pelos dados de efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites. Aos alunos da sala de permanência em especial ao Marcelo “Gaúcho” pela ajuda voluntária. Especial agradecimento ao amigo e parceiro de pesquisa William, que durante minha estada na sala de permanência foi um grande companheiro de discussões sobre os mais diversos temas, em particular, a ionosfera. Ao amigo Claudinei pelas várias conversas sobre o tema de pesquisa. Ao Departamento de Geodésia da UFRGS pelos afastamentos de curto período na etapa de conclusão desta Tese, em particular ao Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer. Ao Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza por todo apoio oferecido e recepção quando da minha chegada em Porto Alegre, auxiliando para que em um tempo mais curto pudesse retornar à rotina diária de trabalho. À Dra Inez Staciarini Batista que sempre respondeu gentilmente meus diversos emails de dúvidas. Um agradecimento muito especial aos meus pais, por toda dedicação aos filhos, pelo amor e carinho que recebo durante todo o tempo. Ao meu irmão Toshio que sempre me apoiou e me auxiliou quando precisei, em especial, agradeço as diversas vezes que me levou e buscou no Aeroporto de Londrina, parte do meu trajeto entre Porto Alegre e Presidente Prudente/Pirapozinho. Por fim, mas com muito carinho, gostaria de agradecer a minha esposa Jaqueline, que durante todo o tempo dessa pesquisa me auxiliou, acreditou, mudou, passou momentos importantes sem minha presença, tornou-se uma grande mãe, guiou a Família e o Lar, e, principalmente, agradeço por ela ter tido por infinitas vezes paciência e compreensão.

RESUMO

Após a desativação da técnica SA, a ionosfera tornou-se a principal fonte de erro no posicionamento com GPS. O erro associado à ionosfera é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presente ao longo do caminho da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O TEC, e conseqüentemente o erro devido à ionosfera, variam no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros. A região brasileira é um dos locais que apresenta os maiores valores e variações espaciais do TEC e onde estão presentes diversas particularidades da ionosfera, tais como, a anomalia equatorial e o efeito da cintilação ionosférica. Desta forma, é importante a realização de pesquisas que visam estudar o comportamento do TEC, e conseqüentemente do erro devido à ionosfera no Brasil, que é um trabalho complexo devido aos diversos fatores que influenciam a variação do TEC, além das particularidades presentes na região brasileira. Estudos desta natureza podem auxiliar a comunidade geodésica brasileira, e demais usuários do GPS, no entendimento das limitações impostas pela ionosfera nas regiões de interesse. Devido à natureza dispersiva da ionosfera, o estudo do comportamento do TEC no Brasil pode ser realizado utilizando os dados GPS de receptores de dupla frequência pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Adicionalmente, para uma melhor análise, pode-se também utilizar dados das estações da rede IGS (*International GNSS Service*) da América do Sul. Esta pesquisa tem como principal meta o estudo do comportamento do erro devido à ionosfera na região brasileira em diferentes situações ionosféricas com base em valores de TEC advindos das estações GPS da RBMC e da rede IGS da América do Sul. Outro objetivo é avaliar a performance e as limitações do Mapa Global da Ionosfera do IGS aplicado no posicionamento por ponto na região brasileira.

palavras-chave: GPS, Posicionamento, Ionosfera, TEC, Explosão Solar, Tempestade Geomagnética

ABSTRACT

In the SA absence, the ionosphere is the largest error source in GPS positioning. The error due to the ionosphere in the GPS observables depends on the signal frequency and Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer. The TEC varies regularly in time and space in relation to the sunspot number, the season, the local time, the geographic position, and others. The Brazilian region is one of the regions of the Earth that presents largest values and space variations of the TEC, being influenced by the equatorial anomaly of ionization and ionospheric scintillation. Therefore, it is important to study the TEC behavior in the Brazilian region. Due to the ionosphere dispersive nature, the TEC behavior in Brazil can be studied using GPS data from RBMC (*Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS*). Additionally, GPS data from IGS (*International GNSS Service*) network of the South America can also be used in the experiments. The goal of this research is to study the ionospheric error behavior in the Brazilian region, considering different ionosphere situations, using TEC values computed by GPS data from RBMC and IGS network. Other goal is to evaluate the performance and limitations of Global Ionospheric Map of IGS applied in the GPS point positioning in Brazil.

Key words: GPS, Positioning, Ionosphere, TEC, Solar Flare, Geomagnetic Storm.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | 11 |
| LISTA DE TABELAS..... | 17 |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS..... | 18 |
| 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO..... | 19 |
| 1.2 Objetivos | 25 |
| 1.3 Pesquisas sobre Ionosfera-GPS no PPGCC..... | 26 |
| 1.4 Conteúdo do Trabalho..... | 27 |
| 2 A IONOSFERA | 28 |
| 2.1 Fonte Solar de Ionização..... | 29 |
| 2.2 Divisão da Atmosfera Terrestre..... | 33 |
| 2.3 Características da Ionosfera..... | 35 |
| 2.3.1 <i>Processo de ionização e o perfil vertical da ionosfera</i> | 35 |
| 2.3.2 <i>Freqüência crítica das camadas ionosféricas</i> | 43 |
| 2.4 Variações do Conteúdo Total de Elétrons (TEC)..... | 44 |
| 2.4.1 <i>Variações temporais</i> | 44 |
| 2.4.2 <i>Influência da variação da radiação solar</i> | 49 |
| 2.4.3 <i>Campo geomagnético</i> | 50 |
| 2.4.3.1 <i>Distúrbios e tempestades geomagnéticas/ionosféricas</i> | 53 |
| 2.4.3.2 <i>Índices geomagnéticos e as tempestades</i> | 60 |
| 2.4.3.3 <i>Variação diária e sazonal dos distúrbios do campo geomagnético</i> | 66 |
| 2.4.4 <i>Regiões geográficas da ionosfera</i> | 69 |
| 2.4.4.1 <i>Região de médias latitudes</i> | 70 |
| 2.4.4.2 <i>Região de altas latitudes</i> | 71 |
| 2.4.4.3 <i>Região equatorial e de baixas latitudes</i> | 73 |
| 2.4.4.3.1 <i>Anomalia equatorial ou de Appleton</i> | 74 |
| 2.5 Algumas Técnicas de Observação da Ionosfera | 80 |
| 2.5.1 <i>Ionossonda/Digissonda</i> | 80 |
| 2.5.2 <i>Radar de espalhamento incoerente</i> | 81 |
| 2.5.3 <i>Receptores GPS de dupla freqüência</i> | 82 |
| 2.6 O Modelo Ionosférico IRI (<i>International Reference Ionosphere</i>)..... | 83 |
| 3 EFEITOS DA IONOSFERA NO GPS | 85 |
| 3.1 Índice de Refração da Ionosfera | 85 |

| | |
|--|------------|
| 3.2 Erro devido à Ionosfera nos Sinais GPS | 88 |
| 3.3 Cintilação Ionosférica | 92 |
| 3.3.1 <i>Impacto da cintilação nos receptores GPS</i> | 98 |
| 3.4 Modelos Globais da Ionosfera | 103 |
| 3.4.1 <i>Modelo de Klobuchar</i> | 103 |
| 3.4.2 <i>Coefficientes do Modelo de Klobuchar estimados pelo CODE</i> | 105 |
| 3.4.3 <i>Mapas Globais do TEC do IGS (Arquivos IONEX)</i> | 106 |
| 3.5 Iniciativa Brasileira na Elaboração de Modelos Regionais da Ionosfera utilizando dados GPS | 109 |
| 4 DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS UTILIZANDO AS OBSERVÁVEIS GPS | 111 |
| 4.1 Determinação do TEC a partir de Medidas de Pseudodistância | 113 |
| 4.2 Determinação do TEC a partir de Medidas de Fase | 114 |
| 4.3 Determinação do TEC a partir da Pseudodistância Filtrada pela Fase da Portadora | 116 |
| 4.3.1 <i>Cálculo da pseudodistância filtrada pela fase da portadora</i> | 117 |
| 4.4 Obtenção do TEC na Direção Vertical..... | 122 |
| 4.5 Semi-Diâmetro da Camada Ionosférica | 125 |
| 4.6 Cálculo da Latitude e Longitude Geográfica do Ponto Ionosférico | 126 |
| 5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS OBTIDOS | 129 |
| 5.1 Programa Computacional Desenvolvido para Estudo do TEC com GPS | 129 |
| 5.1.1 Programa CALTEC | 129 |
| 5.2 Mapas do VTEC para o Brasil utilizando dados GPS da RBMC e IGS..... | 131 |
| 5.2.1 Estudo de caso para o ano de 2001 (período de máxima atividade solar do ciclo 23)..... | 133 |
| 5.3 Explosões Solares e Tempestades Geomagnéticas: os efeitos no comportamento do TEC e no Posicionamento por Ponto na região brasileira | 175 |
| 5.3.1 Estudo da intensa tempestade geomagnética do dia 29 de outubro de 2003 | 178 |
| 5.3.1.1 <i>O desenvolvimento não usual da anomalia equatorial</i> | 181 |
| 5.3.1.2 <i>Intensificação do TEC e deslocamento das cristas da anomalia equatorial</i> .. | 189 |
| 5.3.2 Efeitos do aumento da radiação eletromagnética associada à explosão solar de 28 de outubro de 2003 | 205 |
| 5.4 Performance dos Mapas Globais da Ionosfera do IGS na Região Brasileira..... | 217 |
| 5.4.1 <i>Programa Computacional Desenvolvido – CORIONEX</i> | 217 |

| | |
|--|------------|
| 5.4.2 Correção dos dados GPS com os arquivos IONEX do IGS..... | 218 |
| 5.4.3 Avaliação no posicionamento por ponto | 220 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 234 |
| 6.1 Considerações Finais e Conclusões..... | 234 |
| 6.2 Recomendações..... | 244 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 246 |
| APÊNDICE A – ERROS EM PLANIMETRIA E ALTITUDE GEOMÉTRICA NORMALIZADOS PELO GDOP PARA O DIA 29 E 11 DE OUTUBRO DE 2003 | 261 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1 | - Estações da RBMC | 22 |
| Figura 2.1 | - Representação esquemática das três camadas solares mais externas . | 30 |
| Figura 2.2 | - Foto do eclipse total mostrando a cromosfera e corona | 31 |
| Figura 2.3 | - Possíveis divisões da atmosfera terrestre | 33 |
| Figura 2.4 | - Processo de Fotoionização | 36 |
| Figura 2.5 | - Curva de ionização (Perfil de Chapman) | 38 |
| Figura 2.6 | - Representação esquemática da ionosfera | 42 |
| Figura 2.7 | - Perfis da densidade de elétrons durante o dia e a noite | 43 |
| Figura 2.8 | - Imagem da superfície do Sol em luz branca mostrando algumas manchas solares | 46 |
| Figura 2.9 | - Número de manchas solares – Ciclos solares | 48 |
| Figura 2.10 | - Número de manchas solares – Ciclo 23 | 49 |
| Figura 2.11 | - Modelo do campo magnético da Terra | 51 |
| Figura 2.12 | - Ilustração do equador geomagnético em 1957 e 2000 | 52 |
| Figura 2.13 | - Influência do vento solar no campo geomagnético | 54 |
| Figura 2.14 | - Taxas de ocorrência de 1970 a 1983 dos três eventos solares que provocam alterações na ionosfera | 55 |
| Figura 2.15 | - Imagens de uma região ativa um pouco antes e logo após a ocorrência de uma explosão solar – 9 de março de 1989 | 56 |
| Figura 2.16 | - Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982 com uma intensa tempestade magnética com suas fases características | 62 |
| Figura 2.17 | - Variação típica da componente horizontal do campo geomagnético para duas tempestades geomagnéticas devido à explosão solar e HSSWS | 65 |
| Figura 2.18 | - Número de dias geomagneticamente perturbados (com $A_p \geq 36$) entre 1932 e 1983 em função dos meses do ano | 66 |
| Figura 2.19 | - A suscetibilidade do campo geomagnético tornar-se perturbado por eventos solares em função da hora universal (UT) e dos meses do ano | 68 |
| Figura 2.20 | - Regiões geográficas da ionosfera | 70 |
| Figura 2.21 | - Imagem UV do oval auroral sobre a América do Norte | 72 |
| Figura 2.22 | - Esquema das forças agindo no plasma - efeito fonte | 75 |
| Figura 2.23 | - Mapas Globais do TEC para o dia 08/03/2004 | 77 |

| | | | |
|-------------|---|--|-----|
| Figura 2.24 | - | Variação sazonal da deriva vertical do plasma ionosférico medida em Jicamarca (derivas positivas para cima) durante períodos de alta (1968-1971) e baixa (1975-1976) atividade solar | 79 |
| Figura 3.1 | - | Irregularidades na densidade de elétrons da ionosfera | 94 |
| Figura 3.2 | - | Morfologia global das cintilações em sinais da Banda L durante anos de atividade solar máxima (a) e mínima (b) | 95 |
| Figura 3.3 | - | Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas .. | 97 |
| Figura 3.4 | - | Variação sazonal da ocorrência de bolhas de plasma, observadas durante alta atividade solar (AAS) e baixa atividade solar (BAS), em Cachoeira Paulista, Brasil | 98 |
| Figura 3.5 | - | Estações das Redes SATREF (Noruega) e SWEPOS (Suécia) | 99 |
| Figura 3.6 | - | Porcentagem de corrupção da fase da portadora L_2 (<i>Missing L_2 phase</i>) | 100 |
| Figura 3.7 | - | Estatísticas (médias mensais) de perdas do sinal em L_2 em algumas estações pertencentes à RBMC | 101 |
| Figura 3.8 | - | Porcentagem média de corrupção das observações da fase L_2 – março/2000 | 103 |
| Figura 3.9 | - | Representação do atraso ionosférico a partir do modelo de Klobuchar | 104 |
| Figura 4.1 | - | Exemplo de cálculo do TEC a partir das medidas de pseudodistância ($\rho_2 - \rho_1$) e fase ($\Phi_1 - \Phi_2$) | 117 |
| Figura 4.2 | - | Comportamento do desvio padrão da pseudodistância filtrada pela fase (C/A (P1) ou P2) e do TEC (supondo-se $\sigma_{\rho_1} = \sigma_{\rho_2} = 0,2$ m, e $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = 0,004$ m) | 121 |
| Figura 4.3 | - | Valores do TEC calculados usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase | 122 |
| Figura 4.4 | - | Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera | 123 |
| Figura 4.5 | - | Valores da função de mapeamento geométrica padrão | 124 |
| Figura 4.6 | - | Ilustração do Semi-diâmetro da camada ionosférica | 125 |
| Figura 4.7 | - | Pontos ionosféricos obtidos de observações de 4 estações GPS da RBMC para 29 de outubro de 2003 | 128 |
| Figura 5.1 | - | Estações da RBMC e do IGS que participaram do experimento de | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | produção de mapas do VTEC com base na disponibilidade de estações das redes em 2001 | 134 |
| Figura 5.2 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (00-01 UT) (21-22 HL) | 136 |
| Figura 5.3 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (01-02 UT) (22-23 HL) | 137 |
| Figura 5.4 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (02-03 UT) (23-24 HL) | 138 |
| Figura 5.5 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (03-04 UT) (00-01 HL) | 139 |
| Figura 5.6 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (04-05 UT) (01-02 HL) | 140 |
| Figura 5.7 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (05-06 UT) (02-03 HL) | 141 |
| Figura 5.8 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (06-07 UT) (03-04 HL) | 142 |
| Figura 5.9 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (07-08 UT) (04-05 HL) | 143 |
| Figura 5.10 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (08-09 UT) (05-06 HL) | 144 |
| Figura 5.11 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (09-10 UT) (06-07 HL) | 145 |
| Figura 5.12 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (10-11 UT) (07-08 HL) | 146 |
| Figura 5.13 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (11-12 UT) (08-09 HL) | 147 |
| Figura 5.14 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (12-13 UT) (09-10 HL) | 148 |
| Figura 5.15 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (13-14 UT) (10-11 HL) | 149 |
| Figura 5.16 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (14-15 UT) (11-12 HL) | 150 |
| Figura 5.17 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (15-16 UT) | |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | (12-13 HL) | 151 |
| Figura 5.18 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (16-17 UT) (13-14 HL) | 152 |
| Figura 5.19 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (17-18 UT) (14-15 HL) | 153 |
| Figura 5.20 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (18-19 UT) (15-16 HL) | 154 |
| Figura 5.21 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (19-20 UT) (16-17 HL) | 155 |
| Figura 5.22 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (20-21 UT) (17-18 HL) | 156 |
| Figura 5.23 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (21-22 UT) (18-19 HL) | 157 |
| Figura 5.24 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (22-23 UT) (19-20 HL) | 158 |
| Figura 5.25 | - Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (23-24 UT) (20-21 HL) | 159 |
| Figura 5.26 | - Mapas de diferenças de VTEC entre outubro/2001 e julho/2001 | 162 |
| Figura 5.27 | - Valores médios mensais de foF2 para 2001- Digisondas de Cachoeira Paulista (CP) e São Luiz (SL) | 165 |
| Figura 5.28 | - Valores médios mensais de VTEC em 2001 para CP e SL – obtidos dos Mapas de VTEC | 169 |
| Figura 5.29 | - Valores médios de VTEC/GPS em São José dos Campos (SJC) e São Luiz (SL) | 173 |
| Figura 5.30 | - Imagem do Sol (extremo ultravioleta) no dia 28 de outubro de 2003 as 11:12 UT – Explosão Solar (Destacada) | 179 |
| Figura 5.31 | - Índices geomagnéticos Kp e Dst – 28 e 29 de outubro de 2003 | 180 |
| Figura 5.32 | - Altura de pico (hmF2) para SL e CP para o dia 29 de outubro de 2003 e valores médios de dias geomagneticamente calmos para o mesmo mês | 182 |
| Figura 5.33 | - Frequência crítica (foF2) para SL e CP para o dia 29 de outubro de 2003 e valores médios de dias geomagneticamente calmos para o mesmo mês | 183 |
| Figura 5.34 | - Valores de VTEC (em TECU) para o período do início da manhã do | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | dia 29 de outubro de 2003 – UEPP | 185 |
| Figura 5.35 | - VTEC (em azul) e taxa de variação do VTEC (em preto) – estação UEPP – PRN17 – 29 de outubro de 2003 | 186 |
| Figura 5.36 | - Variação temporal do VTEC na região brasileira para os dias 29 e 11 de outubro de 2003 entre 7 e 11 UT (4 e 8 HL) | 188 |
| Figura 5.37 | - Mapas do VTEC para 28 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL | 191 |
| Figura 5.38 | - Mapas do VTEC para 11 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL | 195 |
| Figura 5.39 | - Erro planimétrico – Posicionamento por Ponto - 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT | 201 |
| Figura 5.40 | - Erro em altitude geométrica – Posicionamento por Ponto - 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT .. | 202 |
| Figura 5.41 | - Fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES no dia 28 de outubro de 2003 entre 10 e 12:30 UT | 206 |
| Figura 5.42 | - Valores de VTEC para o dia 28 de outubro de 2003 entre 9 e 13 UT (6 e 12 HL) – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT | 207 |
| Figura 5.43 | - Mapas do VTEC para o Brasil – 11 (esquerda) e 28 (direita) de outubro de 2003 entre 9 e 14 UT (6 e 11 HL) | 208 |
| Figura 5.44 | - Erro em planimetria e em altitude geométrica – Posicionamento por ponto – 28/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT | 211 |
| Figura 5.45 | - Erro em planimetria e em altitude geométrica – Posicionamento por ponto – 11/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT | 214 |
| Figura 5.46 | - Fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES para o período de 10-13 de outubro de 2003 (superior) e 27-30 de outubro de 2003 (inferior)..... | 216 |
| Figura 5.47 | - Erro em Altitude Geométrica – SCI e CCI-COD – Janeiro (dia 001), Fevereiro (dia 034), Março (dia 070), Abril (dia 093), Maio (dia 146) e Junho (dia 156) de 2001 | 227 |
| Figura 5.48 | - Erro em Altitude Geométrica – SCI e CCI-COD – Julho (dia 201), Agosto (dia 214), Setembro (dia 250), Outubro (dia 289), Novembro (dia 331) e Dezembro (dia 347) de 2001 | 228 |
| Figura 5.49 | - Erro em Planimetria – SCI e CCI-COD – Janeiro (dia 001), Fevereiro (dia 034), Março (dia 070), Abril (dia 093), Maio (dia 146) e Junho (dia 156) de 2001 | 231 |
| Figura 5.50 | - Erro em Planimetria – SCI e CCI-COD – Julho (dia 201), Agosto | |

| | | |
|------------|--|-----|
| | (dia 214), Setembro (dia 250), Outubro (dia 289), Novembro (dia 331) e Dezembro (dia 347) de 2001 | 232 |
| Figura A.1 | - Erro Planimétrico Normalizado pelo GDOP – Posicionamento por ponto – 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT | 262 |
| Figura A.2 | - Erro em Altitude Geométrica Normalizado pelo GDOP – Posicionamento por ponto – 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT | 263 |

LISTA DE TABELAS

| | | | |
|------------|---|---|-----|
| Tabela 2.1 | - | Bandas de Frequência | 34 |
| Tabela 2.2 | - | Relação entre o índice geomagnético Kp e ap | 61 |
| Tabela 2.3 | - | Classificação da atividade geomagnética em função de Kp e Ap | 61 |
| Tabela 2.4 | - | Classificação de uma tempestade geomagnética | 63 |
| Tabela 3.1 | - | Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinações lineares entre duas frequências | 90 |
| Tabela 3.2 | - | Máximo erro devido à ionosfera que pode ser esperado para medidas de distâncias na direção vertical | 91 |
| Tabela 4.1 | - | Variação do semi-diâmetro da camada ionosférica | 126 |
| Tabela 5.1 | - | Coefficiente de correlação linear (x 100%) entre os dados mensais de VTEC advindos de GPS e o quadrado de foF2 advindos de digissondas para SL e CP | 172 |
| Tabela 5.2 | - | Número de dias com influência de tempestade geomagnética para os anos de 2000 a 2006 ($A_p \geq 30$) | 175 |
| Tabela 5.3 | - | Relação de dias com influência de tempestades geomagnéticas intensas | 177 |
| Tabela 5.4 | - | Relação de dias com influência de tempestades geomagnéticas muito intensas | 177 |
| Tabela 5.5 | - | Valor médio do EMQ para altitude geométrica – meses de 2001 | 222 |
| Tabela 5.6 | - | Valor médio da melhora obtida (%) na acurácia (relativa a uma época) do posicionamento por ponto - altitude geométrica – meses de 2001 | 222 |
| Tabela 5.7 | - | Valor médio do EMQ para planimetria – meses de 2001 | 224 |
| Tabela 5.8 | - | Valor médio da melhora obtida (%) na acurácia (relativa a uma época) do posicionamento por ponto – Posição planimétrica – meses de 2001 | 225 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | | |
|--------|---|--|
| CME | - | Coronal Mass Ejection – Ejeção de Massa Coronal |
| CORS | - | Continuously Operating Reference Stations |
| CODE | - | Centre for Orbit Determination in Europe |
| DGPS | - | Differential GPS |
| DIS | - | Distúrbio Ionosférico Súbito |
| EMQ | - | Erro Médio Quadrático |
| ESA | - | European Space Agency |
| foF2 | - | Frequência crítica da camada F2 |
| GIM | - | Global Ionospheric Map |
| GPS | - | Global Positioning System |
| HL | - | Hora Local |
| hmF2 | - | Altura de pico da camada F2 |
| HSSWS | - | High Speed Solar Wind Stream – Vento Solar de Alta Velocidade |
| IGS | - | International GNSS Service |
| INPE | - | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IONEX | - | IONosphere map Exchange format |
| IRI | - | International Reference Ionosphere |
| JPL | - | Jet Propulsion Laboratory |
| NRCan | - | Natural Resources Canada |
| PPGCC | - | Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas |
| RBMC | - | Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo |
| RINEX | - | Receiver INdependent EXchange format |
| SA | - | Selective Availability |
| SDF | - | Sudden Disappearing Filaments - Desaparecimento Súbito de Filamentos |
| TEC | - | Total Electron Content – Conteúdo Total de Elétrons |
| TECU | - | TEC Unit – Unidade de TEC |
| UPC | - | Polytechnical University of Catalonia |
| UT | - | Universal Time |
| VTEC | - | Vertical TEC – TEC na direção vertical |
| WAAS | - | Wide Area Augmentation System |
| WADGPS | - | Wide Area DGPS |

1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

A maior fonte de erros no posicionamento com GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global) era devido à técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva), desativada às 04 horas UT (*Universal Time* – Tempo Universal) de 02 de maio de 2000. Com a desativação da técnica SA, a ionosfera tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GPS.

O erro associado à ionosfera é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O TEC, e conseqüentemente o erro devido à ionosfera, varia no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros. Durante a atividade solar máxima e para satélites próximos ao horizonte, o erro devido à ionosfera nas distâncias medidas pelo GPS pode ser maior que 100 m (NEWBY e LANGLEY, 1992). A ionosfera não só degrada a acurácia e a precisão do GPS como, também, reduz a sua integridade, pois existe uma alta dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas (SKONE, 2000).

Os receptores de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da ionosfera, devido ao fato do erro ser dependente da frequência do sinal. Porém, receptores de dupla frequência são equipamentos caros, fazendo com que os de uma frequência (receptores com a portadora L_1) ainda sejam amplamente empregados no posicionamento com GPS.

A desvantagem da utilização de receptores de uma frequência é de que os resultados dos levantamentos são afetados pelo efeito sistemático devido à ionosfera. Sabe-se que no posicionamento relativo, em uma de linha base curta, os efeitos de primeira ordem da ionosfera podem ser minimizados. No entanto, definir no posicionamento relativo qual o

limite de comprimento de uma base curta é complicado, devido à alta dependência deste com relação à variação espacial e as irregularidades presentes na ionosfera. Isso exige um conhecimento aprofundado do comportamento da ionosfera na região de interesse. Obviamente, seguindo o mesmo raciocínio do posicionamento relativo, pode-se afirmar que a performance do posicionamento DGPS (*Differential GPS*) também é altamente dependente do comportamento da ionosfera (SKONE, 2000; EL GIZAWY, 2003). Em Dal Poz (2005) mostrou-se a dependência e as limitações na performance do posicionamento relativo quanto à atividade ionosférica na região brasileira. Ainda o mesmo pode-se afirmar sobre a eficiência de sistemas como WADGPS (*Wide Area DGPS*) e WAAS (*Wide Area Augmentation System*). Um exemplo pode ser encontrado em Skone (1998), onde um sistema WADGPS canadense possuía limitações em determinados períodos devido às perturbações na atividade ionosférica na região auroral canadense. A partir de um estudo detalhado sobre o entendimento da variação do erro da ionosfera na região de interesse e dos fenômenos e irregularidades existentes, Skone (1998) fez modificações no sistema WADGPS buscando minimizar as limitações impostas pela ionosfera na região auroral canadense. Outro exemplo pode ser encontrado em Komjathy et al. (2003), onde se realizou uma avaliação da aplicação do WAAS no Brasil. Os resultados mostraram a limitação proporcionada pela ionosfera na região brasileira na performance do WAAS, obtendo-se eficácia bem inferior do que a obtida na América do Norte.

Estudos preliminares sobre o uso do GPS, no sul do Brasil e na região equatorial, mostraram que na América Central e na América do Sul as medidas GPS são afetadas por diversas condições ionosféricas, como por exemplo, o efeito da cintilação ionosférica e da anomalia equatorial (WANNINGER et al., 1991, 1992; CAMPOS et al., 1993). Estas conclusões foram obtidas dos resultados de duas campanhas de GPS, denominadas de BRASION'91 e BRASION'92.

Em Camargo (1999) e Matsuoka (2003) também se pode verificar as limitações proporcionadas pela ionosfera na região brasileira, no caso específico de elaboração de modelos analíticos de correção do erro da ionosfera para aplicação em posicionamento com receptores de simples frequência. Embora os resultados tenham sido bastante satisfatórios, a análise mostrou a limitação do método em determinados períodos devido o comportamento da ionosfera na região brasileira. Neste sentido, Matsuoka (2003) em suas recomendações, enfatiza a importância de um estudo exclusivamente voltado ao entendimento da variação do TEC e dos fenômenos e irregularidades da ionosfera sobre a região brasileira.

Desta forma, é importante a realização de pesquisas que visam estudar o comportamento do TEC, e conseqüentemente do erro devido à ionosfera no Brasil, que é um trabalho complexo devido aos diversos fatores que influenciam a variação do TEC, além das particularidades presentes na região brasileira. Estudos desta natureza podem auxiliar a comunidade geodésica brasileira, e demais usuários do GPS, no entendimento das limitações impostas pela ionosfera, possibilitando um melhor planejamento das suas atividades e auxiliando na análise de seus resultados.

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, o estudo do comportamento do TEC no Brasil pode ser realizado utilizando os dados GPS de receptores de dupla frequência pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Atualmente, a RBMC possui 24 estações (figura 1.1) que coletam dados GPS continuamente. As estações de Brasília e Fortaleza também fazem parte da rede IGS (*International GNSS Service*), ocorrendo assim, a integração das redes IGS e RBMC.



Figura 1.1 – Estações da RBMC

Fonte: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/RBMC_2006.pdf - acesso: abril/2006

No que diz respeito à correção do erro devido à ionosfera, diversos modelos têm sido desenvolvidos para uso em posicionamento com receptores de uma frequência. Entre eles, o mais conhecido e utilizado é o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987), pois os seus coeficientes (num total de oito) são transmitidos nas mensagens de navegação dos satélites GPS, sendo, portanto, acessível a todos os usuários do GPS. O modelo de Klobuchar representa um comportamento ideal suavizado da ionosfera (FARAH, 2002), e desta forma, é inadequado para modelar flutuações diárias da ionosfera (NEWBY et al., 1990; FARAH, 2002). Neste sentido, o modelo possui um melhor desempenho na região geográfica da

ionosfera de médias latitudes, tornando-se limitado nas regiões de altas latitudes e equatorial, por ocorrerem em maior número nestas regiões as anomalias e irregularidades ionosféricas.

Comparece na literatura que o modelo de Klobuchar pode remover algo em torno de 50% a 60% do erro devido à ionosfera (NEWBY e LANGLEY, 1992; LEICK, 1995; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001; MONICO, 2000). De fato, experimentos realizados durante o período de máxima atividade solar na região brasileira ($\approx 22^{\circ}\text{S}$; 51°W) próxima ao pico da anomalia equatorial obtiveram uma correção de 53% do erro devido à ionosfera nas medidas de distâncias advindas da portadora L_1 (MATSUOKA e CAMARGO, 2002; AGUIAR et al., 2003).

Apesar das limitações do modelo de Klobuchar, não se deve esquecer das suas vantagens. Primeiramente, a sua simplicidade é um fator importante no aspecto de implementação computacional (FARAH, 2002), sendo ainda que a formulação matemática do modelo é bastante difundida na literatura (por exemplo: Klobuchar (1987), Leick (1995), Seeber (2003), Camargo (1999), Matsuoka e Camargo (2002), entre outros). Outra vantagem muito importante é que os coeficientes do modelo são transmitidos nas mensagens de navegação dos satélites, sendo, desta forma, acessível a todos os usuários, que podem utilizá-lo tanto em posicionamento pós-processado como em tempo real, podendo então ser aplicado inclusive em navegação.

No ano de 1998 o IGS iniciou a distribuição de Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Maps*) que fornecem valores do TEC calculados usando dados coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência (FELTENS e SCHAER, 1998). Oficialmente, estes mapas são distribuídos com uma latência de 11 dias (HERNANDEZ-PAJARES, 2003). Porém, atualmente já vem sendo disponibilizados mapas com latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS) (KOMJATHY e HERNANDEZ-PAJARES, 2004). Estes mapas globais da ionosfera do IGS podem ser

obtidos com acesso livre no endereço eletrônico: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>. Eles são disponibilizados no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*) com valores de TEC sendo fornecidos com resolução espacial de $5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas.

Uma das aplicações destes mapas da ionosfera do IGS é proporcionar informações do TEC para usuários do GPS. Estes mapas permitem a correção das observáveis GPS do erro devido à ionosfera, melhorando assim a performance do posicionamento com GPS; isto é possível devido à relação existente entre o TEC e o erro devido à ionosfera. Uma vantagem do uso dos mapas da ionosfera do IGS para aplicação no posicionamento com GPS é que eles são disponibilizados gratuitamente e em caráter oficial. Estudos realizados mostram que a performance dos mapas da ionosfera do IGS aplicados para a correção das observáveis GPS do erro devido à ionosfera na região de latitudes médias é de 85% (GARCÍA-FERNÁNDEZ, 2004). Em outro estudo, Ovstedal (2002), utilizando dados de um receptor localizado na Noruega, verificou uma melhora média na acurácia (por época) vertical e horizontal do posicionamento absoluto de, aproximadamente, 85% e 55%, respectivamente, quando utilizado os mapas da ionosfera do IGS para a correção do erro devido à ionosfera. Para a região equatorial e de baixas latitudes (localização do Brasil), onde as condições ionosféricas são bem diferentes, não se encontra ainda nenhum relato desse tipo de estudo. É claro que se sabe a priori que a performance deve ser inferior à obtida na região de latitudes médias, devido, por exemplo, as altas variações e irregularidades da ionosfera e o número inferior de estações que participam do cálculo dos valores do TEC contidos nos mapas. Para se ter uma idéia, atualmente, apenas três estações brasileiras fazem parte da rede IGS (localizadas em Brasília, Fortaleza e Cachoeira Paulista). Apesar das possíveis limitações seria interessante realizar estudos para avaliar e divulgar o desempenho dos produtos da

ionosfera do IGS (que tem caráter oficial e são de acesso livre) na correção do erro devido à ionosfera para usuários do GPS na região brasileira.

Esta pesquisa tem como principal meta contribuir com a comunidade geodésica brasileira a partir do estudo do comportamento do erro devido à ionosfera na região brasileira em diferentes situações ionosféricas com base em valores de TEC advindos das estações GPS da RBMC e da rede IGS da América do Sul. Também visa mostrar a correlação existente entre o comportamento da ionosfera e a acurácia do posicionamento com GPS e avaliar a performance dos mapas globais da ionosfera do IGS na região brasileira.

Como se sabe o tema “Ionosfera” tradicionalmente não faz parte dos assuntos de domínio da Geodésia. Neste sentido, esforços foram direcionados para a interação com pesquisadores especialistas no tema “Ionosfera”, o que contribui para um maior entendimento das variações da ionosfera, possibilitando entender de forma mais sólida a relação da ionosfera com o posicionamento com GPS. A troca de conhecimento entre diferentes áreas é cada vez mais necessária e rotineira nas pesquisas científicas modernas e, de fato, foi um aspecto bastante importante para a realização desta presente pesquisa.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos desta pesquisa são:

- Representar e analisar o comportamento na região brasileira do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, na região brasileira, a partir do parâmetro TEC, utilizando dados de estações da RBMC e IGS (América do Sul) durante um período de máxima atividade do ciclo solar 23;

- Analisar o comportamento do erro devido à ionosfera e a acurácia do posicionamento por ponto (absoluto) com GPS, na região brasileira, em períodos de irregularidades ionosféricas, tais como, na ocorrência de explosões solares e tempestades geomagnéticas;
- Avaliar a eficiência e as limitações do modelo da ionosfera do IGS no posicionamento com GPS na região brasileira;
- Direcionar esforços para promover o sinergismo¹ com áreas do conhecimento que tenham como tema principal de estudo a “ionosfera”, visando à troca de conhecimentos teóricos e de técnicas de observação da ionosfera;

1.3 Pesquisas sobre Ionosfera-GPS no PPGCC

Dentro do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) algumas pesquisas sobre os efeitos da ionosfera no GPS já foram realizadas e outras estão em andamento. Analisando os objetivos destas pesquisas pode-se perceber que elas seguem basicamente por quatro linhas principais de atuação que se interagem entre si, e todas relacionadas à região brasileira. A primeira delas está relacionada com o estudo da variação do TEC e, conseqüentemente, do erro da ionosfera nas observáveis GPS (CAMARGO e DAL POZ, 2002; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA et al., 2004). A segunda é estudar o impacto da ionosfera, em diferentes situações, no posicionamento com GPS (DAL POZ, 2005). Uma terceira meta das pesquisas é implementar computacionalmente modelos da ionosfera conhecidos (por exemplo, o modelo de Klobuchar) e avaliar a performance deles na região brasileira (MATSUOKA e CAMARGO, 2002; AGUIAR et al., 2003) . Por fim, a

¹ Sinergismo: do grego *Synergós*: que trabalha junto; Ação cooperativa de duas ou mais ciências, de modo que o efeito resultante é maior que a soma dos efeitos individuais destas.

quarta linha de atuação tem como objetivo desenvolver modelos regionais da ionosfera com base em dados GPS de estações ativas brasileiras (MATSUOKA, 2003; AGUIAR, 2005).

Esta presente pesquisa está vinculada diretamente com a primeira, a segunda e a terceira linha de atuação.

1.4 Conteúdo do Trabalho

O conteúdo desse trabalho está dividido em seis capítulos. No segundo capítulo é apresentada uma revisão sobre a ionosfera, contemplando assuntos como: fonte solar de ionização, divisão da atmosfera, a estrutura da ionosfera, as causas das variações do conteúdo total de elétrons (TEC), técnicas de observação da ionosfera e uma breve descrição do modelo *International Reference Ionosphere* (IRI). No terceiro capítulo, é abordado o assunto referente ao impacto da ionosfera na propagação dos sinais GPS, descrevendo os efeitos de atraso e avanço ionosférico, a cintilação ionosférica e a descrição de alguns modelos globais da ionosfera que podem ser utilizados para a correção do erro devido à ionosfera. No quarto capítulo são apresentados os métodos para a obtenção do TEC utilizando as observáveis GPS. No capítulo 5 são apresentados os experimentos e resultados obtidos nesta pesquisa. Finalmente, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões, as considerações finais e as sugestões de trabalhos futuros.

2 A IONOSFERA

Como já citado, o erro devido à ionosfera no posicionamento com GPS é proporcional à densidade de elétrons livres presentes na ionosfera. Neste sentido, torna-se importante entender a teoria sobre o comportamento da ionosfera, as diversas variações e distúrbios na densidade de elétrons, entre outros fatores, visando entender as limitações causadas pela ionosfera na qualidade do posicionamento com GPS. Tendo em vista que a teoria da ionosfera ainda não é um tema comum à comunidade geodésica brasileira, uma atenção especial foi direcionada para a elaboração deste capítulo.

A existência de uma camada ionizada na atmosfera superior foi sugerida inicialmente pelas variações periódicas notadas nas medições do campo geomagnético (KIRCHHOFF, 1991). O termo “ionosfera” foi usado pela primeira vez pelo australiano R.A. Watson-Watt em uma carta endereçada ao secretário do British Radio Research Board em 1926 (McNAMARA, 1991). A expressão começou a ser bastante utilizada no período entre 1932-34 quando Watson-Watt, Appleton, Ratcliff e outros citaram o nome “ionosfera” em seus artigos e livros científicos (KOMJATHY, 1997).

A atmosfera superior da Terra é ionizada pela radiação eletromagnética e corpuscular do Sol. Sendo assim, alguns conceitos relacionados com o Sol são importantes para o entendimento de alguns fenômenos que ocorrem na ionosfera, e serão brevemente descritos. A divisão da atmosfera, a estrutura da ionosfera, as causas das variações do TEC, as regiões geográficas da ionosfera, o campo geomagnético, algumas técnicas de observação da ionosfera e o modelo *International Reference Ionosphere* (IRI) são outros assuntos abordados neste capítulo.

2.1 Fonte Solar de Ionização

Basicamente o Sol é uma enorme esfera de gás incandescente onde em seu núcleo ocorre a geração de energia através de reações termo-nucleares. É uma estrela média com raio de aproximadamente 7×10^5 km, o que corresponde a aproximadamente 100 vezes o raio da Terra, e uma massa de aproximadamente 2×10^{30} kg, que equivale a uma massa de aproximadamente 300 mil vezes maior do que a massa da Terra (McNAMARA, 1991).

A composição do Sol é de aproximadamente 90% de hidrogênio, 10% de hélio e 0,1% de outros constituintes, tais como carbono, nitrogênio e oxigênio. Esses constituintes são ionizados devido às reações nucleares e interações eletrodinâmicas criando temperaturas que excedem a energia de ligação dos átomos (GUIMARÃES e SILVA, 2003). A temperatura no centro do Sol é estimada estar acima de 15 milhões de graus Kelvin (K) (GUIMARÃES e SILVA, 2003).

A radiação solar eletromagnética, que é a principal responsável pelo processo de ionização na ionosfera, provém de três camadas da atmosfera solar. A figura 2.1 representa a localização dessas camadas (KIRCHHOFF, 1991).

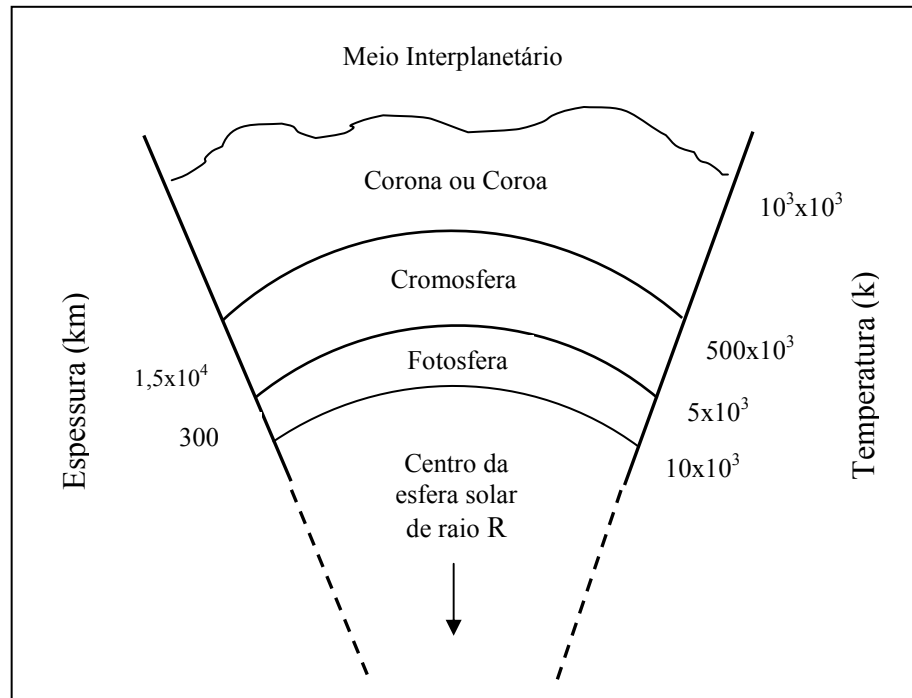


Figura 2.1 – Representação esquemática das três camadas solares mais externas
 Fonte: Adaptada de Kirchoff (1991)

A coroa, também conhecida como coroa, é a camada mais externa e apresenta temperaturas muito altas, da ordem de milhões de graus Kelvin, sendo a camada mais rarefeita do Sol. Vale salientar que o limite da coroa não é bem definido, pois se confunde com o meio interplanetário. A radiação mais intensa, situada no visível, origina-se de uma camada que tem cerca de 300 km de espessura, denominada de fotosfera. A cromosfera é a camada que se situa entre a coroa e fotosfera, e tem cerca de 15000 km de espessura. Esta camada normalmente não é visível, porque sua radiação é muito mais fraca do que a da fotosfera (o mesmo ocorre com a coroa). Ela pode ser observada, no entanto, durante os eclipses, quando a Lua esconde o disco da fotosfera (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2000). A figura 2.2 mostra a cromosfera e coroa (região clara da imagem), quando ocorreu um eclipse total no dia 04/11/1994.



Figura 2.2 – Foto do eclipse total mostrando a cromosfera e corona.
Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2000)

De acordo com a figura 2.1, nota-se que na cromosfera e corona a temperatura do Sol aumenta à medida que se distancia do centro do Sol. A temperatura na cromosfera pode variar de 5000 K até 500000 K, enquanto que na corona a temperatura pode variar de 500000 K até 1000000 K. Esse aquecimento da cromosfera e corona deve ter uma fonte de energia que não são os fótons produzidos no interior do Sol. Pois, se fosse essa fonte de energia, a cromosfera e a corona deveriam ser mais frias do que a fotosfera; no entanto, não é isso que ocorre. Atualmente, pensa-se que a fonte de energia são campos magnéticos variáveis formados na fotosfera e transportados para a cromosfera e coroa por correntes elétricas, deixando parte de sua energia nessas duas regiões (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2000). Vale salientar que abaixo da fotosfera se encontra a zona radiativa, onde a energia flui por radiação. O núcleo do Sol é a região onde a energia é produzida, por reações termo-nucleares.

Além da radiação eletromagnética, o Sol (na região da corona) também libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas: o vento solar que, como a radiação eletromagnética, traz energia para a Terra e, conseqüentemente, contribuiu para a formação da ionosfera (KIRCHHOFF, 1991). Enquanto a radiação eletromagnética viaja

diretamente do Sol para a Terra em aproximadamente 8,3 minutos (pois viaja aproximadamente à velocidade da luz no vácuo) (DAVIES, 1990), as partículas do vento solar chegam à Terra em aproximadamente 5 dias viajando com uma velocidade de cerca de 400 km/s (McNAMARA, 1991). O vento solar é um fluxo de plasma solar ionizado que parte do campo magnético solar preenchendo o meio interplanetário. Ele é constituído de aproximadamente 50,9% de elétrons, 47,3% de prótons e 1,8% de He^{2+} (GUIMARÃES e SILVA, 2003). O vento solar origina-se nas regiões da corona onde as linhas do campo magnético são abertas fazendo com que o plasma coronal se expanda para o meio interplanetário formando o vento solar propriamente dito (DAVIES, 1990). É importante relatar que a energia contida na radiação solar eletromagnética é sem dúvida mais dominante do que a contida no vento solar (SCHUNK E NAGY, 2000 apud LIU, 2004).

Não se pode sentir o vento solar na superfície da Terra, pois a densidade do vento solar é muito baixa, sendo a mesma mais baixa do que qualquer “vácuo” já conseguido experimentalmente na Terra (McNAMARA, 1991). No entanto, as partículas sendo eletricamente carregadas afetam o campo magnético da Terra e a ionosfera (McNAMARA, 1991).

O vento solar e a radiação solar eletromagnética podem sofrer drásticas alterações na ocorrência de tempestades solares, o que implica na alteração das condições do campo magnético e da ionosfera terrestre. Uma tempestade solar é caracterizada pelo aumento apreciável na radiação solar eletromagnética no extremo ultravioleta e raios-X, na velocidade e concentração do vento solar, ou de ambos (KIRCHHOFF, 1991). Nessas condições, quando a radiação e as partículas alcançam a Terra, ocorrem os fenômenos chamados *tempestades ionosféricas* (mudanças drásticas da ionosfera) e *tempestades geomagnéticas* (mudanças drásticas do campo geomagnético). Esses fenômenos alteram significativamente o comportamento da ionosfera, e serão comentados posteriormente. Normalmente, a

perturbação solar causadora destes fenômenos é caracterizada por um aumento dos parâmetros do vento solar (densidade e velocidade). A densidade do vento solar pode passar de 10^6 para 10^7 partículas/m³, e sua velocidade pode mudar de 400-300 para até 1000 km/s ou até mais (KIRCHHOFF, 1991).

2.2 Divisão da Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre, para propósitos práticos, pode ser considerada como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas à Terra. A sua estrutura está relacionada com diversos elementos, tais como: térmicos, químicos e eletromagnéticos. Estes parâmetros combinados variam sensivelmente em função da hora, latitude, longitude, época do ano e atividade solar.

Segundo um esquema simplificado apresentado em Seeber (2003), a atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético, propagação de ondas eletromagnéticas e segundo um parâmetro técnico. A figura 2.3 apresenta um esquema simplificado dessas divisões (SEEBER, 2003).

| Altitude (km) | Temperatura | Ionização | Campo Magnético | Propagação | Técnico |
|---------------|--------------|--------------|-----------------|------------|--------------------|
| 100000 | Termosfera | Protonosfera | Magnetosfera | Ionosfera | Atmosfera Superior |
| 10000 | | Ionosfera | | | |
| 1000 | | | | | |
| 100 | Mesosfera | | | | |
| | Estratosfera | | | | |
| 10 | Troposfera | Neutrosfera | Dinamosfera | Troposfera | Atmosfera Inferior |

Figura 2.3 – Possíveis divisões da atmosfera terrestre.

Fonte: Adaptada de Seeber (2003)

Em função do enfoque deste estudo, a divisão relacionada com a propagação de ondas eletromagnéticas será descrita. Neste caso, a atmosfera terrestre é dividida em troposfera e ionosfera, pois, as ondas eletromagnéticas ao se propagarem em tais meios sofrem diferentes influências. A troposfera é a camada compreendida entre a superfície terrestre até aproximadamente 50 km de altura. Ela é formada por partículas neutras (SEEBER, 2003), e a maior concentração de gases encontra-se até uma altura de 12 km, composta por nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, argônio, vapor d'água, entre outros (SAPUCCI, 2001).

A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura. Neste caso, a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma esteja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995). Sendo assim, sinais UHF (*Ultra High Frequency*), que compreendem uma faixa de frequência de 300 MHz a 3 GHz, onde estão incluídos os sinais GPS ($L_1 = 1575,42$ MHz; $L_2 = 1227,60$ MHz; e futuramente: $L_5 = 1176,45$ MHz), são propagados de forma não dispersiva na troposfera. Na tabela 2.1 são dados alguns exemplos de faixas de frequência (SEEBER, 2003). Esta tabela mostra as bandas de frequência e os seus respectivos comprimentos de ondas. Esta subdivisão é normalmente utilizada em tecnologia de comunicação.

Tabela 2.1 – Bandas de Frequência

| Designação | Faixa de Frequência | Comprimento de Onda |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| LF | < 300 KHz | > 1000 m |
| MF | 300 KHz ... 3000 KHz | 1000 m ... 100 m |
| HF | 3 MHz ... 30 MHz | 100 m ... 10 m |
| VHF | 30 MHz ... 300 MHz | 10 m ... 1 m |
| UHF | 300 MHz ... 3000 MHz | 1 m ... 10 cm |
| SHF | 3 GHz ... 30 GHz | 10 cm ... 1 cm |
| EHF | 30 GHz ... 300 GHz | 1 cm ... 1 mm |

Fonte: Seeber (2003)

2.3 Características da Ionosfera

A ionosfera, ao contrário da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. Caracteriza-se, principalmente, pela formação de íons e elétrons livres, e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 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 plasmasfera pode ser definida como a região de altura superior a 1000 km, aproximadamente, onde a densidade atmosférica neutra é muito pequena e os íons positivos são predominantemente prótons (DAVIES, 1990).

Na região compreendida pela ionosfera, a densidade de íons e elétrons livres é suficiente para alterar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites GPS. Para ondas HF, por exemplo, a ionosfera serve como camada refletora, sendo importante para a comunicação. A formação da ionosfera está intimamente associada à radiação solar eletromagnética (principalmente) e corpuscular incidente na atmosfera terrestre e, com menor grau de importância, à radiação cósmica. Conseqüentemente, o comportamento da ionosfera depende do ângulo zenital solar, da localização geográfica, da estação do ano e do nível de atividade solar (FEDRIZZI, 1999).

2.3.1 Processo de ionização e o perfil vertical da ionosfera

A radiação solar eletromagnética, principalmente na faixa espectral do extremo ultravioleta (EUV) e dos raios X, ao incidir sobre a atmosfera neutra produz uma grande quantidade de íons e elétrons livres através do processo denominado de fotoionização, formando a ionosfera. McNamara (1991) enfatiza que são os elétrons livres que afetam a propagação de ondas de rádio, e não os íons. Segundo McNamara (1991) isto ocorre porque

os íons possuem uma massa cerca de 20 mil vezes maior do que a dos elétrons e, portanto, são muito pesados para responder às rápidas oscilações de uma onda de rádio.

A fotoionização ionosférica consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros. A figura 2.4 ilustra o processo de fotoionização para o caso de um átomo de oxigênio.

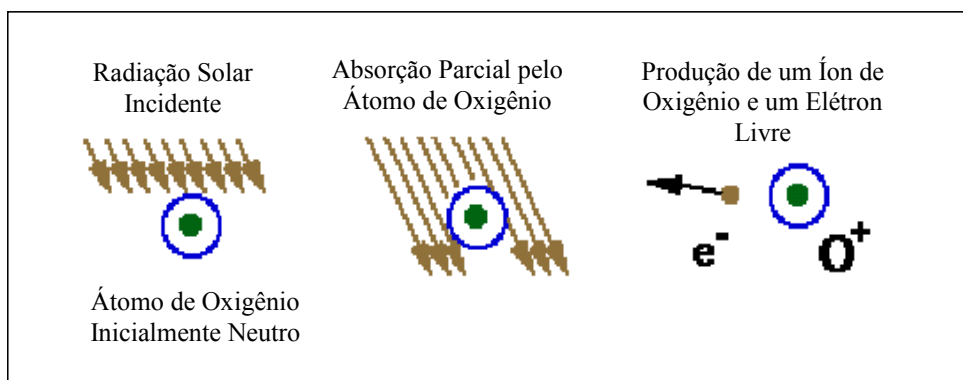


Figura 2.4 – Processo de Fotoionização
Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003)

Quando a energia dos fótons incidentes sobre o elemento neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização, ocorre a perda de elétrons deste elemento, dando origem a um íon positivo e elétrons livres. No caso da ilustração da figura 2.4, foi originado um íon positivo O^+ e um elétron livre (e^-).

Vale salientar que íons e elétrons livres não são produzidos somente pelo processo de fotoionização. Eles também podem ser produzidos por colisão com partículas energéticas carregadas de origem solar (vento solar) ou galáctica (raios cósmicos) que penetram na atmosfera. Este processo ocorre principalmente em regiões de altas latitudes e na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (RODRIGUES, 2003).

O processo inverso da fotoionização é denominado de recombinação, sendo o principal processo pelo qual elétrons livres são perdidos na parte superior da ionosfera

(McNAMARA, 1991). Há dois tipos de recombinação: radiativa e dissociativa. Na recombinação radiativa elétrons combinam-se diretamente com íons de cargas positivas gerando átomos neutros. Este tipo de recombinação é menos eficiente do que a dissociativa que ocorre em dois estágios. No primeiro estágio, íons positivos, X^+ (formado por fotoionização), interagem com moléculas neutras, A_2 (como por exemplo, oxigênio e nitrogênio), resultando: $(X^+ + A_2 = AX^+ + A)$. No segundo estágio, elétrons combinam com as moléculas de cargas positivas, AX^+ , resultando em dois átomos neutros e novamente ocorrendo à perda de elétrons livres: $(AX^+ + e^- = A + X)$ (McNAMARA, 1991). Na parte mais baixa da ionosfera, elétrons são perdidos pelo processo de junção (*attachment*), no qual elétrons juntam-se a átomos neutros resultando em íons de carga negativa. Assim como os íons positivos, os íons negativos são muito mais pesados que os elétrons e, portanto, não afetam a propagação, pois não respondem às rápidas oscilações eletromagnéticas de ondas de rádio (McNAMARA, 1991).

Diante deste cenário de produção e perda de elétrons livres, na medida em que a radiação solar penetra na atmosfera mais densa a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade de elétrons é máxima. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons (FEDRIZZI, 1999). A figura 2.5 ilustra a formação da ionosfera e a presença de um pico de ionização (RODRIGUES, 2003).

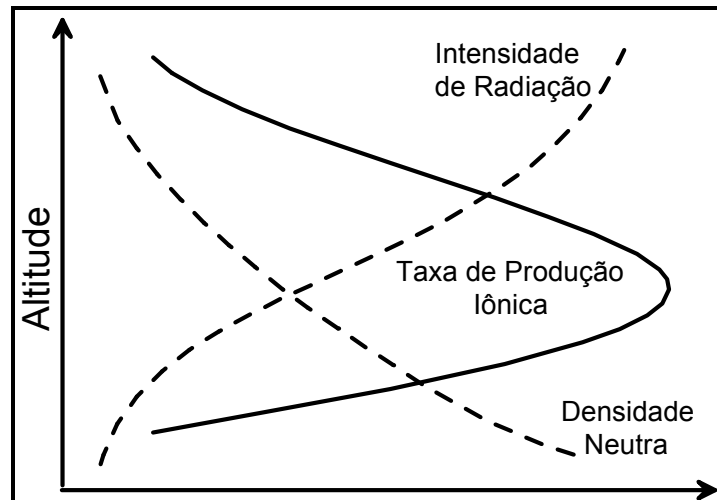


Figura 2.5 – Curva de ionização (Perfil de Chapman).
Fonte: Adaptada de Rodrigues (2003)

A forma exata da curva de ionização, apresentada na figura 2.5, depende de vários fatores, tais como: hora local, latitude, estação do ano, ciclo solar, atividade geomagnética, dentre outros. Segundo Rodrigues (2003), todos estes fatores, juntamente com características químicas da atmosfera, que também apresentam uma alta variabilidade, fazem com que o perfil apresentado na figura 2.5 não seja tão simples.

Devido às diferentes moléculas e átomos presentes na atmosfera e suas diferentes taxas de absorção, distintas camadas ionosféricas são formadas. Desta forma, a ionosfera é dividida em três camadas, denominadas por D, E e F, que são caracterizadas pelas variações da densidade de elétrons à medida que a altitude aumenta. Historicamente, a primeira camada da ionosfera que foi descoberta estava numa altura de 100 km da superfície e foi denominada de camada E, com “E” representando a palavra elétrons (McNAMARA, 1991).

A camada D, que faz parte da região mais baixa da ionosfera, compreende uma região entre as altitudes de 50 e 90 km (DAVIES, 1990). A camada D possui como fontes primárias de ionização o raio-X, a radiação Lyman- α e a radiação cósmica (LIU, 2004). A camada D é afetada principalmente pela radiação solar, e a densidade de elétrons

livres é bem maior durante o dia, fazendo com que à noite a densidade caia drasticamente ou até mesmo desapareça. Valores típicos da densidade de elétrons da camada D ao meio dia local na região de latitudes médias variam entre $6,1 \times 10^8$ a $13,1 \times 10^8$ elétrons/m³ (el/m³), variando de acordo com o nível da atividade solar (KOMJATHY, 1997). A camada D é importante na propagação de ondas, atuando como uma fonte refletora dos sinais de frequência baixa (LF) e de frequência muito baixa (VLF) (DAVIES, 1990). Em Davies (1990), a parte mais baixa da camada D (abaixo de 60 km) é referida como camada C, onde a radiação cósmica é a única fonte de ionização.

A camada E tem início e término, aproximadamente, nas altitudes de 90 km e 140 km, respectivamente (DAVIES, 1990). O comportamento dessa camada é praticamente dependente do nível de atividade solar e do ângulo zenital do Sol (KOMJATHY, 1997). A camada E é livre de distúrbios, diferentemente da camada F, e só está presente durante o dia. Na realidade, a camada E não desaparece completamente à noite, porém, para propósitos práticos, assume-se que a densidade de elétrons é praticamente nula no período noturno (KOMJATHY, 1997). A fonte primária de ionização é a radiação solar eletromagnética na faixa do raio-X. Típicos valores da densidade de elétrons na camada E para a região de latitudes médias variam entre $1,3 \times 10^{11}$ e $1,7 \times 10^{11}$ el/m³ (KOMJATHY, 1997). Uma importante característica a se comentar é que na camada E surge uma fina camada, designada de “E esporádica”, oriunda de variações na densidade de elétrons próximo à região compreendida entre 90 e 130 km (McNAMARA, 1991). Tais variações ocorrem devido à magnetosfera, meteoros, e outros fenômenos físicos. A contribuição da magnetosfera para a formação da “E esporádica”, resume-se ao fato de que íons e elétrons são transportados pelo campo magnético que se encontra na magnetosfera, motivando as variações na densidade de elétrons na região onde se encontra a esporádica. Os meteoros também têm uma contribuição significativa para a formação dessa esporádica, pois, ao incidirem na região da atmosfera,

ocorre uma produção de íons e elétrons livres ao longo de seu trajeto, ocasionando variações na densidade de elétrons. Com respeito à propagação de ondas, a esporádica E é importante, pois, pode refletir ondas de rádio com frequência de até 100 MHz, aproximadamente (DAVIES, 1990).

A camada F compreende, aproximadamente, o intervalo da ionosfera entre as alturas de 140 km e 1000 km, sendo, ainda, subdividida em camadas F1 e F2. A camada F1 é formada entre as altitudes de 140 km e 200 km, e apresenta uma típica concentração de elétrons variando de acordo com a atividade solar de $2,3 \times 10^{11}$ el/m³ a $3,3 \times 10^{11}$ el/m³, para a região de latitudes médias ao meio dia local (KOMJATHY, 1997). À noite, essa região desaparece, pois a densidade de elétrons é controlada principalmente pelo ângulo zenital do Sol (JOHNSON, 1965; KOMJATHY, 1997). A principal fonte de ionização da camada F1 é a radiação solar do extremo ultravioleta.

A camada F2 compreende o intervalo da ionosfera entre as alturas de 200 km até aproximadamente 1000 km, e é onde ocorre o pico na densidade de elétrons da ionosfera entre as altitudes de 300 a 450 km. Valores típicos da densidade de elétrons para regiões de latitudes médias, ao meio dia local variam entre $2,8 \times 10^{11}$ el/m³ a $5,2 \times 10^{11}$ el/m³ (KOMJATHY, 1997). A radiação ionizante desta camada é basicamente a mesma responsável pela ionização da camada F1, porém, ao contrário desta, a camada F2 não segue a mesma variação diurna e sazonal (DAVIES, 1990). Os processos de transporte e as perturbações associadas às tempestades geomagnéticas tornam a variação temporal e espacial desta camada extremamente complexa, onde a radiação solar desempenha um papel limitado na produção e manutenção de elétrons livres. A camada F2 apresenta uma característica difusa devido à concentração de elétrons. Esse fenômeno é chamado de *spread F* e ocorre principalmente à noite, provocando uma variação na densidade de elétrons com uma conseqüente cintilação nos sinais de rádio emitidos por satélites ao atravessar a ionosfera, afetando assim os sinais

emitidos pelos satélites GPS. Em contrapartida, essas irregularidades são importantes na propagação de rádios que utilizam HF (DAVIES, 1990). A divisão da camada F em F1 e F2 é uma consequência da alta ionização, durante o dia, no verão, podendo, ainda, ser dividida em mais regiões. Ocorre um acréscimo na densidade de elétrons de acordo com o aumento da altitude. Após a concentração máxima de elétrons que ocorre na camada F, a densidade de elétrons decresce, até fundir-se com o vento solar. A frequência crítica da camada F2 apresenta uma dependência linear com o número de manchas solares. Exceto para períodos perturbados, o aumento da frequência crítica e da altura máxima do pico da camada F2 são proporcionais ao aumento da atividade solar, ou seja, ao aumento na ocorrência de manchas solares (McNAMARA, 1991). Também, a distribuição global da frequência crítica mostra uma enorme dependência com a atividade geomagnética (KOMJATHY, 1997). Vale salientar que recentemente foi observada uma terceira subcamada na região F, a camada F3, cuja formação e dinâmica ainda estão sendo estudadas (BATISTA et al., 2002).

A figura 2.6 mostra a distribuição das camadas, bem como a densidade de elétrons ao longo do dia e os vários tipos de ondas que propagam na ionosfera, entre outras informações.

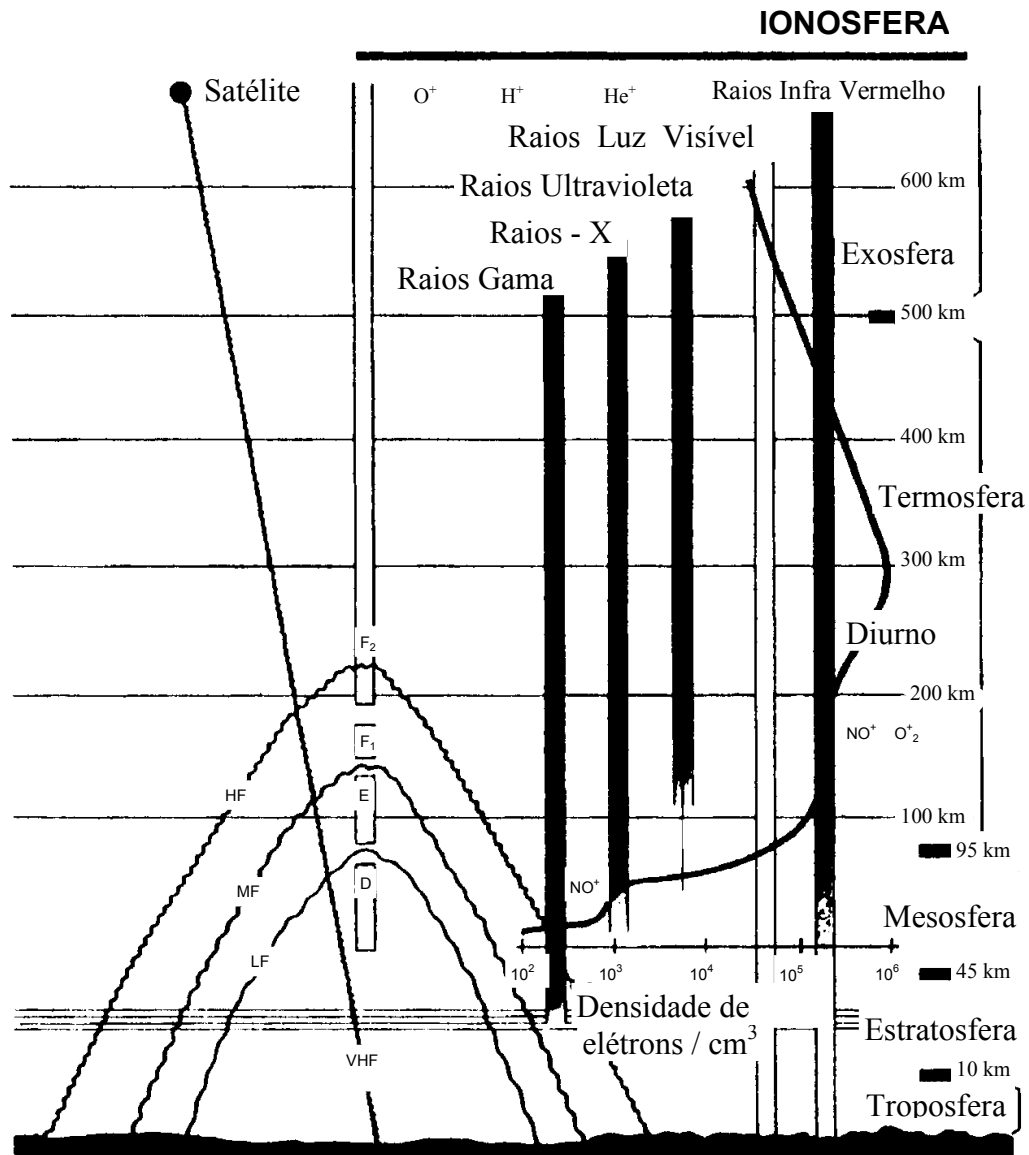


Figura 2.6 - Representação esquemática da ionosfera.
 Fonte: Adaptada por Camargo (1999) de Osório (1992)

Vale ressaltar que a ionosfera se comporta de forma distinta durante os períodos diurno e noturno. A diferença consiste basicamente na queda na densidade de elétrons durante o período noturno, devido à ausência da radiação solar. A figura 2.7 mostra a diferença na densidade de elétrons durante os dois períodos. Nota-se que durante o período noturno a densidade cai consideravelmente.

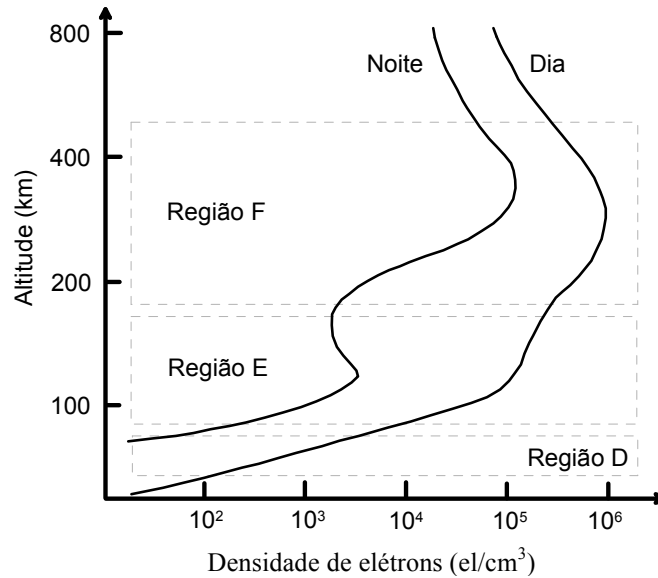


Figura 2.7 – Perfis da densidade de elétrons durante o dia e a noite
 Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003)

De acordo com a figura 2.7 pode-se notar, também, que acima de aproximadamente 300 km a queda na densidade de elétrons é menor do que em outras altitudes.

2.3.2 *Frequência crítica das camadas ionosféricas*

A frequência máxima de uma onda eletromagnética que faz com que esta seja refletida em uma determinada camada ionosférica é denominada de frequência crítica da camada em questão, e é simbolizada por foD, foE, foF1 e foF2 em referência às camadas da ionosfera descritas anteriormente (McNAMARA, 1991). Ou seja, há frequências críticas para todas as camadas da ionosfera. Uma onda com frequência maior que a frequência crítica de uma camada faz com que ela consiga penetrar nesta camada.

O quadrado de uma frequência crítica é linearmente proporcional à densidade máxima de elétrons da camada considerada, que é usualmente denotada por NmD, NmE, NmF1 e NmF2, em referência à densidade máxima de elétrons das camadas ionosféricas D, E, F1 e F2, respectivamente (KOMJATHY, 1997). Citando um exemplo

numérico, supondo a densidade máxima de elétrons típica para a camada F2 (NmF2) de 10^{12} el/m³, a correspondente frequência crítica foF2 será de aproximadamente 9 MHz, ou seja, tem-se a seguinte relação: “foF2 = 9×10^{-6} (NmF2)^{1/2} MHz”, aproximadamente (McNAMARA, 1991).

2.4 Variações do Conteúdo Total de Elétrons (TEC)

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, é influenciada por variações temporais, variações da radiação solar, influências da latitude, longitude e campo geomagnético, dentre outras variáveis.

2.4.1 Variações temporais

As variações temporais, que compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos, influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera. As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons.

A principal razão da existência da variação diurna é devido à iluminação do Sol, ou seja, à radiação solar. Algumas camadas, como a D, E e F1, chegam a ponto de desaparecer à noite. A camada F2 não desaparece, mas a quantidade de elétrons é reduzida a ponto de atingir na madrugada seu valor mínimo, voltando a aumentar seu valor com o nascer do Sol. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12 e 16 horas local (WEBSTER, 1993). Um segundo máximo ocorre na região de baixas latitudes logo após o pôr do Sol, entre 21-22 horas local, sendo geralmente maior que o primeiro.

A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano em uma determinada região, em parte porque o ângulo zenital do Sol tem uma variação sazonal e,

também, devido às mudanças na atmosfera neutra da qual a ionosfera é criada (McNAMARA, 1991). Valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócio) e valores mínimos nos meses de solstícios de inverno e verão. A respeito dos valores mínimos, é importante citar que no hemisfério norte a densidade de elétrons é menor no verão do que no inverno, caracterizando o que se chama de anomalia sazonal de latitudes médias (McNAMARA, 1991). Esse fenômeno ocorre devido à presença de variações na atmosfera neutra (BATISTA, 2003).

As variações de ciclos de longos períodos na densidade de elétrons, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. Segundo Schaer (1999), as manchas solares foram descritas pela primeira vez por Teofrasto, por volta do ano 325 a.C. (SCHAER, 1999). Oliveira Filho e Saraiva (2000) relata que as manchas solares também foram registradas na China no ano 48 A.C.. No entanto, o estudo científico começou com o uso do telescópio, sendo observadas (por projeção da imagem do Sol) por Galileo e Thomas Harriot em 1610, e por Johannes e David Fabricius e por Christoph Scheiner em 1611 (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2000). As manchas solares são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta. Assim, o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. As manchas solares são constituídas de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperatura em torno de 3800 graus Kelvin, e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. As manchas solares tendem a se formar em grupos, e estão associadas a intensos campos magnéticos no Sol (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2000). O diâmetro típico de uma mancha solar é maior do que o diâmetro da Terra (McNAMARA, 1991). O período de duração de uma mancha solar é muito variável;

algumas manchas aparecem por apenas alguns dias, enquanto outras permanecem por várias rotações solares, cujo período de cada rotação é de 27 dias, aproximadamente (SCHAER, 1999).

A figura 2.8 mostra uma imagem da superfície do Sol, onde se podem notar algumas manchas solares, que aparecem na imagem como manchas mais escuras.



Figura 2.8 – Imagem da superfície do Sol em luz branca mostrando algumas manchas solares
Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2000)

O número de manchas solares (R) pode ser calculado a partir do índice de Wolf, que é dado da seguinte forma (DAVIES, 1990):

$$R = k (10g + s) \quad (2.1)$$

Na equação (2.1) “ g ” é o número de grupos de manchas e “ s ” é o número de manchas observadas individualmente. O fator “ k ” é um fator de correção que é usado para possibilitar a comparação de resultados obtidos por diferentes observadores em locais distintos e com diferentes equipamentos. No entanto, a divisão do número de grupos de manchas (g) e manchas isoladas (s) pode ser arbitrária. Às vezes, também é difícil afirmar se um grande complexo de manchas deve ser contado como um ou dois grupos (DAVIES,

1990). Assim, o número de manchas (R) definido pela equação (2.1) pode não ser coerente com a realidade, devido ao grau de arbitrariedade, pois o mesmo depende do observador e das características do equipamento utilizado. O número de manchas solares pode ser avaliado diariamente e como médias mensais e anuais. O índice que representa o número de manchas solares mais utilizado é o que é calculado a partir de uma suavização de um mês específico, e é conhecido por R_{12} . Detalhes sobre esse índice podem ser encontrados em Davies (1990).

A figura 2.9 mostra registros de ciclos solares, desde 1700 até aproximadamente 2004. Vale salientar que, de 1700 até 1750, as médias dos números de manchas são anuais (em preto), ao passo que, de 1750 até os dias atuais, a contagem do número de manchas são dadas pela média mensal (em vermelho). Estes ciclos são definidos com relação ao número de manchas solares. O valor do TEC é proporcional ao aumento da atividade solar, ou seja, ao aumento do número de manchas solares. Em períodos de máxima atividade (maior número de manchas), o TEC máximo diurno pode atingir valores até 50% maiores do que em períodos de mínima atividade (menor número de manchas) (BEARD, 1975 apud FEDRIZZI, 2003).

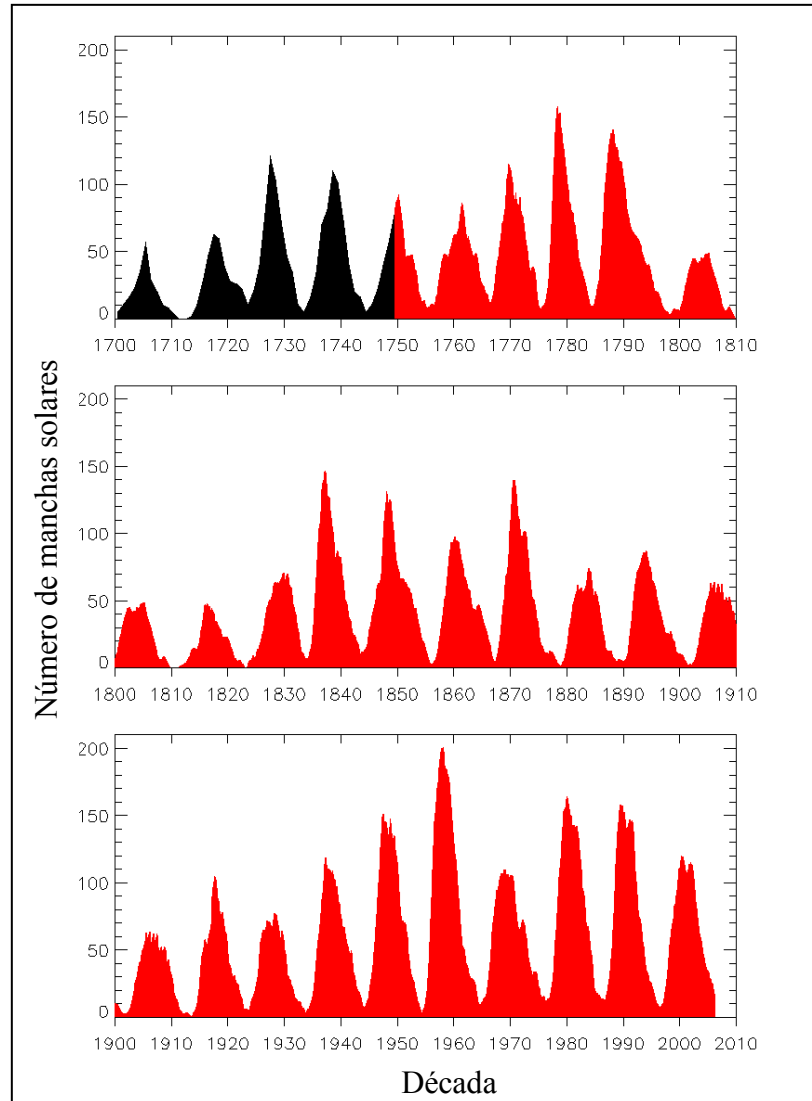


Figura 2.9 – Número de manchas solares – Ciclos solares.
 Fonte : <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html> - acesso em 10/2006

De acordo com a figura 2.9, verifica-se que, além dos ciclos de 11 anos, pode-se notar também ciclos mais longos, de aproximadamente 80 anos (DAVIES, 1990). Normalmente, também existe uma periodicidade de aproximadamente 27 dias, associadas com a rotação solar (DAVIES, 1990). Os ciclos solares são normalmente não-simétricos (LEICK, 1995). A duração da transição do período mínimo para o máximo é menor do que a duração do máximo para o mínimo. Normalmente, a duração do período mínimo para o máximo é de 3 a 4 anos, e do período de declínio é de 7 a 8 anos (KOMJATHY, 1997).

Atualmente, o Sol está no ciclo denominado “ciclo 23” (KUNCHES, 2000), e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001, durante os quais

ocorreu um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na camada ionosférica. A figura 2.10 mostra o número de manchas solares do ciclo 23.

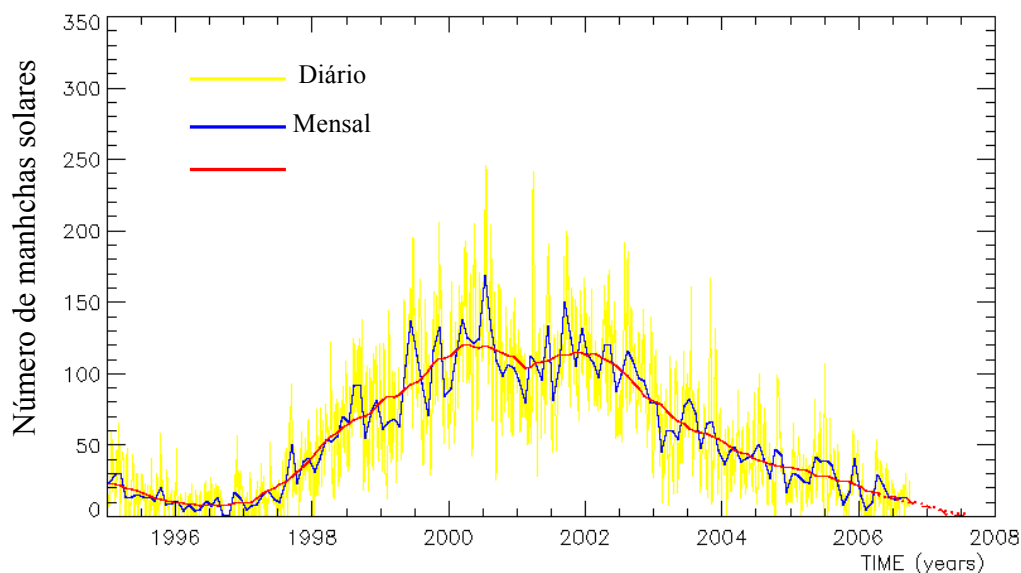


Figura 2.10 – Número de manchas solares – Ciclo 23
 Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html> - acesso em 10/2006

Pode-se notar que atualmente o ciclo 23 está em uma fase de mínima atividade solar, ou seja, mínima ocorrência de manchas solares. Este número reduzido de manchas solares provoca uma diminuição na ionização, pois esta é proporcional ao número de manchas. Assim, a densidade de elétrons da ionosfera está reduzida quando comparada ao período de máxima atividade do ciclo 23.

Segundo previsão de NCAR (2006) o próximo ciclo de manchas solares (ciclo 24) será de 30% a 50% maior do que o ciclo 23. O máximo solar do ciclo 24 deve ocorrer por volta de 2012.

2.4.2 Influência da variação da radiação solar

A variação na quantidade da emissão da radiação ultravioleta emitida pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que variam

de minutos a semanas (WEBSTER, 1993). Três tipos de fenômenos estão associados a essa variação. O primeiro deles é associado aos eventos solares, tais como as explosões solares (*solar flares*), que são caracterizadas por um rápido aumento de energia na superfície do Sol. O segundo tipo de variação da radiação solar está associado aos buracos na coroa (*coronal holes*), que são as fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, mais comuns no período de declínio da atividade solar. O vento solar escapa de buracos na coroa solar aquecida e forma a heliosfera. Quando ocorre esse fenômeno, as partículas que estão sendo emitidas do Sol pelo vento solar sofrem uma aceleração, aumentando, consideravelmente, sua velocidade. O terceiro efeito está relacionado às manchas solares que já foi descrito na seção anterior.

2.4.3 Campo geomagnético

Próximo à superfície da Terra, o campo magnético terrestre ou campo geomagnético, pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra (FONSECA JUNIOR, 2002). A figura 2.11 ilustra as linhas de força do campo geomagnético e a não coincidência do eixo do dipolo com o eixo de rotação da Terra (McNAMARA, 1991).

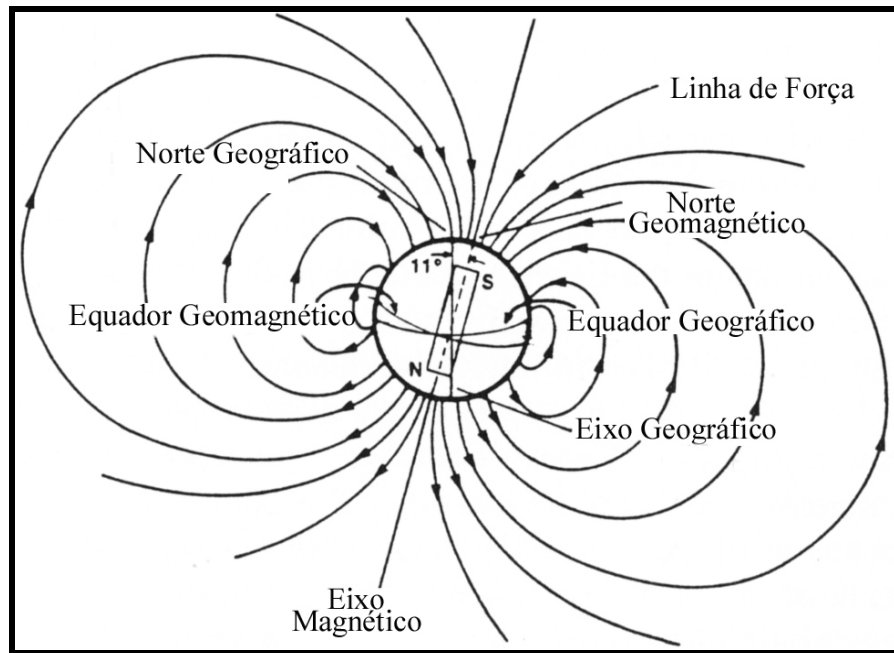


Figura 2.11 – Modelo do campo magnético da Terra
 Fonte: Adaptada de McNamara (1991)

O campo geomagnético tem a forma aproximada de uma barra magnética, como um ímã, e tem dois polos magnéticos, um na região ártica do Canadá, denominado de Pólo Norte Magnético, e um na região costeira da Antártica, sul da Austrália, denominado de Pólo Sul Magnético (NRCAN, 2004).

O pólo norte geomagnético tem coordenadas aproximadas de 79° N e 70° W, enquanto que o pólo sul geomagnético tem as coordenadas de 79° S e 110° E, aproximadamente. O plano do equador geomagnético é perpendicular ao eixo magnético, análogo ao plano do equador geográfico, que é perpendicular ao eixo geográfico. No entanto, os dois eixos não são coincidentes, pois os dois planos equatoriais não são coplanares. Na verdade o eixo geomagnético é inclinado com relação ao eixo geográfico ($90^\circ - 79^\circ = 11^\circ$), como visto na figura 2.11. Análogo às latitudes e longitudes geográficas tem-se também as mesmas coordenadas referenciadas ao equador geomagnético. Enquanto as coordenadas geográficas utilizam os polos e equador geográficos, as geomagnéticas utilizam os polos e equador geomagnéticos (McNAMARA, 1991). Vale salientar que, da mesma forma que as

coordenadas geográficas, as coordenadas geomagnéticas variam em função do tempo. A figura 2.12 ilustra a localização do equador geomagnético em 1957 e 2000.

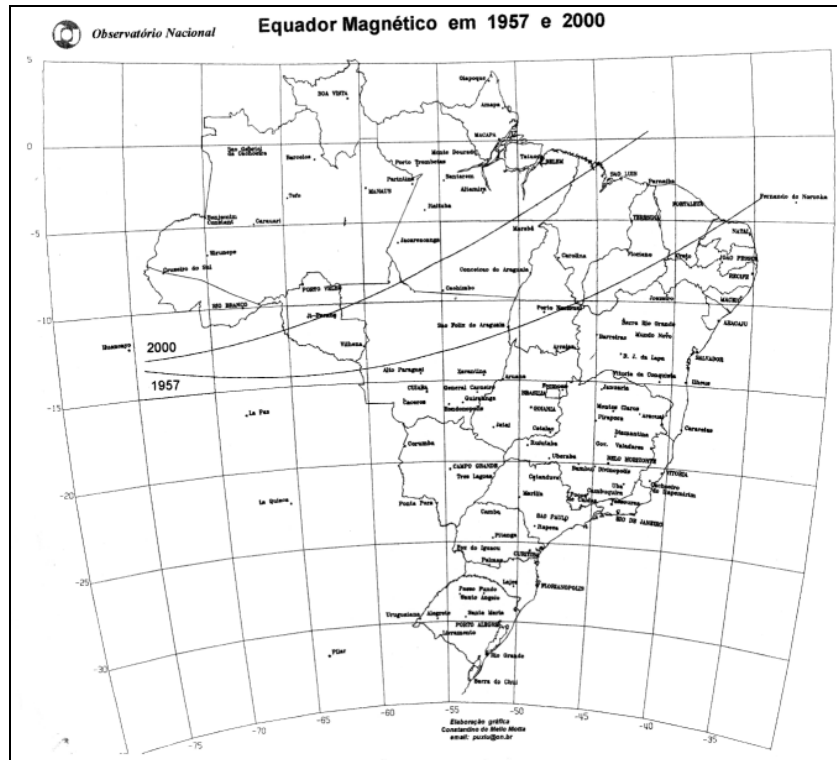


Figura 2.12 – Ilustração do equador geomagnético em 1957 e 2000.
Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/coord.htm> - acesso em Outubro/2006

Acredita-se que o campo geomagnético origina-se no centro da Terra e as linhas de força magnéticas estendem-se a grandes distâncias da Terra, atingindo 10 raios terrestres no lado de frente ao Sol (KIRCHHOFF, 1991).

O campo magnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons. Na ionosfera e na magnetosfera, o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns observadas no campo geomagnético são aquelas produzidas através das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer

variações bruscas e muito intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991).

Vale salientar que o modelo do campo geomagnético mais simples foi ilustrado na figura 2.11, onde o campo geomagnético é aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra. Sob a influência constante do vento solar, o campo geomagnético sofre alterações, tornando-se diferente do modelo teórico apresentado na figura 2.11. Principalmente durante períodos de intensificação do vento solar, devido à eventos solares, as linhas de força do campo geomagnético sofrem drásticas modificações, que por sua vez exercem enorme influência na ionosfera terrestre, causando as tempestades geomagnéticas, sendo que estas implicam em tempestades ionosféricas.

2.4.3.1 Distúrbios e tempestades geomagnéticas/ionosféricas

As emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar ocorrem continuamente, confinando e distorcendo o campo geomagnético em uma cavidade com uma cauda longa que se estende por centenas de raios terrestres na direção anti-solar (FEDRIZZI, 2003), tornando-se diferente do modelo teórico da figura 2.11. Esta cavidade denomina-se magnetosfera. A figura 2.13 mostra a influência do vento solar no campo geomagnético.

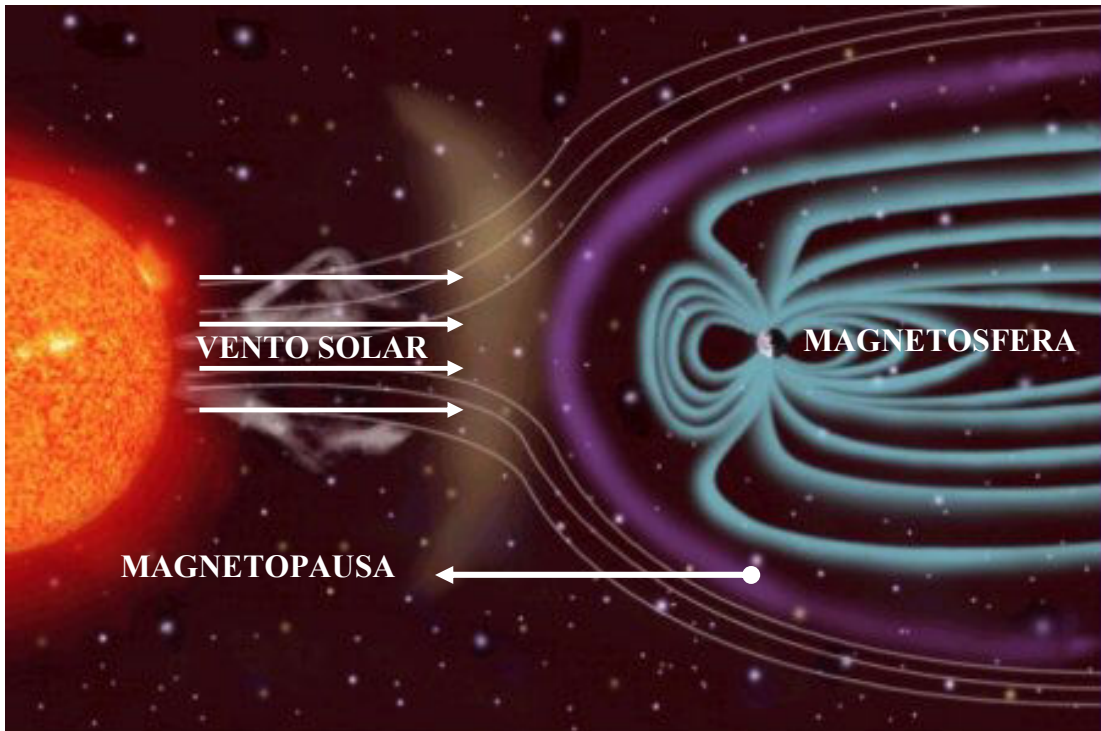


Figura 2.13 – Influência do vento solar no campo geomagnético

Fonte: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=2569> – acesso em março/2004

De acordo com a figura 2.13, pode-se notar que as linhas de força do campo geomagnético são comprimidas do lado iluminado pelo Sol, formando uma espécie de cauda na direção anti-solar. Durante eventos solares intensificados, que por sua vez intensificam os ventos solares, a velocidade do vento solar pode passar de 400-300 para 1000 km/s ou até mais. Dependendo da intensidade da perturbação, o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) é comprimido, podendo passar de 10 para 6 raios terrestres (BATISTA, 2003). Em outras palavras, eventos solares são responsáveis pela alteração dos parâmetros do vento solar (velocidade e densidade). Conseqüentemente, ocorre uma alteração do campo geomagnético, que por sua vez contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas. Estas por sua vez, implicam numa tempestade ionosférica, que é uma resposta à tempestade geomagnética.

Tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas solares: explosões solares (*solar flares*), corrente de

vento solar de alta velocidade (HSSWS – *High Speed Solar Wind Stream*) provenientes de buracos na coroa (*coronal holes*) e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDFs – *Sudden Disappearing Filaments*) (McNAMARA, 1991). Um exemplo das taxas de ocorrência de cada um desses eventos solares para o período de 1970 à 1983 é mostrado na figura 2.14, bem como o número de manchas solares para fins de comparação. Nela verifica-se que as explosões solares e os SDFs ocorrem mais frequentemente durante períodos de alta atividade solar e os buracos na coroa que são as fontes das HSSWS ocorrem principalmente durante a fase de declínio do número de manchas solares. De fato, Gonzalez et al. (1999) também enfatiza que as explosões solares e os SDFs são fenômenos de períodos de alta atividade solar, e que os buracos na coroa estão presentes durante períodos de baixa e média atividade.

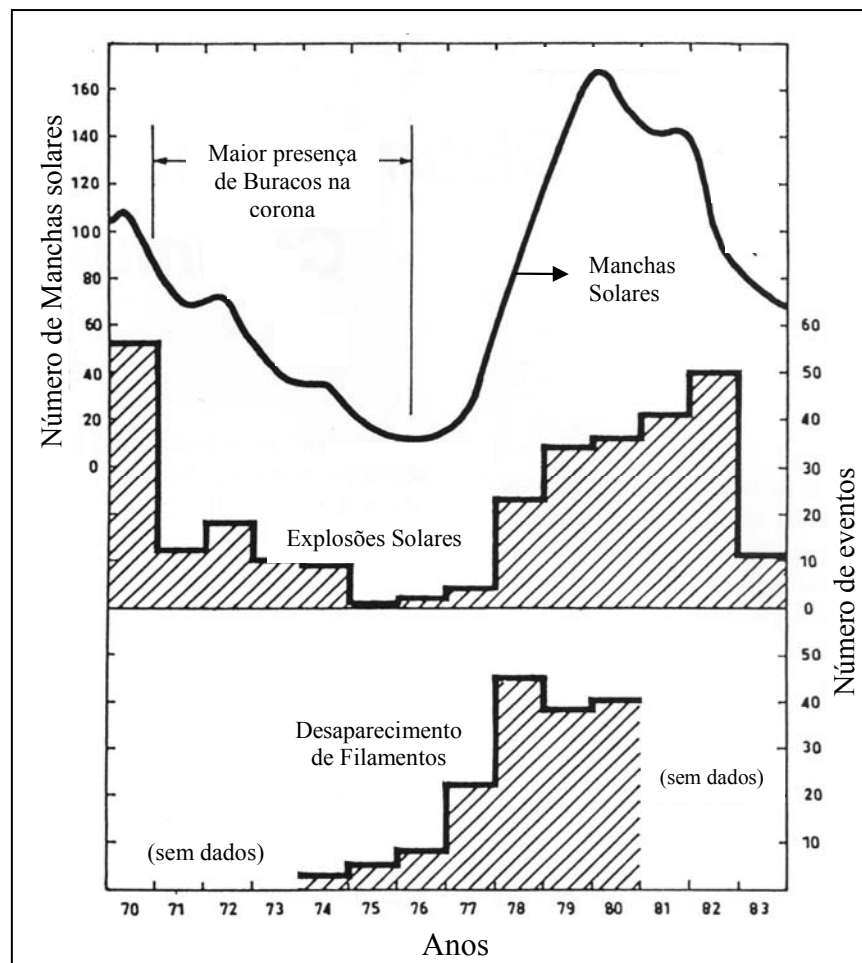


Figura 2.14 – Taxas de ocorrência de 1970 a 1983 dos três eventos solares que provocam alterações na ionosfera. Fonte: adaptada de McNamara (1991)

As explosões solares ocorrem em regiões do Sol denominadas ativas onde se encontram manchas solares (McNAMARA, 1991). Vale salientar, que a predição de qual região ativa gerará intensas explosões solares que afetarão a ionosfera ainda não é uma ciência exata (McNAMARA, 1991). Inclusive, NASA (2005) salienta que uma predição confiável sobre quando ocorrerá uma explosão solar faz parte dos mistérios à respeito do Sol. A figura 2.15 mostra duas imagens do dia 9 de março de 1989 de uma região solar ativa, um pouco antes e logo após a ocorrência de uma explosão solar. A duração de uma explosão solar pode durar de 3 minutos até várias horas, sendo o tempo médio de aproximadamente 30 minutos (DAVIES, 1990).

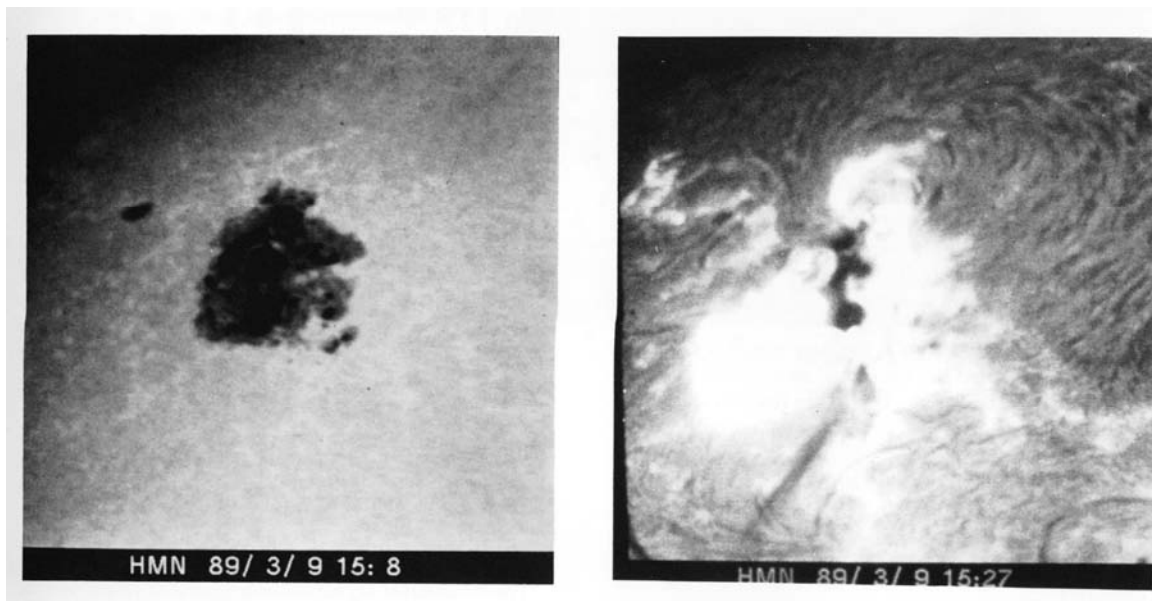


Figura 2.15 – Imagens de uma região ativa um pouco antes e logo após a ocorrência de uma explosão solar – 9 de março de 1989. Fonte: McNamara (1991)

Durante as explosões solares um dos fenômenos que ocorre é o aumento da radiação solar eletromagnética na faixa do comprimento de onda dos raios X (McNAMARA, 1991; BATISTA, 2003). Isto provoca um aumento muito rápido na ionização (pelo processo de fotoionização) em alturas da ionosfera em torno de 80 km (região D), no lado iluminado da Terra (BATISTA, 2003). Uma intensa explosão solar pode aumentar a densidade de elétrons

da camada D em 10 vezes (McNAMARA, 1991). Este aumento de ionização dá origem a uma série de fenômenos denominados genericamente de “Distúrbios Ionosféricos Súbitos” (DIS), os quais afetam a propagação de ondas eletromagnéticas que podem ser muito atenuadas (BATISTA, 2003). McNamara (1991) denomina um dos efeitos causados devido ao rápido aumento de ionização na camada D de “enfraquecimento de ondas curtas” (*short-wave fadeout*). O aumento da densidade de elétrons na região D ocorre apenas alguns minutos após a ocorrência da explosão solar, e dura da ordem de 1,5 horas (BATISTA, 2003). Sandford (1999) enfatiza que durante eventos de DIS podem ocorrer rápidas variações na amplitude e fase (cintilação ionosférica) dos sinais GPS, prejudicando a performance de rastreamento do receptor, que podem ocasionar, inclusive, em perdas de sinal (ou seja, o não registro das observáveis GPS).

Um segundo fenômeno que pode ocorrer no caso de explosões solares muito intensas é a ejeção de uma corrente (fluxo) de prótons que pode alcançar a Terra no caso de ser ejetado na direção dela (McNAMARA, 1991). Os prótons no seu caminho até a Terra podem causar severos danos a satélites e astronautas, pois viajam a uma velocidade de 0,8 vezes a velocidade da luz ($\cong 2,5 \times 10^8$ m/s) e, portanto são altamente penetrantes (McNAMARA, 1991). Quando os prótons chegam à Terra eles encontram o campo magnético terrestre. Sendo uma partícula carregada, um próton não pode cruzar as linhas de força do campo geomagnético, devendo girar ao redor delas. As linhas de força do campo geomagnético são horizontais próximos ao equador e verticais próximos aos pólos. Isto implica que prótons na direção do equador não podem penetrar diretamente na ionosfera, e dessa forma, a ionosfera equatorial é livre dos efeitos dos prótons provenientes de explosões solares. Já no caso das regiões polares, por terem linhas de força do campo geomagnético verticais, os prótons girando ao redor dessas linhas, penetram diretamente na ionosfera polar. Chegando até a camada D, os prótons causam um súbito aumento na densidade de elétrons,

pela ionização dos átomos presentes na atmosfera neutra, em um processo conhecido como ionização por colisão (McNAMARA, 1991). O que acontece é que os prótons (altamente rápidos) ao colidirem com os átomos “expulsam” os elétrons desses átomos. Em suma, a corrente de prótons advinda de uma explosão solar irá causar um aumento na densidade de elétrons na camada D nas regiões próximas aos pólos (McNAMARA, 1991).

Se a explosão solar for muito intensa, tem-se o terceiro fenômeno: a ejeção de uma “nuvem” de plasma, também conhecido como ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*) (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991; KOMJATHY, 1997). Os parâmetros do vento solar são drasticamente intensificados durante tal fenômeno. Sua densidade pode passar de 10^6 para 10^7 partículas/m³, e sua velocidade de 400-300 km/s pode chegar a 1000 km/s ou até mais (BATISTA, 2003). Se caso esta nuvem de plasma proveniente da explosão solar atingir a Terra, poderá causar uma tempestade geomagnética/ionosférica (McNAMARA, 1991). As tempestades mais intensas são frequentemente relacionadas a esse tipo de evento (OULU, 2003 apud FEDRIZZI, 2003). Quando uma nuvem de plasma atinge a Terra, ocorrem mudanças no campo magnético no qual a ionosfera está embebida e, também, mudanças na química e nos movimentos de larga escala da região F2 (McNAMARA, 1991). O resultado de todas essas mudanças é que a frequência crítica e, conseqüentemente, a densidade de elétrons da camada F2 pode ser tanto aumentada como diminuída. Se será aumentada ou diminuída para uma dada localização num determinado instante depende de vários fatores, tais como: a hora do dia em que a nuvem de plasma atingiu a Terra, a hora local em questão, a estação do ano, a latitude do local, e a quanto tempo a tempestade se iniciou, entre outros fatores (McNAMARA, 1991). Neste sentido, pode-se perceber que os efeitos de intensas tempestades geomagnéticas/ionosféricas no comportamento da densidade de elétrons é um assunto bastante complexo, podendo variar bastante de um caso para outro.

Como citado anteriormente, distúrbios ionosféricos também podem ser iniciados por HSSWS que é causada por ejeções de massa provenientes de buracos na corona. Buracos na corona são estruturas “abertas” e relativamente frias da superfícies do Sol (McNAMARA, 1991). Por “abertas” entende-se que as linhas de força do campo magnético do Sol nestes locais estendem-se para fora em direção ao meio interplanetário, ao invés de voltar à superfície do Sol (McNAMARA, 1991). Isso torna possível que material ionizado viaje ao longo das linhas de força abertas, dando origem as correntes de vento solar de alta velocidade (HSSWS), que eventualmente podem alcançar a Terra (KOMJATHY, 1997). É sabido que ventos solares fluem para fora do Sol advindos de toda a superfície solar, mas deve-se salientar que o fluxo advindo de um buraco na corona é mais rápido (McNAMARA, 1991). Velocidades típicas de ventos solares são de aproximadamente 400-300 km/s, e dos provenientes de buracos na corona de 500 km/s (McNAMARA, 1991). Note que a velocidade de HSSWS é inferior à velocidade do vento solar (nuvem de plasma) advindo de uma explosão solar que pode chegar a 1000 km/s ou até mais (KOMJATHY, 1997). HSSWSs são importantes pois podem causar tempestades ionosféricas/geomagnéticas. Porém, seus efeitos não são tão devastadores quanto aqueles advindos de uma explosão solar, pois os HSSWSs não atingem a Terra tão rapidamente quanto a nuvem de plasma de uma explosão solar (McNAMARA, 1991). Como visto, buracos na corona e suas associadas HSSWSs ocorrem mais usualmente durante a fase de declínio do número de manchas solares (ver figura 2.14). Buracos na corona são feições do Sol de longa vida, algumas sobrevivendo por várias rotações do Sol (uma rotação solar = 27 dias), e dão origem a periódicas tempestades ionosféricas/geomagnéticas, que tendem a ocorrer a cada 27 dias e não são tão intensas (DAVIES, 1990).

Desaparecimento súbito de filamentos (SDFs) é o último dos três fenômenos solares que podem provocar distúrbios na ionosfera. Filamentos são estruturas

grandes e relativamente frias da superfície do Sol (KOMJATHY, 1997). Os filamentos desaparecem em poucas horas e imagina-se que parte ou todo o material deles seja ejetado para o meio interplanetário, num evento similar a uma explosão solar (McNAMARA, 1991). Esses desaparecimentos súbitos de filamentos podem afetar o campo magnético da Terra bem como a ionosfera, embora os efeitos sejam freqüentemente pequenos e difíceis de confirmar (McNAMARA, 1991). SDFs são feições que ocorrem principalmente durante o período de alta atividade solar.

2.4.3.2 Índices geomagnéticos e as tempestades

Índices Geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2004). Os índices geomagnéticos mais freqüentemente utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas são os índices: “*Disturbance Storm-Time*” (Dst), “*Planetarische Kennziffer*” ou índice planetário (Kp) e “*Auroral Electrojet*” (AE) (FEDRIZZI, 2003).

Antes de definir o índice Kp, é necessário definir o índice K, pois a partir desse índice é derivado o índice Kp. O índice K é um índice local que consiste em um único dígito de 0 a 9 para cada intervalo de 3 horas e é gerado com medidas de um único local de observação geomagnética. O índice planetário Kp é obtido a partir da média aritmética dos índices K medidos em 13 observatórios entre as latitudes de 46° e 63° N e 46° e 63° S em relação ao equador geomagnético (OLIVEIRA, 2003). O índice Kp possui intervalos de 3 horas (8 valores diários) e está distribuído em 28 níveis (Tabela 2.2) que variam de 0 a 9 e é expresso em terços de uma unidade; por exemplo: 5- é equivalente a $4 \frac{2}{3}$, 5o é equivalente ao próprio 5 e 5+ é equivalente a $5 \frac{1}{3}$. Para estudos de longo período é conveniente definir um único índice médio por dia. Em função da natureza logarítmica dos índices Kp, é difícil

trabalhar com médias dos mesmos (BATISTA, 2003). Por isso, foram criados índices lineares. Desta forma, o índice ap (no mesmo intervalo) é derivado do índice Kp, como mostrado na tabela 2.2. O índice Ap é a média dos oito valores diários de ap. Valores publicados dos índices Kp e Ap podem ser obtidos nos seguintes endereços eletrônicos: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>; <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap>.

Tabela 2.2 – Relação entre o índice geomagnético Kp e ap.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Kp | 0o | 0+ | 1- | 1° | 1+ | 2- | 2o | 2+ | 3- | 3° | 3+ | 4- | 4o | 4+ |
| ap | 0 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 9 | 12 | 15 | 18 | 22 | 27 | 32 |
| Kp | 5- | 5° | 5+ | 6- | 6o | 6+ | 7- | 7° | 7+ | 8- | 8o | 8+ | 9- | 9o |
| ap | 39 | 48 | 56 | 67 | 80 | 94 | 111 | 132 | 154 | 179 | 207 | 236 | 300 | 400 |

Fonte: Davies (1990)

A atividade geomagnética é classificada de acordo com os índices Kp e Ap como mostrada na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação da atividade geomagnética em função de Kp e Ap.

| Atividade Geomagnética | Índice Kp | Índice Ap |
|---------------------------------|------------------|------------------|
| Calma | 0-2 | < 8 |
| Transição | 3 | 8-15 |
| Ativo | 4 | 16-29 |
| Tempestade Fraca | 5 | 30-49 |
| Tempestade Intensa | 6 | 50-99 |
| Tempestade muito intensa | 7-9 | 100-400 |

Fonte: Batista (2003)

O índice Dst (dado em nanoTesla - nT) representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999). É a partir desse parâmetro que se melhor define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. Antes do início da tempestade, o índice Dst 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 figura 2.16 mostra a curva do índice Dst obtida entre os dias 5-8 de setembro de 1982, quando ocorreu uma intensa tempestade geomagnética. Valores publicados do índice Dst podem ser encontrados no endereço eletrônico: <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>.

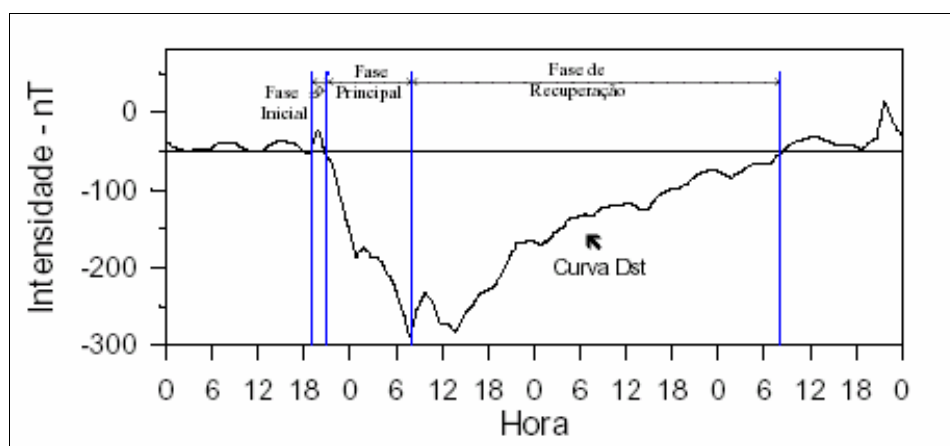


Figura 2.16 - Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982 com uma intensa tempestade magnética com suas fases características. Fonte: Adaptada de Yamashita (1999)

A classificação de uma tempestade geomagnética em função do índice Dst é dada de acordo com a tabela 2.4 (FEDRIZZI, 2003).

Tabela 2.4 – Classificação de uma tempestade geomagnética.

| Condição da Tempestade Geomagnética | Valor do índice Dst (nT) |
|--|---------------------------------|
| Fraca | -30 nT a -50 nT |
| Moderada | -50 nT a -100 nT |
| Intensa | -100 nT a -250 nT |
| Muito Intensa | < -250 nT |

Fonte: Fedrizzi (2003)

Agora serão descritos resumidamente os fenômenos físicos que caracterizam as fases de uma tempestade geomagnética. A fase inicial dura enquanto o campo magnético do meio interplanetário (IMF – *Interplanetary Magnetic Field*) estiver dirigido para o norte. Eventualmente, o IMF se inverte para o sul possibilitando a injeção de partículas energéticas na magnetosfera interna. Uma sub-tempestade é criada por um pulso rápido (30-60 minutos) de inversão para o sul do IMF. Quando o IMF permanece para o sul por um período mais longo a atividade torna-se mais complexa e ocorrerá uma seqüência de sub-tempestades produzindo, então, uma tempestade geomagnética. As partículas injetadas na magnetosfera interna sofrem uma deriva criando uma corrente de anel dirigida para oeste. A corrente de anel causa grandes decréscimos na componente horizontal do campo magnético sobre toda a Terra. Esta é a chamada fase principal da tempestade. Enquanto durar a injeção de partículas a corrente de anel se intensificará, até atingir um valor de equilíbrio em que a taxa de perda iguala a taxa de injeção. Assim que o IMF enfraquece (ou se inverte novamente para norte), a corrente de anel não se intensifica mais e a perturbação na componente horizontal do campo geomagnético começa a diminuir. Esta é a fase de recuperação da tempestade (BATISTA, 2003). Esta descrição detalhada da tempestade é claramente visualizada em gráficos do índice Dst, como o exemplo mostrado na figura 2.16.

Tempestades geomagnéticas típicas podem durar entre 1 e 5 dias. A fase principal dura em média, 1 dia. A fase de recuperação pode durar vários dias. As tempestades com Dst da ordem de -50 a -100 nT ocorrem praticamente todos os meses. Várias vezes por ano são observadas perturbações que podem atingir -150 até -300 nT. E apenas algumas poucas vezes em cada ciclo de atividade solar de 11 anos uma perturbação excede -500 nT (BATISTA, 2003).

Como abordado na seção anterior, as tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas: explosões solares, HSSWSs e SDFs. É importante destacar que a fase inicial de uma tempestade possui característica diferente variando de acordo com o fenômeno solar que a ocasionou. A fase inicial possui um “início súbito”, como foi descrito anteriormente, quando a tempestade é ocasionada por uma explosão solar (principalmente) ou por um SDF (McNAMARA, 1991). Por outro lado, uma tempestade causada por uma HSSWS normalmente inicia com um “início gradual” (McNAMARA, 1991). Para exemplificar a diferença, a figura 2.17 ilustra como a componente horizontal do campo magnético da Terra varia durante duas típicas tempestades geomagnéticas ocasionadas por uma explosão solar e por um HSSWS. Sem levar em conta a unidade, a variação do índice Dst seguiria o mesmo padrão.

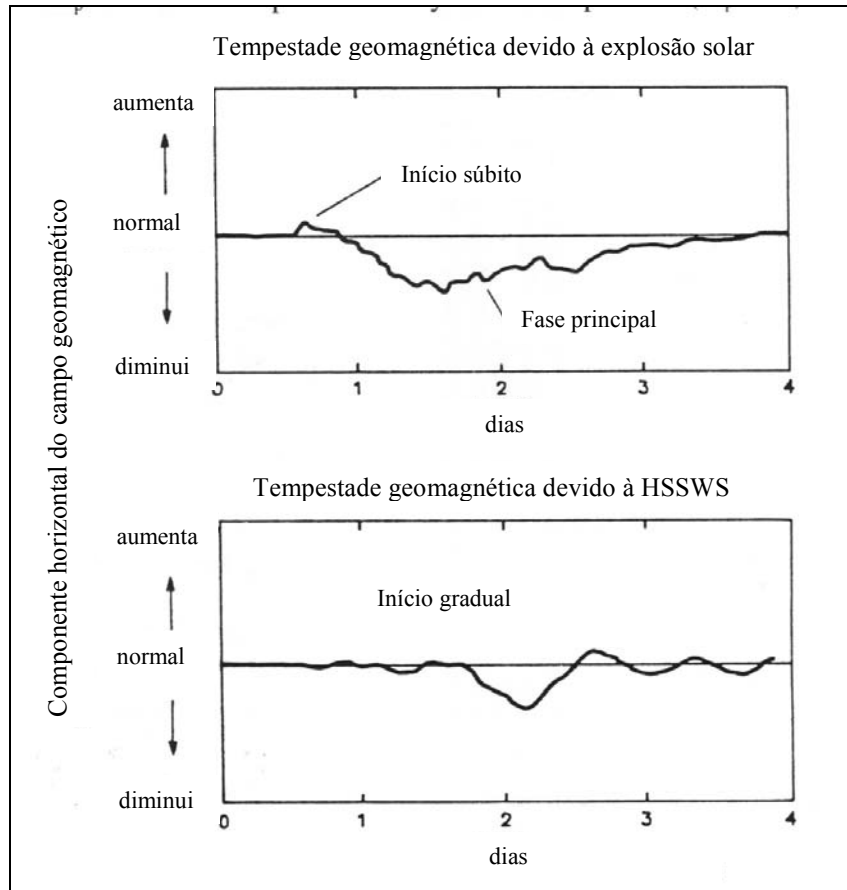


Figura 2.17 – Variação típica da componente horizontal do campo geomagnético para duas tempestades geomagnéticas devido à explosão solar e HSSWS.
Fonte: adaptada de McNamara (1991)

O estudo da atividade geomagnética na região auroral requer a utilização de um índice magnético que maximize a contribuição do eletrojato auroral. Neste caso, utiliza-se o índice AE, obtido a partir de medidas das variações da componente horizontal do campo geomagnético, coletadas em observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (YAMASHITA, 1999). Valores publicados do índice AE podem ser encontrados nos endereços eletrônicos: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/geomag1.html> e <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>.

2.4.3.3 Variação diária e sazonal dos distúrbios do campo geomagnético

A probabilidade de um dado evento solar (explosão, SDFs ou HSSWS) causar um efeito geomagnético/ionosférico depende da estação do ano e da Hora Universal (UT – *Universal Time*), bem como das próprias características do evento solar (McNAMARA, 1991). Como exemplo, relativo às estações do ano, a figura 2.18 mostra o número de dias geomagneticamente perturbados entre 1932 e 1983 no qual o índice magnético A_p foi maior do que 36, ou seja, são dias onde ocorreram tempestades geomagnéticas/ionosféricas de acordo com a classificação da tabela 2.3.

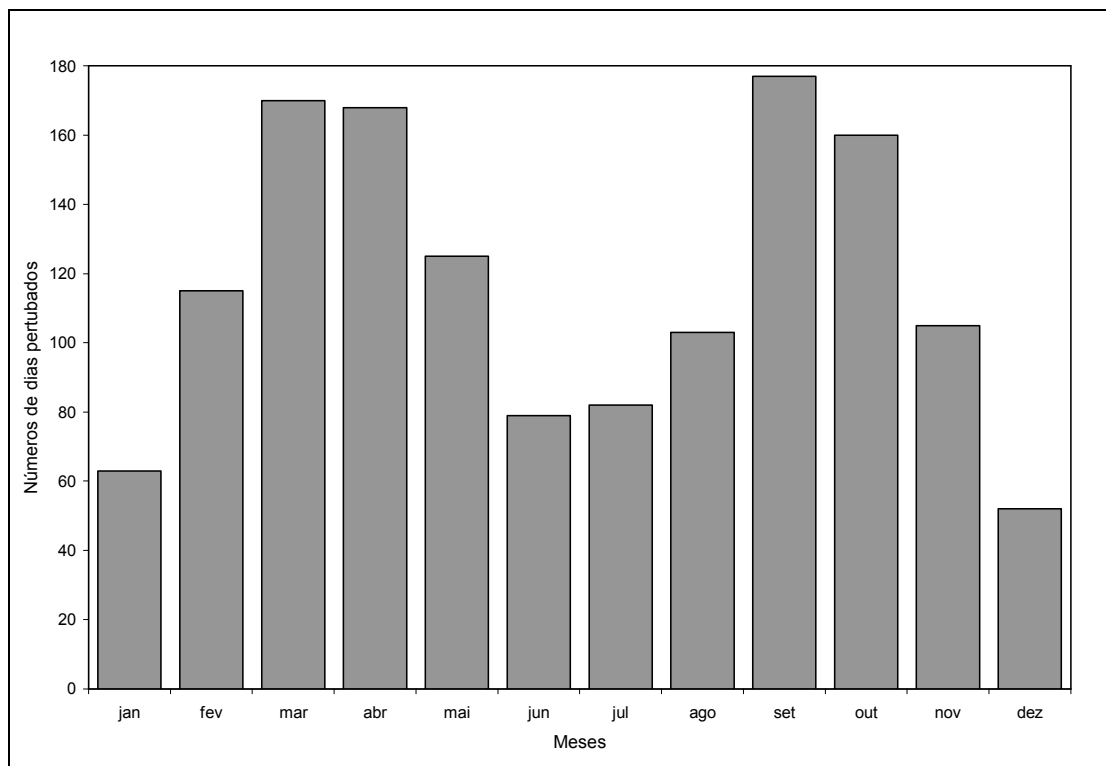


Figura 2.18 – Número de dias geomagneticamente perturbados (com $A_p \geq 36$) entre 1932 e 1983 em função dos meses do ano. Fonte: adaptada de McNamara (1991)

Pode-se verificar a partir da figura 2.18 que o número de dias perturbados é algo em torno de 2 vezes (ou até mais) maior nos meses de equinócio (março, abril, setembro, outubro) do que nos meses de solstício. Isto indica que o campo magnético da Terra é 2 vezes ou mais suscetível a se tornar perturbado por eventos solares durante os meses próximos aos

equinócios (McNAMARA, 1991). Este aumento da suscetibilidade é atribuído ao fato de que durante os equinócios a direção do eixo do campo magnético da Terra forma aproximadamente um ângulo reto com a direção do fluxo do vento solar (McNAMARA, 1991).

A rotação da Terra (e, portanto seu campo magnético) sobre o seu eixo também conduz a situações no qual o eixo do campo geomagnético está mais próximo a formar um ângulo reto com a direção do vento solar. Isto conduz a uma variação de suscetibilidade por um período de 24 horas (THOMPSON, 1985 apud McNAMARA, 1991), como ilustrada na figura 2.19. Note que como a hora considerada está em UT, não existe nenhuma particularidade se é dia ou noite. A probabilidade (suscetibilidade) de ocorrer dias geomagneticamente perturbados é alta durante as duas áreas “mais escuras em formato de S” da figura 2.19, e baixa durante as demais áreas, principalmente nos centros dessas áreas onde está escrito a palavra “Baixa” (McNAMARA, 1991).

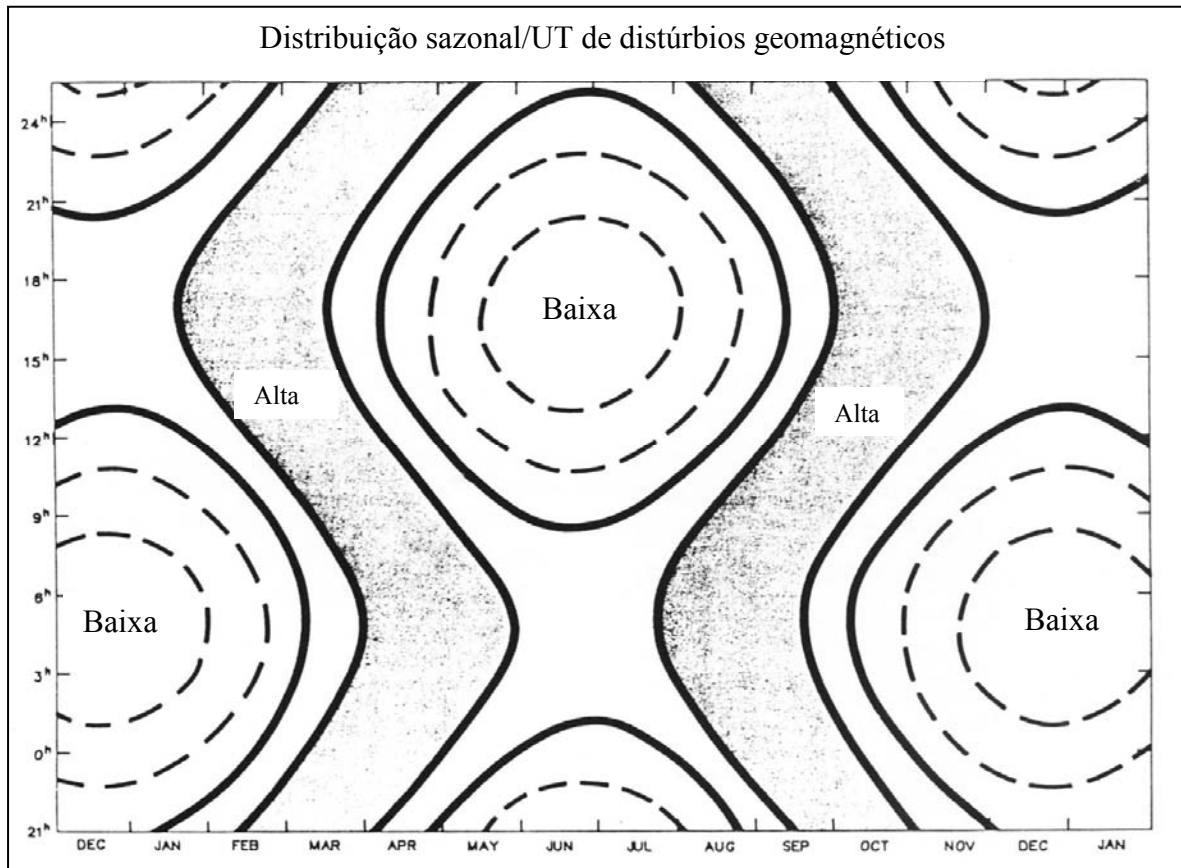


Figura 2.19 – A suscetibilidade do campo geomagnético tornar-se perturbado por eventos solares em função da hora universal (UT) e dos meses do ano. Fonte: adaptada de McNamara (1991)

Por exemplo, se uma nuvem de plasma atingir a Terra entre 15 e 18 horas UT em junho, haverá uma pequena chance do campo geomagnético tornar-se perturbado. Por outro lado, se a mesma nuvem de plasma atingir a Terra na mesma hora UT, mas em fevereiro ou março, haverá uma probabilidade muito maior do campo geomagnético tornar-se perturbado. Então, de uma forma geral, os efeitos geomagnéticos de uma dada explosão solar, HSSWS ou SDFs, serão maiores durante os equinócios do que no solstícios, com um comportamento similar para os efeitos ionosféricos (McNAMARA, 1991). Um corolário para esta afirmação, é que é bastante possível que uma explosão solar de baixa intensidade terá um efeito maior no campo geomagnético e na ionosfera do que uma explosão solar de alta

intensidade, desde que a explosão solar de baixa intensidade ocorra durante os equinócios e a de alta ocorra durante os solstícios (McNAMARA, 1991).

Para finalizar, vale ser comentado que as ocorrências de tempestades geomagnéticas mais intensas tendem a apresentar dois picos dentro do ciclo solar, sendo um deles um pouco anterior ou no período de máximo solar e o outro 2-3 anos após o máximo solar (GONZALEZ et al., 1999).

Informações a respeito das condições atuais da atividade solar e de predições de explosões solares e tempestades geomagnéticas podem ser obtidas, por exemplo, nos seguintes endereços eletrônicos: <http://www.spaceweather.com/> ou <http://www.sidc.be/index.php> .

Para finalizar, vale ser comentando que a NASA possui uma missão atual chamada de STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*) que tem como objetivo estudar e compreender melhor as causas e os mecanismos envolvidos nas explosões solares. Em 25 de outubro de 2006 a NASA lançou duas sondas espaciais para este fim. Para mais informações desta missão acessar <http://stereo.gsfc.nasa.gov/> .

2.4.4 Regiões geográficas da ionosfera

A estrutura global da ionosfera não é homogênea. As três maiores regiões geográficas ionosféricas são conhecidas como regiões de altas e médias latitudes e região equatorial. A figura 2.20 mostra a localização geográfica dessas regiões no globo terrestre. Ainda que a amplitude dessas regiões da ionosfera não possa ser estabelecida exatamente, quando projetadas na superfície terrestre, é conveniente indicar aproximadamente a localização destas regiões.

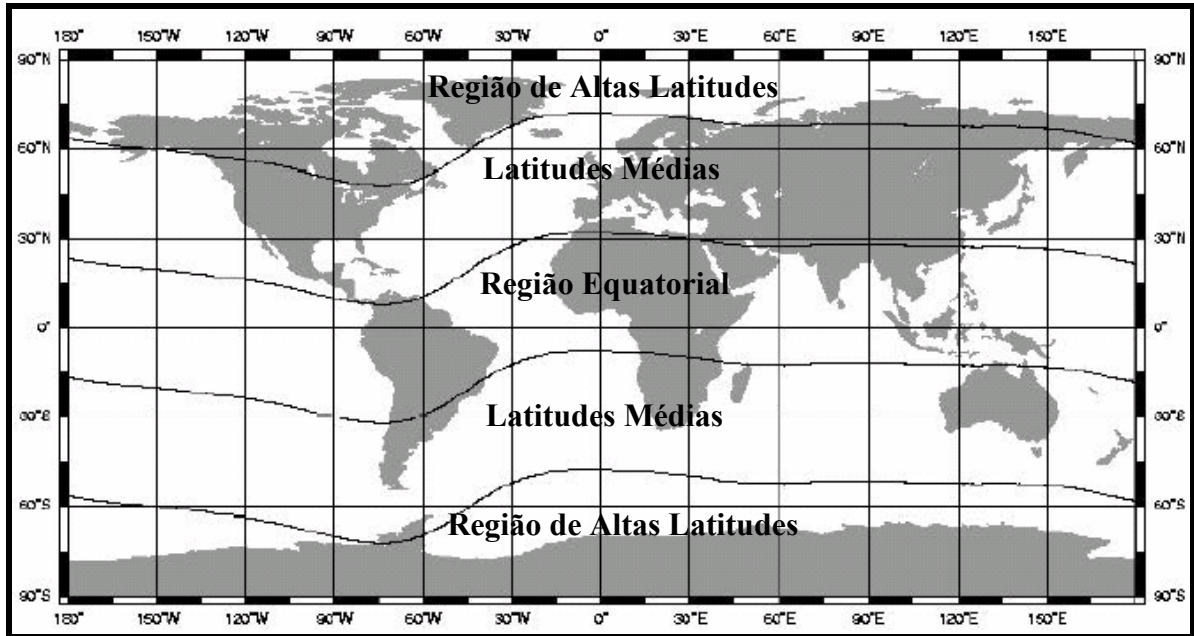


Figura 2.20 – Regiões geográficas da ionosfera
 Fonte: Adaptada de Fonseca Junior (2002)

A ionosfera sobre os pólos sul e norte, alternativamente denominadas de ionosfera polar ou de altas latitudes, é extremamente instável (McNAMARA, 1991). A região equatorial é caracterizada por um alto nível de densidade de elétrons, e vários fenômenos ocorrem nessa região. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas (WEBSTER, 1993).

2.4.4.1 Região de médias latitudes

A região de médias latitudes está localizada entre a região equatorial e de altas latitudes, e está compreendida, aproximadamente, entre as latitudes geográficas de 30°N a 50°N, e 30°S a 50°S. Nessa região, a ionosfera tem um comportamento menos variável do que em outras regiões. É a ionosfera com variação mais regular, normalmente livre de irregularidades e que mais se aproxima dos modelos ionosféricos clássicos (RODRIGUES, 2003), e, portanto, as informações quantitativas fornecidas sobre a ionosfera na literatura, como por exemplo, o perfil vertical da densidade de elétrons, normalmente é referido à região

de médias latitudes. No entanto, severas tempestades geomagnéticas podem implicar em grandes impactos nos sinais GPS nesta região, onde irregularidades na densidade de elétrons podem se estender da região equatorial e de altas latitudes para a região de médias latitudes (FOSTER et al., 2001). Efeitos da cintilação ionosférica algumas vezes também podem ser detectados na região de médias latitudes, embora seus efeitos ocorram com maior frequência nas regiões equatorial e de altas latitudes (WARNANT, 1997).

2.4.4.2 Região de altas latitudes

As regiões de altas latitudes, que estão próximas às regiões polares norte e sul, são sem dúvida as piores regiões no que diz respeito às comunicações HF. Isto se deve ao fato dessas regiões serem muito variáveis espacialmente e temporalmente (McNAMARA, 1991). As regiões de altas latitudes incluem as regiões da capa polar, auroral e sub-regiões aurorais (EL GIZAWY, 2003).

A região da capa polar localiza-se acima das latitudes geomagnéticas de 75°. Nestes locais, as linhas do campo geomagnético são abertas, permitindo que o fluxo de plasma proveniente do vento solar penetre diretamente na região da capa polar, no qual resulta em grandes regiões (com tamanho horizontal entre 5-1000 km) onde a densidade de elétrons é aumentada (HARGREAVES, 1992 apud EL GIZAWY, 2003). Dentro dessas grandes regiões, há irregularidades de pequena escala que causam cintilações, com tamanhos de poucos metros até 1 km. O aumento na densidade de elétrons na região da capa polar está concentrado na região F, nas altitudes de 250 a 400 km (EL GIZAWY, 2003).

A região auroral é relativamente pequena em extensão latitudinal, estando localizada entre as latitudes geomagnéticas de 60° e 75° (no lado noturno) (SKONE, 1998). Esta região é conhecida como oval auroral (FELDSTEIN E STARKOV, 1967 apud SKONE, 1998) e é apresentada na figura 2.21. A largura do oval auroral pode-se expandir no lado

noturno, durante períodos de tempestades geomagnéticas. A região auroral abrange o Canadá, Alaska, Norte da Europa e algumas partes da Rússia (SKONE, 1998).

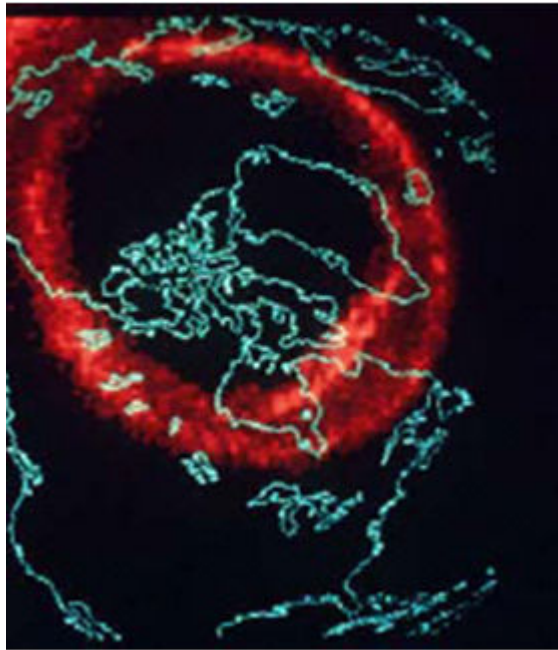


Figura 2.21 – Imagem UV do oval auroral sobre a América do Norte
Fonte: El Gizawy (2003)

Durante períodos geomagneticamente perturbados, a região auroral é caracterizada pela presença de auroras (SKONE, 1998). A interação entre partículas energéticas carregadas que fluem do Sol (vento solar) e o campo geomagnético produz uma aceleração de elétrons na região próxima à Terra. Elétrons energéticos precipitam na direção de altas latitudes, ao longo das linhas de campo geomagnético. Os elétrons enérgicos desta interação resultam em emissões óticas conhecidas como auroras (EL GIZAWY, 2003). Como exemplo, imagens de auroras podem ser vistas no seguinte endereço eletrônico: <http://home.online.no/~arnedani/astronomy/astrophoto/aurora/>.

Durante períodos de sub-tempestades geomagnéticas, o oval auroral pode se expandir por vários graus de latitude em direção ao equador (EL GIZAWY, 2003). Nesses períodos, a precipitação irregular de elétrons e a presença de correntes elétricas localizadas resultam em regiões com aumento na densidade de elétrons localizados na altitude de 110 km

(região E), aproximadamente. Neste sentido, cintilações também são observadas durante eventos de sub-tempestades geomagnéticas na região auroral (EL GIZAWY, 2003). Isto pode dificultar a resolução da ambigüidade para posicionamento preciso e aplicações em redes regionais. Uma significativa degradação na acurácia do posicionamento relativo e DGPS, bem como no desempenho do rastreamento de receptores GPS têm sido observadas durante eventos de sub-tempestades geomagnéticas na região auroral (SKONE, 2000).

Vale salientar que a ocorrência de cintilação auroral está fortemente correlacionada com eventos de sub-tempestades geomagnéticas, enquanto que, a ocorrência de cintilação equatorial, está associada com a ocorrência de irregularidades na ionosfera (EL GIZAWY, 2003).

A sub-região auroral está localizada alguns graus (em direção ao equador) da região auroral. A densidade de elétrons nesta região é bem menor do que na região auroral, o que resulta em altos gradientes do TEC na região de divisa entre a região auroral e sub-região auroral (EL GIZAWY, 2003). Desta forma, tem sido observada uma significativa degradação na acurácia do posicionamento relativo e DGPS nesta região, devido às grandes diferenças dos erros devido à ionosfera entre as estações GPS, ou seja, aos altos gradientes do TEC (EL GIZAWY, 2003). Esta região de divisa está localizada na latitude geomagnética de 60°-65°, aproximadamente, e está presente somente no lado noturno (SKONE, 1998).

2.4.4.3 Região equatorial e de baixas latitudes

A região equatorial está compreendida entre as latitudes geomagnéticas de 30°N e 30°S, aproximadamente. No entanto, segundo Batista (2003), a delimitação da região equatorial que comparece em muitos trabalhos científicos é muito abrangente. Na verdade, esta região pode ainda ser subdividida em duas regiões: a região equatorial propriamente dita,

que se limita a uma área compreendida, aproximadamente, entre as latitudes geomagnéticas de 5°N e 5°S, e a região de baixas latitudes, que se limita a duas áreas que abrangem, aproximadamente, o intervalo entre as latitudes geomagnéticas de 5°N e 30°N, e 5°S e 30°S.

A atividade da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é altamente correlacionada com a hora local, normalmente iniciando seu desenvolvimento por volta das 6-7 horas local, e alcançando sua atividade máxima as 14-15 horas local, possuindo os maiores valores de TEC do globo terrestre. Um segundo máximo na atividade é esperado ocorrer por volta das 21 horas local na região de baixas latitudes, com altos gradientes do TEC na direção norte-sul (WANNINGER, 1993). Também, na região equatorial e de baixas latitudes estão presentes efeitos significativos da cintilação ionosférica, degradando o desempenho de rastreamento dos receptores GPS. O efeito da cintilação ionosférica na região equatorial e de baixas latitudes é maior do que na região de altas latitudes (EL GIZAWY, 2003).

O principal fenômeno da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é a anomalia equatorial ou de Appleton (APPLETON, 1946).

2.4.4.3.1 Anomalia equatorial ou de Appleton

Antes de descrever a anomalia equatorial, torna-se necessário definir o efeito fonte, pois este dá origem a anomalia equatorial. Devido à alta radiação solar na região equatorial e aos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre sensíveis conseqüências, sendo uma delas denominada de efeito fonte, cuja origem é motivada pela movimentação dos elétrons ao longo das linhas de força horizontais do campo geomagnético para longe do equador.

Os campos elétricos do dínamo atmosférico que são gerados na região E são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a região F, devido à alta condutividade paralela (BATISTA, 2003). Durante o dia o campo elétrico (E) é direcionado

para leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético (B) que é dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por $E \times B / B^2$ (BATISTA, 2003). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético. Este movimento ocorre devido à ação da gravidade (\vec{g}) e gradiente de pressão (∇p). Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (RODRIGUES, 2003). Este nome foi dado devido à similaridade com o movimento de uma fonte (chafariz) de água. Um esquema das forças agindo no plasma é mostrado na figura 2.22.

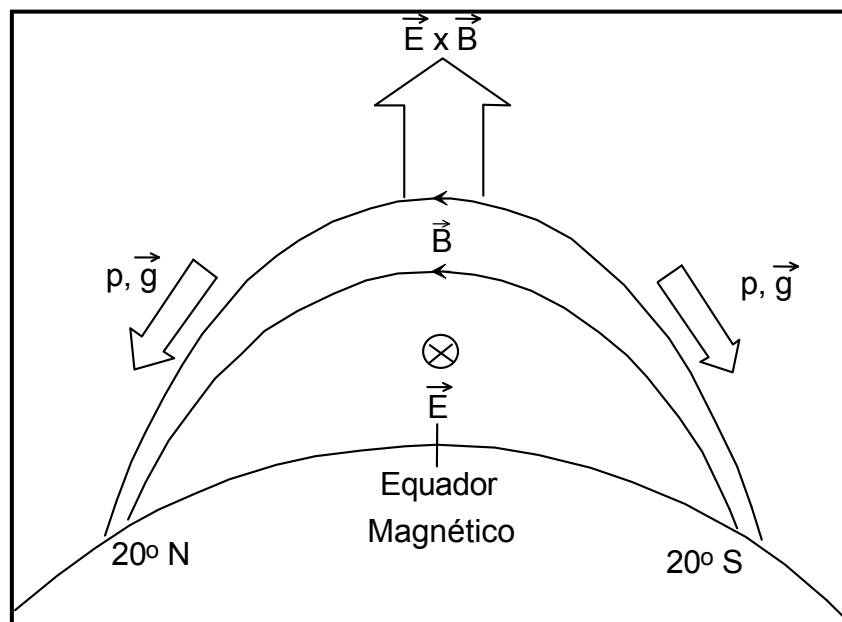


Figura 2.22 – Esquema das forças agindo no plasma - efeito fonte
Fonte: Kelley (1989) apud Rodrigues (2003)

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10° e 20° de latitude geomagnética. No equador geomagnético a ionização fica menos intensa (BATISTA, 2003),

resultando em gradientes de TEC na direção norte-sul. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial ou anomalia de Appleton (APPLETON, 1946). Como resultado para o posicionamento com GPS é que altos valores de TEC estão presentes nas regiões de baixas latitudes, e altos gradientes de TEC podem ocorrer na direção norte-sul, afetando a qualidade tanto do posicionamento por ponto quanto do relativo e DGPS.

Nas faixas da anomalia equatorial que se localizam no território brasileiro as densidades de elétrons atingem valores maiores que em outras regiões da Terra (SOBRAL, 1999). A maior densidade de elétrons desta anomalia, conforme já mencionado, ocorre nas regiões entre as latitudes geomagnéticas de 10° a 20° N e S, causando alta concentração de elétrons nos dois lados do equador geomagnético. Dentro dessas regiões, os valores máximos do TEC ocorrem, aproximadamente, nas latitudes de 15° N e S em relação ao equador geomagnético, que correspondem aos locais aproximados das cristas da anomalia equatorial (FEDRIZZI, 2003).

A figura 2.23, com o objetivo de mostrar a anomalia equatorial, mostra uma seqüência de mapas globais do TEC, produzidos pelo CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*), para o dia 08 de março de 2004, com resolução de 2 horas UT.

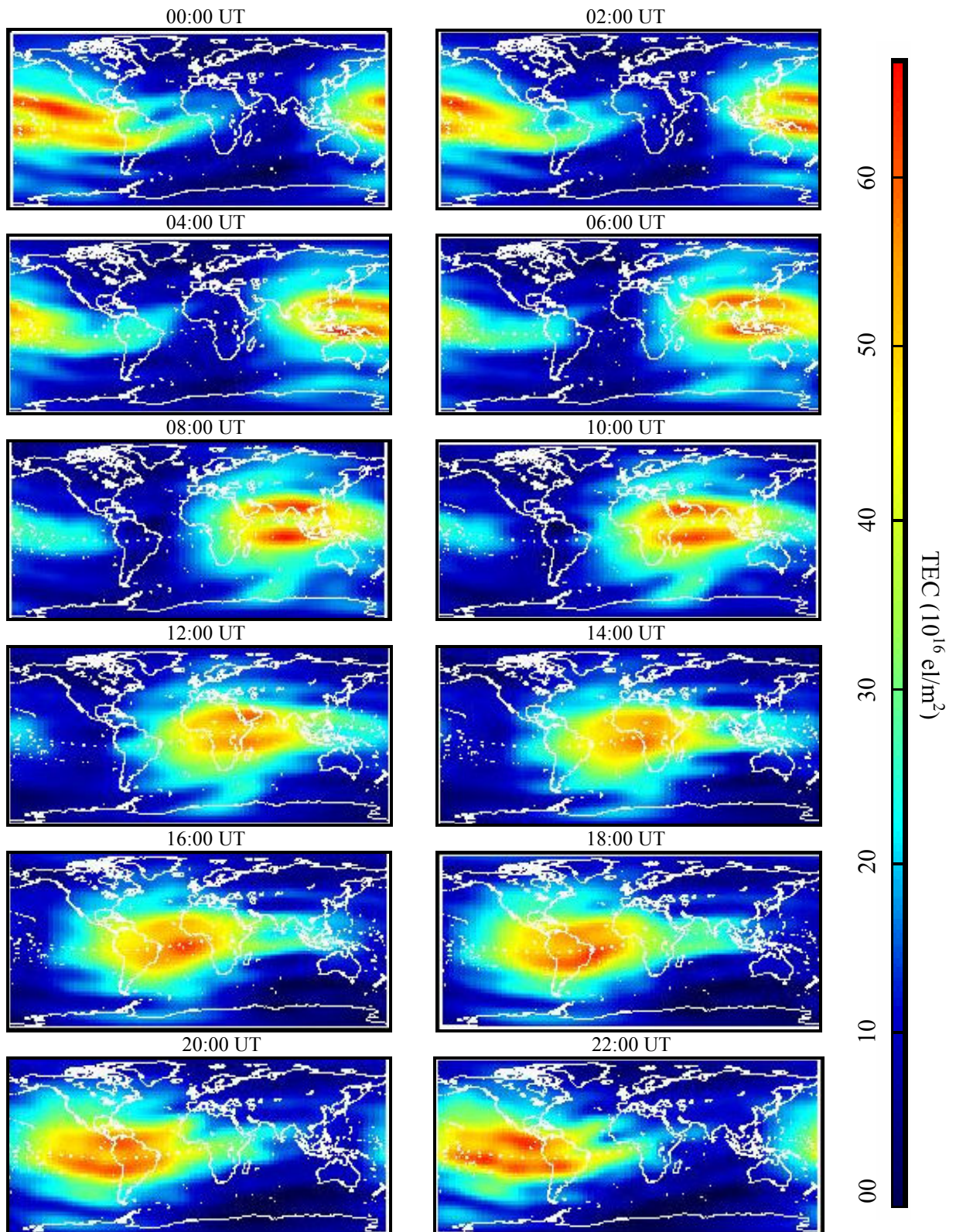


Figura 2.23 – Mapas Globais do TEC para o dia 08/03/2004
Fonte: adaptada de <http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere/gim0.jpg>

Pode-se notar, a partir dos mapas, uma maior concentração de elétrons na área vermelha dos mapas, contornando o equador geomagnético. Esta maior concentração do TEC nestas regiões caracteriza a anomalia equatorial.

A anomalia equatorial varia ao longo do dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta das 14 horas local, e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia noite, normalmente próximo das 21 horas local. Este segundo máximo, em geral, não ocorre durante períodos de baixa atividade solar (BATISTA, 2003). Este comportamento da anomalia equatorial é um reflexo da variação do campo elétrico zonal e da deriva vertical do plasma produzida por ele. Como já citado, durante o dia, na região equatorial, o campo elétrico para leste na presença de um campo geomagnético para norte provoca uma deriva para cima, elevando o plasma e produzindo o efeito fonte. A deriva vertical passa por um máximo antes do meio dia local, continuando positiva (para cima) até pouco antes do entardecer. À noite o campo elétrico é dirigido para oeste e, conseqüentemente, a deriva se inverte para baixo (negativa), cessando o efeito fonte (BATISTA, 2003). Porém, antes da deriva se inverter, nos horários próximos ao pôr do Sol, a deriva vertical se intensifica devido ao desenvolvimento de campos elétricos do dínamo da região F, provocando assim uma intensificação do efeito fonte e da anomalia equatorial, gerando o segundo pico na densidade de elétrons nas regiões das cristas da anomalia. Este comportamento da deriva vertical equatorial do plasma ionosférico pode ser verificada na figura 2.24, que mostra a variação média da deriva vertical medida com o radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, no Peru, durante várias estações do ano, para condições geomagnéticas calmas e durante anos de atividade solar alta e baixa¹.

¹ Entenda-se por alta atividade solar períodos com máxima ocorrência de manchas solares e, baixa, o contrário.

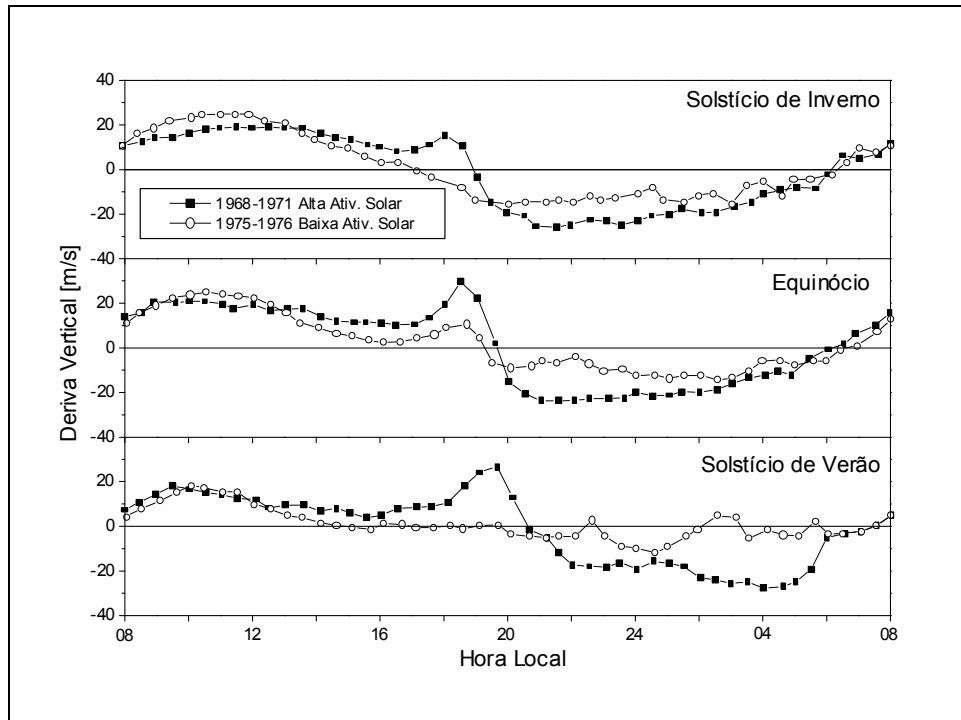


Figura 2.24 - Variação sazonal da deriva vertical do plasma ionosférico medida em Jicamarca (derivadas positivas para cima) durante períodos de alta (1968-1971) e baixa (1975-1976) atividade solar. Fonte: adaptada de Fejer et al. (1979).

O pico que ocorre na deriva vertical próximo ao pôr do Sol, conhecido como pico pré-inversão, é fortemente dependente da atividade solar (BATISTA, 2003). Pode-se verificar na figura 2.24, referente ao estudo feito em Jicamarca no Peru, que durante períodos de atividade solar máxima o pico ocorre em todas as estações do ano, sendo maior no equinócio e menor no solstício de inverno. Já durante atividade solar baixa o pico pré-inversão só ocorre no equinócio, ainda tendo amplitude menor do que para alta atividade solar (FEJER et al., 1979). É importante salientar, que estudos realizados na região brasileira mostraram que o pico pré-inversão é um pouco maior nos meses próximos ao solstício de verão do que nos de equinócios, e menor nos próximos ao solstício de inverno (BATISTA et al., 1996).

2.5 Algumas Técnicas de Observação da Ionosfera

2.5.1 Ionossonda/Digissonda

A ionossonda é o instrumento mais antigo e ainda amplamente usado para a medida de parâmetros ionosféricos (LIU, 2004). Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética de frequência variável, em seqüência, tipicamente de 1 a 25 MHz (KIRCHHOFF, 1991). Os sinais emitidos nas diversas frequências, normalmente na vertical, são refletidos pela ionosfera e em função do tempo decorrido entre transmissão e recepção, obtém-se as chamadas curvas de alturas “virtuais” da ionosfera em função da frequência, que são chamados de ionogramas (KIRCHHOFF, 1991). As alturas de reflexão dos sinais em função da frequência registradas nos ionogramas são ditas “virtuais”, pois não correspondem às alturas reais em que os sinais foram refletidos. Isto porque as alturas virtuais são obtidas adotando-se a velocidade de propagação dos sinais emitidos igual à velocidade da luz no vácuo. Porém, sabe-se que na ionosfera a velocidade de grupo é menor do que a velocidade da luz no vácuo, devido à presença de elétrons livres. Desta forma, as alturas obtidas nos ionogramas são um pouco maiores do que as alturas reais de reflexão (LIU, 2004).

Um grande número de informações pode ser obtido da análise de um ionograma, sendo essas informações conhecidas como parâmetros ionosféricos (YAMASHITA, 1999). Dentre os parâmetros ionosféricos obtidos está a frequência crítica da camada F2 (foF2), do qual se obtém a densidade máxima de elétrons da mesma (NmF2). Dos ionogramas também são obtidos perfis de densidade de elétrons.

Ionossondas digitais são denominadas de digissondas, e são dotadas de mais capacitação diagnóstica da ionosfera devido à tecnologia mais desenvolvida (YAMASHITA, 1999). A digissonda trata-se de um instrumento mais moderno e sofisticado que a ionossonda

e mede, além do perfil de densidade de elétrons, também as velocidades de deriva do plasma ionosférico (YAMASHITA, 1999).

No Brasil, o INPE opera 3 digissondas (em São Luiz, Fortaleza e Cachoeira Paulista) e 1 ionossonda (em Cachimbo), e a UNIVAP opera 3 ionossondas (em Manaus, Palmas e São José dos Campos).

Para um maior aprofundamento sobre ionossondas e as formulações e relações matemáticas envolvidas para a obtenção de parâmetros ionosféricos, pode-se consultar, por exemplo, Davies (1990), McNamara (1991) e Kirchhoff (1991).

2.5.2 Radar de espalhamento incoerente

Como o próprio nome diz, o radar de espalhamento incoerente baseia-se na capacidade dos elétrons provocarem espalhamento nas ondas eletromagnéticas. O espalhamento de ondas eletromagnéticas por elétrons foi descoberto por Thompson (1906) apud Davies (1990). Gordon (1958) apud Davies (1990) previu que o mesmo princípio poderia ser aplicado à sondagem ionosférica. Enviando-se pulsos eletromagnéticos com frequência bem maior que foF2 haveria espalhamento detectável. Gordon supôs que os elétrons estariam em movimento termal aleatório do mesmo tipo do executado pelas partículas neutras, então o radar detectaria espalhamento de elétrons individuais, com fase aleatória (ou incoerente). Os ecos desses pulsos trariam informações de parâmetros geofísicos tanto da parte inferior como da superior da ionosfera. Após alguns experimentos, foi detectado que o espectro espalhado consiste de duas partes, uma devido aos íons e outra, aos elétrons (BERTONI, 1998).

Os elétrons são capazes de espalhar energia radiante com uma seção de espalhamento da ordem de 10^{-24} cm² (KIRCHHOFF, 1991). Devido ao valor diminuto da seção transversal de espalhamento, o equipamento necessário para se estudar o plasma deve

ser de alta potência. Os radares de espalhamento incoerente possuem, portanto transmissores potentes e receptores sensíveis aliados a antenas de alto ganho (KIRCHHOFF, 1991).

Vários parâmetros ionosféricos podem ser determinados simultaneamente por esta técnica, entre os quais a densidade de elétrons, temperatura de íons e elétrons e a velocidade de deriva dos íons (KIRCHHOFF, 1991). Um detalhamento da técnica com os princípios e formulações matemáticas pode ser encontrado, por exemplo, em Davies (1990).

2.5.3 Receptores GPS de dupla frequência

Aproveitando-se da propriedade dispersiva da ionosfera, os sinais GPS operando em duas frequências diferentes podem ser usados para determinar a integral da densidade de elétrons, ou seja, o TEC. O TEC pode ser obtido por uma combinação linear baseado na diferença entre as observações de pseudodistância ou fase obtidas de ambas as frequências (L_1 e L_2).

Atualmente, um número cada vez mais crescente de redes GPS equipadas com receptores de dupla frequência de escala local, regional e global têm sido implantadas. Muitas dessas redes têm seus dados disponibilizados publicamente (acesso livre) na internet e via ftp, como por exemplo, a rede global IGS (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov.br>) e a brasileira RBMC (<http://www.ibge.gov.br>). A acessibilidade e disponibilidade das observações provenientes de redes GPS constitui uma base de dados sólida para a derivação de conjuntos de dados de TEC em âmbito local, regional e global (LIU, 2004). Como exemplo, atualmente no Brasil, pode-se obter informações do TEC utilizando-se os dados GPS de 24 receptores pertencentes à RBMC.

Existem regiões em que o número de receptores GPS disponíveis é relativamente bastante elevado, propiciando ainda mais vantagens para o estudo da ionosfera com GPS. Por exemplo, Skone et al. (2004) usou dados de 400 receptores GPS para produzir

mapas do TEC para uma região que abrange os Estados Unidos e Canadá. Skone et al. (2004) enfatiza ainda que os receptores utilizados pertencem a rede IGS e CORS (*Continuously Operating Reference Stations – USA*), e que, assim como a rede IGS, a CORS também disponibiliza seus dados na internet com acesso público no endereço: <http://sopac.ucsd.edu>. No referido endereço eletrônico são disponibilizados dados GPS de várias redes de todo o mundo com acesso livre.

Uma descrição detalhada para obtenção do TEC usando receptores GPS de dupla frequência é apresentada no capítulo 5.

2.6 O Modelo Ionosférico IRI (*International Reference Ionosphere*)

O *International Reference Ionosphere* (IRI) é um projeto internacional patrocinado pelo *Committee on Space Research* (COSPAR) e pela *International Union of Radio Science* (URSI). Essas organizações formaram um grupo de trabalho nos anos 60, composto por membros de várias nações, para produzir um modelo empírico padrão da ionosfera, baseado em todas as fontes de dados disponíveis. O modelo é frequentemente atualizado e disponibilizado aos usuários (KOMJATHY, 1997).

O IRI fornece dentre vários parâmetros, a densidade de elétrons, temperatura de elétrons e íons, a composição iônica (O^+ , H^+ , He^+ , O_2^+ , NO^+) no intervalo de altura entre 50 e 2000 km, bem como também fornece valores do TEC. As principais fontes de dados são a rede mundial de ionossondas, os radares de espalhamento incoerente, os dados de sondadores da parte superior da ionosfera e as medidas *in situ* feitas por instrumentos a bordo de vários satélites e foguetes (KOMJATHY, 1997). O IRI é atualizado anualmente durante *workshops*. Mais informações do modelo podem ser encontradas em relatórios dos *workshops* (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri/iri_workshops.html), e em relatórios informativos, que são publicados trimestralmente.

Para a utilização do modelo *on line* basta acessar o seguinte endereço: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html>. Um programa computacional do modelo IRI para uso em ambiente *Windows* pode ser obtido em <http://umlcar.uml.edu/IRI-2001/>.

3 EFEITOS DA IONOSFERA NO GPS

Um dos parâmetros mais importantes e que caracteriza a camada da ionosfera é o seu 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 GPS (EL GIZAWY, 2003).

3.1 Índice de Refração da Ionosfera

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 GPS são o atraso de grupo na modulação e o avanço na fase da onda portadora.

O índice de refração da fase (n_f) na ionosfera pode ser expressa pela complexa fórmula de Appleton-Hartree (DAVIES, 1990):

$$n_f^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}}, \quad (3.1)$$

onde:

$$X = n_e e^2 / \varepsilon_0 m \omega^2 = f_n^2 / f^2 ;$$

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

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

$$Z = \nu / \omega ;$$

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

f - frequência da onda;

f_H - girofrequência;

f_n - frequência de plasma;

n_e - densidade de elétrons (el/m^3);

e - carga do elétron = $-1,602 \times 10^{-19}$ Coloumb;

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

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

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

ν - frequência de colisão; e

B - Campo geomagnético;

A equação (3.1) pode ser simplificada levando-se em conta somente o efeito de primeira ordem da ionosfera. Considerando que a girofrequência (f_H) tem um valor típico de 1,5 MHz e a frequência de colisão (ν) é da ordem de 10^4 Hz (KLOBUCHAR, 1996), e portanto possuem valores muito menores do que as frequências dos sinais GPS (ou seja, $f \gg f_H$ e ν), os termos Y_T , Y_L e Z da equação (3.1) podem ser ignorados (FEDRIZZI, 2003). Neste sentido, o índice de refração da fase (n_f) pode ser aproximado por:

$$n_f = \sqrt{1 - X} . \quad (3.2)$$

Como visto anteriormente, o termo X pode ser reescrito na forma, $X = n_e e^2 / \epsilon_0 m \omega^2 = f_n^2 / f^2$. Considerando que a frequência de plasma na ionosfera raramente excede 20 MHz (KLOBUCHAR, 1996) e, portanto, $f \gg f_n$, é possível efetuar a seguinte expansão em série binomial (FEDRIZZI, 2003):

$$n_f = \sqrt{1-X} = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{n_e e^2}{2\varepsilon_0 m \omega^2} = 1 - \frac{n_e e^2}{2\varepsilon_0 m (2\pi)^2 f^2}. \quad (3.3)$$

Pela substituição dos valores das constantes “e”, “m” e “ ε_0 ” na equação (3.3), o índice de refração da fase pode ser aproximado por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2}. \quad (3.4)$$

Desta forma, pela equação (3.4), pode-se observar que o índice de refração da fase depende principalmente da densidade de elétrons (n_e) e da frequência (f) da onda eletromagnética.

Uma expressão correspondente para o índice de refração de grupo (n_g) pode ser derivada a partir da equação de Rayleigh modificada (DAVIES, 1990; LEICK, 1995):

$$\begin{aligned} n_g &= n_f + f \frac{dn_f}{df} = \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) + \left(\frac{80,6 f n_e}{f^3}\right) \\ n_g &= 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pelas equações (3.4) e (3.5) pode-se notar que o índice de refração do grupo é sempre maior que o índice de refração da fase. Isto faz com que, na propagação dos sinais GPS, ocorra uma redução na velocidade de grupo e um avanço na da fase, provocando um aumento nas distâncias medidas a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade, respectivamente.

3.2 Erro devido à Ionosfera nos Sinais GPS

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

$$S = \int_r^s n \, ds, \quad (3.6)$$

onde n representa, de forma genérica, o índice de refração da fase ou do 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 é obtida quando o índice de refração (n) é unitário, logo:

$$\rho = \int_r^s ds \quad (3.7)$$

A diferença entre a distância medida (S), com a influência da ionosfera, e a distância geométrica (ρ), entre o satélite e a antena receptora, resulta no erro devido à ionosfera (I_r^s), que é dado por:

$$I_r^s = \int_r^s n \, ds - \int_r^s ds. \quad (3.8)$$

Substituindo os índices de refração da fase (3.4) e do grupo (3.5) na equação (3.8), obtém-se o erro devido à ionosfera para a distância medida pela fase da portadora ($I_{f_r}^s$) e pelo código ($I_{g_r}^s$), respectivamente. Desta forma, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_{f_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (3.9)$$

ou

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (3.10)$$

e, para o código, tem-se que:

$$I_{g_r}^s = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (3.11)$$

ou

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (3.12)$$

onde a parcela variável $\left(\int_r^s n_e ds\right)$ caracteriza a quantidade de elétrons ao longo do caminho do sinal, entre o satélite e a antena receptora em uma coluna de 1 m^2 , que por sua vez representa o conteúdo total de elétrons (TEC), ou seja (LEICK, 1995):

$$\text{TEC} = \int_r^s n_e ds. \quad (3.13)$$

Substituindo a equação (3.13) nas equações (3.10) e (3.12), obtém-se o erro devido à ionosfera na distância medida pela fase da portadora e pelo código, em função do TEC e da frequência:

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (3.14)$$

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (3.15)$$

O TEC é dado em elétrons por metro quadrado (el/m^2), a frequência em Hertz (Hz) e a constante 40,3 é dada em $\text{Hz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}\text{m}$, resultando no erro devido à ionosfera ($I_{f_r}^s$ e $I_{g_r}^s$) expresso em metros (m). O erro devido à ionosfera relacionado com o código ($I_{g_r}^s$) é usualmente denominado de atraso ionosférico ou atraso de grupo. De acordo com as equações (3.14) e (3.15), percebe-se que o erro devido à ionosfera, seja ele incidente sobre a fase da portadora ou para o código, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera e quanto maior o valor de TEC maior será o erro devido à ionosfera. Na tabela 3.1 tem-se uma estimativa do erro devido à ionosfera para diferentes frequências e indica o erro residual na direção vertical para a combinação linear *ion-free* entre duas frequências (SEEBER, 2003).

Tabela 3.1 - Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinações lineares entre duas frequências.

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

Fonte: Seeber (2003).

Devido à aproximação efetuada no índice de refração, a correção do erro devido à ionosfera, calculada pelas expressões (3.14) e (3.15), representa somente o efeito de 1º ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. O erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 2003). Kedar et al. (2003) concluíram a partir de seus experimentos que a contribuição do erro de 2º ordem da ionosfera no posicionamento foi sub-centimétrico.

A tabela 3.2 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as medidas de distâncias advindas das portadoras L_1 , L_2 e para a combinação linear *ion-free* (L_0), considerando os efeitos de 1º, 2º e 3º ordem da ionosfera (SEEBER, 2003). Para direções inclinadas, ou seja, para medidas advindas de satélites deslocando-se do zênite para o horizonte, o erro devido à ionosfera aumentará em até 3 vezes, aproximadamente.

Tabela 3.2 – Máximo erro devido à ionosfera que pode ser esperado para medidas de distâncias na direção vertical.

| Frequência | 1ª ordem | 2ª ordem | 3ª ordem |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L_1 | 32,5 m | 0,036 m | 0,002 m |
| L_2 | 53,5 m | 0,076 m | 0,007 m |
| L_0 | 0,0 m | 0,026 m | 0,006 m |

Fonte: Seeber (2003).

Considerando as estimativas presentes na tabela 3.2, pode-se verificar que a soma dos erros devido à ionosfera de 2º e 3º ordem representa apenas 0,12% e 0,15% do erro de 1º ordem para L_1 e L_2 , respectivamente, e para combinação linear L_0 o erro remanescente representa 3,2 cm.

Para finalizar, vale ser comentado que, segundo Klobuchar (1996), as camadas da ionosfera, por apresentarem diferentes densidades de elétrons e propriedades,

contribuem de forma diferente no total do erro devido à ionosfera. A camada D tem seus efeitos na maioria das vezes negligenciados para as frequências do GPS. A camada E somada com a F1 contribuem com aproximadamente 10% do erro total devido à ionosfera. A camada F2 por ser mais densa e por ser altamente variável é a que causa a maior parte dos efeitos na propagação dos sinais GPS (KLOBUCHAR, 1996). É importante salientar que os sinais GPS também são afetados pela densidade de elétrons contida na região acima da ionosfera, conhecida por plasmasfera. O conteúdo de elétrons da plasmasfera pode variar entre 10% do valor do conteúdo de elétrons da ionosfera existente durante o dia, quando a densidade da região F2 é alta, até aproximadamente 50% durante o período noturno, quando a densidade da região F2 é reduzida (KLOBUCHAR, 1996).

3.3 Cintilação Ionosférica

Irregularidades na ionosfera da Terra podem produzir variações de curtos períodos nos sinais trans-ionosféricos, provocadas por rápidas flutuações na fase e amplitude, devidas aos efeitos da difração e refração, que causam um enfraquecimento e variações da fase no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra, em muitos casos, a perda do sinal. Essas rápidas flutuações em fase e amplitude do sinal são chamadas de cintilações (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 *et al.*, 1946 apud RODRIGUES, 2003). 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).

A partir de 1970, aumentou o número de estudos sobre cintilação usando ionogramas e satélites. Foram projetados receptores para monitorar o nível de cintilação. Um

desses equipamentos, designado de Monitor de Cintilação Ionosférica (*Ionospheric Scintillation Monitor – ISM*), consiste de um receptor GPS de uma frequência (L_1), que foi projetado para monitorar os níveis de cintilação em tempo real (NICHOLS et al., 1999). Um outro exemplo é o receptor GSV4004 que tem sido utilizado para o estudo da cintilação ionosférica no norte da Europa (ex: DODSON et al., 2001; AQUINO et al., 2003). A cintilação ionosférica tem sido um tema de estudo de grande interesse científico, tanto a nível nacional como internacional, tratando-se de um assunto bastante complexo.

Rodrigues (2003) também define as cintilações ionosféricas como sendo flutuações da amplitude e/ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons e, conseqüentemente, do índice de refração. Normalmente, essas irregularidades que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altitude (DAVIES, 1990).

Períodos de cintilação estão associados, geralmente, com a existência de regiões de irregularidades de pequena escala na densidade de elétrons na camada ionosférica, como ilustrado na figura 3.1 (EL GIZAWY, 2003).

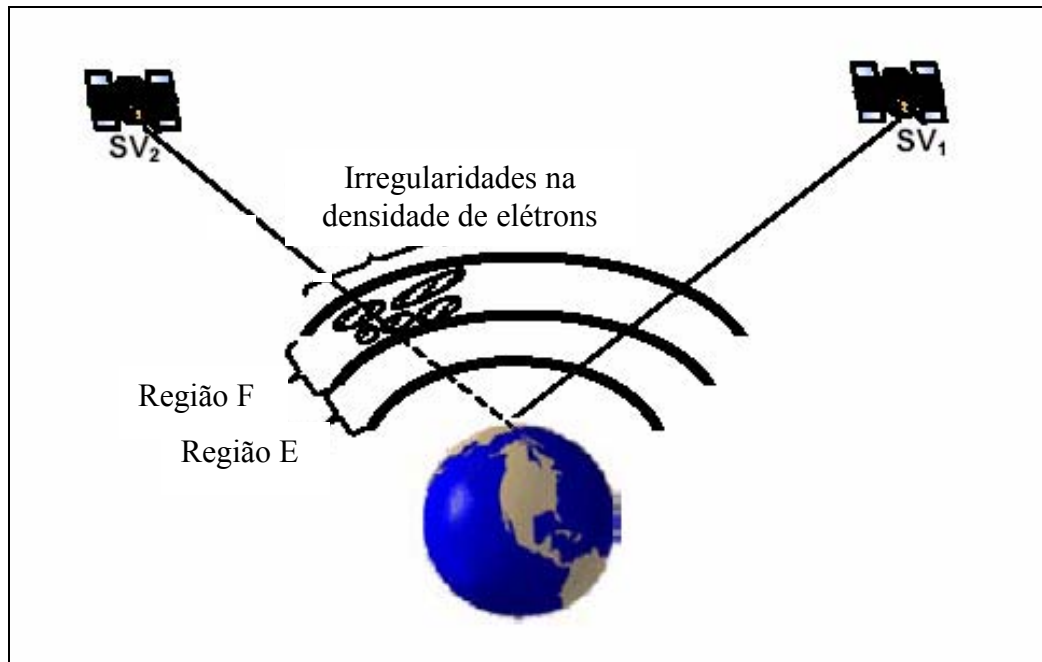


Figura 3.1 - Irregularidades na densidade de elétrons da ionosfera
 Fonte: adaptada de El Gizawy (2003)

De acordo com Aarons (1982) e Basu et al. (1988) apud Rodrigues (2003), existem três regiões principais de ocorrência das cintilações, como ilustrado na figura 3.2. A primeira região é a região equatorial e de baixas latitudes no período após o pôr-do-sol. A segunda região compreende o lado noturno da região do oval auroral e o lado diurno do vértice polar. Por fim, a terceira região corresponde à região mais interna da capa polar. Nesta região, é possível observar cintilações em qualquer hora local. Nas regiões de latitudes médias os efeitos da cintilação são normalmente negligenciáveis.

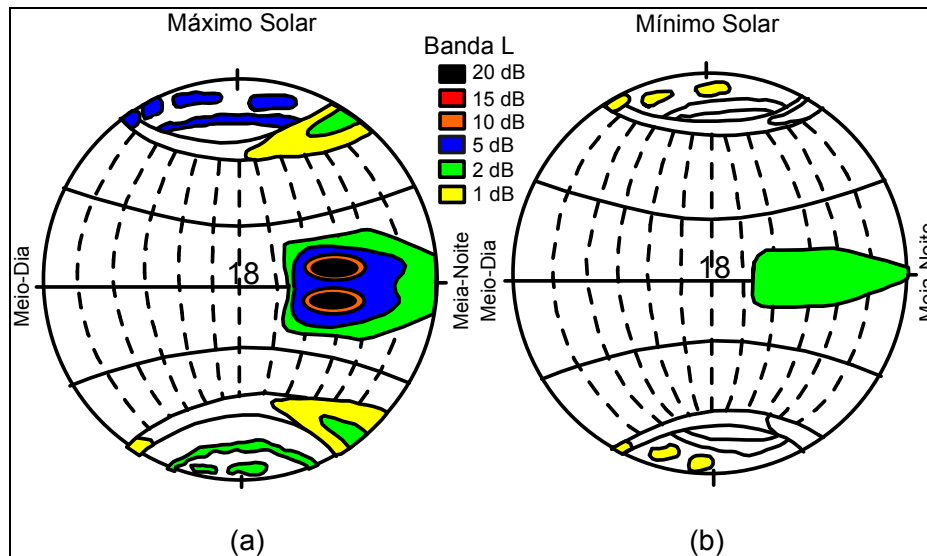


Figura 3.2 - Morfologia global das cintilações em sinais da Banda L durante anos de atividade solar máxima (a) e mínima (b). Fonte: adaptada de Basu et al. (1988) apud Rodrigues (2003)

As regiões de maior intensidade das cintilações correspondem às regiões de pico (norte e sul) da anomalia equatorial, localizadas a aproximadamente 15° N e 15° S de latitude geomagnética, e desta forma um maior número de perdas de sinal é esperado para receptores próximos a estes locais. A geração das irregularidades equatoriais e a ocorrência de um máximo secundário de ionização, que ocorrem durante o período após o pôr-do-sol, se combinam de forma a resultar uma atividade máxima de cintilação nesta região (RODRIGUES, 2003).

As cintilações que ocorrem em altas latitudes são mais fracas que as cintilações observadas na região equatorial e de baixas latitudes (SKONE, 2000). As cintilações observadas na região equatorial e de baixas latitudes são causadas por irregularidades de plasma ionosférico geradas por processo de instabilidade *Rayleigh-Taylor* (FINN e KNIGHT, 1996; RODRIGUES, 2003). Este processo tem início após o pôr do Sol, onde a densidade do plasma nas regiões mais baixas da ionosfera decresce com a recombinação dos íons. Ao mesmo tempo, há um movimento ascendente para as camadas superiores como resultado de forças eletromagnéticas. Isto faz com que os gradientes em

altura da densidade no plasma fiquem maiores, que por sua vez conduz à formação de irregularidades que aumentam de uma maneira instável. Cintilações na região equatorial e de baixas latitudes se mostram relacionadas com a anomalia equatorial, sendo que tem se observado que sua maior intensidade ocorre nos locais de pico da anomalia (SKONE et al. 2001). Na região de altas latitudes, a ocorrência da cintilação é devida às tempestades geomagnéticas (SKONE, 2000).

A cintilação ionosférica tem o potencial de afetar todos os serviços GPS, incluindo os Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) e Serviço de Posicionamento Preciso (PPS), no rastreamento dos receptores de simples e dupla frequência, tanto no posicionamento por ponto como no relativo (FU et al., 1999).

Cintilação ionosférica também pode ocorrer em regiões caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas. Essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação trans-ionosféricos e nos sinais GPS (SAHAI, et al., 2000).

As bolhas ionosféricas são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida (HANSON e SANATANI, 1973 apud SANTOS, 2001). Estendem-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético, alcançando extensões de 10000 km e cerca de 150 km a 300 km na direção perpendicular, estabelecendo-se na alta ionosfera (SANTOS, 2001). Ocorrem sempre após o por do Sol e principalmente no período noturno até a meia noite; não obstante durante algumas fases do ano aparecem durante a noite toda até o amanhecer (SOARES, 2001). A figura 3.3 mostra um esquema didático da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.

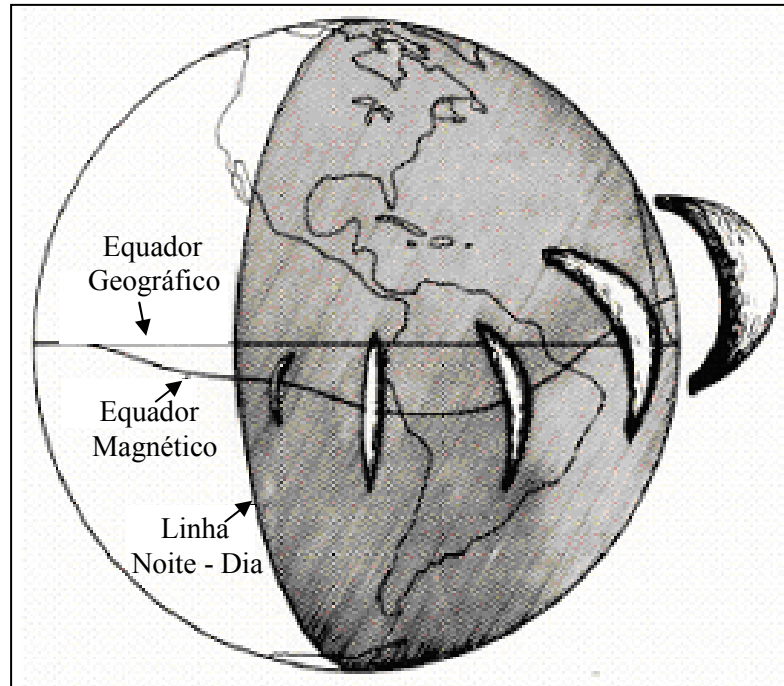


Figura 3.3 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas
Fonte: Soares (2001)

No Brasil, as bolhas ionosféricas geralmente ocorrem entre os meses de outubro a março e variam de características com o ciclo de atividade solar. A figura 3.4 mostra a variação sazonal da ocorrência das bolhas de plasma, observadas durante alta atividade solar (AAS) e baixa atividade solar (BAS) no Brasil em Cachoeira Paulista (SAHAI et al., 2000).

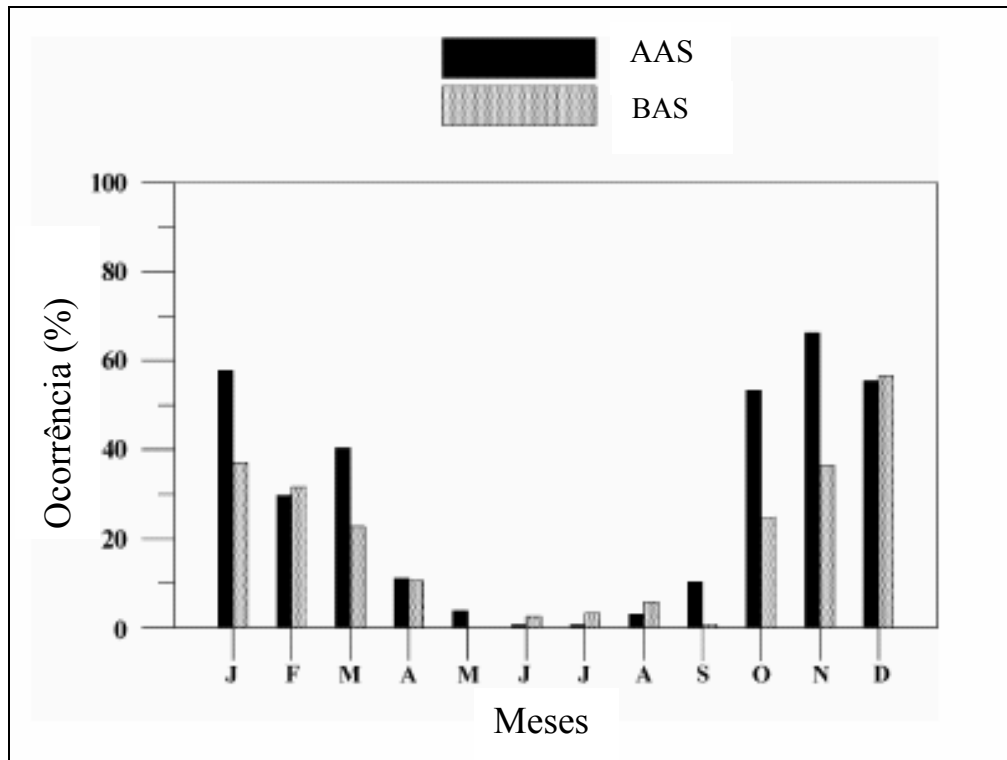


Figura 3.4 – Variação sazonal da ocorrência de bolhas de plasma, observadas durante alta atividade solar (AAS) e baixa atividade solar (BAS), em Cachoeira Paulista, Brasil.

Fonte: Sahai et al. (2000)

As bolhas ionosféricas interferem na propagação de ondas eletromagnéticas devido à alta variação na densidade do plasma ionosférico nas bordas das bolhas. Pois, conforme já mencionado, no interior das bolhas a densidade do plasma é drasticamente reduzida, ao passo que, nas regiões externas às bolhas, existe uma maior concentração do plasma, resultando em altos gradientes de densidade de elétrons, causando irregularidades na ionosfera, que por sua vez causam perturbações na propagação de ondas nestes locais.

3.3.1 Impacto da cintilação nos receptores GPS

A cintilação pode causar perdas de sinais, ou seja, perdas de ciclos, devido ao enfraquecimento da potência do sinal recebido e da variação da fase (SEEBER, 2003). A perda de sinais está também relacionada ao sistema de recepção do receptor GPS (antena/amplificador) e à técnica de processamento do sinal.

A performance de rastreamento dos receptores GPS não depende somente da magnitude da atividade da cintilação ionosférica, mas também da capacidade de rastreamento dos receptores GPS. Pesquisas têm mostrado que a performance pode variar significativamente entre receptores, sob idênticas condições de cintilação ionosférica, principalmente em L_2 . Skone et al. (2001) realizou alguns experimentos com receptores GPS de duas redes locais, sendo uma equipada com receptores Trimble 4000 SSI (rede SATREF-Noruega) e outra com receptores Ashtech ZXII (rede SWEPOS da Suécia). A figura 3.5 mostra a disposição das estações de cada rede.

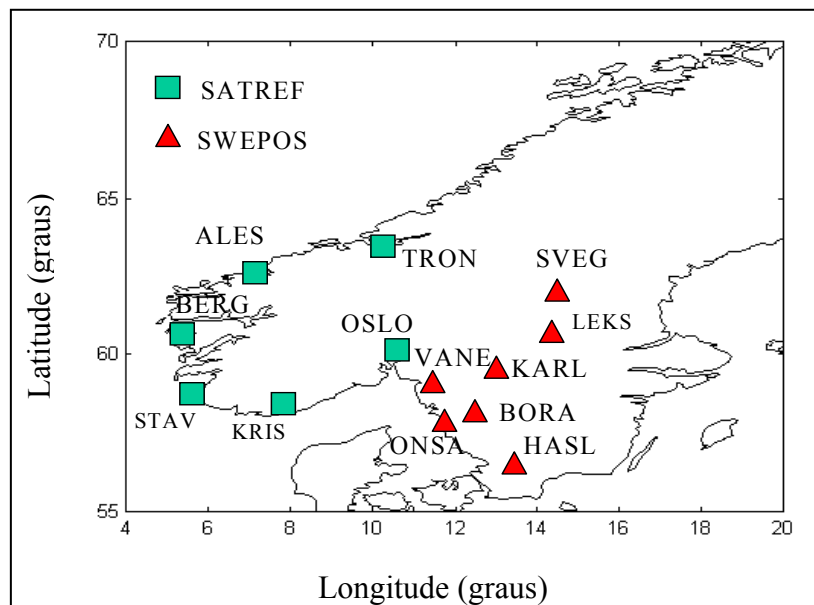


Figura 3.5 – Estações das Redes SATREF (Noruega) e SWEPOS (Suécia)
Fonte: adaptada de Skone et al. (2001)

A performance de rastreamento em L_2 para cada estação das duas redes, dada em porcentagem de corrupção de observações da fase (ou seja, perdas de ciclo ou observações perdidas), é mostrada na figura 3.6. Vale ressaltar que os receptores Trimble 4000 SSI utilizam a tecnologia *codeless* (correlação cruzada) para o rastreamento dos sinais GPS, enquanto que os receptores Ashtech ZXII utilizam a tecnologia *semicodeless* (técnica Z TRACKING). A descrição destas técnicas de processamento do sinal pode ser encontrada em Leick (1995), Monico (2000) e Seeber (2003).

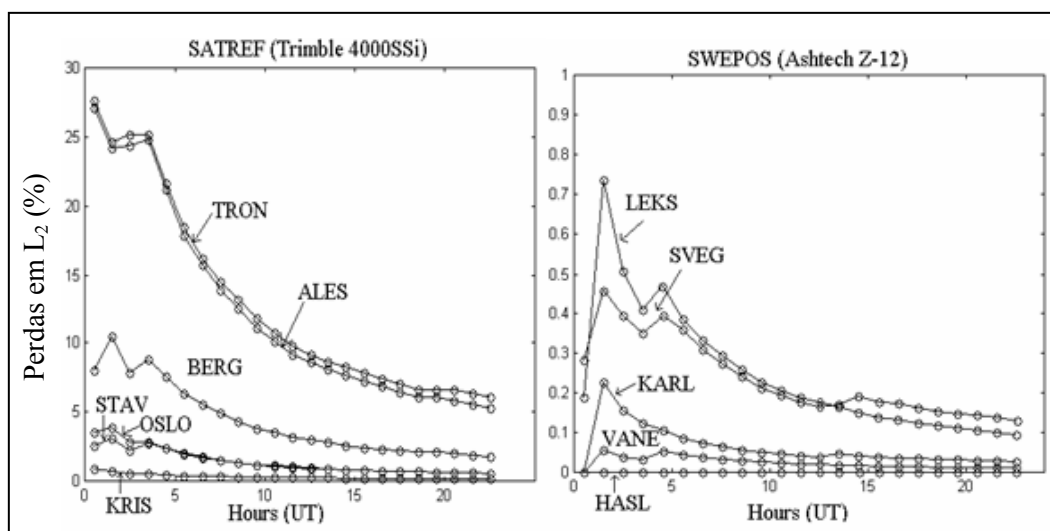


Figura 3.6 – Porcentagem de corrupção (perda) da fase da portadora L_2 (*Missing L_2 phase*)
Fonte: Skone et al. (2001)

De acordo com a figura 3.6, nota-se que os receptores que utilizam a tecnologia *semicodeless* para rastreamento dos sinais GPS tiveram uma melhor performance, com apenas 0,75% no máximo de corrupção das observações. No caso dos receptores que utilizam a tecnologia *codeless*, a porcentagem máxima chegou a atingir aproximadamente 28% (SKONE et al., 2001). Isto mostra um melhor desempenho da tecnologia *semicodeless* para o rastreamento dos sinais GPS, sob idênticas condições de cintilação ionosférica (SKONE et al., 2001).

Ainda na figura 3.6, pode-se notar que as estações ALES e TRON, da rede SATREF, proporcionaram os maiores valores de porcentagem de corrupção (aproximadamente 28%). Este fato pode ser explicado devido à localização destas estações, com latitudes maiores que 62°N , que se encontram numa região consideravelmente afetada pelos efeitos da cintilação ionosférica (região de altas latitudes) (SKONE et al., 2001). Vale salientar que a performance de rastreamento da portadora L_1 não foi afetada significativamente (SKONE et al., 2001).

De acordo com os experimentos realizados por Skone et al. (2001), pode-se concluir que todos os receptores GPS sofrem os efeitos da cintilação ionosférica, entretanto, alguns são mais afetados do que outros, variando de acordo com as técnicas de processamento que os receptores utilizam.

Em outro experimento, Skone et al. (2001) realizou experimentos com receptores localizados próximos ao equador, visando, neste caso, analisar a cintilação ionosférica que ocorre na região equatorial e de baixas latitudes. A figura 3.7 mostra a porcentagem de perdas de sinal L₂ de 4 estações da RBMC¹ de 1998 até 2000, coletados com receptores Trimble 4000 SSI.

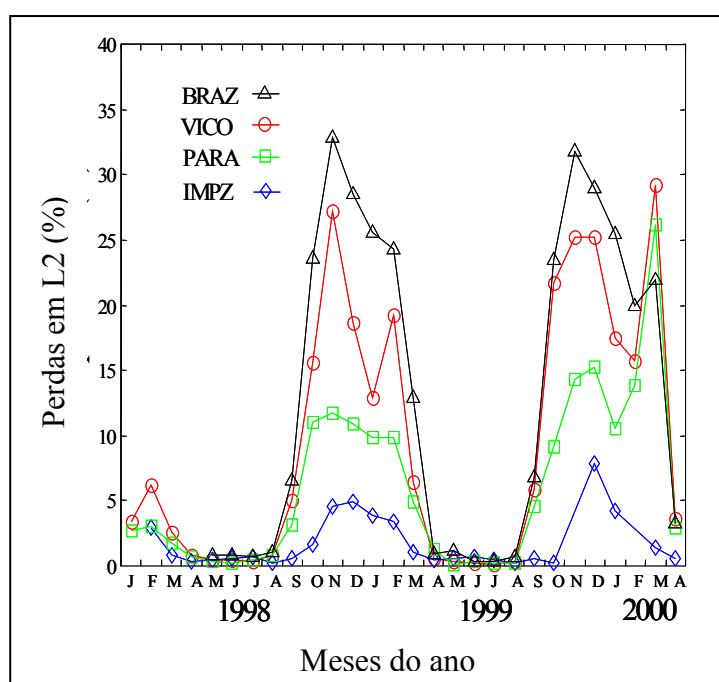


Figura 3.7 – Estatísticas (médias mensais) de perdas do sinal em L₂ em algumas estações pertencentes a RBMC

Fonte: adaptada de Skone et al. (2001)

Os resultados mostrados na figura 3.7 são relativos ao período das 20 às 23 horas local, no qual é o período do dia em que ocorre o pico do efeito da cintilação nesta região. De acordo com a figura 3.7, pode-se notar que o efeito da cintilação é mais intenso no

¹ A localização destas estações pode ser vista na figura 5.1

período de setembro a março. Também, nota-se um aumento após 1998, mostrando uma dependência com relação ao aumento da atividade solar do ciclo 23 (SKONE et al., 2001). As estações de Brasília (BRAZ) e Viçosa (VICO) registraram as maiores corrupções da fase na portadora L_2 . Isto se deve a grande quantidade de sinais que atravessam o pico da anomalia equatorial para as estações de BRAZ e VICO (SKONE et al., 2001). No entanto, em março de 2000 as estações PARA e VICO possuem um aumento significativo na corrupção da fase em L_2 , que segundo Skone et al. (2001) isto ocorreu devido à existência, neste período, de um deslocamento no pico da anomalia equatorial para regiões mais afastadas do equador geomagnético. Este deslocamento pode ser explicado pelo possível aumento do pico pré-inversão da deriva vertical do plasma ionosférico no equador geomagnético com o início do período de máxima atividade solar do ciclo 23, que intensificou o efeito fonte, fazendo com que as cristas da anomalia equatorial se deslocassem para regiões mais afastadas do equador geomagnético. Detalhes sobre o comportamento do pico pré-inversão encontram-se na seção 2.4.4.3.1.

A figura 3.8 mostra a distribuição espacial da porcentagem média de corrupção das observações da fase em L_2 durante março de 2000 (período de máximo solar), em função da latitude e hora local (SKONE et al., 2001).

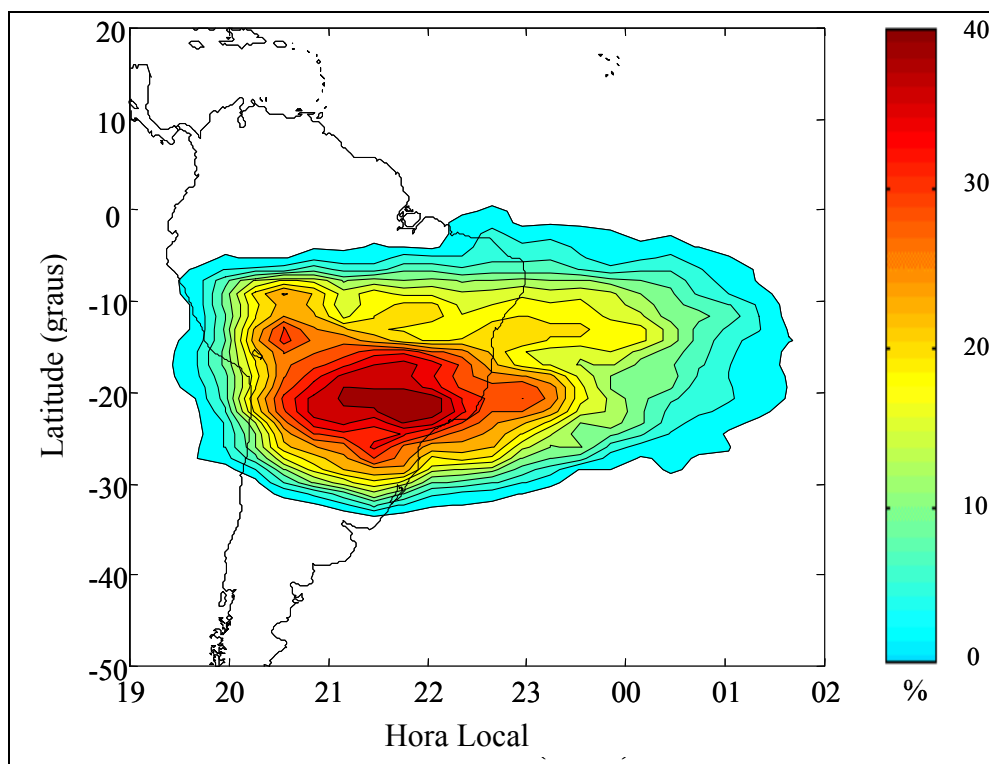


Figura 3.8 – Porcentagem média de corrupção das observações da fase L_2 – março/2000.
 Fonte: adaptada de Skone et al. (2001)

De acordo com a figura 3.8, nota-se que, na região compreendida entre aproximadamente as latitudes de 15° a 25° S, os efeitos da cintilação ionosférica são mais intensos. Verifica-se também que, entre aproximadamente 20:30 e 23:00 horas local, os efeitos da cintilação ionosférica também são mais intensos. Nesses resultados, a corrupção da fase na portadora L_1 não ultrapassou 5% (SKONE et al., 2001).

3.4 Modelos Globais da Ionosfera

3.4.1 Modelo de Klobuchar

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites que fazem parte do GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma frequência, utilizando o modelo de Klobuchar. Esse modelo permite calcular o atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica para a pseudodistância entre o satélite e a antena

receptora. Para utilizá-lo na correção da fase da portadora tem-se que trocar o sinal da correção calculada. Os coeficientes do modelo, num total de oito (α_i e β_i , $i = 0, \dots, 3$), são estimados periodicamente em função de duas variáveis: dia do ano e fluxo solar na frequência de 2800 MHz ($F_{10.7cm}$); sendo posteriormente transmitidos pelos satélites, como parte das mensagens de navegação (KLOBUCHAR, 1987).

Para descrever a variação da ionosfera durante o dia, o modelo de Klobuchar utiliza-se da função co-seno com amplitude máxima às 14:00 horas local. A amplitude (A) e o período (P) da função co-seno são calculados em função da latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos pelos satélites e representados por um polinômio de terceiro grau (LEICK, 1995). Durante a noite, o atraso ionosférico em L_1 é considerado constante (DC) e igual a 5 nanosegundos, que equivale, aproximadamente, a 1,5 m ou $9,24 \times 10^{16}$ elétrons/m². A figura 3.9 mostra uma simples representação do atraso ionosférico a partir do modelo de Klobuchar.

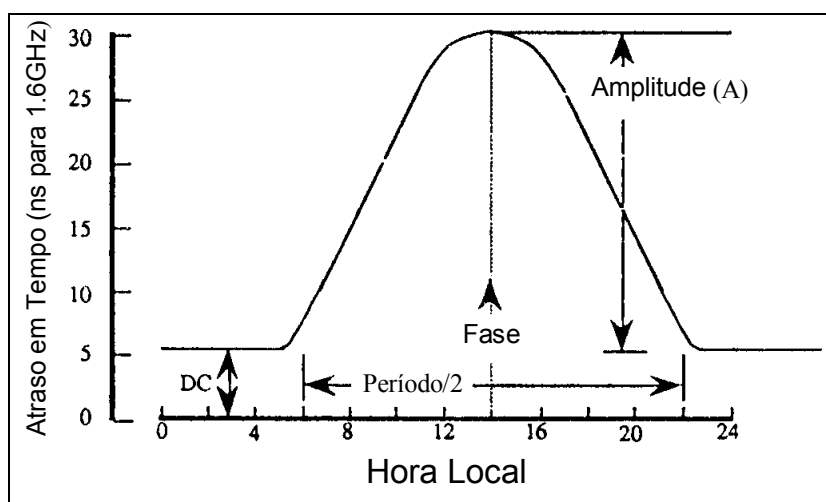


Figura 3.9 - Representação do atraso ionosférico a partir do modelo de Klobuchar.
Fonte: Adaptada de Newby et al. (1990)

O algoritmo empregado para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L_1 , além dos oitos coeficientes α_i e β_i , ($i = 0, \dots, 3$), utiliza a latitude e a

longitude geodésica da estação, o azimute, o ângulo de elevação do satélite e o tempo GPS da época de observação. A descrição detalhada do algoritmo (formulações) pode ser encontrada, por exemplo, em Leick (1995), Camargo (1999), Matsuoka e Camargo (2002) e Matsuoka (2003).

O modelo de Klobuchar representa um comportamento ideal suavizado da ionosfera (FARAH, 2002), e desta forma, é inadequado para modelar possíveis flutuações diárias (NEWBY et al., 1990) (FARAH, 2002). Segundo a literatura o modelo de Klobuchar pode remover algo em torno de 50% a 60% do erro devido à ionosfera (KLOBUCHAR, 1987) (NEWBY e LANGLEY, 1992) (MATSUOKA e CAMARGO, 2002).

Apesar das limitações do modelo de Klobuchar não se deve esquecer as suas vantagens que o torna uma opção acessível aos usuários de receptores GPS de simples frequência para reduzir a influência do erro devido à ionosfera. Primeiramente, a sua simplicidade é um fator importante no aspecto de implementação computacional (FARAH, 2002), sendo ainda que a formulação matemática do modelo é bastante difundida na literatura. Outra vantagem muito importante é que os coeficientes do modelo são transmitidos nas mensagens de navegação dos satélites, sendo, desta forma, acessível a todos os usuários, que podem utilizá-lo tanto em posicionamento pós-processado como em tempo real, podendo ser aplicado inclusive em navegação com GPS.

3.4.2 Coeficientes do Modelo de Klobuchar estimados pelo CODE

O CODE, que pertence ao grupo de trabalho da ionosfera do IGS, tem estimado e disponibilizado, desde julho de 2000, coeficientes para o modelo de Klobuchar (CODE, 2006). Estudos realizados na região de latitudes médias verificaram uma melhor performance do que os originais contidos nas mensagens de navegação, por um fator de 1,5 vezes (FARAH, 2002). Estes novos coeficientes podem ser acessados via internet no

endereço: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>. Os coeficientes são estimados baseados em dados GPS de estações da rede IGS, diferentemente dos coeficientes originais que são baseados em medidas de fluxo solar.

Então, estes novos coeficientes podem ser utilizados no modelo de Klobuchar pelos usuários de receptores GPS de simples frequência, inclusive na região brasileira, tornando-se uma outra estratégia de correção do erro devido à ionosfera. O CODE também disponibiliza os coeficientes do modelo de Klobuchar com 1 e 2 dias de predição, podendo, portanto, ser utilizados para correção do erro devido à ionosfera em aplicações em tempo real.

3.4.3 Mapas Globais do TEC do IGS (Arquivos IONEX)

No ano de 1998 o IGS, a partir do seu grupo de trabalho da ionosfera, iniciou a produção de Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Maps*) que disponibilizam valores de VTEC¹ calculados usando dados coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência (FELTENS e SCHAER, 1998). Oficialmente, estes mapas são disponibilizados na sua forma final com uma latência de 11 dias (HERNANDEZ-PAJARES, 2003). Porém, desde dezembro de 2003, o IGS vem disponibilizando os mapas em uma versão preliminar com uma latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS) (KOMJATHY e HERNANDEZ-PAJARES, 2004).

Os mapas são disponibilizados pelo IGS em arquivos no formato IONEX² (*IONosphere map Exchange format*) que fornecem valores de VTEC em um *grid* com resolução espacial de 5° x 2,5° em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas (SCHAER, 1999). Além dos valores de VTEC, os arquivos IONEX fornecem

¹ TEC na direção vertical (ver seção 4.4)

² Uma descrição do formato IONEX pode ser verificada em Schaer e Gurtner (1998)

valores do atraso instrumental interfrequência dos satélites, bem como, dos receptores envolvidos no processamento.

Atualmente, o grupo de trabalho da ionosfera do IGS conta com a participação de 4 centros de análises¹, a saber:

- CODE (Suíça);
- ESA (*European Space Agency*) (Alemanha);
- JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) (EUA);
- UPC (*Polytechnical University of Catalonia*) (Espanha);

São estes centros de análise que produzem os mapas do TEC disponibilizados pelo IGS, cada qual com suas estratégias, porém todas utilizando os dados GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) das estações ativas do IGS. Detalhes sobre as estratégias de modelagem adotadas por cada centro de análise podem ser obtidos em CODE (2006), ESA (2006), JPL (2006) e UPC (2006). Desta forma, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de 4 arquivos IONEX. Desde meados de dezembro de 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos centros de análise são combinados para resultar em um único arquivo IONEX, ou seja, em um único mapa global do VTEC. Os arquivos IONEX de cada centro de análise, bem como, os arquivos combinados, são disponibilizados pelo IGS, com acesso livre, no seguinte endereço eletrônico: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>.

Segundo IGSCB (2006), a precisão média dos valores de VTEC para os arquivos IONEX finais (11 dias de latência) é de 2-8 TECU e para os arquivos rápidos (latência menor do que 24 horas) de 2-9 TECU. É claro que, essa precisão pode variar de acordo com a região do globo terrestre, dependendo do número de estações que foram

¹ Deve-se comentar que o NRCan (*Natural Resources Canadá*) já fez parte desse grupo

utilizadas em determinada região. Além disso, essa precisão média refere-se aos valores de VTEC do *grid* e, portanto, para valores interpolados espera-se uma menor precisão. Mais informações sobre as atividades do grupo de trabalho da ionosfera do IGS e dos arquivos IONEX produzidos por eles podem ser obtidas em http://gage152.upc.es/~ionex3/igs_iono/igs_iono.html.

Uma das aplicações destes arquivos IONEX do IGS é possibilitar ao usuário de receptor de simples frequência uma forma de obter o valor do erro devido à ionosfera para realizar a correção das suas observáveis, e desta forma, melhorar a qualidade do seu posicionamento. Como já foi comentado, isto é possível devido ao fato do erro ser proporcional ao TEC.

No hemisfério norte um estudo realizado por Ovstedal (2002) avaliou a melhora obtida no posicionamento por ponto após a correção das pseudodistâncias (C/A) do erro devido à ionosfera a partir dos valores de VTEC obtidos dos arquivos IONEX do IGS produzidos pelo CODE. Ovstedal (2002) utilizou no experimento os dados da estação GPS OSLO (60°N; 10°E), localizada na Noruega, coletados no período de 17 a 23 de junho de 2001 (período de máxima atividade solar do ciclo 23). Os resultados mostram uma melhora média de 85% na acurácia (por época) da determinação da altitude geométrica, e de 55% para a acurácia horizontal. Vale salientar que a estação OSLO está localizada na região geográfica da ionosfera de divisa entre a de latitudes médias e de altas latitudes, e desta forma, em condições ionosféricas diferentes do Brasil (localizada na região equatorial e de baixas latitudes).

3.5 Iniciativa Brasileira na Elaboração de Modelos Regionais da Ionosfera utilizando dados GPS

Em todo o mundo vários modelos regionais da ionosfera para aplicação na correção do erro devido à ionosfera nas observáveis de receptores de simples frequência têm sido desenvolvidos. No Brasil, mais especificamente na FCT/UNESP, foi desenvolvido por Camargo (1999) um modelo regional da ionosfera denominado de Mod_Ion que utiliza dados GPS das estações da RBMC.

Neste modelo, o erro devido à ionosfera em L_1 é representado analiticamente por uma série do tipo de Fourier. Os coeficientes desta série são estimados em lote pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o método paramétrico. Vale salientar que também são estimados os atrasos instrumentais interfrequência dos satélites e dos receptores. As observações envolvidas no ajustamento são as diferenças entre as pseudodistâncias em L_1 e L_2 . O usuário pode optar por considerar as pseudodistâncias originais ou as filtradas pela fase. Após estimar os coeficientes da série, pode-se corrigir as observáveis GPS de interesse utilizando o programa Cor-Rinex-Ion também desenvolvido por Camargo (1999), e que atualmente é uma sub-rotina do programa Mod_Ion. Ou seja, o usuário entra com os arquivos de dados GPS dos receptores que farão parte do processo de estimação, bem como, do arquivo que se deseja corrigir. O Mod_Ion irá estimar os coeficientes da série e em seguida realizará a correção no arquivo desejado. Mais detalhes quanto ao Mod_Ion podem ser encontrados em Camargo (1999), Camargo et al. (2000), Matsuoka (2003) e Matsuoka e Camargo (2002). Recentemente, Aguiar (2005) adaptou o algoritmo de filtro de Kalman no Mod_Ion para estimar os coeficientes do modelo, visando correções da ionosfera em tempo real. Detalhes podem ser encontrados em Aguiar (2005) e Aguiar e Camargo (2006).

Na Escola de Engenharia de São Carlos da USP (Universidade de São Paulo) também foi desenvolvido um modelo da ionosfera (VERONEZ, 2004). Neste modelo

o erro devido à ionosfera é representado analiticamente por um polinômio de segundo grau, sendo os coeficientes estimados a partir de dados GPS da RBMC por meio de um ajustamento seqüencial (VERONEZ, 2004).

4 DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS UTILIZANDO AS OBSERVÁVEIS GPS

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS é o TEC. O TEC representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite, e cuja área da base é unitária (1 m^2).

O TEC é dado em elétrons/ m^2 . Normalmente, o TEC apresenta valores muito elevados, sendo muitas vezes maior do que 1×10^{18} elétrons/ m^2 (LIU, 2004). Para propósitos de padronização a comunidade científica tem adotado como unidade do TEC a sigla “TECU” (*TEC Unit* – Unidade de TEC), sendo $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16}$ elétrons/ m^2 . Vale salientar que o TEC é facilmente convertido em *erro* na distância medida pela fase (-) ou código (+), nas frequências L_1 , L_2 e L_5 ¹, usando a equação (3.14) e (3.15), onde:

- Para L_1 , $1 \text{ TECU} \cong \pm 0,16 \text{ m}$;
- Para L_2 , $1 \text{ TECU} \cong \pm 0,27 \text{ m}$;
- Para L_5 , $1 \text{ TECU} \cong -0,29 \text{ m}$.

Durante mais de três décadas o TEC foi obtido pelo método de rotação Faraday, utilizando ondas de rádio transmitidas por satélites nas frequências entre 40 e 400 MHz (FEDRIZZI, 2003). Com a redução do número de satélites utilizados na técnica de rotação Faraday e a necessidade do aumento na precisão das calibrações ionosféricas para fins espaciais a determinação do TEC foi gradualmente sendo substituída por técnicas que utilizam os dados do GPS (LANYI e ROTH, 1988).

¹ Frequência a ser transmitida futuramente com o decorrer da modernização do GPS

A natureza dispersiva da ionosfera permite o cálculo do TEC usando os dados coletados por receptores GPS de dupla frequência. O TEC pode ser obtido utilizando dados de um receptor de dupla frequência a partir de uma combinação linear entre as observáveis de pseudodistância em L_1 e L_2 ou utilizando as observáveis de fase da portadora em ambas as frequências. Nessas combinações lineares para a obtenção do TEC, os erros que contaminam as observáveis em ambas as frequências da mesma maneira são eliminados, tais como: a refração troposférica, o não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, o erro das efemérides, bem como, também é eliminada a distância geométrica. Porém, alguns erros não são correlacionados entre as frequências e, portanto, não são eliminados na combinação linear, influenciando na determinação do TEC. São eles: (1) o atraso instrumental interfrequência do satélite e do receptor; (2) os efeitos de multicaminho e (3) o ruído do receptor. Detalhes sobre estes erros podem ser obtidos, por exemplo, em Monico (2000), Hofmann-Wellenhof et al. (2001) e Seeber (2003).

Para a minimização da influência do atraso instrumental interfrequência do satélite no cálculo do TEC podem ser utilizados os valores fornecidos nas mensagens de navegação transmitidas pelos satélites GPS. Outra opção é utilizar os valores disponibilizados nos arquivos IONEX do IGS. O atraso instrumental interfrequência do receptor pode ser obtido por processos de calibração (SARDÓN e ZARRAOA, 1997) ou por técnicas de modelagem que utilizam dados de receptores GPS de dupla frequência (exemplos: LANYI e ROTH, 1988; COCO et al., 1991; WILSON e MANNUCCI, 1993; SARDÓN et al., 1994; KOMJATHY, 1997; CAMARGO, 1999). Nesta última técnica, também se estima o atraso instrumental interfrequência dos satélites. O atraso instrumental de alguns receptores da rede IGS também é fornecido nos arquivos IONEX do IGS. O efeito de multicaminho pode ser minimizado evitando-se obstáculos próximos à antena e utilizando antenas do tipo *choke ring*, bem como, evitando-se observações de satélites com baixo ângulo de elevação; e o ruído do

receptor pode ser minimizado utilizando-se receptores que possuam componentes eletrônicos de baixo ruído.

4.1 Determinação do TEC a partir de Medidas de Pseudodistância

O TEC na direção do satélite (s) ao receptor (r) pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias (P_{1r}^s , P_{2r}^s), advindas dos códigos P nas portadoras L_1 e L_2 , a partir da seguinte combinação linear:

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} \left[(P_{2r}^s - P_{1r}^s) - \varepsilon_{p21} \right] \quad (\text{el/m}^2) \quad , \quad (4.1)$$

onde f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras em L_1 e L_2 respectivamente. O termo ε_{p21} representa a diferença entre L_2 e L_1 dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as pseudodistâncias, e os erros aleatórios. Estão presentes neste termo o atraso instrumental interfrequência do satélite e receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor. Quando é utilizada a pseudodistância advinda do código C/A em substituição a do código P da portadora L_1 existe uma tendência diferencial entre ambas.

A desvantagem da utilização das observações de pseudodistâncias é que as medidas do TEC são consideravelmente ruidosas (JAKOWSKI, 1996). Aplicando a lei de propagação de covariâncias (GEMAEL, 1994) na equação 4.1, considerando somente a precisão das pseudodistâncias, tem-se que:

$$\sigma_{TEC_{PD}} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} \sqrt{\sigma_{P2}^2 + \sigma_{P1}^2} \quad , \quad (4.2)$$

onde $\sigma_{TEC_{PD}}$ é o desvio padrão do TEC derivado de medidas de pseudodistâncias, σ_{P2} e σ_{P1}

são, respectivamente, o desvio padrão da pseudodistância em L_2 e L_1 . Tradicionalmente, a precisão de uma pseudodistância pode atingir 3 m para o código C/A e 0,3 m para o código P, o que corresponde a 1% do comprimento do chip (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001). No entanto, recentes desenvolvimentos demonstram que uma melhor precisão é atingida (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001). De fato, por exemplo, Pereira et al. (2003) salientam que o valor da precisão para a pseudodistância em L_1 (C/A) das estações da RBMC é normalmente de 0,2-0,3 m, e para as advindas do código P em L_2 de 0,7 a 0,8 m. Simulando uma situação em que $\sigma_{p1} = 0,2$ m e $\sigma_{p2} = 0,7$ m, e aplicando esses valores na equação (4.2), tem-se que a precisão do TEC será de $\sigma_{\text{TEC}_{\text{pd}}} = 7$ TECU, aproximadamente. Skone et al. (2002) afirma que normalmente a precisão de medidas de TEC derivadas de pseudodistâncias é de 1 a 5 TECU. Simulando um caso não favorável em que $\sigma_{p1} = 3$ m e $\sigma_{p2} = 0,3$ m (ou seja, 1% do comprimento do chip), então o valor de $\sigma_{\text{TEC}_{\text{pd}}}$ será de 28,7 TECU.

4.2 Determinação do TEC a partir de Medidas de Fase

O TEC na direção do satélite (**s**) ao receptor (**r**) também pode ser obtido a partir da combinação linear entre as medidas de fase da portadora em L_1 e L_2 ($\varphi_{1r}^s, \varphi_{2r}^s$):

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} \left[(\lambda_1 \varphi_{1r}^s - \lambda_2 \varphi_{2r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - \varepsilon_{\varphi_{12}} \right] \text{ (el/m}^2\text{)}, \quad (4.3)$$

onde f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras em L_1 e L_2 e λ_1 e λ_2 são o comprimento de onda em L_1 e L_2 , respectivamente. O termo $\varepsilon_{\varphi_{12}}$ representa a diferença entre L_1 e L_2 dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as fases e os erros aleatórios. Estão presentes neste termo o atraso instrumental interfrequência do satélite e

receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor. Note que na equação (4.3) o TEC calculado, tendo como observável a fase da portadora, está sendo influenciado pelas ambigüidades inteiras (N_{1r}^s e N_{2r}^s) em L_1 e L_2 , respectivamente. A ambigüidade é diferente para cada satélite, para cada passagem do mesmo satélite, e a cada vez que ocorrerem perdas de sinal implica em uma nova ambigüidade.

A imprecisão no cálculo do TEC devido à ambigüidade faz com que muitos trabalhos encontrados na literatura denominem o TEC advindo das observações da fase como um valor de “TEC relativo” (SKONE, 1998; EL GIZAWY, 2003; RODRIGUES, 2003; FEDRIZZI, 2003; LIU, 2004). Seguindo a mesma linha de raciocínio, o TEC advindo da pseudodistância (equação 4.1) é dito na literatura como sendo um valor de “TEC absoluto” devido à inexistência do termo relativo à ambigüidade. Porém, os valores de TEC calculados pela pseudodistância são aproximadamente 10 vezes ou mais ruidosos do que os obtidos pela fase da portadora (SKONE, 1998). Skone et al. (2002) enfatiza que a precisão do TEC derivado de medidas de fase é usualmente melhor do que 0,1 TECU. Aplicando a lei de propagação de covariâncias na equação (4.3), considerando somente a precisão das fases, tem-se que:

$$\sigma_{\text{TEC}_{\text{Fase}}} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} \sqrt{\lambda_1^2 \sigma_{\phi_1}^2 + \lambda_2^2 \sigma_{\phi_2}^2}, \quad (4.4)$$

onde $\sigma_{\text{TEC}_{\text{Fase}}}$ é o desvio padrão do TEC derivado de medidas de fase, σ_{ϕ_1} e σ_{ϕ_2} são, respectivamente, o desvio padrão da fase em L_1 e L_2 . Tipicamente, a precisão da fase em L_1 e L_2 é de aproximadamente 0,02-0,06 ciclos, que corresponde a 0,004-0,012 m em distância (GAO et al., 2002). Assumindo-se um caso em que $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = 0,02$ ciclos, então a precisão do TEC derivado de medidas de fase será de $\sigma_{\text{TEC}_{\text{Fase}}} = 0,06$ TECU, que é bem melhor que a

precisão do TEC advinda de medidas de pseudodistâncias, porém, com a desvantagem de conter a influência das ambigüidades, que provocam um deslocamento do TEC de seu valor “real”.

Uma alternativa é utilizar como observável no cálculo do TEC a pseudodistância filtrada pela fase da portadora em L_1 e L_2 . Com isto diminui-se consideravelmente o ruído da pseudodistância e elimina-se a influência da ambigüidade da fase. A combinação linear utilizada para a obtenção do TEC a partir da pseudodistância filtrada pela fase da portadora é a mesma apresentada na equação (4.1). Obviamente, a diferença é que ao invés de utilizar as pseudodistâncias originais se utiliza as filtradas pela fase.

4.3 Determinação do TEC a partir da Pseudodistância Filtrada pela Fase da Portadora

Como apresentado anteriormente, o TEC pode ser obtido pela combinação linear entre as observações de pseudodistância ou fase nas frequências L_1 e L_2 . As medidas de TEC obtidas a partir da pseudodistância são bastante ruidosas, e as obtidas pela fase são influenciadas pela diferença entre as ambigüidades em L_1 e L_2 . Estas afirmações podem ser observadas na figura 4.1 que mostram valores do TEC advindos das duas técnicas.

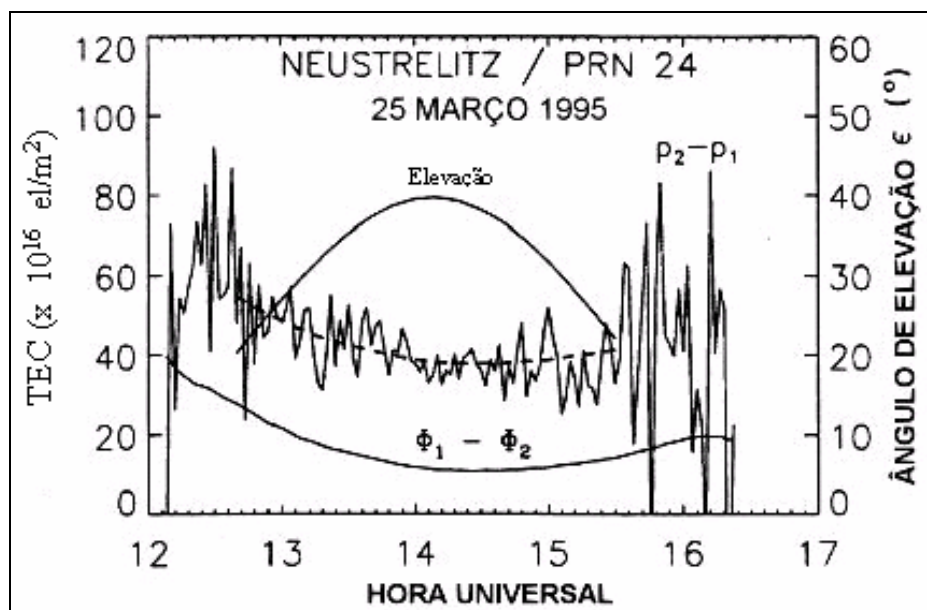


Figura 4.1 – Exemplo de cálculo do TEC a partir das medidas de pseudodistância ($\rho_2 - \rho_1$) e fase ($\Phi_1 - \Phi_2$). Fonte: Jakowski (1996)

Para obter uma estimativa mais adequada do TEC pode-se utilizar na equação (4.1) as pseudodistâncias filtradas pela fase da portadora em L_1 e L_2 . A forma de obtenção da pseudodistância filtrada pela fase será apresentada a seguir.

4.3.1 Cálculo da pseudodistância filtrada pela fase da portadora

O princípio da combinação entre a pseudodistância e a medida da fase da onda portadora deve-se, primeiramente, à investigação de Hatch (1982). O algoritmo é amplamente encontrado na literatura, como por exemplo, em Hatch (1982), Goad (1990) e Jin (1996).

A diferença da fase da portadora entre duas épocas (t_{k-1} e t_k) fornece uma distância relativa ou medida integrada Doppler que, em inglês, é designada de *delta range*. Denotando as diferenças no intervalo (t_{k-1} e t_k), respectivamente, para L_1 e L_2 , como $D_{k-1,k}^1$ e $D_{k-1,k}^2$, tem-se que:

$$D_{k-1,k}^1 = \lambda_1 \varphi_{1r k}^s - \lambda_1 \varphi_{1r k-1}^s \quad (4.5)$$

e

$$D_{k-1,k}^2 = \lambda_2 \varphi_{2r k}^s - \lambda_2 \varphi_{2r k-1}^s . \quad (4.6)$$

A partir da equação (4.5) e (4.6) uma distância relativa livre do efeito da ionosfera pode ser obtida, por meio da expressão:

$$D_{k-1,k} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^2 . \quad (4.7)$$

Fazendo duas vezes a equação (4.7) menos a equação (4.5) e (4.6), pode-se projetar a diferença em distância da fase da portadora em equivalente diferença em distância da pseudodistância, respectivamente para L_1 e L_2 . Assim:

$$M_{k-1,k}^i = 2D_{k-1,k} - D_{k-1,k}^i , \quad (4.8)$$

para $i = 1, 2$.

A quantidade ($M_{k-1,k}^i$) tem uma importante propriedade, que é a de conter as mesmas informações que fazem parte da diferença ($P_{ir k}^s - P_{ir k-1}^s$), porém com ruído reduzido (JIN, 1996), que corresponde a 0,7 do ruído da pseudodistância original.

Para uma época inicial (t_0), a pseudodistância filtrada pela fase da portadora é dada pela própria pseudodistância observada, isto é, $P_{ir0/0}^s = P_{ir0}^s$. A partir dela, um valor predito para pseudodistância, para uma época (t_k), pode ser obtido, pela expressão (JIN, 1996):

$$P_{irk/k-1}^s = P_{irk-1/k-1}^s + M_{k-1,k}^i, \quad (4.9)$$

para $i = 1, 2$ e $k = 1, 2, \dots, t_k$. Na equação (4.9) ($P_{irk-1/k-1}^s$) representa a pseudodistância filtrada na época t_{k-1} .

A pseudodistância filtrada pela fase da portadora para a época t_k é dada por (JIN, 1996):

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{1}{k+1}(P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s). \quad (4.10)$$

Teunissen (1991) mostra que a equação (4.10) não é estritamente um estimador de mínimos quadrados recursivo, já que a suposição de que a variância da fase da portadora é zero, é implicitamente feita. A expressão teórica para a filtragem da pseudodistância é dada por:

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2}{k(\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s), \quad (4.11)$$

sendo $\sigma_{P_i}^2$ e $\sigma_{\phi_i}^2$ as variâncias da medida de pseudodistância e fase em L_i ($i = 1, 2$), respectivamente.

No processo de filtragem, quando ocorrem perdas de ciclos, o algoritmo deve ser reiniciado.

A variância da pseudodistância filtrada é obtida da seguinte forma (TEUNISSEN, 1991):

$$\sigma_{P_{r}^s k/k}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2 (\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2)}{k(\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)}, \quad (4.12)$$

para $i = 1, 2$.

O valor mínimo da variância é obtido para o limite de $k \rightarrow \infty$ (TEUNISSEN, 1991):

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_{P_i^{s k/k}}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2}{1 + (\sigma_{\phi_i}^2 / \sigma_{P_i}^2)}, \quad (4.13)$$

para $i = 1, 2$.

A figura 4.2 mostra o comportamento do desvio padrão para a pseudodistância (C/A (P₁) ou P₂) filtrada pela fase (eixo Y esquerdo), obtido com a equação 4.12, supondo-se uma situação teórica em que $\sigma_{P_1} = \sigma_{P_2} = 0,2$ m, $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = 0,004$ m e $k=1,2,\dots,700$. Seguindo a mesma linha de raciocínio, a figura 4.2 também apresenta os respectivos valores do desvio padrão do TEC (eixo Y direito) que se obteria se caso fossem usadas medidas de pseudodistâncias filtradas pela fase com valores de precisão segundo o eixo Y esquerdo da figura 4.2.

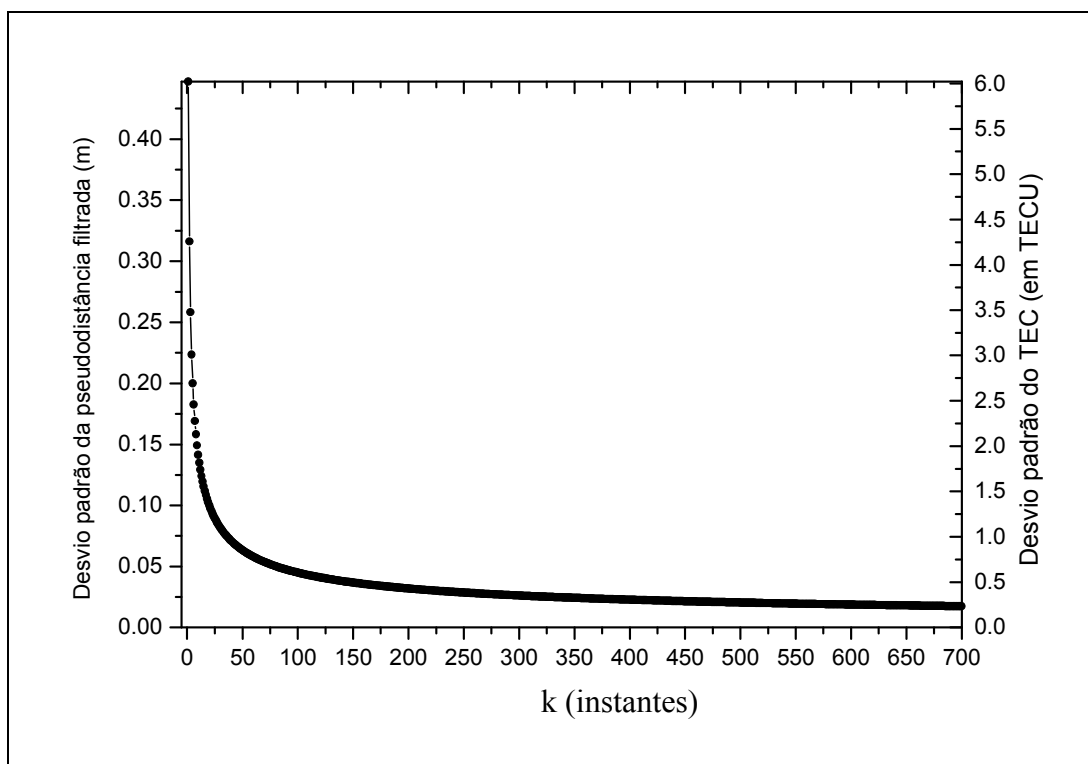


Figura 4.2 – Comportamento do desvio padrão da pseudodistância filtrada pela fase (C/A (P1) ou P2) e do TEC (supondo-se $\sigma_{P1} = \sigma_{P2} = 0,2$ m, e $\sigma_{\varphi1} = \sigma_{\varphi2} = 0,004$ m)

Pode-se notar na figura 4.2 a melhora na precisão das pseudodistâncias ao se utilizar a técnica de filtragem pela fase, sendo que os valores do desvio padrão se estabilizam após alguns instantes. Conseqüentemente, ao se utilizar as pseudodistâncias filtradas pela fase para o cálculo do TEC, este será obtido com uma precisão melhor do que com o uso das pseudodistâncias originais. É importante salientar que a cada perda de sinal (ciclo) o algoritmo deve ser inicializado.

Para exemplificar a vantagem da técnica proposta, a figura 4.3 mostra um gráfico com os valores do TEC calculados usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase. Pode-se notar claramente a melhora na estimativa dos valores do TEC usando a técnica de filtragem da pseudodistância pela fase, reduzindo consideravelmente o ruído nas medidas do TEC.

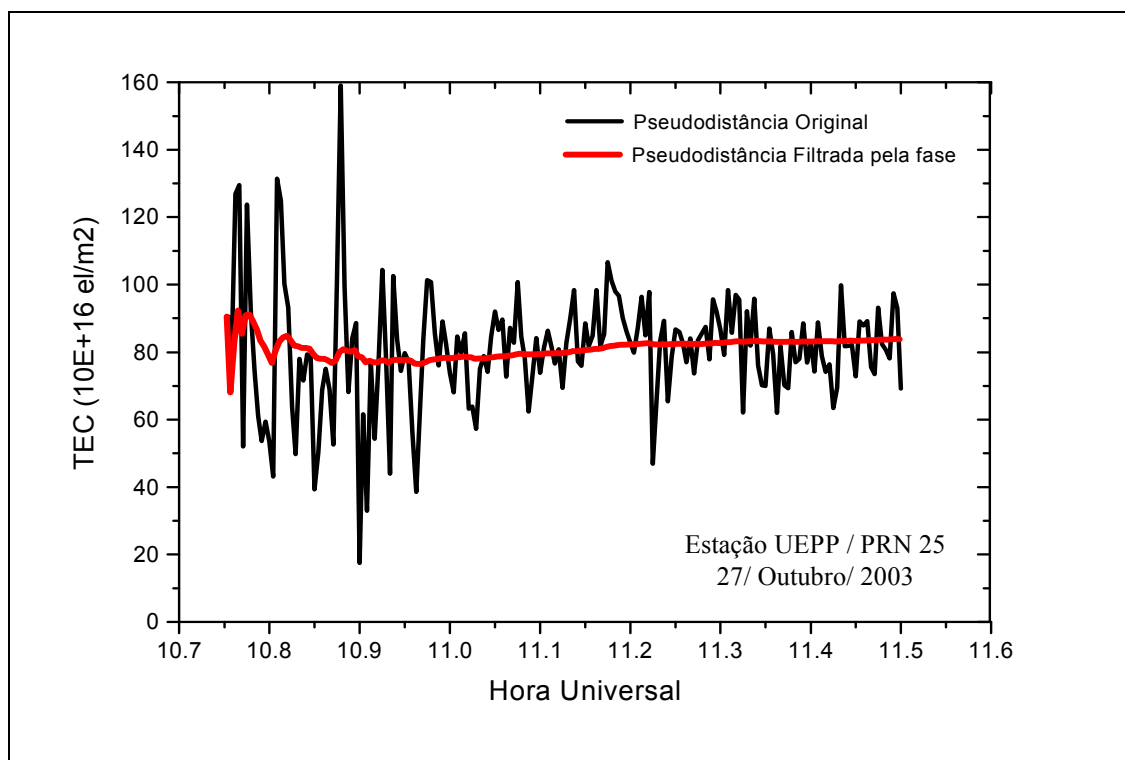


Figura 4.3 – Valores do TEC calculados usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase

4.4 Obtenção do TEC na Direção Vertical

Nas equações (4.1) e (4.2), o TEC é dado ao longo da direção entre o satélite e o receptor (TEC_r^s). Para fins de padronização, usa-se o TEC na direção vertical (VTEC) no ponto ionosférico que pode ser obtido a partir da multiplicação entre o TEC_r^s e a função de mapeamento geométrica padrão ($\cos(z')$):

$$VTEC = \cos(z') TEC_r^s, \quad (4.14)$$

onde o valor de z' , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em uma camada de altura média (h_m), é obtido de acordo com a seguinte expressão (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001):

$$\sin z' = \frac{r_m}{r_m + h_m} \sin z, \quad (4.15)$$

onde r_m é o raio médio da Terra ($r_m \cong 6371$ km), h_m representa a altura média do pico do perfil vertical da densidade de elétrons da ionosfera, que geralmente varia entre 300 e 450 km, e z é o ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - el$, onde “ el ” é o ângulo de elevação do satélite). A figura 4.4 ilustra as quantidades envolvidas na equação (4.15).

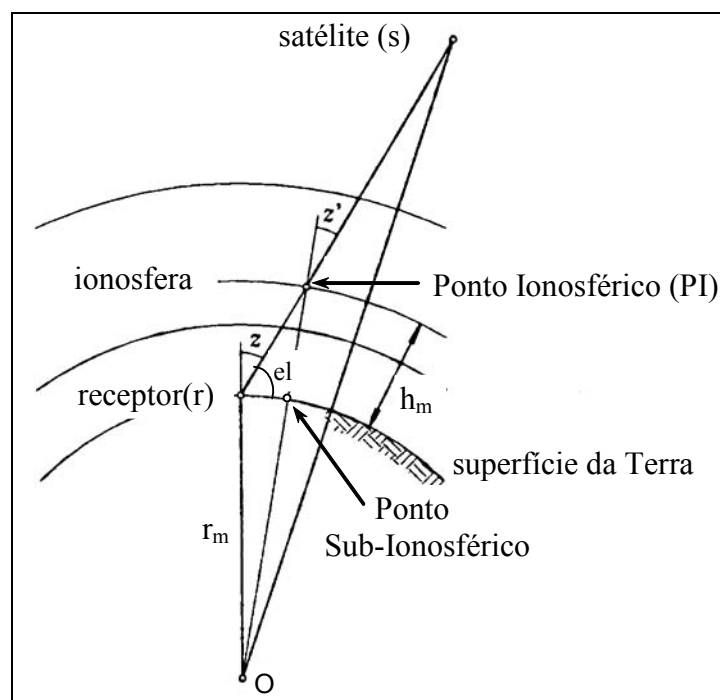


Figura 4.4 - Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera
Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2001)

A figura 4.5 mostra os valores da função de mapeamento geométrica padrão para diferentes ângulos de elevação do satélite e considerando h_m igual a 300, 350, 400 e 450 km.

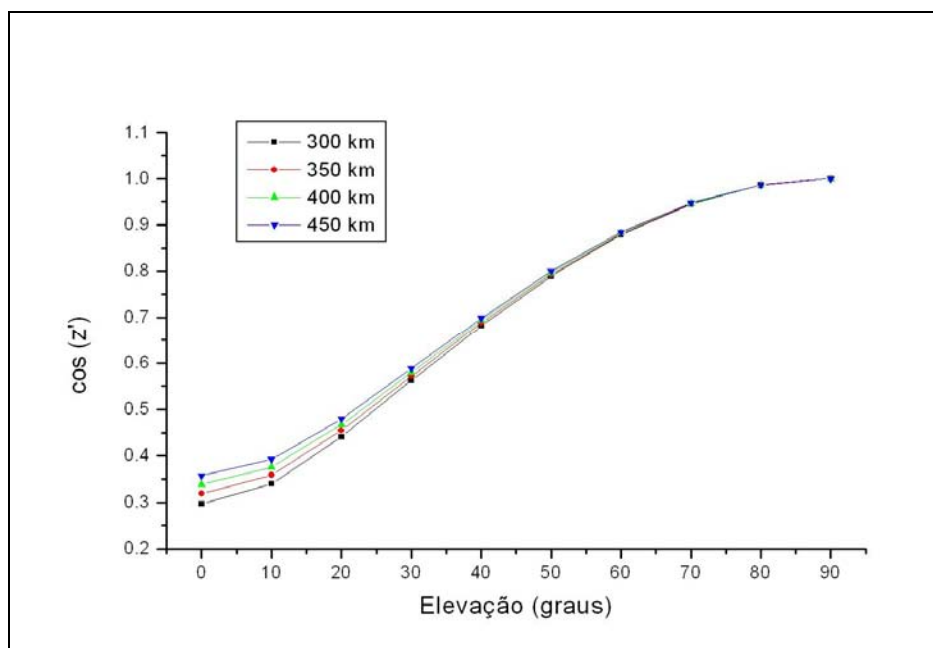


Figura 4.5 – Valores da função de mapeamento geométrica padrão

Pode-se notar na figura 4.5 que os valores da função geométrica padrão variam pouco com relação aos diferentes valores de h_m , sendo ainda que a diferença diminui conforme aumenta o ângulo de elevação. Odjik (2002) também salienta que para ângulos de elevação superior a 20 graus não existem diferenças significativas nos valores da função de mapeamento geométrica padrão para diferentes h_m .

A modelagem do TEC apresentada anteriormente, trata-se de um modelo chamado de 2D, uma vez que a ionosfera é aproximada por uma simples camada. Processos de modelagem mais complexos existem, como por exemplo, modelos 3D, onde se pode obter o perfil vertical da densidade de elétrons. Aos interessados nesse assunto podem consultar, por exemplo, García-Fernández (2004) e Liu (2004).

4.5 Semi-Diâmetro da Camada Ionosférica

Supondo que haja uma distribuição homogênea dos satélites, o semi-diâmetro da simples camada ionosférica é definido, basicamente, pelo máximo ângulo central, dado por (SCHAER, 1999):

$$\Delta z_{\max} = z_{\max} - z'_{\max}. \quad (4.16)$$

A figura 4.6 mostra uma ilustração da idéia do semi-diâmetro da camada ionosférica.

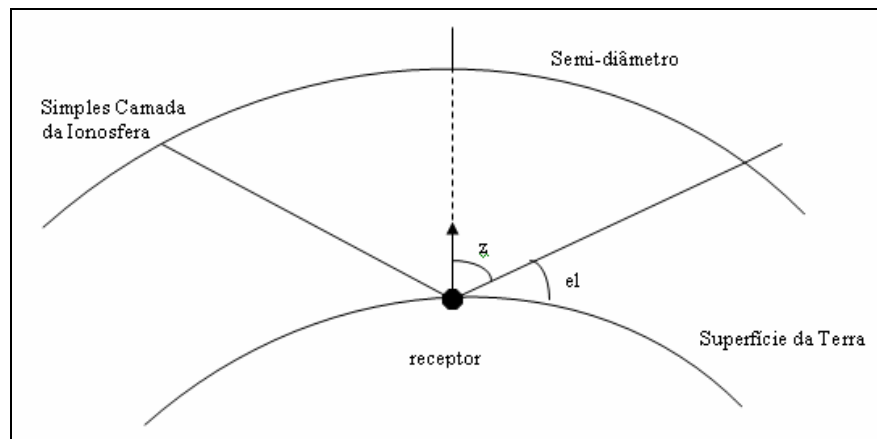


Figura 4.6 – Ilustração do Semi-diâmetro da camada ionosférica

Na tabela 4.1 são dados o semi-diâmetro em graus (Δz_{\max}), e o semi-diâmetro em quilômetros ($r_m \Delta z_{\max}$) resultantes da variação do ângulo zenital e ainda, considerando a altura média de pico da ionosfera (h_m) de 400 km.

Tabela 4.1 – Variação do semi-diâmetro da camada ionosférica.

| $z_{\max}(\text{°})$ | $z'_{\max}(\text{°})$ | $\Delta z_{\max}(\text{°})$ | $r_m \Delta z_{\max}(\text{km})$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 4,70 | 0,30 | 34 |
| 10 | 9,40 | 0,60 | 66 |
| 15 | 14,09 | 0,91 | 101 |
| 20 | 18,77 | 1,23 | 136 |
| 25 | 23,43 | 1,57 | 174 |
| 30 | 28,06 | 1,94 | 215 |
| 35 | 32,66 | 2,34 | 260 |
| 40 | 37,21 | 2,79 | 310 |
| 45 | 41,70 | 3,30 | 366 |
| 50 | 46,11 | 3,89 | 431 |
| 55 | 50,42 | 4,58 | 509 |
| 60 | 54,57 | 5,43 | 603 |
| 65 | 58,51 | 6,49 | 721 |
| 70 | 62,15 | 7,85 | 873 |
| 75 | 65,35 | 9,65 | 1073 |
| 80 | 67,92 | 12,08 | 1344 |
| 85 | 69,61 | 15,39 | 1711 |
| 90 | 70,20 | 19,80 | 2200 |

Por exemplo, de acordo com a tabela 4.1, se caso forem utilizados para o cálculo do TEC observações de um receptor GPS advindas de satélites com ângulo de elevação maior ou igual a 10° (ou seja, $z_{\max} = 80^\circ$), poderá se obter medidas do TEC de pontos ionosféricos localizados dentro de uma camada ionosférica de semi-diâmetro igual a 1344 km. Imaginando que se tenham dois satélites em direções opostas e com ângulo de elevação de 20° , neste caso as duas medidas de TEC obtidas estarão separadas por uma distância de aproximadamente 1746 km na camada ionosférica, ou seja, as condições ionosféricas podem ser totalmente diferentes nos dois pontos mesmo advindos de dados de um mesmo receptor.

4.6 Cálculo da Latitude e Longitude Geográfica do Ponto Ionosférico

Os valores do TEC calculados são obtidos para um ponto na camada ionosférica, denominado de ponto ionosférico. O ponto ionosférico é a intersecção entre o vetor satélite/receptor e a simples camada que representa a ionosfera.

A localização do ponto ionosférico pode ser calculada em função da latitude e da longitude geográfica da estação (receptor), do azimute e do ângulo de elevação do satélite. Desta forma, a latitude e longitude geográfica do ponto ionosférico são calculados da seguinte forma (EL GIZAWY, 2003):

$$\phi_{PI} = \text{sen}^{-1} [\text{sen} \phi_r \cos \psi + \cos \phi_r \text{sen} \psi \cos Az], \quad (4.17)$$

$$\lambda_{PI} = \lambda_r + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \psi \text{sen} Az}{\cos \phi_{PI}} \right), \quad (4.18)$$

sendo:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - el - \text{sen}^{-1} \left(\frac{r_m}{r_m + h_m} \cos(el) \right), \quad (4.19)$$

onde:

ϕ_{PI} e λ_{PI} - latitude e longitude do ponto ionosférico;

ϕ_r e λ_r - latitude e longitude da estação (receptor);

el - ângulo de elevação do satélite;

Az - azimute do satélite;

r_m - raio médio da Terra; e

h_m - altura média do pico da camada ionosférica.

Como exemplo, a figura 4.7 mostra a localização dos pontos ionosféricos, durante um período de 24 horas, obtidos a partir de observações de quatro estações GPS da RBMC para o dia 29 de outubro de 2003 (a localização de cada estação pode ser verificada na figura 5.1). Para cada ponto ionosférico uma medida de TEC pode ser obtida.

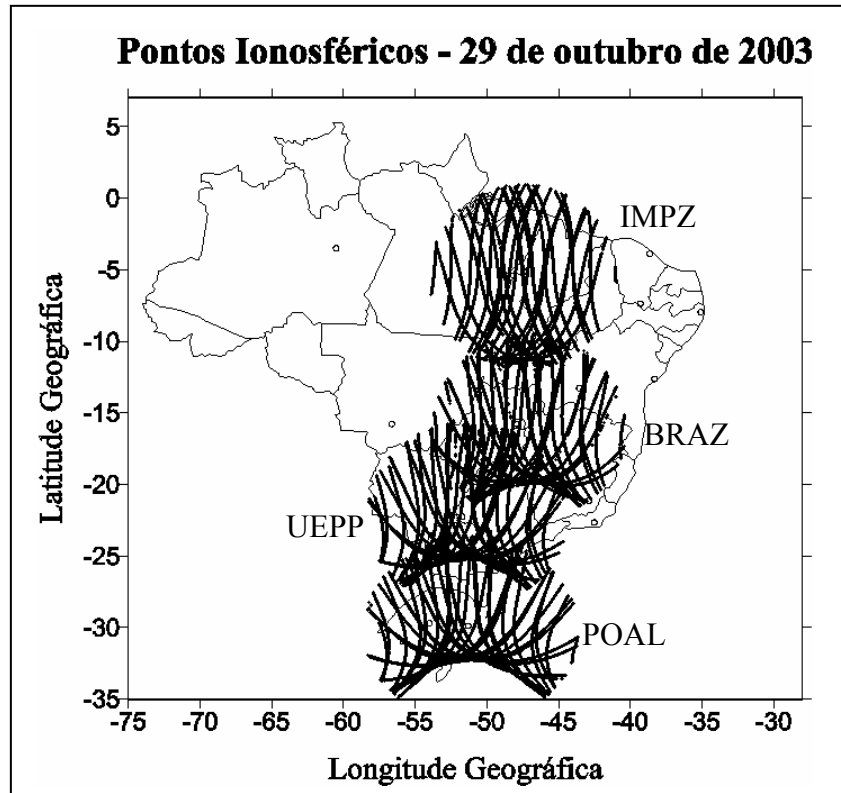


Figura 4.7 – Pontos ionosféricos obtidos de observações de 4 estações GPS da RBMC para 29 de outubro de 2003.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os experimentos e os resultados obtidos na pesquisa. O primeiro conjunto de experimentos refere-se ao estudo do comportamento do TEC a partir de dados GPS em um período de máxima atividade solar do ciclo 23, considerando dias com atividade geomagnética classificada como calma. Em seguida, são apresentados e discutidos resultados de experimentos que estudaram o comportamento do TEC e as modificações na acurácia do posicionamento por ponto em períodos perturbados. Nestes experimentos o sinergismo com outras áreas do conhecimento, em particular com a Aeronomia, pode ser verificada a partir da troca de conhecimentos e de dados.

O último experimento mostra a performance e as limitações dos mapas globais de VTEC do IGS aplicados no posicionamento por ponto na região brasileira. Neste experimento também é mostrada e discutida a variação do erro do posicionamento por ponto na região brasileira em período de máxima atividade solar, mostrando a correlação com os resultados obtidos nos experimentos anteriores.

5.1 Programa Computacional Desenvolvido para Estudo do TEC com GPS

5.1.1 Programa CALTEC

O CALTEC calcula valores do VTEC, e suas respectivas posições (latitude e longitude geográfica dos pontos ionosféricos) utilizando dados GPS de vários receptores de dupla frequência no formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*). A observável utilizada para o cálculo do TEC é a pseudodistância filtrada pela fase.

Os valores calculados são organizados em arquivos horários (abrangendo valores de VTEC calculados em todas as estações no período de 30 minutos antes e 30

minutos após o instante considerado como referência), compondo, um total de 24 arquivos por dia, que podem ser usados como amostras para a geração de mapas do VTEC para uma determinada região. Os arquivos recebem o nome do instante de referência. Por exemplo, para um dado dia o arquivo referente a 0 hora e 30 minutos (UT) irá conter valores de VTEC com suas respectivas posições calculadas entre 0 e 1 hora UT; o arquivo referente a 1 hora e 30 minutos (UT) irá conter valores entre 1 e 2 horas UT; e assim sucessivamente até o arquivo referente as 23 horas e 30 minutos (UT) que conterá valores entre 23 e 24 horas UT. Este tipo de estratégia de considerar observações de 30 minutos antes e depois também é utilizado, por exemplo, por Komjathy (1997).

Com os arquivos fornecidos pelo CALTEC, que contém uma amostra contendo valores de VTEC com suas respectivas posições, pode-se utiliza-los para realizar interpolações para a geração de um grid de VTEC da região de interesse.

Antes do processamento, o programa CALTEC permite ao usuário informar a partir de qual ângulo de elevação dos satélites serão consideradas as observações, a altura da camada ionosférica (h_m) a ser adotada para a função de mapeamento geométrica padrão, os satélites que participarão do processamento, qual a hora universal de início e término do processamento e informar o intervalo de determinações dos valores. Sabe-se que o atraso instrumental interferência dos satélites influenciam na determinação do VTEC. O CALTEC busca eliminar essa influência a partir da obtenção dos valores do atraso instrumental dos satélites contidos nas efemérides transmitidas. Para uma correção mais acurada, pode-se utilizar um arquivo IONEX do IGS do dia requerido, pois, este também contém uma estimativa do valor do atraso instrumental dos satélites. Ou seja, o CALTEC pode minimizar a influência do atraso instrumental interferência dos satélites nos valores de VTEC, bastando fornecer um arquivo de efemérides transmitidas ou um arquivo IONEX do IGS do dia requerido no processamento. Se caso o usuário tiver o conhecimento de uma estimativa do

atraso instrumental interfrequência de cada receptor envolvido no processamento, este valor também pode ser considerado no processamento para minimizar a sua influência na determinação dos valores de VTEC.

Vale salientar, que mapas do VTEC produzidos nesta pesquisa foram comparados com mapas produzidos por Fedrizzi et al. (2001) e Fedrizzi (2003). Uma boa concordância foi observada. Detalhes podem ser encontrados em Matsuoka e Dal Poz (2004). Também, mapas de VTEC produzidos nesta pesquisa já contribuíram com pesquisas relacionadas à área de Aeronomia do INPE (BATISTA et al., 2006). Verificou-se a concordância entre o comportamento do VTEC representado nos mapas produzidos e o comportamento dos valores de frequência crítica (f_oF_2) advindas de Digissondas, como será verificada nos experimentos que se seguem.

5.2 Mapas do VTEC para o Brasil utilizando dados GPS da RBMC e IGS

Diversos centros na Europa e na América do Norte, produzem mapas do VTEC utilizando dados GPS, dentre os quais se podem citar: o CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*), o *European Space Operations Center* (ESOC), a Universidade de New Brunswick (UNB), o Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), ente outros.

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) já produziu mapas do VTEC para a região Sul Americana utilizando dados GPS. Para a obtenção dos valores do VTEC utilizou-se o programa UNB-IMT (UNB *Ionospheric Modelling Technique*) desenvolvido por Komjathy (1997) na Universidade de New Brunswick. Os resultados obtidos são apresentados em Fedrizzi et al. (2001) e Fedrizzi (2003).

Outro trabalho brasileiro foi realizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, onde foi produzida uma série histórica do VTEC para cada

estação GPS da RBMC de 1997 a 2001 (FONSECA JUNIOR, 2002). Os valores do VTEC foram obtidos utilizando o programa científico BERNESE GPS SOFTWARE (HUGENTOBLE et al., 2001) que foi desenvolvido no Instituto Astronômico da Universidade de Berna na Suíça.

O Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) também tem produzido mapas do VTEC utilizando os valores disponibilizados nos arquivos IONEX do IGS e também a partir da utilização do modelo de Klobuchar com os coeficientes advindos das efemérides transmitidas (OLIVEIRA, 2003) (OLIVEIRA et al., 2003) (MORAIS et al., 2004).

A FCT/UNESP já realizou suas primeiras experiências para a produção de mapas do VTEC para a região brasileira (DAL POZ, 2002) (CAMARGO e DAL POZ, 2002). Os mapas produzidos mostraram a variação diária e sazonal da ionosfera, porém, nenhuma variação latitudinal do VTEC, e nem a presença da anomalia equatorial, foi observada. Para a produção destes mapas o VTEC da ionosfera foi representado analiticamente por uma série do tipo Fourier. Os coeficientes desta série foram estimados utilizando o programa Mod_Ion (CAMARGO, 1999) tendo como observáveis GPS as coletadas nas estações da RBMC durante um período de 24 horas. O fato de se estimar apenas um conjunto de coeficientes da série para representar o dia inteiro e também para toda a região brasileira pode ter provocado uma alta suavização nos mapas produzidos e, desta forma, comprometeu qualquer variação latitudinal do VTEC.

A seguir serão apresentados os resultados de experimentos realizados para elaborar mapas do VTEC para o Brasil utilizando observações GPS de receptores de dupla frequência da RBMC e da rede sul americana do IGS. Os dados do VTEC foram obtidos a partir do uso do programa CALTEC desenvolvido nesta pesquisa.

5.2.1 Estudo de caso para o ano de 2001 (período de máxima atividade solar do ciclo 23)

Os mapas regionais da ionosfera para o Brasil foram produzidos de modo a mostrar e estudar as variações espaciais e temporais do VTEC durante o período de 24 horas, bem como o seu comportamento mensal (sazonal), tudo relacionado a um período de máxima atividade solar do ciclo 23. Baseado no que já foi abordado, sabe-se que, estudando o comportamento do TEC se estará estudando também o comportamento do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, devido à proporcionalidade entre ambos.

Os dados GPS da RBMC e do IGS usados para o cálculo do VTEC abrangem cinco dias de cada mês do ano de 2001. Os cinco dias de cada mês foram escolhidos com base na atividade geomagnética (verificando-se o índice A_p diário); correspondem aos cinco dias com menor atividade geomagnética de cada mês, todos sem influência de tempestades geomagnéticas, ou seja, buscou-se estudar o comportamento do TEC em períodos com atividade geomagnética calma. Experimentos que mostram as influências de períodos com tempestades geomagnéticas são apresentados na seção 5.3.

As estações GPS da RBMC e do IGS que participaram dos experimentos são mostradas na figura 5.1. Os dados da RBMC foram obtidos no site oficial do IBGE e os da rede IGS no site oficial do IGS, ambos com acesso livre.



Figura 5.1 – Estações da RBMC e do IGS que participaram do experimento de produção de mapas do VTEC com base na disponibilidade de estações das redes em 2001

No processamento dos dados GPS no programa CALTEC para a obtenção dos valores de VTEC foram utilizadas as pseudodistâncias filtradas pelas fases. Só foram consideradas as observações coletadas com ângulo de elevação maior do que 20 graus. Os valores do VTEC calculados foram corrigidos da influência do atraso instrumental interfrequência dos satélites e dos receptores. Os valores do atraso instrumental interfrequência dos satélites foram obtidos dos arquivos IONEX produzidos pelo CODE. Os atrasos instrumentais interfrequências de cada receptor foram obtidos utilizando preliminarmente o programa Mod_Ion (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003) desenvolvido na FCT/UNESP.

Os mapas horários do VTEC para cada dia (5 dias por mês) foram gerados

no programa Surfer utilizando os arquivos de saída do programa CALTEC, que contém valores de VTEC de vários pontos ionosféricos. O método de interpolação utilizado para a geração do *grid* foi a Krigagem (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Um exemplo na literatura do uso da Krigagem para a elaboração de mapa de VTEC é encontrado em Blanch et al. (2004). É interessante comentar, que se encontra em andamento um projeto de Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), onde se pretende implementar um programa computacional para a geração de *grids* de VTEC utilizando amostras de VTEC obtidos com dados GPS (AGUIAR, 2006), objetivando, assim, tornar o processo mais autônomo futuramente.

Para cada dia foram elaborados 24 mapas horários de VTEC, sendo 5 dias para cada mês, correspondendo a 120 mapas por mês, e 1440 mapas no total. Depois, para cada mês, foram feitos mapas horários médios, que nada mais são do que uma média entre os valores de VTEC dos cinco mapas horários (5 dias) de cada mês. Logo, o produto final é um conjunto de mapas horários médios de VTEC para cada mês de 2001. Objetivou-se apresentar e analisar a variação espacial, horária e mensal do VTEC na região brasileira durante um período de máxima atividade solar advindos de dados GPS da RBMC. Para uma melhor representação dados GPS da rede do IGS da América do Sul também foram incluídos no processamento. As figuras 5.2 a 5.25 apresentam os mapas horários médios de VTEC (em TECU) para todos os meses de 2001. A hora local (HL) apresentada nos mapas é referente ao meridiano de 45° W. É importante salientar que os mapas de VTEC produzidos possuem limitações nas regiões oceânicas, devido ao fato do número reduzido de pontos ionosféricos nessas regiões.

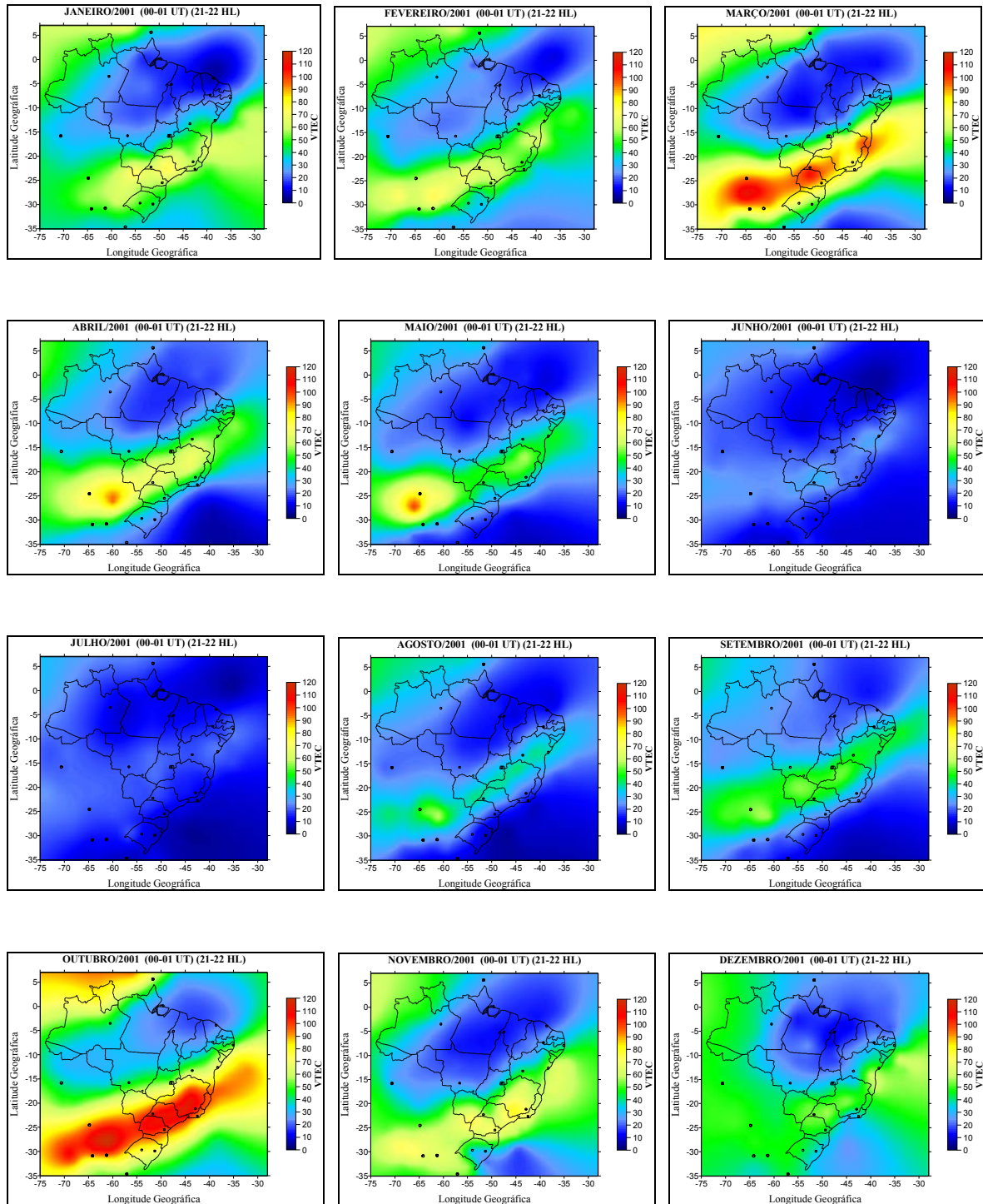


Figura 5.2 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (00-01 UT) (21-22 HL)

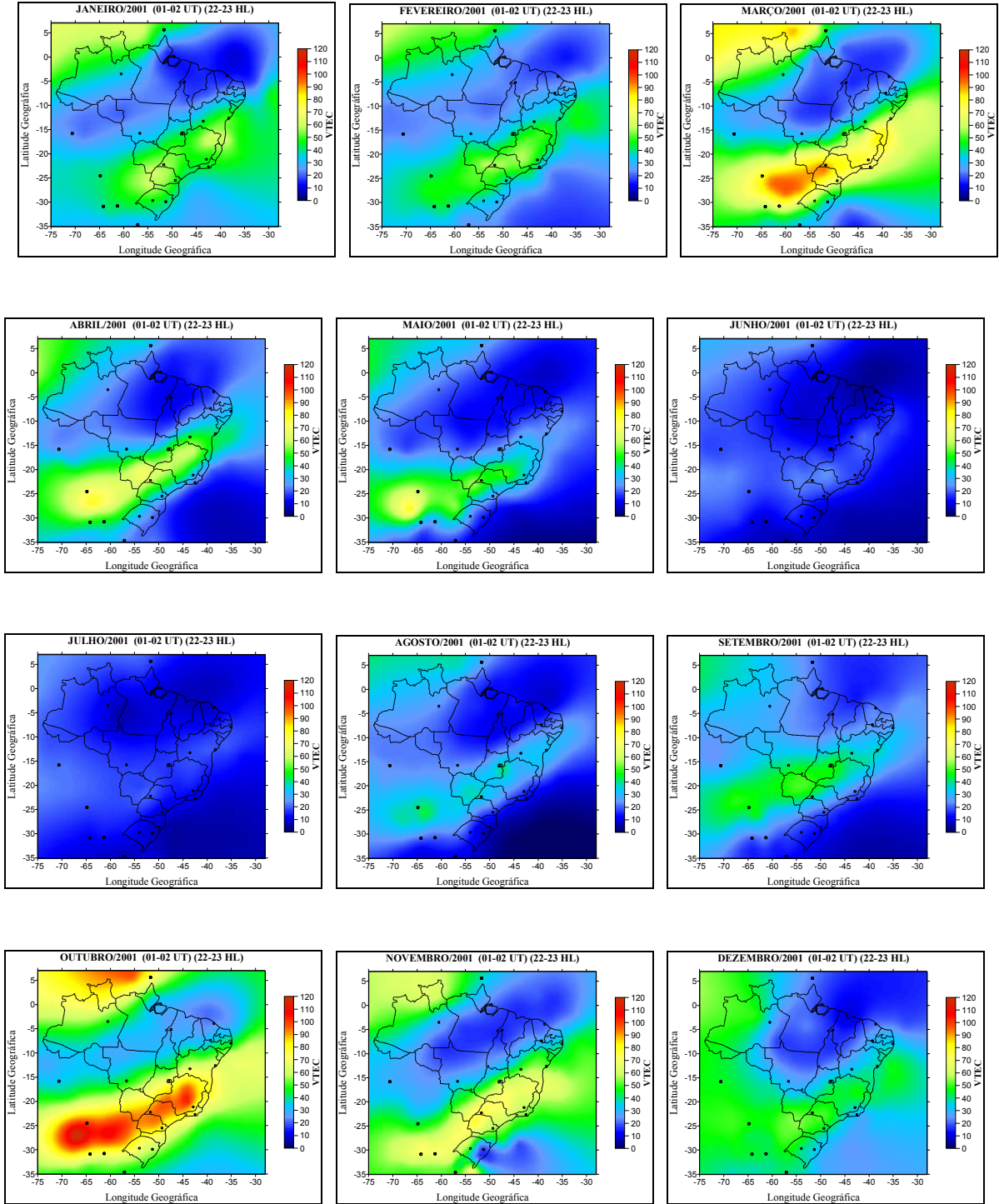


Figura 5.3 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (01-02 UT) (22-23 HL)

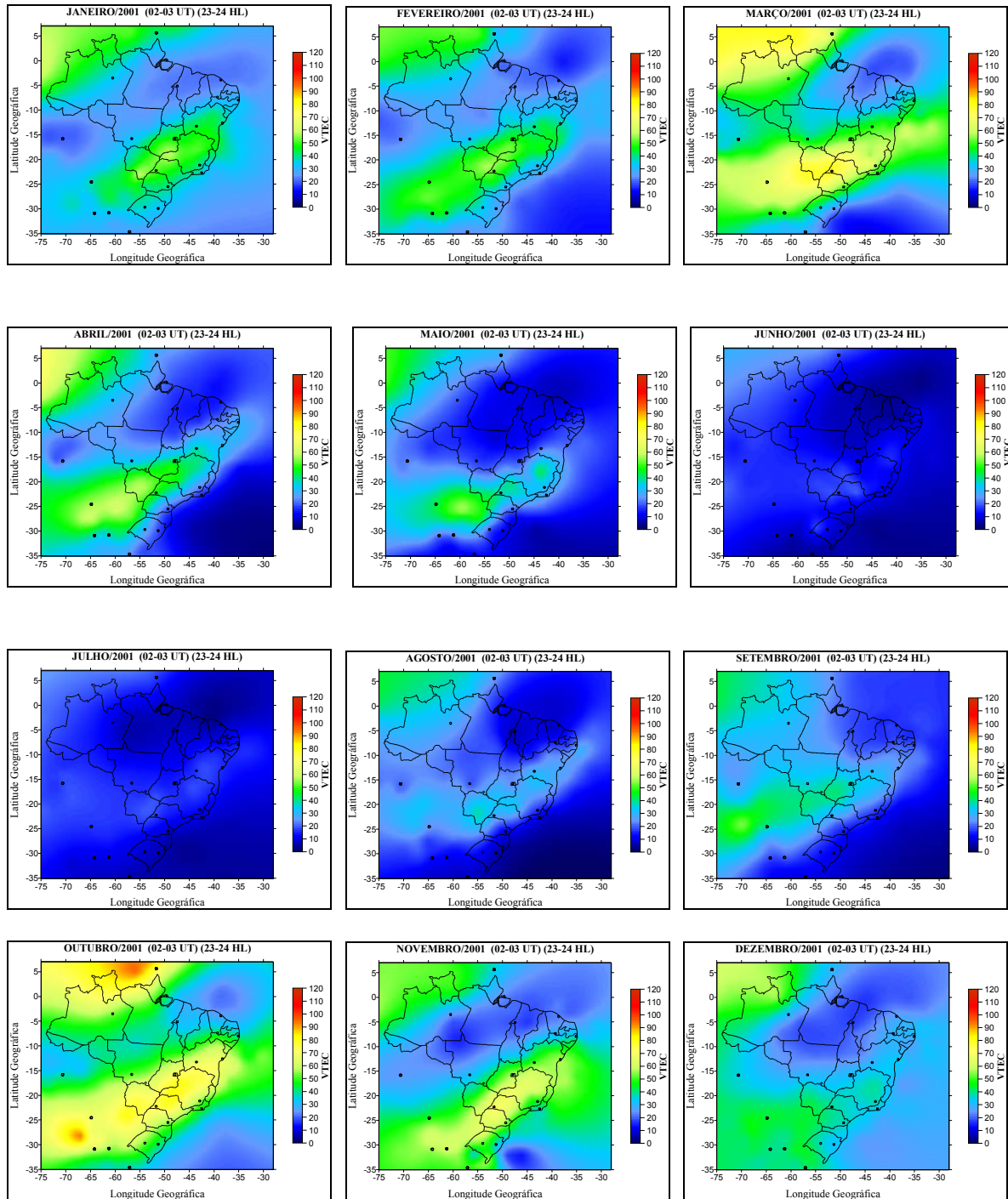


Figura 5.4 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (02-03 UT) (23-24 HL)

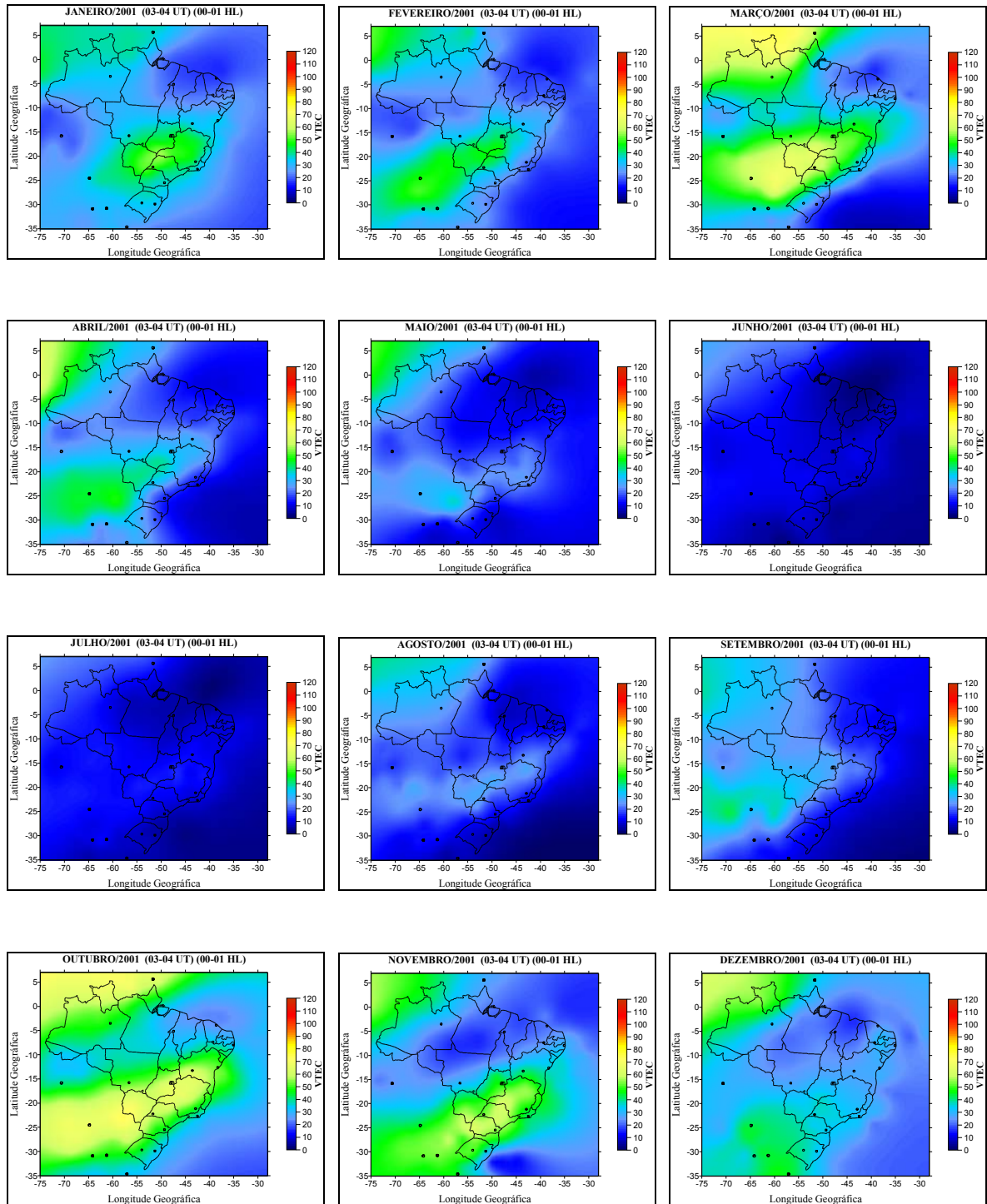


Figura 5.5 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (03-04 UT) (00-01 HL)

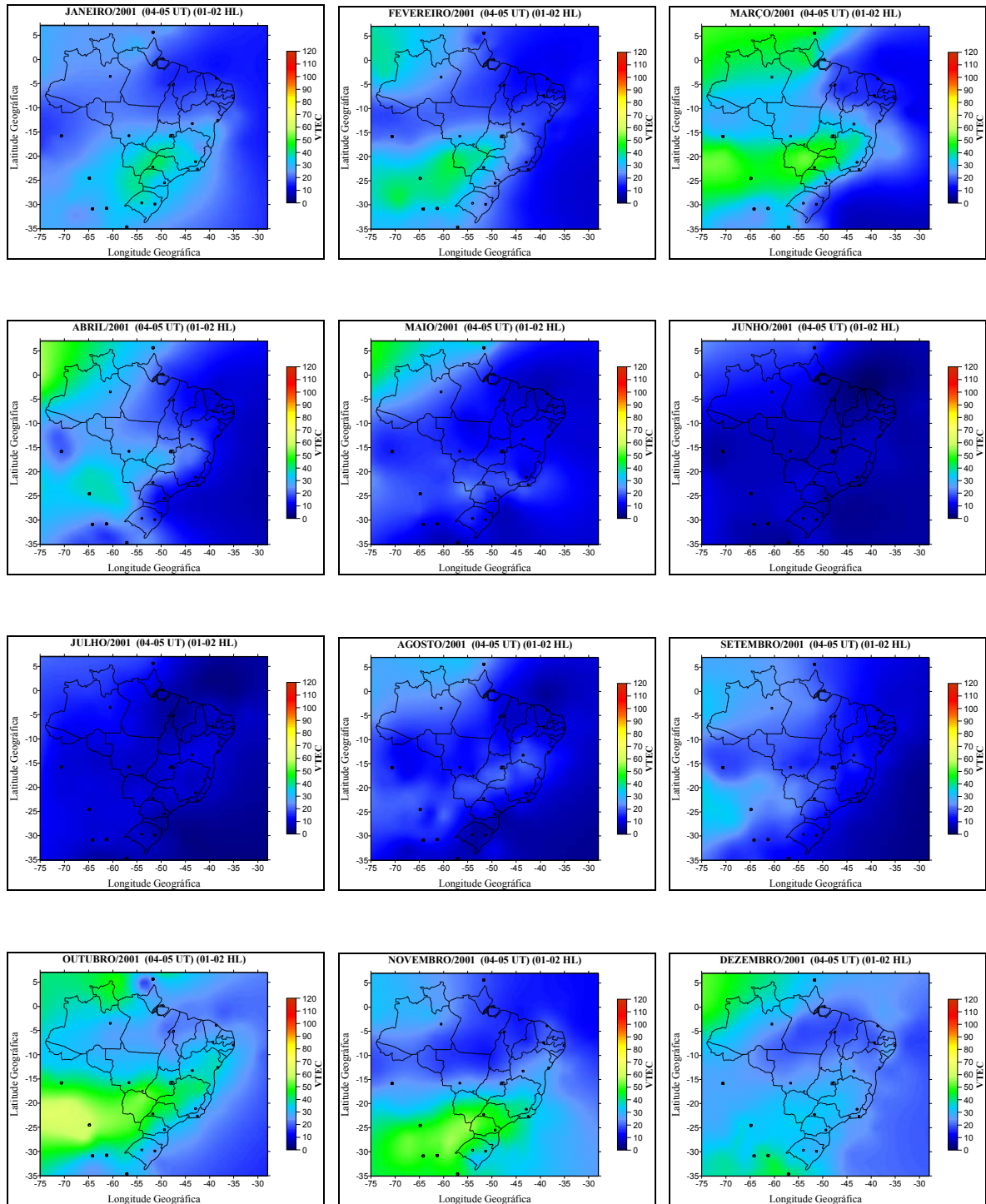


Figura 5.6 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (04-05 UT) (01-02 HL)

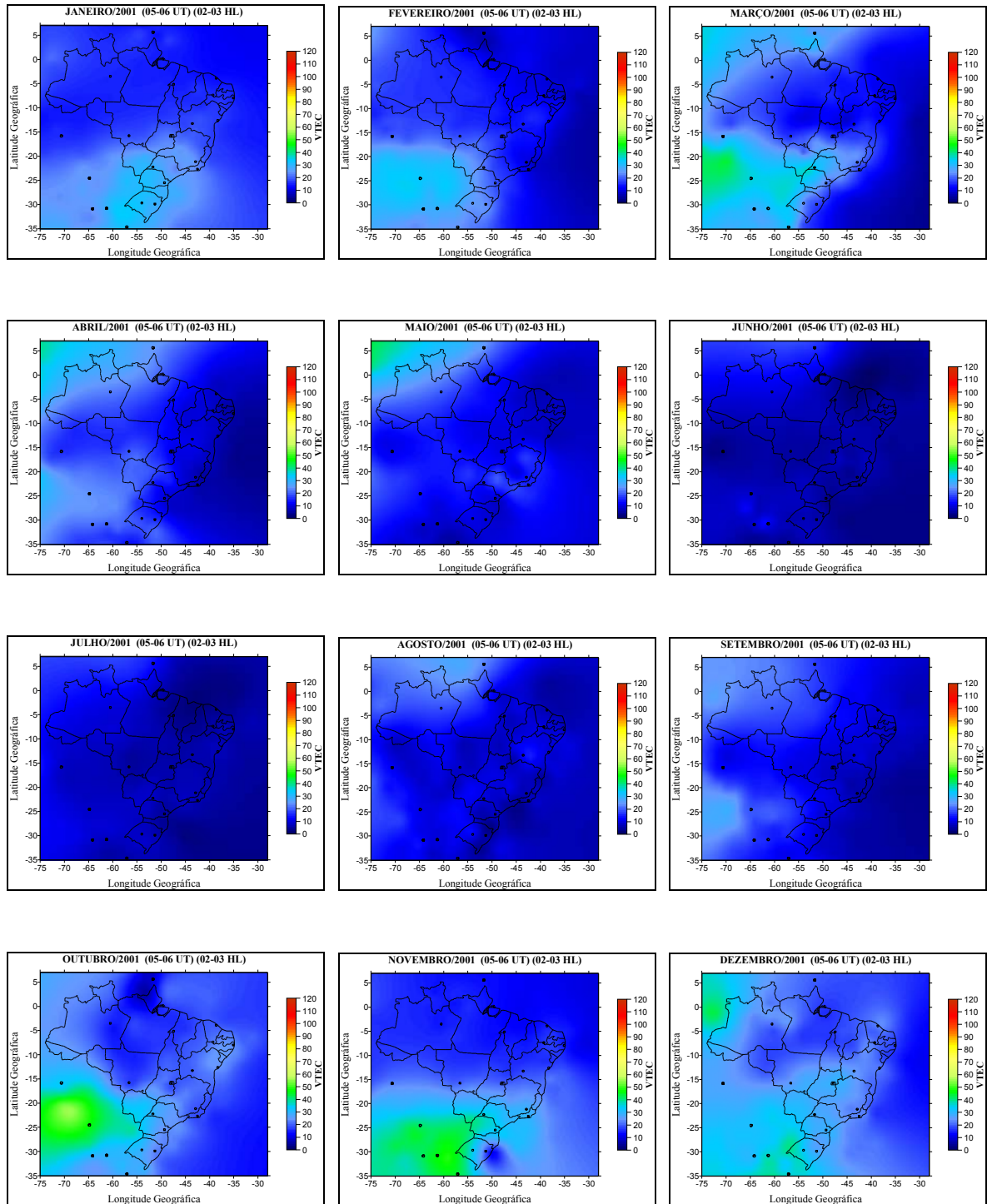


Figura 5.7 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (05-06 UT) (02-03 HL)

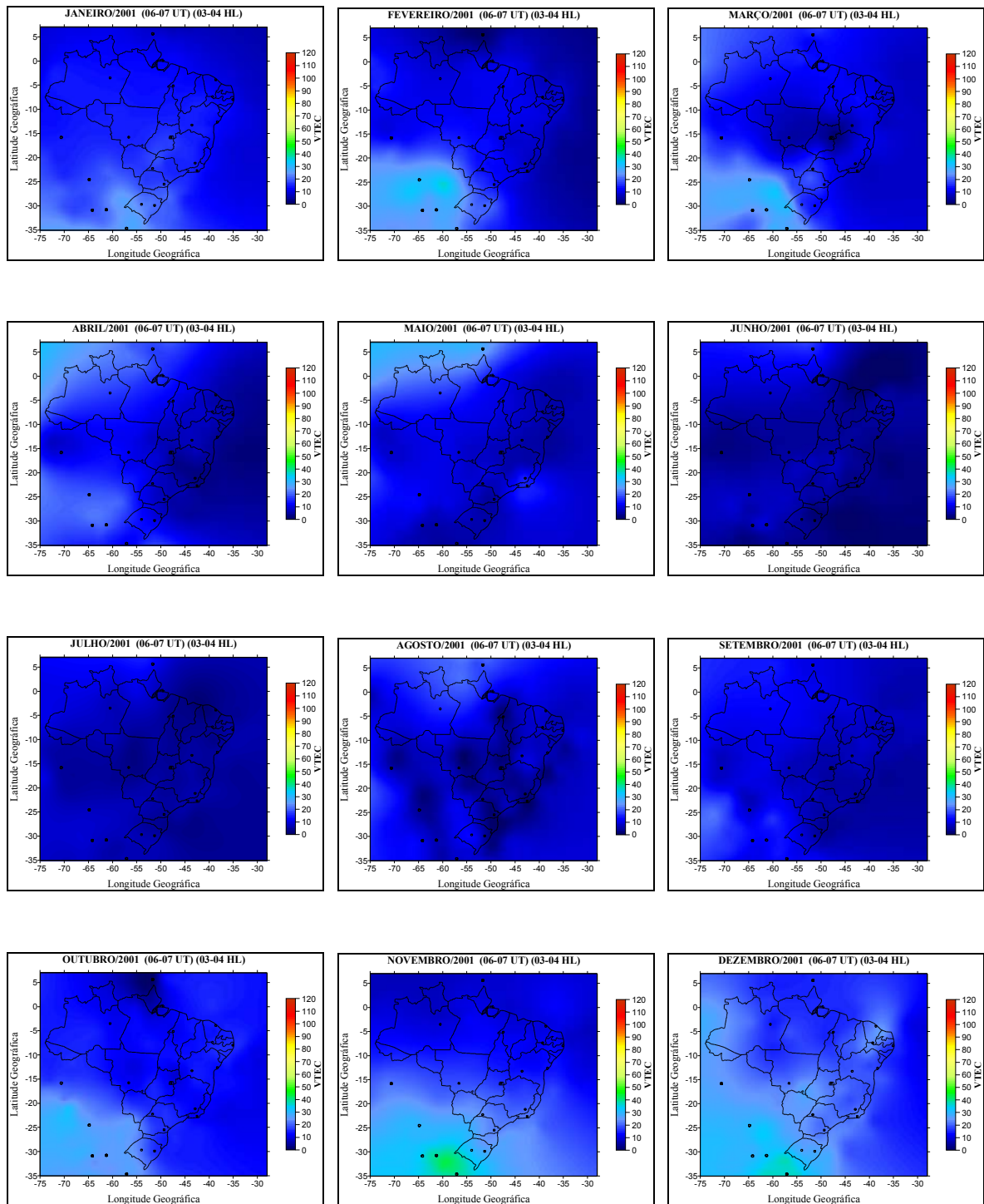


Figura 5.8 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (06-07 UT) (03-04 HL)

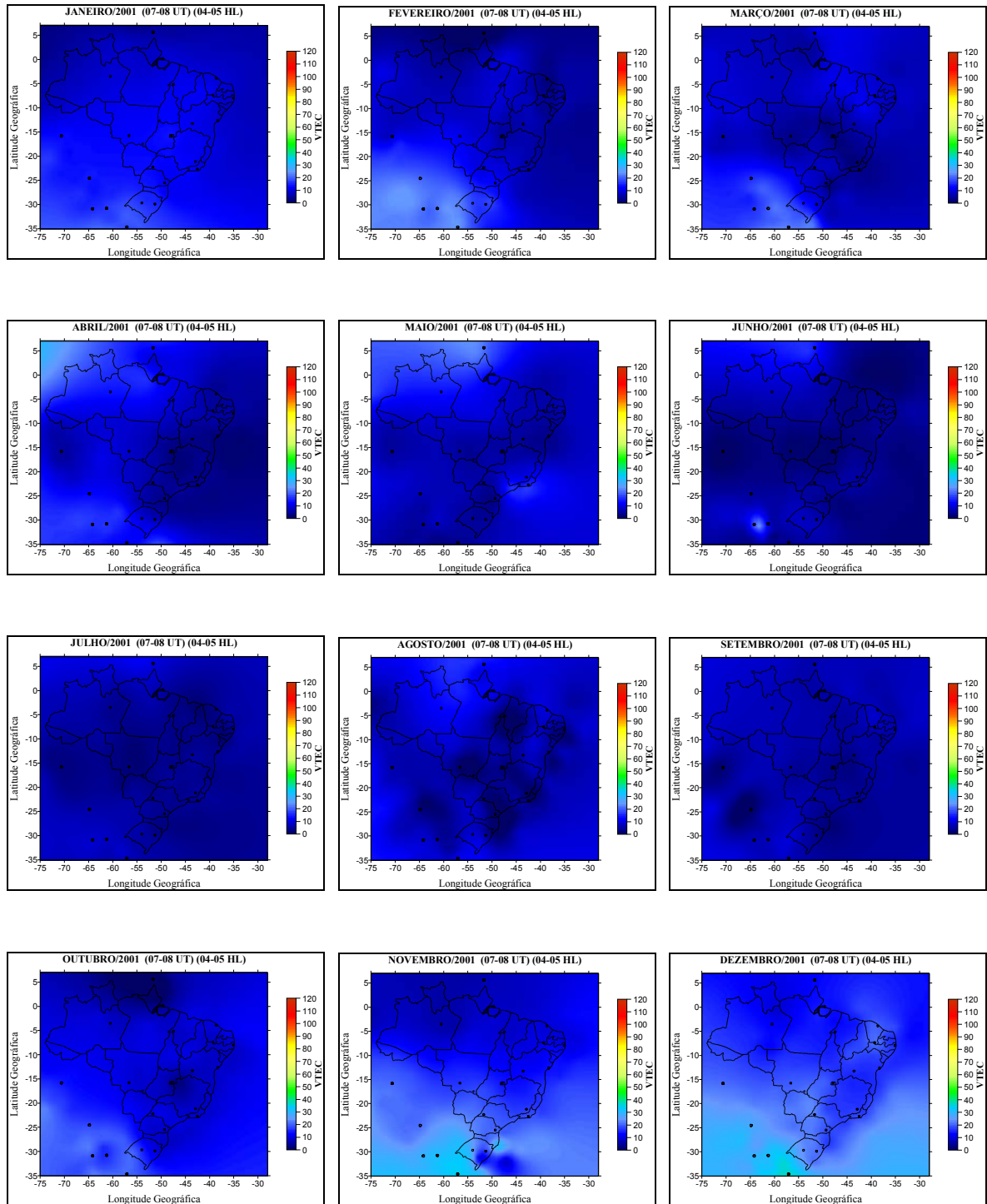


Figura 5.9 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (07-08 UT) (04-05 HL)

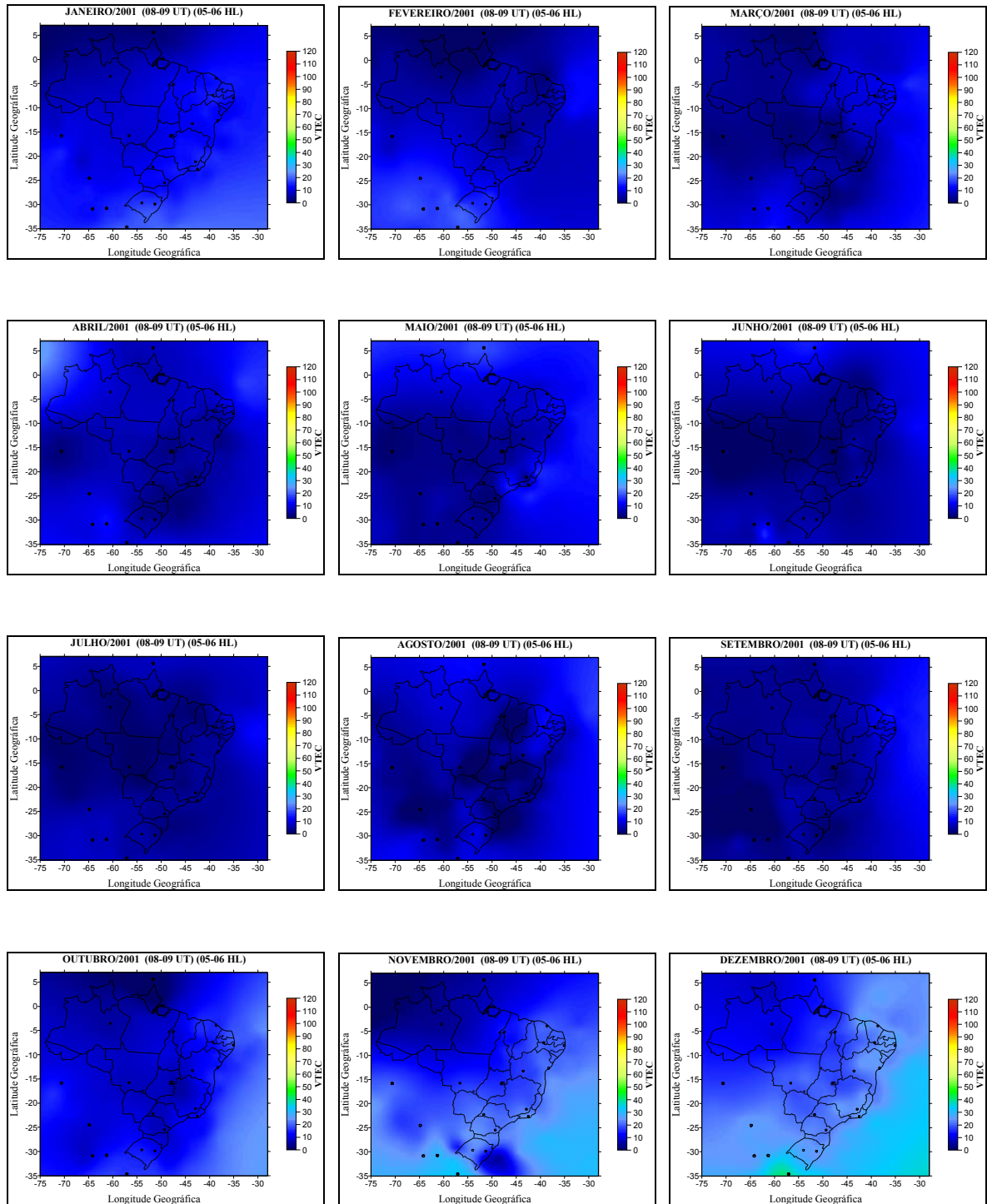


Figura 5.10 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (08-09 UT) (05-06 HL)

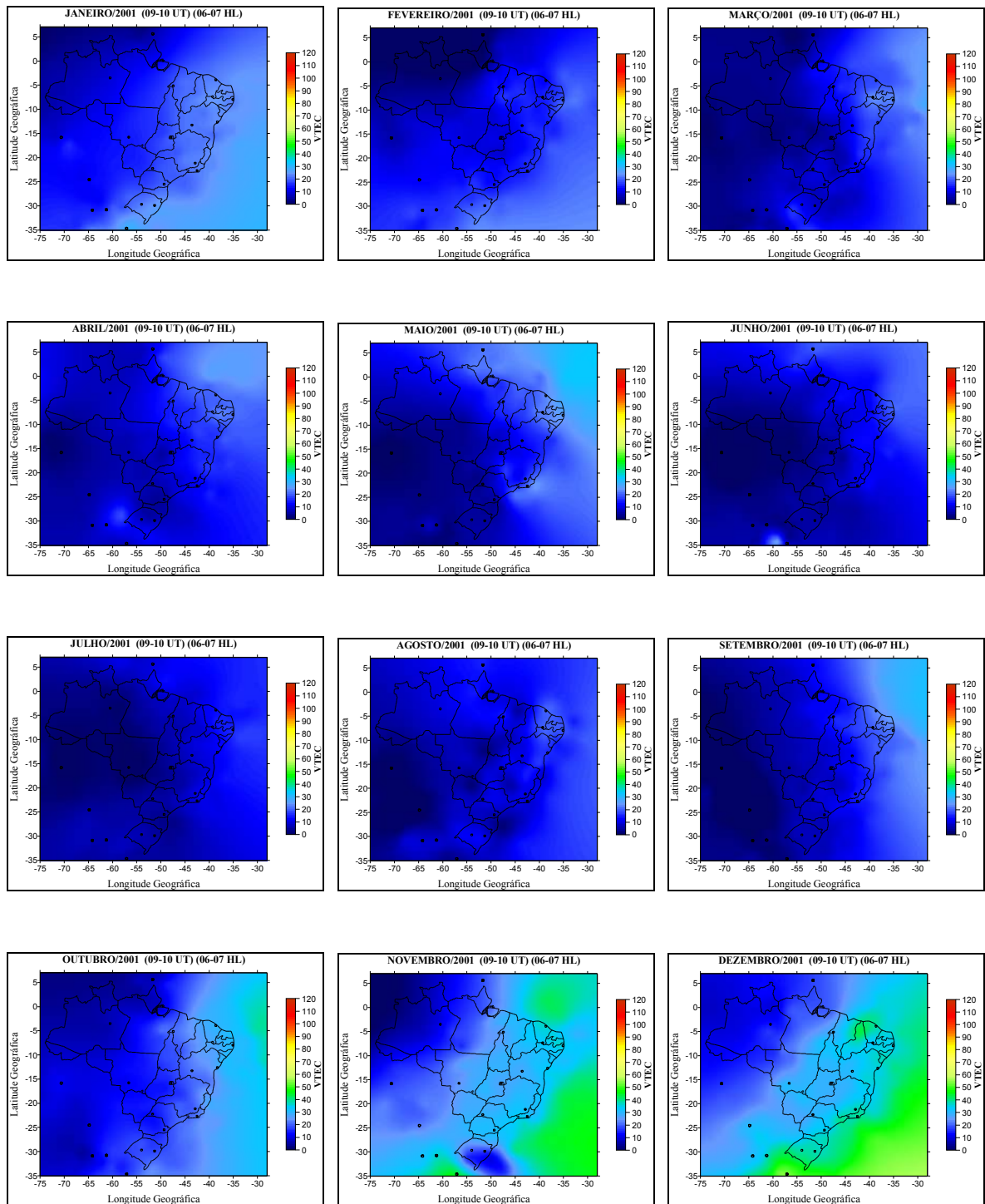


Figura 5.11 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (09-10 UT) (06-07 HL)

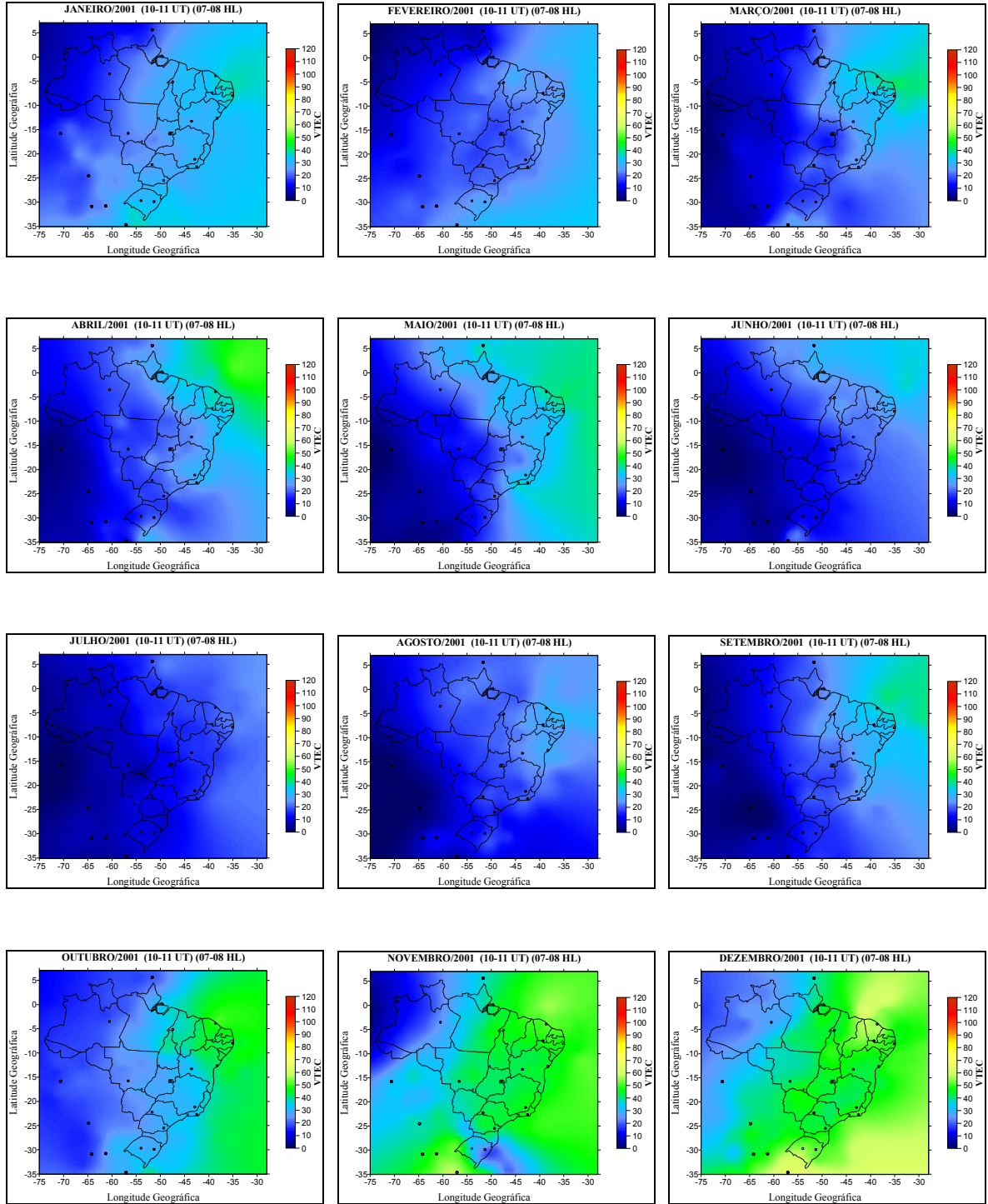


Figura 5.12 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (10-11 UT) (07-08 HL)

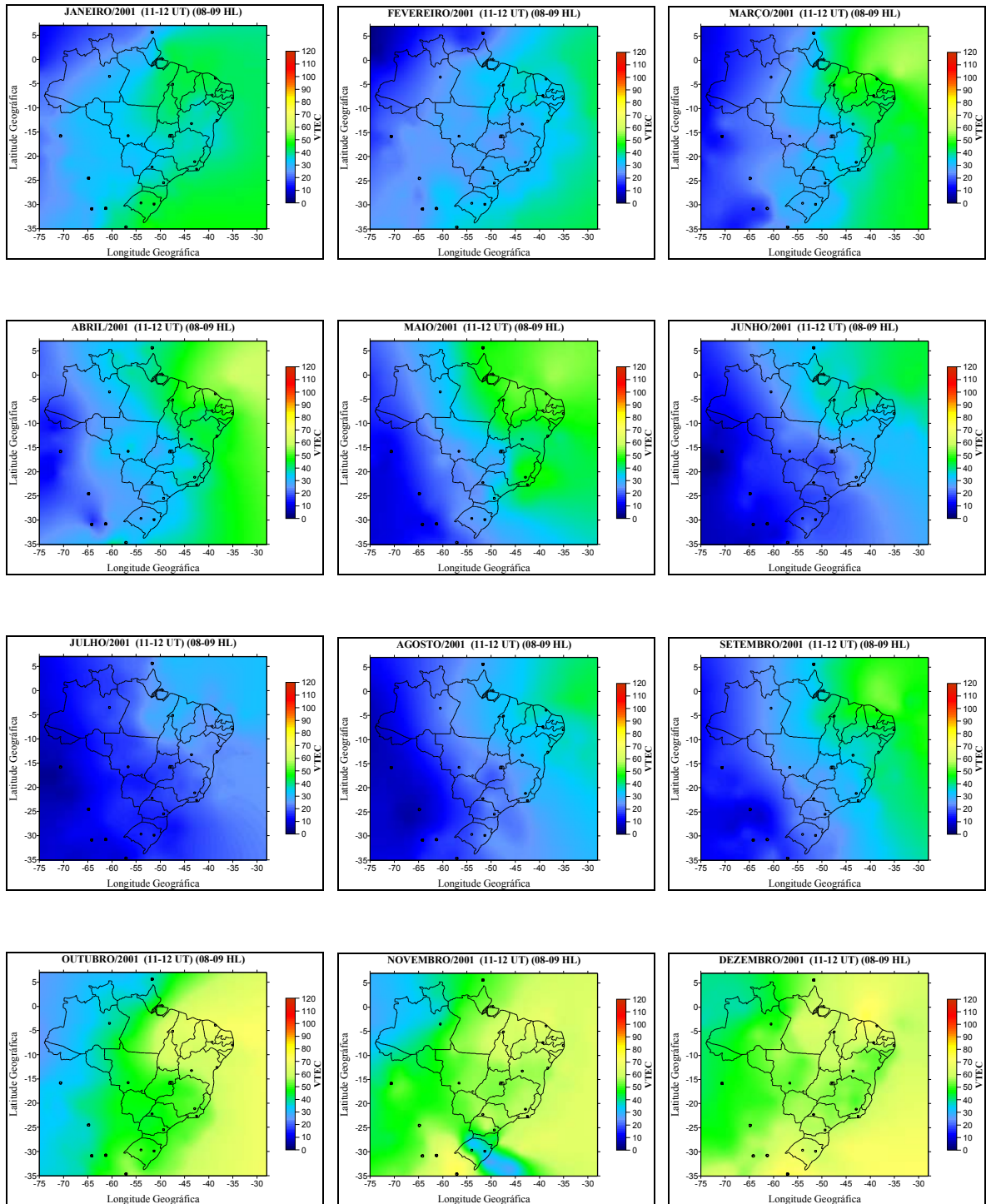


Figura 5.13 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (11-12 UT) (08-09 HL)

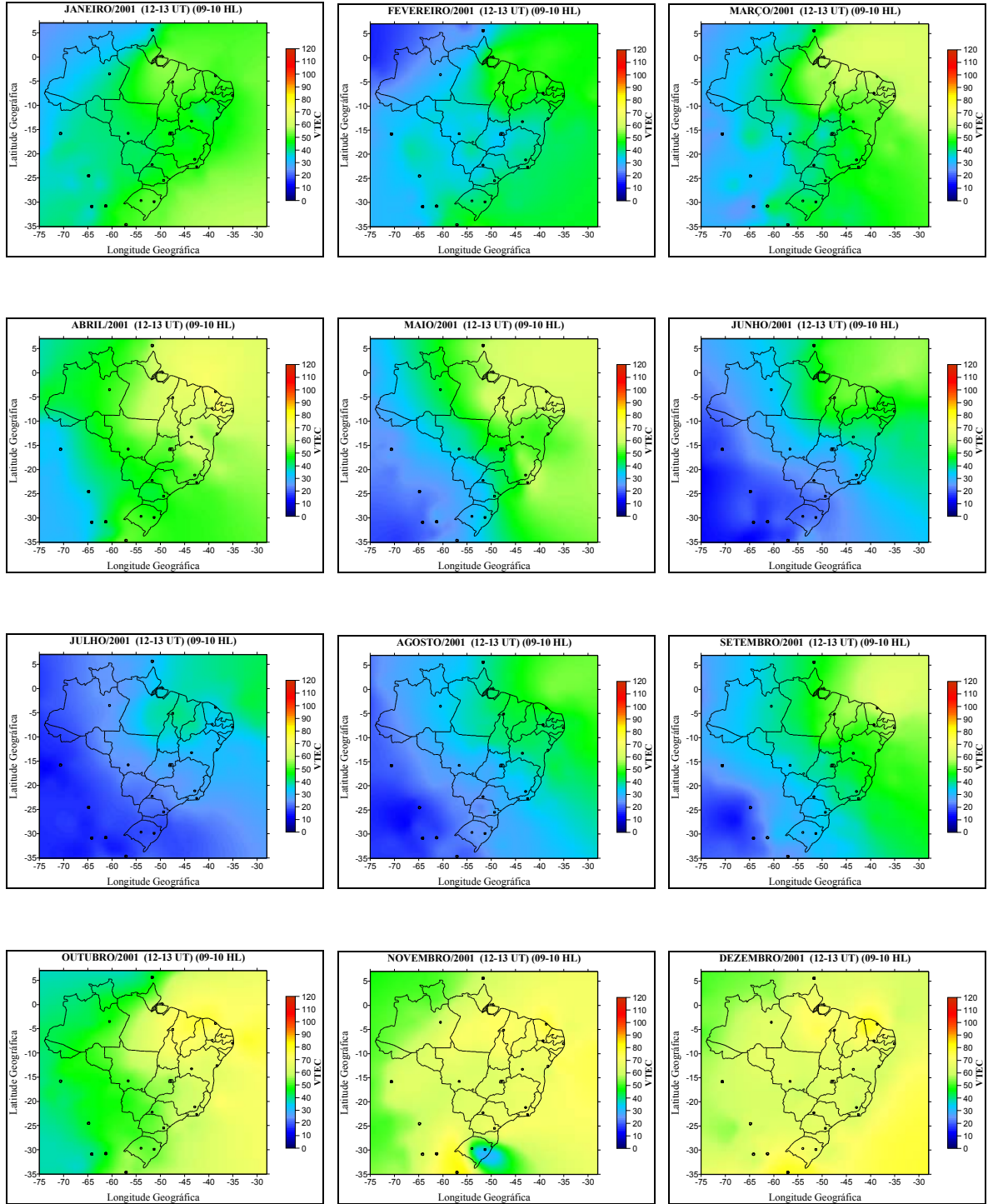


Figura 5.14 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (12-13 UT) (09-10 HL)

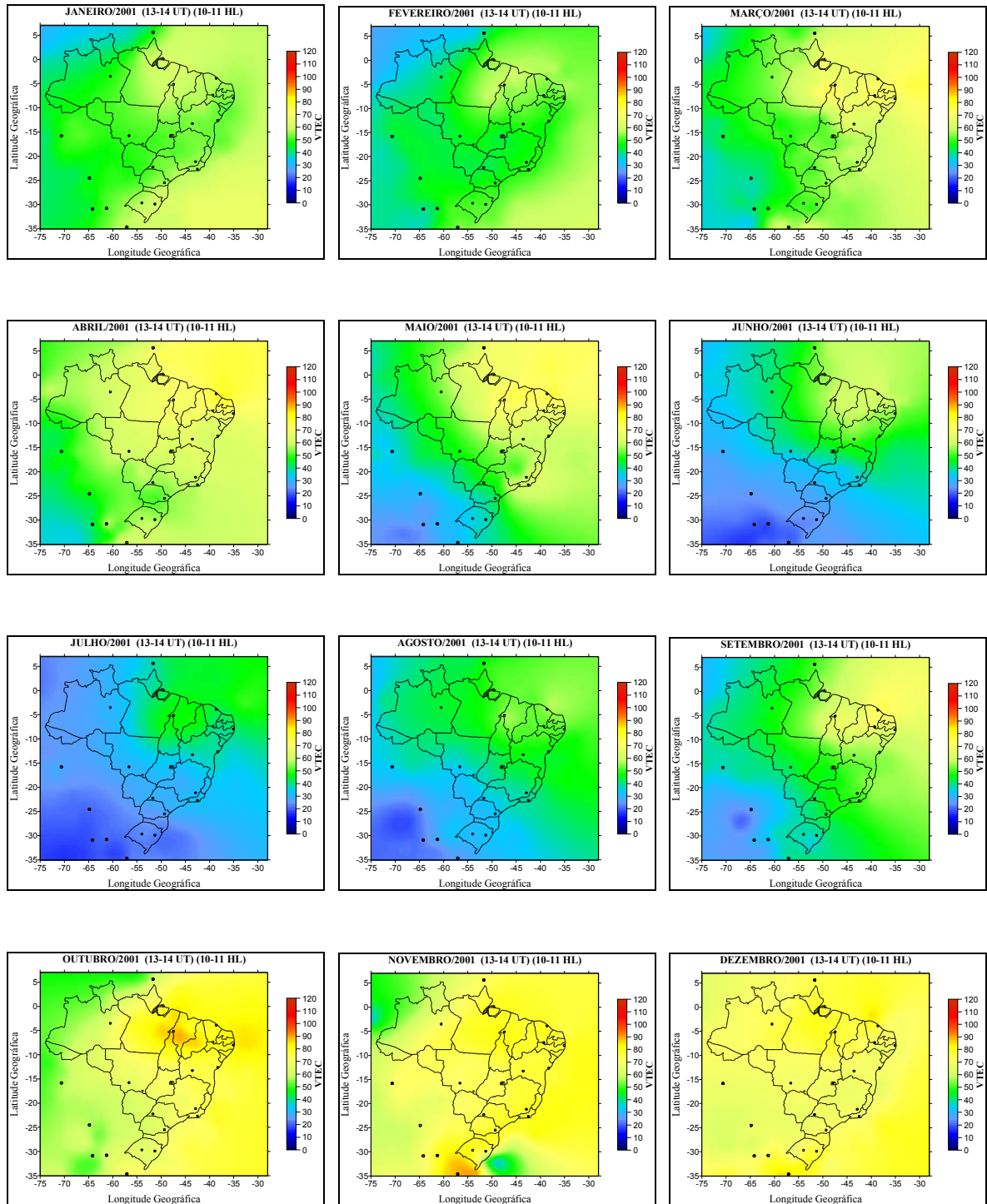


Figura 5.15 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (13-14 UT) (10-11 HL)

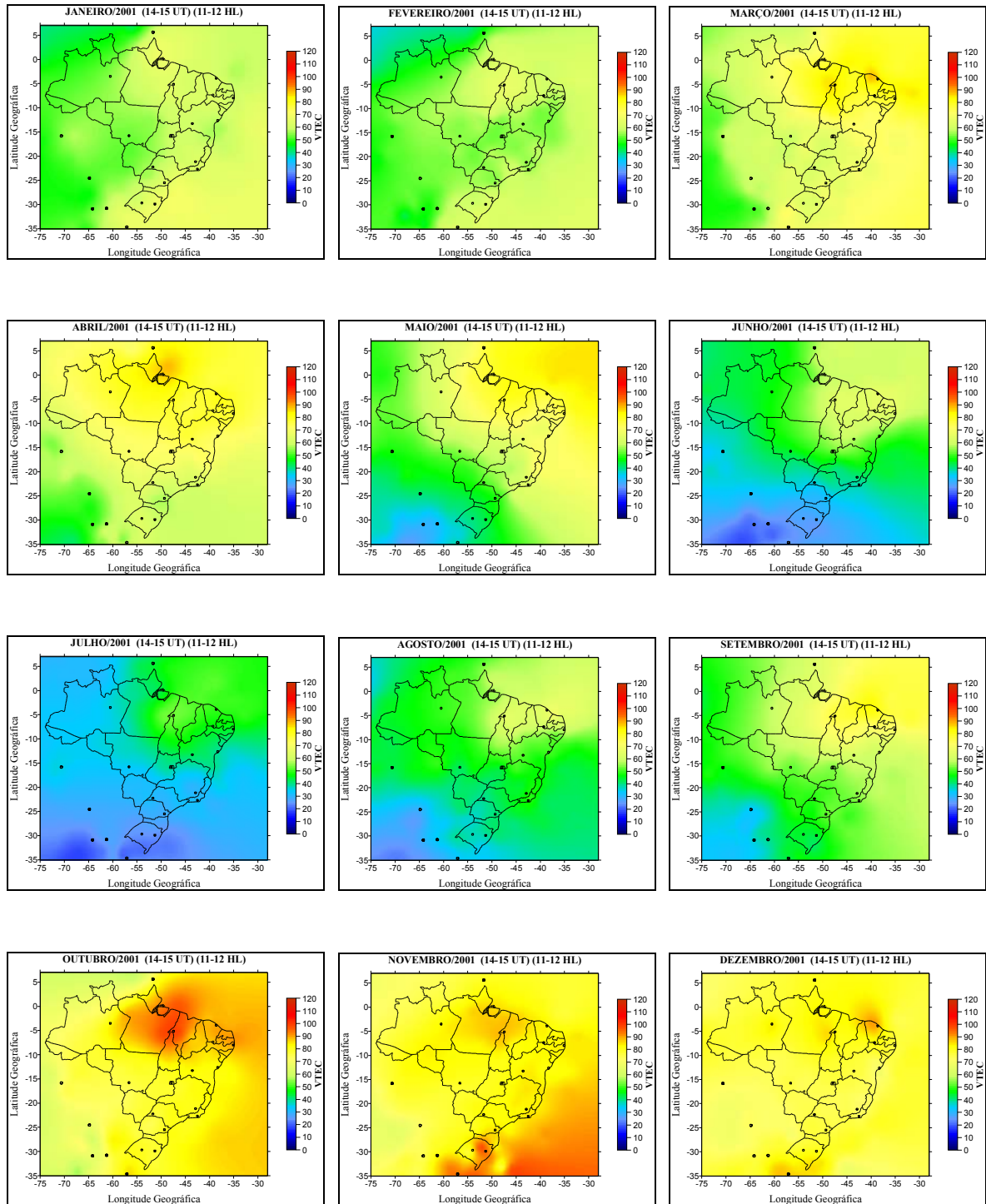


Figura 5.16 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (14-15 UT) (11-12 HL)

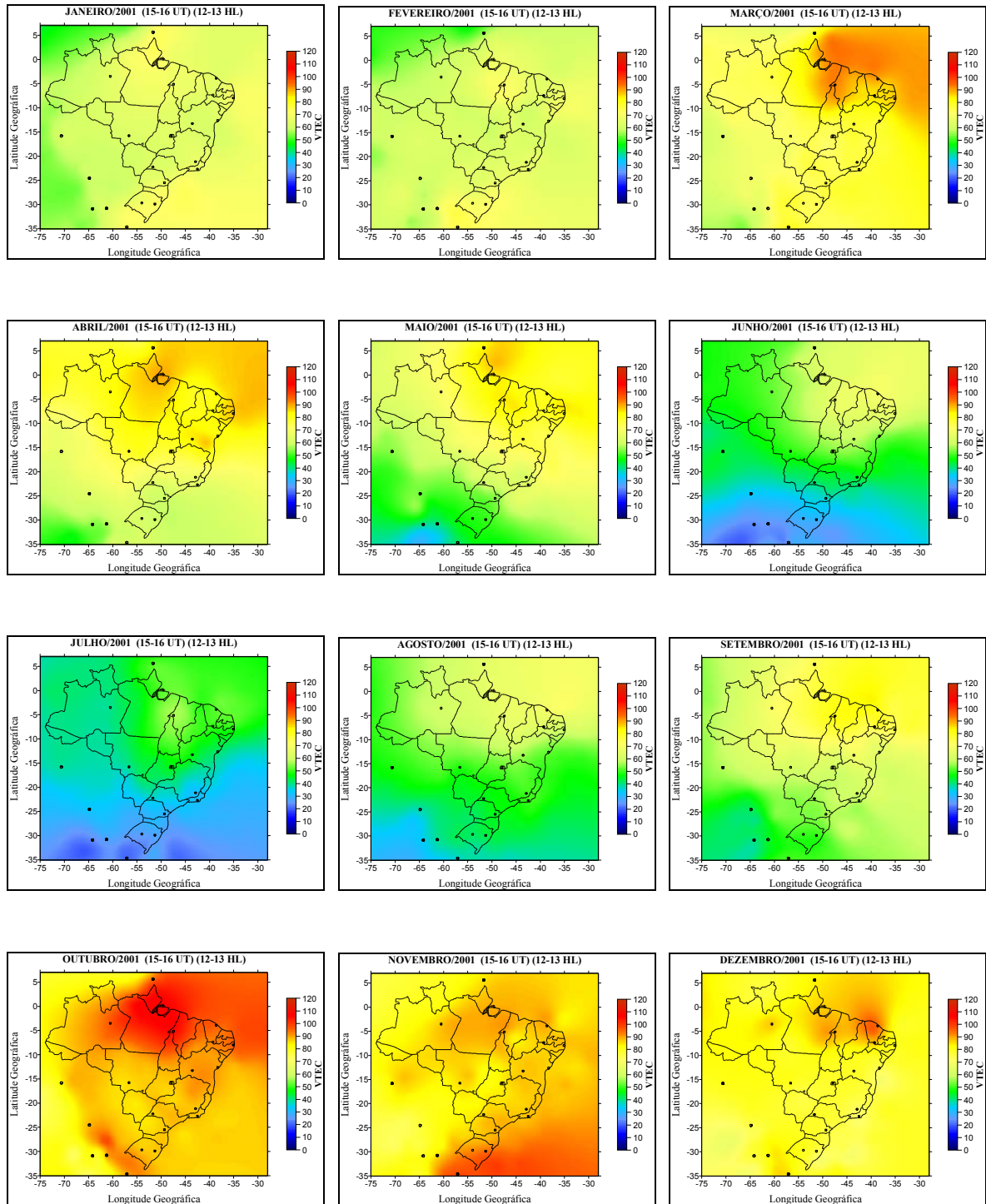


Figura 5.17 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (15-16 UT) (12-13 HL)

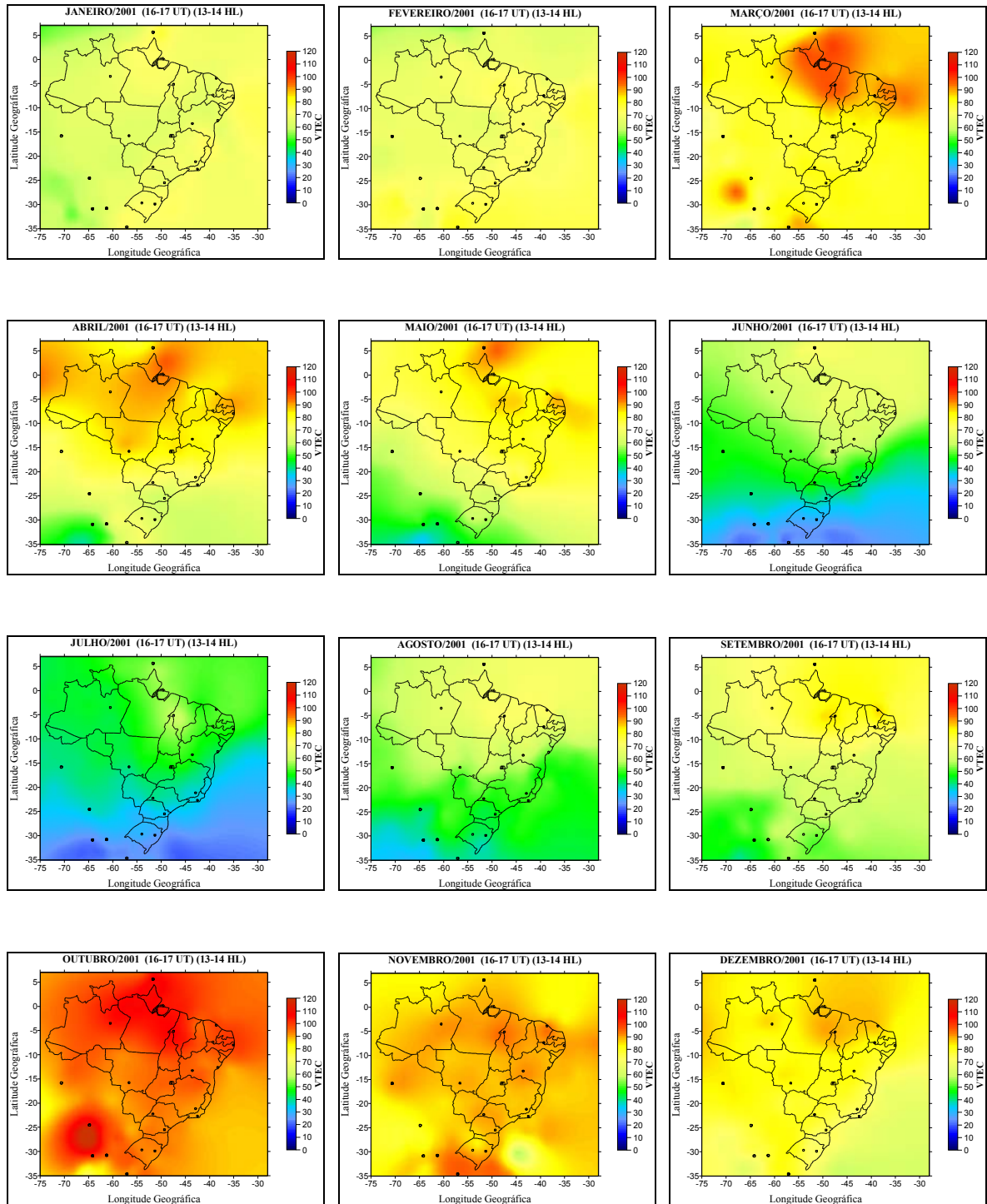


Figura 5.18 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (16-17 UT) (13-14 HL)

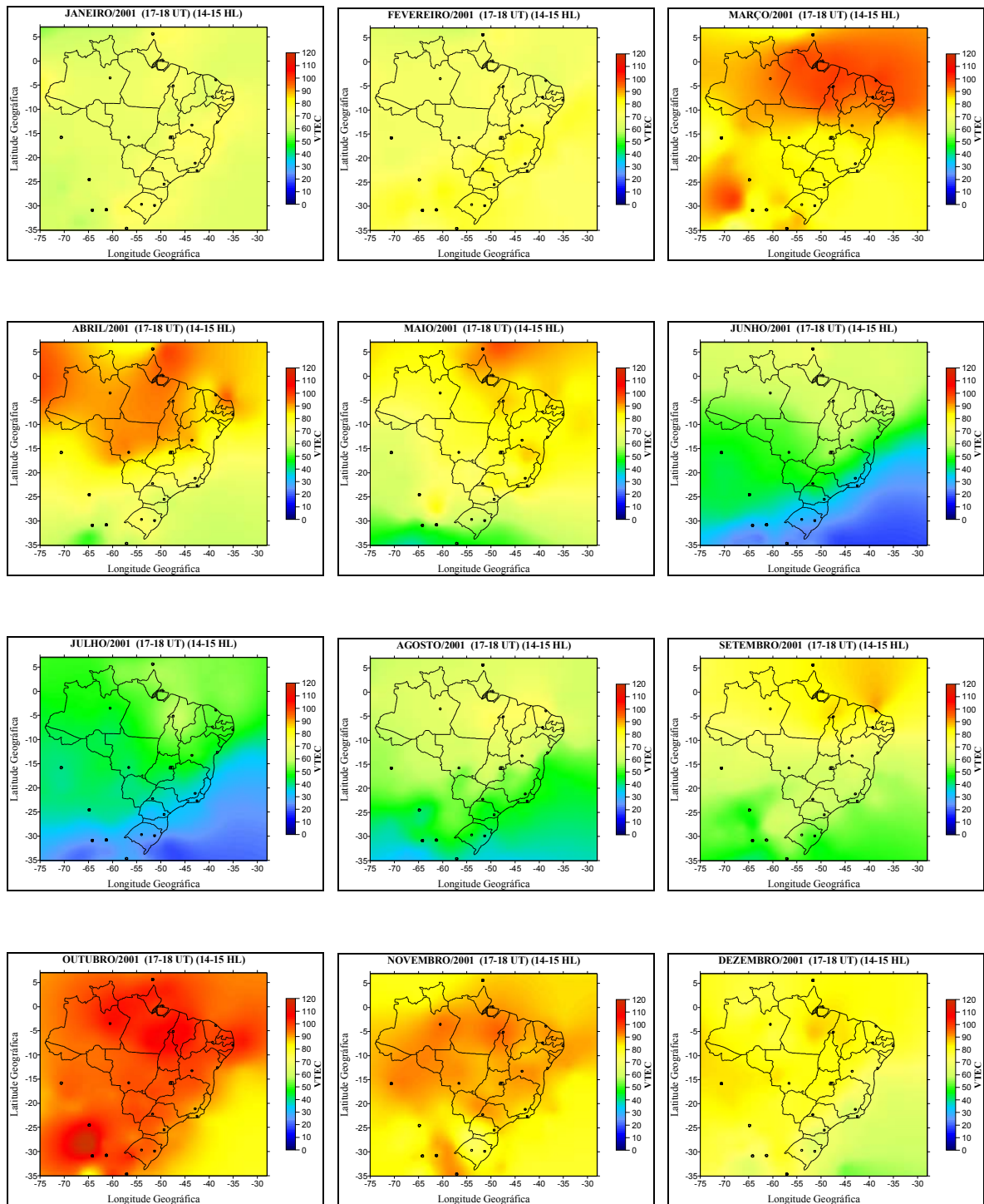


Figura 5.19 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (17-18 UT) (14-15 HL)

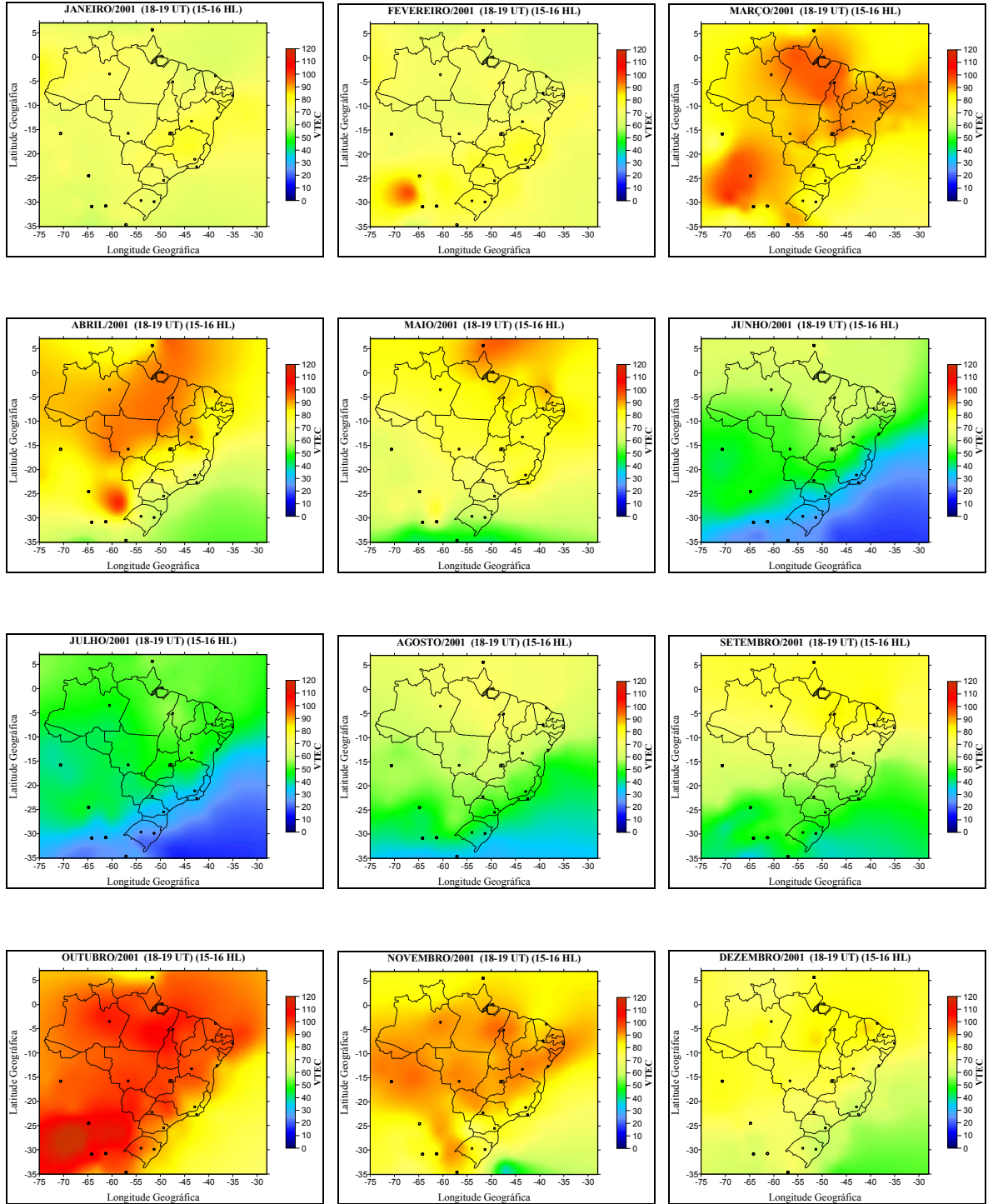


Figura 5.20 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (18-19 UT) (15-16 HL)

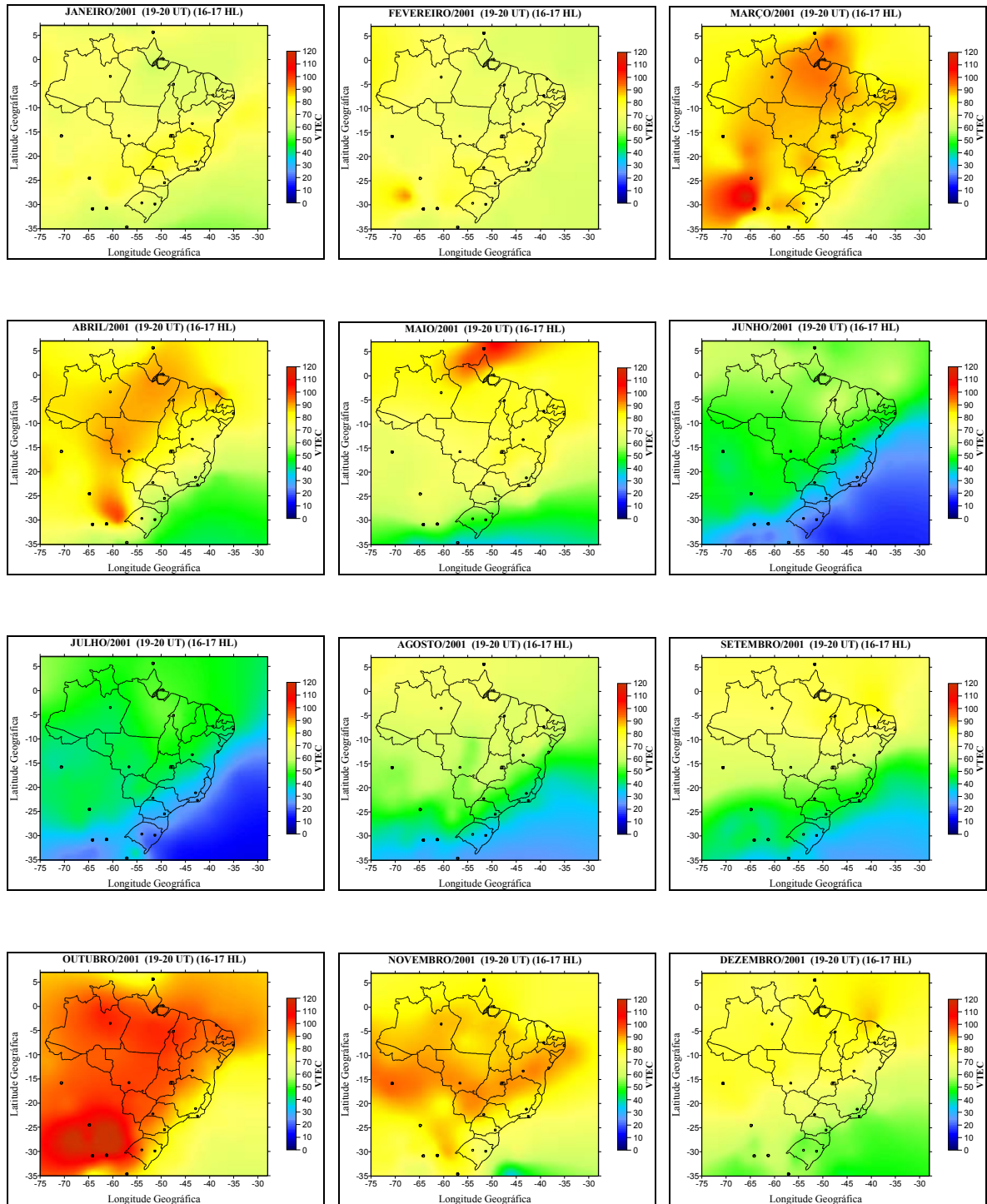


Figura 5.21 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (19-20 UT) (16-17 HL)

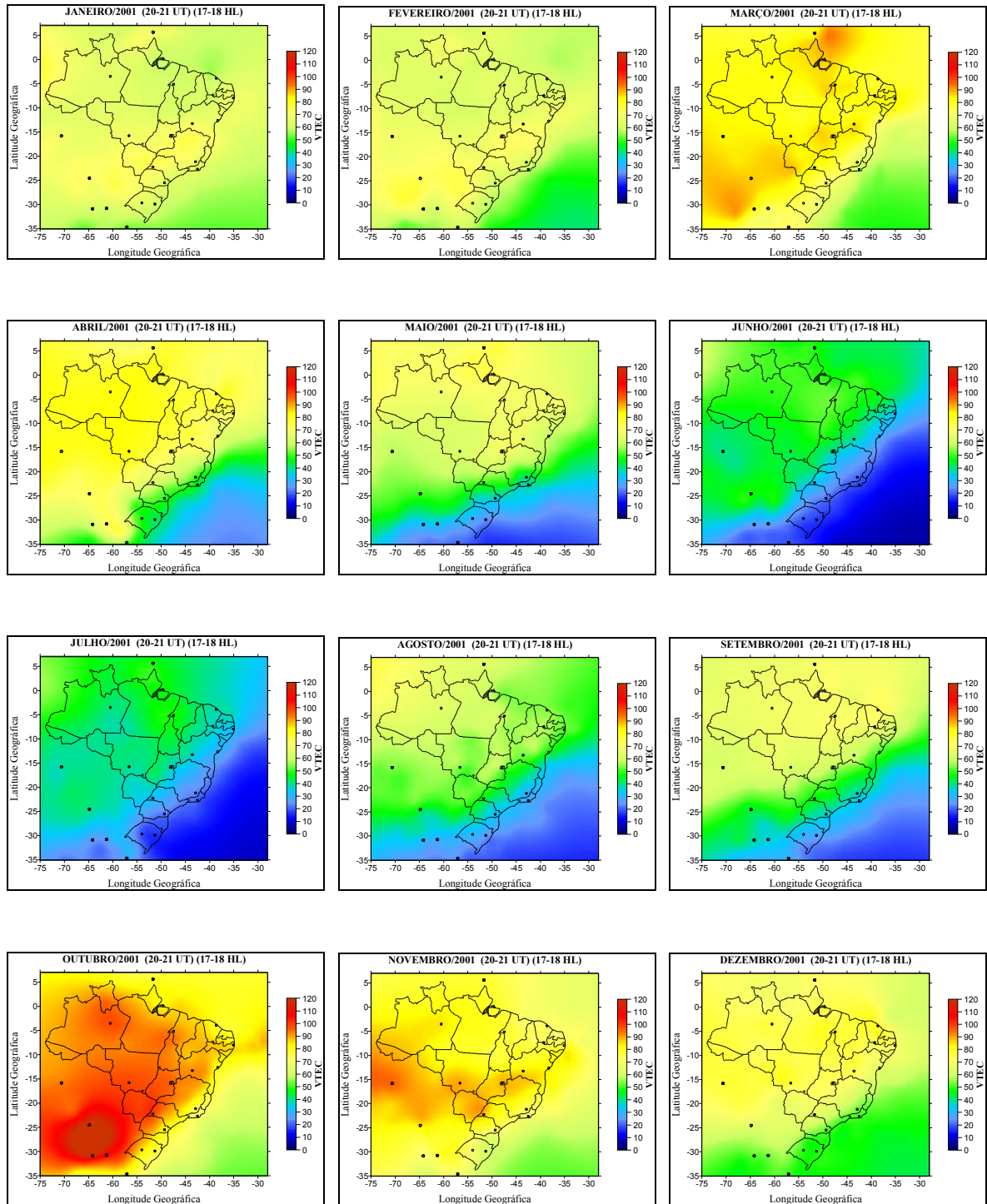


Figura 5.22 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (20-21 UT) (17-18 HL)

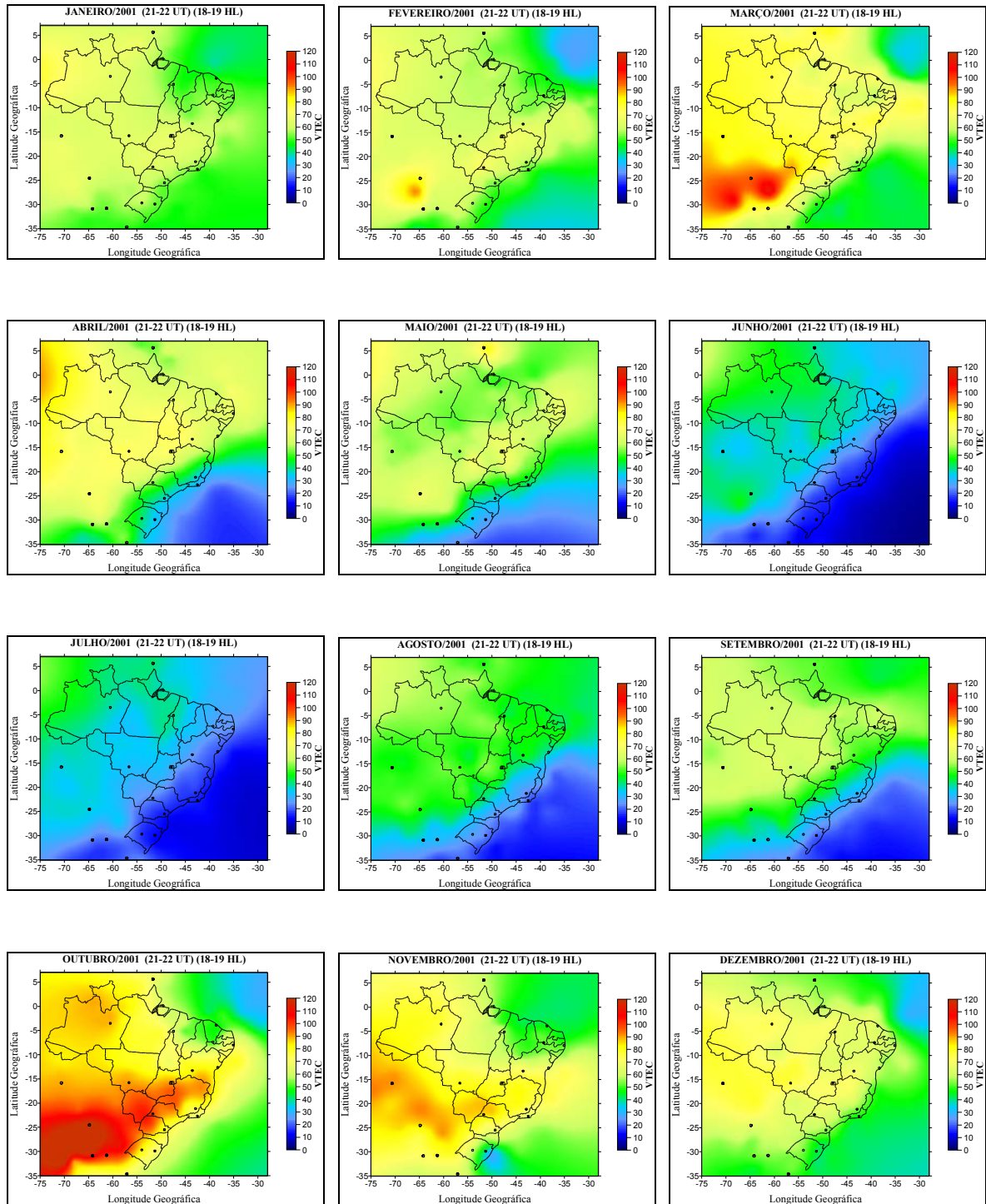


Figura 5.23 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (21-22 UT) (18-19 HL)

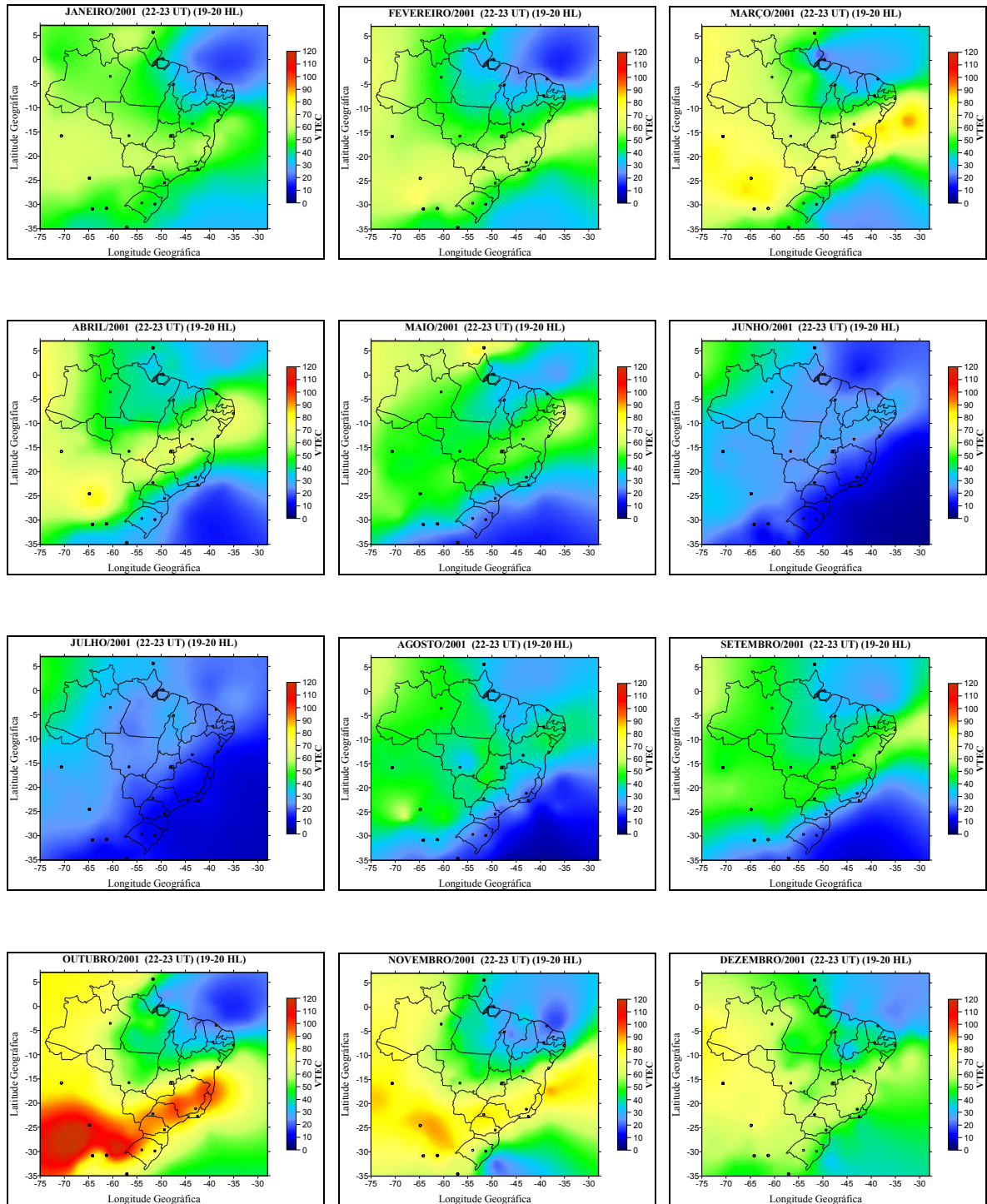


Figura 5.24 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (22-23 UT) (19-20 HL)

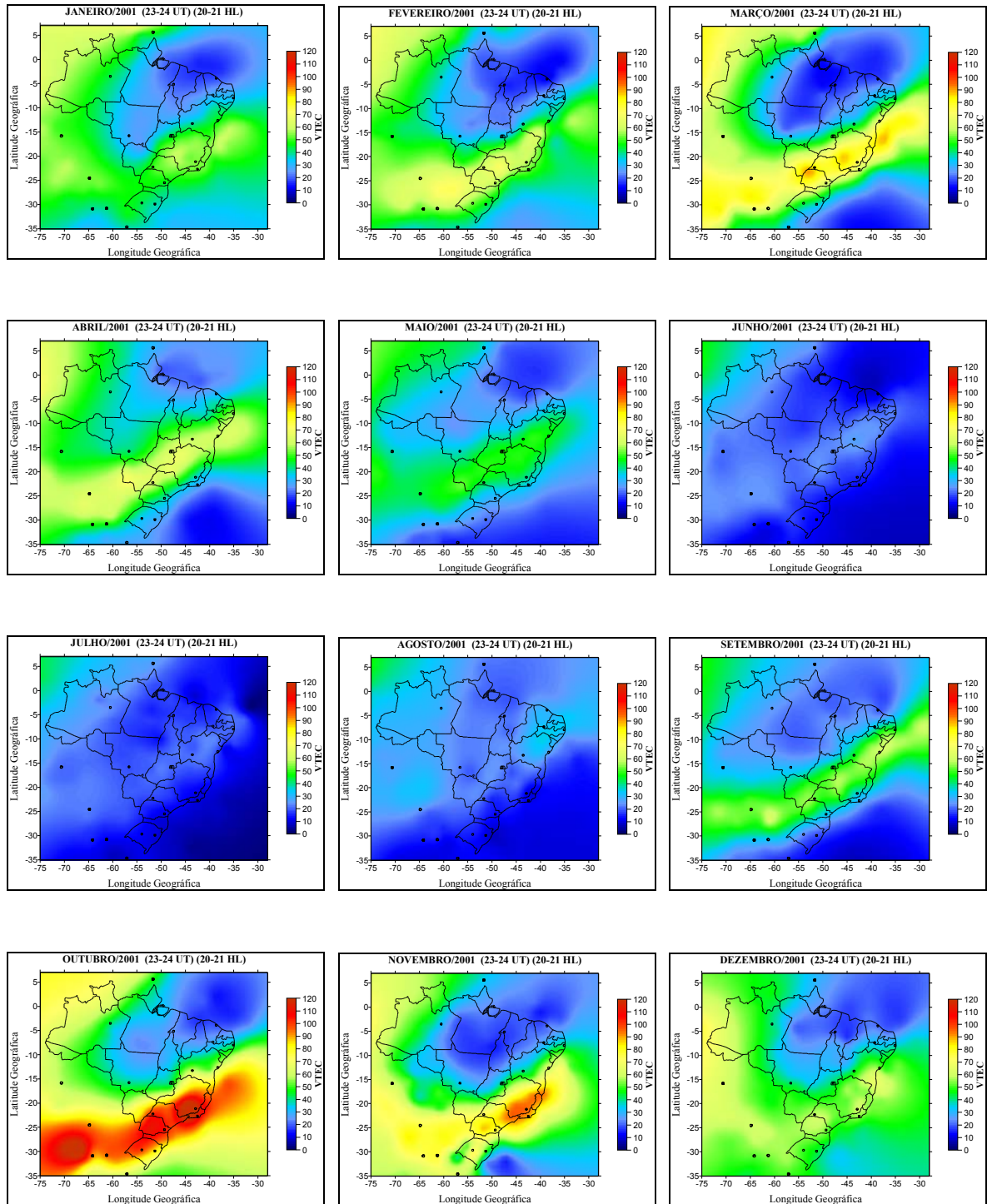


Figura 5.25 – Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (2001)– (23-24 UT) (20-21 HL)

Analisando os mapas presentes nas figuras 5.2 a 5.25 pode-se verificar o comportamento médio mensal do VTEC na região brasileira durante um período de alta presença de manchas solares do ciclo solar 23 (período de máxima atividade solar). Analisando de forma geral, para todos os meses, verifica-se que o VTEC atinge valores mínimos em toda a região no período entre 7-9 UT (4-6 Horas Local - HL) e o seu valor máximo próximo às 17-19 UT (14-16 HL). Um destacado segundo máximo de valores de VTEC é observado na região de baixas latitudes (crista sul da anomalia equatorial) após o pôr do sol nos meses próximos aos equinócios de outono e primavera, com destaque aos meses de outubro e março.

Os meses com maiores valores de VTEC, bem como com as maiores variações espaciais (variação latitudinal), são aqueles próximos aos equinócios: outubro, março, abril, novembro. Os menores valores e com baixa variação espacial do VTEC correspondem aos meses próximos do solstício de inverno, ou seja, os meses de julho e junho, principalmente.

Observa-se que os mapas referentes a outubro e março apresentaram as maiores variações espaciais do VTEC, principalmente na direção norte-sul, consequência da presença da anomalia equatorial. Nestes meses a ocorrência da anomalia equatorial está bastante destacada, com uma alta variação latitudinal de VTEC, principalmente no período entre 19 e 24 HL, estando de acordo com a teoria sobre o assunto (seção 2.4.4.3.1). Este período corresponde ao segundo pico diário da anomalia equatorial.

O primeiro pico da anomalia equatorial ocorre durante o período da tarde. Porém, nesse período a variação latitudinal do VTEC é menor, pois, embora o efeito fonte desloque elétrons das regiões próximas ao equador para as regiões das cristas da anomalia equatorial, devido à presença da radiação solar, elétrons livres continuam sendo produzidos na região equatorial pelo processo de fotoionização. Já no segundo pico da anomalia equatorial,

que é formado devido ao pico pré-inversão da deriva vertical do plasma ionosférico que ocorre nas horas próximas ao pôr do Sol, a variação latitudinal do VTEC é bem mais destacada, pois, com o pôr do Sol é cessado a fotoionização, e então, devido ao efeito fonte, observam-se baixos valores de VTEC próximos ao equador geomagnético e altos valores nas regiões de crista da anomalia (região de baixas latitudes). Ou seja, a região equatorial perde elétrons pelo efeito fonte e não há mais produção de elétrons por fotoionização; em contrapartida a região de crista da anomalia equatorial recebe os elétrons devido ao efeito fonte.

Como se trata de um período de máxima atividade solar se espera que o pico pré-inversão da deriva vertical do plasma ionosférico ocorra durante todo o ano, com maior intensidade em períodos próximos dos equinócios e solstício de verão, e menor nos próximos do solstício de inverno. Realmente, analisando os mapas pode-se perceber a presença da anomalia equatorial (19-24 HL) não só nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão, mas também nos demais meses, porém, de forma menos acentuada (nos demais meses os valores de VTEC nas cristas da anomalia equatorial são menores). É importante destacar que nos meses de junho, julho e agosto praticamente não se observa variação latitudinal de VTEC, mostrando a pouca influência do efeito fonte e a baixa produção de elétrons livres nesses meses, mesmo em um período de máxima atividade solar, ou seja, um menor impacto no posicionamento com GPS é esperado nesses meses.

Ainda, analisando os mapas pode-se verificar que praticamente não existem diferenças mensais entre o período de, aproximadamente, 5-11 UT (2-8 HL). Nesse período em todos os meses e em todo território brasileiro valores pequenos de VTEC estão presentes, pois, a atividade diária da radiação solar não existe e também o efeito fonte já não está mais agindo na região, não havendo mais a presença da anomalia equatorial. Isso significa que nesse período, o impacto da ionosfera em um posicionamento com GPS seria praticamente o

mesmo em todo o território brasileiro, não importando também o mês do ano em que está sendo realizado.

Como exemplo, para melhor mostrar como pode ser significativa a mudança mensal do impacto proporcionado pela ionosfera, a figura 5.26 mostra um conjunto de mapas da diferença entre os valores de VTEC dos mapas do mês de outubro com relação aos do mês de julho.

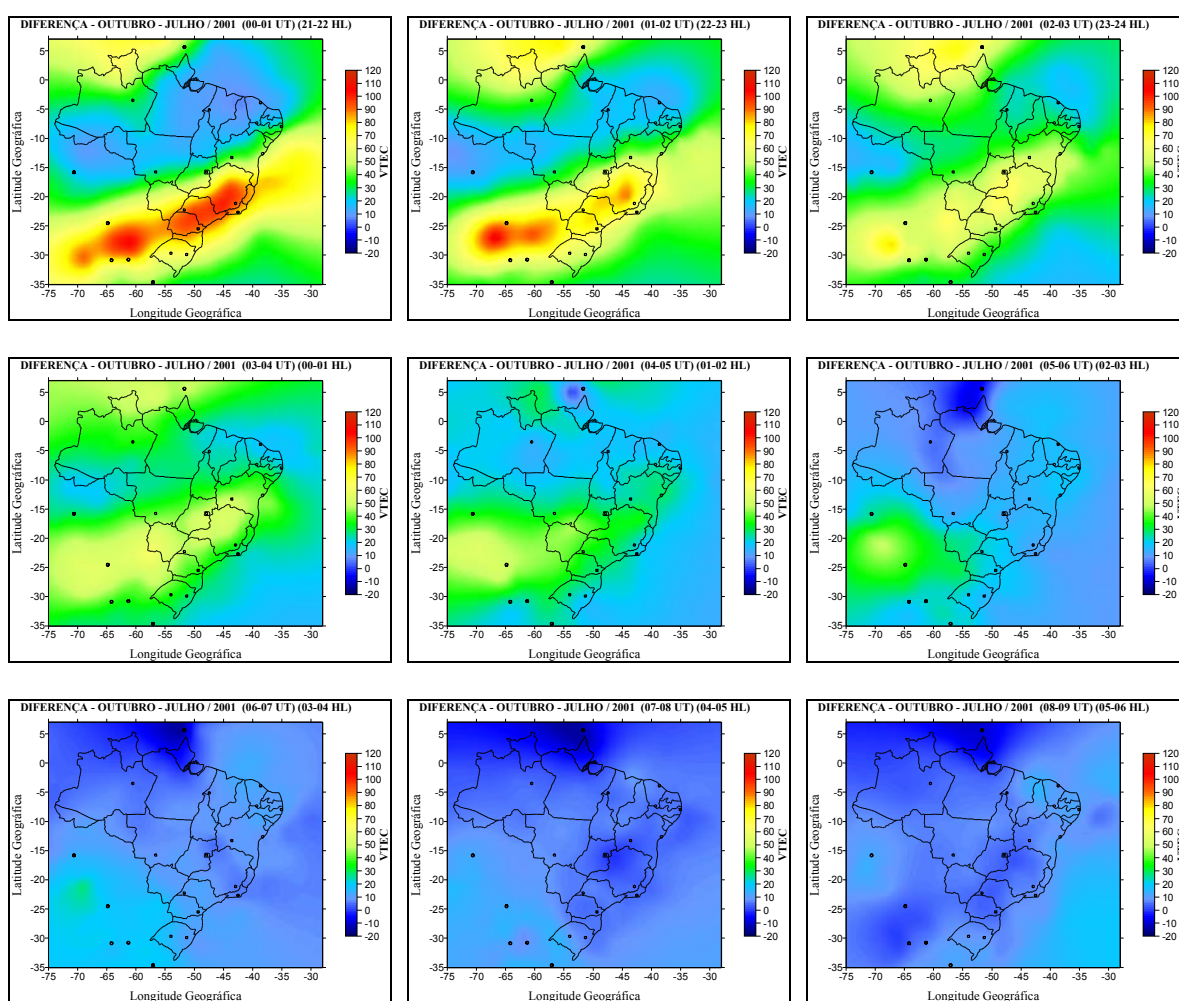
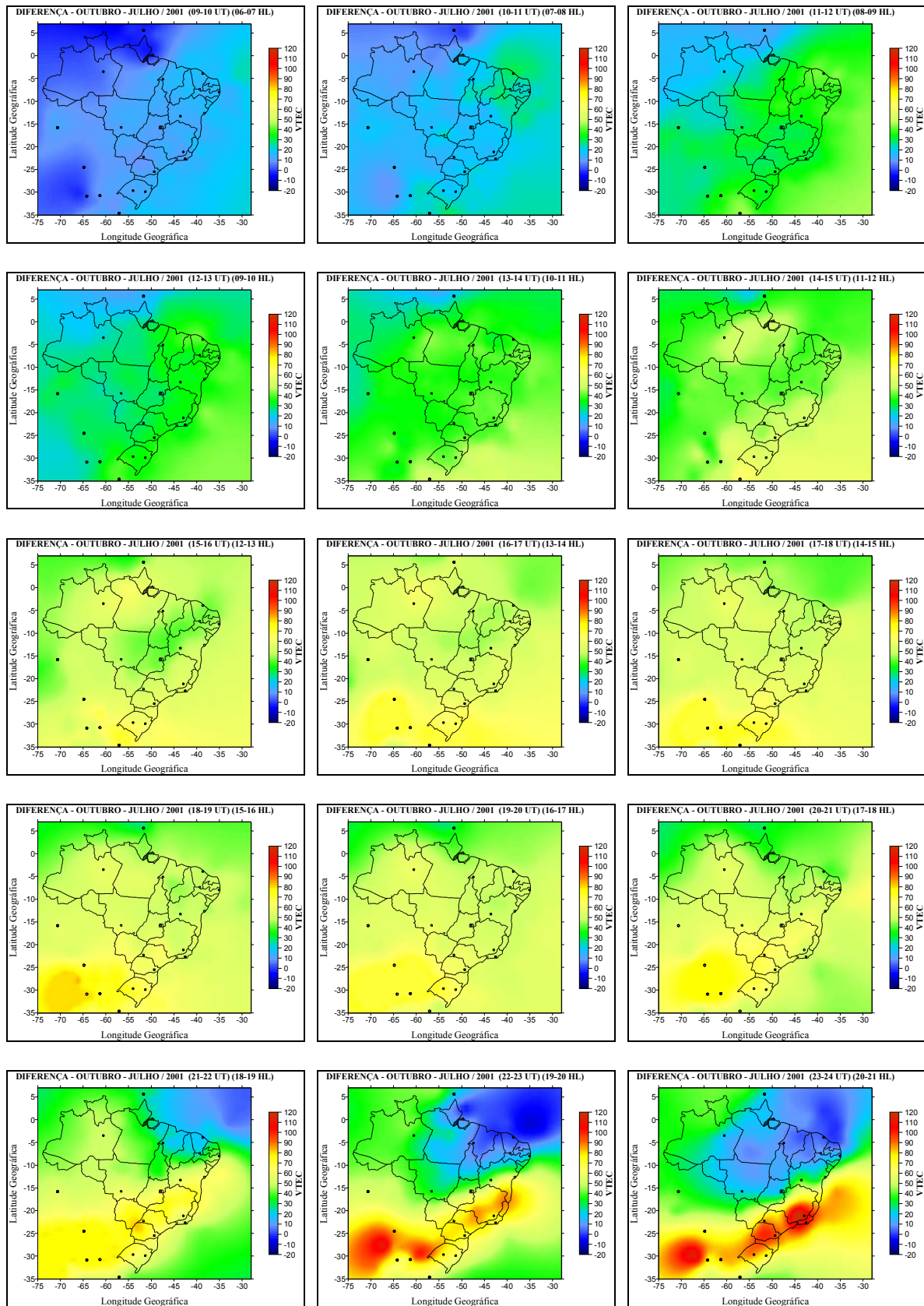


Figura 5.26 – Mapas de diferenças de VTEC entre outubro/2001 e julho/2001 (Continua)



(... continuação) Figura 5.26 – Mapas de diferenças de VTEC entre outubro/2001 e julho/2001

Observando os mapas da figura 5.26, pode-se verificar que as diferenças existentes entre os meses de outubro e julho de 2001 ocorrem principalmente no período da tarde em todo o território, resultado da maior atividade solar no mês de outubro. Um segundo período de grandes diferenças ocorre na região de baixas latitudes no período entre, aproximadamente, as 19 e 24 HL. Isso é devido a forte presença da anomalia equatorial no mês de outubro e, praticamente, a não observância desta no mês de julho. Nos horários em que não se tem influência da anomalia equatorial e nem a presença diária da radiação solar praticamente não existem diferenças entre os meses, principalmente no período entre 3 e 7 HL.

Pelos resultados e análises até aqui apresentados se pode verificar as significativas mudanças do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS em um período de máxima atividade solar do ciclo 23. Esses resultados podem auxiliar os usuários do GPS na fase de planejamento de campo e na interpretação de resultados de posicionamento. Nos experimentos que serão apresentados na seção 5.4 pode-se observar a influência da ionosfera no posicionamento por ponto na região brasileira durante o ano de 2001, onde se verifica a correlação com os resultados até aqui apresentados.

Dando continuidade aos experimentos, adicionalmente, para uma melhor análise do comportamento da ionosfera no período considerado e visando analisar a concordância das representações do VTEC advindas das observações GPS da RBMC e da rede IGS apresentadas anteriormente nos mapas, entrou-se em contato com a Divisão de Aeronomia do INPE para a possível obtenção de dados das Digissondas (Ionossondas Digitais) instaladas em São Luiz ($\cong 3^{\circ}\text{S}$; 44°W) e Cachoeira Paulista ($\cong 22^{\circ}\text{S}$; 45°W), que são regiões próximas do equador geomagnético e do pico (crista) da anomalia equatorial (região geográfica ionosférica de baixas latitudes), respectivamente. Gentilmente, os dados de frequência crítica da camada F2 (foF2) advindas das duas Digissondas foram

disponibilizados. Esses dados correspondem ao mesmo período do experimento anterior com dados GPS, ou seja, foram disponibilizados dados médios mensais de foF2 das duas Digissondas considerando dados dos 5 dias geomagneticamente mais calmos de cada mês do ano de 2001. A figura 5.27 apresenta gráficos de valores horários médios mensais de foF2 para o ano de 2001 advindos das Digissondas localizadas em Cachoeira Paulista (CP) e São Luiz (SL).

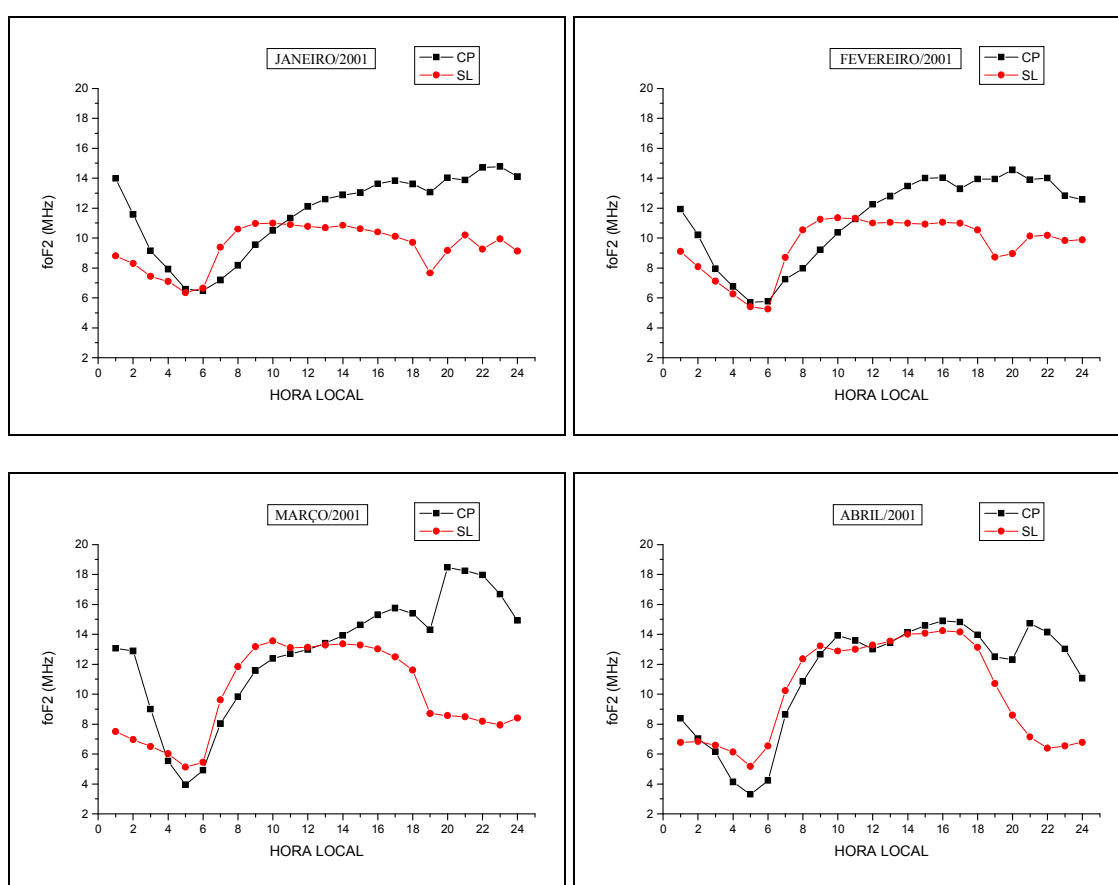
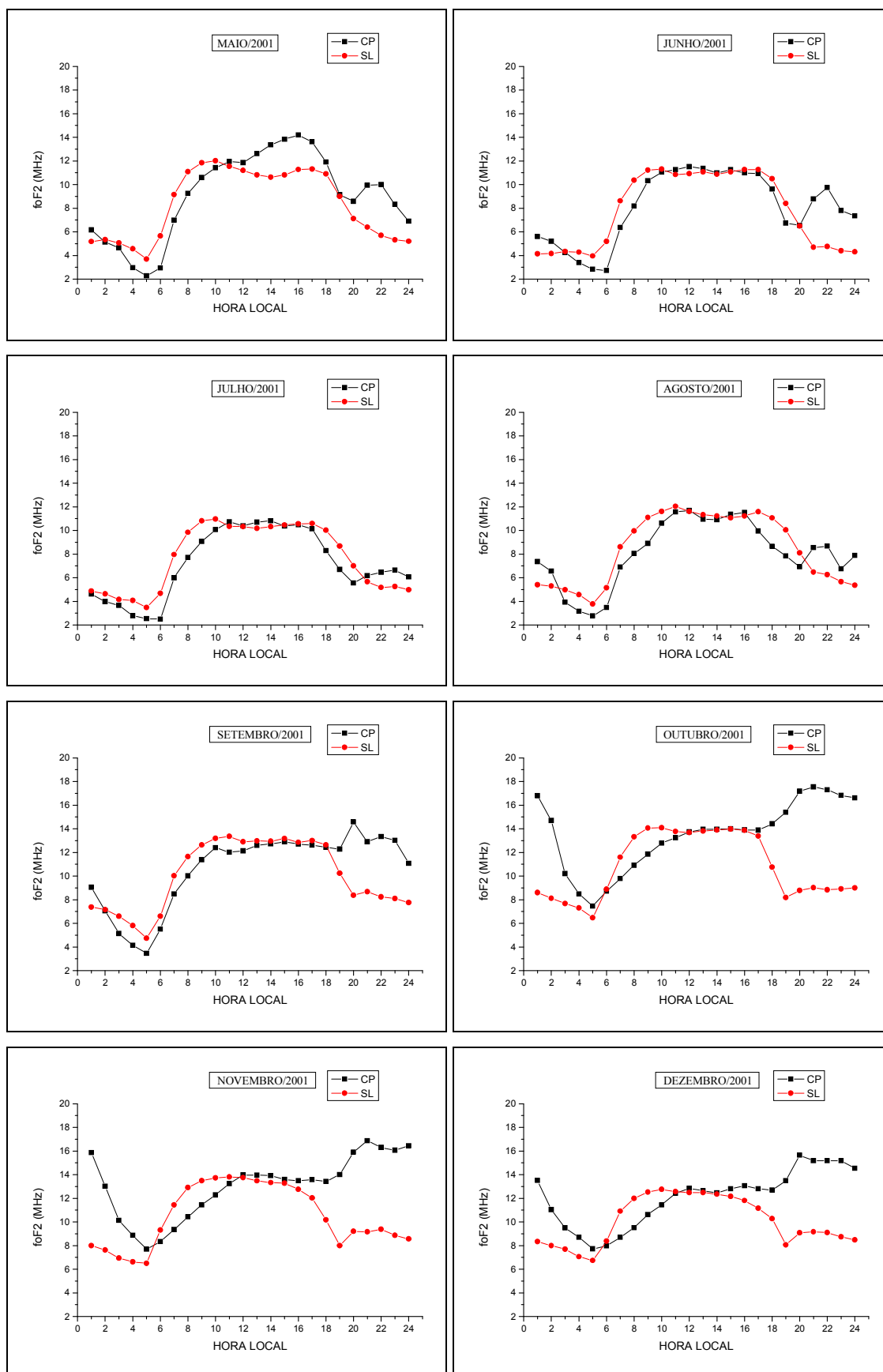


Figura 5.27 – Valores médios mensais de foF2 para 2001- Digissondas de Cachoeira Paulista (CP) e São Luiz (SL). (continua ...)



(... continuação) Figura 5.27 – Valores médios mensais de foF2 para 2001- Digissondas de Cachoeira Paulista (CP) e São Luiz (SL). Fonte: Cortesia da Divisão de Aeronomia do INPE

Analisando os gráficos de foF2 presentes na figura 5.27 pode-se obter uma análise do comportamento da ionosfera parecida com o que foi feita analisando os mapas de VTEC advindos de dados GPS apresentados anteriormente. Observa-se que os picos de foF2 são maiores nos meses próximos aos equinócios e menores nos meses próximos ao solstício de inverno. Em todos os meses os menores valores ocorrem próximos as 4-5 HL, e os maiores valores ocorrem no período da tarde. Quanto aos maiores valores, um segundo máximo ocorre após o pôr do Sol em CP, o que não é observado em SL, gerando uma grande diferença entre as duas localidades. Isto mostra a presença da anomalia equatorial que ocorre após o pôr do Sol, e que foi visto anteriormente nos mapas de VTEC. Assim como visto nos mapas de VTEC, este segundo máximo de foF2 de CP é bastante destacado nos meses próximos ao equinócio e, também, nos meses próximos ao solstício de verão. Estando também em concordância com a teoria sobre o assunto, por se tratar de um período de máxima atividade do ciclo Solar 23, a presença desse segundo pico em CP é observada em todos os meses, porém, com menor intensidade nos meses relacionados ao solstício de inverno.

Pode-se verificar que uma atividade menos irregular e com menor variação mensal é verificada em SL, reflexo da não ocorrência do segundo pico após o pôr do Sol. Basicamente em todos os meses observa-se em SL que, com o início da atividade solar diária por volta das 6-7 HL, os valores de foF2 começam a aumentar gradativamente, mantendo-se bastante estável durante o dia; com o pôr do Sol, os valores de foF2 começam a diminuir gradativamente.

Na seqüência, a figura 5.28 apresenta gráficos de VTEC (em TECU), cujos valores foram obtidos dos mapas de VTEC apresentados nas figuras 6.2 a 6.25, para as posições de (22 °S; 45°W) e (3°S; 44°W), ou seja, onde aproximadamente estão localizadas as Digissondas de CP e SL. A intenção é mostrar e comparar melhor a variação do VTEC nas regiões próximas ao equador e na de baixas latitudes, e, além disso, verificar uma possível

correlação entre os dados de VTEC e de foF2, ou seja, entre dois sensores de observação ionosférica: Digissondas e receptores GPS. Porém, é importante revisar, que a teoria diz que o quadrado do parâmetro foF2 é diretamente proporcional a densidade máxima de elétrons da camada ionosférica F2. O TEC corresponde ao conteúdo total de elétrons presente em todo o caminho percorrido pelo sinal do satélite ao receptor, ou seja, inclui-se a densidade de elétrons de todas as camadas (D, E, F1 e F2) e, também, da Plasmasfera. Sabe-se também, que se espera que a camada com a maior contribuição nos valores de TEC seja a camada F2, e portanto, é interessante verificar a correlação entre os dois parâmetros ionosféricos foF2 e VTEC.

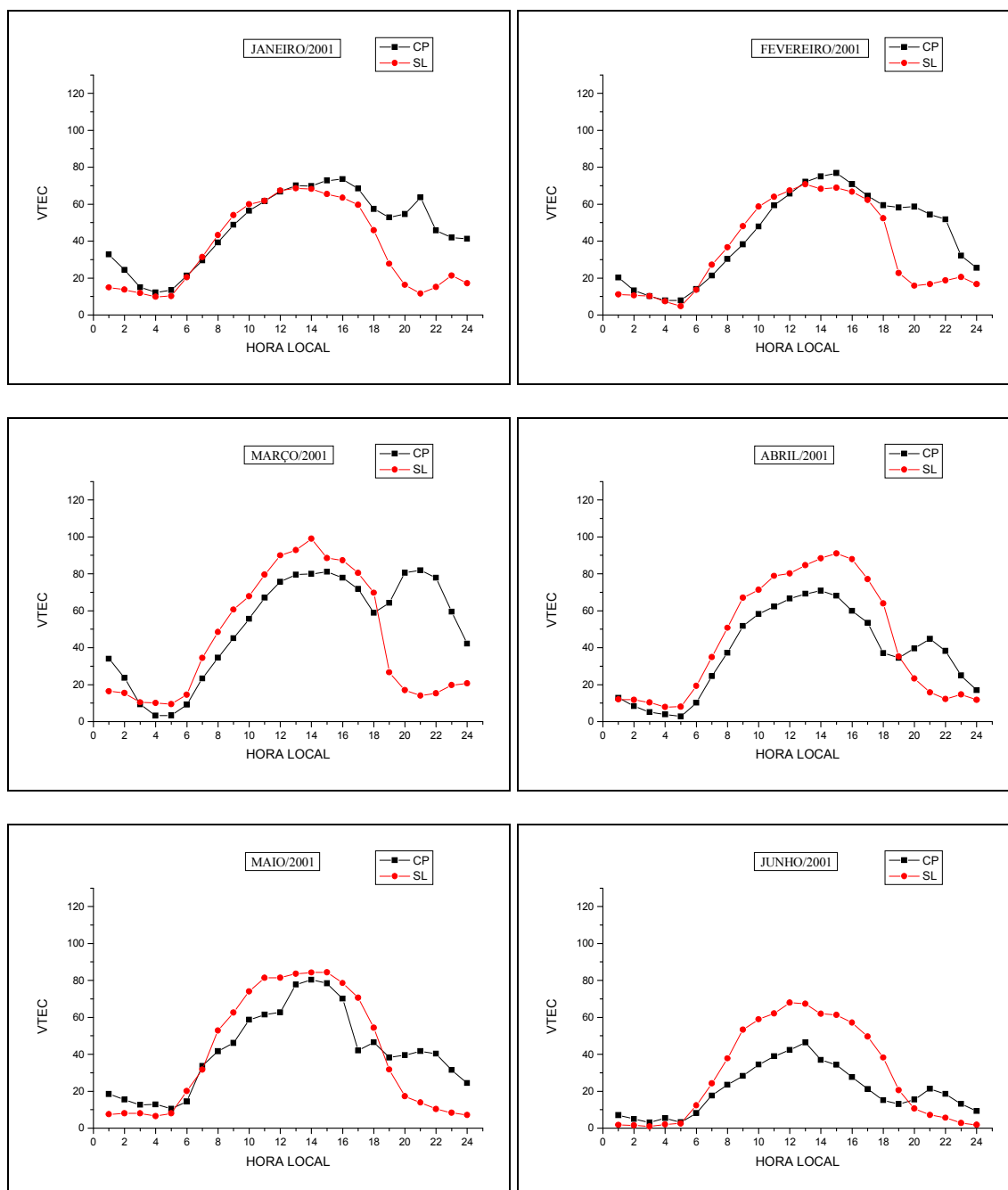
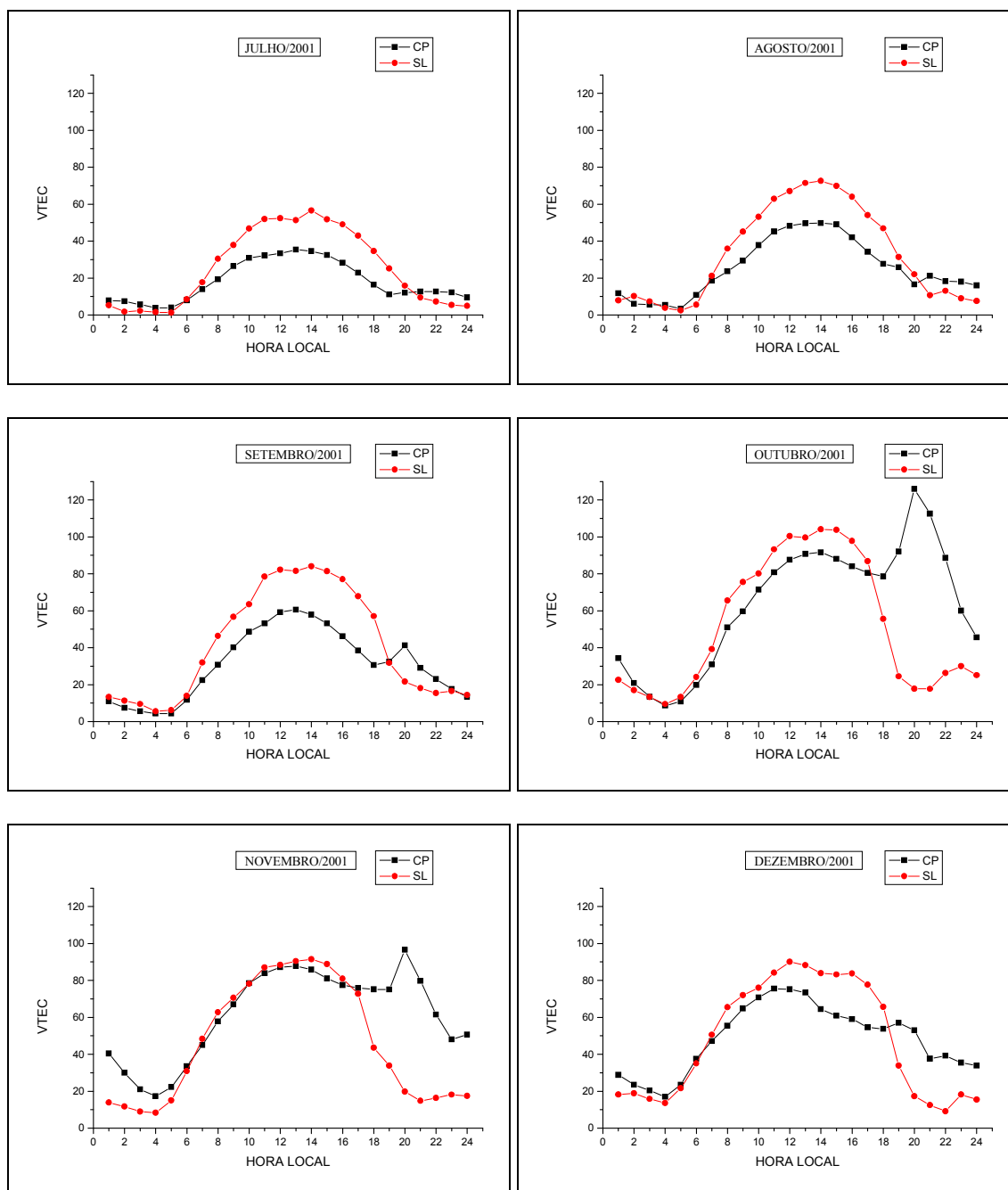


Figura 5.28 – Valores médios mensais de VTEC em 2001 para CP e SL – obtidos dos mapas de VTEC (Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.28 – Valores médios mensais de VTEC em 2001 para CP e SL – obtidos dos mapas de VTEC

Observando a figura 5.28, as análises realizadas anteriormente novamente são evidenciadas (horas diárias de valores mínimos; máximos e mínimos mensais). Comparando o comportamento do VTEC em SL e CP nota-se, no período da tarde, maiores valores de VTEC em SL do que em CP, ou seja, na região mais próxima do equador geomagnético. Já nos gráficos de foF2 esse comportamento não é verificado. Porém,

consultando a literatura, este fato também foi evidenciado nos experimentos realizados por Rodrigues (2003) e Fonseca Junior (2002) utilizando dados GPS para determinar valores de VTEC.

Novamente, analisando os gráficos da figura 5.28 observa-se a presença da anomalia equatorial, mostrando valores maiores de VTEC em CP do que em SL no período após o pôr do Sol, evidenciando a variação latitudinal de VTEC nesse período, como já foi verificado nos experimentos anteriores.

Assim como nos gráficos de foF2 (figura 5.27), também os gráficos de VTEC (figura 5.28) mostram um comportamento menos irregular e uma menor variação mensal do comportamento do VTEC em SL. Em todos os meses praticamente a mesma curva diária dos valores de VTEC em SL é observada, mudando somente a magnitude dos valores, com maiores valores nos meses próximos aos equinócios e menores nos próximos ao solstício de inverno. Já em CP o VTEC tem um comportamento mais diferenciado entre os meses, resultado principalmente da mudança de magnitude do segundo pico da anomalia equatorial (pós pôr do Sol).

O comportamento da curva de VTEC de SL é parecido com o que normalmente é visto em modelos ionosféricos, como por exemplo o modelo de Klobuchar (ver figura 3.9), e que são mais adequados para as regiões geográficas da ionosfera de latitudes médias. Desta forma, observa-se que a região próxima ao equador geomagnético tem um comportamento parecido com a região de latitudes médias, e o que muda é que na região equatorial maiores valores são esperados. Isto evidencia o porquê alguns pesquisadores subdividem a região equatorial, discriminando duas regiões: a próxima ao equador e a de baixas latitudes, onde normalmente ocorre o segundo pico da anomalia equatorial. De fato, tanto nos mapas do VTEC quanto nos gráficos de foF2 a diferença de comportamento entre as duas regiões é bem notada.

Visando verificar um possível indicador numérico de concordância entre os dados médios mensais de foF2 e VTEC apresentados anteriormente, calculou-se o coeficiente de correlação linear entre os valores mensais de VTEC e o quadrado de foF2. Os valores para ambas as localidades são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Coeficiente de correlação linear (x 100%) entre os dados mensais de VTEC advindos de GPS e o quadrado de foF2 advindos de digissondas para SL e CP

| Coeficiente de Correlação Linear (x 100%) | | |
|--|-----------|-----------|
| Meses | SL | CP |
| Janeiro | 80 | 61 |
| Fevereiro | 82 | 81 |
| Março | 95 | 82 |
| Abril | 98 | 86 |
| Maió | 94 | 92 |
| Junho | 96 | 90 |
| Julho | 96 | 97 |
| Agosto | 95 | 95 |
| Setembro | 96 | 75 |
| Outubro | 96 | 70 |
| Novembro | 96 | 55 |
| Dezembro | 91 | 30 |
| Média | 93 | 76 |

Analisando a tabela 5.1 pode-se verificar de uma forma geral uma boa correlação linear entre os dados de foF2 e VTEC. Uma forte correlação linear em todos os meses é verificada principalmente em SL, com um valor médio de 93%. Para CP uma menor correlação linear é verificada, porém ainda bem significativa, com valor médio de 76%, chegando a ter uma forte correlação, similar ao visto em SL, para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho, julho e agosto, que apresentaram valores maiores do que 80%.

Menores valores de correlação são verificados nos meses de dezembro (principalmente) e novembro em CP.

Consultando alguns trabalhos na literatura encontraram-se dois gráficos em Rodrigues (2003) que mostram valores do VTEC calculados a partir de dois receptores GPS, um localizado em São José dos Campos (próximo a Cachoeira Paulista) e outro em São Luiz, para um dia próximo ao equinócio de primavera (22/09/2001). A figura 5.29 apresenta esses dois gráficos para São José dos Campos (SJC) e São Luiz (SL).

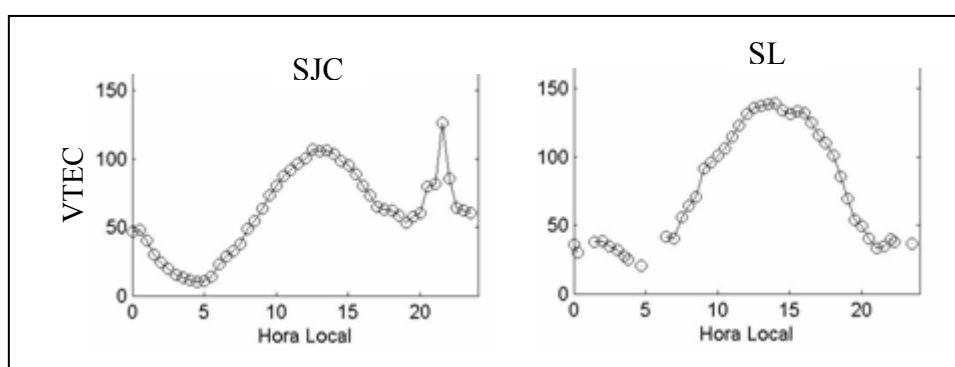


Figura 5.29 – Valores médios de VTEC/GPS em São José dos Campos (SJC) e São Luiz (SL) – 22 de setembro de 2001. Fonte: Rodrigues (2003)

Como pode ser notada, a razão pela qual se está apresentando os gráficos da figura 5.29, retirados de Rodrigues (2003), é devida ao fato de que se pode verificar uma alta concordância entre esses dois gráficos e os apresentados na figura 5.28 referentes aos meses próximos ao equinócio de primavera (setembro, outubro, novembro) para CP (comparar com SJC – região relativamente próxima) e SL. Nota-se novamente o mesmo comportamento diário, com destaque ao segundo pico pós pôr do Sol para SJC e os valores maiores no período da tarde em SL do que em SJC, características essas, também observadas em CP e SL nos meses anteriormente referidos apresentadas na figura 5.28.

Em suma, este primeiro experimento apresentou um estudo do comportamento do erro devido à ionosfera, a partir do parâmetro VTEC, na região brasileira,

utilizando dados GPS das estações pertencentes à RBMC e IGS, durante um período de máxima atividade do ciclo solar 23. Esforços foram realizados para a adição de dados de outros sensores ionosféricos, o que foi conseguido a partir de dados de foF2 advindos de Digissondas cedidos pela Divisão de Aeronomia do INPE. Desta forma, puderam-se realizar comparações entre os parâmetros VTEC e foF2, além de um maior detalhamento no estudo do comportamento da ionosfera brasileira. De uma forma geral, a boa concordância entre os resultados obtidos de VTEC e a teoria referente ao assunto, bem como, com os dados de foF2 e mesmo de outras referências bibliográficas (ex. Rodrigues (2003); Fonseca Junior (2002)), mostraram a potencialidade da RBMC e da rede IGS para o estudo do comportamento da ionosfera na região brasileira, em particular do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. É claro que, sabe-se que o número de estações GPS ativas no Brasil é pequeno se comparado com outros países desenvolvidos, como por exemplo, Estados Unidos e Japão. Com a modernização da RBMC em que se está previsto o aumento do número de receptores (FORTES et al., 2005), bem como o advento de redes estaduais, como a do estado de São Paulo, uma performance melhor pode ser esperada. Porém, mesmo com um número reduzido de estações, deve-se ter em mente a grande área que potencialmente pode ser coberta por um único receptor (ver seção 4.5) para obtenção de medidas de TEC, o que mostra a potencialidade do uso de receptores GPS no estudo da ionosfera.

Vale ser salientado, que os valores de VTEC advindos dos dados GPS foram calculados através do processamento dos dados em programas computacionais elaborados nessa pesquisa, ficando esses programas disponíveis para futuros experimentos a ser realizados na FCT/UNESP. Programas científicos conhecidos, como o Bernese Software, também fazem esse tipo de cálculo, porém, obviamente, eles não são gratuitos. A geração dos *grids* a partir das amostras de VTEC, que resultou nos mapas, foi realizado a partir de programa comercial (Surfer). No entanto, como continuidade das pesquisas, dentro do

PPGCC, existe um projeto de Tese (AGUIAR, 2006) no qual esse procedimento de interpolação para geração de grid está previsto para ser implementado.

Neste primeiro experimento foram considerados somente dias sem perturbações geomagnéticas. Na seqüência serão mostrados experimentos relacionados a um período de ocorrência de explosão solar e tempestade geomagnética muito intensas.

5.3 Explosões Solares e Tempestades Geomagnéticas: os efeitos no comportamento do TEC e no Posicionamento por Ponto na região brasileira

Primeiramente será apresentada uma análise do número de dias com influência de tempestades geomagnéticas compreendendo o período de máxima atividade solar do ciclo 23 (2000-2001) até o ano de 2006. A classificação da atividade geomagnética para cada dia foi realizada a partir do índice A_p e de acordo com a classificação dada na tabela 2.3.

A tabela 5.2 apresenta o número de dias com $A_p \geq 30$ para os anos de 2000 a 2006, ou seja, o número de dias por ano sobre influência de alguma tempestade geomagnética, seja ela fraca, intensa ou muito intensa.

Tabela 5.2 – Número de dias com influência de tempestade geomagnética para os anos de 2000 a 2006 ($A_p \geq 30$)

| Ano | Número de dias |
|-------------|-----------------------|
| 2000 | 39 |
| 2001 | 27 |
| 2002 | 24 |
| 2003 | 76 |
| 2004 | 21 |
| 2005 | 34 |
| 2006 | 11 |

Na tabela 5.2 pode-se verificar que no ano de 2003 ocorreu o maior número de dias com tempestades, aproximadamente dois anos após o pico da atividade solar do ciclo 23.

A tabela 5.2 apresentou o número de dias por ano com influência de tempestade, sem discriminar se é fraca, intensa ou muito intensa. Na maior parte desses dias a tempestade geomagnética foi classificada como fraca. As tempestades intensas e principalmente as muito intensas são as que podem provocar as maiores perturbações na ionosfera e, conseqüentemente, na performance do posicionamento com GPS. Neste sentido, a título de informação, as tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os dias sob influência de tempestades geomagnéticas intensas e muito intensas de 2000 a 2006, classificadas de acordo com a tabela 2.3.

Tabela 5.3 - Relação de dias com influência de tempestades geomagnéticas intensas

| 2000 | | 2001 | | 2002 | | 2003 | | 2004 | | 2005 | | 2006 | |
|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap |
| 12/02 | 60 | 20/03 | 74 | 17/04 | 62 | 02/02 | 52 | 22/01 | 64 | 17/01 | 58 | 14/04 | 65 |
| 06/04 | 82 | 08/04 | 63 | 18/04 | 63 | 30/05 | 59 | 23/07 | 52 | 18/01 | 84 | 15/12 | 94 |
| 07/04 | 74 | 11/04 | 85 | 19/04 | 62 | 18/06 | 60 | 07/11 | 50 | 19/01 | 60 | | |
| 24/05 | 93 | 12/04 | 50 | 20/04 | 70 | 11/07 | 52 | | | 21/01 | 66 | | |
| 08/06 | 64 | 13/04 | 50 | 23/05 | 78 | 21/08 | 58 | | | 05/04 | 50 | | |
| 14/07 | 51 | 18/04 | 50 | 07/09 | 57 | 17/09 | 70 | | | 08/05 | 91 | | |
| 16/07 | 50 | 02/10 | 52 | 01/10 | 67 | 18/09 | 50 | | | 15/05 | 87 | | |
| 17/09 | 56 | 03/10 | 69 | 02/10 | 53 | 14/10 | 66 | | | 30/05 | 90 | | |
| 18/09 | 70 | 21/10 | 57 | 04/10 | 64 | 11/11 | 61 | | | 12/06 | 54 | | |
| 30/09 | 51 | 22/10 | 96 | 24/10 | 63 | 13/11 | 52 | | | 23/06 | 50 | | |
| 04/10 | 63 | | | 21/11 | 50 | | | | | 10/07 | 57 | | |
| 06/11 | 55 | | | | | | | | | 12/09 | 75 | | |
| 29/11 | 56 | | | | | | | | | 13/09 | 44 | | |
| | | | | | | | | | | 15/09 | 52 | | |

Tabela 5.4 - Relação de dias com influência de tempestades geomagnéticas muito intensas

| 2000 | | 2001 | | 2002 | | 2003 | | 2004 | | 2005 | | 2006 | |
|-------|-----|-------|-----|----------------|----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|------|----|
| DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap | DATA | Ap |
| 15/07 | 164 | 31/03 | 192 | | | 29/05 | 109 | 25/07 | 154 | 24/08 | 102 | | |
| 12/08 | 123 | 06/11 | 142 | | | 18/08 | 108 | 27/07 | 186 | 11/09 | 101 | | |
| 05/10 | 116 | 24/11 | 104 | | | 29/10 | 204 | 08/11 | 140 | | | | |
| | | | | Sem ocorrência | | 30/10 | 191 | 09/11 | 119 | | | | |
| | | | | | | 31/10 | 116 | 10/11 | 161 | | | | |
| | | | | | | 20/11 | 150 | | | | | | |

Analisando-se as tabelas 5.3 e 5.4 pode-se verificar que de 2000 a 2006 na maioria dos casos os dias com tempestades ocorreram nos meses próximos aos equinócios, estando de acordo com a teoria sobre o assunto (seção 2.4.3.3). Pode-se notar que poucos dias do ano são classificados como influenciados por tempestades geomagnéticas muito intensas. Por exemplo, para 2003, que foi o ano de mais ocorrência, apenas 6 dias estavam sob a influência de tempestades geomagnéticas muito intensas.

Na seqüência, será apresentada uma série de experimentos que foi realizada para verificar e analisar os efeitos da tempestade geomagnética, classificada como muito intensa, de 29 de outubro de 2003 no comportamento do TEC e na performance do posicionamento com GPS na região brasileira.

5.3.1 Estudo da intensa tempestade geomagnética do dia 29 de outubro de 2003

No dia 28 de outubro de 2003, durante as 11:00 e 11:30 UT (08:00 – 08:30 HL), aproximadamente, uma intensa explosão solar (*solar flare*) ocorreu diretamente na direção da Terra, aumentando instantaneamente o fluxo de radiação eletromagnética. A figura 5.30 apresenta uma imagem do Sol (na faixa do extremo ultravioleta) onde se pode ver a explosão solar.

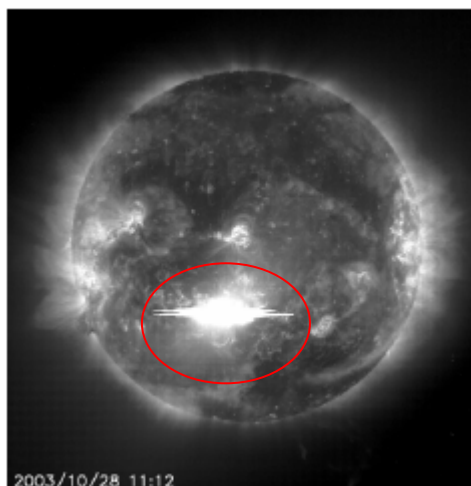


Figura 5.30 – Imagem do Sol (extremo ultravioleta) no dia 28 de outubro de 2003 às 11:12 UT – Explosão Solar (destacada). Fonte: Liu et al. (2006)

Medidas do fluxo da radiação eletromagnética na faixa dos raios-X associado à explosão indicaram que havia ocorrido uma das 3 maiores explosões solares das últimas 3 décadas (SKOUG et al., 2004). Subseqüentemente, além do aumento da radiação eletromagnética, observou-se a ocorrência de uma ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*) lançando um fluxo de vento solar intensificado em direção a Terra, onde medidas realizadas pela espaçonave ACE (*Advanced Composition Explorer*) indicaram uma velocidade do vento solar de aproximadamente 1850 km/s, bem acima da velocidade padrão (400-300 km/s). Como consequência, com a chegada da CME, às 06:11 UT (03:11 HL) do dia seguinte (29/10/2003), iniciou-se uma intensa tempestade geomagnética, aproximadamente 19 horas após a ocorrência da CME (SKOUG et al., 2004). Inclusive, Skoug et al. (2004) enfatiza que este tempo de deslocamento (19 horas) foi o terceiro mais rápido entre os registros de ocorrências existentes. Os deslocamentos mais rápidos de CME que se têm registrado ocorreram em 4 de agosto de 1972 (14,6 horas) e 2 de setembro de 1859 (17,5 horas) (SKOUG et al., 2004).

A figura 5.31 mostra os valores dos índices Kp e Dst para os dias 28 e 29 de outubro de 2003.

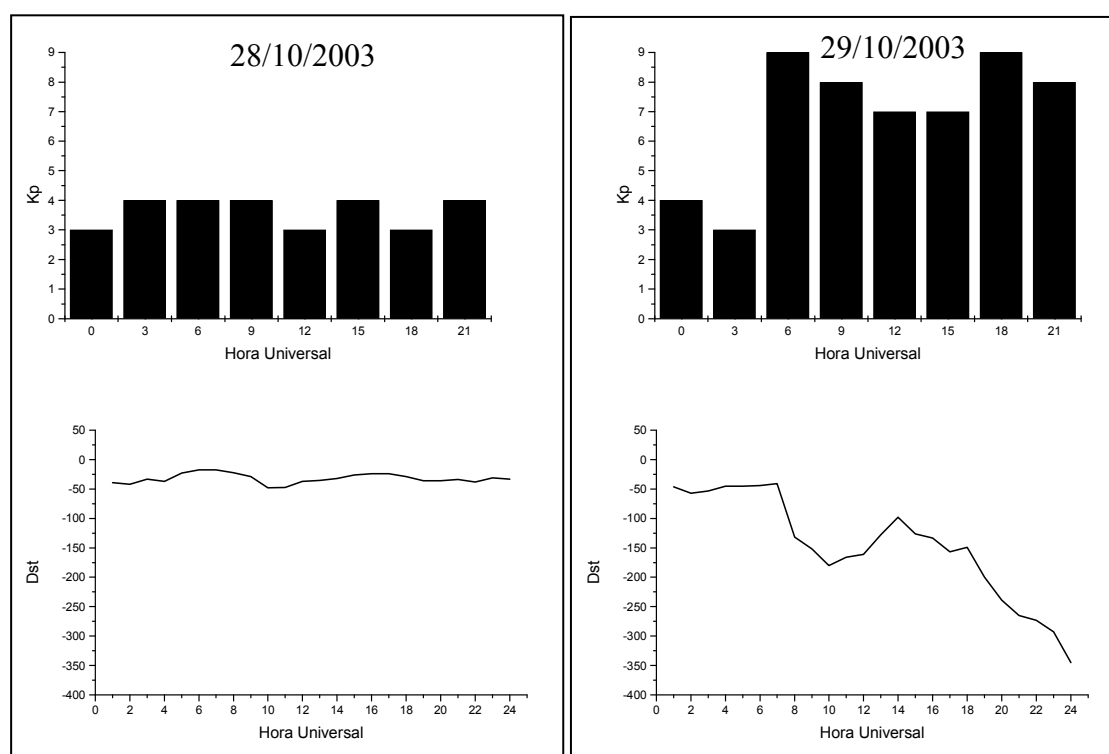


Figura 5.31 – Índices geomagnéticos Kp e Dst – 28 e 29 de outubro de 2003

Na figura 5.31 pode-se verificar a partir dos índices Kp e Dst a ocorrência de uma tempestade geomagnética muito intensa no dia 29 de outubro (ver classificação apresentada nas tabelas 2.3 e 2.4), iniciando-se por volta das 6 UT o aumento do índice Kp e o decréscimo do índice Dst. O índice Kp atingiu o valor máximo em sua escala (9) e o Dst obteve um valor mínimo de -345 nT. O valor do índice Ap para o dia 29 de outubro foi de 204, o que também o classifica como sendo um dia com “tempestade geomagnética muito intensa”. No dia 28 de outubro, embora não tenha presença de tempestade, a atividade geomagnética foi classificada como “ativa”, com índice Ap igual a 25.

Na seqüência serão mostrados os resultados e análises de experimentos realizados para o estudo do impacto da intensa explosão solar do dia 28 de outubro de 2003 no comportamento do TEC na região brasileira utilizando os dados GPS da RBMC e da rede IGS da América do Sul, bem como, do impacto no posicionamento por ponto. Primeiramente,

serão apresentados (seção 5.3.1.1 e 5.3.1.2) os experimentos relacionados à intensa tempestade geomagnética ocorrida no dia 29 de outubro de 2003 que está vinculado ao evento de CME associado à explosão solar. Depois, na seção 5.3.2, será apresentada uma análise do comportamento do TEC e do posicionamento por ponto decorrente do impacto causado pelo aumento do fluxo da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar.

5.3.1.1 O desenvolvimento não usual da anomalia equatorial

Nesta seção serão apresentados os experimentos realizados para o estudo do comportamento do TEC no período da manhã de 29 de outubro de 2003. Alguns resultados apresentados neste experimento foram realizados a partir de um trabalho em conjunto com pesquisadores da Divisão de Aeronomia do INPE (BATISTA et al., 2006). Este tipo de trabalho conjunto mostrou-se bastante interessante, pois, houve uma interação de conhecimentos e de diferentes técnicas de observação, contribuindo para uma análise mais aprofundada. Além disso, também foi interessante no sentido de verificar a concordância dos resultados entre técnicas distintas de observação: as Digissondas e o GPS.

Durante eventos de tempestades geomagnéticas, o comportamento da anomalia equatorial de ionização pode ser drasticamente afetado. O desenvolvimento da anomalia equatorial depende diretamente da intensidade e direção do campo elétrico zonal sobre o equador geomagnético que em combinação com o campo geomagnético gera o efeito fonte. O desenvolvimento da anomalia equatorial pode sofrer drásticas modificações em períodos geomagneticamente perturbados, como por exemplo, a sua formação em horários em que não é usual a sua presença (ABDU et al., 1991).

As figuras 5.32 e 5.33 mostram os valores dos parâmetros ionosféricos, altura de pico da camada F2 (hmF2) e frequência crítica (foF2) para o dia 29 de outubro e, também, mostram valores médios advindos de dias geomagneticamente calmos para o mesmo

mês, visando a comparação (BATISTA et al., 2006). Estes valores são advindos de ionogramas (15 minutos de resolução temporal) registrados por Digissondas localizadas em São Luiz (SL) ($\cong 3^{\circ}\text{S}$; 44°W) e Cachoeira Paulista (CP) ($\cong 22^{\circ}\text{S}$; 45°W), que, como já visto, são regiões próximas do equador geomagnético e do pico (crista) da anomalia equatorial, respectivamente.

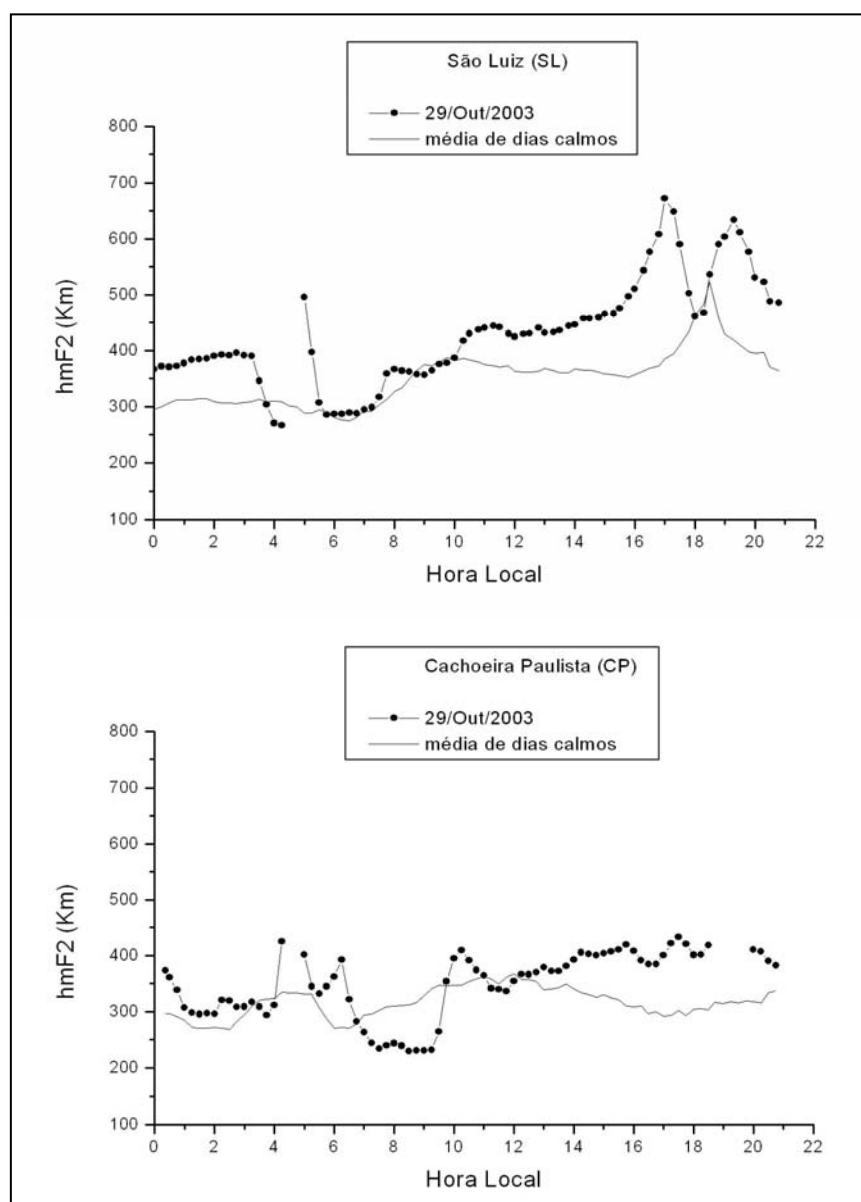


Figura 5.32 – Altura de pico (hmF2) para SL e CP para o dia 29 de outubro de 2003 e valores médios de dias geomagneticamente calmos para o mesmo mês
Fonte: Adaptada de Batista et al. (2006)

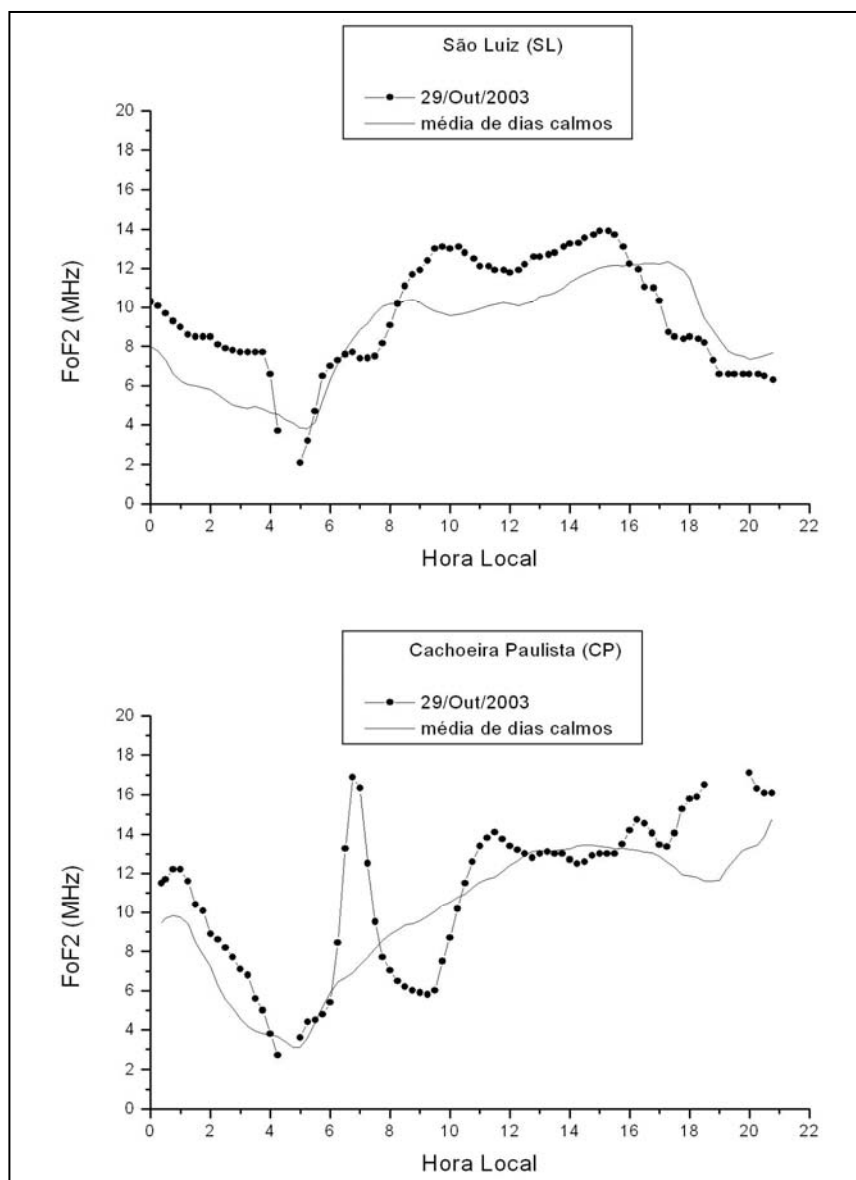


Figura 5.33 – Frequência crítica (foF2) para SL e CP para o dia 29 de outubro de 2003 e valores médios de dias geomagneticamente calmos para o mesmo mês
 Fonte: Adaptada de Batista et al. (2006)

Na figura 5.32 pode-se verificar que, logo após o início da tempestade as 3 HL (6 UT), ocorreu um rápido decréscimo no valor de hmF2 em SL. Porém, por volta das 5 HL um aumento significativo foi verificado. Este aumento pode ter ocorrido antes, pois, observando-se as figuras 5.32 e 5.33 pode-se notar que não houve registro as 04:30 e 04:45 HL nas duas Digisondas. Suspeita-se que a frequência crítica da camada F2 nesses períodos

tenha sido abaixo da menor frequência (2 MHz) utilizada pelas Digissondas (BATISTA et al., 2006).

Na figura 5.33 verifica-se como maior distúrbio o aumento de foF2 em CP, ou seja, o aumento da densidade de elétrons. Entre 5 e 6 HL, os valores de foF2 foram gradualmente aumentando em CP, tendo um comportamento similar ao apresentado para dias calmos. Porém, entre 06:00 e 06:45 HL houve um abrupto aumento de foF2, algo em torno de 3 vezes (de 5.4 para 16.9 MHz), bem diferente do que ocorreu para dias geomagneticamente calmos. Em SL, uma rápida diminuição em foF2 ocorreu por volta das 4 HL. Em dias calmos, espera-se um aumento gradual e suavizado de foF2 a partir do início diário da iluminação solar, ou seja, com o início diário do processo de fotoionização, que aumenta a produção de elétrons gradualmente conforme o aumento regular da radiação solar diária.

O aumento de hmF2 e a diminuição de foF2 em SL, e o aumento de foF2 em CP, respectivamente nos períodos citados anteriormente, mostram que possivelmente houve uma intensificação do efeito fonte durante as primeiras horas da manhã (\cong 6 HL) do dia 29 de outubro de 2003, onde elétrons da região equatorial (SL) deslocaram-se para a região de baixas latitudes (CP), gerando a anomalia equatorial, fato este que não é comum ocorrer nessas horas em dias calmos.

Outro fato que pode ser verificado na figura 5.33 é que, após o significativo aumento em CP, por volta das 06:45 HL inicia-se a diminuição de foF2. Inclusive, aproximadamente, as 07:30 HL os valores se tornam menores do que os valores médios de dias geomagneticamente calmos, ficando assim até por volta das 10:30 HL. Isto mostra que possivelmente houve uma intensificação e uma posterior retração da anomalia equatorial. Ainda das figuras 5.32 e 5.33 pode-se analisar o comportamento de foF2 e hmF2 no período da tarde e noite do dia 29 de outubro. Isto será analisado nos experimentos da próxima seção.

A figura 5.34 mostra valores do VTEC (em TECU) calculados com dados GPS coletados pela estação UEPP (22,1°S; 51,4°W) da RBMC utilizando o programa CALTEC, para o período das 5 as 8 HL. A observável utilizada no cálculo foi a pseudodistância filtrada pela fase. O atraso instrumental dos satélites foi eliminado dos valores de VTEC utilizando as informações contidas nos arquivos IONEX produzidos pelo CODE e o atraso instrumental do receptor foi obtido a partir do uso preliminar do programa Mod_Ion (CAMARGO, 1999).

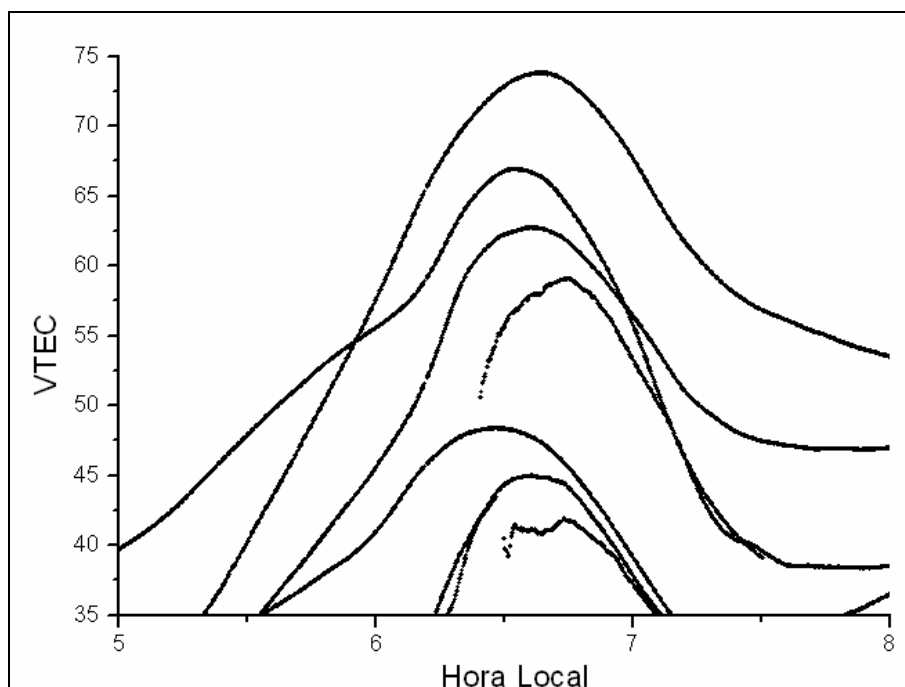


Figura 5.34 – Valores de VTEC (em TECU) para o período do início da manhã do dia 29 de outubro de 2003 – UEPP

Pode-se notar na figura 5.34, o aumento e posterior decréscimo dos valores de VTEC, estando em concordância com as observações advindas da Digissonda de CP no mesmo período. A figura 5.34 mostrou as observações de VTEC para todos os satélites observados, no período considerado, na estação UEPP. Aprofundando um pouco mais, uma outra análise pode ser realizada a partir da figura 5.35 que mostra os valores do VTEC (TECU

- em azul) e a sua taxa de variação (TECU/minuto – em preto) advindos de observações do satélite PRN 17. Para os demais satélites, um comportamento similar foi verificado.

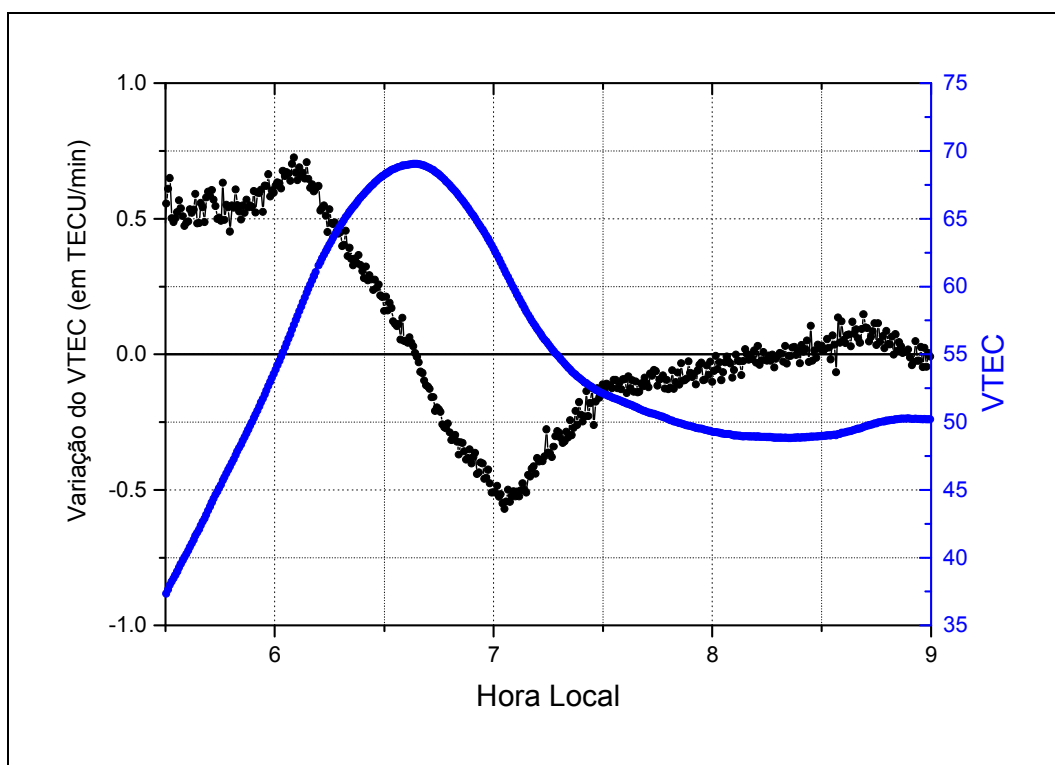


Figura 5.35 – VTEC (em azul) e taxa de variação do VTEC (em preto) – UEPP – PRN17 – 29 de outubro de 2003

Analisando a figura 5.35, pode-se verificar claramente o que já foi discutido até o momento. Observa-se que entre 5:30 e 6:10 HL, aproximadamente, a taxa de variação do VTEC apresenta valores positivos variando entre 0,5 e 0,7 VTEC/min, aproximadamente, fazendo com que neste período os valores de VTEC aumentem rapidamente. Porém, entre 6:10 e 07:00 HL verifica-se a diminuição repentina dos valores da taxa de variação do VTEC, apresentando uma diminuição da taxa com comportamento linear. Dentro deste intervalo, dois fatos podem ser destacados. Entre 6:10 e 6:45 HL, aproximadamente, embora a taxa de variação esteja diminuindo ela ainda é positiva, ou seja, os valores de VTEC continuam aumentando. Após as 6:45 HL, aproximadamente, a taxa de variação torna-se negativa e, portanto, dá-se início a diminuição do VTEC. Após as 7 HL, aproximadamente, a taxa de

variação inicia novamente a sua ascensão, adquirindo alguns valores positivos, porém muito próximos de zero, após às 8 HL, aproximadamente. A análise da figura 5.35 evidenciou as conclusões obtidas anteriormente que diz respeito ao aumento e a posterior retração dos valores do VTEC na região de baixas latitudes durante o período da manhã do dia 29 de outubro de 2003.

Continuando, a figura 5.36 mostra mapas horários do VTEC para a região brasileira entre 4 e 8 HL para o dia 29 de outubro de 2003. Para fins de comparação, também são apresentados mapas para o dia 11 do mesmo mês, que é um dia geomagneticamente calmo ($A_p = 2$) (BATISTA et al., 2006). Os valores de VTEC (em TECU) são advindos de observações GPS de 15 estações da RBMC e de 6 da rede IGS da América do Sul (a localização das estações está representada por pequenos pontos nos mapas) que foram processadas no programa CALTEC.

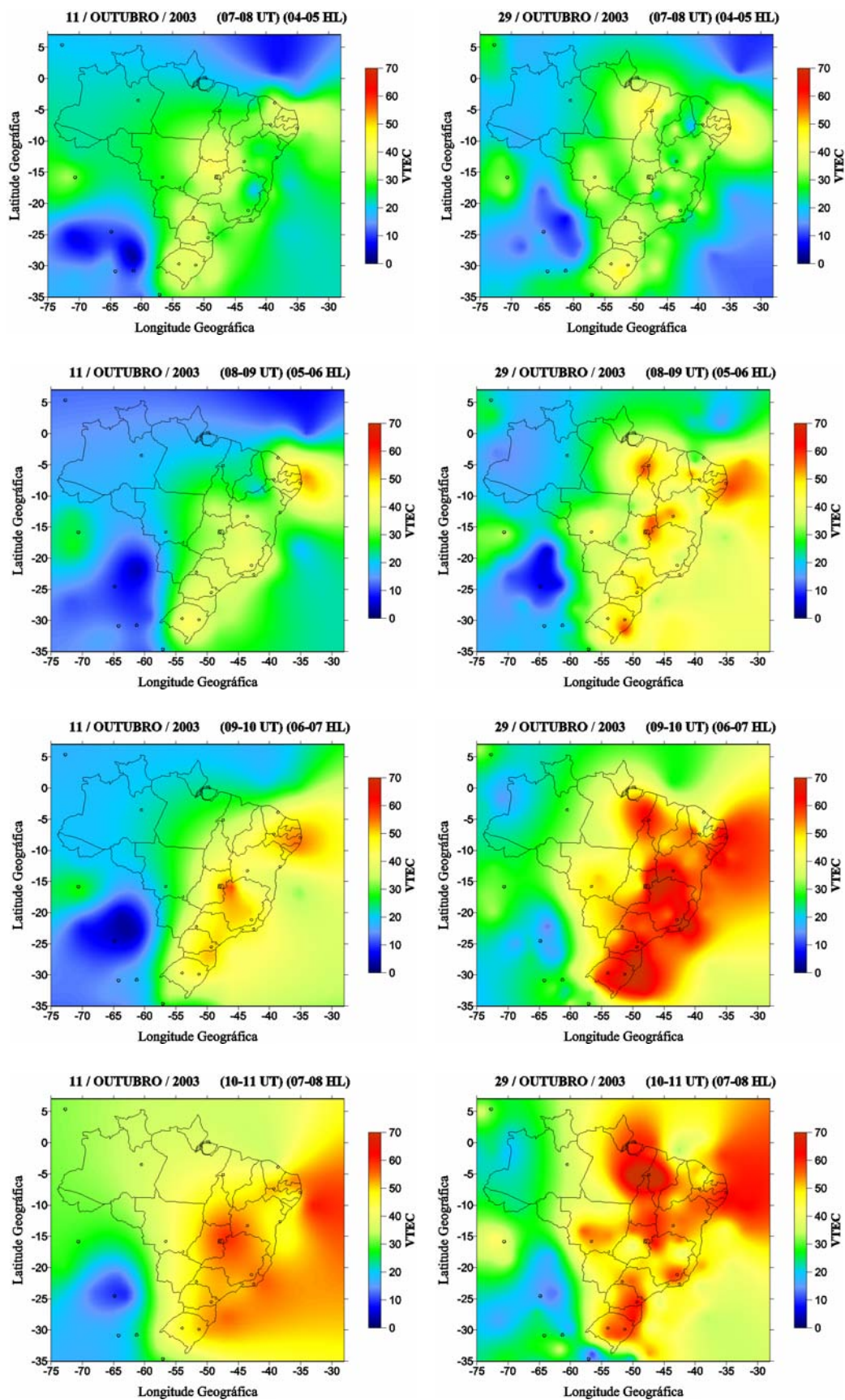


Figura 5.36 – Variação temporal do VTEC na região brasileira para os dias 29 e 11 de outubro de 2003 entre 7 e 11 UT (4 e 8 HL). Fonte: Adaptada de Batista et al. (2006)

Pode-se verificar na figura 5.36 que os valores do VTEC são baixos entre 4 e 5 HL, o que de fato se espera normalmente, pois, os valores mínimos do VTEC ocorrem aproximadamente neste período. No mapa seguinte (5-6 HL) o VTEC começa a aumentar, como esperado, devido ao início diário do processo de fotoionização. Porém, uma hora mais tarde (6-7 HL) uma repentina intensificação da anomalia equatorial foi observada e, logo após, no mapa das 7-8 HL a sua retração, estando em concordância novamente com as verificações feitas nos experimentos anteriores das Digissondas. No dia geomagneticamente calmo esse repentino aumento e retração não são observados, comportando-se como esperado, ou seja, num aumento contínuo e regular (BATISTA et al., 2006).

Aos interessados em obter mais informações e discussões relativas às possíveis causas físicas que geraram o fenômeno ionosférico observado, poderão encontrá-las em Batista et al. (2006).

5.3.1.2 Intensificação do TEC e deslocamento das cristas da anomalia equatorial

Analisando novamente a figura 5.32 e 5.33, concentrando a atenção para o período após as 10 HL, verifica-se que no período entre 10 e 16 HL, aproximadamente, os valores de foF2 em SL são maiores no dia da tempestade quando comparados aos valores médios de dias calmos. Já para CP entre 10 e 10:30 HL, aproximadamente, os valores de foF2 do dia da tempestade são menores do que para dias calmos, resultado ainda do fenômeno ocorrido no período da manhã. Após este período os valores de foF2 para CP são praticamente iguais aos de dias calmos até as 16 HL, aproximadamente. Após este horário, observa-se no dia da tempestade um rápido aumento e uma posterior diminuição na altura hmF2 na estação equatorial de SL. Novamente, as 18 HL, aproximadamente, este mesmo acontecimento é observado. Já os valores da frequência crítica foF2 para SL, que até então eram maiores do que para dias calmos, após as 16 HL tornaram-se menores, permanecendo

assim até o final do dia. Em CP, estação de baixas latitudes, os valores de foF2 para o dia da tempestade, que até então estavam praticamente iguais aos de dias calmos, ficaram maiores e permaneceram assim até o final do dia. Entre 18:45-19:45 HL, aproximadamente, tem-se a ausência de registros para CP devido a possíveis problemas técnicos (BATISTA, 2005).

A análise realizada anteriormente aponta alguns fatos interessantes. Primeiramente, verifica-se que possivelmente houve um aumento da densidade de elétrons nas regiões próximas do equador geomagnético durante o período da tarde do dia que ocorreu a tempestade (veja SL). As 19:30 HL, aproximadamente, um pico em hmF2 em SL é observado, mostrando que possivelmente houve uma intensificação da deriva vertical do plasma ionosférico na região equatorial quando comparada a dias calmos e, em consequência do efeito fonte intensificado, ocorreu um deslocamento dos elétrons para regiões ainda mais afastadas do equador geomagnético. Esta possível intensificação da elevação do plasma ionosférico na região do equador geomagnético, faz com que se espere que as cristas norte e sul da anomalia equatorial desloquem-se para regiões com latitudes mais afastadas do equador do que em dias geomagneticamente calmos. Outro fato é que, como houve um aumento na densidade de elétrons na região equatorial durante o período da tarde, espera-se também um aumento na densidade de elétrons nas regiões das cristas da anomalia equatorial após as 16 HL quando comparada a de dias geomagneticamente calmos. Estas observações foram possíveis de ser verificadas também nos experimentos realizados com dados GPS, que novamente se mostraram em concordância com os resultados advindos das Digissondas, e que serão vistos na seqüência. Observa-se também na figura 5.32 que por volta das 17 HL ocorreu um aumento dos valores de hmF2 para SL. Porém, Batista (2007) salienta que, embora hmF2 tenha aumentado por volta das 17 HL em SL, a base inferior da camada F2, ao contrário, não se elevou. Isto significa que houve uma elevação do plasma ionosférico somente na região de pico da densidade de elétrons da camada F2. Por outro lado, o pico de hmF2 ocorrido por

volta das 19:30 HL em SL, que foi comentado anteriormente, também foi acompanhado da elevação da base inferior da camada F2, mostrando a elevação do plasma ionosférico da camada F2 na região próxima ao equador geomagnético (BATISTA, 2007).

A figura 5.37 apresenta mapas do VTEC (em TECU) entre 15 e 24 HL para os dias 28 e 29 de outubro de 2003, visando comparar a modificação do comportamento do TEC no dia da tempestade em comparação a um dia antes. Foram utilizados dados GPS de 15 estações da RBMC e de 6 estações IGS da América do Sul, seguindo a mesma metodologia dos mapas produzidos anteriormente.

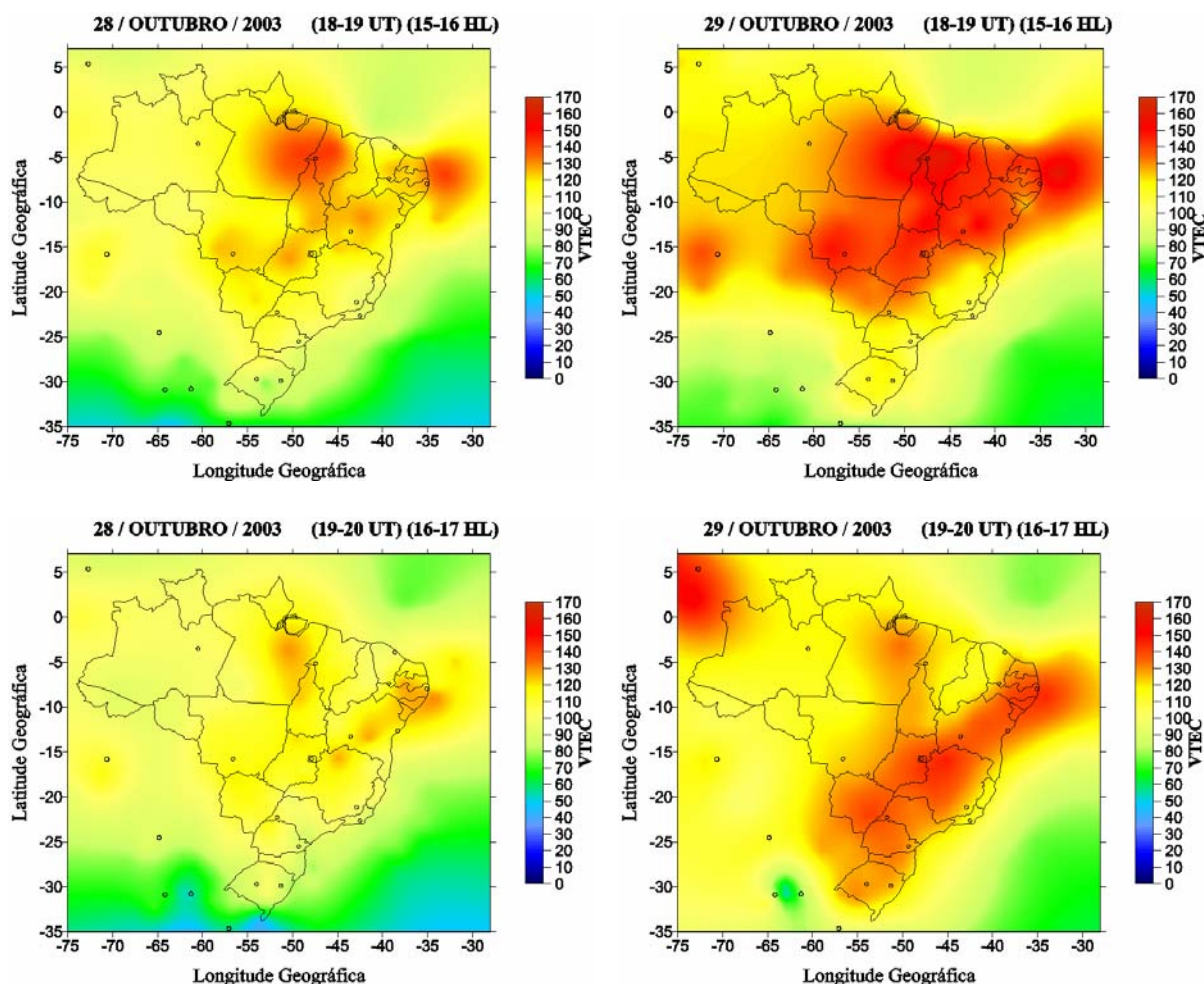
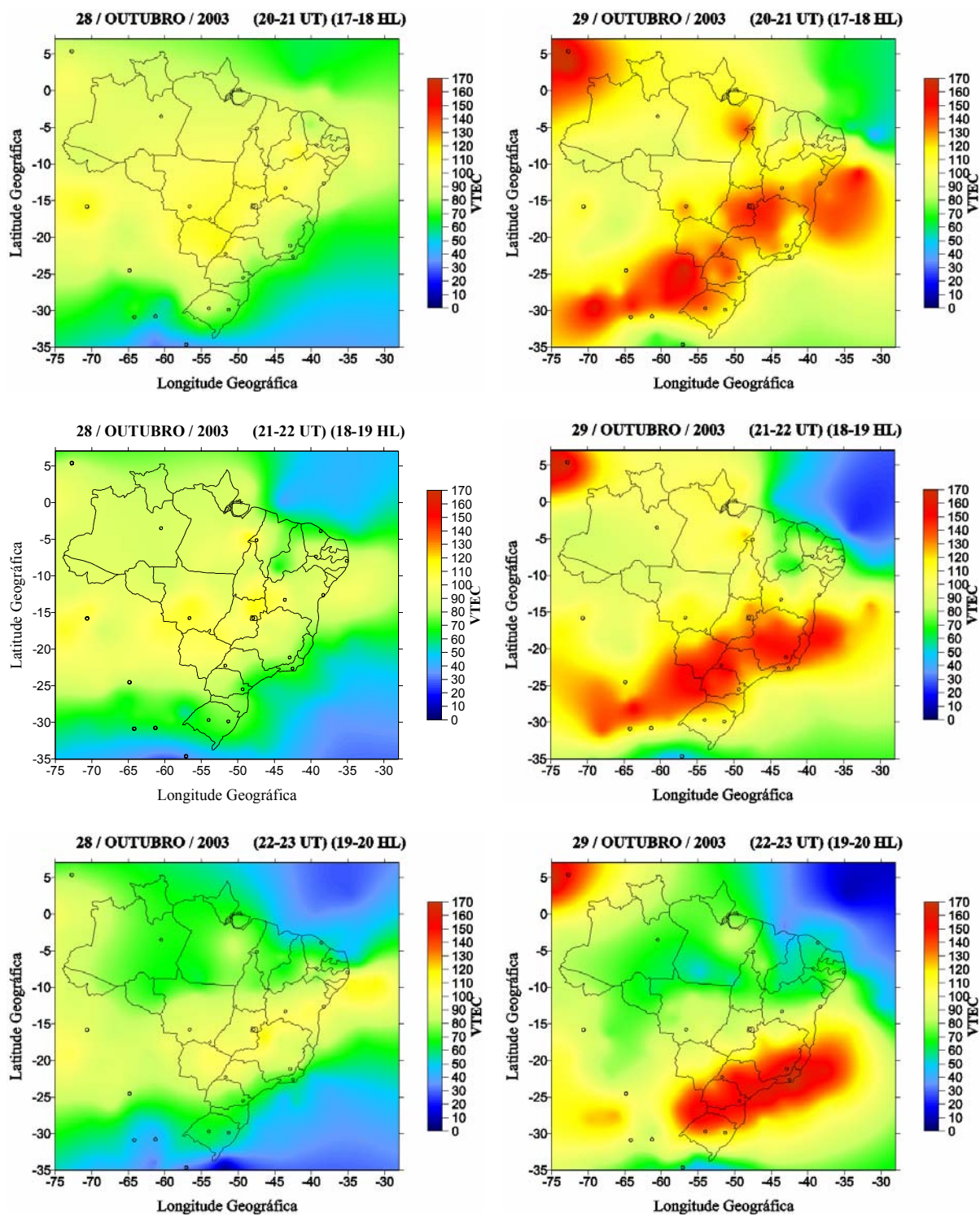
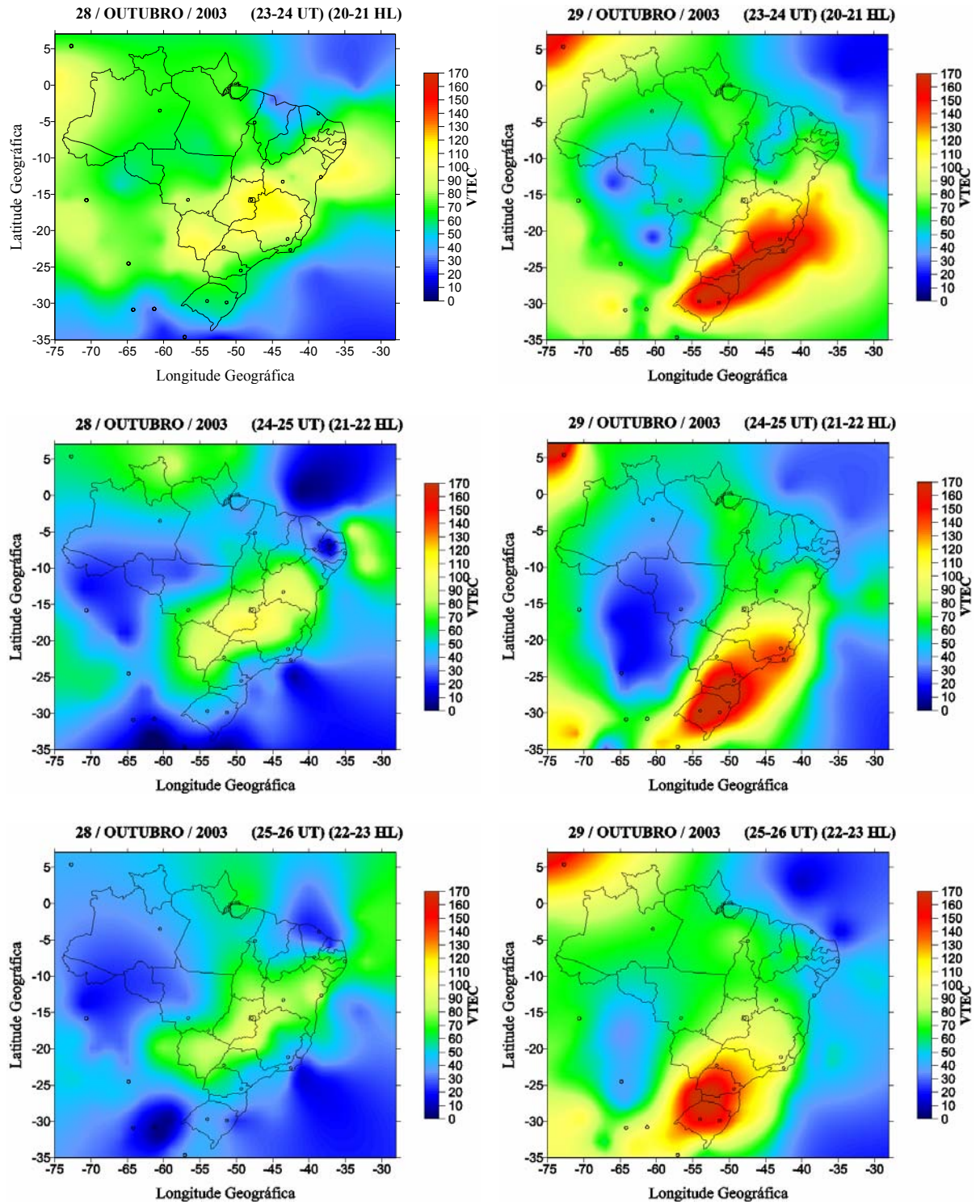


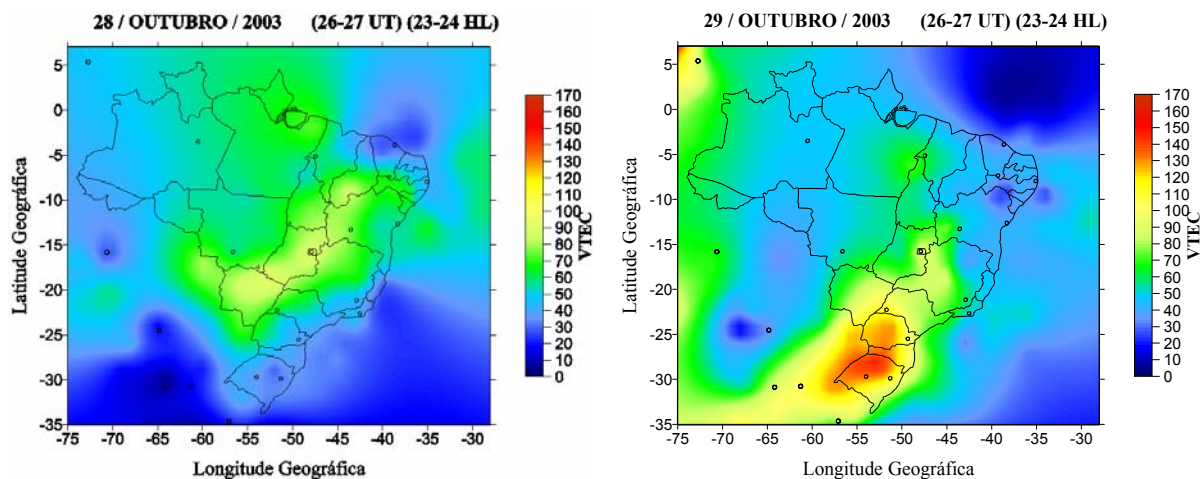
Figura 5.37 – Mapas do VTEC para 28 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL
(Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.37 – Mapas do VTEC para 28 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL (Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.37 – Mapas do VTEC para 28 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL (Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.37 – Mapas do VTEC para 28 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL

Verificando-se a figura 5.37 podem-se analisar as modificações no comportamento do TEC ocorridas no dia da tempestade para o período da tarde e do segundo pico da anomalia equatorial que normalmente ocorre no mês de outubro. Primeiramente, comparando os mapas do período das 15-16 HL pode-se notar que ocorreu no dia da tempestade um aumento do VTEC, principalmente nos locais mais ao norte do país, ou seja, mais próximo ao equador. Comparando os mapas das 16-17 HL se começa a notar o aumento do VTEC nas regiões mais ao sul e o início da diminuição do VTEC na região equatorial. A partir de então dois fatos se destacam: 1) Comparando-se os mapas seguintes se percebe um deslocamento da crista da anomalia equatorial para latitudes mais afastadas da região equatorial. Como exemplo, basta comparar nos mapas os valores do VTEC na região do Estado do Rio Grande do Sul entre os dias 28 e 29 de outubro. 2) Outro acontecimento interessante, que é possível de se observar comparando-se os mapas, é o aumento do VTEC na crista da anomalia equatorial, bem como a diminuição do VTEC nas regiões mais próximas ao equador que ocorreu no dia da tempestade em comparação ao dia anterior, aumentando ainda mais a variação espacial do VTEC na direção norte-sul no dia da tempestade. É importante salientar, que a partir dos mapas pode-se analisar somente a crista sul da anomalia equatorial.

Comparando-se o dia 29 de outubro de 2003 com um dia geomagneticamente calmo do mesmo mês (11) as diferenças verificadas no comportamento do VTEC ficam ainda mais evidentes. É o que pode ser verificado a partir da figura 5.38 a seguir.

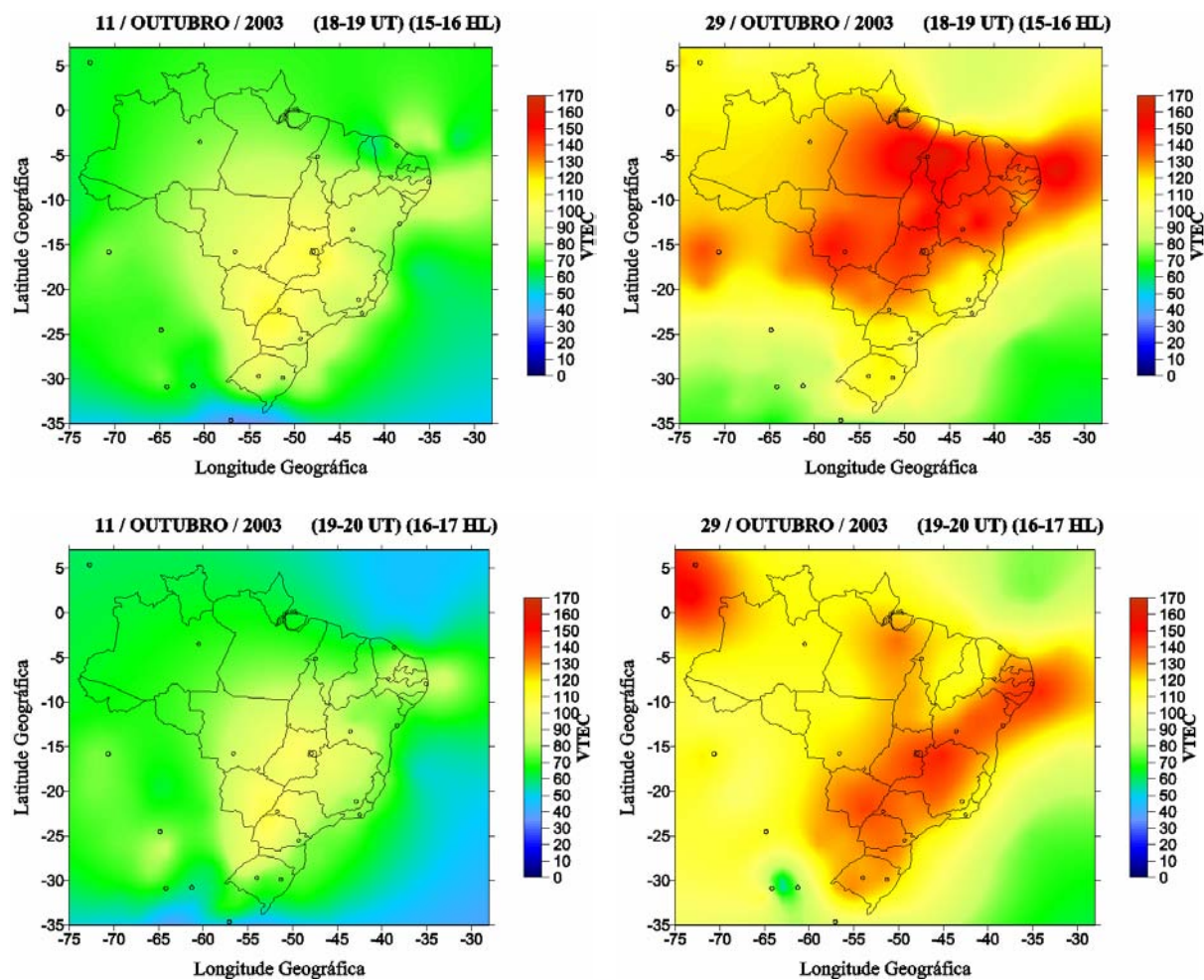
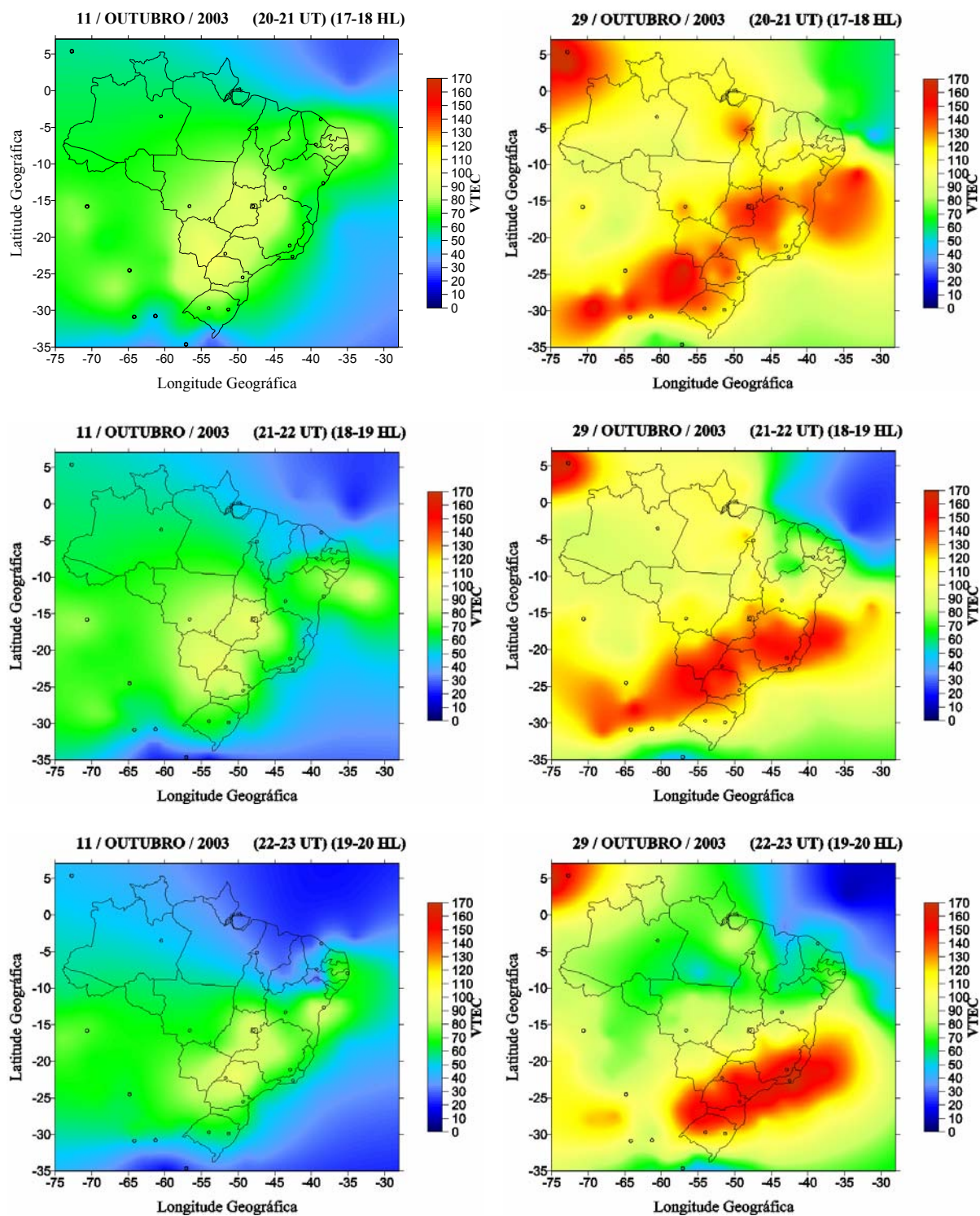
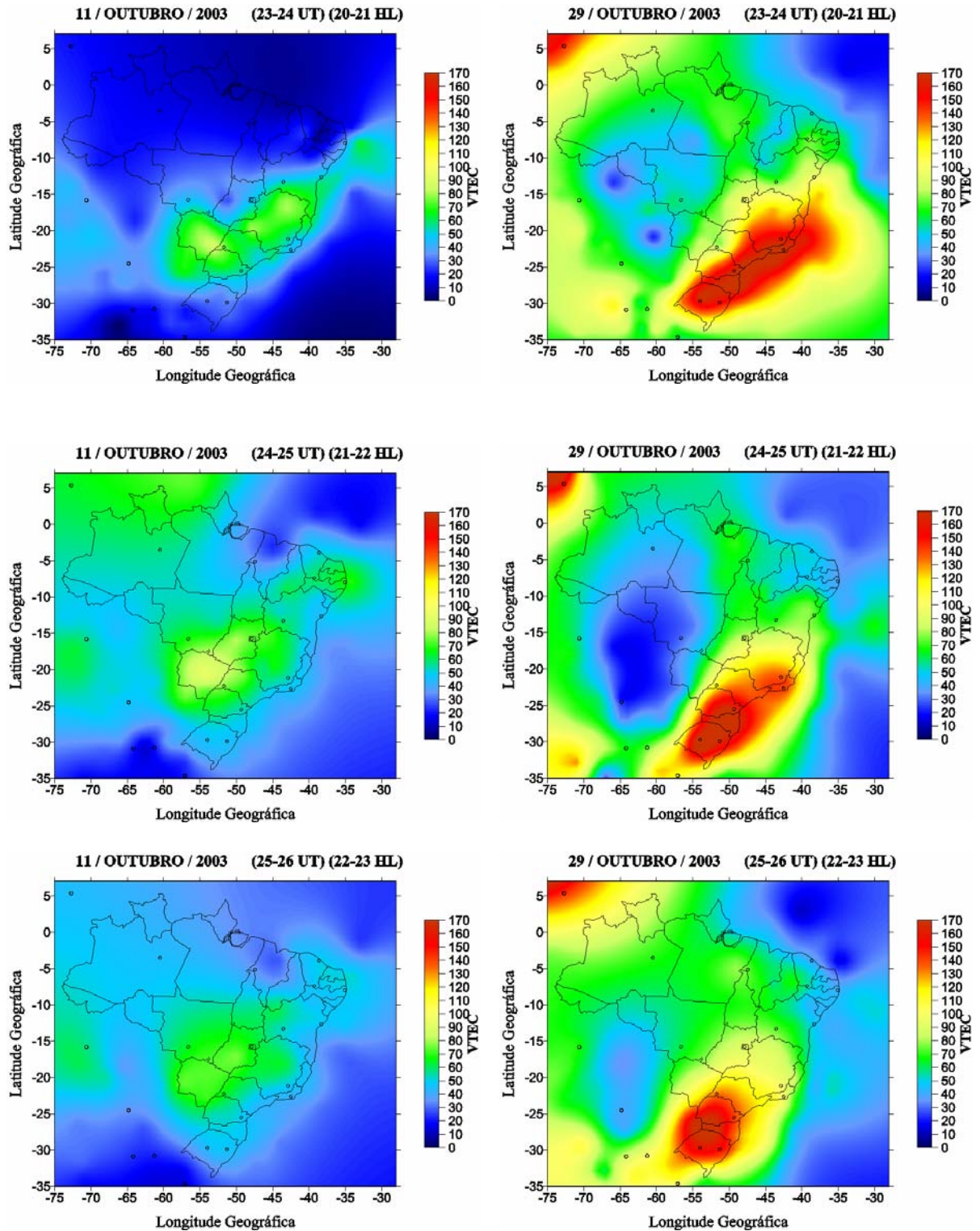


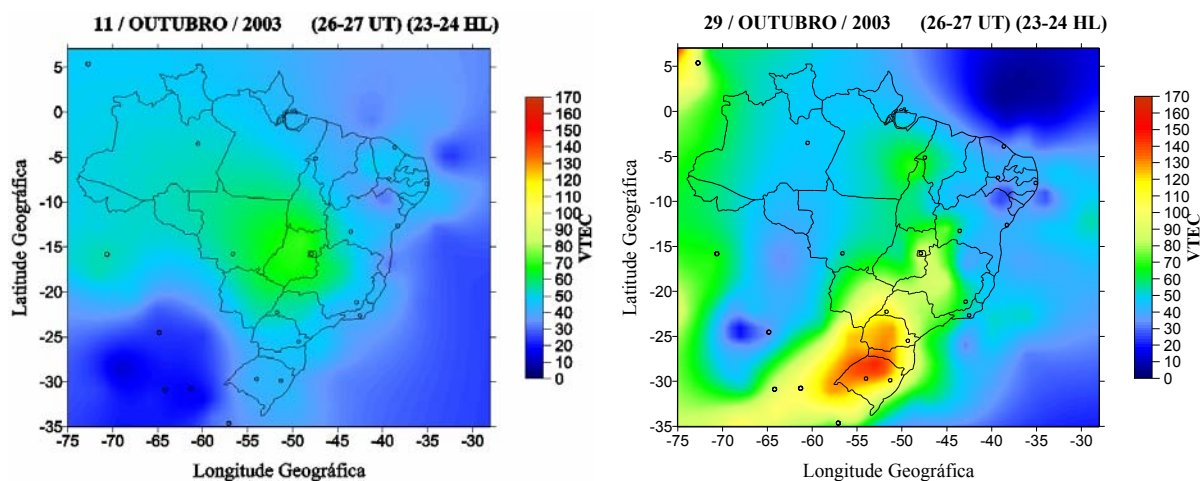
Figura 5.38 – Mapas do VTEC para 11 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL
(Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.38 – Mapas do VTEC para 11 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL (Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.38 – Mapas do VTEC para 11 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL (Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.38 – Mapas do VTEC para 11 e 29 de outubro de 2003 entre 15 e 24 HL

O aumento do VTEC e o deslocamento da crista sul da anomalia equatorial para regiões mais afastadas do equador, que foram observados no dia 29 de outubro de 2003 na região brasileira, também já foram verificados em outros dias de tempestade geomagnética do ciclo solar 23. Como exemplo, se pode consultar o trabalho realizado por Fedrizzi (2003) que estudou as tempestades ocorridas nos dias 15 de julho de 2000 e 31 de março de 2001.

Como exemplo de outros trabalhos que estudaram a tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 com dados GPS, pode-se citar os experimentos realizados por Skone et al. (2004). Os experimentos realizados mostraram o aumento do VTEC em algumas regiões dos Estados Unidos no período do segundo pico da anomalia equatorial, principalmente na parte mais ao sul dos Estados Unidos. Isso se deve principalmente ao deslocamento da crista norte da anomalia equatorial. Mais detalhes em Skone et al. (2004).

Dando continuidade às discussões e análises, vale lembrar que na presente pesquisa o enfoque principal é com relação ao comportamento do TEC, ou seja, ao erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. É claro que, as modificações do dia da tempestade geomagnética que foram observadas no comportamento do TEC, e conseqüentemente, no erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, gerarão modificações no comportamento do erro

esperado no posicionamento com GPS. Na região brasileira, mesmo em períodos geomagneticamente calmos, no mês de outubro uma alta variação espacial e temporal do TEC é observada. Principalmente, no período do segundo pico da anomalia equatorial, a região brasileira apresenta tanto a região que fica com valores baixos de VTEC quanto à região da crista sul da anomalia, com altos valores de VTEC. Ou seja, dependendo da localização do receptor, este pode coletar, em um mesmo instante, observações de um satélite com alta influência da ionosfera e de outro com baixa. Ainda, com base no que foi apresentado na seção 4.5, deve-se ter em mente que, mesmo um receptor que aparentemente esteja longe da região de crista da anomalia equatorial, este ainda pode receber observações de satélites com baixo ângulo de elevação que atravessaram a região de pico da anomalia equatorial. Desta forma, é evidente que a análise do comportamento do erro devido à ionosfera no posicionamento com GPS na região brasileira, principalmente no período de segundo pico da anomalia equatorial, não é uma tarefa simples. Investigações anteriores (MATSUOKA, 2003; AGUIAR e CAMARGO, 2006), realizados para a estação UEPP, no período do segundo pico da anomalia equatorial em meses próximos aos equinócios, mostraram uma variação bastante irregular do erro posicional (principalmente na componente altimétrica) advindo de um processamento de posicionamento por ponto, variando entre altos valores e baixos valores em curto período de tempo. Também, em experimentos preliminares de posicionamento relativo, realizados por Dal Poz (2005), verificou-se um aumento do erro posicional no período do segundo pico da anomalia equatorial nos meses próximos aos equinócios.

Voltando aos experimentos, foram realizados alguns experimentos para verificar o erro do posicionamento por ponto no período da tarde/noite do dia 29 de outubro de 2003, período em que grandes mudanças no comportamento do TEC foram verificadas. Para fins de comparação, também foi realizado o posicionamento por ponto para o dia 11 do

mesmo mês (dia geomagneticamente calmo). Utilizaram-se os dados GPS das estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT¹ (ver localização na figura 5.1).

Para realizar o posicionamento por ponto, os dados das quatro estações foram processados no software GPSPACE² (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*) desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*). Esse software possibilita realizar o posicionamento por ponto preciso utilizando pseudodistâncias (detalhes em NRCan, 1997). No processamento utilizaram-se, como observáveis, as pseudodistâncias advindas do código C/A em L1 coletadas de satélites com ângulo de elevação superior a 10 graus. As efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, geradas pelo GSD/NRCan, foram incluídas no processamento. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP), valor menor ou igual a 7. As posições foram estimadas a cada 30 segundos. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas conhecidas das estações. Note que o posicionamento por ponto que foi processado no software GPSPACE é classificado como “preciso” e não “convencional ou simples” pelo fato de utilizar as efemérides precisas e correções precisas dos relógios dos satélites. É importante salientar que o posicionamento por ponto preciso pode ser realizado de outras formas mais complexas. Aos interessados em obter mais informação sobre técnicas de posicionamento por ponto preciso podem consultar, por exemplo, Monico (2000).

As figuras 5.39 e 5.40 mostram o comportamento do erro planimétrico e altimétrico, respectivamente, para as estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT para o período da tarde/noite dos dias 11 e 29 de outubro de 2003.

¹ A preferência seria utilizar a estação IMPZ, pois, esta está mais próxima do equador geomagnético. Porém, os dados GPS de IMPZ não estão disponibilizados para o dia geomagneticamente calmo, impossibilitando a comparação.

² O GPSPACE pode ser adquirido gratuitamente no endereço eletrônico:
http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace_e.php

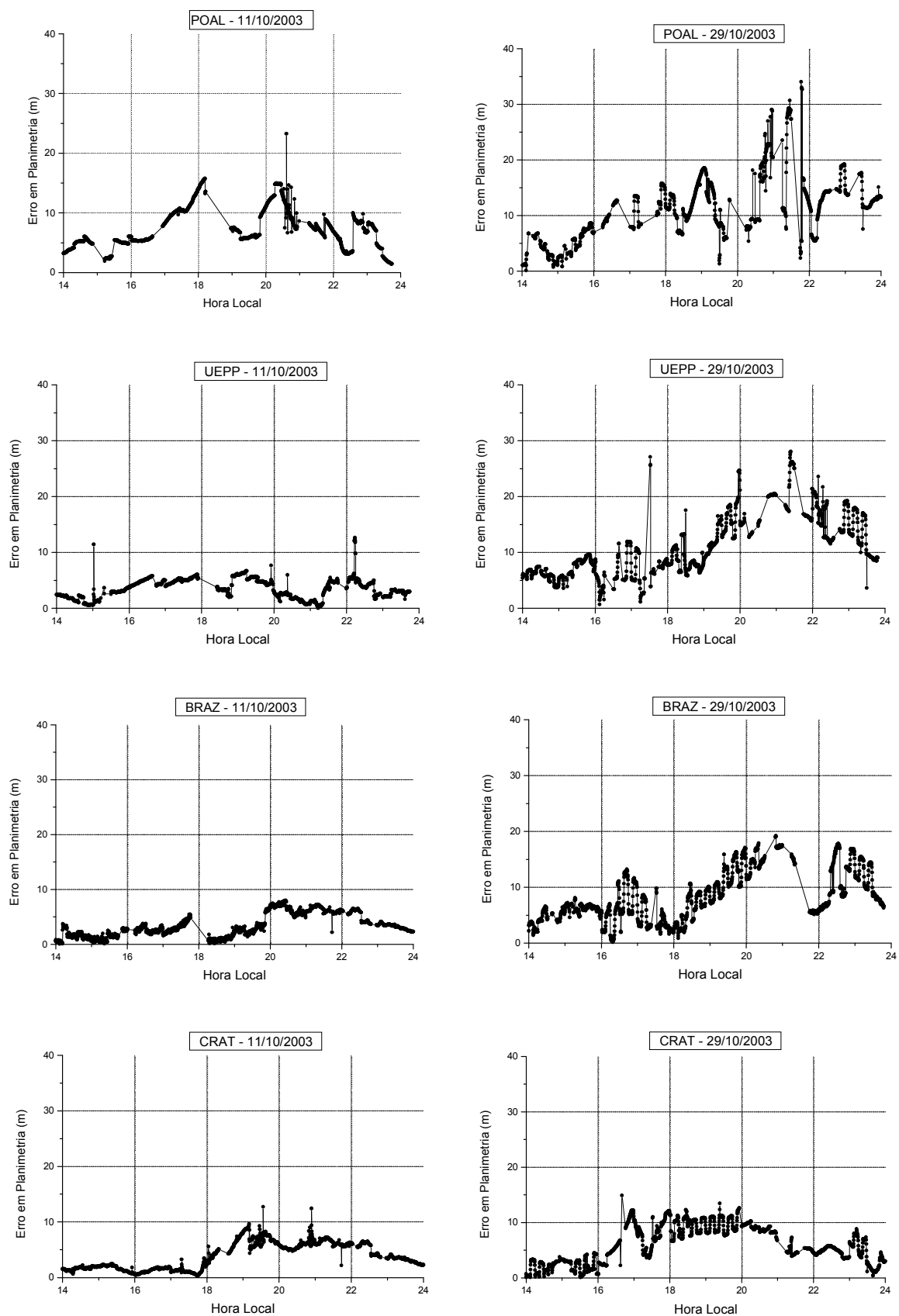


Figura 5.39 – Erro planimétrico – Posicionamento por Ponto - 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

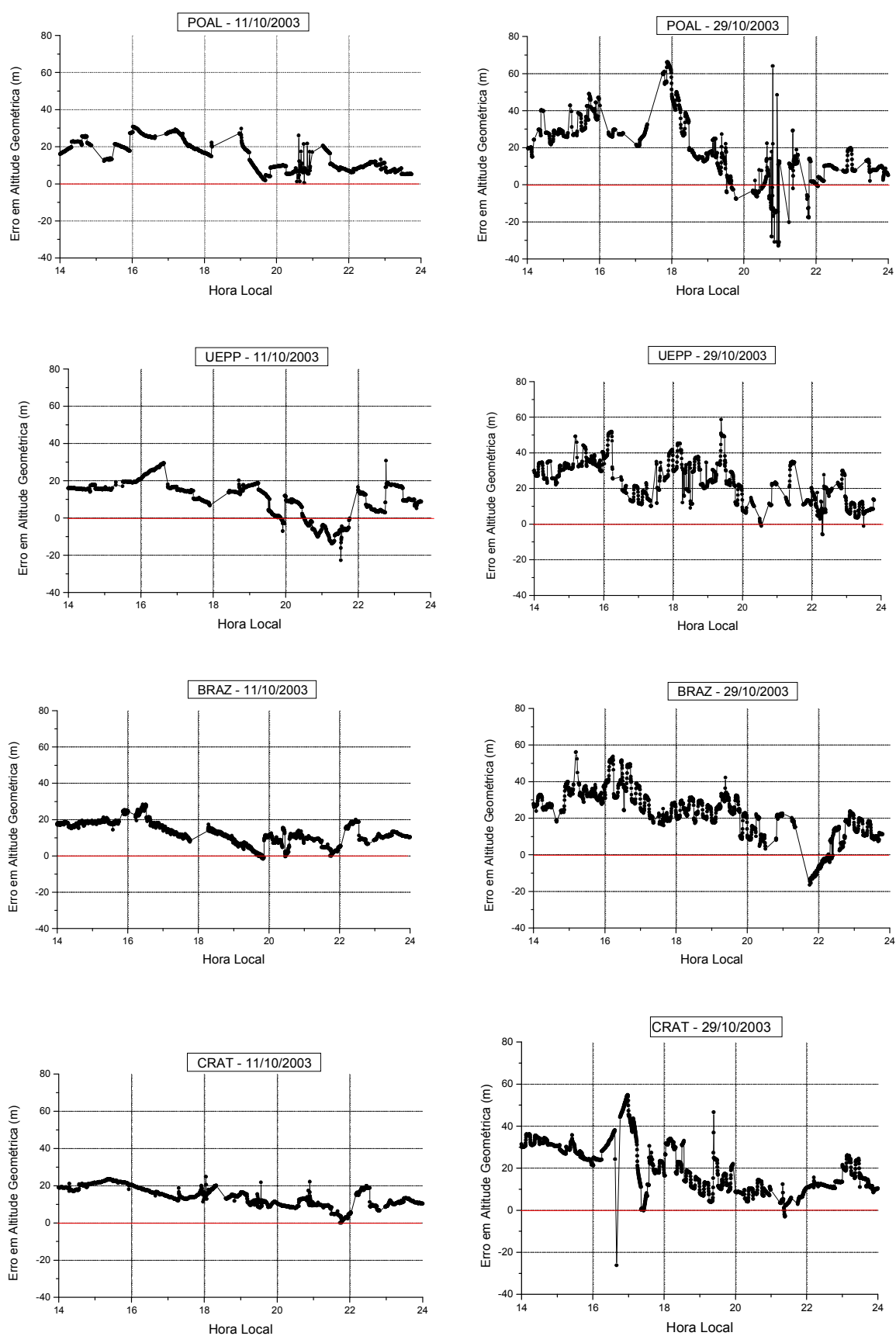


Figura 5.40 – Erro em altitude geométrica – Posicionamento por Ponto - 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

Analisando os gráficos das figuras 5.39 e 5.40 verifica-se que o erro devido à ionosfera, que contamina as pseudodistâncias, influencia mais a determinação em altitude geométrica do que a posição planimétrica. Isso já era esperado e foi observado em outros trabalhos (ex: EL GIZAWY, 2003), e tem relação com a geometria dos satélites, que favorece a determinação planimétrica.

Quanto às modificações ocorridas decorrentes das modificações do TEC devido à tempestade geomagnética, pode-se verificar claramente que, no dia 29, houve um aumento da variação temporal do erro planimétrico e altimétrico para as quatro estações. Em outras palavras, no dia da tempestade uma variação bem mais irregular do erro altimétrico e planimétrico é observada quando comparada ao dia geomagneticamente calmo. Além disso, de uma maneira geral, observam-se erros maiores no dia da tempestade.

Numa análise mais detalhada, concentrando primeiramente no erro planimétrico (figura 5.39), pode-se verificar que as maiores variações e magnitudes, decorrente da tempestade geomagnética, ocorreram para a estação POAL, com destaque para o período entre 20 e 22 HL. Para as estações UEPP e BRAZ, também se observa uma variação mais irregular do erro do que a do dia calmo, além de discrepâncias maiores em quase todo o período. Ainda, analisando o erro planimétrico, pode-se verificar que as menores mudanças ocorreram para a estação CRAT.

Quanto ao erro em altitude geométrica (figura 5.40), pode-se verificar que para todas as estações GPS uma variação temporal do erro bastante irregular ocorreu no dia da tempestade, além de valores maiores na maior parte do tempo, quando comparada ao dia de atividade geomagnética calma. Como períodos de grande destaque, podem-se citar: o próximo as 18 e 21 HL, aproximadamente, para a estação POAL; o próximo as 19:30 HL para UEPP e CRAT; e o próximo as 17 HL para CRAT. O aumento do erro no período da tarde evidencia o

aumento do VTEC que ocorreu no dia da tempestade neste mesmo período, como foi verificado nos experimentos anteriores. A grande variação irregular do erro verificada em destaque para POAL às 21 HL, aproximadamente, mostra o possível efeito decorrente do deslocamento para regiões mais afastadas do equador do segundo pico intensificado da anomalia equatorial, ocorrido no dia da tempestade. Porém, de fato, um comportamento bastante irregular do erro em altitude geométrica é verificado em todas as estações GPS no dia da tempestade em praticamente todo o período analisado, mostrando a influência da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003.

É importante enfatizar, por se ter feito uma comparação dos resultados de posicionamento por ponto entre dois dias (11 e 29 de outubro de 2003), que estipulou que no processamento apenas seriam consideradas as posições estimadas com GDOP menor do que 7. Isto já faz com que não haja diferenças significativas em termos de geometria dos satélites entre os dois dias, de forma a não influenciar a análise dos resultados. Mesmo assim, foi realizada a normalização dos erros em altitude geométrica e planimétrica pelos valores de GDOP, tendo em vista que o software GPSPACE fornece os valores de GDOP associado a cada posição estimada. As figuras geradas são apresentadas no Apêndice A. As mesmas análises e conclusões feitas anteriormente para as figuras 5.39 e 5.40, também valem ao se compararem os erros planimétricos e altimétricos normalizados pelo GDOP para os dias 11 e 29 de outubro de 2003.

Como já foi informado, nos endereços eletrônicos <http://www.spaceweather.com/> ou <http://www.sidc.be/index.php>, pode-se obter informações à respeito das condições atuais e previsões da atividade geomagnética, bem como, da ocorrência de explosões solares. Neste sentido, se o usuário tiver conhecimento que ocorreu uma intensa explosão solar¹ e que ela afetará drasticamente o campo geomagnético, ele saberá

¹ Inclusive, se o usuário fizer um cadastro ele poderá receber alerta da atividade solar/geomagnética por email.

que uma tempestade geomagnética muito intensa deverá ocorrer após algumas horas, afetando o posicionamento com GPS.

5.3.2 Efeitos do aumento da radiação eletromagnética associada à explosão solar de 28 de outubro de 2003

Os experimentos anteriores analisaram as mudanças ocorridas no TEC na região brasileira devido ao evento de CME associado à explosão solar ocorrido no dia 28 de outubro de 2003, que ocasionou uma intensa tempestade geomagnética no dia seguinte (29).

Normalmente, a maioria dos estudos encontrados na literatura, associados à intensas explosões solares, tratam do impacto no comportamento da ionosfera associado ao evento de CME, que dão início as tempestades geomagnéticas após várias horas da ocorrência do evento. Como se sabe, o início da tempestade depende da velocidade desse vento solar intensificado. Ou seja, normalmente os estudos se referem ao impacto na ionosfera terrestre devido ao aumento da radiação corpuscular (CME) devido à explosão solar.

Porém, um primeiro fenômeno que ocorre associado à explosão solar é o aumento da radiação eletromagnética. Como o comportamento do TEC, entre outros fatores, depende principalmente do nível de radiação eletromagnética solar (especialmente na faixa dos raios X e EUV), com o aumento desta radiação associado à uma intensa explosão solar, mudanças no comportamento do TEC também são esperadas. Como a radiação eletromagnética viaja aproximadamente na velocidade da luz no vácuo, os efeitos na ionosfera decorrentes do aumento do fluxo dessa radiação serão percebidos em poucos minutos do início da explosão solar.

Na seção 2.4.3.1 se comentou que o aumento da radiação eletromagnética solar, na faixa dos raios X, pode provocar um rápido aumento na densidade de elétrons na camada D da ionosfera (MCNAMARA, 1991). Segundo Leonovich et al. (2001), um aumento

súbito da densidade de elétrons na camada F também pode ser esperado. Os efeitos resultantes deste rápido aumento da densidade de elétrons da ionosfera associados ao aumento da radiação eletromagnética de explosões solares são denominados genericamente na literatura de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS). Entre os DIS que podem ocorrer, em decorrência do aumento da densidade de elétrons na ionosfera, está o rápido aumento do TEC (*Sudden Increase of TEC*) em determinadas regiões do globo terrestre (ZHANG et al., 2005).

Em suma, os experimentos realizados nesta seção têm como objetivo verificar se houve a ocorrência de um súbito aumento do TEC na região brasileira devido ao aumento do fluxo de radiação eletromagnética associado à intensa explosão solar de 28 de outubro de 2003. Um estudo do impacto no posicionamento por ponto em diferentes locais do Brasil também foi realizado.

A figura 5.41 mostra o fluxo de raios X ($1-8 \text{ \AA}$ e $0,5-4 \text{ \AA}$) registrado pelo satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) durante o período das 10 às 12:30 UT (7 – 9:30 HL) do dia 28 de outubro.

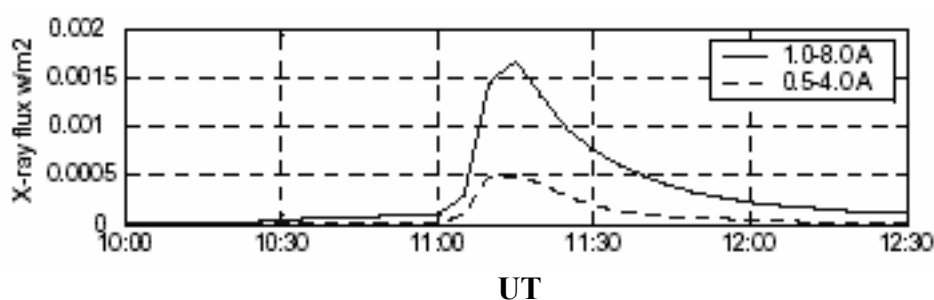


Figura 5.41 – Fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES no dia 28 de outubro de 2003 entre 10 e 12:30 UT. Fonte: Adaptada de Tsurutani et al. (2006)

Analisando a figura 5.41 pode-se observar que, devido à explosão solar, um abrupto aumento do fluxo de raios X ocorreu após as 11 UT (8 HL), com pico as 11:15 UT aproximadamente.

A figura 5.42 mostra o comportamento do VTEC no período entre 9 e 13 UT (6 e 10 HL) do dia 28 de outubro de 2003, calculados a partir dos dados GPS das estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT (a localização delas pode ser vista na figura 5.1). Os dados foram processados no programa CALTEC.

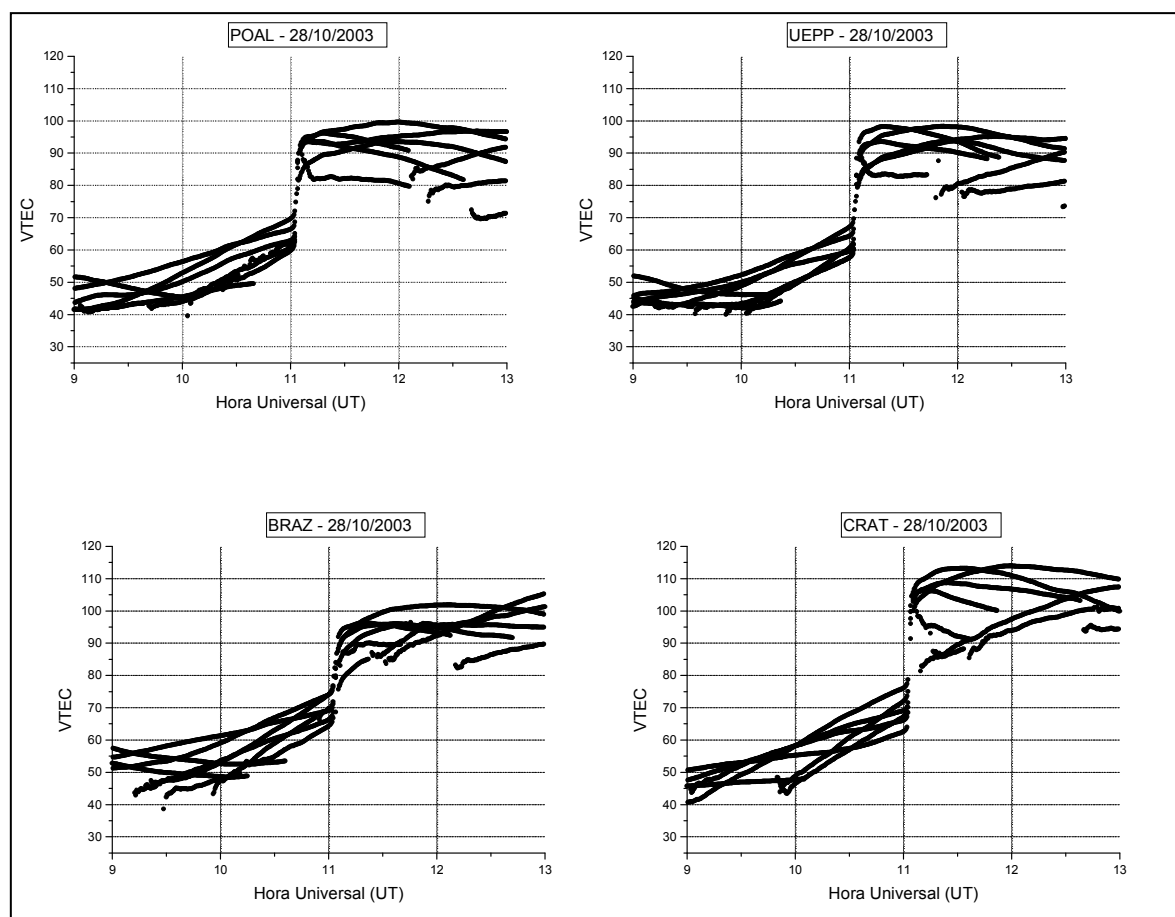


Figura 5.42 – Valores de VTEC para o dia 28 de outubro de 2003 entre 9 e 13 UT (6 e 12 HL) – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

Analisando a figura 5.42 pode-se verificar que ocorreu um fenômeno de DIS, estando em concordância com o aumento do fluxo da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar. Os valores de VTEC aumentaram repentinamente logo após as 11:04 UT (08:04 HL), aproximadamente, em todas as estações GPS do experimento, mostrando a característica abrangente do fenômeno observado, uma vez que essas estações estão distribuídas em várias regiões do Brasil.

Outro fato observado foi o não registro (perda de sinal) das observáveis de fase e pseudodistância em L_2 de alguns satélites nos arquivos RINEX das 4 estações GPS, todas ocorridas em 11:03 UT (08:03 HL), aproximadamente. Na estação CRAT isto ocorreu com o satélite PRN 9, 18 e 26, na UEPP com o PRN 25, na POAL com PRN 25 e 24 e na BRAZ com PRN 25. Para as observáveis de fase e pseudodistância em L_1 não houve perdas. Porém, é evidente que elas estão com a influência do aumento do TEC e, portanto, com um aumento do erro devido à ionosfera.

A figura 5.43 mostra mapas do VTEC para o Brasil produzidos para o dia 28 de outubro de 2003 entre 9 e 14 UT (6 e 11 HL). Para fins de comparação, são também apresentados mapas do dia 11 de outubro (geomagneticamente calmo).

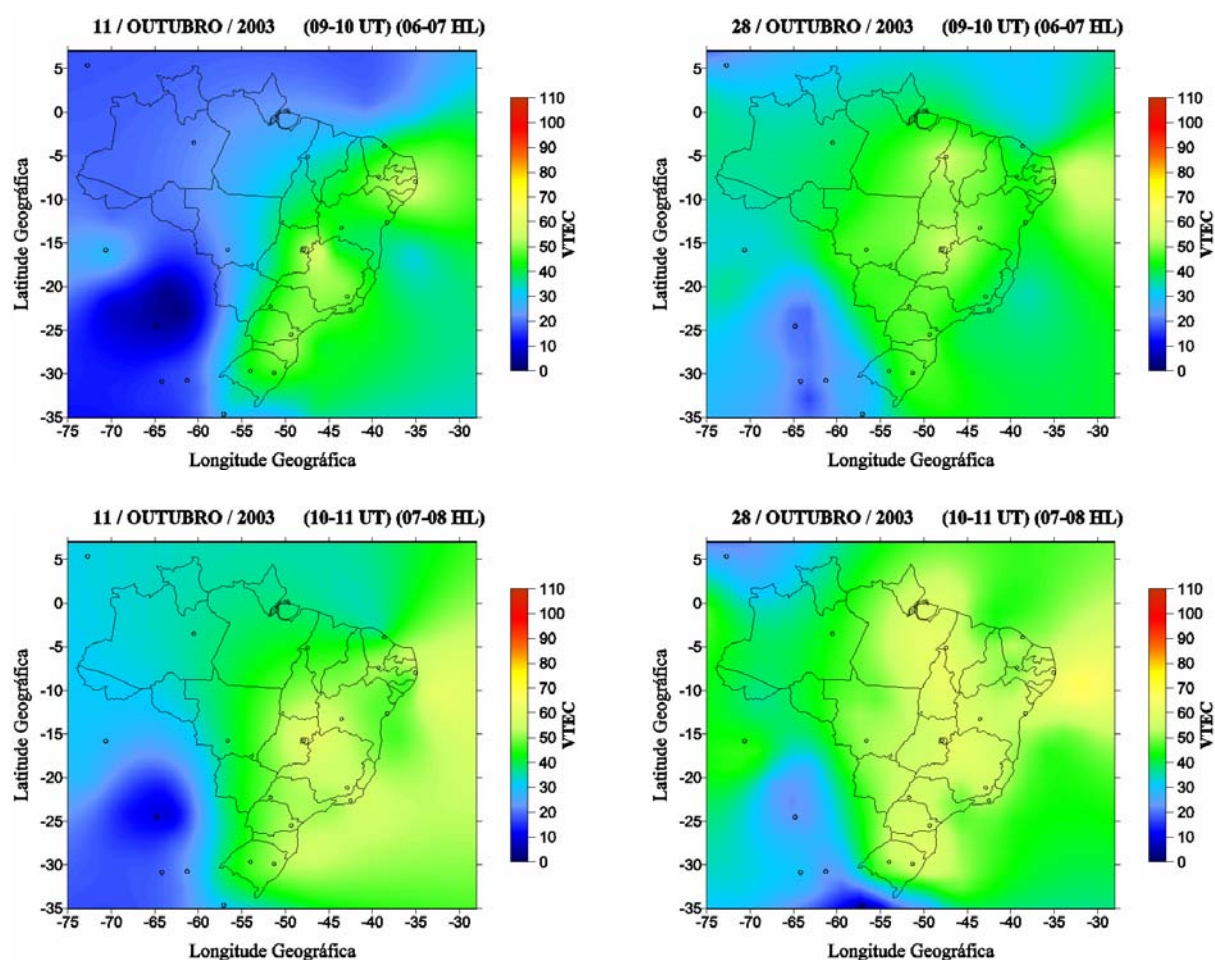
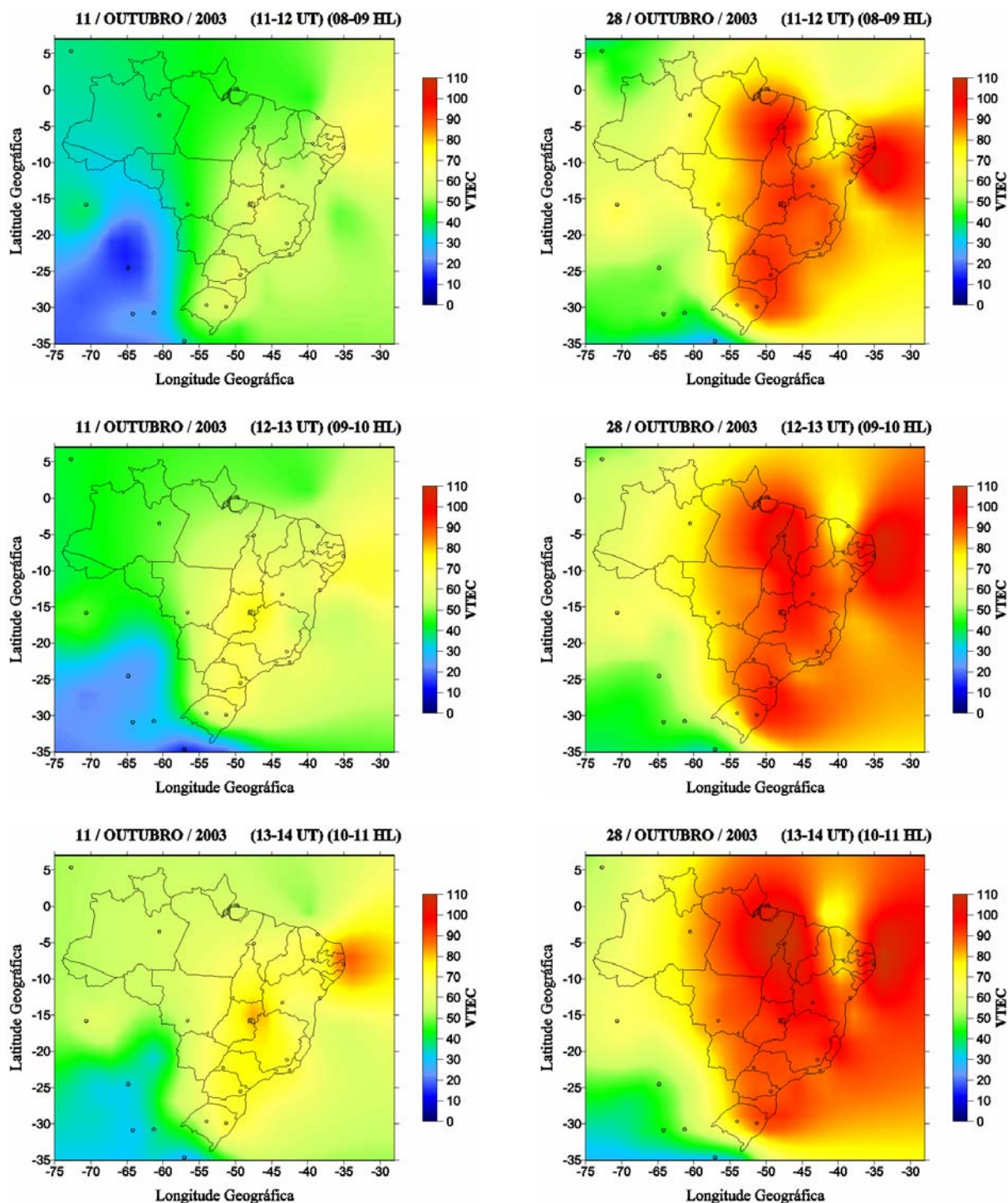


Figura 5.43 – Mapas do VTEC para o Brasil – 11 e 28 de outubro de 2003 entre 9 e 14 UT (6 e 11 HL) (Continua ...)



(... Continuação) Figura 5.43 – Mapas do VTEC para o Brasil – 11 e 28 de outubro de 2003 entre 9 e 14 UT (6 e 11 HL)

Analisando a figura 5.43 pode-se verificar o aumento ocorrido no VTEC em toda a região brasileira estando em concordância com o rápido aumento do fluxo de radiação eletromagnética decorrente da explosão. Enquanto no dia 11 de outubro um aumento gradual

é verificado em todo o período, no dia 28 observa-se um aumento gradual nos dois primeiros mapas e, um aumento abrupto é verificado no mapa das 11-12 UT (8-9 UT). A partir de então um aumento gradual é verificado, porém, com valores maiores do que para o dia geomagneticamente calmo (11).

Foi realizado o posicionamento por ponto para as estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT utilizando o software GPSPACE para o período entre 10 e 13 UT (7 e 10 HL) do dia 28 de outubro, visando verificar o impacto causado devido ao repentino aumento do TEC decorrente da explosão solar. No processamento do posicionamento por ponto foi adotado o mesmo procedimento do experimento anterior (seção 5.3.1.2). A figura 5.44 apresenta o comportamento do erro em planimetria e altitude geométrica, entre 7 e 10 HL (10 e 13 UT), para as quatro estações GPS consideradas no experimento.

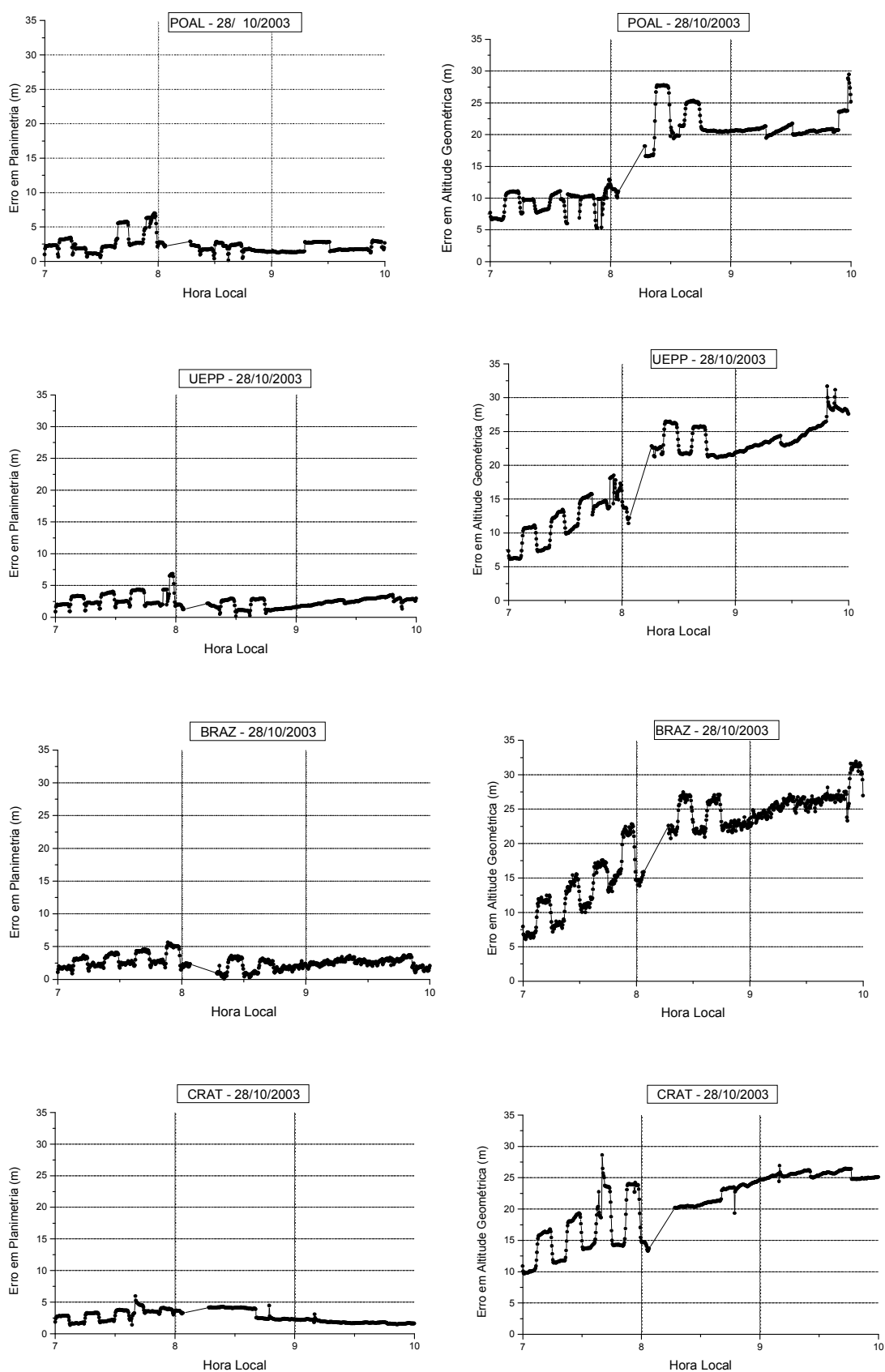


Figura 5.44 – Erro em planimetria e em altitude geométrica – Posicionamento por ponto – 28/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

Analisando os gráficos da figura 5.44, várias características semelhantes podem ser observadas em todos eles. Primeiramente, pode-se verificar que uma maior variação temporal de ambos os erros ocorreu para as estações POAL, UEPP e BRAZ no período entre 7 e 8:45 HL (10 e 11:45 UT), aproximadamente. Para a estação CRAT uma maior variação é observada entre 7 e 8 HL (10 e 11 UT), aproximadamente.

Um fato ocorrido para todas as estações GPS foi que o software GPSPACE não realizou o posicionamento por ponto no período entre 08:04 e 08:15 HL (11:04 e 11:15 UT). O início deste período de ausência de posições estimadas coincide com o aumento repentino do VTEC, ou seja, do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, observado nas quatro estações GPS devido ao aumento da radiação eletromagnética decorrente da explosão (ver figuras 5.41 e 5.42). Os arquivos de saída gerados pelo software GPSPACE informam que durante este intervalo as pseudodistâncias (C/A) advindas de 2-3 satélites não passaram pelo controle de qualidade específico do software, sendo classificadas como sendo “*outliers*”¹, um termo bastante empregado em Ajustamento de Observações para indicar que uma observação (medida) não está dentro da propriedade estocástica pré-estipulada. Isto mostra a possível influência do aumento repentino do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. Além disso, coincidentemente durante o período citado, as observações dos demais satélites não foram nem analisadas pelo software, pois, não houve registro do erro do relógio desses satélites no arquivo de correções precisas dos relógios dos satélites produzidos e disponibilizados pelo GSD/NRCAN e que foi utilizado no processamento. Nesses casos, o GPSPACE também rejeita automaticamente do processamento as observações desses satélites. Desta forma, somando todas as exclusões o processamento não foi realizado nesse período.

¹ Para quem desejar um maior aprofundamento sobre outlier pode consultar, por exemplo, Teunissen (2000).

É importante salientar que a detecção de pseudodistâncias com qualidade abaixo da requerida pelo GPSPACE, durante o período citado anteriormente, é observada nas quatro estações GPS utilizadas no experimento, o que evidencia uma resposta em larga escala da explosão solar no posicionamento com GPS na região brasileira. Também, da mesma forma, a alta variação temporal do erro, principalmente em altitude geométrica, observada para as quatro estações GPS, também mostra outra influência em larga escala decorrente da explosão solar.

Continuando a análise dos gráficos da figura 5.44 outro fato ocorrido de abrangência geral é que, para todas as estações GPS, houve um aumento do erro em altitude geométrica após as 08:15 HL (11:15 UT), ou seja, logo após o período de ausência de determinações citado anteriormente. Quanto ao erro em planimetria, observa-se que, para todas as estações GPS, este erro foi menor do que o erro em altitude geométrica, não ultrapassando 7 metros aproximadamente. Ainda, com relação ao erro em planimetria, diferentemente do que se observou para o erro altimétrico, não se pode verificar um aumento do erro após as 08:15 HL (11:15 UT). Novamente, pode-se verificar que a maior influência da ionosfera é na determinação da altitude geométrica. A pouca influência da ionosfera no posicionamento planimétrico fica ainda mais destacado pelo fato de que o período analisado corresponde às primeiras horas da manhã, quando, como se sabe, está se iniciando a produção de elétrons livres.

Para fins de comparação, foi realizado o posicionamento por ponto para o dia 11 de outubro de 2003 (dia geomagneticamente calmo). A figura 5.45 apresenta os gráficos para o erro planimétrico e altimétrico para as quatro estações GPS utilizadas no experimento.

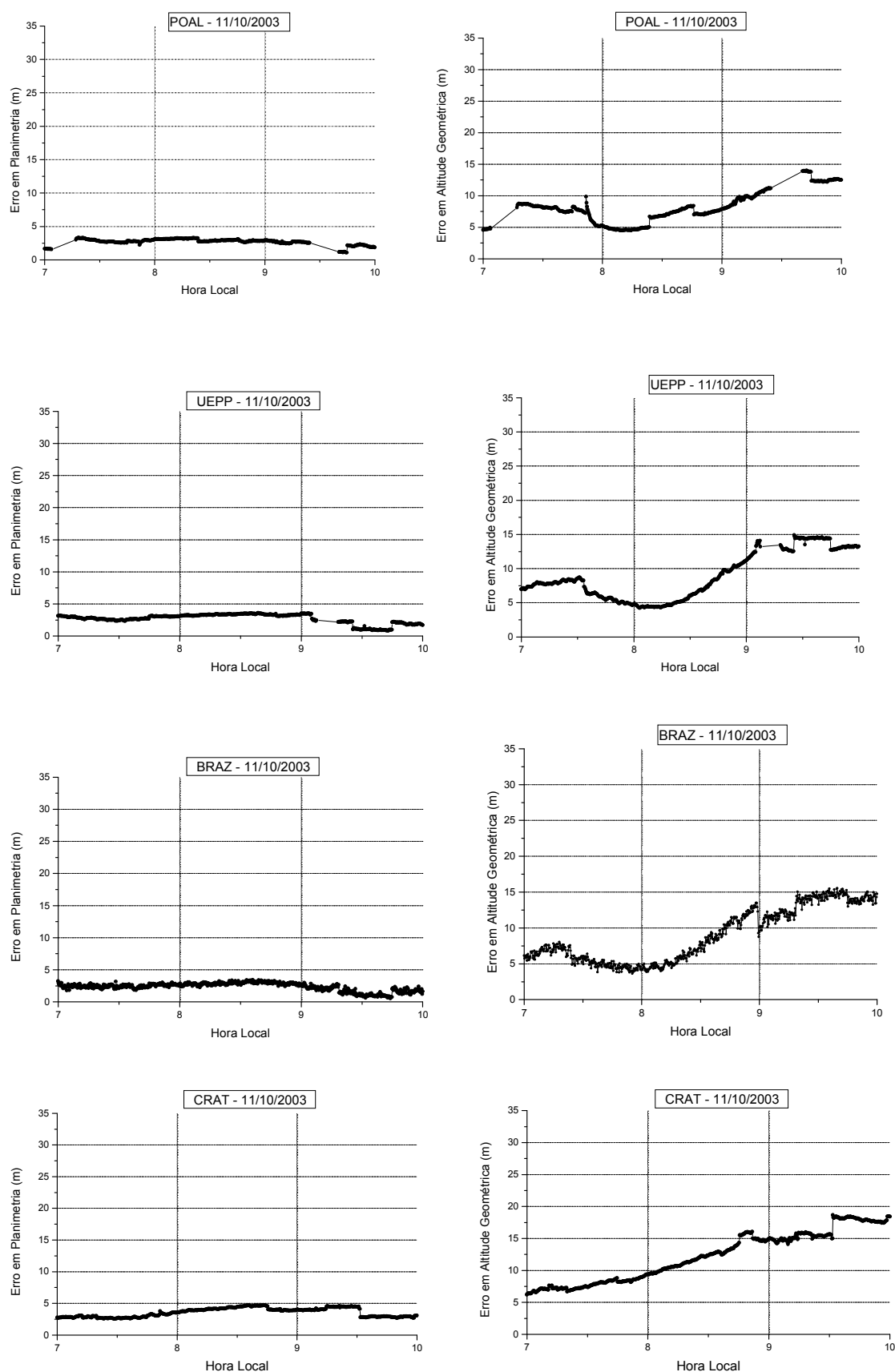


Figura 5.45 – Erro em planimetria e em altitude geométrica – Posicionamento por ponto – 11/10/2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

Analisando os gráficos da figura 5.45, pode-se concluir que não se observa para o dia 11 de outubro os fatos ocorridos para o dia 28, evidenciando ainda mais que as modificações ocorridas na acurácia do posicionamento por ponto têm correlação com o aumento da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar. Observando os gráficos da figura 5.45, pode-se verificar, de uma maneira geral, um comportamento bastante esperado para o período analisado. Primeiramente, o erro em planimetria apresenta pouca influência da ionosfera, principalmente, no período da manhã. O comportamento do erro em altitude geométrica apresenta de maneira geral um aumento gradativo, sem grandes variações, estando de acordo com o aumento gradual da atividade ionosférica que ocorre durante o período da manhã.

Para finalizar, voltando para o dia 28 (figura 5.44), um fato que chama atenção é o comportamento irregular da variação temporal dos erros planimétricos e altimétricos no período anterior ao efetivo aumento repentino da radiação eletromagnética, ou seja, no período que antecede a intensa explosão solar. Este tipo de observação merece futuras investigações, no sentido de verificar se este mesmo comportamento ocorreu para outros períodos de intensas explosões solares. O que já se pode verificar é que, analisando o fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES para o dia 28 de outubro de 2003, mesmo antes do abrupto aumento ocorrido as 11:00 UT, aproximadamente, o fluxo já apresentava valores altos para o dia 28 quando comparado ao dia 11 do mesmo mês, classificado como geomagneticamente calmo, o que pode ter ocasionado no comportamento irregular do erro em altitude e planimetria que foi observado antes do período das 11:00 UT. A figura 5.46 mostra o fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES comparando o dia 11 com 28 de outubro 2003.

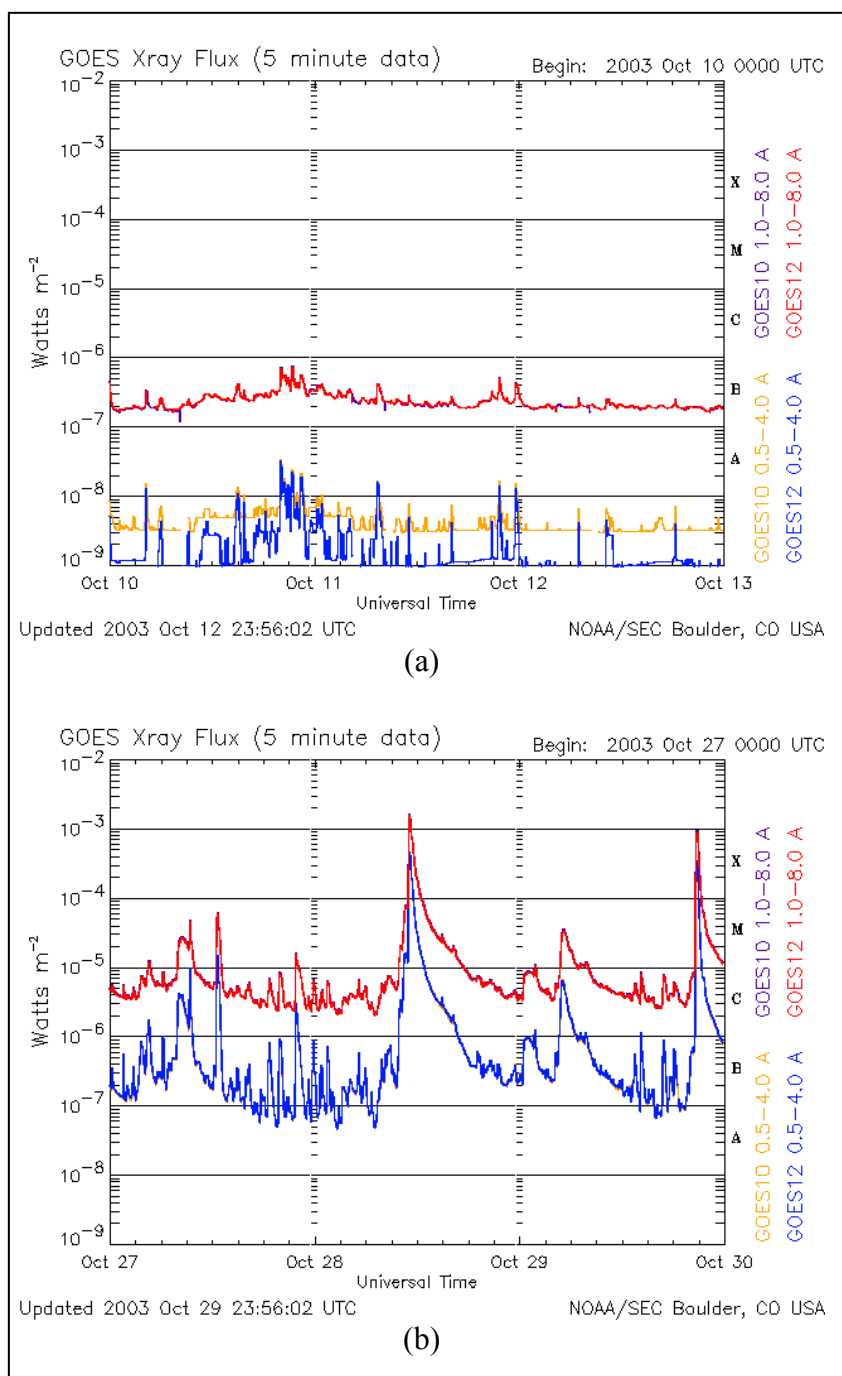


Figura 5.46 – Fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES para o período de 10-13 de outubro de 2003 (a) e 27-30 de outubro de 2003 (b). Fonte: <http://www.sec.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html> (acesso em fevereiro/2007)

Realmente, analisando os gráficos da figura 5.46 pode-se verificar que mesmo antes da intensa explosão solar (antes de 11 UT) o fluxo de raios X do dia 28 de outubro de 2003 já estava aumentado com relação, por exemplo, ao dia 11 do mesmo mês.

5.4 Performance dos Mapas Globais da Ionosfera do IGS na Região Brasileira

Nesta seção serão apresentados os experimentos realizados para avaliar a performance dos mapas globais da ionosfera do IGS aplicados no posicionamento por ponto na região brasileira durante um período de máxima atividade solar.

5.4.1 Programa Computacional Desenvolvido – CORIONEX

Foi desenvolvido um programa computacional para a correção de observações GPS de receptores de simples frequência do erro devido à ionosfera utilizando arquivos IONEX. O programa foi desenvolvido em Fortran Lahey 95 e recebeu a denominação de CORIONEX.

Os dados de entrada do programa CORIONEX são os arquivos de observação GPS (no formato RINEX), efeméride precisa (no formato SP3) e o arquivo com o *grid* de valores de VTEC no formato IONEX. O usuário deve informar também um valor aproximado para a latitude, longitude e altitude do receptor GPS, bem como, o intervalo que se deseja realizar a correção. Basicamente, as principais etapas realizadas pelo CORIONEX para a correção de uma observação GPS num dado instante se dá a partir da seguinte seqüência:

- Calculo da latitude e longitude geográfica do ponto ionosférico correspondente à observação a ser corrigida;
- Busca dos valores de VTEC dos 4 pontos do *grid* dos dois mapas horários mais próximos do ponto ionosférico calculado;
- Interpolação espacial e temporal dos valores de VTEC para a obtenção do valor de VTEC correspondente à posição do ponto ionosférico em questão;

- Determinação do valor do TEC na direção satélite/receptor a partir do uso da função de mapeamento geométrica padrão;
- Conversão do TEC obtido para atraso ionosférico em L_1 (em metros);
- Correção das observações GPS (para a pseudodistância subtrai-se o valor do atraso ionosférico e para a fase soma-se);
- Geração de um novo arquivo RINEX de observação com as observáveis corrigidas do erro devido à ionosfera a partir do arquivo IONEX de entrada;

Desta forma, nesta pesquisa foram desenvolvidos dois aplicativos computacionais: o CORIONEX e o CALTEC. Este tipo de atividade está em concordância com a “filosofia” adotada pelo GEGE¹ (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial) da FCT/UNESP que, além de utilizar programas computacionais já prontos (comerciais ou científicos), também prioriza nas suas atividades de pesquisa o desenvolvimento de novos aplicativos computacionais. Como exemplos anteriores, relacionados às pesquisas sobre a combinação Ionosfera/GPS, têm-se desenvolvidos os programas Mod_Ion (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003), Mod_Ion_FK (AGUIAR, 2006), bem como uma implementação computacional do modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987) feita por Matsuoka e Camargo, 2002.

5.4.2 Correção dos dados GPS com os arquivos IONEX do IGS

Para o experimento foram utilizados os dados GPS da estação UEPP ($\cong 22,1^\circ\text{S}$; $51,4^\circ\text{W}$) referentes a quatro dias de cada mês de 2001, contemplando, assim, toda a

¹ O GEGE é um grupo de pesquisa da FCT/UNESP cadastrado no diretório de grupos de pesquisa do CNPq. O autor desta presente Tese, bem como, seu orientador, faz parte deste grupo.

variação sazonal. O período também foi escolhido de tal forma que a avaliação correspondesse a um período de alta atividade ionosférica dentro da variação do ciclo de longo período, pois, o ano 2001 está dentro do período de máximo número de manchas solares do ciclo 23. A estação UEPP foi escolhida, pois está localizada na região de baixas latitudes, onde existe uma alta atividade da ionosfera, estando, por exemplo, numa localização onde normalmente sofre o efeito do pico da anomalia equatorial. Com isso, pretendeu-se avaliar a performance dos IONEX do IGS em um local brasileiro com alta influência da ionosfera.

Visando uma homogeneização, os quatro dias de cada mês de 2001 foram escolhidos de tal forma que não houvesse a influência de tempestades geomagnéticas, e desta forma, escolheram-se dias classificados como sendo de atividade geomagnética calma ($A_p \leq 8$).

Utilizando o programa CORIONEX, os dados GPS da estação UEPP para cada dia foram corrigidos do erro devido à ionosfera utilizando os arquivos IONEX do IGS produzidos pelos 5 centros de análise (CODE, ESA, JPL, NRCan, UPC). Em 2001 o arquivo IONEX combinado ainda não era produzido. Logo, para cada dia obteve-se cinco arquivos RINEX da estação UEPP corrigidos do erro devido à ionosfera a partir dos arquivos IONEX do CODE, do ESA, do JPL, do NRCan e do UPC. Vale informar que a altura média da simples camada ionosférica (h_m), presente no cálculo da latitude e longitude do ponto ionosférico e na função de mapeamento geométrica padrão, foi adotada no processamento como sendo igual a 450 km, valor informado no cabeçalho dos arquivos IONEX utilizados no experimento.

5.4.3 Avaliação no posicionamento por ponto

Para avaliar e comparar a performance dos arquivos IONEX do IGS foram analisados os resultados do posicionamento por ponto, com a pseudodistância advinda do código C/A, processado utilizando os dados GPS da estação UEPP corrigidos do efeito da ionosfera com cada um dos 5 arquivos IONEX. Para fins de comparação, para verificar a melhora obtida, também foram processados os dados da UEPP sem a correção do erro devido à ionosfera. Em suma, para cada dia, um total de 6 arquivos GPS da estação UEPP foram processados para realizar o posicionamento por ponto. As seguintes siglas serão adotadas para identificar que os resultados obtidos se referem ao processamento com dados:

- sem a correção da ionosfera (**SCI**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do CODE (**CCI-COD**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do ESA (**CCI-ESA**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do JPL (**CCI-JPL**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do NRCan (**CCI-NRC**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do UPC (**CCI-UPC**).

Para o processamento do posicionamento por ponto foram utilizadas as efemérides precisas e as correções dos relógios dos satélites geradas e fornecidas pelo GSD/NRCan. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP) valor menor ou igual a 7. No processamento foram consideradas apenas as pseudodistâncias coletadas com ângulo de elevação acima de 10 graus. Todos esses procedimentos adotados visam minimizar os diversos erros envolvidos no posicionamento, deixando predominante somente o erro devido à ionosfera para verificar a melhora obtida no posicionamento utilizando os dados GPS corrigidos da ionosfera com os IONEX. O *software*

utilizado foi o GPSPACE desenvolvido pelo GSD/NRCan. As coordenadas foram estimadas a cada 30 segundos e comparadas com as coordenadas conhecidas da estação UEPP, obtendo-se o erro posicional cometido no posicionamento por ponto em cada época.

Para um indicador da acurácia obtida no posicionamento por ponto, com base nas amostras de 24 horas (a cada 30 seg) dos erros cometidos para cada dia e cada estratégia de processamento (SCI, CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC, CCI-UPC), foi calculado o EMQ (Erro Médio Quadrático) correspondente à determinação vertical (altitude geométrica) e horizontal. O EMQ representa a acurácia média da posição estimada relativa a uma época, uma vez que é obtido a partir da raiz quadrada da média do quadrado dos erros cometidos em cada época (30 seg) em uma amostra de 24 horas. Ou seja, é o erro médio posicional esperado em cada época de observação.

Para cada mês calculou-se um valor médio do EMQ com base nos valores dos quatro dias. A tabela 5.5 apresenta o valor médio do EMQ para altitude geométrica para cada mês do ano de 2001 referentes a cada estratégia de processamento. Com base nos valores da tabela 5.5, os valores da melhora média obtida (em %) na acurácia (relativa a uma época) da determinação da altitude geométrica após a correção do erro devido à ionosfera para cada resultado CCI são apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.5 – Valor médio do EMQ para altitude geométrica – meses de 2001.

| EMQ – Altitude Geométrica (m) | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| | SCI | CCI-COD | CCI-ESA | CCI-JPL | CCI-NRC | CCI-UPC | Média (CCI)* |
| Janeiro | 15,33 | 3,37 | 3,47 | 3,45 | 3,53 | 3,27 | 3,41 ± 0,10 |
| Fevereiro | 14,80 | 4,13 | 4,10 | 4,17 | 4,28 | 4,15 | 4,16 ± 0,06 |
| Março | 17,02 | 4,26 | 4,38 | 4,65 | 4,68 | 4,51 | 4,49 ± 0,17 |
| Abril | 17,11 | 4,09 | 4,78 | 4,08 | 4,91 | 4,67 | 4,50 ± 0,39 |
| Mai | 13,79 | 3,43 | 3,78 | 3,26 | 3,92 | 3,89 | 3,65 ± 0,29 |
| Junho | 10,50 | 2,74 | 2,89 | 2,72 | 2,83 | 3,39 | 2,91 ± 0,27 |
| Julho | 9,40 | 2,15 | 2,40 | 2,31 | 2,42 | 2,75 | 2,40 ± 0,22 |
| Agosto | 10,95 | 2,99 | 3,25 | 2,81 | 3,48 | 3,32 | 3,17 ± 0,27 |
| Setembro | 13,84 | 3,78 | 4,04 | 3,27 | 4,51 | 4,05 | 3,93 ± 0,45 |
| Outubro | 21,09 | 6,92 | 7,31 | 6,69 | 7,20 | 8,03 | 7,23 ± 0,50 |
| Novembro | 20,78 | 6,04 | 6,71 | 7,62 | 7,21 | 6,42 | 6,80 ± 0,62 |
| Dezembro | 18,95 | 4,14 | 4,01 | 4,80 | 5,28 | 4,15 | 4,47 ± 0,54 |
| Média Anual | 15,29 ± 3,87 | 4,00 ± 1,33 | 4,26 ± 1,44 | 4,15 ± 1,61 | 4,52 ± 1,50 | 4,38 ± 1,84 | 4,26 ± 1,44** |

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC, ou seja, é um valor médio anual conjunto para as estratégias CCI.

Tabela 5.6 – Valor médio da melhora obtida (%) na acurácia (relativa a uma época) do posicionamento por ponto - altitude geométrica – meses de 2001.

| Melhora Média na Acurácia (em %) com base na redução do EMQ da Altitude Geométrica após a Correção do Erro devido à Ionosfera | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | CCI-COD | CCI-ESA | CCI-JPL | CCI-NRC | CCI-UPC | Média* |
| Janeiro | 78,0 | 77,4 | 77,5 | 77,0 | 78,7 | 77,7 ± 0,6 |
| Fevereiro | 72,1 | 72,3 | 71,8 | 71,1 | 71,9 | 71,8 ± 0,4 |
| Março | 75,0 | 74,3 | 72,7 | 72,5 | 73,5 | 73,6 ± 1,0 |
| Abril | 76,1 | 72,1 | 76,1 | 71,3 | 72,7 | 73,6 ± 2,3 |
| Mai | 75,1 | 72,6 | 76,3 | 71,6 | 71,8 | 73,5 ± 2,1 |
| Junho | 73,9 | 72,5 | 74,1 | 73,0 | 67,7 | 72,2 ± 2,6 |
| Julho | 77,1 | 74,4 | 75,4 | 74,2 | 70,7 | 74,4 ± 2,3 |
| Agosto | 72,7 | 70,3 | 74,3 | 68,2 | 69,6 | 71,0 ± 2,4 |
| Setembro | 72,3 | 70,8 | 76,4 | 67,4 | 70,7 | 71,6 ± 3,3 |
| Outubro | 67,2 | 65,3 | 68,3 | 65,9 | 61,9 | 65,7 ± 2,4 |
| Novembro | 70,9 | 67,7 | 63,3 | 65,3 | 69,1 | 67,3 ± 3,0 |
| Dezembro | 78,1 | 78,8 | 74,7 | 72,1 | 78,1 | 76,4 ± 2,9 |
| Média Anual | 74,0 ± 3,2 | 72,4 ± 3,7 | 73,4 ± 4,0 | 70,8 ± 3,5 | 71,4 ± 4,4 | 72,4 ± 3,9** |

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores de melhora obtida

Primeiramente, analisando os valores mensais do EMQ da estratégia de processamento SCI na tabela 5.5, pode-se verificar a variação mensal do erro em altitude geométrica. Pode-se verificar que a variação desse erro está em concordância com a variação sazonal do VTEC apresentada na seção 5.2, ou seja, observa-se a alta influência do erro devido à ionosfera na determinação altimétrica. Verifica-se que os maiores valores de EMQ em altitude geométrica ocorreram nos meses próximos aos equinócios e os menores nos próximos ao solstício de inverno. Exemplificando, com base nos valores da tabela 5.5, verifica-se que o valor médio do EMQ para a estratégia SCI no mês de outubro (21,09 m) é aproximadamente 124 % maior do que o referente ao mês de julho (9,40 m).

Analisando os valores médios de EMQ da tabela 5.5 pode-se observar a redução do EMQ para as estratégias CCI quando comparada aos SCI, ou seja, após aplicar as correções do erro devido à ionosfera com os arquivos IONEX do IGS. Pode-se verificar (tabelas 5.5 e 5.6) que os melhores resultados foram obtidos a partir das estratégias CCI-JPL e CCI-COD, embora se deva salientar que essas duas estratégias não apresentaram resultados tão diferentes das demais. De fato, analisando a última coluna das tabelas 5.5 e 5.6 pode-se verificar que o valor máximo de desvio padrão calculado a partir de todos os valores CCI foi de 0,62 m e de 3%, respectivamente para o valor médio do EMQ e para a melhora média obtida.

De uma forma geral, pode-se verificar que a melhora média mensal obtida na acurácia altimétrica (relativa a uma época) após o uso dos arquivos IONEX foi acima de 70%, com exceção dos meses de outubro e novembro, com melhora média de 65,7% e 67,3%. Calculando uma média de todos os valores da tabela 5.6, obtém-se uma melhora média na acurácia altimétrica de $72,4 \pm 3,9\%$. Este valor representa então um indicador da melhora média obtida na acurácia (relativa a uma época) da determinação altimétrica do posicionamento por ponto, utilizando os arquivos IONEX para a correção do erro devido à

ionosfera, referente a um período de máximo solar (2001) na região brasileira de baixas latitudes e sem a influência de tempestades geomagnéticas.

Dando seqüência à apresentação dos resultados, assim como para a altitude geométrica, as tabelas 5.7 e 5.8 mostram os valores médios de EMQ e de melhora obtida para a determinação planimétrica.

Tabela 5.7 – Valor médio do EMQ para planimetria – meses de 2001.

| EMQ – Planimetria (m) | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| | SCI | CCI-COD | CCI-ESA | CCI-JPL | CCI-NRC | CCI-UPC | Média (CCI)* |
| Janeiro | 3,60 | 3,00 | 3,27 | 2,97 | 3,23 | 2,79 | 3,05 ± 0,19 |
| Fevereiro | 3,65 | 3,00 | 3,42 | 2,90 | 3,20 | 3,26 | 3,16 ± 0,21 |
| Março | 5,16 | 3,94 | 4,92 | 4,13 | 5,16 | 4,82 | 4,59 ± 0,53 |
| Abril | 6,48 | 4,17 | 4,74 | 4,13 | 5,18 | 5,04 | 4,65 ± 0,48 |
| Mai | 5,16 | 2,60 | 3,43 | 2,83 | 3,67 | 3,60 | 3,23 ± 0,48 |
| Junho | 4,53 | 2,13 | 2,49 | 2,19 | 3,21 | 3,04 | 2,61 ± 0,49 |
| Julho | 3,99 | 3,46 | 2,25 | 2,03 | 2,62 | 2,53 | 2,58 ± 0,54 |
| Agosto | 4,78 | 2,51 | 2,68 | 2,44 | 3,24 | 2,77 | 2,73 ± 0,31 |
| Setembro | 5,16 | 3,55 | 4,18 | 3,35 | 4,62 | 4,32 | 4,00 ± 0,53 |
| Outubro | 5,56 | 3,72 | 4,90 | 3,82 | 4,99 | 5,03 | 4,49 ± 0,66 |
| Novembro | 4,98 | 3,21 | 4,52 | 3,69 | 4,49 | 3,78 | 3,94 ± 0,56 |
| Dezembro | 3,86 | 2,72 | 3,12 | 2,66 | 3,41 | 2,94 | 2,97 ± 0,31 |
| Média Anual | 4,74 ± 0,86 | 3,17 ± 0,62 | 3,66 ± 0,96 | 3,09 ± 0,72 | 3,92 ± 0,91 | 3,66 ± 0,93 | 3,50 ± 0,87** |

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC, ou seja, é um valor médio anual conjunto para as estratégias CCI.

Tabela 5.8 – Valor médio da melhora obtida (%) na acurácia (relativa a uma época) do posicionamento por ponto – Posição planimétrica – meses de 2001.

| Melhora Média na Acurácia (em %) com base na redução do EMQ da posição Planimétrica após a Correção do Erro devido à Ionosfera | | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| | CCI-COD | CCI-ESA | CCI-JPL | CCI-NRC | CCI-UPC | Média* |
| Janeiro | 16,6 | 9,2 | 17,5 | 10,3 | 22,5 | 15,2 ± 5,5 |
| Fevereiro | 17,8 | 6,3 | 20,5 | 12,3 | 10,7 | 13,5 ± 5,7 |
| Março | 23,6 | 4,6 | 19,9 | 0,0 | 6,6 | 10,9 ± 10,3 |
| Abril | 35,6 | 26,8 | 36,2 | 20,1 | 22,2 | 28,2 ± 7,5 |
| Mai | 49,6 | 33,5 | 45,1 | 28,8 | 30,2 | 37,5 ± 9,3 |
| Junho | 53,0 | 45,0 | 51,6 | 29,1 | 32,9 | 42,3 ± 10,8 |
| Julho | 13,3 | 43,6 | 49,1 | 34,3 | 36,6 | 35,4 ± 13,6 |
| Agosto | 47,5 | 43,9 | 48,9 | 32,2 | 42,0 | 42,9 ± 6,5 |
| Setembro | 31,2 | 19,0 | 35,1 | 10,4 | 16,3 | 22,4 ± 10,4 |
| Outubro | 33,1 | 11,9 | 31,3 | 10,2 | 9,5 | 19,2 ± 0,6 |
| Novembro | 35,5 | 9,2 | 25,9 | 9,8 | 24,1 | 20,9 ± 11,2 |
| Dezembro | 29,5 | 19,2 | 31,1 | 11,6 | 23,8 | 23,0 ± 7,9 |
| Média Anual | 32,2 ± 13,1 | 22,7 ± 15,4 | 34,3 ± 12,1 | 17,4 ± 11,0 | 23,1 ± 11,1 | 26,0 ± 13,8** |

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores de melhora obtida

Primeiramente, analisando na tabela 5.7 os resultados de EMQ planimétrico da estratégia SCI e comparando com os valores SCI referentes à altitude geométrica (tabela 5.5) pode-se verificar que o EMQ em planimetria é menor do que em altitude geométrica. A média anual de EMQ da estratégia SCI para a altitude geométrica foi de 15,29 m e para a planimétrica foi de 4,74 m. Logo, o valor médio anual referente à planimetria foi 69% menor do que o relacionado à altitude geométrica. Isto evidencia, novamente, que a maior influência da ionosfera é na determinação altimétrica, mostrando-se pouco correlacionada com a determinação da posição planimétrica. Realmente, ainda analisando os resultados SCI de EMQ planimétrico da tabela 5.7 não se verifica uma variação mensal da mesma forma que nos resultados da altitude geométrica, onde se verificou de maneira evidente menores valores para meses próximos ao solstício de inverno e maiores para os próximos aos equinócios e solstício de verão. Para os resultados SCI planimétrico pode-se verificar maiores valores para os meses próximos aos equinócios, porém, a diferença com relação a outros meses não é tão

significativa quanto nos resultados SCI da altitude geométrica. Para se ter uma idéia, o maior valor de EMQ (SCI) para a planimetria (6,48 m – Abril – tabela 5.7) é menor do que o menor valor de EMQ (SCI) para a altitude geométrica (9,40 m – Julho – tabela 5.5).

Como a posição planimétrica é pouco afetada pela ionosfera, isto implica que a melhora obtida no posicionamento por ponto usando os arquivos IONEX é menor do que a melhora para a altitude geométrica. Analisando a tabela 5.8 pode-se verificar um valor médio geral de melhora obtida de $26 \pm 13,8\%$. O mesmo valor referente à altitude geométrica foi de $72,4 \pm 3,9\%$ (tabela 5.6). Note que, comparando a média anual da melhora obtida em planimetria para cada estratégia CCI (tabela 5.8) pode-se verificar em termos de porcentagem uma maior eficiência para a CCI-JPL e CCI-COD, embora, ao analisar os valores médios anuais do erro planimétrico na tabela 5.7 percebe-se que todos os resultados CCI ficaram entre 3 e 4 m, aproximadamente, ou seja, próximos. O mesmo valor SCI foi de 4,74 m.

Para se ter uma idéia da variação diária do erro em altitude geométrica (maior influenciada pela ionosfera), as figuras 5.47 e 5.48 mostram esta variação para um dia de cada mês do ano de 2001 considerando as estratégias de processamento SCI e CCI-COD¹.

¹ Para uma melhor qualidade de visualização optou-se por incluir somente a estratégia CCI-COD, uma vez que se verificou uma performance bastante similar entre as estratégias CCI.

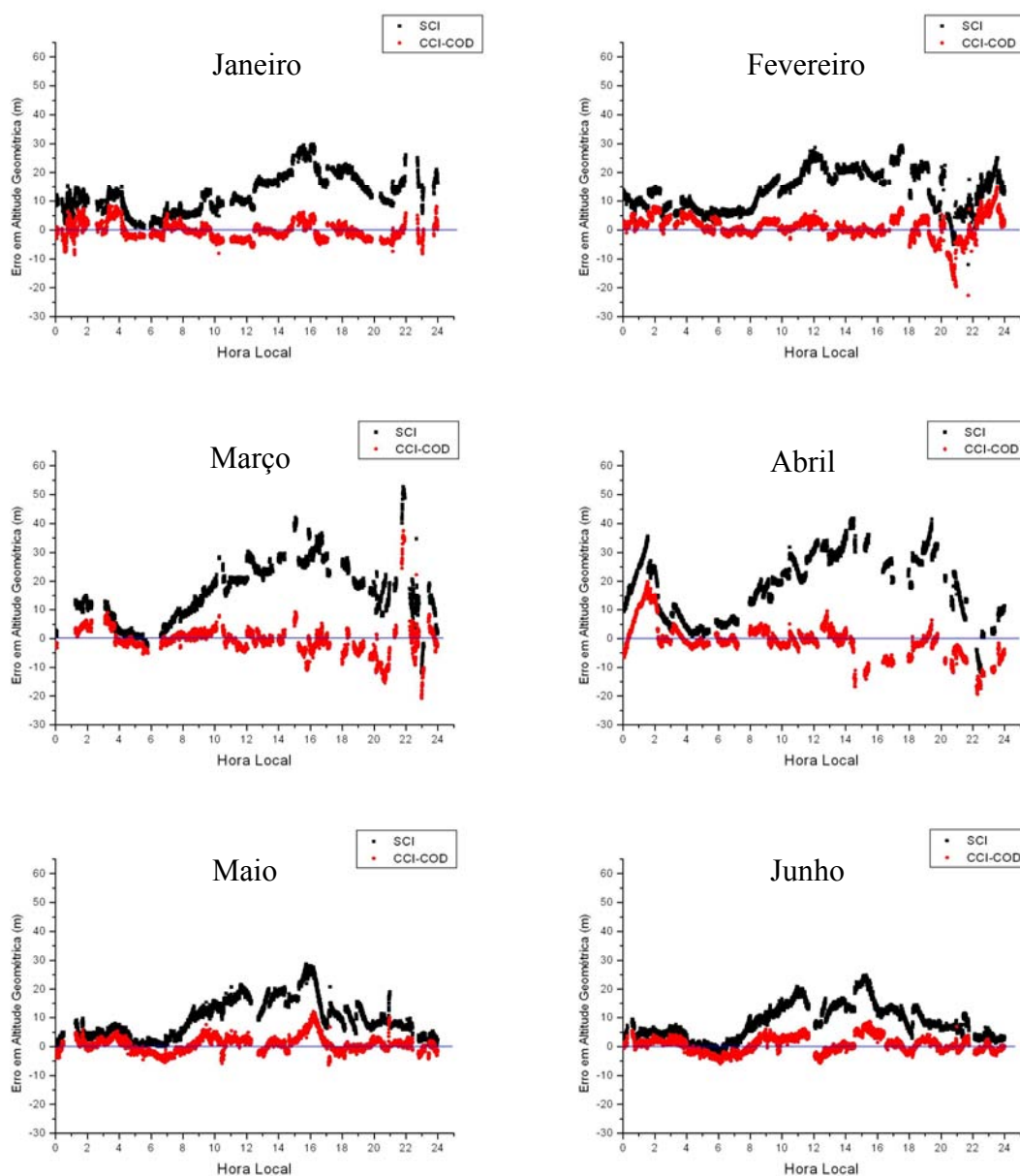


Figura 5.47 – Erro em Altitude Geométrica – SCI e CCI-COD – Janeiro (dia 001), Fevereiro (dia 034), Março (dia 070), Abril (dia 093), Maio (dia 146) e Junho (dia 156) de 2001

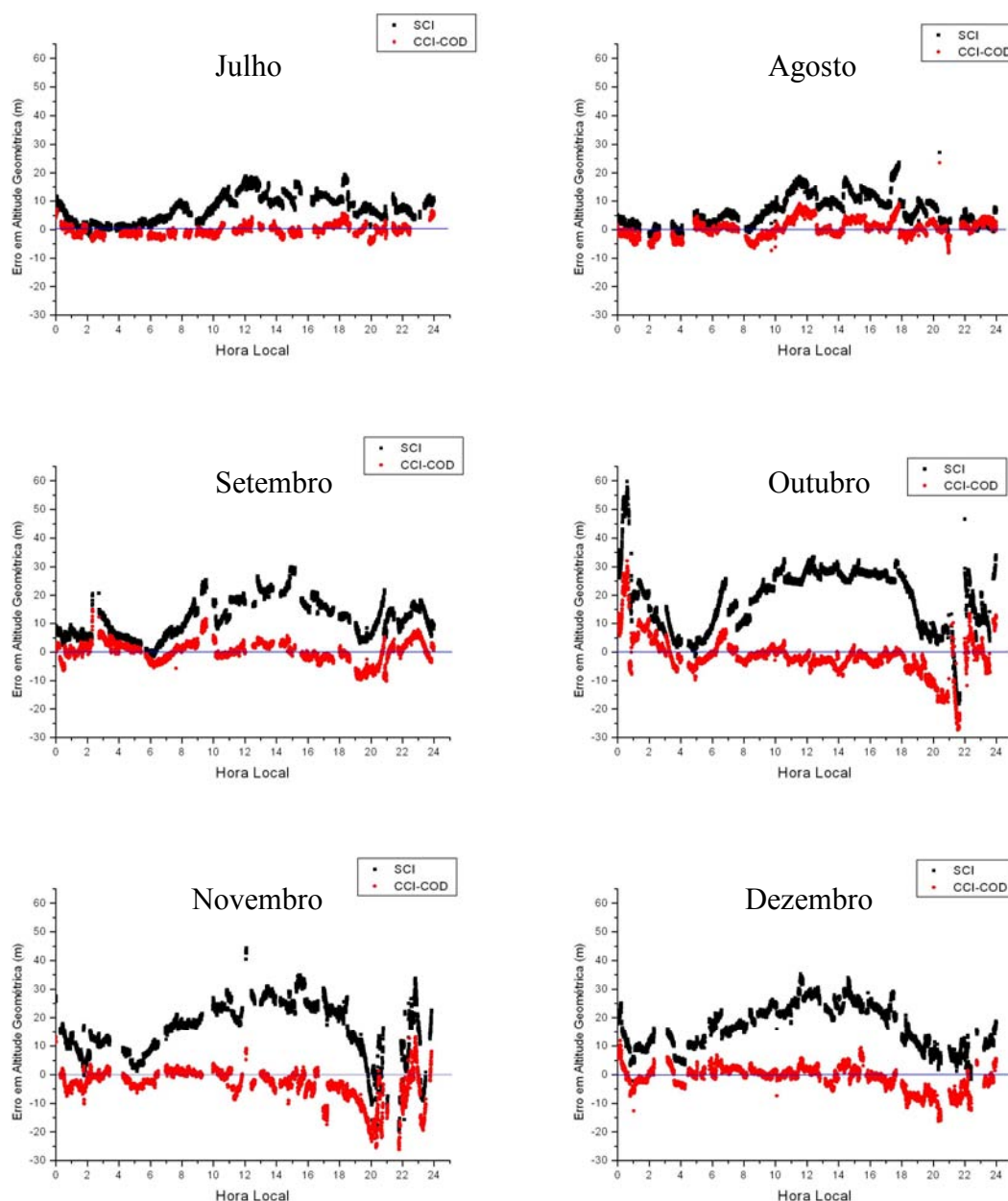


Figura 5.48 – Erro em Altitude Geométrica – SCI e CCI-COD – Julho (dia 201), Agosto (dia 214), Setembro (dia 250), Outubro (dia 289), Novembro (dia 331) e Dezembro (dia 347) de 2001

Primeiramente, analisando os resultados SCI dos gráficos das figuras 5.47 e 5.48, pode-se verificar a variação diária e sazonal do erro em altitude geométrica que se mostra mais uma vez com forte influência do comportamento da ionosfera. Assim como o TEC, o erro em altitude geométrica começa a aumentar diariamente por volta das 6-7 HL, ou

seja, com o início da atividade solar diária, e chega a valores máximos no período da tarde. De uma forma geral, os menores valores de erro ocorreram por volta das 4-5 HL, justamente o período em que foram verificados menores valores do TEC nos experimentos apresentados na seção 5.2.1. Quanto à variação mensal pode-se verificar que os menores valores ocorreram nos meses próximos ao solstício de inverno e maiores nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão. Principalmente nesses meses de maiores valores um fato que chama bastante a atenção é que, após o pôr do Sol, um comportamento bastante irregular do erro em altitude geométrica é verificado. Em alguns dias, como o de outubro por exemplo, este comportamento persiste até as primeiras horas da madrugada. Este período pós pôr do Sol coincide ao período de ocorrência da anomalia equatorial de ionização, que em períodos de máxima atividade do ciclo solar ocorre em praticamente todos os meses, com ênfase nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão. A estação UEPP sofre a influência da crista da anomalia equatorial no período noturno que faz com que ocorra um aumento da magnitude do erro devido à ionosfera. Além do aumento do erro, sabe-se que existe uma forte correlação da ocorrência do efeito da cintilação ionosférica e a localização da crista da anomalia equatorial (seção 3.4).

Quanto aos resultados CCI-COD, pode-se verificar nos gráficos das figuras 5.47 e 5.48 que a melhor performance ocorre no período diurno, ou seja, a maior redução do erro ocorre no período entre 6 e 18 HL, aproximadamente. A performance da correção é reduzida¹ no período pós pôr do Sol nos meses próximos aos equinócios e verão, ou seja, nos meses em que ocorre de forma significativa a anomalia equatorial. Esses experimentos vêm confirmar mais uma vez a dificuldade em obter uma boa performance na modelagem do erro devido à ionosfera no período pós por do Sol. Os resultados dos experimentos realizados por Matsuoka (2003) e Aguiar (2005) também mostraram uma redução na performance do Mod-

¹ Em alguns casos até com resultados piores do que os advindos da estratégia SCI

Ion e do Mod-Ion-FK, respectivamente, durante meses de forte influência da anomalia equatorial noturna.

Como visto nas tabelas 5.7 e 5.8, a influência da ionosfera na determinação planimétrica é bem menor do que na altimétrica e, desta forma, a melhora da acurácia após a correção com os arquivos IONEX do IGS também é menor. Estas observações podem ser verificadas novamente nas figuras 5.49 e 5.50 que mostram o comportamento do erro planimétrico para um dia de cada mês do ano de 2001 considerando as estratégias de processamento SCI e CCI-COD.

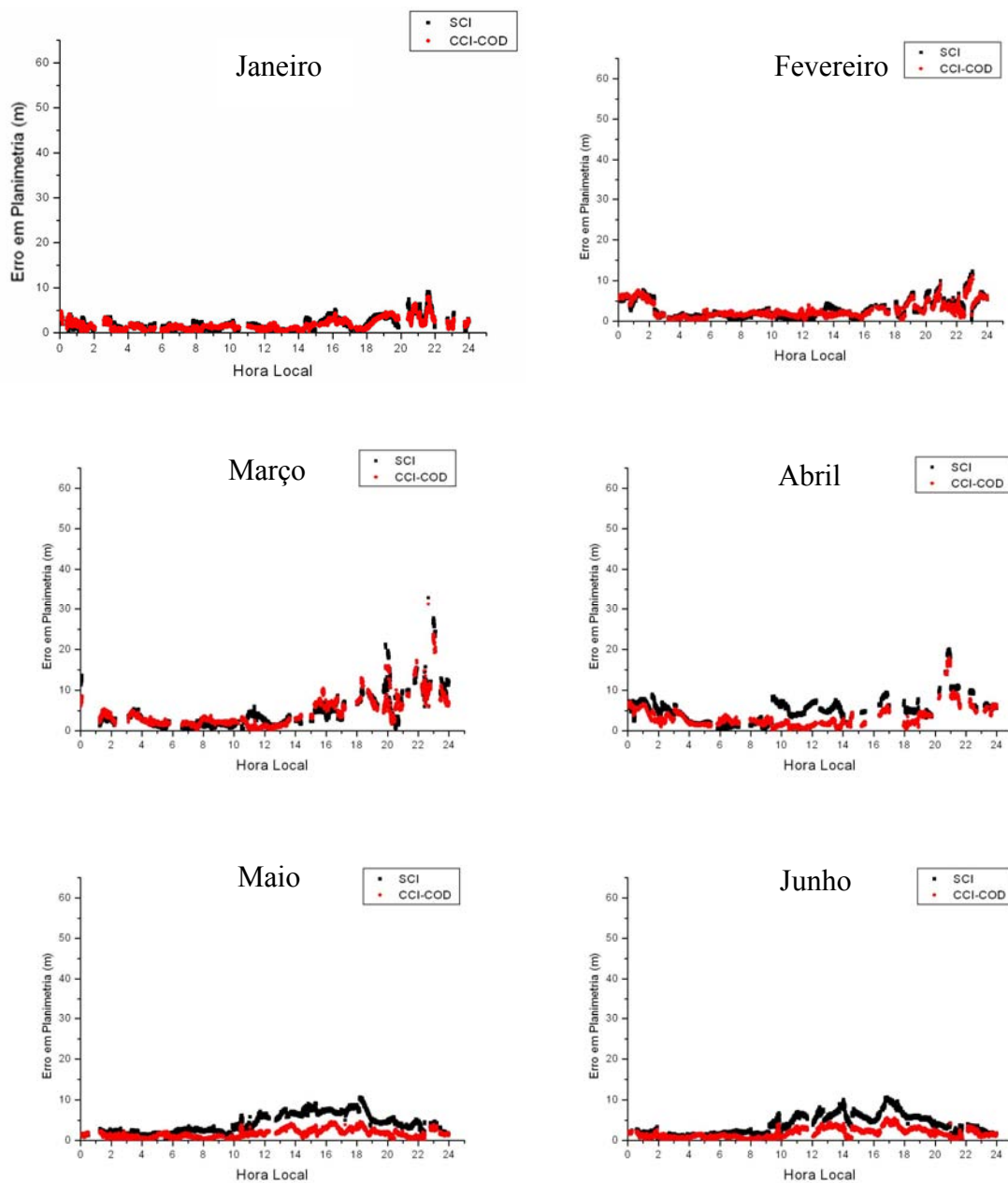


Figura 5.49 - Erro em Planimetria – SCI e CCI-COD – Janeiro (dia 001), Fevereiro (dia 034), Março (dia 070), Abril (dia 093), Maio (dia 146) e Junho (dia 156) de 2001

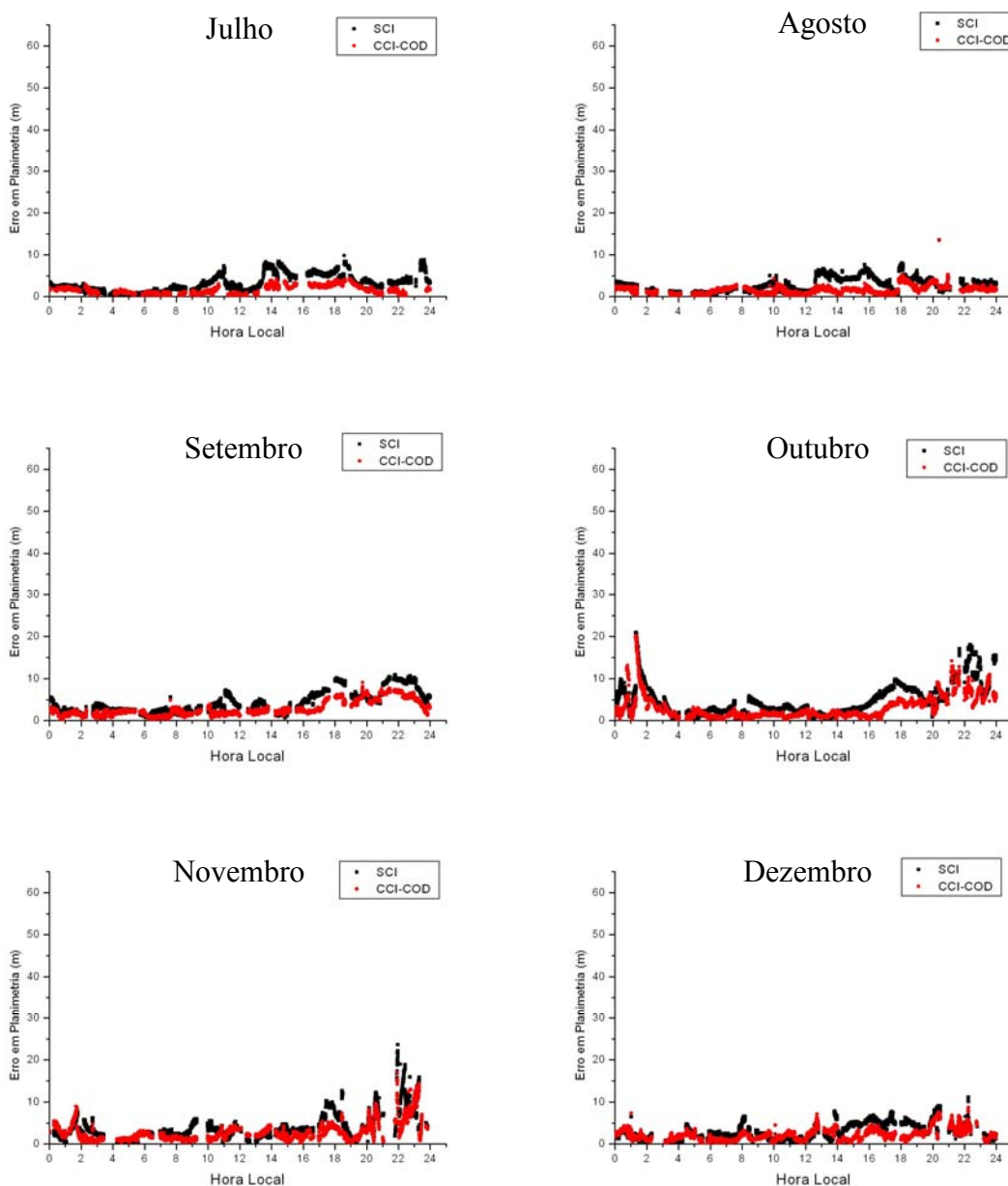


Figura 5.50 - Erro em Planimetria – SCI e CCI-COD – Julho (dia 201), Agosto (dia 214), Setembro (dia 250), Outubro (dia 289), Novembro (dia 331) e Dezembro (dia 347) de 2001

Comparando os gráficos das figuras 5.49 e 5.50 com os das figuras 5.47 e 5.48, fica mais uma vez evidente a maior correlação do erro da ionosfera com a determinação em altitude geométrica. Nas figuras 5.49 e 5.50 pode-se verificar que os resultados CCI-COD são bem próximos aos SCI. Isto é esperado pelo fato do erro da ionosfera afetar muito pouco a determinação planimétrica. Um fato interessante que se observa é que, durante os meses

próximos aos equinócios (principalmente, setembro, outubro, novembro, março e abril) também se tem um comportamento irregular do erro em planimetria após o pôr do Sol, ou seja, assim como ocorreu para a altitude geométrica. Isto está indicando que a anomalia equatorial também afeta a determinação planimétrica, mesmo que em menor magnitude.

Em resumo, os experimentos realizados para avaliar os arquivos IONEX do IGS na região brasileira referem-se a um período de máxima atividade solar do ciclo 23, englobando todos os meses do ano de 2001 (4 dias por mês classificados como geomagneticamente calmo) e considerando os dados GPS da estação UEPP que está localizada em uma região crítica em termos de atividade ionosférica. De uma forma geral, com base em valores médios verificou-se uma melhora média na acurácia em altitude geométrica do posicionamento por ponto de 72% e de 26% na acurácia horizontal, aproximadamente. Ainda, verificou-se que a maior eficácia da correção ocorre para a altitude geométrica durante o período diurno. Os períodos diários mais complicados, tanto para a determinação altimétrica quanto para a planimétrica, coincide com o período noturno de ocorrência da anomalia equatorial de ionização. Uma variação irregular de ambos os erros ocorre neste período, principalmente, em meses próximos aos equinócios e solstícios de verão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Considerações Finais e Conclusões

O desenvolvimento de projetos científicos que envolvem várias áreas do conhecimento tem sido algo crescente nos dias atuais. O advento de novas tecnologias nas diversas áreas tem contribuído de forma significativa para isto. Focando para a área da Geodésia, o surgimento das redes GPS de estações ativas no Brasil, tendo como principal exemplo a RBMC, tem impulsionado o sinergismo da Geodésia Brasileira com outras áreas do conhecimento. Dentro do PPGCC pode-se citar a pesquisa desenvolvida por Sapucci (2005) que mostra o sinergismo da Geodésia com a Meteorologia.

Nesta pesquisa, dentro desse aspecto de sinergismo, primeiramente deu-se uma atenção especial ao estudo referente à teoria sobre a ionosfera, tema não convencional na área da Geodésia. Ao final, foi apresentado um amplo texto sobre o assunto (capítulo 2). Para a realização desta meta foi de suma importância o contato com pesquisadores da Divisão de Aeronomia do INPE, por meio de uma disciplina ministrada por eles no PPGCC, participação em congressos e parceria em elaboração de artigos científicos.

Essa troca de conhecimento com os pesquisadores da Aeronomia para o conhecimento sobre o comportamento da ionosfera foi importante para o entendimento mais sólido do impacto da ionosfera no posicionamento com GPS na região brasileira, além de adicionar nos resultados desta pesquisa dados de Digissondas, o que possibilitou uma análise dos resultados e comparações com valores advindos de observações GPS. Em suma, o contato com especialistas no tema ionosfera foi um fator diferencial para a execução desta pesquisa.

Quanto ao desenvolvimento de aplicativos computacionais, foi elaborado um (CALTEC) para a determinação do TEC com dados de receptores GPS de dupla frequência. Foi apresentada de forma detalhada a formulação matemática envolvida na

determinação do TEC a partir das observáveis GPS. O programa utiliza como observável as pseudodistâncias filtradas pela fase. Pode-se eliminar a influência do atraso interfrequência dos satélites a partir do uso dos valores fornecidos nos arquivos IONEX do IGS ou nas efemérides transmitidas. Se caso o usuário tiver o valor do atraso instrumental interfrequência dos receptores, este pode ser informado para que seja eliminado dos valores de VTEC calculados. No caso desta pesquisa, estes valores foram obtidos a partir do uso a priori do programa Mod_Ion (CAMARGO, 1999).

No primeiro experimento realizado foram utilizados os dados GPS das estações da RBMC e da rede IGS da América do Sul para o estudo do comportamento do erro devido à ionosfera, a partir do parâmetro VTEC, durante um período de máxima atividade solar na região brasileira. O conjunto de dados envolveu cinco dias geomagneticamente calmos de cada mês de 2001. Os resultados mostraram-se bastante condizentes com a teoria a respeito do comportamento da ionosfera. De uma forma geral, os maiores valores de VTEC ocorreram nos meses próximos aos equinócios e menores nos próximos ao solstício de inverno. Também, verificou-se que o VTEC atinge valores mínimos em toda a região no período entre 7-9 UT (4-6 Horas Local - HL) e o seu valor máximo próximo às 17-19 UT (14-16 HL). Seguindo a concordância com a teoria, os resultados mostraram que um destacado segundo máximo de valores de VTEC é observado na região de baixas latitudes (crista sul da anomalia equatorial) após o pôr do sol principalmente nos meses próximos aos equinócios de outono e primavera e, também, nos meses próximos ao solstício de verão.

Os meses com as maiores variações espaciais (latitudinal), foram novamente aqueles próximos aos equinócios e com as menores variações os próximos ao solstício de inverno. Isto é resultado da variação anual do nível de radiação solar e da anomalia equatorial.

Ainda, analisando os resultados verificou-se que praticamente não existem diferenças mensais de VTEC entre o período de, aproximadamente, 5-11 UT (2-8 HL),

principalmente entre 7-9 UT (4-6 HL). Os horários com as maiores diferenças mensais foram no período da tarde, devido à mudança mensal no nível de radiação solar, e na região de pico da anomalia equatorial na sua formação pós pôr do Sol.

Como se sabe, em toda a descrição da análise realizada pode-se substituir a palavra “TEC” por “erro nas observáveis GPS”, devido à proporcionalidade de ambos. Desta forma, pode-se afirmar que os resultados do primeiro experimento podem auxiliar os usuários do GPS para o entendimento das variações do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS na região brasileira durante um período de máxima atividade solar. Por fim, este entendimento pode auxiliar o usuário a entender as variações e magnitudes do erro no posicionamento com GPS. De fato, comparando os resultados do primeiro experimento com os resultados do posicionamento por ponto utilizando dados da estação UEPP sem a correção da ionosfera (último experimento) pode-se verificar a correlação existente entre a variação do VTEC e o erro cometido no posicionamento, principalmente na determinação da altitude geométrica. Para se citar outro exemplo, com relação ao posicionamento relativo, os resultados apresentados por Dal Poz (2005) também se mostram correlacionados com o comportamento do VTEC na região brasileira.

Adicionalmente, foram incluídos no primeiro experimento dados de foF2 advindos de Digissondas localizadas em São Luiz e em Cachoeira Paulista que foram cedidos pela Divisão de Aeronomia do INPE. Isto possibilitou analisar a concordância entre os resultados das Digissondas e os do GPS. Tendo-se em mente que o quadrado de foF2 é proporcional à densidade máxima de elétrons da camada F2 e sabendo-se que de uma maneira geral a camada F2 contribui de forma significativa no valor de VTEC, calculou-se o coeficiente de correlação linear entre o quadrado de foF2 e VTEC para se ter um indicador numérico de concordância entre eles. O valor médio obtido foi de 93% e 76% para São Luiz e Cachoeira Paulista, respectivamente, mostrando a boa correlação entre os resultados advindos

das Digissondas (foF2) e do GPS (VTEC).

Enfim, os resultados apresentados no primeiro experimento mostram a potencialidade do uso de estações GPS ativas para o estudo da ionosfera na região de interesse. Comparada com outras redes GPS de países desenvolvidos, a RBMC possui um número pequeno de estações. Porém, mesmo assim, os resultados mostram a potencialidade do seu uso para se estudar a ionosfera na região brasileira. Além disso, para uma melhor qualidade, podem-se incluir as estações da rede IGS da América do Sul, como foi feito nesta pesquisa, uma vez que elas também têm seus dados disponíveis com acesso livre na internet. Desta forma, a RBMC, associada à rede IGS, pode ser utilizada por pesquisadores que estudam a ionosfera na região brasileira. Futuramente, o cenário será ainda melhor com a modernização e expansão da RBMC, que também contará com a parceria entre o IBGE, responsável pela RBMC, e o INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária). Atualmente, o INCRA está iniciando o processo de modernização e expansão de sua rede de estações ativas. Serão instalados pelo INCRA, em parceria com o IBGE, aproximadamente 75 novos receptores de dupla frequência (SALOMONI, 2007)

De fato, o potencial da RBMC para uso em pesquisas relacionadas com o comportamento da ionosfera brasileira foi verificado novamente no segundo experimento apresentado nesta pesquisa. Neste experimento foi mostrada a resposta da ionosfera no período da manhã do dia da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. Parte dos resultados apresentados nesta pesquisa foi um trabalho (BATISTA et al., 2006) realizado em conjunto com pesquisadores da Divisão de Aeronomia do INPE, mostrando novamente o sinergismo com esta área. Desta forma, neste experimento foram utilizados dados de Digissondas e mapas de VTEC para a região brasileira e, em suma, verificou-se a formação não usual da anomalia equatorial. Novamente, verificou-se a concordância entre os resultados advindos do GPS e das Digissondas.

No terceiro experimento foi estudado o impacto da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 (período da tarde/noite) no comportamento do VTEC e a influência na performance do posicionamento por ponto na região brasileira. Novamente, foram utilizados valores de VTEC advindos do processamento dos dados GPS das estações da RBMC e IGS. Também neste experimento dados de Digisondas (foF2 e hmF2) foram cedidas pelo INPE. As análises dos resultados mostraram um aumento do VTEC na região brasileira no período da tarde e um deslocamento e aumento de VTEC da crista da anomalia equatorial para latitudes mais afastadas do equador no período pós pôr do Sol. Este aumento e deslocamento da crista da anomalia equatorial na região brasileira também já foram verificados em outros dias de intensas tempestades geomagnéticas do ciclo solar 23. Como exemplo, se pode consultar o trabalho realizado por Fedrizzi (2003) que estudou as tempestades ocorridas nos dias 15 de julho de 2000 e 31 de março de 2001.

Uma análise do impacto dessas modificações do VTEC no posicionamento por ponto com GPS foi realizada. Foram processados os dados GPS do dia 29 de outubro de 2003 das estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT, ou seja, de estações em várias localidades brasileiras. Para fins de comparação foram processados os dados para um dia geomagneticamente calmo do mesmo mês. Primeiramente, verificou-se que o erro em altitude geométrica foi mais influenciado pela ionosfera do que o erro planimétrico, embora este último também tenha sido prejudicado pelos efeitos da tempestade. Pôde-se verificar claramente que houve um aumento da variação temporal do erro planimétrico e altimétrico para as quatro estações. Em outras palavras, no dia da tempestade uma variação bem mais irregular do erro altimétrico e planimétrico foi observada.

Concentrando-se primeiramente no erro planimétrico, pôde-se verificar que as maiores variações e magnitudes, decorrentes da tempestade geomagnética, ocorreram para a estação POAL, com destaque para o período entre 20 e 22 HL. Para as estações UEPP e

BRAZ, também se observou uma variação mais irregular do erro planimétrico do que a do dia calmo, além de valores mais altos em quase todo o período. As menores mudanças ocorreram para a estação CRAT, a mais próxima do equador.

Quanto ao erro em altitude geométrica verificou-se que para todas as estações GPS uma variação temporal bastante irregular ocorreu no dia da tempestade, além de valores maiores na maior parte do tempo, quando comparada ao dia de atividade geomagnética calma. Como períodos de grande destaque, podem-se citar: o próximo as 18 e 21 HL, aproximadamente, para a estação POAL; o próximo às 19:30 HL para UEPP e CRAT; e o próximo as 17 HL para CRAT. O aumento do erro no período da tarde evidencia o aumento do VTEC que ocorreu no dia da tempestade neste mesmo período. A grande variação irregular do erro verificada em destaque para POAL às 21 HL, aproximadamente, mostra o possível efeito decorrente do deslocamento para regiões mais afastadas do equador do segundo pico intensificado da anomalia equatorial, ou seja, chegando até o Rio Grande do Sul. Porém, de uma forma geral, um comportamento bastante irregular do erro em altitude geométrica foi verificado em todas as estações GPS no dia da tempestade em praticamente todo o período analisado, mostrando a influência da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003.

Como as tempestades geomagnéticas se iniciam várias horas após a ocorrência da explosão solar, pode-se evitar realizar levantamentos com GPS em períodos de intensas tempestades geomagnéticas. Isto porque, existem serviços disponíveis on line (ex: <http://www.spaceweather.com/> e <http://www.sidc.be/index.php>) , que informam a ocorrência de explosões solares e se elas poderão afetar e com qual intensidade o campo geomagnético da Terra. Além disso, também podem ser encontradas informações se o posicionamento com GPS também será drasticamente afetado.

É importante comentar que os mapas de VTEC apresentados nessa pesquisa possuem limitações na região do oceano Atlântico que aparece nos mapas. Obviamente, isto ocorre devido ao número reduzido de pontos ionosféricos. Neste sentido, é importante realizar estudos para melhorar a representação do VTEC nas regiões oceânicas. Por exemplo, se poderiam utilizar dados de VTEC advindos de modelos ionosféricos climatológicos (ex.: modelo IRI), ou mesmo os advindos de arquivos IONEX do IGS. Obviamente, o ideal seria utilizar valores de VTEC advindos de receptores GPS localizados na própria região oceânica. Para atingir este objetivo, deveria ser feita uma procura para saber se existem receptores nessas regiões e a quem eles pertencem, para enfim tentar formar algum tipo de parceria.

O quarto experimento estudou as modificações ocorridas no posicionamento por ponto com GPS e no comportamento do VTEC na região brasileira devido ao repentino aumento do fluxo de radiação solar decorrente da intensa explosão solar de 28 de outubro de 2003 ocorrida por volta as 11:00 UT. Neste horário a ionosfera na região brasileira encontra-se em um período de início da sua atividade. Com a explosão solar, um repentino aumento da radiação solar eletromagnética foi observado, o que ocasionou um aumento na atividade ionosférica.

Os resultados mostraram um abrupto aumento do VTEC em larga escala no território brasileiro em concordância com o aumento da radiação eletromagnética proveniente da explosão solar. Este fenômeno é classificado como um dos DIS (Distúrbios Ionosféricos Súbitos) que podem ocorrer em períodos de explosões solares.

Foi analisado o comportamento da acurácia do posicionamento por ponto em quatro estações da RBMC localizadas em diferentes regiões do Brasil (POAL, UEPP, BRAZ e CRAT). Os resultados mostraram um comportamento dos erros bastante similares nas quatro estações GPS, mostrando a característica abrangente do impacto da explosão solar. Foram observadas perdas do sinal L2 em todas as 4 estações GPS, sendo que, ainda, algumas

observações de pseudodistância em L1 foram rejeitadas pelo software GPSPACE que as classificou como sendo outliers. Estes eventos mostram a influência da explosão solar na qualidade de rastreamento dos sinais pelos receptores. Para todas as estações GPS o software GPSPACE não realizou o posicionamento por ponto no período entre 08:04 e 08:15 HL (11:04 e 11:15 UT), que coincide com o aumento repentino do VTEC e com o aumento da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar.

Uma alta variação temporal dos erros planimétricos e altimétricos foi observada nas quatro estações quando comparada com os resultados de um dia do mesmo mês sem explosão solar. Um fato interessante observado com relação a isso é a alta variação temporal dos erros antes do efetivo aumento da radiação solar eletromagnética. Isto merece uma investigação futura no sentido de verificar se isto ocorre em outros períodos de intensas explosões solares.

O último experimento realizado teve como objetivo avaliar a performance na região brasileira dos mapas globais da ionosfera do IGS (arquivos IONEX), algo que ainda não tinha sido feito, embora seja um produto de aquisição livre (via internet) e oficial do IGS. Todos os estudos e experimentos realizados anteriormente nesta pesquisa foram importantes para uma melhor interpretação dos resultados deste último experimento.

Primeiramente, foi desenvolvido um programa computacional denominado CORIONEX para a correção de dados GPS do erro devido à ionosfera a partir de valores de VTEC de arquivos no formato IONEX. Para o experimento foram utilizados os dados GPS da estação UEPP abrangendo quatro dias geomagneticamente calmos de cada mês de 2001. Foi realizado o posicionamento por ponto utilizando os dados GPS sem a correção da ionosfera (SCI) e com a correção (CCI) a partir dos arquivos IONEX produzidos pelos cinco centros do Grupo de Trabalho da Ionosfera do IGS.

Analisando os resultados SCI verificou-se o comportamento do erro posicional para a estação UEPP durante o decorrer do ano de 2001, que corresponde a um ano de máximo número de manchas solares do ciclo 23. Verificou-se que a ionosfera afeta principalmente a determinação altimétrica, e é pouco correlacionada com o posicionamento planimétrico. Assim como a variação do VTEC, maiores valores de erro em altitude geométrica foram alcançados durante os meses próximos aos equinócios e solstício de verão; os menores nos meses próximos ao solstício de inverno.

Para os resultados SCI planimétrico pode-se verificar maiores valores para os meses próximos aos equinócios, porém, a diferença com relação a outros meses não é tão significativa quanto nos resultados SCI da altitude geométrica. Para se ter uma idéia, o maior valor de EMQ (SCI) para a planimetria é menor do que o menor valor de EMQ (SCI) para a altitude geométrica.

Quanto à variação diária, ainda analisando os resultados SCI, observou-se que o erro em altitude geométrica começou a aumentar diariamente por volta das 6-7 HL, ou seja, com o início da fotoionização diária, e chega a valores máximos no período da tarde. De uma forma geral, os menores valores de erro ocorreram por volta das 4-5 HL, justamente o período em que foram verificados os menores valores de VTEC do primeiro experimento.

Principalmente nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão, após o pôr do Sol um comportamento bastante irregular do erro em altitude geométrica foi observado. Em alguns dias, como o de outubro por exemplo, este comportamento persiste até as primeiras horas da madrugada. Este período coincide, como já foi visto, ao período de ocorrência da anomalia equatorial de ionização, que em períodos de máxima atividade do ciclo solar ocorre em praticamente todos os meses, com ênfase nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão. A estação UEPP sofre a influência da crista da anomalia equatorial no período noturno que faz com que ocorra um aumento da magnitude do erro

devido à ionosfera. Além do aumento do erro, também se sabe que existe uma forte correlação da ocorrência do efeito da cintilação ionosférica e a localização da crista da anomalia equatorial.

Analisando os resultados SCI da determinação planimétrica não se observa como para a altimetria um comportamento diário similar ao comportamento do VTEC. Porém, um fato interessante é que nos meses próximos aos equinócios observam-se irregularidades do erro planimétrico no período de ocorrência da anomalia equatorial noturna, indicando a influência desta também na determinação planimétrica mesmo que em menor magnitude.

Quanto aos resultados do posicionamento por ponto CCI à partir dos IONEX do IGS, quando comparados com os SCI, verificou-se um valor médio anual de melhora obtida de 72% para a determinação altimétrica e de 26% para a planimétrica, com resultados bastante similares entre as estratégias CCI.

Em uma análise diária observou-se que a maior eficácia da correção ocorre para a altitude geométrica durante o período diurno. Os períodos diários mais complicados, tanto para a determinação altimétrica quanto para a planimétrica, coincide com o período noturno de ocorrência da anomalia equatorial de ionização. Uma variação irregular de ambos os erros ocorre neste período, principalmente, em meses próximos aos equinócios e solstícios de verão, tanto para os resultados SCI e CCI.

Pode-se perceber que a anomalia equatorial noturna na região brasileira é um fator bastante limitante para o posicionamento por ponto na região brasileira. Também, resultados de posicionamento relativo realizados por Dal Poz (2005) apontam para uma limitação na acurácia deste tipo de posicionamento em períodos de ocorrência significativa da anomalia equatorial. Além disso, modelos ionosféricos investigados na região brasileira, tais como o Mod_Ion (CAMARGO, 1999; MATSUOKA 2003), Mod_Ion_FK (AGUIAR, 2005),

Klobuchar (MATSUOKA e CAMARGO, 2002) e IONEX do IGS apresentaram limitações no período da anomalia equatorial noturna.

6.2 Recomendações

Com a experiência adquirida durante a execução dessa pesquisa, a partir da análise dos resultados e das dificuldades encontradas, e tendo em mente que ainda há muito que se desenvolver em termos de aplicativos computacionais e estudos sobre o tema na região brasileira, têm-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Implementar um método de interpolação para a geração do *grid* de VTEC a partir das amostras fornecidas pelo programa CALTEC;
- Direcionar esforços para que se tenha a produção sistemática de mapas de VTEC na região brasileira;
- Realizar estudos para melhorar a representação do VTEC nas áreas oceânicas;
- Investigar as modificações ocorridas na ionosfera e na performance do posicionamento com GPS na região brasileira no período atual de mínima ocorrência de manchas solares;
- Estudar o impacto de outras explosões solares e tempestades geomagnéticas muito intensas na ionosfera e na performance do posicionamento com GPS na região brasileira;
- Verificar a influência de tempestades geomagnéticas de menores intensidades na performance do posicionamento com GPS na região brasileira;

- Analisar a performance dos arquivos IONEX do IGS aplicados em outros locais do Brasil e em períodos de tempestades geomagnéticas e explosões solares;
- Comparar a performance dos arquivos IONEX do IGS com a do modelo de Klobuchar para a correção do erro devido à ionosfera;
- Estudar a correlação existente entre o comportamento da ionosfera e a performance do posicionamento relativo na região brasileira;
- Investigar o efeito da cintilação ionosférica na região brasileira em períodos de explosões solares e tempestades geomagnéticas;
- Com o advento de redes GPS ativas em tempo real na região brasileira desenvolver sistemas de monitoramento da ionosfera em tempo real, proporcionando inclusive serviços de alertas de irregularidades para os usuários;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdu, M. A.. Magnetospheric disturbance effects on the equatorial ionization anomaly (EIA): an overview, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.*, v.53, p.757-771, 1991.

Aguiar, C. R.. *Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): implementação em tempo real*. 2005. 159p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Aguiar, C.R.. *Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GPS no Brasil*. 2006. Projeto de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Aguiar, C.R.; Camargo, P.O.. Modelagem em tempo real do erro sistemático das observáveis GPS devido à ionosfera. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.12, n.1, p.101-120, jan-jun, 2006.

Aguiar, C.R.; Camargo, P.O.; Matsuoka, M. T.; Dal Poz, W.R.. Determinação do erro sistemático na pseudodistância devido à ionosfera: avaliação da performance do Mod_Ion e do modelo de Klobuchar. *Mitishita, E.A. ed. Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: Imprensa Universitária. 2003. 495p. Vol.3, p.119-132.

Aquino, M.H.O.; Rodrigues, F.S.; Dodson, A.; Moore, T.; Waugh, S.. Results of Statistical Analysis of GPS Ionospheric Scintillation Data in Northern Europe 13-15 October 2003, Matera, Italy. Disponível em: http://www.nottingham.ac.uk/iessg/research/research_project/isgres38/iessg_matera_2003_1.pdf. Acesso em outubro/2006.

Appleton, E.V.. Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, 157, 691, 1946.

Batista, I. S.; Medeiros, R.T.; Abdu, M.A.; Souza, J.R.; Bailey, G.J.; Paula, E.R.. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region, *Journal of Geophysical Research*, v.101, N0.A5, p.10,887-10,892, May, 1996.

Batista, I. S.; Abdu, M. A.; MacDougall, J.; Souza, J. R.. Long term trends in the frequency of occurrence of the F-3 layer over Fortaleza, Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n. 12-14, p.1409-1412, Aug.-Sep. 2002.

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.

Batista, I. S.; Abdu, M.A.; Souza, J.R.; Bertoni, F.; Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O.; Bailey, G.J.. Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm, *Journal of Geophysical Research*, v.111, A05307, doi:10.1029/2005JA011428, 2006.

Batista, I.S.. *Comunicação Pessoal*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2005.

Batista, I.S.. *Comunicação Pessoal*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2007.

Bertoni, F.C.P.. *Estudos de derivas ionosféricas por meio de ionossondas digitais*. 1998. 135p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Blanch, J.; Walter, T.; Enge, P.. Ionospheric estimation using extended kriging for a low latitude SBAS. In: *17TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation - ION GNSS-2004 – CD-ROM*, USA, 2004.

Camargo, P.O.. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência*. 1999. 191p. 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.; Dal Poz, W.R.. Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: primeiras experiências na FCT/UNESP. In: Mitishita, E.A. ed. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: Imprensa Universitária. 2002. 395p. Vol.2, p.80-99.

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, 7 a 11 de novembro, 1993.

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, Nov. 1991.

CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) – online – endereço eletrônico: <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>. Acesso em agosto de 2006.

Dal Poz, W.R.. *Análise do modelo regional da ionosfera (Mod_Ion) no período de máxima atividade solar e produção de mapa da ionosfera*. 2002. 86p. Relatório de Bolsa de Iniciação Científica (FAPESP) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Dal Poz, W.R.. *Posicionamento Relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas*. 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Dal Poz, W.R.. *Análise da influência do efeito da ionosfera no posicionamento relativo na região brasileira*. 2006. Projeto de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Davies, K.. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

Dodson, A.; Moore, T.; Aquino, M.H.O.; Waugh, S.. Ionospheric Scintillation Monitoring in Northern Europe. In: *14TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the*

Institute de Navigation - ION GPS-2001 – CD-ROM, Salt Lake City, Utha, 11-14 September, 2001.

El Gizawy, M.L.. *Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users*. 2003. 161p. Msc thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

ESA (European Space Agency) – on line – endereço eletrônico: <http://nng.esoc.esa.de/gps/ionmon.html>. Acesso em agosto de 2006.

Farah, A.. The Ionospheric Delay Effort for GPS Single-Frequency Users-Analysis Study for Simulation. In: *15TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2002 – CD-ROM*, Oregon, Portland, 24-27 September, 2002.

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

Fedrizzi, M.; Langley, R.B.; Komjathy, A.; Santos, M.C.; Paula, E.R.; Kantor, I.J.. The low-latitude ionosphere: monitoring its behaviour with GPS. In: *14TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2001 – CD-ROM*, Salt Lake City, Utha, 11-14 September, 2001.

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

Feltens, J., and Schaer, S.. IGS Products for the Ionosphere. In: *Proceeding of the IGS Analysis Centre Workshop*, edited by J. M. Dow et al., p. 225-232, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, Februray 9-11, 1998.

Fejer, B.G.; Farley, D.T.; Woodman, R.f.; Calderon, C.. Dependence of Equatorial F Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. *Journal of Geophysical Research*, v.84, n.A10, oct. 1979.

Finn, A.; Knight, M.. The impact of ionospheric scintillations on GPS performance. In: *9TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation –ION GPS-1996*, Kansas, Missouri, Sept. 17-20, 1996.

Fonseca Junior, E.S.. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Fortes, L.P.S.; Costa, S.M.A.; Lima, M.A.A.; Fazan, J.A.; Santos, M.C.. Modernização da RBMC. In: *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia*, Macaé, 2005.

Foster, A.J.; Erickson, P.J.; Rich, F.J.. Regional GPS mapping of storm enhanced density during the 15-16 July 2000 geomagnetic storm. In: *14TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2001* – CD-ROM, Salt Lake City, Utha, 11-14 September, 2001.

Fu, W.X., Han, S., Rizos, C., Kinght, M., Finn, A. Some Results on the Nonparametric Statistics of GPS Signal Scintillation. *International Symposium on GPS: Application to Earth Sciences & Interaction with Other Space Geodetic Techniques*, Tsukuba, Japan, 18-22 October, 1999.

Gao, Y.; Liao, X.; Liu, Z.Z.. Ionosphere modeling using carrier smoothed ionosphere observations from a regional GPS network, *Geomatica*, v.56, n.2, 97-106, 2002.

García-Fernández, M.. *Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data*. 2004. Ph.d. Thesis. Doctoral Program in Aerospace Science & Technology, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Spain.

Gemael, C.. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319p.

Goad, C. C.. Optimal filtering of pseudoranges and phases from single-frequency GPS receivers. *Journal of The Institute of Navigation*, v.37, n.3, p.249-262, Fall/1990.

Gonzalez, W.D.; Tsurutani, B.T.; Gonzalez, A.L.C.. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews* 88: p.529–562, 1999.

Guimarães, R.C.; Silva, C.E.. Anomalia magnética do atlântico sul: origem interna e visão espacial. In: *XXI Congresso Brasileiro de Cartografia – CD-ROM*, Belo Horizonte/MG, Brasil, 2003.

Hatch, R.. The synergism of GPS code and carrier measurements. In: *Proceedings of the Third International Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Las Cruces, New Mexico, Feb. 8-12, v.2, p.1213-1231, 1982.

Hernández-Pajares, M.. *Performance of IGS ionosphere TEC maps*. Disponível em: http://maite152.upc.es/~ionex3/doc/IGS_IONO_report_April2003_7.pdf, 2003. Acesso em outubro/2004.

Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.. *Global Positioning System Theory and Practice*. 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.

Hugentobler, U.; Schaer, S.; Fridez, P.. *Bernese GPS Software*, version 4.2, Switzerland, Astronomical Institute, University of Bern, 515p., 2001.

IGSCB (*International GPS Service Central Bureau*) – online – endereço eletrônico: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>. Acesso em agosto de 2006.

ISGI (*International Service of Geomagnetic Indices*) – online – endereço eletrônico: <http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/indicgeo.htm>. Acesso em março de 2004.

Isaaks, E.H.; Srivastava, M.R.. *Introduction an applied Geostatistics*. Oxford, New York: Oxford University Press. 1989.

Jakowski, N. TEC monitoring by using satellite positioning systems. In: *Kohl, H.; Ruster, R.; Schlegel, K. ed. Modern ionospheric science*. Katlenburg-Lindau, European Geophysical Society, p. 371-390, 1996.

Jin, XX.. *Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results*. Delft, 1996. PhD Thesis – Delft University of Technology, Holanda.

JPL (Jet Propulsion Laboratory) – on line – endereço eletrônico: <http://iono.jpl.nasa.gov/>. Acesso em agosto de 2006.

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

Kedar, S.; Hajj, G.A.; Wilson, B.D.; Heflin, M.B.. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophysical Research Letters*, v.30, n.16, 1829, 2003.

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.

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

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

Klobuchar, J.A.. Ionospheric Effects on GPS (Chapter 12). In: *Parkinson, B. W.; Spilker, J. J. ed. Global Positioning System: theory and applications*. Washington: AIAA, v.1, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

Komjathy, A. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. 1997. 248p. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics

Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

Komjathy, A.; Sparks, L.; Mannucci, A.J.; Xiaoqing, P.. An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south american region. *Journal of the Institute of Navigation*, v.50, n.3, p.193-218, Fall/2003.

Komjathy, A.; Hernández-Pajares, M.. The IGS global TEC maps: present and future. In: *National Radio Science Meeting*, Boulder, CO, USA, 2004.

Kunches, J.M.; In the teeth of cycle 23. In: *13TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2000* – CD ROM, Salt Lake City, Utha, Sept. 19-22, 2000.

Lanyi, G.E.; Roth, T.. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio Science*, v.23, n.4, p.483-492, July/Aug. 1988.

Leick, A.. *GPS satellite surveying*. 2°.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

Leonovich, L.A.; Altynev, A.T.; Grechnev, V.V.; Afraimovich, E.L.. Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data. In: http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0110/0110063.pdf , acesso em julho/2006, 2001.

Liu, Z.. *Ionosphere tomographic modelling and applications using global positioning system (GPS) measurements*. 2004. 304p. PhD Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

Liu, J. Y., Lin, C.H.; Chen, Y.I.; Lin, Y.C.; Fang, T.W.; Chen, C.H.; Chen, Y.C.; Hwang, J.J.. Solar flare signatures of the ionospheric GPS total electron content. *Journal of Geophysical Research*, v.111, A05308, doi:10.1029/2005JA011306, 2006.

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. In: *Mitishita*,

E.A. ed. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: Imprensa Universitária. 2002. 395p. Vol.2, p.20-40.

Matsuoka, M.T.. *Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS*. 2003. 164p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Matsuoka, M.T.; Dal Poz, W.R.. *Impacto da ionosfera na propagação dos sinais GPS e estudo do comportamento do TEC na região brasileira utilizando a RBMC*. Relatório de Estudo dirigido. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O.. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, n.56/01, p.14-27, julho/2004.

Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O.; Dal Poz, W.R.. Declínio do número de manchas solares do ciclo solar 23: redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.10, n.2, p.141-157, 2004.

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

Monico, J.F.G.. *Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. da Unesp, 2000. 287p.

Morais, T.N., Oliveira, A.B.V., Walter, F.: Global Behavior of the Equatorial Anomaly since 1999 and Effects on GPS Signals. In: *11th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Saint Petersburg, Russia, p. 196-203, May, 2004.

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) – on line – endereço eletrônico: <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/quests.htm>, acesso em fevereiro de 2005.

NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) – on line – endereço eletrônico: <http://www.ucar.edu/news/releases/2006/sunspot.shtml>, acesso em outubro de 2006.

Newby, S.P.; Langley, R.B.; Janes, 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, p.429-443, Sept. 1990.

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, v.1, p.240-244, Mar. 16-20, 1992.

Nichols, J., Hansen, A., Water, T., Enge, P. Observations of Equatorial Scintillations Using GPS Receivers. In: *12TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation –ION GPS-1999*, Nashville, Tennessee, Sept. 14-17, 1999.

NRCan (Natural Resources Canada) – on line – Endereço eletrônico: http://www.geolab.nrcan.gc.ca/geomag/northpole_e.shtml>. Acesso em março de 2004.

NRCan: User's Guide – GPSPACE: Manual de Operação – GSD/NRCan, Canadá, 1997 – http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace_e.php

Odjik, D.. *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays*. Netherlands: Editora Optima Grapsche Communicatie, 2002. 242p.

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

Oliveira, A. B. V., Morais, T. N., Walter, F.: Effects of Equatorial Anomaly in the GPS Signals. In: *16TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS/GNSS-2003 – CD-ROM*, Port-land, Oregon, 09-12 September, 2003.

Oliveira Filho, K.S.O; Saraiva, M.F.O.. *Astronomia e Astrofísica*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física. 2000. 708 p.

Osório, I.M.T.V.P.. *O sistema global de posicionamento na orbitografia de satélites de baixa altitude*. 1992. 198p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal.

Ovstedal, O.. Absolute positioning with single-frequency GPS receivers. *GPS Solutions*, v.5, n.4, p.33-34, 2002.

Pereira, K.D.; Fazan, J.A.; Fortes, L.P.S. RBMC: Sete anos fornecendo referência a posicionamentos GPS no Brasil e exterior. In: *XXI Congresso Brasileiro de Cartografia – CD-ROM*, Belo Horizonte/MG, Brasil, 2003.

Rodrigues, F.S.R.. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Saastamoinen, I.I.. Contribution to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, v.107, p.13-34, 1973.

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

Salomoni, R.. *Comunicação Pessoal*. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) – Superintendência Regional do Rio Grande do Sul – SR11. 2007

Sandford, W.H.. The impact of solar winds on navigation aids. *Journal of Navigation*, v.52, issue 1, p.42-46, jan.1999.

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

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

Sapucci, L.F.. *Estimativas do IWW utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergismo entre a geodésia e a meteorologia*. 2005. 200p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

Sardón, 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, p.577-586, May/Jun., 1994.

Sardón, E.; Zarraoa, N.. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases. *Radio Science*, v.32, p.1899-1910, Sept./Oct., 1997.

Schaer, S. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. 205p. Ph.D. dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland.

Schaer, S.; Gurtner, W.. *IONEX – format version 1*. In: Proceedings of IGS AC Workshop, Germany, February, 1998. Disponível em: <http://maite152.upc.es/~ionex3/doc/ionex1.pdf>. Acesso em agosto de 2006.

Seeber, G.. *Satellite Geodesy*. 2º ed. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

Soares, A.P. *Monitoração de anomalias em comunicações via satélite*. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, Brasil, 21 a 26 de outubro, 2001.

Skone, S.. *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*. 1998. 198p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

Skone, S. GPS Receiver Tracking Performance Under Ionospheric Scintillation Conditions. In: *IGS Network Workshop*, Soria Moria, Oslo, Norway, 12-14 July, 2000. Disponível em: <http://www.gdiv.statkart.no/igsworkshop/book/>. Acesso em julho de 2002.

Skone, S.; Knudsen, K.; de Jong, M.. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions. *Phys. Chem. Earth (A)*, v. 26, n. 6-8, p. 613-621, 2001.

Skone, S.; Hoyle, V.; Lee, S.; Poon, S.. Variations in point positioning accuracies for single frequency GPS users during solar maximum, *Geomatica*, v.56, n.2, 131-140, 2002.

Skone, S.; Yousuf, R.; Coster, A.. Performance Evaluation of the Wide Area Augmentation System for Ionospheric Storm Events. In: *Proceedings of The 2004 International Symposium on GNSS/GPS*, Sydney, Australia, 6–8 December 2004.

Skoug, R. M., Gosling, J. T., Steinberg, J. T., McComas, D. M., Smith, C. W., Ness, N. F., Hu, Q., Burlaga, L. F. Extremely high solar wind: 29-30 October 2003, *J. Geophys. Res.*, 109, A09102, doi: 10.1029/2004JA010494, 2004.

Sobral, J. H. A.. *Sobre a Importância Estratégica da Ciência Espacial para o Brasil*. <http://www.agespacial.gov.br/Artigos/revista8.pdf>, 1999, acesso em março de 2002.

Teunissen, P.J.. The GPS phase-adjusted pseudorange. In: *Proceedings of the Second International Workshop on High Precision Navigation*, Stuttgart, Freudenstadt, Nov., 1991, p115-125.

Teunissen, P.J.; Kleusberg, A.. *GPS for Geodesy*. 2ª Ed. Berlin: editora Verlag, 1998. 650p.

Teunissen, P.J.G.. *Testing Theory: an introduction*. 2000. Editora: Delft University Press. Delft, Holanda.

Tsurutani, B.T.; Mannucci, A.J.; Iijima, B.; Guarnieri, F.L.; Gonzalez, W.D.; Judge, D.L.; Gangopadhyay, P.; Pap, J.. The extreme Halloween 2003 solar flares (and Bastille Day, 2000

Flare), ICMEs, and resultant extreme ionospheric effects: A review. *Advances in Space Research*, v.37, Issue 8, p.1583-1588, 2006.

UPC (Polytechnical University of Catalonia) – on line – endereço eletrônico: <http://gage1.upc.es/>. Acesso em agosto de 2006.

Veronez, M.R.. *Proposta de um modelo regional da ionosfera para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método seqüencial de ajustamento*. 2004. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Wanninger, L.; Seeber, G.; Campos, M.A.. Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions. In: *IAG Symposium 111*, Heidelberg, Aug. 13, 1991.

Wanninger, L.; Seeber, G.; Campos, M.. Limitations of GPS in equatorial regions due to the ionosphere. In: *VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, May 10-14, 1993. In: *International Conference Cartography - Geodesy*, Maracaibo, Venezuela, Nov. 24 - Dec. 4, 1992.

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

Warnant, R.. Influence of the ionospheric refraction on the repeatability of distances computed by GPS. In: *10TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-1997*, Kansas City, 16-19 September, 1997.

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

Wells, D.; Beck, N.; Delikaraoglou, D.; Kleusberg, A.; Krakiwsky, E.J.; Lachapelle, G.; Langley, R.B.; Nakiboglu, M.; Schwarz, K.P.; Tranquilla, J.M.; Vanicek, P.. *Guide to GPS positioning*. Fredericton: Canadian GPS Associates, 1986.

Wilson, B.D.; Manucci, A.J.. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data. In: *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-1993* – Salt Lake City, Utha, 22-24 September, 1993.

Wilson, B. D.; Yinger, C. H.; Feess, W. A.; Shank, C.. New and improved - The broadcast interfrequency biases. *GPS World*, v.10, n.9, p.56-66, Sept. 1999.

Yamashita, C.S.. *Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude*. 1999. 75p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Zhang, H.; Wang, J.; Zhu, W.Y.; Huang, C.. Gaussian random process and its application for detecting the ionospheric disturbance using GPS, *Journal of Global Positioning System*, v.4, n.1-2, p.76-81, 2005.

**APÊNDICE A – ERROS EM PLANIMETRIA E ALTITUDE GEOMÉTRICA
NORMALIZADOS PELO GDOP PARA O DIA 29 E 11 DE OUTUBRO DE 2003**

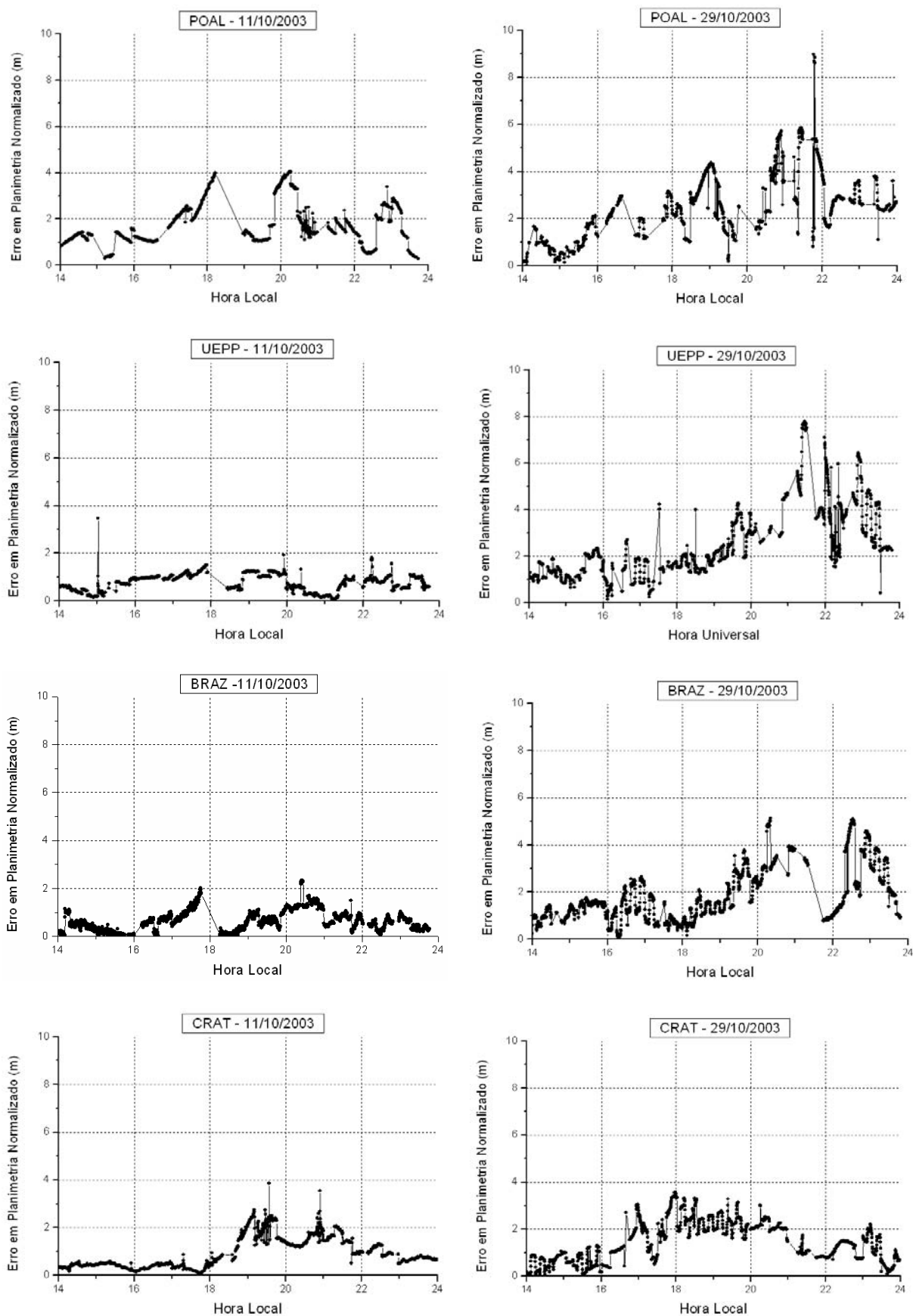


Figura A.1 – Erro Planimétrico Normalizado pelo GDOP – Posicionamento por ponto – 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT

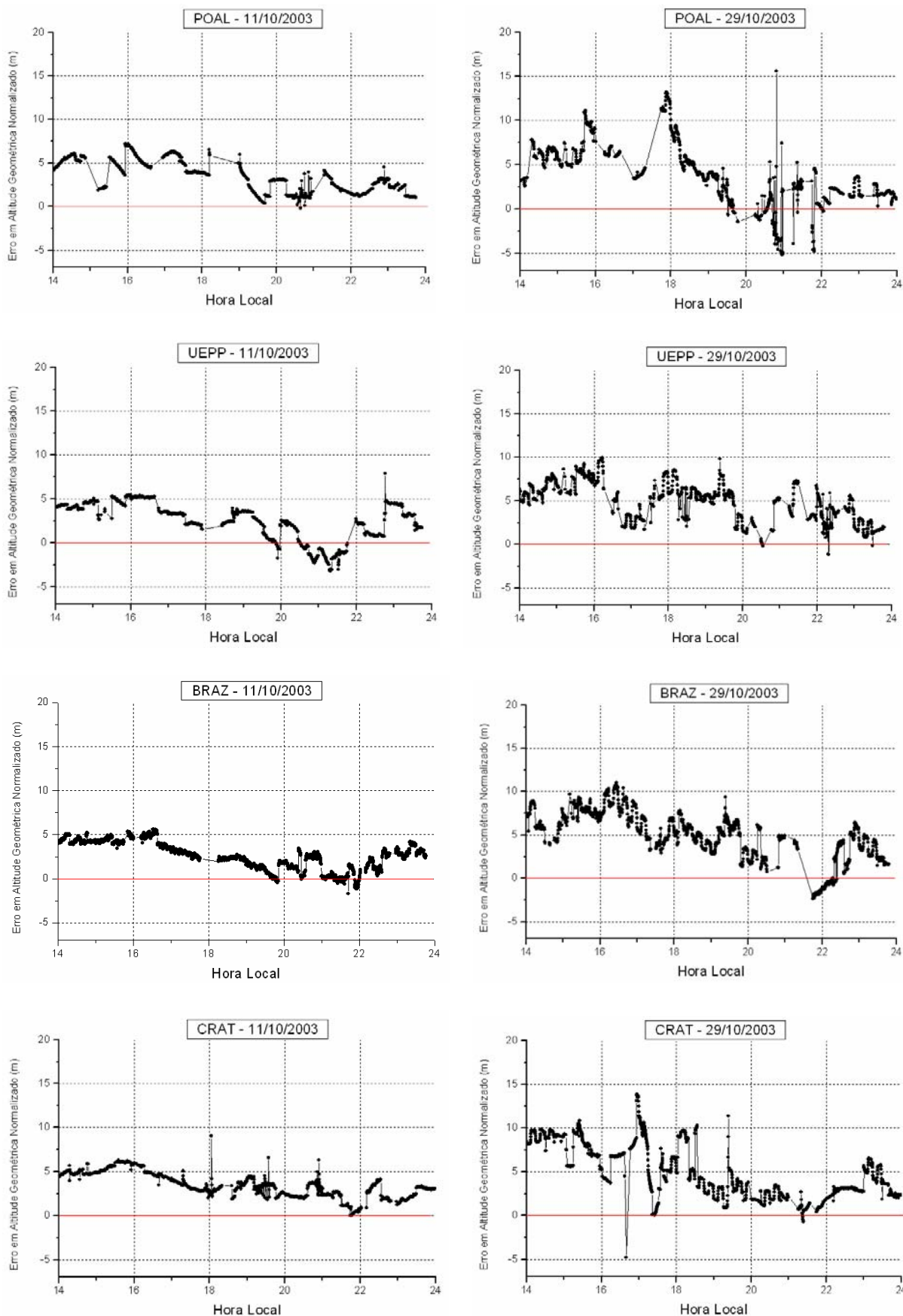


Figura A.2 – Erro em Altitude Geométrica Normalizado pelo GDOP – Posicionamento por ponto – 14 – 24 HL – 11 e 29 de outubro de 2003 – POAL, UEPP, BRAZ e CRAT