

CHRISTIANE SILVA SALOMONI

**GPS E IONOSFERA: ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO TEC E DE SUA  
INFLUÊNCIA NO POSICIONAMENTO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA EM  
PERÍODOS DE ALTA E BAIXA ATIVIDADE SOLAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Área de Concentração: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

Linha de Pesquisa: Cartografia e SIG

Orientadores:

Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Prof. Dr. Marcelo Tomio Matsuoka

Porto Alegre

2008

**BANCA EXAMINADORA**

Dra. Inez Staciarini Batista  
Divisão de Aeronomia – INPE

Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez  
UNISINOS

Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati  
CEPSRM – UFRGS

Dissertação defendida e aprovada em 15 de Agosto de 2008.

*Dedico esse trabalho a Deus, ao meu esposo Tiago, e a minha mãe, Marlene. Sem eles, tudo seria imensamente mais difícil, se não impossível.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me indicar o caminho e por me dar forças para trilhá-lo.

Aos meus orientadores: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza, por aceitar meu projeto mesmo sabendo que eu não teria como me dedicar exclusivamente à pesquisa – sem esse apoio eu não teria conseguido cursar a pós-graduação; e Prof. Dr. Marcelo Tomio Matsuoka, um pesquisador apaixonado pela sua pesquisa, por tudo que me ensinou sobre Ionosfera e GPS nas muitas e incontáveis horas em que ficou *online*, mesmo à noite e em finais de semana – sem a sua disposição em compartilhar conhecimento eu não teria conseguido seguir essa linha de pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação do CEPSSRM, na pessoa de sua coordenadora, Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim, por ter aceito meu projeto e meu pedido de prorrogação, e aos professores da Banca Examinadora.

Ao IBGE, pelo fornecimento dos dados GPS das estações da RBMC; ao IGS, pelo fornecimento dos Mapas Globais da Ionosfera e pelos dados de efemérides precisas; e ao NRCan, pelo fornecimento do *software* GPSPACE e pelos dados de efemérides precisas.

A minha irmã, Leticia, pelo auxílio com a revisão gramatical deste trabalho, e aos amigos, Ana Maria, Márcio e Rafael, pela tradução do resumo para a língua inglesa.

Ao meu esposo, Tiago, amor da minha vida, por todas as noites em que me apoiou, ficando acordado comigo, e pelo amor e compreensão em todas as muitas horas em que o meu cansaço e *stress* falaram mais alto. E a minha mãe, Marlene, minha primeira professora, que me ensinou, além das primeiras letras, a sempre procurar fazer o meu melhor.

*“Quando todos pensam o mesmo, ninguém pensa muito.”*  
Walter Lippmann

## RESUMO

A ionosfera é uma das principais fontes de erro sistemático das observáveis GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), pois, por ser um meio dispersivo, ela afeta a propagação de ondas eletromagnéticas, fazendo com que a modulação e a fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites GPS sofram, respectivamente, um retardo e um avanço, o que, por sua vez, provoca um erro na distância medida entre o satélite e o receptor. Esse erro é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal e diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, à densidade de elétrons presentes na ionosfera ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora. O TEC sofre variações regulares, cujo comportamento pode ser verificado ao longo do dia, ao longo das estações do ano e também ao longo de ciclos de aproximadamente onze anos (associados à ocorrência de manchas solares). Além dessas variações, eventos solares extremos (explosões solares, ejeções coronais de massa, entre outros) podem causar abruptas e significativas mudanças no comportamento do TEC, exercendo grande influência no posicionamento com GPS, principalmente com receptores de uma frequência. No Brasil, o fator ionosfera é ainda mais relevante, pois essa região é afetada por fenômenos como a Anomalia Equatorial (AE), a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e até mesmo pela ocorrência de irregularidades ionosféricas. Pretendendo aprofundar o entendimento da relação entre a ionosfera e o posicionamento com GPS na região brasileira, essa pesquisa analisou dados de TEC e dados de GPS em períodos de alta e baixa atividade solar, bem como em um período geomagneticamente perturbado. Os resultados demonstraram uma relação direta entre a redução do TEC, no período de baixa atividade solar, e a melhora no posicionamento com GPS. Essa melhora se traduziu, no posicionamento por ponto, por uma redução de 59% no erro planimétrico e 64% no erro altimétrico e, no posicionamento relativo, por uma redução de 65% no erro planimétrico e 63% no erro altimétrico. Já durante o período afetado por uma severa tempestade geomagnética verificou-se um comportamento completamente atípico da ionosfera, piorando muitos os resultados do posicionamento relativo, em horários e locais inesperados.

**Palavras-chave:** GPS. Ionosfera. TEC. Anomalia Equatorial. Tempestade geomagnética.

## ABSTRACT

The ionosphere is one of the main sources of systematic error of the observable GPS (*Global Positioning System*) because as it is a dispersive environment it affects the propagation of electromagnetic waves making the modulation and the phase of signals transmitted by GPS satellites go through, respectively, delay and advance which will cause an error in the measure of the distance between the satellite and the receptor. This error is inversely proportional to the square of the frequency of the signal and directly proportional to the TEC (*Total Electron Content*), what means the density of electrons on the ionosphere between the satellite and the reception antenna. The TEC goes through regular variances, which behaviour can be verified during the day, throughout seasons and also throughout cycles of approximately eleven years (related to the occurrence of sunspot). Besides these variances, extreme solar events such as solar flares and coronal mass ejection may cause abrupt and significant changes to TEC behavior, exerting big influence in GPS positioning, mainly to monofrequency receptors. In Brazil, the ionosphere factor is even more relevant because this region is affected by phenomena such as the Equatorial Anomaly (EA), the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA) and even by the occurrence of ionospheric irregularities. In order to develop knowledge about the relation between ionosphere and GPS positioning in Brazil, on this research TEC and GPS data were analysed in periods of high and low solar activity, as well as in a geomagnetic perturbed period. The results showed direct relation between the decreasing of TEC, in the low solar activity period, and the improving of GPS positioning. This improving has resulted in a reduction of 59% in the planimetric error and 64% in the altimetric error in the point positioning and a reduction of 65% in the planimetric error and 63% in the altimetric error in the relative positioning. During the period affected by a severe geomagnetic storm, a completely atypical behavior was identified in the ionosphere, making the results of the relative positioning much worse in unexpected times and locations.

**Keywords:** GPS. Ionosphere. TEC. Equatorial Anomaly. Geomagnetic Storm.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Magnetosfera terrestre .....	23
Figura 2 - Modelo teórico do campo magnético da Terra .....	24
Figura 3 - Posição do equador magnético em 1957 e em 2000.....	25
Figura 4 - Processo de fotoionização.....	26
Figura 5 - Perfil da densidade de elétrons dia/noite .....	28
Figura 6 - Regiões geográficas da ionosfera .....	30
Figura 7 - Cintilação ionosférica .....	34
Figura 8 - Efeito Fonte: esquema das forças agindo no plasma .....	37
Figura 9 - Mapas globais do TEC para 08/10/2001 - Anomalia Equatorial.....	39
Figura 10 - Campo magnético total para o ano 2000 .....	41
Figura 11 - Deslocamento da AMAS nos últimos anos .....	42
Figura 12 - Relação entre o TEC e o VTEC.....	44
Figura 13 - Variação diurna do VTEC para Outubro de 2001 .....	46
Figura 14 - Variação sazonal do VTEC para os meses do ano 2001 (00-01 UT - 21-22 HL) .	48
Figura 15 - Manchas solares.....	49
Figura 16 - Número de manchas solares - Ciclos Solares .....	51
Figura 17 - Ciclo Solar 23 .....	52
Figura 18 - Explosão solar detectada pela SOHO .....	53
Figura 19 - Ejeção Coronal de Massa (CME Halo).....	56
Figura 20 - Dinâmica do vento solar na magnetosfera.....	58
Figura 21 - Fases de uma tempestade geomagnética.....	59
Figura 22 - Estações GPS da rede IGS .....	67
Figura 23 - Atividade solar: <i>Sunspot</i> , <i>Solar flares</i> e <i>CME's Halo</i> .....	70

Figura 24 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Janeiro 2002 (00-06 HL) (03-09 UT) e Janeiro 2006 (01-07 HL) (04-10 UT).....	73
Figura 25 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Janeiro 2002 (08-14 HL) (11-17 UT) e Janeiro 2006 (09-15 HL) (12-18 UT).....	74
Figura 26 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Janeiro 2002 (16-22 HL) (19-01 UT) e Janeiro 2006 (17-23 HL) (20-02 UT).....	75
Figura 27 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Julho 2002 (00-06 HL) (03-09 UT) e Julho 2006 (01-07 HL) (04-10 UT).....	76
Figura 28 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Julho 2002 (08-14 HL) (11-17 UT) e Julho 2006 (09-15 HL) (12-18 UT).....	77
Figura 29 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Julho 2002 (16-22 HL) (19-01 UT) e Julho 2006 (17-23 HL) (20-02 UT).....	78
Figura 30 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Outubro 2001 (00-06 HL) (03-09 UT) e Outubro 2006 (01-07 HL) (04-10 UT).....	79
Figura 31 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Outubro 2001 (08-14 HL) (11-17 UT) e Outubro 2006 (09-15 HL) (12-18 UT).....	80
Figura 32 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Outubro 2001 (16-22 HL) (19-01 UT) e Outubro 2006 (17-23 HL) (20-02 UT).....	81
Figura 33 - Variação diurna média do VTEC na região brasileira para os meses de Janeiro 2002 e 2006; Julho 2002 e 2006; e Outubro 2001 e 2006.....	82
Figura 34 - Indicativo da variação espacial média do VTEC na região brasileira para o período de Alta Atividade Solar .....	83
Figura 35 - Indicativo da variação espacial média do VTEC na região brasileira para o período de Baixa Atividade Solar .....	83

Figura 36 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Janeiro 2002 (00-10 HL) e Janeiro 2006 (23-09 HL).....	87
Figura 37 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Janeiro 2002 (12-22 HL) e Janeiro 2006 (11-21 HL).....	88
Figura 38 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Julho 2002 (00-10 HL) e Julho 2006 (23-09 HL) .....	89
Figura 39 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Julho 2002 (12-22 HL) e Julho 2006 (11-21 HL) .....	90
Figura 40 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Outubro 2001 (00-10 HL) e Outubro 2006 (23-09 HL) .....	91
Figura 41 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Outubro 2001 (12-22 HL) e Outubro 2006 (11-21 HL) .....	92
Figura 42 - Posição da estação RIOD (RBMC) no Brasil.....	97
Figura 43 - EMQ mensal para o período de Alta e Baixa Atividade Solar – Posicionamento por ponto.....	99
Figura 44 - EMQ em Planimetria para os dias do experimento – Posicionamento por ponto	101
Figura 45 - EMQ em Altitude Geométrica para os dias do experimento – Posicionamento por ponto .....	102
Figura 46 - Posição da linha de base RIOD-VICO (RBMC) no Brasil.....	108
Figura 47 - EMQ mensal para o período de Alta e Baixa Atividade Solar – Posicionamento relativo .....	111
Figura 48 - Discrepâncias em Planimetria para os dias do experimento – Posicionamento relativo .....	114
Figura 49 - Discrepâncias em Altitude Geométrica para os dias do experimento – Posicionamento relativo.....	115

Figura 50 - Agrupamentos de manchas Solares 10484, 10486 e 10488.....	125
Figura 51 - CME ocorrida no dia 28 de Outubro de 2003.....	128
Figura 52 - Índice Dst para os dias 29 e 30 de Outubro de 2003 .....	129
Figura 53 - Estações RBMC e linhas de base utilizadas no experimento .....	131
Figura 54 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (01-07 HL) (04-10 UT) e 29 Outubro 2003 (01-07 HL) (04-10 UT) .....	134
Figura 55 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (09-15 HL) (12-18 UT) e 29 Outubro 2003 (09-15 HL) (12-18 UT) .....	135
Figura 56 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (17-23 HL) (20-26 UT) e 29 Outubro 2003 (17-23 HL) (20-26 UT) .....	136
Figura 57 - Discrepâncias em Planimetria CRAT - 11 e 29 de Outubro de 2003.....	140
Figura 58 - Discrepâncias em Planimetria SMAR - 11 e 29 de Outubro de 2003 .....	140
Figura 59 - Discrepâncias em Planimetria PARA - 11 e 29 de Outubro de 2003.....	141
Figura 60 - Discrepâncias em Altitude Geométrica CRAT - 11 e 29 de Outubro de 2003....	141
Figura 61 - Discrepâncias em Altitude Geométrica SMAR - 11 e 29 de Outubro de 2003 ...	142
Figura 62 - Discrepâncias em Altitude Geométrica PARA - 11 e 29 de Outubro de 2003....	142
Figura 63 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (04-08 HL) (07-11 UT) e 29 Outubro 2003 (04-08 HL) (07-11 UT) .....	145
Figura 64 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (05-09 HL) (08-12 UT) e 29 Outubro 2003 (05-09 HL) (08-12 UT) .....	146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das explosões solares .....	54
Tabela 2 - Classificação das Tempestades Geomagnéticas (índice Dst).....	60
Tabela 3 - Relação entre os índices Kp e Ap.....	61
Tabela 4 - Classificação das Tempestades Geomagnéticas (índice Kp e Ap).....	62
Tabela 5 - Dias utilizados nos experimentos .....	69
Tabela 6 - Valores médios mensais de VTEC para o Brasil e percentual de redução do VTEC em 2006 com relação a 2001/2002 .....	86
Tabela 7 - Média mensal do EMQ e redução média mensal do EMQ em 2006 – Posicionamento por ponto .....	98
Tabela 8 - EMQ (Janeiro 2002 e 2006) e redução percentual do EMQ em 2006 – Posicionamento relativo.....	109
Tabela 9 - EMQ (Julho 2002 e 2006) e redução percentual do EMQ em 2006 – Posicionamento relativo.....	110
Tabela 10 - EMQ (Outubro 2001 e 2006) e redução percentual do EMQ em 2006 – Posicionamento relativo.....	110
Tabela 11 - Explosões solares Outubro/Novembro 2003.....	126
Tabela 12 - CME's Halo - Outubro/Novembro 2003 .....	126
Tabela 13 - Linhas de base e estações RBMC envolvidas no experimento .....	130
Tabela 14 - Atividade geomagnética nos dias envolvidos no experimento .....	132
Tabela 15 - Discrepâncias em Planimetria e Altitude Geométrica e percentual de aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro – Estação CRAT (linha de base FORT-CRAT) .....	138

Tabela 16 - Discrepâncias em Planimetria e Altitude Geométrica e percentual de aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro – Estação SMAR (linha de base POAL-SMAR)..... 139

Tabela 17 - Discrepâncias em Planimetria e Altitude Geométrica e percentual de aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro – Estação PARA (linha de base UEPP-PARA) ..... 139

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 OBJETIVOS .....	19
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	21
2.1 A ATMOSFERA TERRESTRE .....	21
2.2 A IONOSFERA .....	25
2.2.1 Perfil vertical da ionosfera.....	27
2.2.2 Regiões geográficas da ionosfera .....	30
2.2.2.1 Região de altas latitudes .....	31
2.2.2.2 Região de médias latitudes .....	32
2.2.2.3 Região equatorial .....	32
2.2.2.3.1 Cintilação ionosférica .....	33
2.2.2.3.2 Anomalia Equatorial (AE).....	35
2.2.2.3.3 Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).....	40
2.3 O TEC E SUAS VARIAÇÕES .....	42
2.3.1 Variações regulares.....	45
2.3.1.1 Variações diurnas.....	45
2.3.1.2 Variações sazonais .....	47
2.3.1.3 Variações com o ciclo de atividade solar.....	49
2.3.2 Variações abruptas.....	52
2.3.2.1 Explosões solares (Solar flares) .....	53
2.3.2.2 Ejeções Coronais de Massa (Coronal Mass Ejections) .....	55
2.3.2.3 Tempestades geomagnéticas (Geomagnetic storms).....	57

2.3.2.3.1 <i>Índice Dst</i> .....	58
2.3.2.3.2 <i>Índice Kp e Ap</i> .....	61
2.4 ERRO DEVIDO À IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS .....	62
2.4.1 Modelos para correção do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS.....	66
<b>3 COMPORTAMENTO DO TEC E DO POSICIONAMENTO COM GPS EM PERÍODOS DE ALTA E BAIXA ATIVIDADE SOLAR NA REGIÃO BRASILEIRA</b> .....	68
3.1 EXPERIMENTO: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TEC NA REGIÃO BRASILEIRA.....	70
3.1.1 Tratamento dos dados, resultados e análises .....	72
3.2 EXPERIMENTO: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO POR PONTO.....	95
3.2.1 Tratamento dos dados, resultados e análises .....	96
3.3 EXPERIMENTO: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO RELATIVO.....	105
3.3.1 Tratamento dos dados, resultados e análises .....	107
3.4 CONCLUSÕES .....	117
<b>4 EFEITOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO POSICIONAMENTO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA: Estudo de caso</b> .....	125
4.1 TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 29 DE OUTUBRO DE 2003 .....	128
4.2 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES.....	130
4.3 CONCLUSÕES .....	150
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	153
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	158

## 1 INTRODUÇÃO

A ionosfera, região da atmosfera terrestre caracterizada pela formação de íons e elétrons livres e localizada aproximadamente entre 50 e 1.000 km de altura (KIRCHHOFF, 1991), é a principal fonte de erro sistemático das observáveis GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global). Por ser um meio dispersivo, ela afeta a propagação de ondas eletromagnéticas, fazendo com que a modulação e a fase das ondas portadoras (portadora L1 e L2) transmitidas pelos satélites GPS na banda L do espectro eletromagnético sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995), o que, por sua vez, provoca um erro na distância entre o satélite e o receptor medida por este último. De acordo com Leick (1995), esse erro é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal e diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, à densidade ou número de elétrons presentes na ionosfera ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora.

O estudo de parâmetros ionosféricos, como o TEC, é tradicionalmente realizado através de equipamentos como a ionossonda/digissonda, o radar de espalhamento incoerente, entre outros (KIRCHHOFF, 1991). A tecnologia GPS, no entanto, tem sido utilizada nos últimos anos como uma maneira alternativa de estudar a ionosfera, pois, aliando a propriedade dispersiva da ionosfera aos sinais GPS transmitidos em duas frequências distintas, é possível determinar a integral da densidade de elétrons, ou seja, o parâmetro TEC. Ainda aproveitando a dependência do erro devido à ionosfera em relação à frequência do sinal, torna-se possível, utilizando receptores GPS de dupla frequência, eliminar quase que por completo os efeitos de primeira ordem da ionosfera no posicionamento com GPS, por meio de uma combinação

linear (*ion-free*) das observáveis obtidas simultaneamente em ambas as portadoras (MONICO, 2000).

Nesse sentido, a implantação de redes GPS ativas – Sistemas de Controle Ativos (SCA) – equipadas com receptores de dupla frequência, permite a produção de mapas de TEC em escala local, regional e global, bem como a produção de modelos visando a correção do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS para usuários de receptores de uma frequência. O IGS (*International GNSS Service*) é um dos órgãos que produz e disponibiliza, com acesso livre, Mapas Globais da Ionosfera (*Global Ionospheric Maps – GIM*), fornecendo valores de TEC, em arquivos no formato IONEX, modelados a partir de dados de uma rede de receptores de dupla frequência, permitindo o estudo do TEC e a correção das observáveis GPS, no que diz respeito ao erro devido à ionosfera. No Brasil, o estudo do TEC e do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS pode ser realizado utilizando os dados de receptores GPS de dupla frequência pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) que, atualmente, possui 55 estações (IBGE, 2008) espalhadas ao longo do território, coletando dados GPS continuamente. Mapas de TEC para a região brasileira, utilizando dados da RBMC, foram produzidos e apresentados por Fonseca Junior (2002) e, mais recentemente, integrando dados de estações da RBMC e estações do IGS dentro da América Latina, por Matsuoka (2007).

Cabe ressaltar, contudo, que, no posicionamento com receptores de uma frequência (ainda amplamente empregados no Brasil), o erro devido à ionosfera não pode ser eliminado, fazendo com que os resultados fiquem altamente sujeitos ao comportamento da ionosfera. Visando minimizar este problema, são utilizados modelos da ionosfera, como o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987), cujos coeficientes são transmitidos nas efemérides transmitidas do GPS. Esse modelo, no entanto, é mais adequado para ser aplicado em condições regulares de ionosfera, não sendo esse o caso do Brasil que, por suas dimensões

continentais (compreendendo a região equatorial e de baixas latitudes), é uma região especial, em termos de influência da ionosfera, sendo afetado pela presença da Anomalia Equatorial (AE), pela proximidade com a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e até mesmo pela ocorrência de irregularidades, como a cintilação ionosférica e a presença de bolhas ionosféricas.

É preciso considerar também que a densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, sofre alterações em função da radiação solar, da localização geográfica, do campo geomagnético da Terra, entre outras. O comportamento dessas variações pode ser verificado regularmente ao longo do dia (variações diurnas), ao longo das estações do ano (variações sazonais) e também ao longo de ciclos de aproximadamente onze anos, associados à ocorrência de manchas solares e ao aumento e diminuição da emissão de radiação solar. Se essas variações regulares do TEC já exercem influência sobre os resultados do posicionamento com GPS, eventos como explosões solares (*solar flares*), ejeções coronais de massa (CME – *Coronal Mass Ejection*) e tempestades geomagnéticas, entre outros, podem causar abruptas e significativas mudanças no estado da ionosfera, alterando drasticamente os valores de TEC e exercendo grande influência nos resultados do posicionamento com GPS, principalmente com receptores de uma frequência.

Por essa razão, o entendimento do comportamento da ionosfera através do estudo do TEC é um fator muito importante, principalmente no Brasil. Nessa direção, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de verificar o comportamento das variações do TEC, bem como sua relação com o erro no posicionamento com GPS na região brasileira. Dentre esses estudos, é possível citar: experimentos realizados por Matsuoka e Camargo (2004), Dal Poz (2005) e Matsuoka (2007), que analisaram o comportamento sazonal do TEC na região brasileira, verificando que maiores valores de TEC são encontrados nos meses próximos aos equinócios e menores valores nos meses próximos aos solstícios

(principalmente solstício de inverno); experimentos realizados por Matsuoka, Camargo e Dal Poz (2004), verificando a melhora da performance do posicionamento por ponto com GPS com o início do declínio da atividade solar, ou seja, com a diminuição do número de manchas solares; experimentos realizados por Matsuoka, Camargo e Batista (2006), verificando o grande impacto de uma intensa explosão solar no comportamento do TEC e no posicionamento por ponto com GPS na região brasileira; e um estudo preliminar realizado por Dal Poz, Camargo e Aguiar (2008), verificando a melhora no desempenho do posicionamento relativo com GPS em períodos de baixa atividade solar.

Esta pesquisa pretende colaborar com o entendimento da relação entre ionosfera e posicionamento com GPS, aprofundando o estudo do comportamento do TEC e do impacto da ionosfera no posicionamento com GPS (por ponto e relativo) em períodos de alta e baixa atividade solar na região brasileira, utilizando o Mapa Global da Ionosfera do IGS (arquivos IONEX) e os dados GPS de estações da RBMC, todos disponibilizados de forma gratuita na internet.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivos principais:

- Avaliar e comparar o comportamento diário e sazonal do TEC na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar, utilizando os dados do Mapa Global da Ionosfera do IGS (arquivos IONEX);

- Verificar e comparar a influência da ionosfera, em períodos de alta e baixa atividade solar, no posicionamento por ponto e no posicionamento relativo na região brasileira;
- Avaliar a influência de severas tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo com GPS na região brasileira.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O conteúdo desta pesquisa está dividido em cinco capítulos, constando no primeiro capítulo a introdução e os objetivos que guiaram o desenvolvimento deste trabalho. No segundo capítulo são introduzidos alguns conceitos importantes sobre a atmosfera e a ionosfera terrestre, bem como sua relação e influência no posicionamento com GPS – com ênfase na região brasileira –, de maneira a fornecer a fundamentação teórica para o desenvolvimento e análise dos experimentos nos capítulos posteriores. No terceiro e quarto capítulos são apresentados os experimentos, seus resultados e análises, seguindo estrutura semelhante a de artigos científicos. O terceiro capítulo apresenta três experimentos, que têm por objetivo avaliar o comportamento do TEC e do posicionamento com GPS em períodos de alta e baixa atividade solar. O quarto capítulo aborda o efeito de severas tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo com GPS na região brasileira. No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Considerando que a temática desta pesquisa envolve assuntos não tradicionais da área da Geodésia, neste capítulo são introduzidos alguns conceitos importantes sobre a atmosfera e a ionosfera terrestre, bem como sua relação e influência no posicionamento com GPS – com ênfase na região brasileira –, de maneira a fornecer a fundamentação teórica para o desenvolvimento e análise dos experimentos nos capítulos posteriores.

### **2.1 A 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 (MATSUOKA, 2007).

A atmosfera pode ser dividida em várias camadas em função dos diversos elementos com os quais sua estrutura está relacionada. No contexto desta pesquisa, a divisão em função da propagação de ondas eletromagnéticas será adotada. Nestes termos, a atmosfera pode ser dividida em atmosfera neutra (Troposfera) e ionizada (Ionosfera e Plasmasfera).

A camada mais baixa da atmosfera terrestre, que inicia na superfície da Terra e se estende até 50 km de altura aproximadamente, recebe o nome de Troposfera. A troposfera constitui a zona neutra da atmosfera e a propagação de ondas eletromagnéticas nesta região depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura da camada atmosférica (SAPUCCI, 2001). Outra característica dessa camada é que a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma esteja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995). Dessa forma, os sinais GPS, que são emitidos nas frequências 1575,42 MHz (portadora L1) e 1227,60 MHz (portadora L2), são propagados de forma não dispersiva na troposfera.

A ionosfera é caracterizada como a região onde a densidade dos íons e elétrons livres é suficientemente elevada para afetar a propagação de ondas eletromagnéticas (KIRCHHOFF, 1991). Ao contrário da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, a propagação das ondas eletromagnéticas na ionosfera depende da sua frequência. Os limites da ionosfera estão localizados entre 50 e 1.000 km de altura, aproximadamente, embora sua fronteira superior não seja bem definida, podendo ser interpretada com uma zona de transição com a plasmasfera (MATSUOKA, 2003). Por ser nessa região da atmosfera terrestre que as ondas eletromagnéticas enviadas pelos satélites GPS são mais afetadas pela densidade de elétrons, maiores detalhes sobre a ionosfera e suas características serão abordados na próxima seção desse capítulo.

A plasmasfera, constituída de plasma (íons de hidrogênio e elétrons livres) pode ser conceituada como a região de altura superior a 1.000 km onde a densidade atmosférica neutra é muito pequena e os íons positivos são predominantemente prótons. Segundo Fedrizzi (2003), o comportamento da densidade de elétrons livres na plasmasfera é consideravelmente afetado pelo ciclo solar e pela variação sazonal. O conteúdo de elétrons plasmasférico pode variar entre 10% do valor do conteúdo de elétrons ionosférico existente durante o dia até

aproximadamente 50% durante o período noturno (KLOBUCHAR, 1996), dependendo da época do ano e do nível de atividade solar (DAVIES, 1966). Na altura de aproximadamente 30.000 km a plasmasfera diminui, formando a plasmapausa, que vem a ser a fronteira entre a plasmasfera e a magnetosfera (DAVIES, 1966).

A magnetosfera, por sua vez, é a região onde o campo magnético terrestre controla o transporte de íons e elétrons (KIRCHHOFF, 1991). O vento solar, que se choca com a magnetosfera a uma velocidade padrão de 400 km/s, provoca o aparecimento de uma onda ou frente de choque na região exposta ao sol. Separando o campo magnético interplanetário do campo geomagnético existe uma região conhecida como magnetopausa, onde a maioria das partículas do vento solar são deflexionadas. A magnetosfera está contida na cavidade formada pela magnetopausa, conforme pode ser verificado na Figura 1. A forma das linhas de fluxo magnético dentro da magnetosfera é tal que estas são comprimidas em frente ao Sol (aproximadamente 10 raios terrestres), pela ação do vento solar, e alongadas do lado oposto (aproximadamente 60 raios terrestres), formando uma região conhecida como cauda magnética (KIRCHHOFF, 1991).

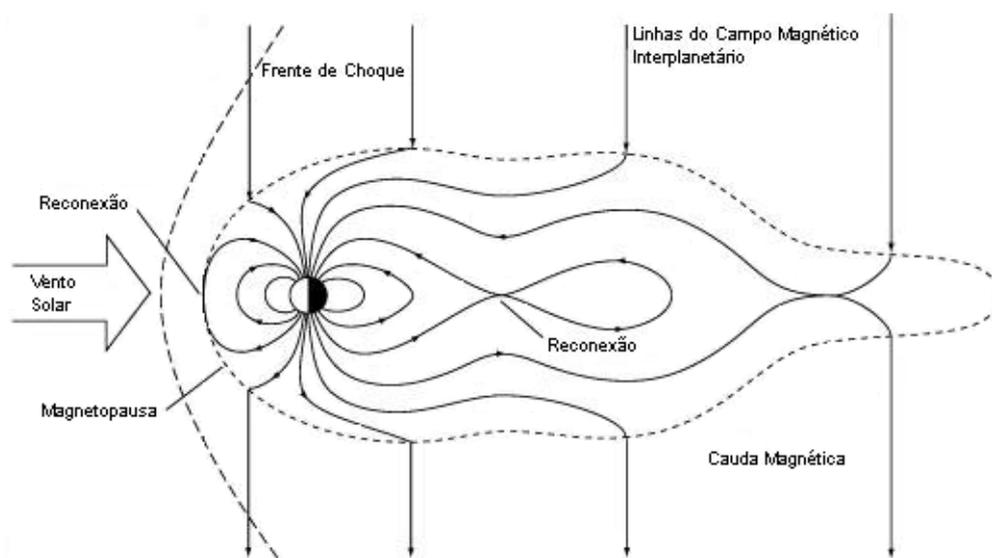


Figura 1 - Magnetosfera terrestre

Fonte: Adaptada de <http://geomag.usgs.gov/intro.php> (Acesso em Abril, 2008)

Na ionosfera e na magnetosfera, o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resulta em modificações nas condições de transporte do meio ionizado (KIRCHHOFF, 1991). Eventos solares, que causam a intensificação do vento solar, fazendo com que as linhas do campo geomagnético sofram drásticas modificações, exercem grande influência na ionosfera terrestre, causando as tempestades geomagnéticas e, por consequência, as tempestades ionosféricas (MATSUOKA, 2007).

Próximo à superfície da Terra, o campo geomagnético pode ser aproximado a um dipolo (Figura 2) não coincidente com o eixo de rotação da Terra (FONSECA JUNIOR, 2002). Como o eixo do dipolo geomagnético não coincide com o eixo de rotação terrestre, não há coincidência do equador geográfico com o magnético. De acordo com Goodman (2005), o eixo geomagnético é inclinado  $11,5^\circ$  em relação ao eixo de rotação da Terra. O campo geomagnético tem dois pólos 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 (USGS, 2007).

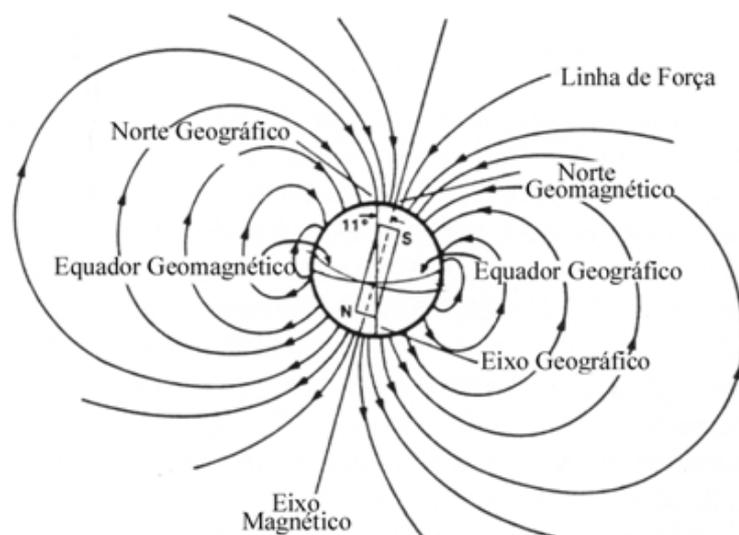


Figura 2 - Modelo teórico do campo magnético da Terra

Fonte: Adaptada de McNAMARA, 1991

O Brasil, pela sua extensão, abrange desde regiões próximas ao equador geomagnético até regiões de baixas latitudes. A Figura 3 apresenta a variação da posição do equador geomagnético entre os anos de 1957 e 2000 para a região brasileira.

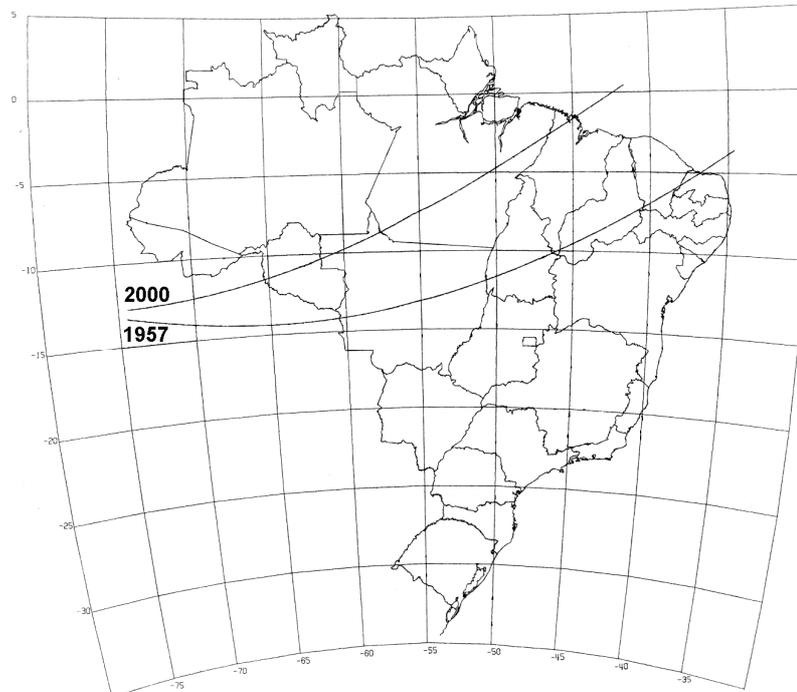


Figura 3 - Posição do equador magnético em 1957 e em 2000

Fonte: Adaptada de <http://astro.if.ufrgs.br/eqmags.gif> (Acesso em Abril, 2008)

## 2.2 A IONOSFERA

A ionosfera é formada principalmente pela ação da radiação solar eletromagnética na atmosfera terrestre e, em menor escala, pela ação da radiação cósmica que, embora exercendo um papel secundário, é importante na manutenção da ionosfera noturna (KIRCHHOFF, 1991).

A radiação solar, principalmente nos intervalos do extremo ultravioleta (EUV) e do raio-X, ao incidir sobre a atmosfera neutra da Terra produz uma grande quantidade de íons positivos e elétrons livres, em um processo denominado Fotoionização. Quando a energia dos fótons incidentes sobre o elemento neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização, ocorre a perda de elétrons desse elemento, tornando-o um íon positivo e dando origem a elétrons livres (RODRIGUES, 2003). Esse processo pode ser melhor compreendido através da Figura 4, que ilustra a fotoionização de um átomo de Oxigênio.



Figura 4 - Processo de fotoionização  
 Fonte: Adaptada de BUGOSLAVSKAYA, 1962 *apud* EL GIZAWY, 2003

A Fotoionização é um dos principais processos produtores de íons e elétrons livres na ionosfera, mas a ionização também pode ser produzida por colisão com partículas energéticas carregadas (ionização secundária ou corpuscular), de origem solar ou galáctica, que penetram na atmosfera, mais facilmente em regiões de altas latitudes e em regiões de anomalia geomagnética (RODRIGUES, 2003).

Em função da densidade de elétrons e do seu comportamento, a ionosfera pode ser dividida em diferentes camadas, delimitadas verticalmente. No entanto, como a estrutura global da ionosfera não é homogênea, ela também pode ser dividida em regiões geográficas (em função da latitude) que apresentam comportamentos semelhantes.

### 2.2.1 Perfil vertical da ionosfera

À medida que a radiação eletromagnética penetra na atmosfera mais densa, a produção de elétrons livres, através do processo de Fotoionização, 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. Dessa forma, devido às diferentes taxas de absorção e aos diferentes constituintes atmosféricos, distintas regiões são formadas na ionosfera, as quais são denominadas de camadas D, E e F, sendo essa última subdividida em F1 e F2 (FEDRIZZI, 1999).

Como a ionosfera é formada principalmente pela ação da radiação solar, seu comportamento é distinto durante o período noturno e diurno, conforme pode ser visto na Figura 5. Assim como o processo de Fotoionização aumenta a densidade de elétrons durante o dia, durante a noite o processo de Recombinação – elétrons livres se combinam com íons positivos produzindo átomos neutros – pode fazer com que algumas camadas diminuam muito sua densidade de elétrons e até mesmo desapareçam (VERONEZ, 2004).

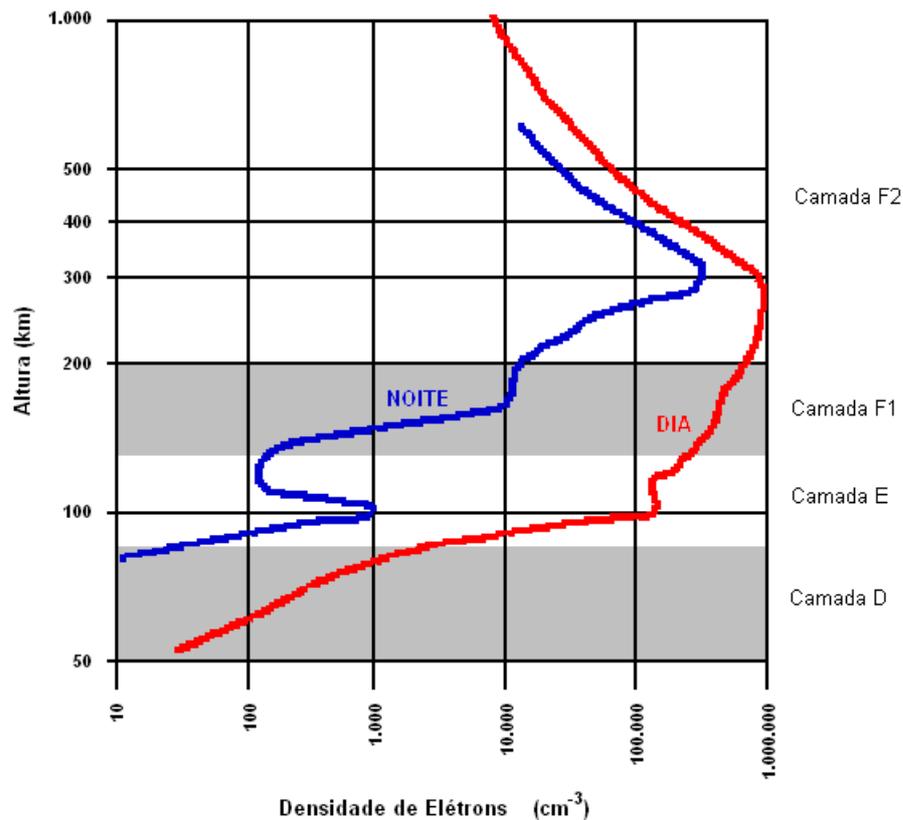


Figura 5 - Perfil da densidade de elétrons dia/noite  
 Fonte: Adaptada de EL GIZAWY, 2003

A camada D, também denominada de baixa ionosfera, situa-se na parte inferior da ionosfera, entre as alturas de 50 e 85 km, aproximadamente, apresentando uma concentração máxima de elétrons por volta de 80 km de altura (DAVIES, 1966). As radiações ionizantes mais importantes são raios-X (comprimento de onda menor do que 10 Å), que ionizam oxigênio e nitrogênio em torno de 80 km; a radiação solar Lyman- $\alpha$  (1216 Å), que ioniza o óxido nítrico; e os raios cósmicos, que ionizam principalmente as regiões inferiores da camada D. Santana (2001) enfatiza que a camada D é a que possui menor densidade de elétrons entre todas as camadas ionosféricas, podendo muitas vezes deixar de existir à noite, por causa dos processos de Recombinação (EL GIZAWY, 2003) que, nessa camada, ocorrem mais facilmente devido à maior densidade dos átomos (a densidade dos gases aumenta quando a altitude diminui). Segundo Davies (1966), essa camada representa um papel muito

importante na propagação de ondas, atuando como refletora dos sinais de baixa frequência (LF) e de frequência muito baixa (VLF).

A camada E, situada entre aproximadamente 85 e 140 km de altura, é uma região de máxima condutividade elétrica ionosférica, sendo importante devido à presença das correntes elétricas ionosféricas e à interação destas correntes elétricas com o campo geomagnético. Segundo Fonseca Junior (2002), o comportamento da camada E é praticamente dependente do nível de atividade e do ângulo zenital do Sol. Embora não desapareça completamente à noite, para efeitos práticos, geralmente se assume que a densidade de elétrons cai à zero no período noturno (KOMJATHY, 1997). Maior densidade de elétrons nesta camada pode ser encontrada em horários próximos ao meio dia local e em períodos com maior ocorrência de manchas solares (FEDRIZZI, 2003).

A camada F, situada entre 140 e 1.000 km, é dividida em F1, tipicamente diurna, e F2. A camada F1 está localizada do limite inferior da camada F até aproximadamente 200 km de altura. De acordo com Santana (2001), esta camada é caracterizada por um pequeno pico secundário ou uma pequena inflexão na curva da densidade de elétrons em torno de 180 km, desaparecendo durante a noite, pois a densidade de elétrons é controlada primariamente pelo ângulo zenital do Sol. Segundo Davies (1966), a densidade de elétrons na camada F1 é mais pronunciada no verão, nas épocas de maior número de manchas solares e durante a ocorrência de perturbações ionosféricas. A camada F2, localizada logo acima da camada F1, apresenta um pico de densidade de elétrons entre 300 e 450 km, devido à competição entre processos químicos e transporte de plasma (FEDRIZZI, 2003). A camada F2 é dominada por processos dinâmicos, havendo grande interação com os ventos termosféricos, que são o resultado dos gradientes de pressão horizontal criados pelo aquecimento solar diurno. Além disso, a presença do campo magnético também exerce grande influência na distribuição de sua ionização, tornando a variação temporal e espacial desta camada bastante complexa. A

densidade de elétrons tende a atingir um valor máximo logo após o pôr-do-sol, devido a processos de transporte de plasma (RICH, 1985 *apud* FEDRIZZI, 2003), e a camada F2 pode persistir por toda a noite, embora sua intensidade diminua continuamente, pois a atmosfera neutra nesta região é suficientemente tênue para evitar que haja uma recombinação significativa (BEARD, 1975 *apud* FEDRIZZI, 2003). Valores mínimos de densidade de elétrons ocorrem pouco antes do amanhecer (McNAMARA, 1991) e aumentam gradativamente durante o decorrer do dia.

### 2.2.2 Regiões geográficas da ionosfera

Como a estrutura global da ionosfera não é homogênea, ela também pode ser dividida, em função da latitude, em três grandes regiões geográficas: altas latitudes, médias latitudes e região equatorial, cujas localizações aproximadas são apresentadas na Figura 6.

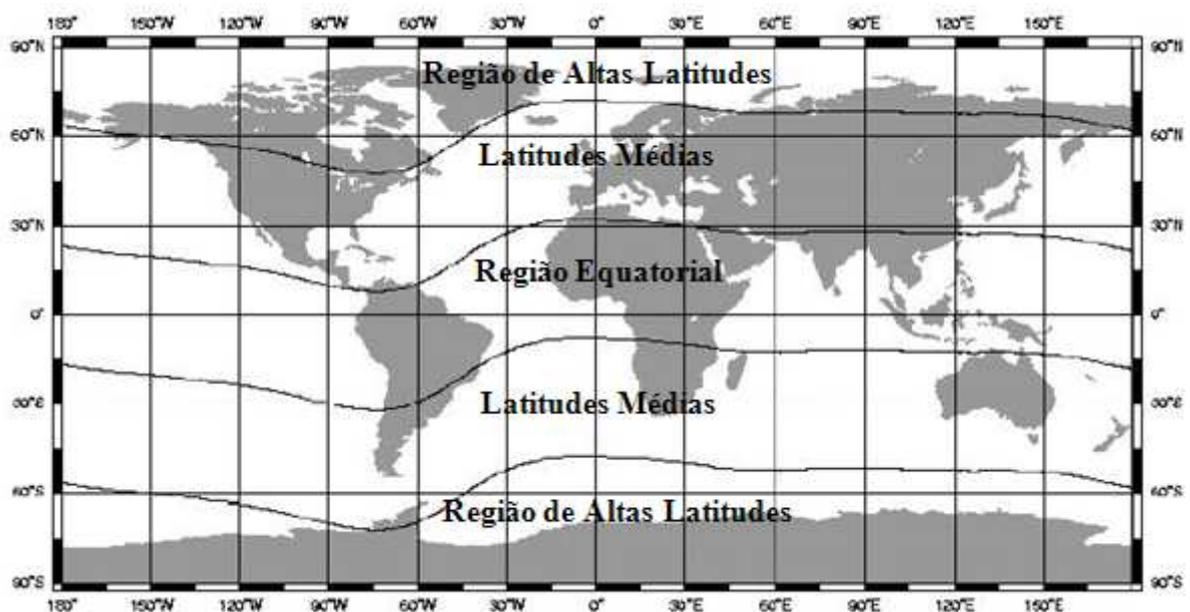


Figura 6 - Regiões geográficas da ionosfera  
Fonte: FONSECA JUNIOR, 2002

### 2.2.2.1 Região de altas latitudes

A região de altas latitudes é subdividida em capa polar, auroral e região sub-auroral (EL GIZAWY, 2003), e é uma região extremamente instável (McNAMARA, 1991). Uma das causas deste comportamento altamente perturbado é que, nessa região de altas latitudes, as linhas do campo geomagnético são abertas e quase perpendiculares à superfície da Terra, o que faz com que haja uma conexão com o exterior da magnetosfera atingida pelo vento solar.

A região capa polar está localizada acima das latitudes geomagnéticas de 75°. Nessa região, as linhas do campo geomagnético são abertas, permitindo que o fluxo de plasma proveniente do vento solar penetre diretamente, resultando em grandes regiões (5 a 1.000 km) com aumento de densidade de elétrons (HARGREAVES, 1992 *apud* EL GIZAWY, 2003) concentrado na camada F da ionosfera, entre 250 e 400 km (EL GIZAWY, 2003).

A região auroral está situada entre as latitudes geomagnéticas de 60° e 75°, no lado noturno, e é também conhecida como oval auroral. Nessa região, durante períodos geomagneticamente perturbados, acontecem os fenômenos conhecidos como auroras (boreal, no hemisfério norte, e austral, no hemisfério sul) ou Luzes do Norte (*Northern Lights*), no hemisfério norte. Conforme Langley (2000), esses fenômenos são causados pela interação entre as partículas de alta energia, principalmente elétrons, que colidem com os átomos neutros da alta atmosfera da Terra. Ao colidirem, essas partículas de alta energia podem excitar os elétrons de valência dos átomos neutros; essa energia, então, é liberada através da emissão de fótons, isto é, luz. A cor verde é resultado da colisão com um átomo de oxigênio, e a cor vermelha resultado da colisão com um átomo de oxigênio ou nitrogênio (LANGLEY, 2000).

A região sub-auroral está localizada a alguns graus (em direção ao equador geomagnético) da região auroral. A densidade de elétrons nesta região é bem menor do que na região auroral, o que resulta em altos gradientes de densidade de elétrons na divisa entre a região auroral e região sub-auroral (EL GIZAWY, 2003).

#### 2.2.2.2 Região de médias latitudes

A região de médias latitudes, situada entre aproximadamente 30° e 50° a partir do equador geomagnético, é a menos perturbada das regiões geográficas da ionosfera, aproximando-se dos modelos ionosféricos clássicos (EL GIZAWY, 2003).

No entanto, severas tempestades geomagnéticas podem implicar em irregularidades na densidade de elétrons também nessa região, causando grandes impactos nos sinais GPS (FOSTER *et al.*, 2001 *apud* MATSUOKA, 2007).

#### 2.2.2.3 Região equatorial

A região equatorial está situada entre o equador geomagnético e  $\pm 30^\circ$ . No entanto, essa região pode ser ainda subdividida entre região equatorial propriamente dita, situada entre o equador e  $\pm 5^\circ$ , e região de baixas latitudes, entre  $\pm 5^\circ$  e  $\pm 30^\circ$  (MATSUOKA, 2007).

Na região equatorial ocorrem dois fenômenos importantes que afetam a propagação do sinal GPS: as irregularidades ionosféricas, que produzem a Cintilação

Ionosférica e causam interferências a ponto de provocar a perda do sinal GPS, e a Anomalia Equatorial (AE) ou Anomalia de Appleton, que provoca variações espaciais do TEC. Na região brasileira, além da ocorrência desses fenômenos, também há a proximidade com a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), que será brevemente apresentada.

#### *2.2.2.3.1 Cintilação ionosférica*

De acordo com El Gizawy (2003), cintilações ionosféricas são rápidas flutuações na fase e/ou na amplitude de um sinal GPS, causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do trajeto do sinal na ionosfera. Normalmente, essas irregularidades estão localizadas entre 200 e 600 km de altitude (DAVIES, 1966), ou seja, na camada F da ionosfera (Figura 7). Essas flutuações causam um enfraquecimento e variações da fase do sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra, em muitos casos, a perda do sinal (WEBSTER, 1993).

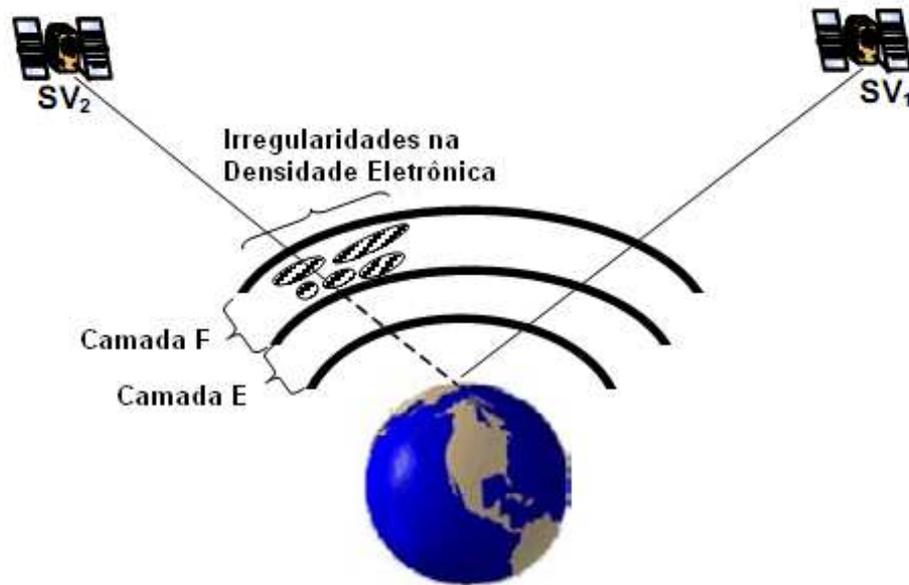


Figura 7 - Cintilação ionosférica  
 Fonte: Adaptada de EL GIZAWY, 2003

Períodos de cintilação estão associados, geralmente, com a existência de pequenas regiões de irregularidades na densidade de elétrons da camada F da ionosfera (EL GIZAWY, 2003), mas também podem estar associados a grandes regiões – conhecidas como Bolhas Ionosféricas – onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida (SANTANA, 2001), causando um aumento da ocorrência de cintilações ionosféricas.

As bolhas ionosféricas se desenvolvem na região do equador geomagnético e estendem-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético por extensões de até  $\cong 10.000$  km e, na direção perpendicular, por extensões em torno de 100 a 300 km, aproximadamente (SANTANA, 2001). Ocorrem geralmente durante a noite, entre 20 HL (Hora Local) e meia-noite; no entanto, durante algumas épocas do ano, podem ocorrer durante toda a noite até o amanhecer. As bolhas ionosféricas são mais fortes, em termos de grau de diminuição da densidade do plasma, durante períodos de alta atividade solar (SANTANA, 2001), quando os campos elétricos se tornam mais intensos, estabelecendo condições mais

favoráveis à geração de irregularidades. Na região brasileira, a ocorrência de bolhas ionosféricas é maior nos meses de primavera e verão (com máxima ocorrência entre os meses de novembro a janeiro) e menor nos meses de inverno (SAHAI *et al.*, 1994 *apud* SANTANA, 2001).

De acordo com Skone (2000), os efeitos da cintilação ionosférica são mais intensos na região equatorial e de baixas latitudes, nas latitudes geomagnéticas entre  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 20^\circ$ , e na região de altas latitudes: auroral e capa polar. No entanto, Skone (2000) enfatiza que as cintilações ocorrem por motivos diferentes nessas duas regiões: nas regiões de altas latitudes são causadas por tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas; na região equatorial e de baixas latitudes, a cintilação está associada com o fenômeno da Anomalia Equatorial e é observada com maior intensidade nos locais de pico da anomalia (SKONE, KNUDSEN e JONG, 2001), onde produz um maior impacto na performance do posicionamento com receptores GPS, em relação às regiões de altas latitudes.

#### 2.2.2.3.2 Anomalia Equatorial (AE)

A anomalia equatorial se caracteriza por uma variação latitudinal de densidade de elétrons na região equatorial da ionosfera como resultado de um processo conhecido como Efeito Fonte.

O Efeito Fonte consiste no movimento de elevação do plasma na região do equador geomagnético e posterior descida ao longo das linhas do campo geomagnético até as baixas latitudes (RODRIGUES, 2003). De acordo com Batista (2003 *apud* MATSUOKA, 2007), essa elevação do plasma ocorre quando os campos elétricos do dínamo atmosférico,

que são gerados na camada E da ionosfera, são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a camada F, devido à alta condutividade paralela. Durante o dia, o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) é direcionado para leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético ( $\vec{B}$ ), que é dirigido para o norte, causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por  $\vec{E} \times \vec{B} / B^2$ . 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, devido à ação da gravidade ( $g$ ) e ao gradiente de pressão ( $\nabla p$ ), gerando um pico de densidade de elétrons nas latitudes geomagnéticas entre  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 20^\circ$ . À noite, o campo elétrico é direcionado para oeste e, conseqüentemente, a deriva se inverte para baixo (negativa), cessando o efeito fonte. No entanto, 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 na camada F, provocando assim uma intensificação do efeito fonte, conhecido como pico pré-inversão, e gerando um segundo pico de densidade de elétrons nas regiões de baixas latitudes.

Uma representação esquemática das forças que originam o Efeito Fonte é apresentada na Figura 8.

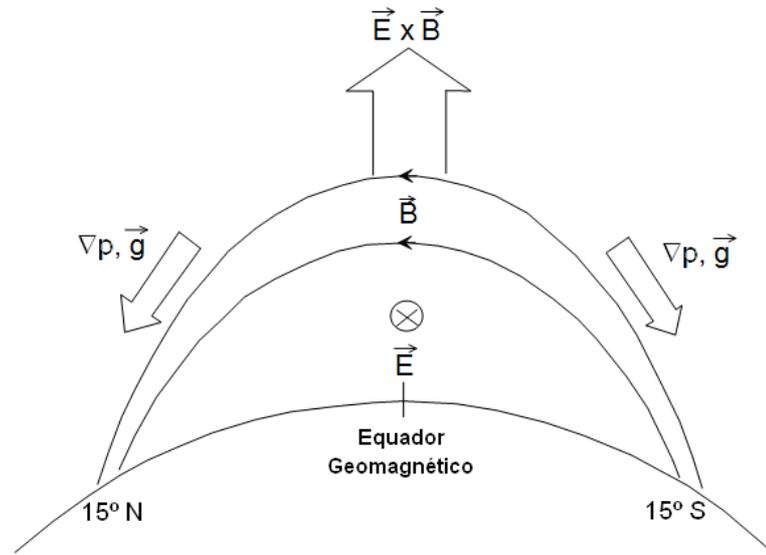


Figura 8 - Efeito Fonte: esquema das forças agindo no plasma  
 Fonte: Adaptada de RODRIGUES, 2003

Como consequência direta do Efeito Fonte tem-se um aumento da densidade de elétrons nas regiões de descida do plasma (entre  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 20^\circ$  de latitude geomagnética) e uma diminuição da densidade de elétrons na região do Equador Geomagnético (BATISTA, 2003 *apud* MATSUOKA, 2007), resultando em gradientes de densidade de elétrons na direção Norte-Sul e caracterizando assim a Anomalia Equatorial. Segundo Fedrizzi (2003), os valores máximos de densidade de elétrons ocorrem nas latitudes de  $\pm 15^\circ$  a partir do equador geomagnético, correspondendo às regiões de crista da anomalia equatorial. Importante salientar que, 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 *apud* MATSUOKA, 2007).

A anomalia equatorial varia durante o dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta de 14 HL, e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia-noite, normalmente próximo de 21 HL. De acordo com Matsuoka (2007), a variação latitudinal da densidade de elétrons no período da tarde é

menor, pois, embora o efeito fonte desloque elétrons das regiões próximas ao equador para as regiões das cristas da anomalia equatorial, elétrons livres continuam sendo produzidos na região equatorial pelo processo de fotoionização, devido à presença da radiação solar. Já no segundo pico da anomalia equatorial, formado pelo pico pré-inversão nas horas próximas ao pôr-do-sol, a variação latitudinal da densidade de elétrons é bem mais destacada, pois o efeito fonte desloca os elétrons da região do equador para as cristas da anomalia, mas, com o pôr-do-sol, não há mais o processo de fotoionização, ou seja, baixos valores de densidade de elétrons são encontrados na região do equador geomagnético e altos valores na região das cristas da anomalia.

Segundo Batista (2003 *apud* MATSUOKA, 2007), esse segundo máximo geralmente não ocorre em períodos de baixa atividade solar, pois o pico pré-inversão é fortemente dependente da atividade solar. Estudos realizados por Fejer *et al.* (1979) com medidas realizadas em Jicamarca, no Peru, demonstram que, durante períodos de atividade solar alta, o pico pré-inversão ocorre em todas as estações do ano, sendo maior nos equinócios e menor no solstício de inverno. Já, durante períodos de baixa atividade solar, o pico pré-inversão só ocorre nos equinócios, com amplitude menor do que durante a alta atividade solar. Estudos realizados na região brasileira (BATISTA *et al.*, 1996) mostram que o pico pré-inversão é um pouco maior nos meses próximos ao solstício de verão do que nos equinócios, e menor nos meses próximos ao solstício de inverno.

A Figura 9 apresenta uma seqüência de mapas globais de TEC produzidos para o dia 8 de Outubro de 2001, com resolução de 2 UT (*Universal Time* – Tempo Universal). Nos mapas é possível observar, em vermelho, as cristas da Anomalia Equatorial, onde há um maior número de elétrons; e, entre as cristas, a região do Equador Geomagnético, com menor densidade de elétrons.

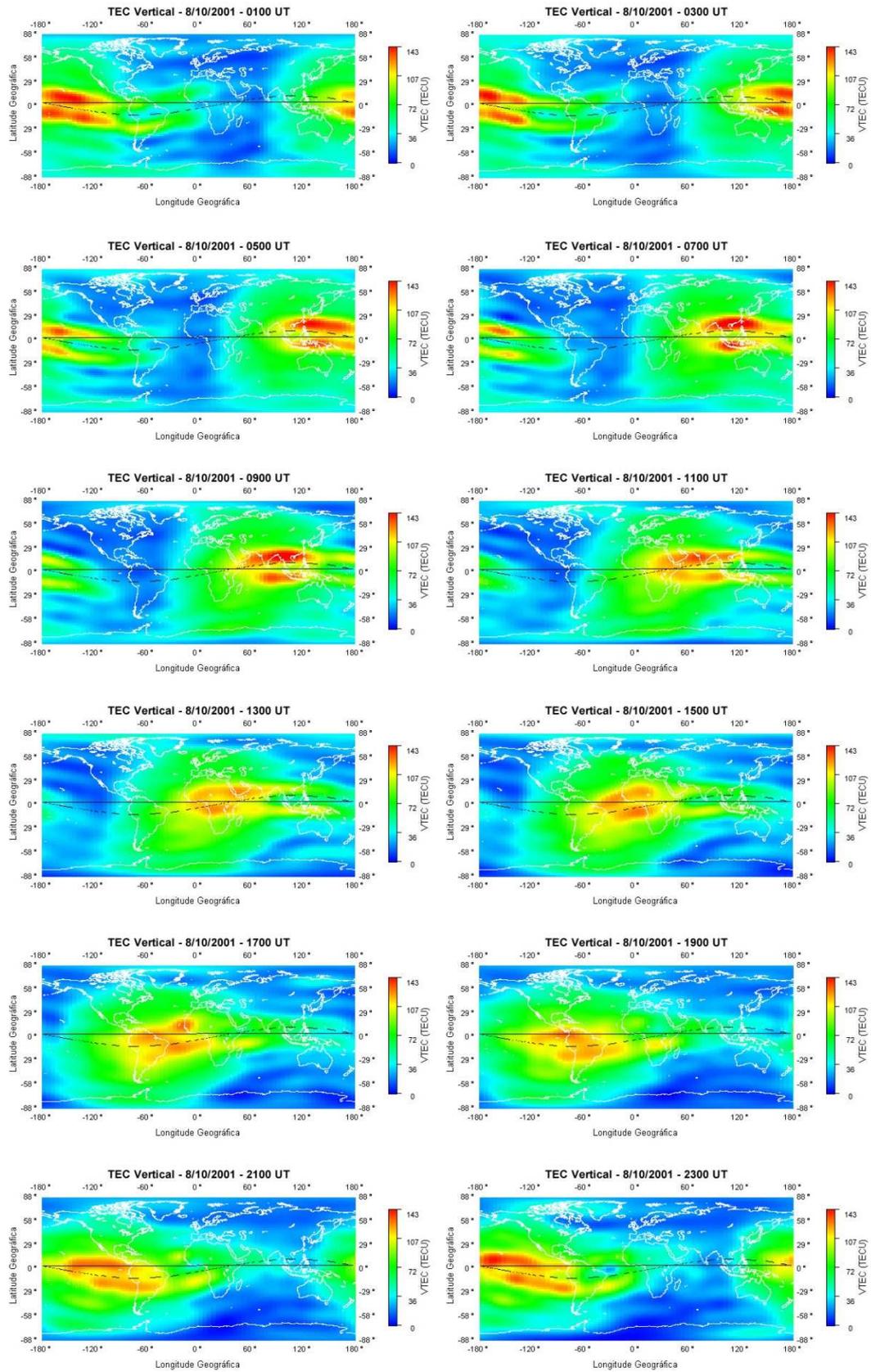


Figura 9 - Mapas globais do TEC para 08/10/2001 - Anomalia Equatorial  
 Fonte: Arquivos IONEX

Experimentos realizados por Batista *et al.* (2006), Fedrizzi (2003) e Skone *et al.* (2004) verificaram um comportamento alterado da anomalia equatorial durante tempestades geomagnéticas severas. Com efeito, Abdu (1991) afirma que 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. Durante esses eventos, têm sido observado um deslocamento da crista sul e norte da anomalia equatorial para regiões mais afastadas do equador, deslocamento esse atribuído à intensificação do efeito fonte em associação com os campos elétricos na direção leste intensificados (BATISTA *et al.*, 2006).

#### 2.2.2.3.3 Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)

Um dos fenômenos que contribui para o aumento da ionização na região brasileira é a proximidade com a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). A AMAS é uma anomalia do campo geomagnético terrestre caracterizada por apresentar baixas intensidades no campo.

Na Figura 10, o contorno de 28.000 nT – em azul – destaca a região da AMAS, e o triângulo vermelho demonstra o centro da AMAS à época (em função da mínima intensidade de campo).

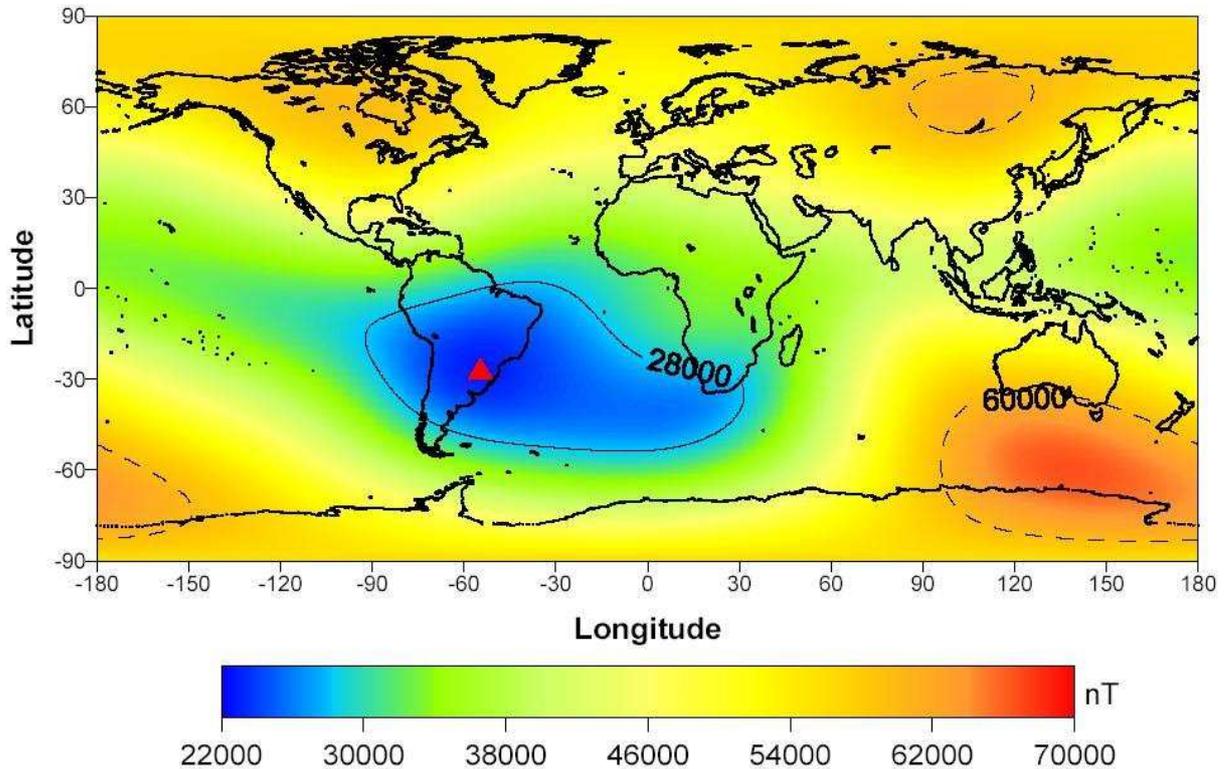


Figura 10 - Campo magnético total para o ano 2000  
 Fonte: HARTMANN, 2005

Em virtude do campo magnético nesta região ser mais fraco, há um contínuo fluxo de partículas energéticas precipitando-se a baixas altitudes – camada D da ionosfera -, contribuindo, ao colidirem com elementos neutros, para uma maior ionização da ionosfera terrestre na região, produzindo assim, efeitos semelhantes aos que ocorrem nas regiões de altas latitudes (JASKULSKI *et al.*, 2006).

De acordo com Hartmann (2005), a AMAS sofre uma deriva para Oeste, com taxas diferenciadas ao longo dos anos. A Figura 11 mostra essa deriva para os últimos anos, demonstrando também que, atualmente, o centro da AMAS encontra-se sobre o Paraguai.

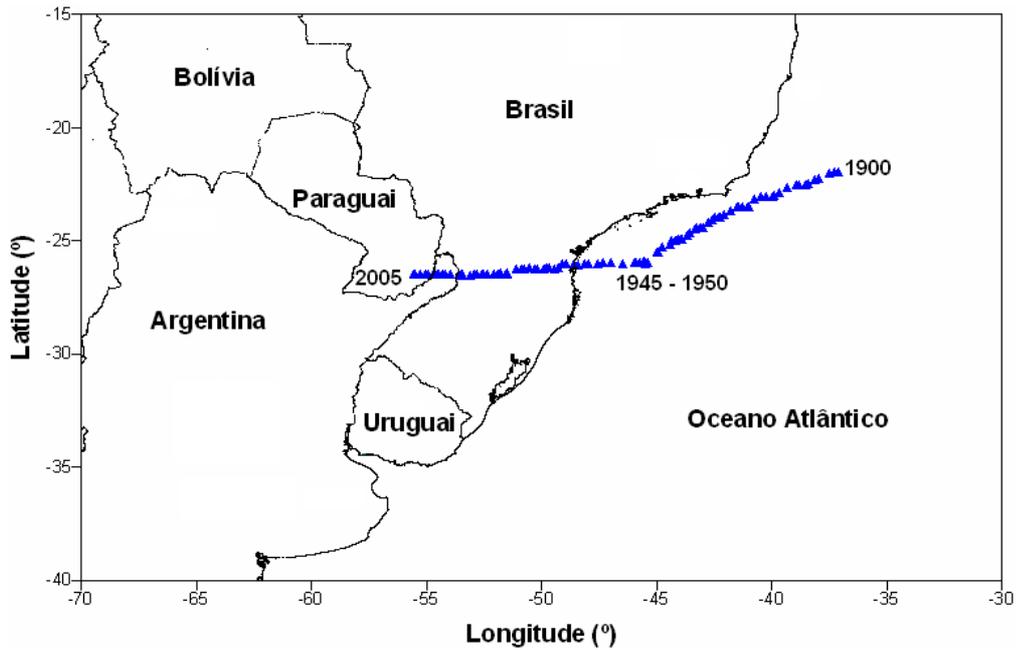


Figura 11 - Deslocamento da AMAS nos últimos anos  
 Fonte: HARTMANN, 2005

### 2.3 O TEC E SUAS VARIAÇÕES

O Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Content* – TEC) representa o número ou a densidade de elétrons contidos em uma coluna cilíndrica que se estende desde a superfície terrestre (antena receptora) até uma determinada altura na atmosfera (satélite), e cuja área da base é unitária (FEDRIZZI, 1999). A unidade de medida é o TECU (*Total Electron Content Unit* – Unidade do Conteúdo Total de Elétrons), sendo 1 TECU equivalente a  $1 \times 10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>.

Como o TEC depende da posição do satélite relativo ao receptor e, portanto, da elevação do satélite, é mais útil, para fins de padronização, ter-se a medida do TEC na direção vertical (VTEC – *Vertical TEC*), pois assim esta medida pode ser transformada e depois usada

para qualquer elevação do satélite (OLIVEIRA, 2003). O Conteúdo Total de Elétrons na direção Vertical (VTEC) é dado na seguinte equação:

$$\text{VTEC} = \cos(z') \text{TEC} \quad (1)$$

onde o valor de  $z'$  representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico (definido como a intersecção da linha que liga o receptor ao satélite com a camada ionosférica) localizado em uma camada de altitude média  $H_m$ , e é obtido através da seguinte equação (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 1994 *apud* OLIVEIRA, 2003):

$$\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z \quad (2)$$

onde  $R_m$  é o raio médio da Terra (6371 km),  $H_m$  a altura média da camada ionosfera (300 km) e  $z$  é o ângulo zenital do satélite ( $z = 90^\circ - \text{el}$ , onde  $\text{el}$  representa o ângulo de elevação do satélite).

A Figura 12 ilustra a obtenção do VTEC a partir das medidas de TEC.

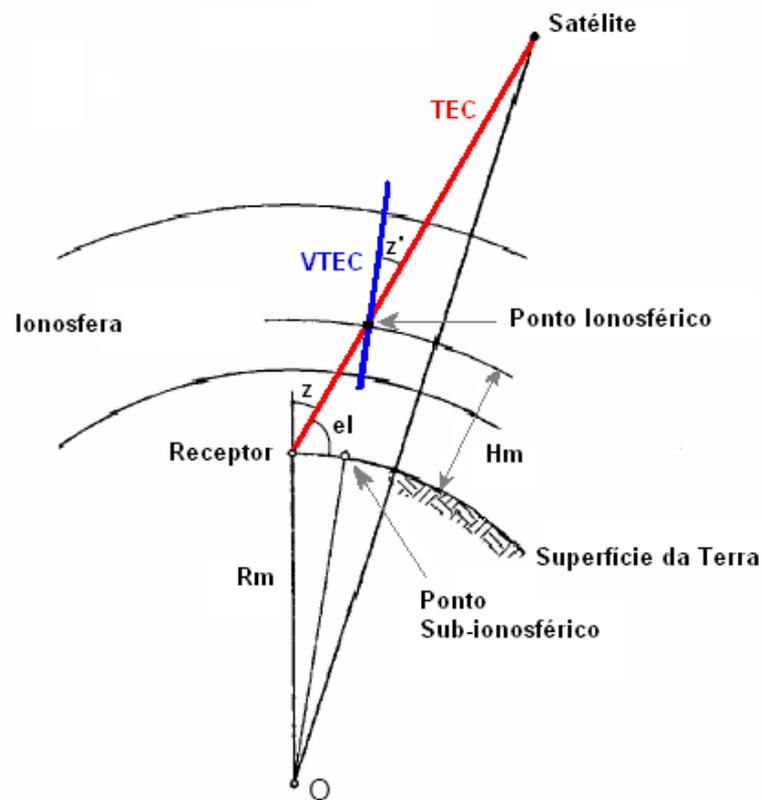


Figura 12 - Relação entre o TEC e o VTEC  
 Fonte: Adaptada de OLIVEIRA, 2003

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, sofre alterações em função da radiação solar, localização geográfica, campo geomagnético da Terra, entre outras. O comportamento dessas variações pode ser verificado regularmente ao longo do dia (variações diurnas), ao longo das estações do ano (variações sazonais) e também ao longo do ciclo de atividade solar (aproximadamente onze anos). No entanto, eventos como explosões solares (*solar flares*), ejeções coronais de massa (CME – *Coronal Mass Ejection*) e tempestades geomagnéticas, entre outros, podem causar significativas mudanças na ionosfera e, conseqüentemente, no TEC.

### 2.3.1 Variações regulares

As variações regulares podem ser divididas em: variações diurnas, variações sazonais e variações com o ciclo de atividade solar (aproximadamente onze anos).

#### 2.3.1.1 *Variações diurnas*

As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera que desaparecem à noite devido à recombinação dos elétrons e íons positivos. Esse tipo de variação ocorre principalmente por causa da iluminação do Sol, ou seja, da variação da radiação solar.

Durante o dia, devido ao aumento e diminuição da taxa de fotoionização, ocorrem máximos de densidade de elétrons entre 12 e 16 HL (WEBSTER, 1993) e, em regiões de baixas latitudes ocorre um segundo máximo entre 21 e 22 HL, geralmente maior que o primeiro (MATSUOKA, 2007). Esse segundo máximo deve-se principalmente à presença do fenômeno denominado Anomalia Equatorial e, segundo Batista (2003 *apud* MATSUOKA, 2007), geralmente não ocorre em períodos de baixa atividade solar.

A Figura 13 apresenta a variação diurna do VTEC na região brasileira para o mês de Outubro de 2001, período de alta atividade solar.

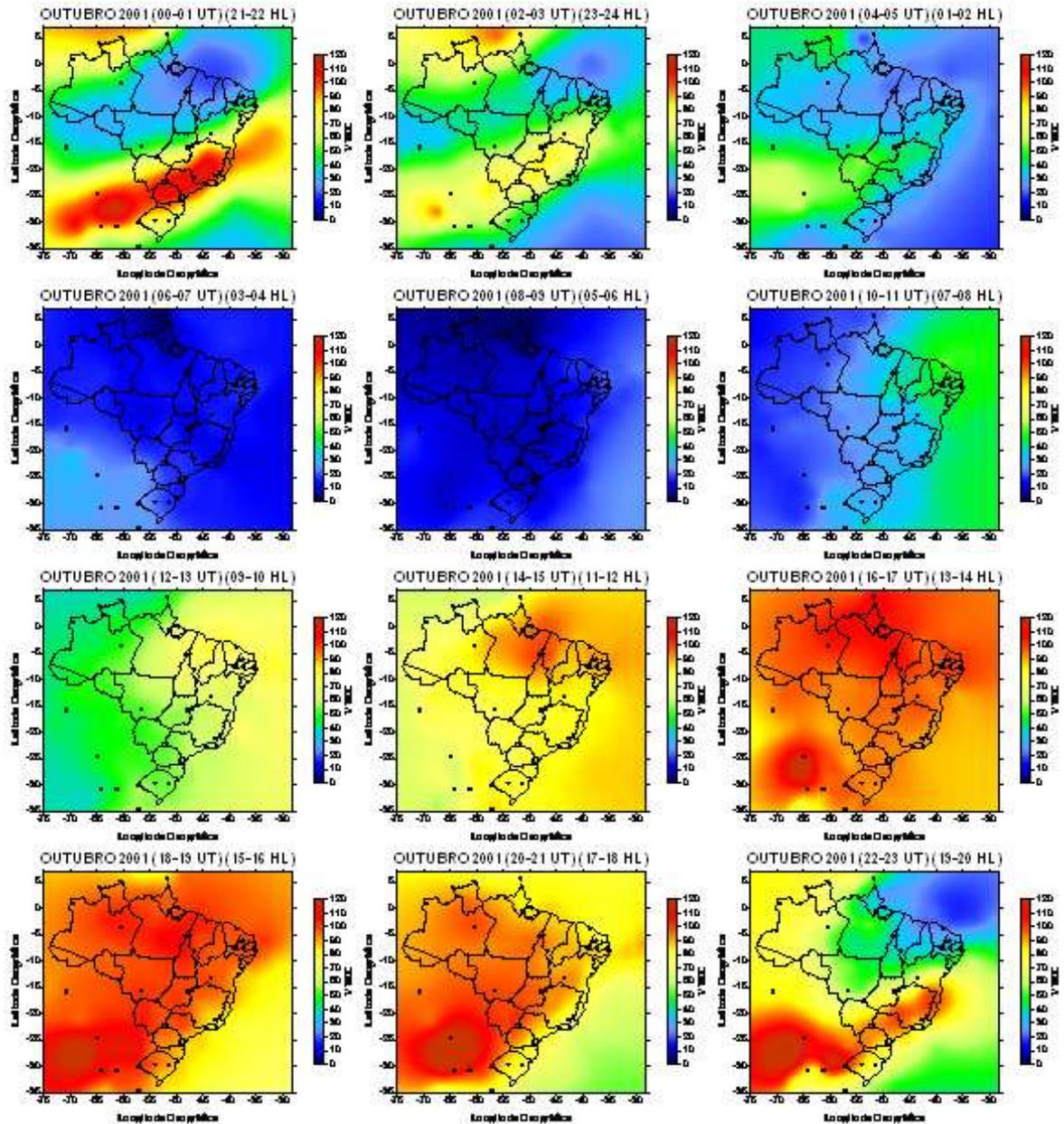


Figura 13 - Variação diurna do VTEC para Outubro de 2001  
 Fonte: MATSUOKA, 2007

Em períodos de alta atividade, o TEC máximo diurno pode atingir valores maiores do que 100% em relação aos valores observados nos períodos de baixa atividade (FONSECA JUNIOR, 2002).

### 2.3.1.2 *Variações sazonais*

As variações sazonais são caracterizadas pelas estações do ano que, devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, também exercem influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera.

Experimentos realizados na região brasileira indicam que valores maiores de densidade de elétrons, bem como maiores variações espaciais (variação latitudinal) no TEC, são encontrados nos meses de março, abril, setembro e outubro, ou seja, nos meses próximos aos equinócios. Esses experimentos também indicam que valores menores de densidade de elétrons são encontrados nos meses próximos aos solstícios, principalmente nos meses de junho e julho, próximos ao solstício de inverno (MATSUOKA e CAMARGO, 2004; DAL POZ, 2005; MATSUOKA, 2007).

A Figura 14 apresenta a variação sazonal do VTEC para os meses do ano de 2001 (entre 00-01 UT – 21-22 HL) na região brasileira, corroborando a afirmação anterior: maiores valores de TEC nos meses próximos aos equinócios e menores valores próximos aos solstícios.

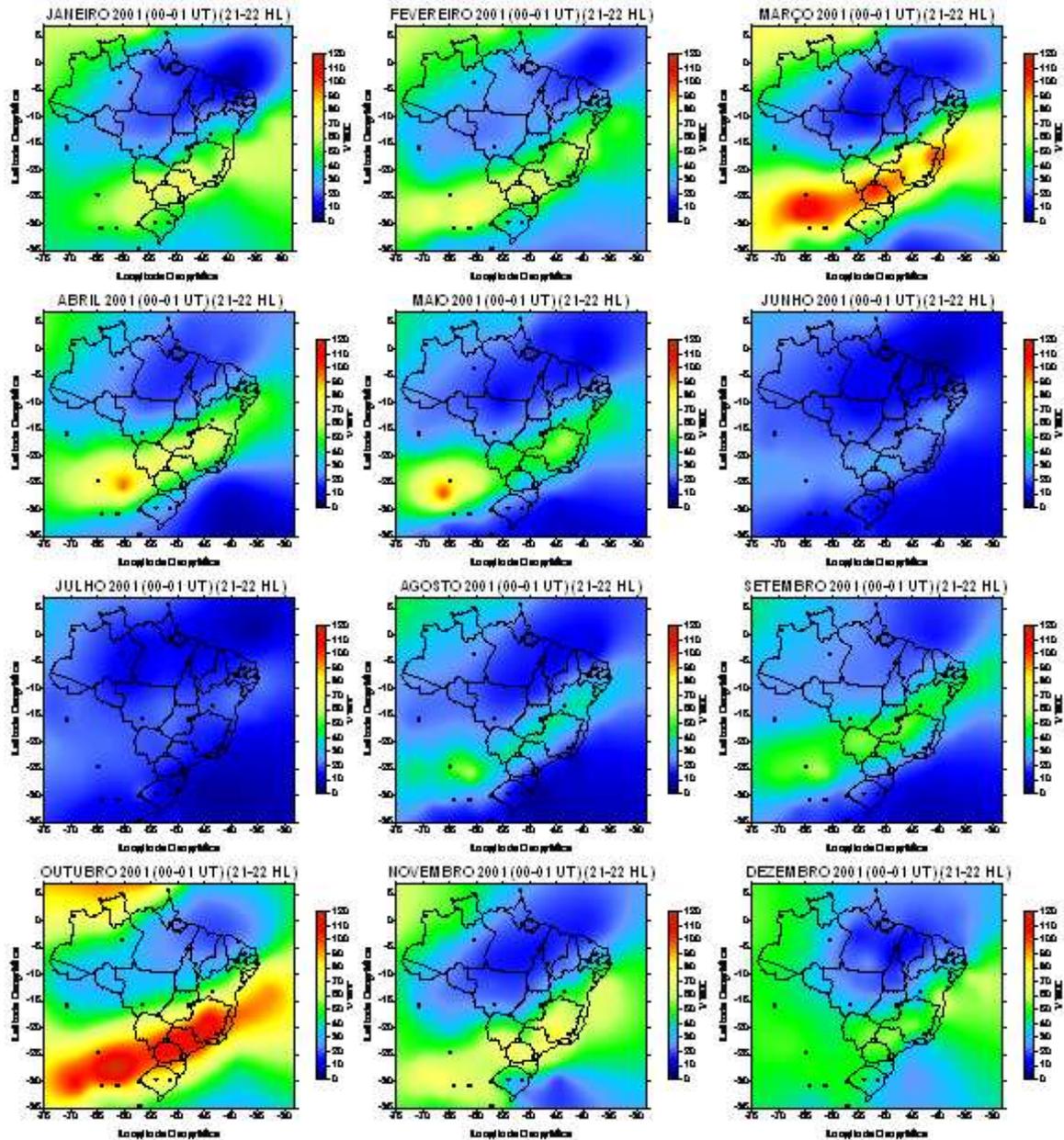


Figura 14 - Variação sazonal do VTEC para os meses do ano 2001 (00-01 UT - 21-22 HL)  
 Fonte: MATSUOKA, 2007

### 2.3.1.3 Variações com o ciclo de atividade solar

As variações com o ciclo de atividade solar estão associadas à ocorrência de manchas solares (Figura 15).

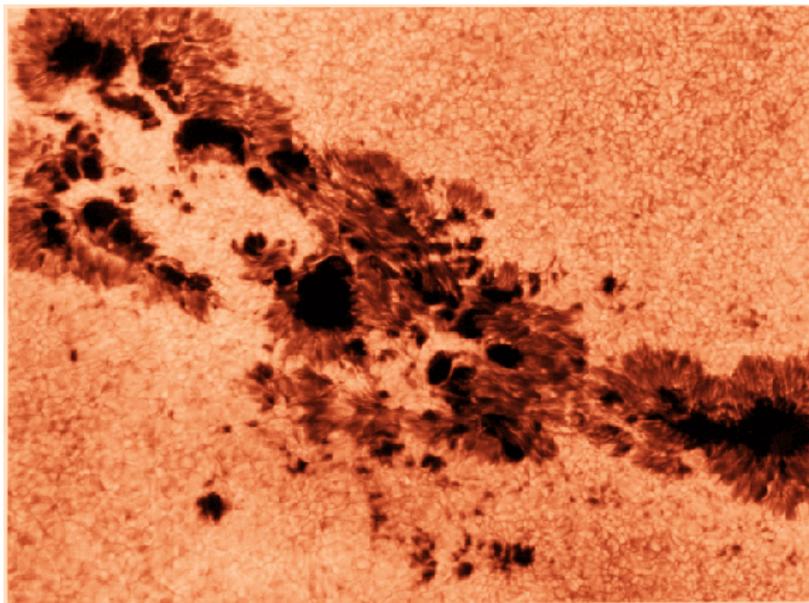


Figura 15 - Manchas solares

Fonte: <http://helios.gsfc.nasa.gov/sunspot.html> (Acesso em Abril, 2008)

As manchas solares ocorrem na Fotosfera e são regiões mais frias e mais escuras (aproximadamente 3.700 K), se comparadas com a fotosfera solar circunvizinha (aproximadamente 5.700 K), de acordo com Hathaway (2008). Esses complexos apresentam campos magnéticos extremamente fortes e são rodeados por regiões mais brilhantes, que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta desencadeando, com isso, uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (MATSUOKA, 2007). Assim, o aumento da densidade de elétrons na ionosfera é proporcional ao aumento do número de manchas.

Desde pelo menos 1.000 a.C., na China, as manchas solares são observadas. Inicialmente feitas a olho nu, a partir de 1.611 d.C., na Europa, essas observações começaram

a ser feitas telescopicamente (ECHER *et al.*, 2003). Os estudos permitiram constatar que o aumento ou a diminuição do número de manchas na superfície do Sol obedece a um ciclo de aproximadamente 11 anos, composto de um máximo de atividade solar (maior número de manchas) e um mínimo (menor número de manchas). Análises de registros de ciclos solares permitiram observar que o tempo entre o mínimo e o máximo é de 3 a 4 anos, enquanto que o período de declínio é de 7 a 8 anos (KOMJATHY, 1997). Segundo Beard (1975 *apud* FEDRIZZI, 2003), em períodos de alta atividade solar (maior número de manchas solares), os valores de TEC podem chegar a ser 50% maiores que em períodos de baixa atividade. A Figura 16 apresenta registros de ciclos solares, desde 1700 até 2008 (até 1750 as médias dos números de manchas eram anuais, a partir de então, passou-se a utilizar a média mensal).

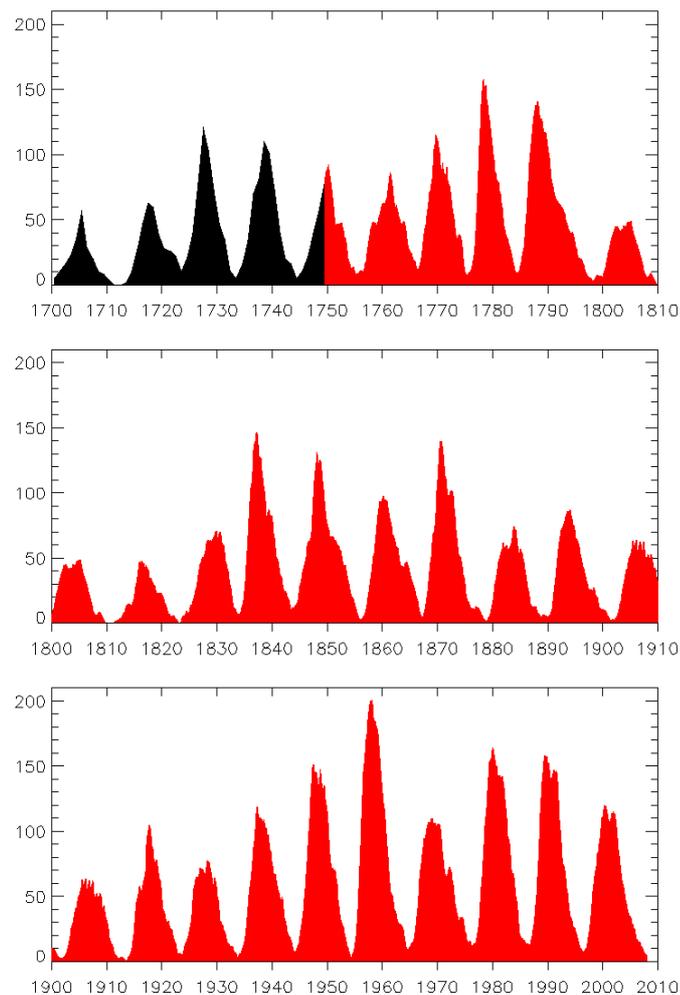


Figura 16 - Número de manchas solares - Ciclos Solares  
 FONTE: <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html> (Acesso em Julho, 2008)

O último ciclo solar – Ciclo 23 (Figura 17) – teve início no ano de 1996 (WILSON e HATHAWAY, 2008), atingindo seu máximo de número de manchas entre os anos 2000 e 2002 (PHILLIPS, 2008). No momento atual, ano 2008, o Sol encontra-se em período de mínima ocorrência de manchas solares, em fase de transição entre o Ciclo 23 e 24. De acordo com Hathaway (*apud* Phillips, 2008), manchas solares com polaridade magnética invertida (em relação às anteriores), observadas em 4 de Janeiro de 2008, marcaram o início do Ciclo Solar 24. Conforme Hathaway (*apud* Phillips, 2006), a expectativa é que esse seja

um dos mais fortes ciclos solares dos últimos cinquenta anos, e que seu máximo seja atingido em 2011 ou 2012.

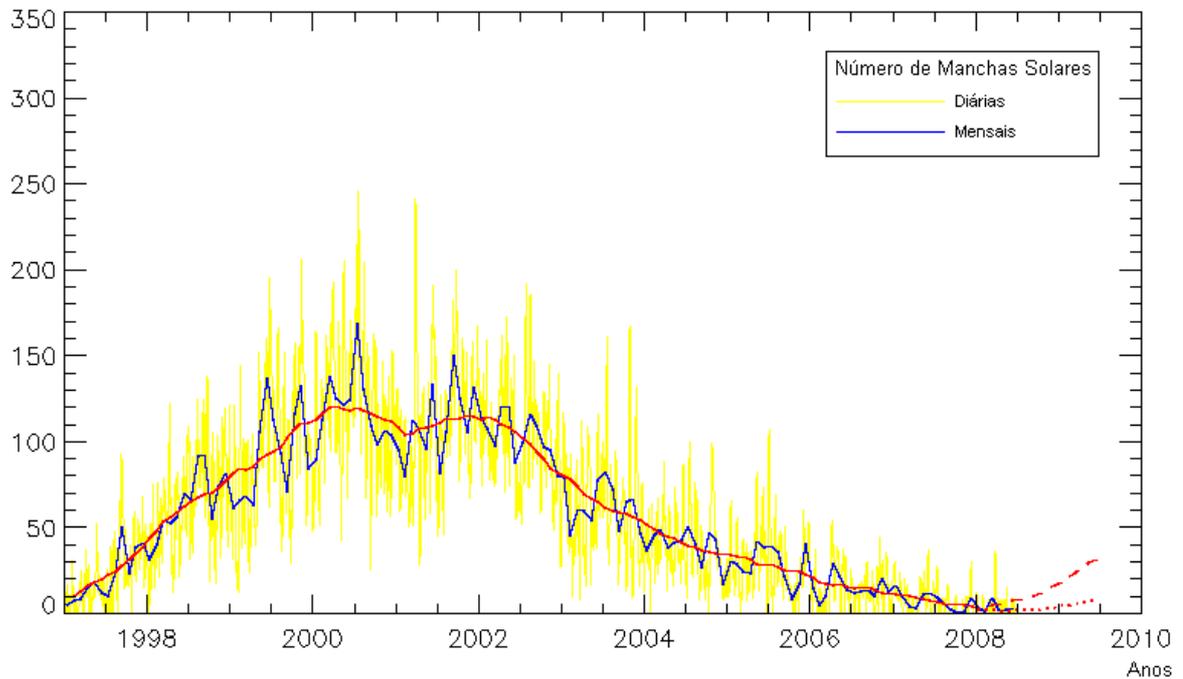


Figura 17 - Ciclo Solar 23

FONTE: Adaptada de <http://sidc.oma.be/images/wolfjmmms.png> (Acesso em Julho, 2008)

### 2.3.2 Variações abruptas

Além das variações regulares, o TEC pode sofrer abruptas modificações em seu comportamento devido a eventos solares.

No contexto deste trabalho, serão descritas as variações abruptas devido a explosões solares, ejeções coronais de massa (CME – *Coronal Mass Ejection*) e, no caso desses eventos ocorrerem direcionados para a Terra, tempestades geomagnéticas e ionosféricas.

### 2.3.2.1 Explosões solares (Solar flares)

As explosões solares ocorrem em regiões ativas do Sol, onde se encontram as manchas solares e os campos magnéticos intensos (McNAMARA, 1991). São caracterizadas por um aumento súbito da emissão de radiação, em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, e a sua duração varia entre 3 minutos e várias horas, sendo o tempo médio de aproximadamente 30 minutos (DAVIES, 1966).

A Figura 18 mostra uma grande explosão solar ocorrida em 28 de Outubro de 2003, às 11:12 UT, registrada pelos instrumentos EIT (*Extreme Ultraviolet Imaging Telescope*) da espaçonave SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), que tem como missão estudar o Sol – desde o seu núcleo até a camada mais externa (corona) –, bem como o vento solar (SOHO, 2008).

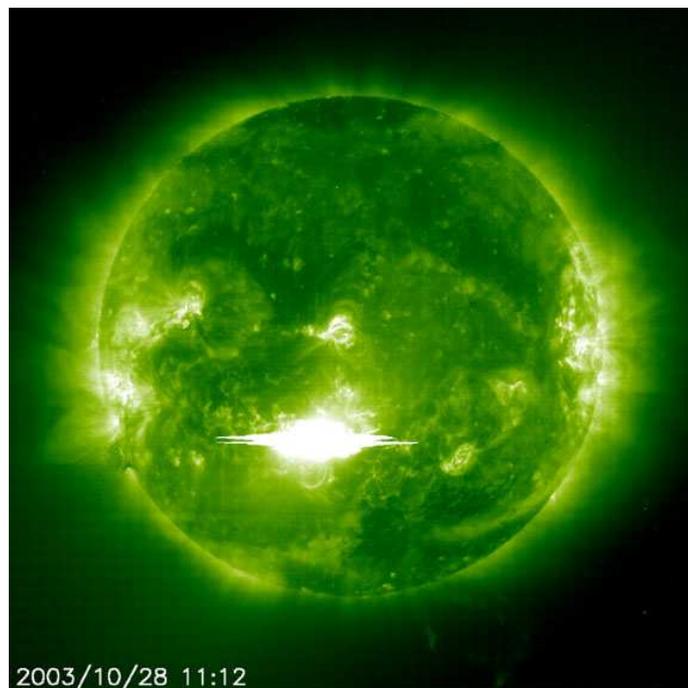


Figura 18 - Explosão solar detectada pela SOHO  
Fonte: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/images> (Acesso em Maio, 2008)

Segundo Goodman (2005), as explosões solares são divididas em classes, conforme Tabela 1, de acordo com a intensidade do pico da explosão no comprimento de onda de raios-X de 1 a 8 Angstroms, podendo cada classe ter ainda nove subdivisões:

Tabela 1 - Classificação das explosões solares

Classes	Energia Raio-X (Watt/m <sup>2</sup> )
X	$E > 10^{-4}$
M	$10^{-5} < E < 10^{-4}$
C	$10^{-6} < E < 10^{-5}$
B	$E < 10^{-6}$

Fonte: Adaptada de GOODMAN, 2005

As explosões Classe X são muito intensas e podem provocar *blackouts* de rádio propagação com duração de horas e até mesmo dias. Já as explosões Classe M são explosões de força média, mas que podem provocar *blackouts* nas regiões polares. As explosões Classe C e B são menores e com efeitos pouco perceptíveis na Terra (SPACEWEATHER, 2008).

Na ocorrência de uma explosão solar acontece um rápido aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética, especialmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta (EUV), que, se direcionado para a Terra, pode desencadear uma série de fenômenos na ionosfera, genericamente chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS – *Sudden Ionospheric Disturbance*). Durante eventos de DIS podem ocorrer rápidas variações na amplitude e na fase (cintilação ionosférica) dos sinais GPS, prejudicando a performance de rastreamento do receptor e ocasionando, inclusive, perdas de sinal (MATSUOKA, CAMARGO e BATISTA, 2006).

Entre os DIS que podem ocorrer está um rápido aumento da densidade de elétrons, através do processo de fotoionização, em alturas da ionosfera em torno de 80 km (camada D), no lado iluminado da Terra (BATISTA, 2003 *apud* MATSUOKA, 2007). Segundo

McNamara (1991), uma intensa explosão solar pode aumentar em até 10 vezes o TEC na camada D. Esse aumento de elétrons na camada D ocorre apenas alguns minutos após a ocorrência da explosão solar, dura em média 1,5 horas (BATISTA, 2003 *apud* MATSUOKA, 2007) e causa a absorção de ondas de rádio HF (*short wave* – ondas curtas) que passam pela região (GOODMAN, 2005), num fenômeno conhecido como “enfraquecimento de ondas curtas” (*short-wave fadeout*), de acordo com McNamara (1991).

#### 2.3.2.2 Ejeções Coronais de Massa (*Coronal Mass Ejections*)

Ejeção Coronal de Massa é a denominação dada a grandes quantidades de plasma que são subitamente ejetadas a partir do Sol (HATHAWAY, 2007). Segundo Howard (2006), a primeira observação de uma CME deu-se em 14 de Dezembro de 1971, utilizando equipamentos a bordo do Observatório OSO-7 (*Orbiting Solar Observatory 7* – NASA).

A frequência de ocorrência de CME's está relacionada ao ciclo de manchas solares. Em épocas de baixa atividade solar, a frequência é de uma CME por semana. Em períodos de alta atividade solar, observa-se em média 2 ou 3 CME's por dia (HATHAWAY, 2007). É importante salientar, no entanto, que nem todas as CME's ocorrem na direção da Terra; as que ocorrem são denominadas CME's Halo (HATHAWAY, 2007).

A Figura 19 apresenta uma CME ocorrida em 14 de Julho de 2000, registrada pelo coronógrafo LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment*) a bordo da SOHO.

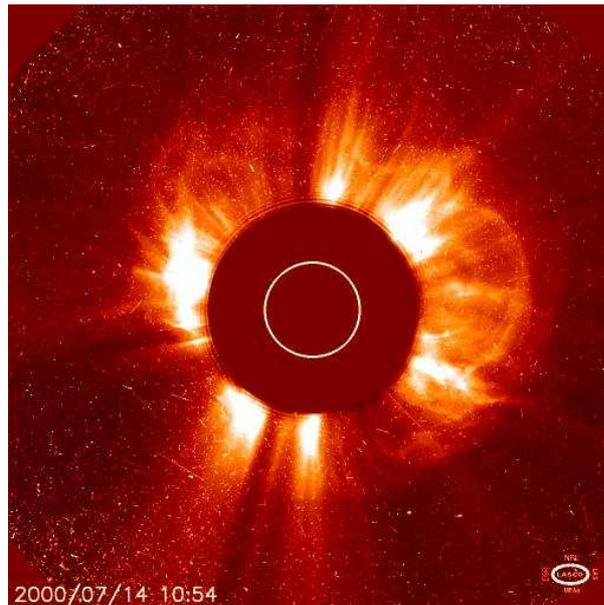


Figura 19 - Ejeção Coronal de Massa (CME Halo)

Fonte: <http://soho.nascom.nasa.gov/hotshots> (Acesso em Maio, 2008)

Durante bastante tempo acreditava-se que CME's eram iniciadas por explosões solares (HOLMAN, 2006). Atualmente, no entanto, o relacionamento entre explosões solares e CME's é um tópico bastante controverso, e diversos estudos têm sido realizados visando conhecer melhor a integração entre estes fenômenos (LIU, WEBB e ZHAO, 2006; ANDREWS, 2002). Embora diversas vezes explosões solares e CME's ocorram concomitantemente, Webb (1995) sustenta que suas origens podem ser bem diferentes; já Holman (2006) afirma que explosões solares e CME's são eventos relacionados, mas que um não é a origem do outro.

É importante salientar, no entanto, que CME's podem ser geofetivas, ou seja, têm o potencial de causar perturbações geomagnéticas na Terra (WEBB, 1995). Com a ocorrência de CME's, os parâmetros do vento solar são drasticamente modificados: sua densidade pode passar de  $10^6$  para  $10^7$  partículas/m<sup>3</sup> e sua velocidade de 300-400 km/s para valores maiores que 1.000 km/s (BATISTA, 2003 *apud* MATSUOKA, 2007). Se essa nuvem de plasma for ejetada na direção da Terra e atingi-la, poderá causar uma tempestade

geomagnética, que por sua vez, causará uma tempestade ionosférica, afetando o comportamento do TEC (McNAMARA, 1991).

#### *2.3.2.3 Tempestades geomagnéticas (Geomagnetic storms)*

O campo geomagnético controla o movimento de partículas ionizadas na ionosfera e magnetosfera. Portanto, qualquer perturbação no campo resultará em modificações diretas nas condições do transporte ionizado (KIRCHHOFF, 1991). Assim, tempestades geomagnéticas podem ser definidas como a resposta da magnetosfera terrestre a alterações nos parâmetros do vento solar, causados por eventos tais como CME's. De forma semelhante, a tempestade ionosférica é uma resposta da ionosfera a uma tempestade geomagnética (GOODMAN, 2005).

De acordo com Tsurutani e Gonzalez (1996), essas perturbações denominadas tempestades geomagnéticas acontecem devido à entrada de energia do vento solar intensificado na magnetosfera pelo processo de reconexão, ou seja, as linhas do campo magnético interplanetário (direção sul) se interconectam com as linhas do campo geomagnético da Terra (direção norte) no lado diurno, transportando a energia sobre a calota polar na direção da cauda da magnetosfera, onde ocorre uma nova reconexão, e a energia é injetada para dentro da magnetosfera. A Figura 20 apresenta a dinâmica do vento solar na magnetosfera (os números de 0 a 7 indicam as sucessivas posições do campo magnético interplanetário).

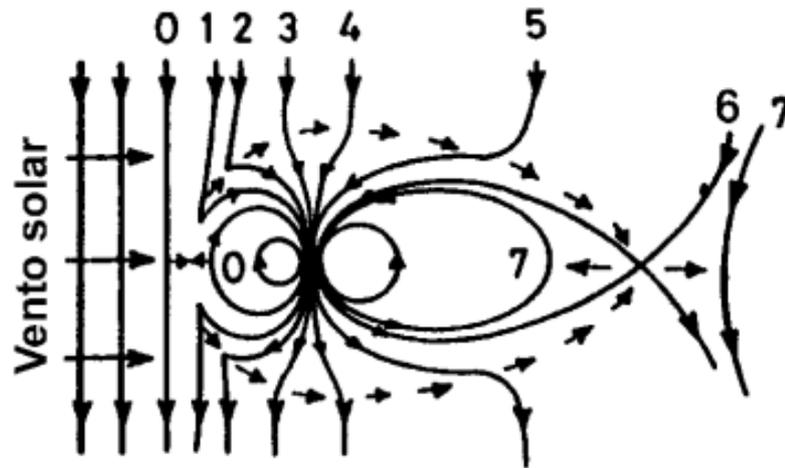


Figura 20 - Dinâmica do vento solar na magnetosfera  
 Fonte: HARGREAVES (1995) *apud* FEDRIZZI (2003)

Tempestades geomagnéticas são descritas por alguns índices, que informam a intensidade e a duração das mesmas. Segundo Fedrizzi (2003), os índices geomagnéticos mais utilizados são: *Disturbance Storm-Time* (Dst), *Planetary Kennziffer* ou índice planetário (Kp) e *Auroral Electrojet* (AE). Neste trabalho serão descritos apenas os índices Dst e Kp, que descrevem as tempestades geomagnéticas de forma mais global.

#### 2.3.2.3.1 Índice Dst

O índice Dst é obtido em unidades de nanoTeslas (nT) e em resolução temporal de uma hora (são apresentados valores médios para intervalos de uma hora, começando entre 00 e 01 UT de cada dia). Para a determinação deste índice, utiliza-se a medida da componente horizontal (H) do campo magnético terrestre de superfície fornecida por magnetogramas em estações localizadas em baixas latitudes e distribuídas longitudinalmente (FEDRIZZI, 2003).

Valores oficiais do índice Dst podem ser encontrados no endereço eletrônico <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>.

Perturbações graves no índice Dst são negativas, ou seja, são decréscimos no campo geomagnético normalmente produzidos pelo sistema de corrente equatorial na magnetosfera (conhecida como corrente do anel). As variações positivas que ocorrem no índice Dst são geralmente uma consequência decorrente da compressão da magnetosfera causada pelo aumento da pressão devido ao vento solar (SUGIURA e KAMEI, 2000). É a partir desse índice que melhor se define a tempestade geomagnética e suas fases, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão (MATSUOKA, 2007).

A Figura 21 apresenta as fases típicas de uma tempestade geomagnética em função do índice Dst.

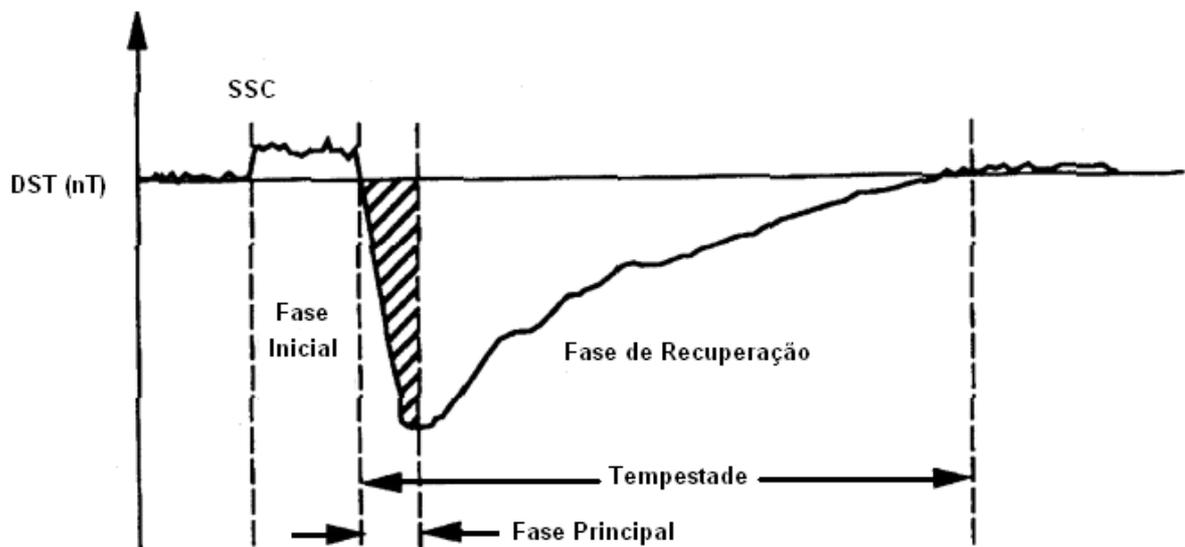


Figura 21 - Fases de uma tempestade geomagnética  
Fonte: Adaptada de TSURUTANI e GONZALES (1996)

As tempestades mais intensas são frequentemente relacionadas às CME's (OULU, 2003 *apud* FEDRIZZI, 2003). Nesses casos, Fedrizzi (2003) afirma que o aumento da velocidade do vento solar, acompanhado pela passagem do campo magnético interplanetário na direção sul, pode resultar em um início súbito de tempestade (SSC – *Sudden Storm Commencement*). O SSC é uma consequência do aumento da pressão dinâmica do vento solar sobre a magnetopausa no lado diurno e caracteriza o começo da ‘Fase Inicial’ de uma tempestade magnética, com um pico de intensidade no Dst. O SSC, porém, não é uma componente obrigatória da tempestade, podendo a fase inicial apresentar, ao invés do início súbito, um início gradual, dependendo do evento que lhe deu origem. Após esse pico, desenvolve-se a ‘Fase Principal’ da tempestade, que é caracterizada por uma queda brusca do valor do índice devido ao aumento de correntes elétricas que fluem na magnetosfera. Ao alcançar o mínimo, o índice volta a subir, na etapa conhecida como ‘Fase de Recuperação’, até atingir aproximadamente o valor calmo, quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999).

Tempestades geomagnéticas típicas podem durar entre 1 e 5 dias. A fase principal dura, em média, 1 dia, e a fase de recuperação pode durar vários dias.

A classificação de uma tempestade geomagnética em função do índice Dst é dada de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2 - Classificação das Tempestades Geomagnéticas (índice Dst)

<b>Intensidade da Tempestade</b>	<b>Dst (nT)</b>
Severa	<-250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Fonte: Adaptada de FEDRIZZI (2003)

### 2.3.2.3.2 Índices Kp e Ap

O índice Kp representa a média do índice K, obtido a partir de 13 observatórios distribuídos globalmente, e possui a capacidade de descrever o estado geral da atividade geomagnética planetária. O índice K é um índice local quase-logarítmico que contém as variações ocorridas na atividade magnética (em intervalos de 3 horas) relativas à curva do dia geomagneticamente calmo para um determinado observatório magnético (FEDRIZZI, 2003).

O índice Kp possui intervalos de 3 horas (8 valores diários), está distribuído em 28 níveis (Tabela 3) 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  $5 \frac{1}{3}$ . Em função da natureza logarítmica do índice Kp, torna-se difícil trabalhar com médias dos mesmos (BATISTA, 2003 *apud* MATSUOKA, 2007). Desta forma, foram criados índices lineares como o índice ap (no mesmo intervalo), que é derivado do índice Kp, como mostrado na Tabela 3. O índice Ap é a média dos oito valores diários de ap. Valores publicados dos índices Kp e Ap podem ser obtidos no endereço eletrônico: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>.

Tabela 3 - Relação entre os índices Kp e Ap

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

Fonte: DAVIES (1966)

A classificação de uma tempestade geomagnética em função dos índices Kp e Ap é dada de acordo com a Tabela 4:

Tabela 4 - Classificação das Tempestades Geomagnéticas (índice Kp e Ap)

<b>Atividade Geomagnética</b>	<b>Índice Kp</b>	<b>Índice Ap</b>
Calma	0-2	< 8
Transição	3	8-15
Ativa	4	16-29
Tempestade Fraca	5	30-49
Tempestade Intensa	6	50-99
Tempestade Severa	>7	>100

Fonte: Adaptada de BATISTA (2003 *apud* MATSUOKA, 2007)

## 2.4 ERRO DEVIDO À IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS

Os sinais GPS – emitidos na banda L do espectro eletromagnético – são transmitidos em duas ondas portadoras: portadora L1 (1575,42 MHz) e portadora L2 (1227,60 MHz). Essas duas frequências são geradas simultaneamente e, sobre elas, são modulados o código C/A (*Coarse Acquisition* – Fácil Aquisição), modulado somente sobre a portadora L1, e o código P (*Precise or Protected* – Preciso ou Protegido), modulado sobre as duas portadoras.

As observáveis básicas do GPS que permitem determinar posição, velocidade e tempo podem ser identificadas como (MONICO, 2000):

- Pseudodistância a partir do código; e
- Fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

As observáveis GPS, tal como toda observável envolvida em um processo de medida, estão sujeitas a erros. Esses erros, segundo Monico (2000), podem ter sua origem no satélite, na propagação do sinal, no conjunto receptor-antena e na estação.

No entanto, desde a desativação da SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva) – uma técnica de degradação da qualidade do sinal através da manipulação das mensagens de navegação e da frequência do relógio dos satélites –, às 04:00UT de 2 de Maio de 2000, a ionosfera tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GPS (MATSUOKA, 2007).

A ionosfera, como visto anteriormente, tem natureza dispersiva, ou seja, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende de sua frequência. Os principais efeitos desta região atmosférica sobre os sinais do GPS são: o atraso de grupo na modulação do sinal (denominado de atraso ionosférico ou atraso de grupo), e o avanço na fase da onda portadora. Esses efeitos provocam um erro na distância entre o satélite e o receptor obtida pelo usuário: um aumento nas distâncias obtidas a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade, respectivamente. A ionosfera não só degrada a acurácia e a precisão do GPS, como também reduz a sua confiabilidade, pois estudos têm mostrado uma alta dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas (SKONE, 2000).

De acordo com Leick (1995), esse erro devido à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal e diretamente proporcional ao TEC, ou seja, à densidade ou número de elétrons presentes na ionosfera ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora. Contudo, a modelagem do TEC e, conseqüentemente, do erro devido à ionosfera no sinal GPS, torna-se complicada em virtude das diversas variações que a densidade de elétrons sofre nessa camada.

O erro de primeira ordem devido à ionosfera para a fase ( $I_{f_r}^s$ ) e para o código ( $I_{g_r}^s$ ) ao longo da direção satélite (s) e antena receptora (r) são dados em função do TEC e da frequência do sinal (f) (LEICK, 1995):

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

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

Como o TEC é dado em elétrons por metro quadrado (el/m<sup>2</sup>), a frequência em Hertz (Hz), e a constante 40,3 é dada em m Hz<sup>2</sup>(el/m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>, o erro devido a ionosfera ( $I_{f_r}^s$  e  $I_{g_r}^s$ ) é expresso em metros (m).

Nas equações (3) e (4) é possível perceber que os erros de primeira ordem devidos à ionosfera na fase e no código têm a mesma magnitude, porém sinais contrários; ambos são diretamente proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. Assim, verifica-se que as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera (ou seja, ocorre um atraso menor no código e um avanço menor na fase), e que, quanto maior o valor do TEC, maior será o erro devido à ionosfera.

Vale salientar que, através das equações (3) e (4), o TEC é facilmente convertido em erro na distância medida pela fase (-) ou código (+), nas frequências L1 e L2 (MATSUOKA, 2007):

$$I_{f_r}^s \text{ ou } I_{g_r}^s \text{ (L1, 1 TECU)} \cong \pm 0,16\text{m}$$

$$I_{f_r}^s \text{ ou } I_{g_r}^s \text{ (L2, 1 TECU)} \cong \pm 0,27\text{m}$$

Como as duas frequências emitidas pelos satélites GPS são geradas simultaneamente, e o erro devido à ionosfera é dependente da frequência do sinal, torna-se possível utilizar receptores de dupla frequência para modelar e corrigir o efeito da ionosfera,

por meio de combinações lineares das observáveis obtidas simultaneamente em ambas as portadoras. 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: refração troposférica, não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, erro das efemérides. Porém, alguns erros – atraso instrumental, interferência do satélite e do receptor, efeitos de multicaminho e ruído do receptor – não são eliminados na combinação linear, influenciando na determinação do TEC (MATSUOKA, 2007).

Dentro da realidade brasileira, os receptores de uma frequência ainda são amplamente empregados no posicionamento GPS, principalmente devido ao custo dos receptores de dupla frequência. A desvantagem da utilização dos receptores GPS de uma frequência é que os resultados dos levantamentos, para o posicionamento por ponto e para o posicionamento relativo de linhas de bases médias e longas, são afetados pelo efeito sistemático da ionosfera. Sabe-se que, no posicionamento relativo, em uma linha de base curta, mesmo com o uso de receptores de uma frequência, os efeitos da ionosfera podem ser significativamente minimizados, pois o erro da ionosfera que contamina as observáveis em ambos receptores é altamente correlacionado. No entanto, é complicado definir, no posicionamento relativo, qual seria a distância máxima de separação de uma linha de base dita curta, devido à alta dependência desta com relação à variação espacial/temporal do TEC e as irregularidades presentes na ionosfera (MATSUOKA, 2007). A própria classificação de linhas de base em curtas, médias e longas é um tema controverso, mas, para fins práticos, adotam-se os seguintes comprimentos: <15 km (curta), entre 15 e 100 km (média) e >100 km (longa) (IBGE, 1993).

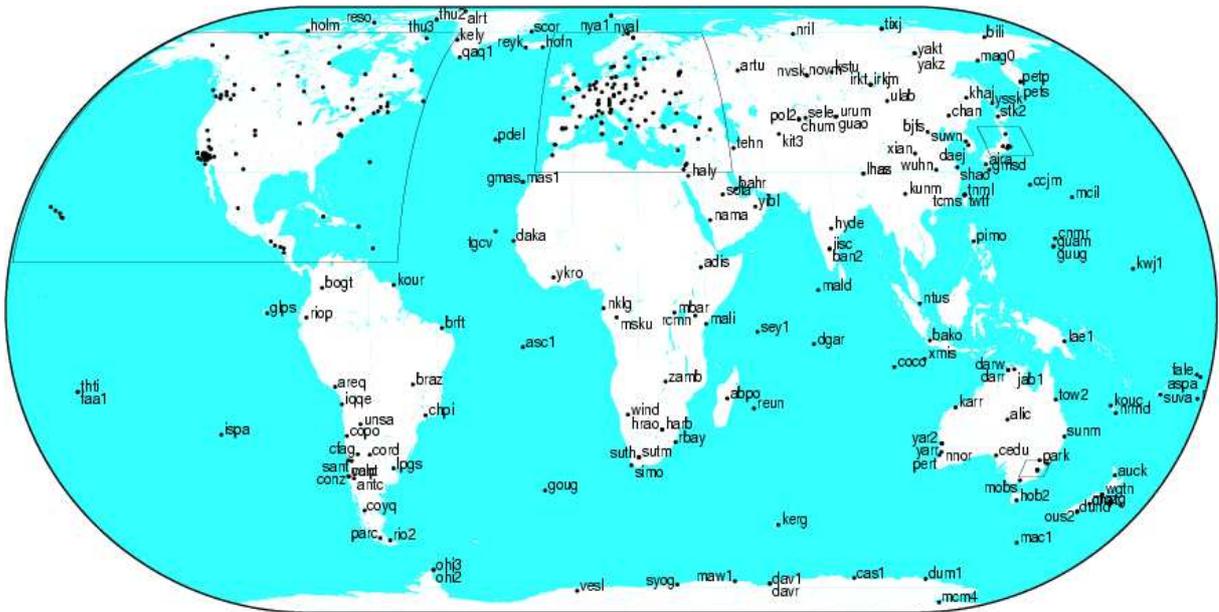
#### 2.4.1 Modelos para correção do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS

No que diz respeito à correção do erro devido à ionosfera, diversos modelos têm sido desenvolvidos para uso em receptores de uma frequência. Dentre eles, o mais conhecido e utilizado é o modelo de Klobuchar, cujos coeficientes são transmitidos nas efemérides transmitidas do GPS. Segundo a literatura, o modelo é capaz de remover entre 50 e 60% do erro devido à ionosfera (LEICK, 1995; SEEBER, 2003). Estudos na região brasileira mostraram uma correção de 53% do erro devido à ionosfera nas medidas de distâncias advindas da portadora L1 (MATSUOKA e CAMARGO, 2002; AGUIAR *et al.*, 2003).

Em 1998 o IGS (*International GNSS Service*) iniciou a produção de Mapas Globais da Ionosfera (*Global Ionospheric Maps – GIM*), fornecendo valores do VTEC calculados com dados (GPS e GLONASS) de receptores de dupla frequência da rede IGS, permitindo que as observáveis GPS sejam corrigidas no que diz respeito ao erro devido à ionosfera, pelo fato do erro ser proporcional ao TEC. Esses dados são disponibilizados, de forma livre e gratuita, no endereço eletrônico <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>.

Os mapas, disponibilizados no formato IONEX (*IONosphere Map EXchange*), fornecem valores de VTEC (em unidades de TECU) em uma grade com resolução espacial de  $5^\circ \times 2,5^\circ$  em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas (IGS, 2008). A cada dia são gerados quatro arquivos IONEX (cada um produzido por um dos quatro centros de análise, localizados na Suíça, Alemanha, EUA e Espanha) e um arquivo contendo uma combinação dos outros quatro, resultando em um único mapa global do VTEC. A precisão média dos valores de VTEC fornecidos nos arquivos IONEX disponibilizados com 11 dias de latência (versão final) é de 2 a 8 TECU e, nos arquivos disponibilizados com latência menor do que 24 horas (versão rápida), é de 2 a 9 TECU. Essa precisão varia em

função da região do globo, do número de estações GPS utilizadas, entre outros fatores. Na América do Sul e, principalmente, no Brasil, a rede IGS é pouco densificada, como pode ser verificado na Figura 22. Efetivamente, dentro da região brasileira existem apenas três estações IGS, localizadas em Brasília, Fortaleza e Cachoeira Paulista (IGS, 2008).



CSM7 2008 Jun 2 16:55:18

Figura 22 - Estações GPS da rede IGS

Fonte: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/complete.html> (Acesso em Maio, 2008)

Essas grades fornecidas nos arquivos IONEX são utilizadas para a produção de mapas de VTEC e para a correção do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. Em um estudo realizado na região brasileira Matsuoka e Camargo (2007) verificaram que, com o uso dos mapas de VTEC do IGS para a correção das observáveis GPS no posicionamento por ponto (com código C/A apenas), foi possível obter uma melhora na acurácia de 26% para a posição planimétrica e 72% para a altimétrica.

### **3 COMPORTAMENTO DO TEC E DO POSICIONAMENTO COM GPS EM PERÍODOS DE ALTA E BAIXA ATIVIDADE SOLAR NA REGIÃO BRASILEIRA**

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, sofre variações regulares, que podem ser verificadas ao longo do dia (variações diurnas), ao longo das estações do ano (variações sazonais) e também e também ao longo do ciclo de atividade solar de aproximadamente onze anos.

Experimentos realizados na região brasileira indicam que valores maiores de TEC, bem como maiores gradientes espaciais do TEC, são encontrados diariamente entre 12 e 16 HL (WEBSTER, 1993) e, em alguns casos, entre 21 e 22 HL aproximadamente (MATSUOKA, 2007). Outros experimentos (MATSUOKA e CAMARGO, 2004; DAL POZ, 2005; MATSUOKA, 2007) verificaram que, ao longo do ano, os maiores valores de TEC são encontrados nos meses de março, abril, setembro e outubro, ou seja, nos meses próximos aos equinócios, e menores valores são encontrados nos meses próximos aos solstícios, principalmente nos meses de junho e julho, próximos ao solstício de inverno. De igual forma, verificou-se que, em períodos de alta atividade solar (maior número de manchas solares), os valores de TEC podem chegar a ser 50% maiores do que os encontrados em períodos de baixa atividade solar (BEARD, 1975 *apud* FEDRIZZI, 2003).

Sabe-se, também, que a densidade de elétrons tem relação direta com o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, o que pode afetar muito a acurácia, tanto do posicionamento por ponto, quanto do posicionamento relativo, principalmente quando são utilizados receptores de uma frequência, e, no caso do posicionamento relativo, em linhas de base médias e longas. O Brasil, por suas dimensões continentais, que compreendem a região

equatorial e de baixas latitudes, é uma região especial, em termos de influência da ionosfera, sendo afetado pela presença da Anomalia Equatorial (AE), pela proximidade com a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e até mesmo pela ocorrência de irregularidades, como a cintilação ionosférica e a presença de bolhas ionosféricas.

Neste capítulo serão apresentados experimentos para avaliar o comportamento do TEC e do posicionamento com GPS (por ponto e relativo) em períodos de alta e baixa atividade solar. Para todos os experimentos foram utilizados os mesmos dias dos meses de Janeiro de 2002 e 2006 (próximo ao solstício de verão, no hemisfério sul), Julho de 2002 e 2006 (próximo ao solstício de inverno, no hemisfério sul), e Outubro de 2001 e 2006 (próximo ao equinócio de primavera, no hemisfério sul), explicitados na Tabela 5. Embora fosse desejável utilizar o mesmo tamanho de amostra em todos os meses, foi necessário levar em consideração a disponibilidade de arquivos GPS nas estações RBMC para a realização dos experimentos com o posicionamento por ponto e posicionamento relativo, motivo pelo qual o tamanho da amostra variou entre os meses.

Tabela 5 - Dias utilizados nos experimentos

<b>Mês</b>	<b>Ano</b>	<b>Dias do Mês</b>	<b>Total de Dias</b>
Janeiro	2002	03, 04, 05, 06, 07, 08, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 25, 27, 28, 29, 30	20
Janeiro	2006	03, 04, 05, 06, 07, 08, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 27, 28, 31	20
Julho	2002	04, 05, 06, 07, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	22
Julho	2006	04, 05, 06, 07, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	22
Outubro	2001	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 09, 11, 12, 13, 15, 18, 19, 24, 25, 28, 29, 31	19
Outubro	2006	03, 04, 05, 06, 07, 08, 10, 11, 12, 14, 16, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31	19

O gráfico da Figura 23 apresenta o número médio mensal de manchas solares (*sunspot*), o número de explosões solares (*solar flares*) classe M ou X, e o número de CME's Halo ocorridas nos meses envolvidos no experimento, permitindo caracterizar, perfeitamente, o período de alta (ano 2001 e 2002) e de baixa atividade solar (ano 2006). Com efeito, observa-se uma redução média de aproximadamente 89%, em termos de número médio de manchas solares, no período de baixa atividade solar, em relação ao período de alta atividade solar.

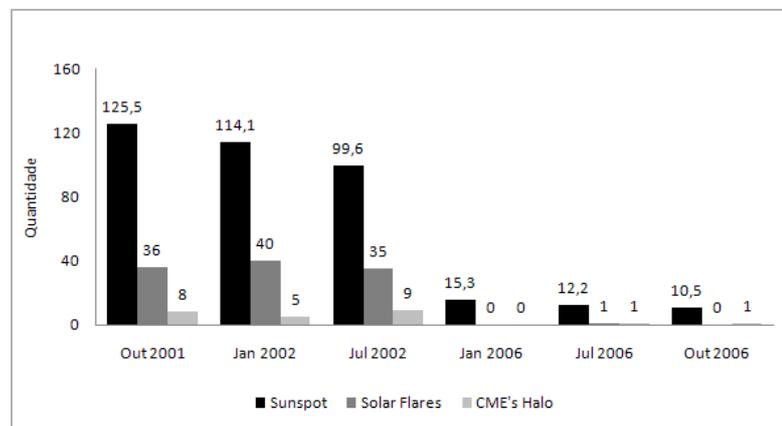


Figura 23 - Atividade solar: *Sunspot*, *Solar flares* e *CME's Halo*

Fonte: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ftpsolarflares.html>; <http://sidc.oma.be/sunspot-data/>; [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/cme\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/cme_list/) (Acesso em Setembro, 2007)

### 3.1 EXPERIMENTO: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TEC NA REGIÃO BRASILEIRA

A determinação de parâmetros ionosféricos, entre eles a densidade de elétrons, é tradicionalmente realizada com equipamentos como a ionossonda/digissonda, o radar de espalhamento incoerente, entre outros (maiores detalhes sobre estes equipamentos podem ser

obtidos em Kirchhoff (1991)). A tecnologia GPS, no entanto, tem sido utilizada como uma maneira alternativa de estudar a ionosfera, pois, aliando a propriedade dispersiva da ionosfera aos sinais GPS transmitidos em duas frequências distintas, é possível determinar a integral da densidade de elétrons, ou seja, o parâmetro TEC da ionosfera.

A implantação de redes GPS equipadas com receptores de dupla frequência tem permitido a produção de mapas de VTEC em escala local, regional e global. No âmbito regional, Matsuoka (2007) produziu e analisou mapas médios de VTEC para a região brasileira utilizando dados GPS de estações da RBMC e de estações do IGS na América do Sul. Esses mapas foram produzidos para todos os meses do ano de 2001, período de alta atividade solar, utilizando dados de cinco dias de cada mês. De maneira geral, foi possível observar a variação diária do TEC, com valores mínimos encontrados entre 4 e 6 HL e valores máximos entre 14 e 16 HL, com um segundo máximo após o pôr-do-sol nos meses próximos aos equinócios. A variação sazonal também ficou bastante caracterizada, com maiores valores de TEC nos meses próximos aos equinócios e menores valores nos meses próximos ao solstício de inverno.

Neste experimento serão utilizadas as grades dos Mapas Globais da Ionosfera (arquivos no formato IONEX) com valores de VTEC, disponibilizados pelo IGS na sua versão final, para avaliar o comportamento diário e sazonal do TEC na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar.

### 3.1.1 Tratamento dos dados, resultados e análises

Para o experimento em questão foram utilizados os arquivos IONEX dos dias explicitados na Tabela 5, de modo que fosse possível estudar, em anos de alta (2001 e 2002) e baixa (2006) atividade solar, o período próximo ao solstício de verão no hemisfério sul (Janeiro), próximo ao solstício de inverno no hemisfério sul (Julho), e próximo ao equinócio de primavera no hemisfério sul (Outubro).

Como os arquivos IONEX fornecem valores de VTEC para todo o globo, em uma grade com resolução espacial de  $5^\circ \times 2,5^\circ$  em longitude e latitude, respectivamente, o tratamento inicial dos dados foi feito retirando os dados correspondentes à região brasileira do arquivo IONEX original, formando uma nova grade, subdividida em 12 arquivos horários diários, com resolução temporal de 2 horas, que é a resolução disponibilizada pelo IGS. A seguir, calculou-se uma grade média horária para cada mês envolvido no experimento. A partir dessa grade média horária contendo os valores médios mensais de VTEC, é que são apresentados os resultados e análises desse experimento.

Inicialmente, de modo a estabelecer uma visão geral do comportamento do VTEC, foram gerados mapas horários com valores médios mensais de VTEC (em unidades de TECU) para a região brasileira (Figura 24 a Figura 32). Esses mapas foram gerados no programa Surfer 7.0, num total de 12 mapas horários para cada mês. Como um estudo maior dos métodos de interpolação não foi realizado nessa pesquisa, optou-se por adotar o método de interpolação de Krigagem, geralmente utilizado nas pesquisas dessa área. Convém ressaltar também que, a partir do ano 2003, o IGS começou a disponibilizar os arquivos IONEX a partir das 00 UT. Como anteriormente eram disponibilizados a partir das 01 UT, os mapas do

período de alta atividade solar tem 1 hora de diferença em relação aos mapas do período de baixa atividade solar. Nos mapas e gráficos, a Hora Local (HL) é referida ao meridiano 45°W.

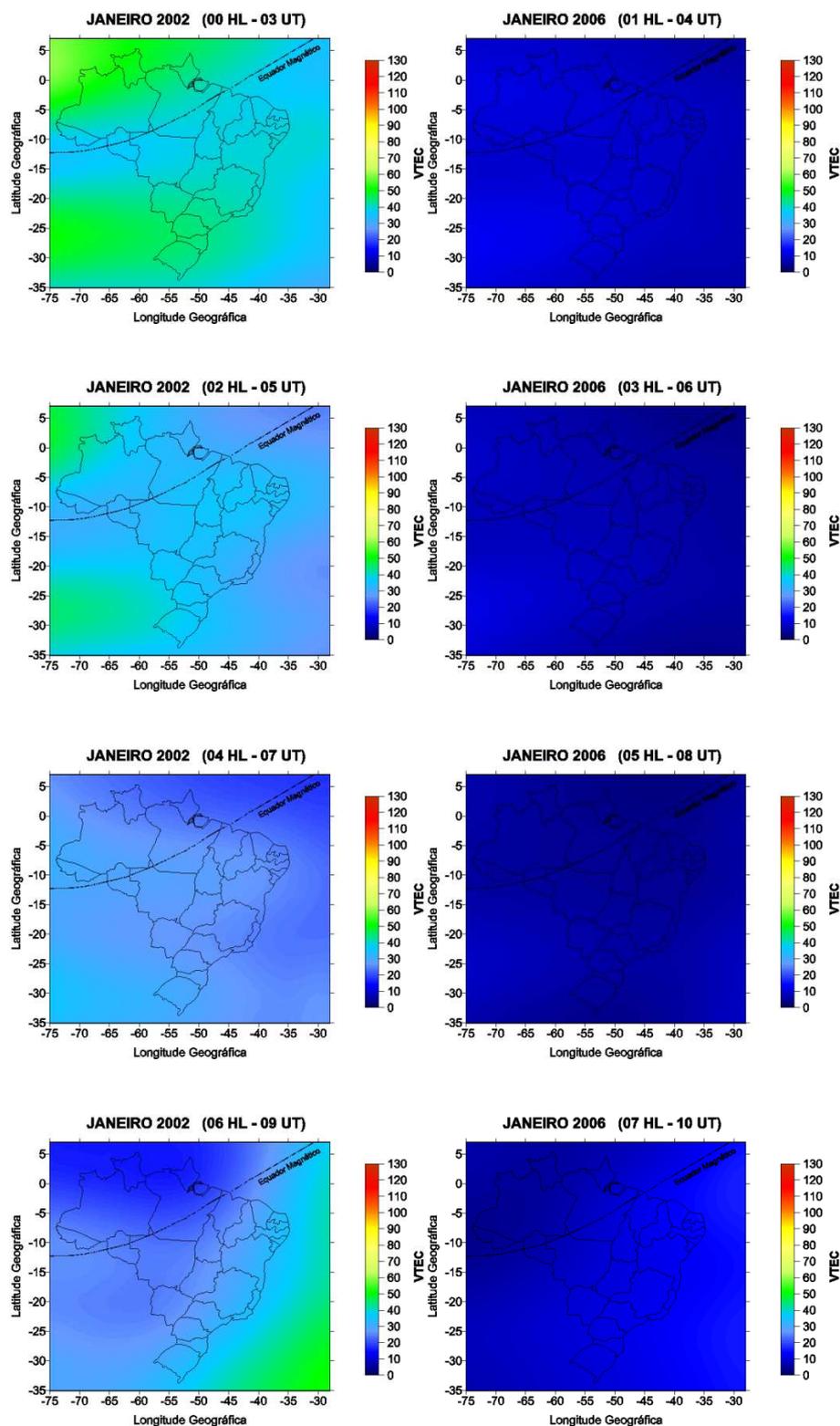


Figura 24 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Janeiro 2002 (00-06 HL) (03-09 UT) e Janeiro 2006 (01-07 HL) (04-10 UT)

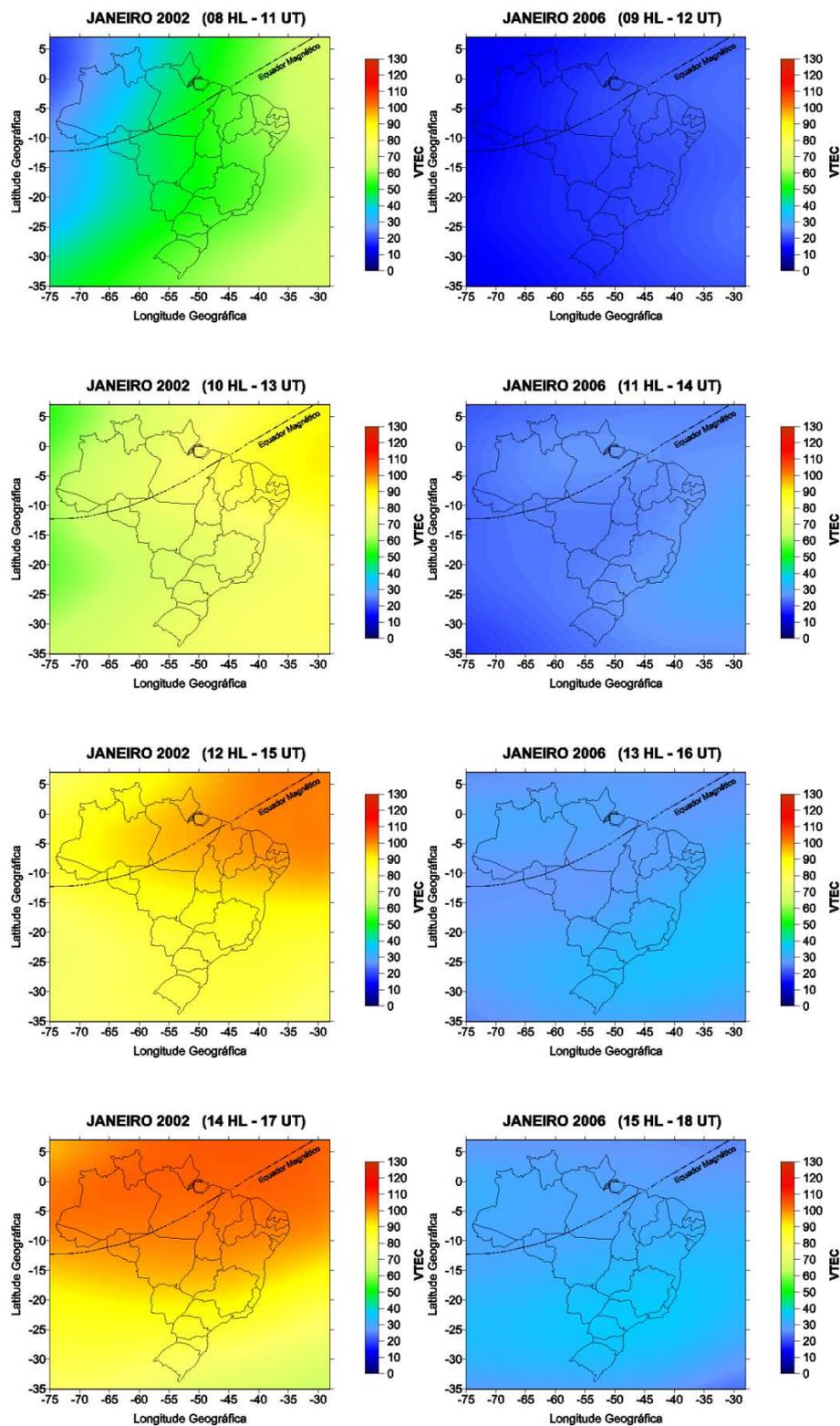


Figura 25 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Janeiro 2002 (08-14 HL) (11-17 UT) e Janeiro 2006 (09-15 HL) (12-18 UT)

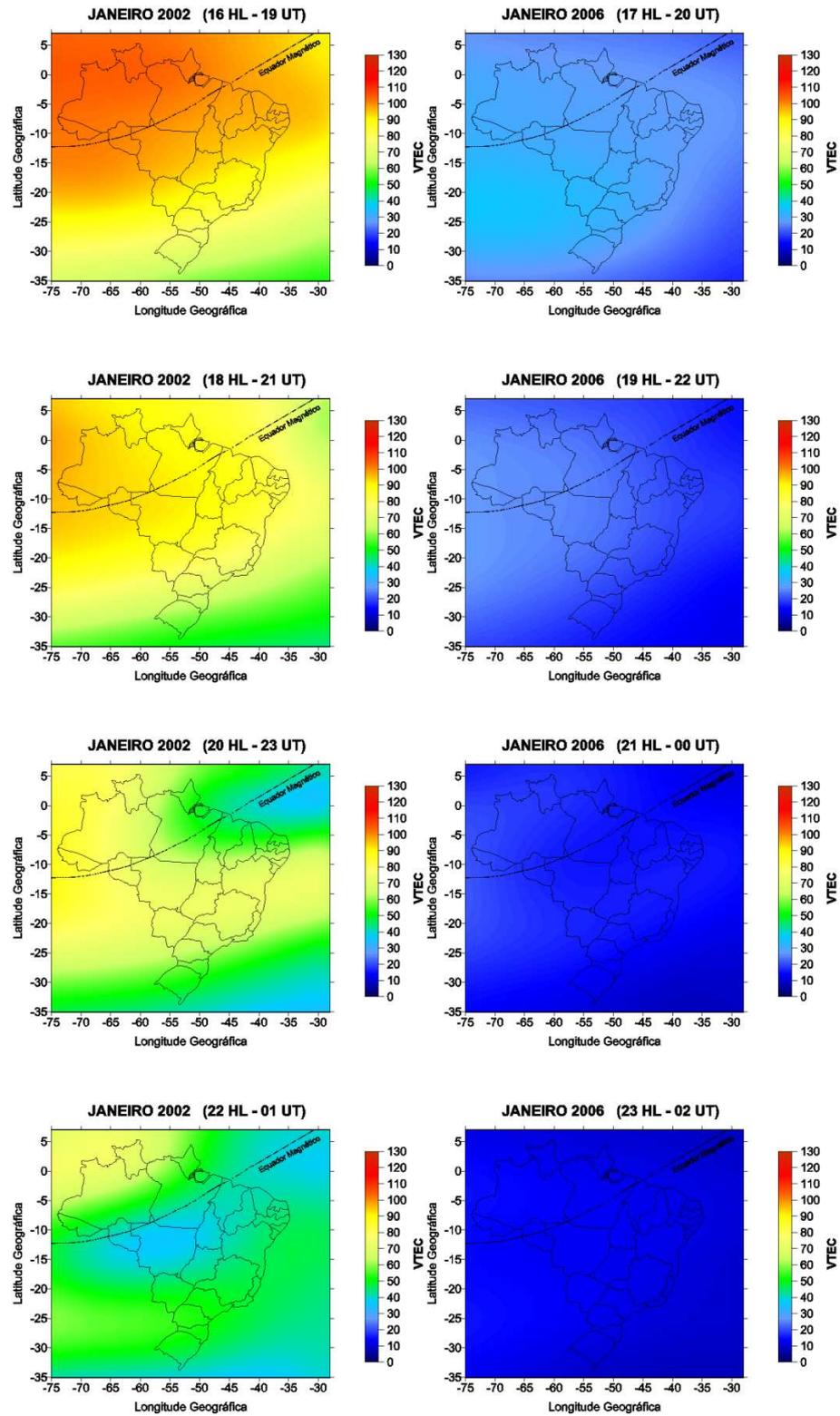


Figura 26 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Janeiro 2002 (16-22 HL) (19-01 UT) e Janeiro 2006 (17-23 HL) (20-02 UT)

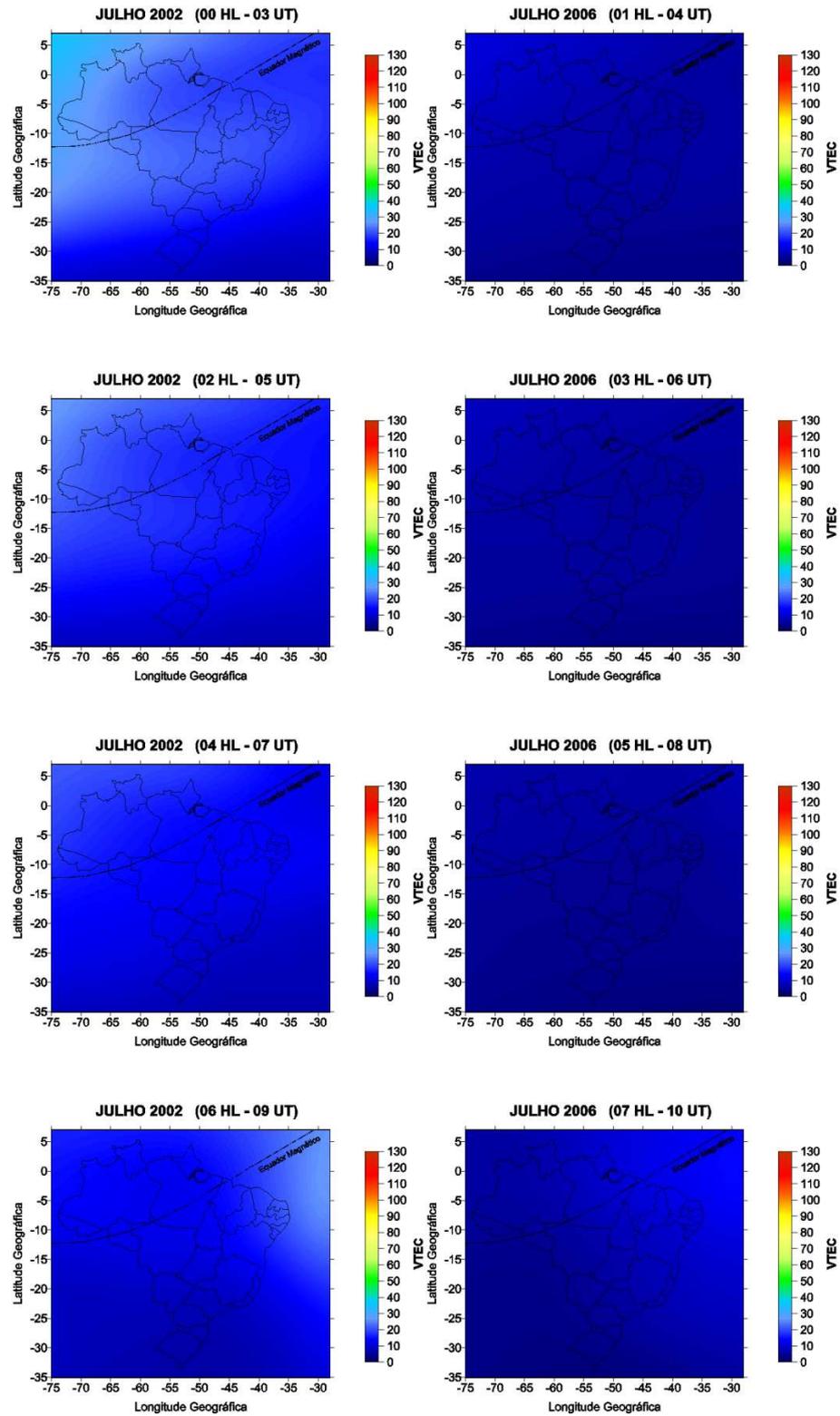


Figura 27 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Julho 2002 (00-06 HL) (03-09 UT) e Julho 2006 (01-07 HL) (04-10 UT)

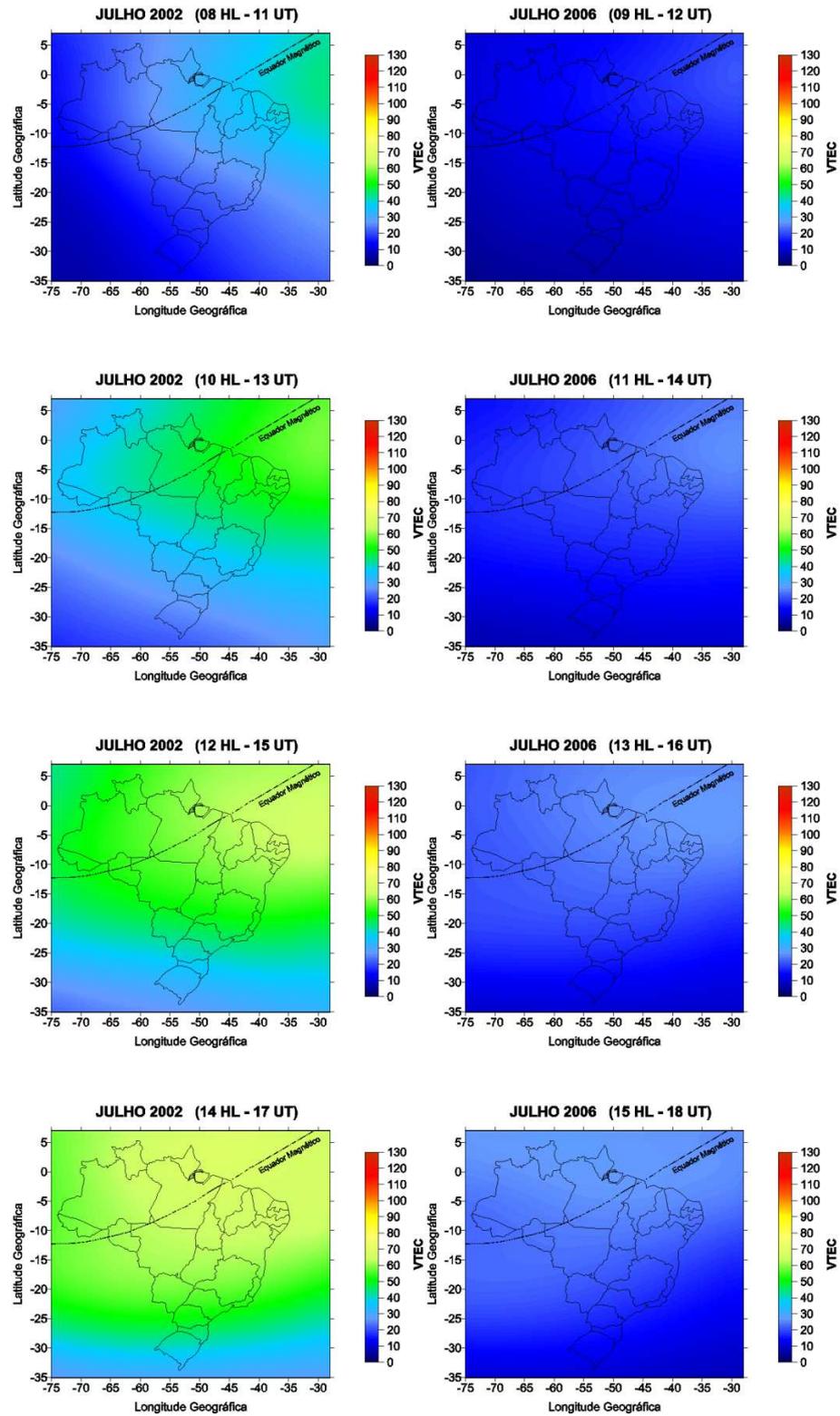


Figura 28 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Julho 2002 (08-14 HL) (11-17 UT) e Julho 2006 (09-15 HL) (12-18 UT)

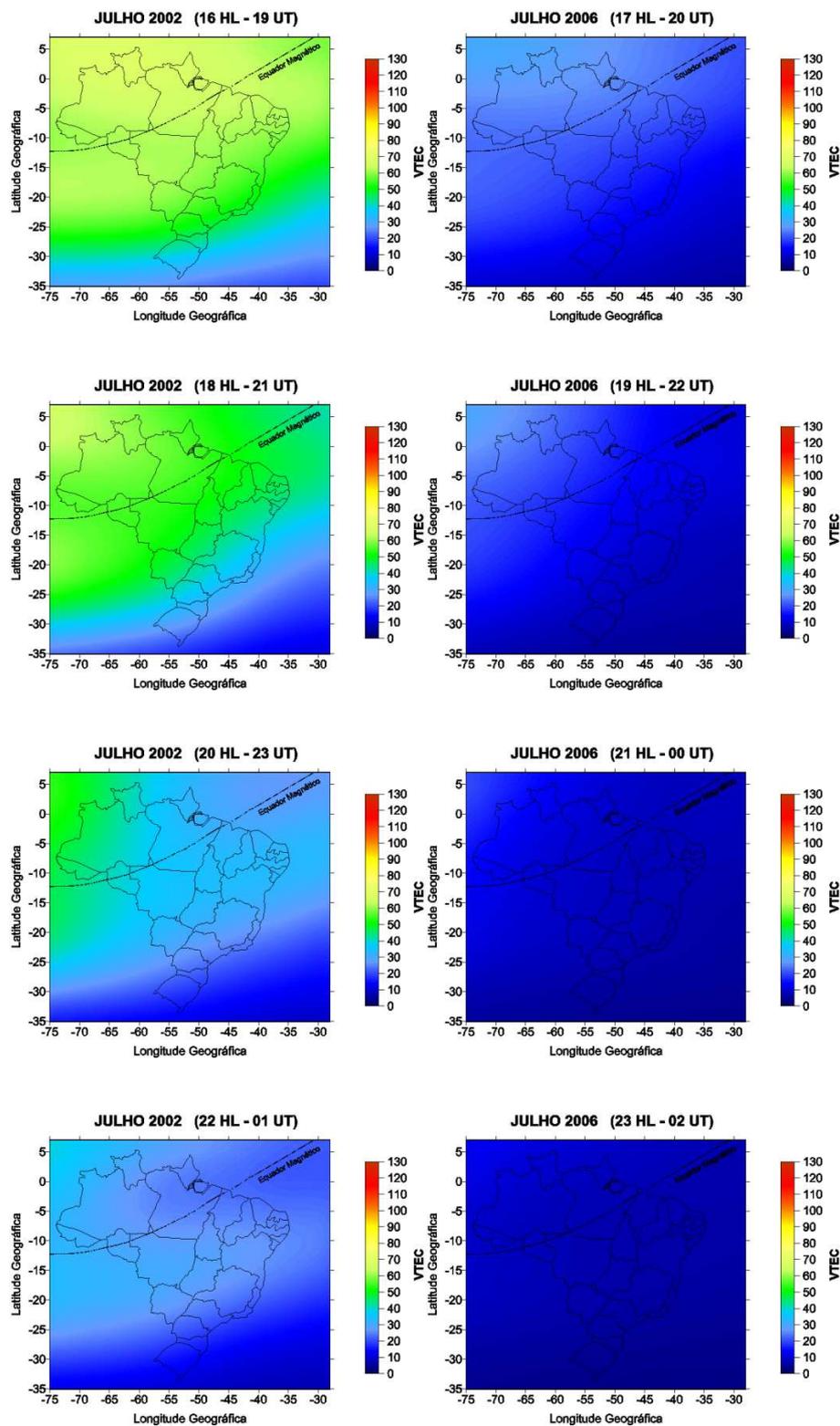


Figura 29 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Julho 2002 (16-22 HL) (19-01 UT) e Julho 2006 (17-23 HL) (20-02 UT)

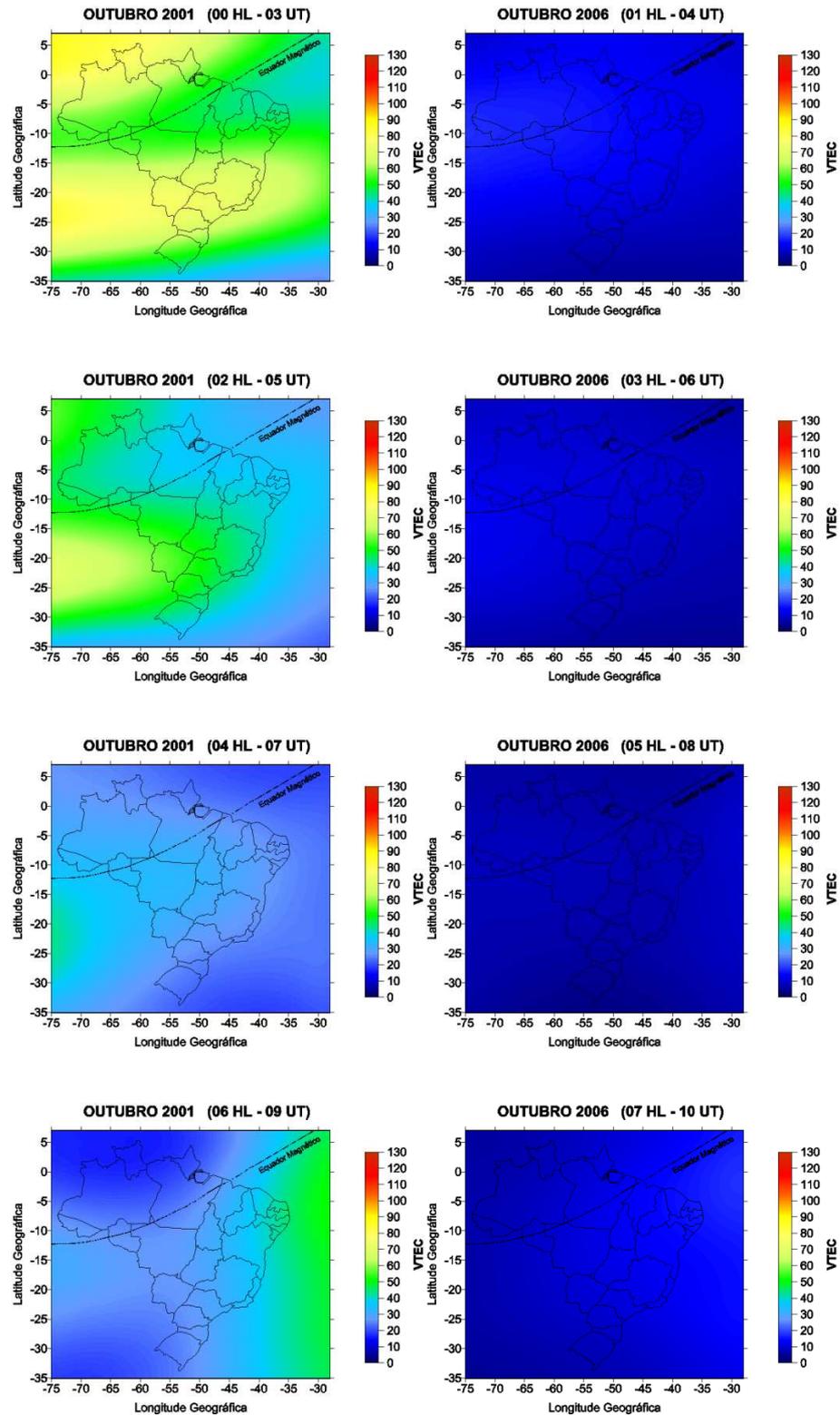


Figura 30 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Outubro 2001 (00-06 HL) (03-09 UT) e Outubro 2006 (01-07 HL) (04-10 UT)

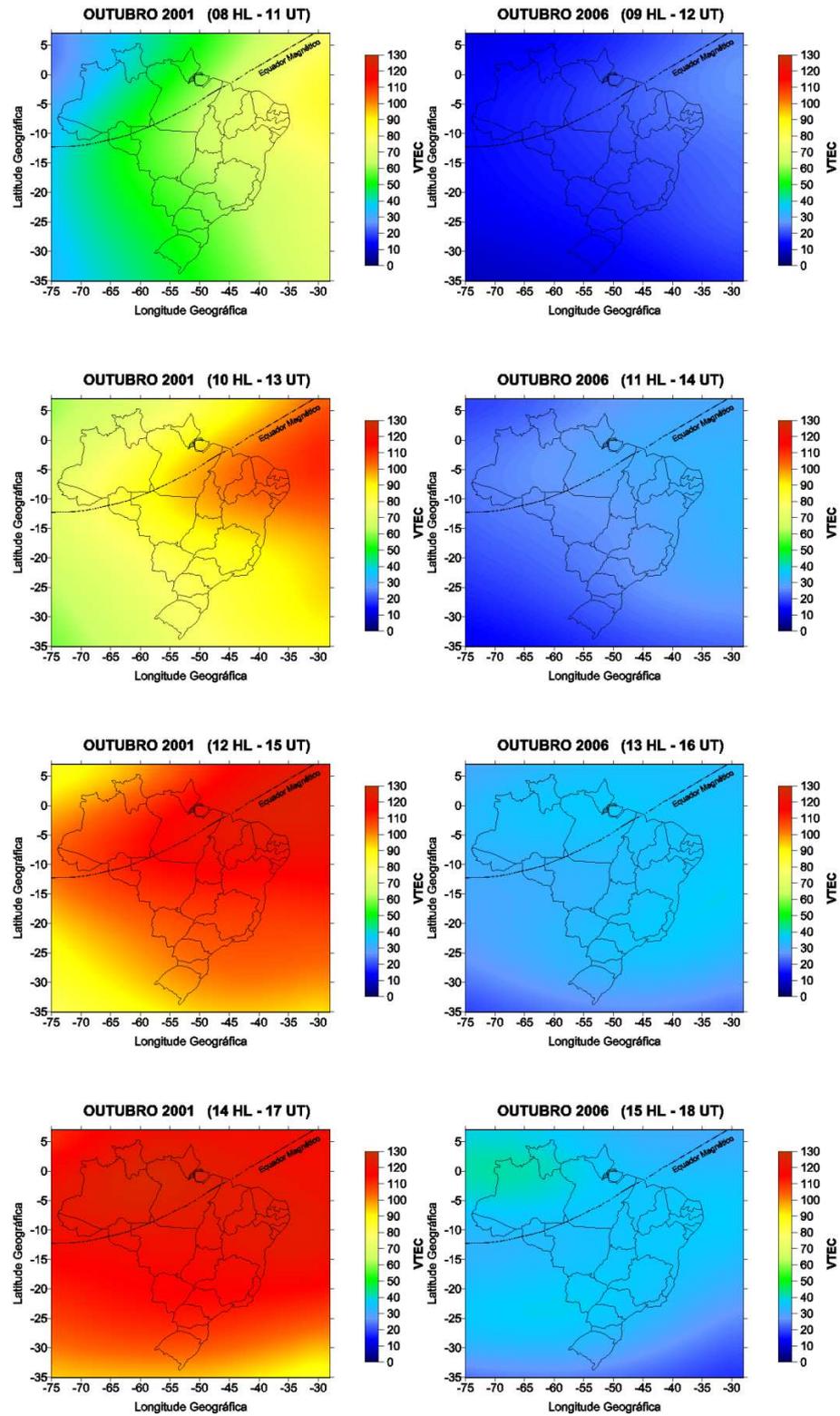


Figura 31 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Outubro 2001 (08-14 HL) (11-17 UT) e Outubro 2006 (09-15 HL) (12-18 UT)

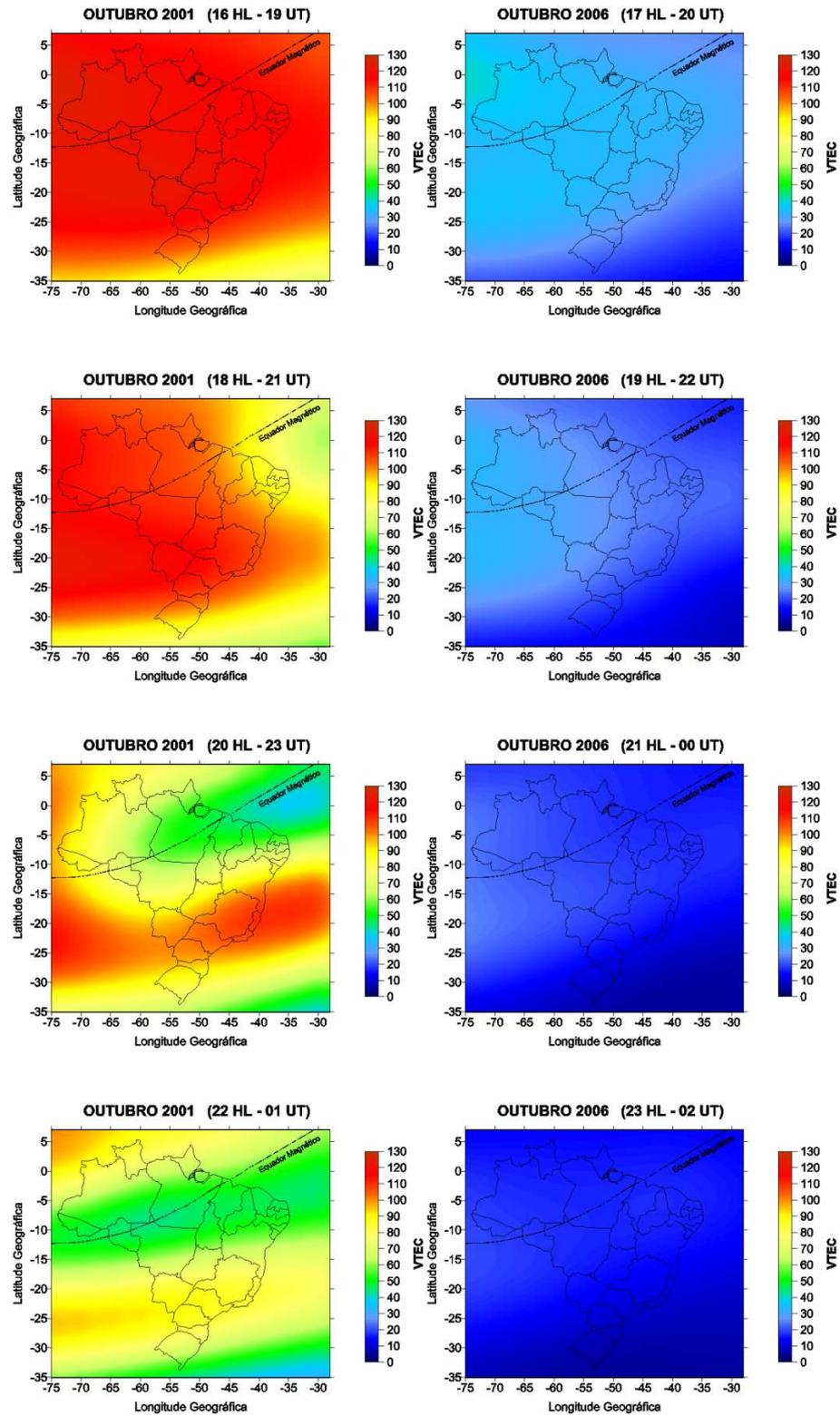


Figura 32 - Mapas horários: valores médios de VTEC para o Brasil nos meses de Outubro 2001 (16-22 HL) (19-01 UT) e Outubro 2006 (17-23 HL) (20-02 UT)

Como auxílio para a análise da variação diurna do VTEC, a Figura 33 apresenta os valores mínimo, médio e máximo de VTEC para o Brasil, extraídos de cada mapa médio horário mensal, com resolução temporal de 2 horas. Dessa forma, os valores apresentados representam a média mensal de todos os valores de VTEC contidos nas grades médias de cada mês do experimento.

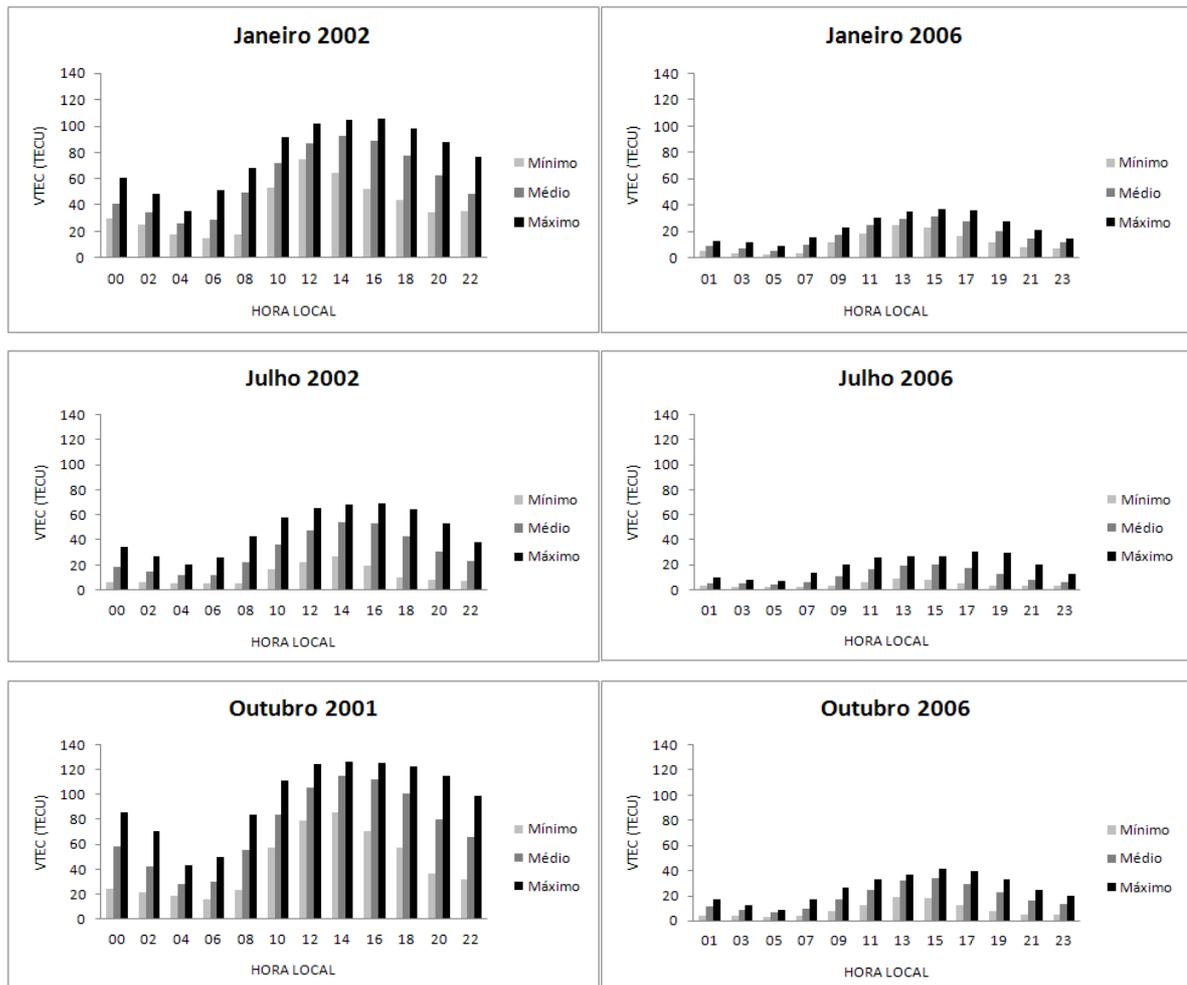


Figura 33 - Variação diurna média do VTEC na região brasileira para os meses de Janeiro 2002 e 2006; Julho 2002 e 2006; e Outubro 2001 e 2006

Fonte: Arquivos IONEX

De igual forma, extraiu-se o desvio-padrão dos valores de VTEC para cada grade horária média mensal, resultando nos gráficos da Figura 34 e Figura 35. Como o desvio-padrão é uma medida de dispersão que leva em consideração a totalidade dos valores da

variável em estudo (valores de VTEC na grade), ele pode ser considerado como um indicativo da variação espacial média do VTEC na região brasileira para os meses envolvidos no experimento. Assim, quanto maior o desvio-padrão, maiores as diferenças nos valores de VTEC na região brasileira em determinado horário, ou seja, maior a variação espacial.

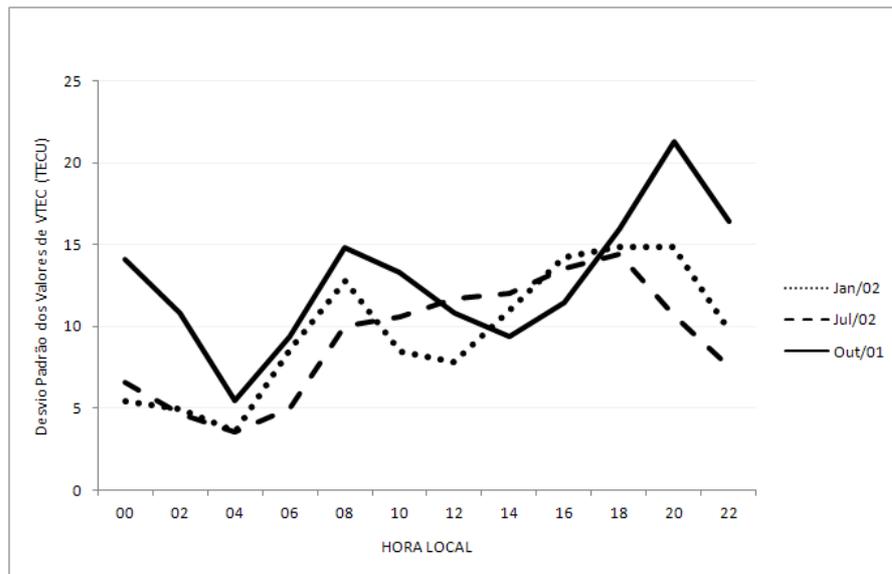


Figura 34 - Indicativo da variação espacial média do VTEC na região brasileira para o período de Alta Atividade Solar

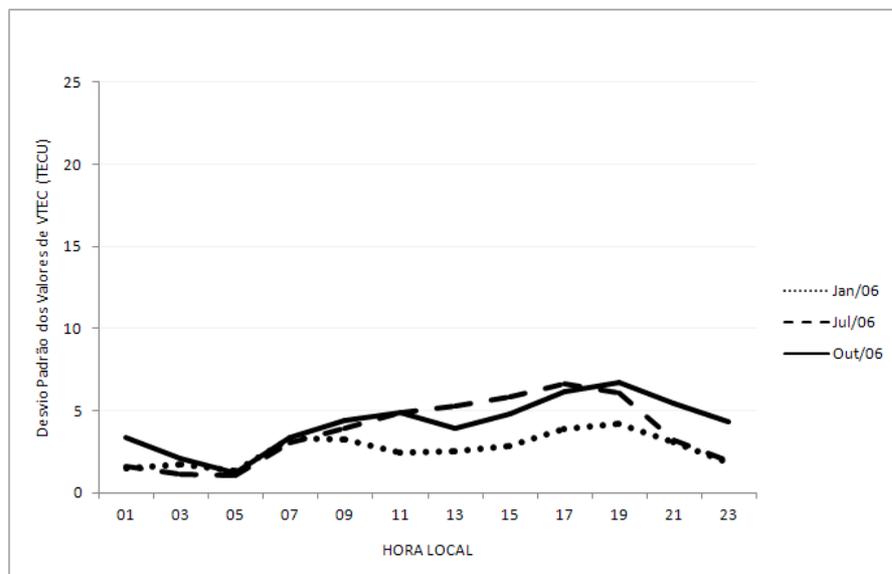


Figura 35 - Indicativo da variação espacial média do VTEC na região brasileira para o período de Baixa Atividade Solar

O conjunto de resultados (mapas e gráficos) exposto anteriormente permite avaliar o comportamento médio do VTEC nos meses de Janeiro e Julho (próximo aos solstícios) e no mês de Outubro (próximo ao equinócio de primavera) durante períodos de alta e baixa atividade solar. Deve-se ter em mente que a resolução espacial e temporal dos arquivos IONEX impede uma análise mais minuciosa do TEC na região brasileira, limitando o estudo a uma análise mais geral.

Em uma primeira análise visual dos mapas das Figuras 24 a 32 verifica-se que os maiores valores, bem como a maior variação diurna e espacial do VTEC, são encontrados para o período de alta atividade solar (2001 e 2002). Esse resultado era previsível e esperado, pois sabe-se que, quanto maior o número de manchas solares (o que caracteriza os anos com alta atividade solar), maior também é a densidade de elétrons na ionosfera. Não há como deixar de citar também os mapas do mês de Outubro de 2001, em especial após as 15 HL, quando grandes valores e variações espaciais de VTEC podem ser observados. Esse comportamento e os motivos para tal serão verificados mais detalhadamente no decorrer do capítulo.

Aprofundando a análise do comportamento do VTEC, têm-se a Figura 33, que apresenta a variação diurna média de VTEC na região brasileira nos meses do experimento. Esses dados permitem constatar, tanto para o período de alta, quanto para o de baixa atividade solar, que os menores valores médios de VTEC são encontrados entre 05 e 06 HL, e os maiores valores médios de VTEC são encontrados entre 14 e 17 HL, que é o horário de formação do primeiro pico da anomalia equatorial e também de alto fluxo de radiação eletromagnética solar. No período de alta atividade solar, principalmente no mês de Outubro de 2001, e com menor intensidade no mês de Janeiro de 2002, observa-se que os valores médios máximos de VTEC continuam bem altos (~100 TECU) até por volta das 22 HL, o que, sem dúvida, se deve à formação do segundo pico da anomalia equatorial, como também pode

ser verificado nos mapas do VTEC para o mês em questão. Valores altos de VTEC (70-80 TECU) são observados até mesmo nas primeiras horas da madrugada, no mês de Outubro de 2001. Esse comportamento noturno do VTEC, no entanto, não é observado durante o ano de baixa atividade solar, ocorrendo uma queda gradual dos valores de VTEC após as 17 HL em todos os meses do experimento. Batista (2003 *apud* MATSUOKA, 2007) afirma que esse segundo máximo nos valores de VTEC, que caracteriza a formação da anomalia equatorial noturna, geralmente não ocorre nos meses de baixa atividade solar, corroborando os resultados deste experimento.

Na análise da Figura 33 observa-se, ainda, uma grande redução dos valores de VTEC nos meses do ano de 2006 em relação aos meses do ano de 2001 e 2002. Através dos dados apresentados na Figura 34 e Figura 35, percebe-se que, além dos valores de VTEC serem menores em 2006, a variação espacial média (que pode ser analisada através do desvio padrão de VTEC no horário) também é bem menor e apresenta um comportamento semelhante entre os meses, alcançado seu mínimo por volta das 05 HL em todos os meses, horário no qual, como visto anteriormente, também são encontrados os menores valores de VTEC. Enquanto isso, altos valores de variação espacial média são encontrados para os meses sob influência da alta atividade solar, aumentando a partir das 14 HL e chegando a um máximo por volta das 20 HL, novamente caracterizando as formações da anomalia equatorial sobre o território brasileiro.

A apreciação desses resultados também ressalta, como pode ser visto nos mapas, que o mês com maiores valores, maior variação diurna e maior variação espacial (principalmente na direção norte-sul) do VTEC, em período de alta atividade solar, é o mês de Outubro, próximo ao equinócio de primavera. Já os menores valores e menores variações são encontrados no mês de Julho, próximo ao solstício de inverno. Esses resultados concordam com experimentos anteriores realizados na região brasileira em períodos de alta atividade

solar (MATSUOKA e CAMARGO, 2004; DAL POZ, 2005; MATSUOKA, 2007) e com a variação sazonal do VTEC citada na literatura. Já para o período de baixa atividade solar, uma menor diferença nos valores e variações de VTEC é observada entre os meses, ou seja, em períodos de baixa atividade solar a variação sazonal do VTEC é bem menor.

Na Tabela 6, pode-se verificar o alto percentual de redução dos valores médios mensais de VTEC, no ano de 2006, com a diminuição da atividade solar, em relação aos anos de alta atividade solar. Em relação ao ano de 2001 e 2002, a redução média geral em 2006 é de aproximadamente 70%.

Tabela 6 - Valores médios mensais de VTEC para o Brasil e percentual de redução do VTEC em 2006 com relação a 2001/2002

Meses	Valores Médios Mensais de VTEC (TECU)		Redução VTEC em 2006 (%)
	Alta atividade Solar	Baixa atividade Solar	
<b>Janeiro</b>	59	17	71
<b>Julho</b>	31	11	64
<b>Outubro</b>	73	19	75

Visando analisar a variação latitudinal do VTEC, e assim, poder analisar o comportamento da anomalia equatorial mais detalhadamente no Brasil, fixou-se uma longitude geográfica (50°W) na grade média mensal e gerou-se gráficos horários plotando os valores médios mensais de VTEC entre as latitudes geográficas de 5°N e 35°S. Esses gráficos são apresentados nas Figuras 36 a 41.

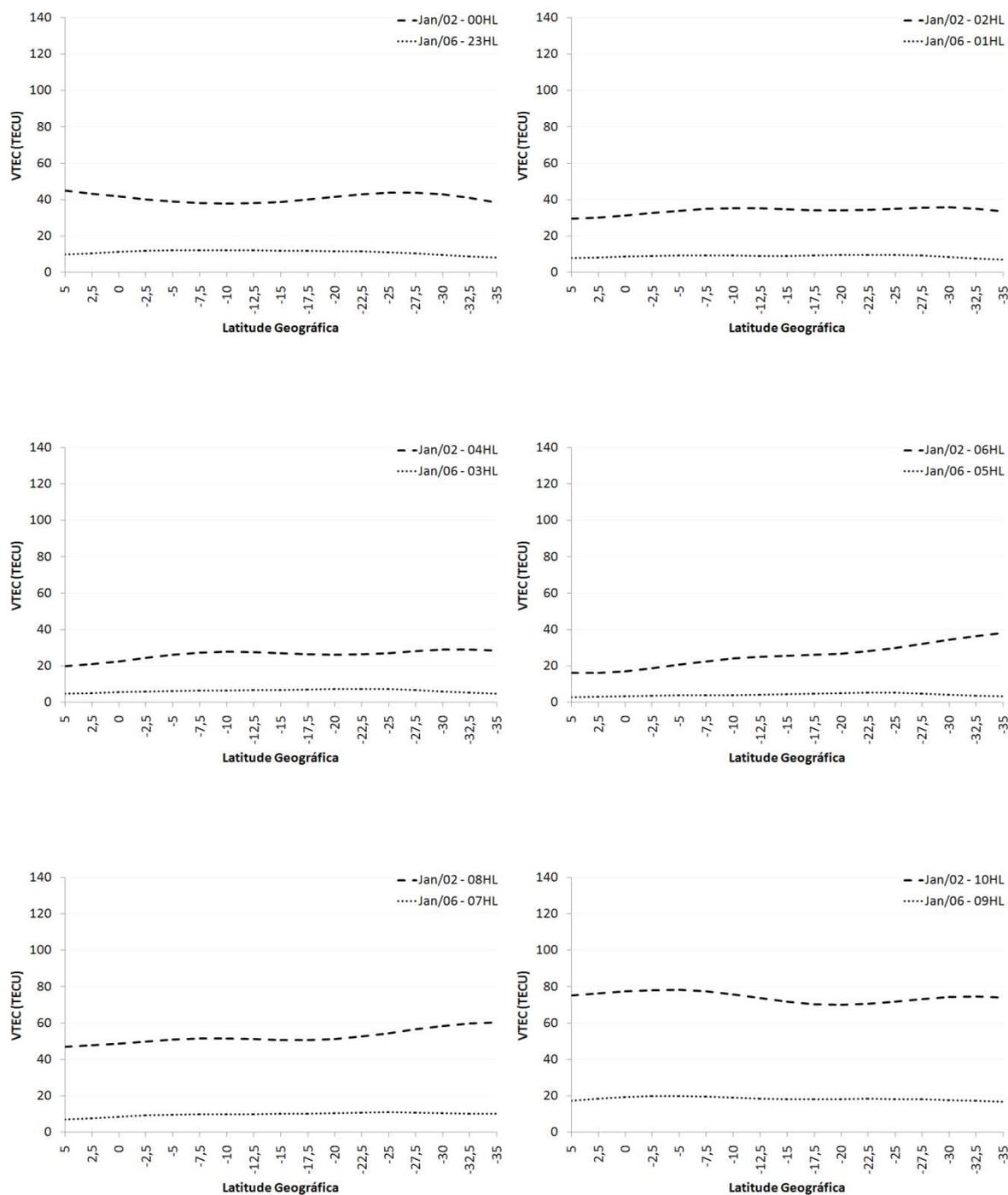


Figura 36 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Janeiro 2002 (00-10 HL) e Janeiro 2006 (23-09 HL)

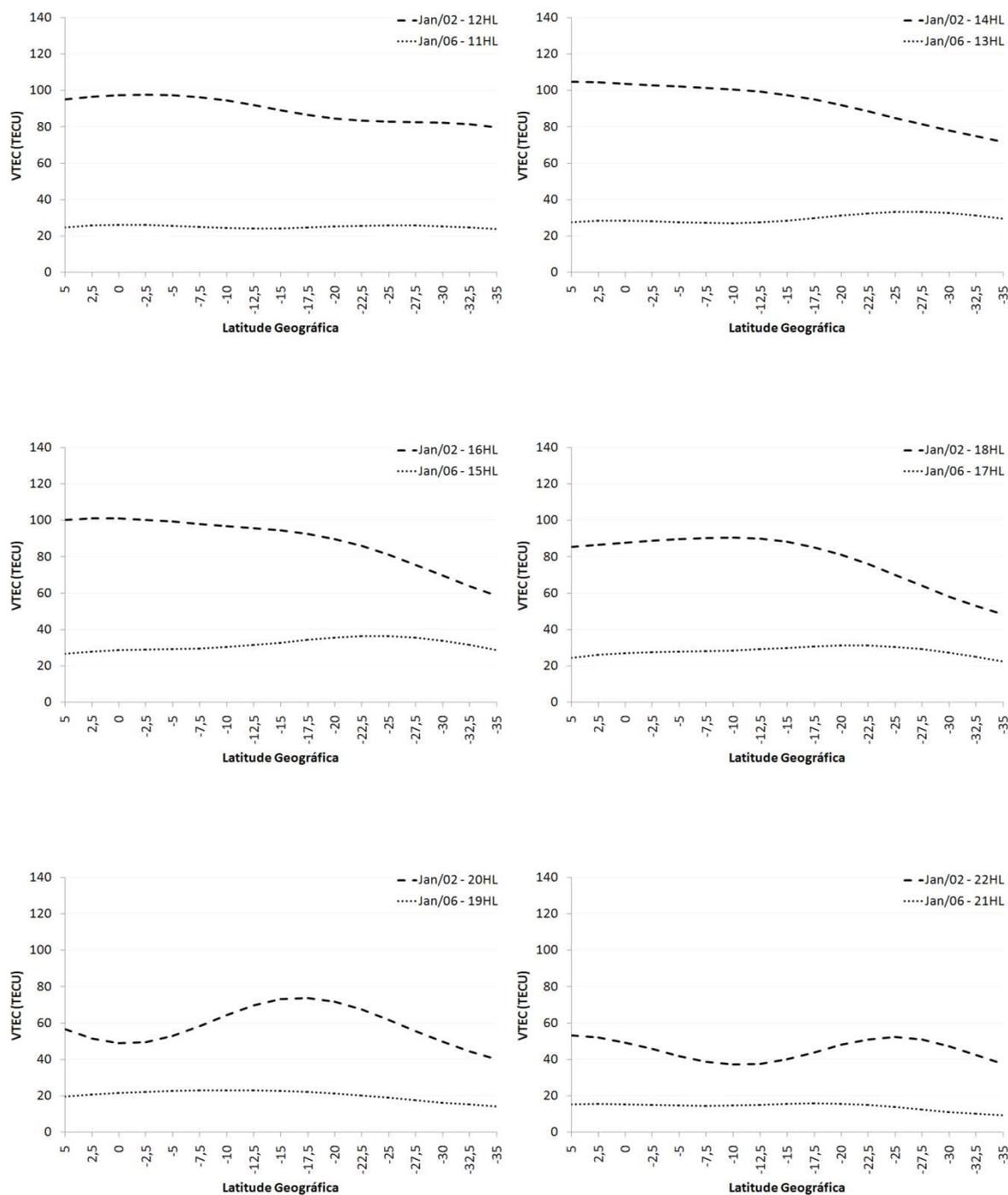


Figura 37 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Janeiro 2002 (12-22 HL) e Janeiro 2006 (11-21 HL)

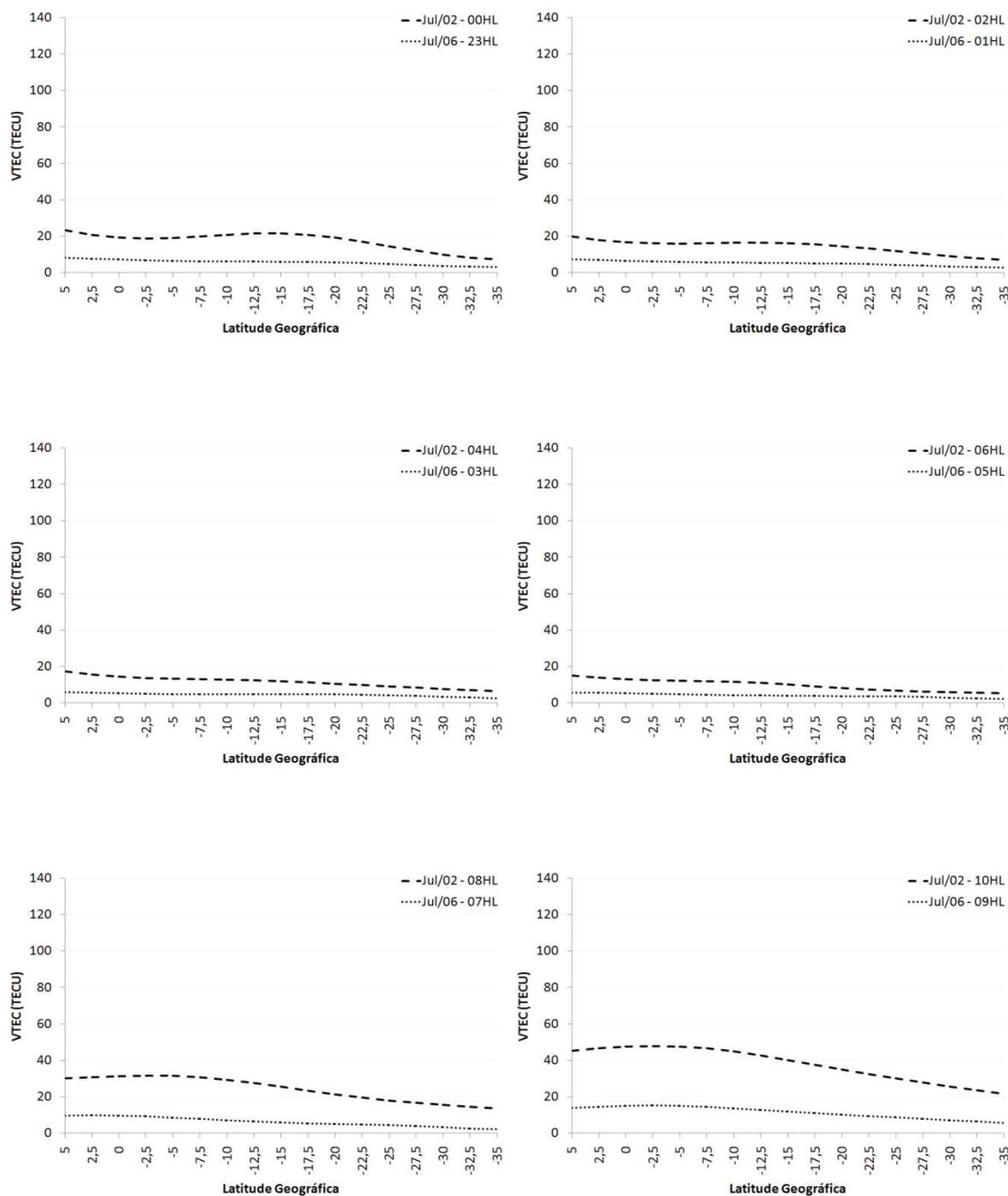


Figura 38 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Julho 2002 (00-10 HL) e Julho 2006 (23-09 HL)

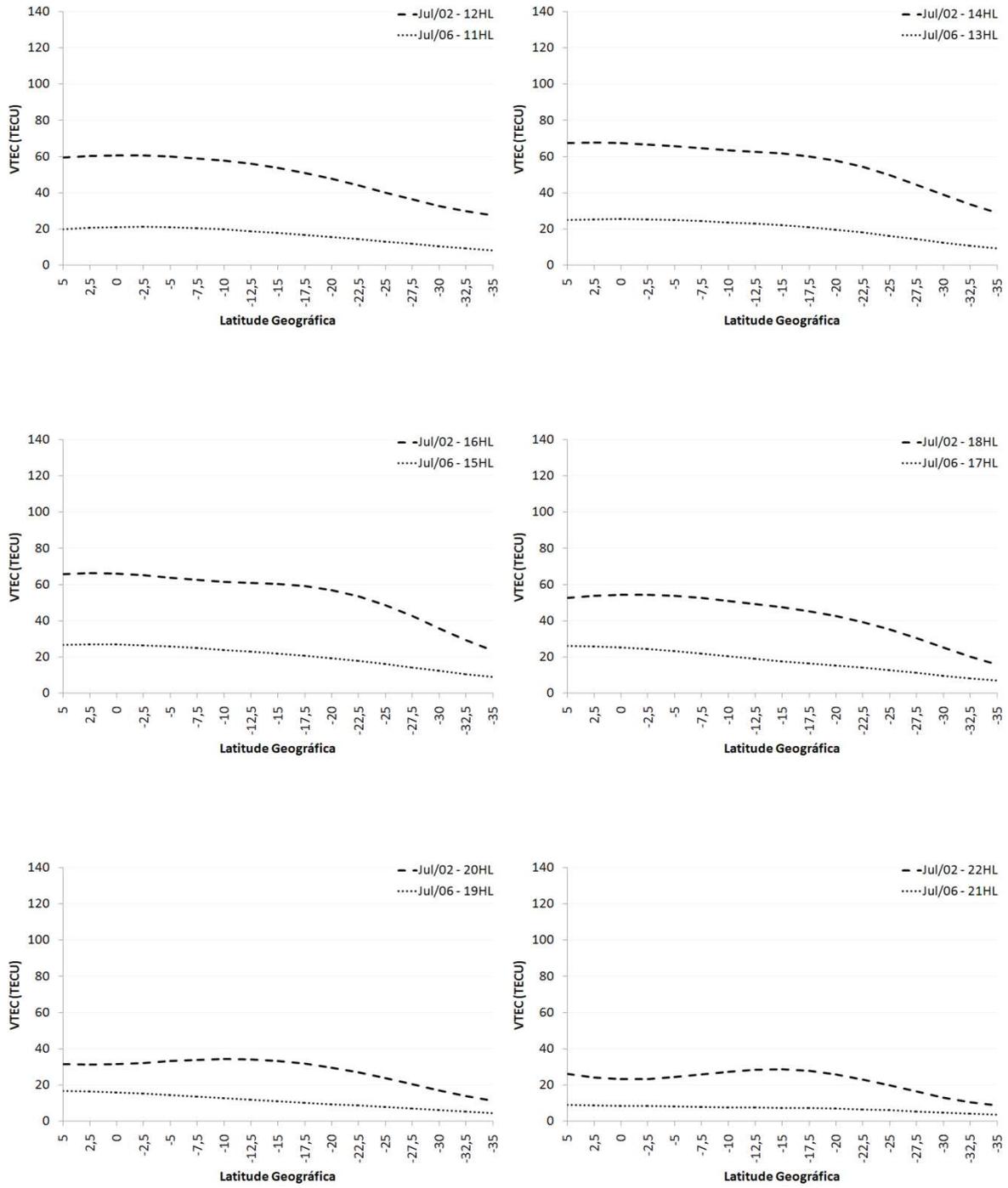


Figura 39 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Julho 2002 (12-22 HL) e Julho 2006 (11-21 HL)

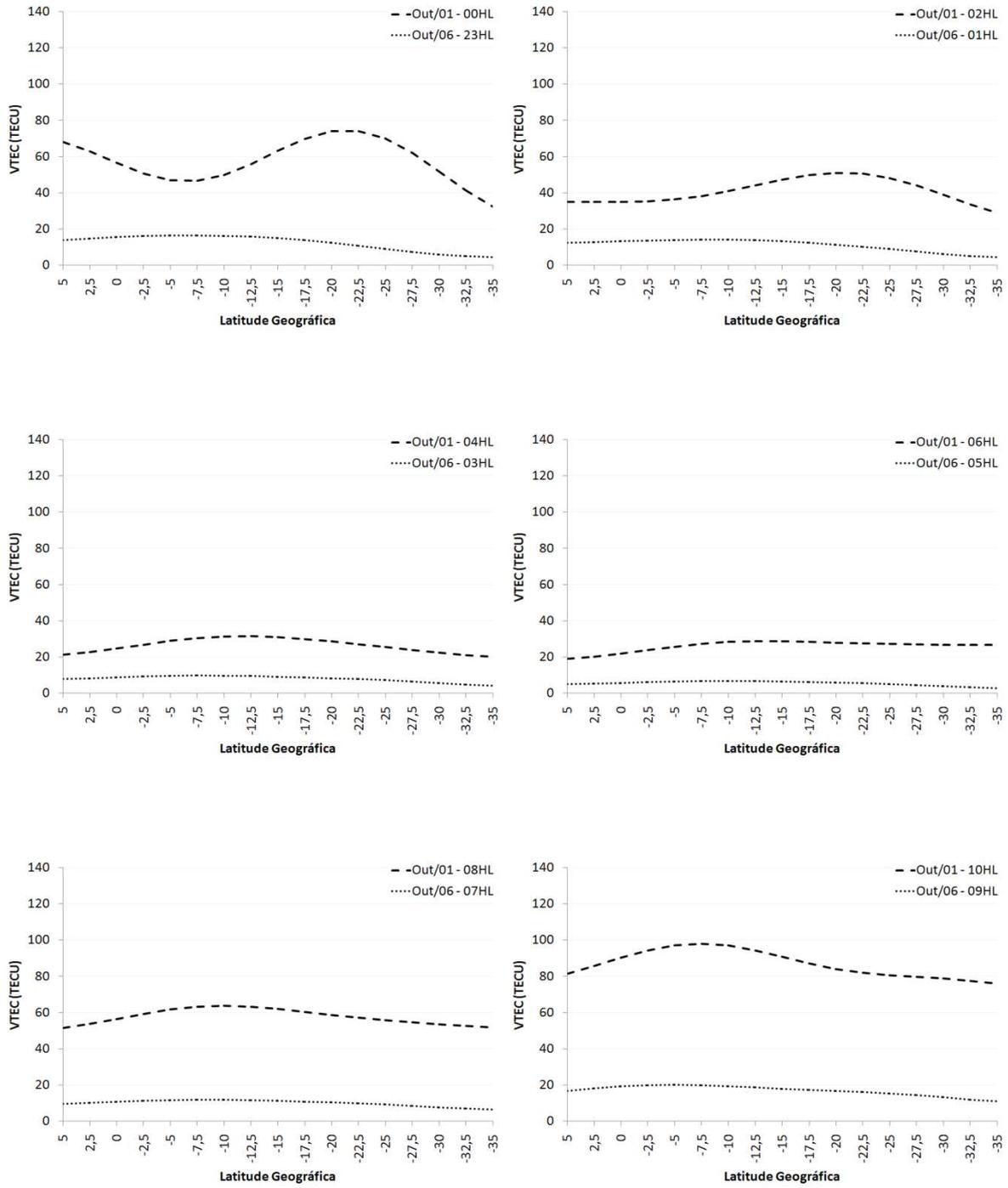


Figura 40 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Outubro 2001 (00-10 HL) e Outubro 2006 (23-09 HL)

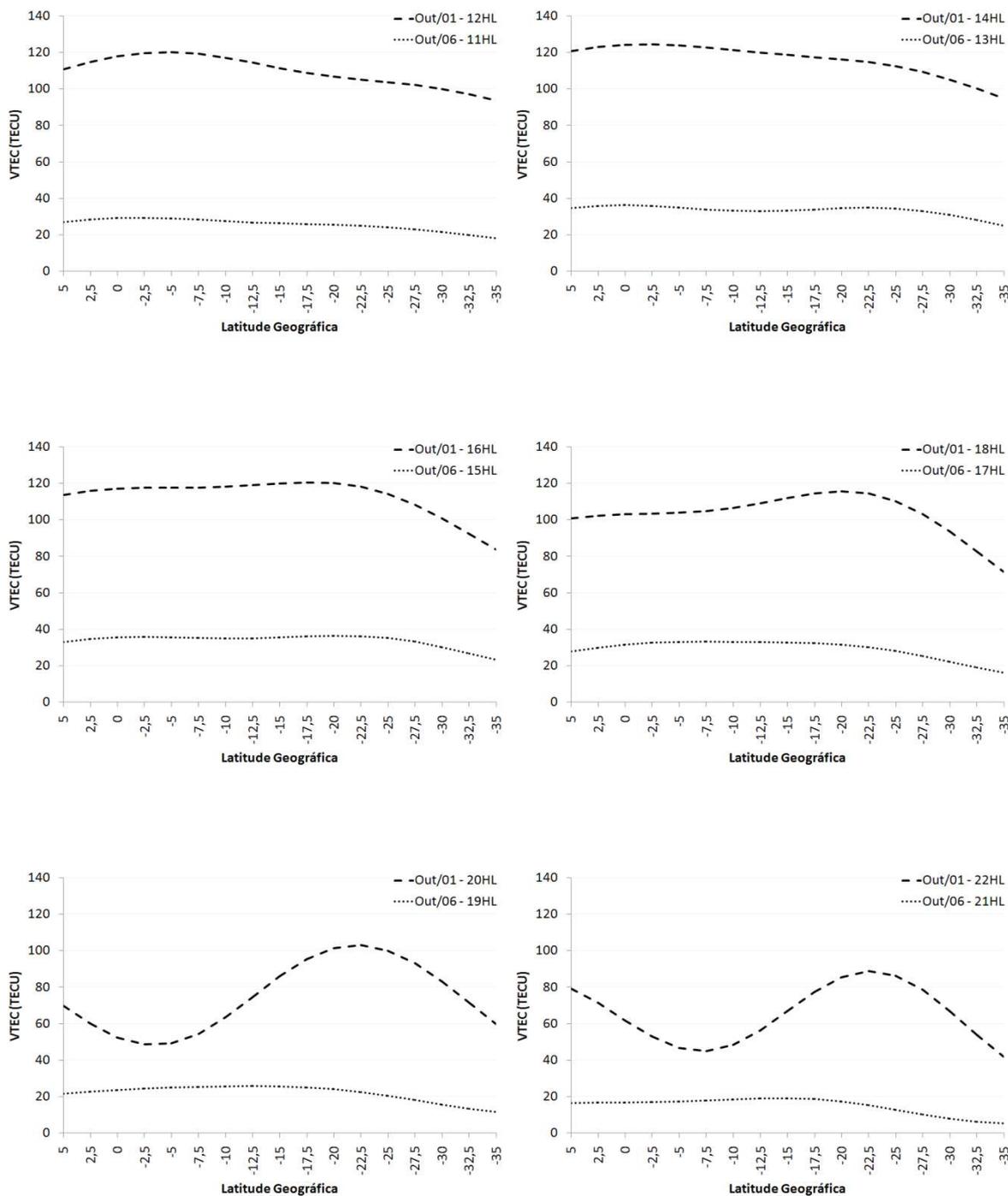


Figura 41 - Variação latitudinal média do VTEC (para a longitude geográfica 50°W) em Outubro 2001 (12-22 HL) e Outubro 2006 (11-21 HL)

Uma primeira análise dos gráficos das Figuras 36 a 41 confirma a diminuição considerável dos valores de VTEC em 2006 com relação a 2001 e 2002. Por causa desses valores médios de VTEC, tão baixos nos meses do ano 2006, que não chegam a ultrapassar 40

TECU, a variação latitudinal média também é muito pequena ao longo do dia em todos os meses, não sendo possível observar a formação das cristas da anomalia equatorial, mesmo no mês de Outubro, onde os valores de VTEC são um pouco maiores que nos outros meses. No entanto, as maiores variações latitudinais médias de VTEC são observadas no período da tarde, entre 14 e 18 HL.

Já no período de alta atividade solar, as variações latitudinais médias são maiores em todos os meses, em comparação ao ano de 2006, pois os valores de VTEC também são maiores. Caracteristicamente, as menores variações e os menores valores latitudinais de VTEC são encontrados no mês de Julho. Nesse mês, observa-se uma variação latitudinal maior no período da tarde, entre 12 e 18 HL, com um decréscimo dos valores de VTEC nas baixas latitudes (a partir de 20°S, aproximadamente). Entre 20 e 22 HL, é possível observar a segunda formação da anomalia equatorial; embora a variação latitudinal média seja bastante suave, observa-se um pequeno pico de VTEC por volta de 17,5° de latitude geográfica.

No mês de Janeiro, os valores de VTEC e as variações são maiores que em Julho, mas o comportamento é similar; as maiores variações são encontradas no período da tarde, entre 14 e 18 HL, com uma diminuição dos valores de VTEC nas baixas latitudes (a partir de 20°S, aproximadamente). No entanto, apesar da variação latitudinal ser menor, é possível observar, nos gráficos, a segunda formação da anomalia equatorial por volta de 20 e 22 HL, inclusive com a caracterização da crista sul, na latitude geográfica aproximada de 17,5°S e 25°S.

O mês de Outubro, por sua vez, é o que apresenta os maiores valores e a maior variação latitudinal do VTEC. Entre 12 e 18 HL, os valores de VTEC são bem altos, embora a variação latitudinal não seja tão elevada. No entanto, a partir das 20 HL, e estendendo-se até algumas horas após a meia-noite, a variação latitudinal do VTEC é muito alta, ficando

perfeitamente caracterizada a formação do segundo pico da anomalia equatorial, com a crista sul se apresentando na latitude geográfica aproximada de 22,5°S. Esse resultado concorda com a teoria da formação da anomalia equatorial, que explica que a formação noturna é causada pela intensificação do efeito fonte (pico pré-inversão), nas horas próximas ao pôr-do-sol. Como essa intensificação do efeito fonte desloca elétrons da região do equador geomagnético (onde não está mais ocorrendo produção de elétrons por causa do pôr-do-sol e do conseqüente cessamento da fotoionização) para as regiões de baixa latitude, ocorre uma maior variação latitudinal do VTEC (na direção norte-sul) na região brasileira nas horas após o pôr-do-sol. Essa variação latitudinal normalmente não é tão intensa no período da tarde, porque, apesar do efeito fonte existir, continua ocorrendo produção de elétrons por fotoionização na região do equador geomagnético.

Os resultados também estão em acordo com outro ponto importante já verificado na teoria: durante períodos de alta atividade solar, o pico pré-inversão, que leva à segunda formação da anomalia equatorial, ocorre em todas as estações do ano, sendo maior nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão, e menor nos meses próximos ao solstício de inverno. Além disso, a não observância da anomalia equatorial noturna nos resultados de 2006, concorda novamente com a teoria, que diz que o pico pré-inversão praticamente não ocorre em período de baixa atividade solar; quando ocorre, é somente em meses próximos aos equinócios e com menor intensidade, se comparado aos períodos de alta atividade solar. Vale salientar que, ainda que ocorresse um forte pico pré-inversão em período de baixa atividade solar, a variação latitudinal continuaria muito baixa, pois baixos valores de VTEC estão presentes neste período.

### 3.2 EXPERIMENTO: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO POR PONTO

No posicionamento com GPS, o termo posicionamento por ponto (ou absoluto) normalmente refere-se à obtenção da posição de uma estação, a partir de observações de pseudodistâncias derivadas do código C/A, e da fixação dos parâmetros de órbita e correções para o relógio dos satélites (efemérides transmitidas) aos valores contidos nas mensagens de navegação (MONICO, 2000).

Visando obter melhores resultados no posicionamento por ponto, são utilizadas, ainda, as efemérides precisas ou pós-processadas. Essas efemérides precisas (formato SP3 – *Standard Product 3*) são disponibilizadas por diversas instituições, como por exemplo o IGS, que fornece dados de efemérides precisas no endereço eletrônico [http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html), e o NRCan (*Natural Resources Canada*), que disponibiliza dados de efemérides precisas no endereço eletrônico [http://www.geod.nrcan.gc.ca/online\\_data\\_e.php](http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php).

No experimento apresentado nesta seção, o objetivo é verificar a influência da ionosfera em períodos de alta e baixa atividade solar no posicionamento por ponto com GPS. Para tanto, foram utilizados dados GPS dos mesmos dias e meses para os quais foi feita a avaliação do comportamento do TEC, na seção 3.1 deste capítulo. Também foi realizado o posicionamento por ponto utilizando efemérides precisas, no intuito de minimizar a influência de outros erros que contaminam as observáveis GPS (erro orbital, erro troposférico), deixando predominante nos resultados o erro devido à ionosfera.

Um estudo preliminar nesta mesma linha foi desenvolvido na região brasileira por Matsuoka, Camargo e Dal Poz (2004), onde se realizou o posicionamento por ponto (utilizando as efemérides precisas do IGS), a partir das observações de pseudodistâncias (C/A), para o dia 1º de Abril de 2001 (alta atividade solar) e 1º de Abril de 2004 (declínio da atividade solar), com o objetivo de verificar a melhora da performance do posicionamento com GPS com o declínio da atividade solar. A análise dos resultados obtidos mostrou uma redução média de aproximadamente 25% do erro horizontal para o dia 1º de abril de 2004 quando comparado ao de 2001. A redução média do erro em altitude geométrica foi de 43% aproximadamente. De maneira geral, observou-se uma melhora na precisão e acurácia no posicionamento para o dia de 2004 em comparação com o dia de 2001.

### 3.2.1 Tratamento dos dados, resultados e análises

Para o desenvolvimento desse experimento, procurou-se uma estação GPS, pertencente à RBMC, localizada em uma região onde os valores de TEC fossem altos na região brasileira, ou seja, nas regiões que normalmente ocorre a formação da crista sul da anomalia equatorial. A estação escolhida foi a estação RIOD, localizada no Rio de Janeiro, nas coordenadas geodésicas  $22^{\circ}49'04,2399''S$  e  $43^{\circ}18'22,5958''W$  (SIRGAS 2000). A sua posição dentro do território brasileiro é apresentada na Figura 42.



Figura 42 - Posição da estação RIOD (RBMC) no Brasil

Os dados da estação RIOD da RBMC, para os dias citados na Tabela 5, foram processados no *software* GPSPACE 3.3 (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*), desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan. No processamento foram utilizadas somente as pseudodistâncias advindas do código C/A em L1, coletadas com ângulo de elevação superior a 15 graus. Para evitar diferenças significativas entre os dias, em termos de geometria dos satélites, só foram consideradas as posições estimadas com GDOP (*Geometric Dilution of Precision – Diluição da Precisão Geométrica*) menor que 7. Utilizou-se, também, no processamento, as efemérides precisas. Com esses procedimentos, e considerando que o *software* GPSPACE utiliza o modelo de Hopfield para correções do erro troposférico, procurou-se minimizar os diversos erros envolvidos no posicionamento, deixando predominante a influência da ionosfera sobre os resultados. Ainda com esse objetivo, não foi utilizado no processamento nenhum modelo para correção ionosférica.

Com base nos valores dos erros ou discrepâncias (coordenadas calculadas comparadas com as coordenadas conhecidas da estação) cometidos em cada época, para uma amostra de 24 horas (um dia), o *software* GPSPACE disponibiliza o Erro Médio Quadrático (EMQ) para cada dia. O EMQ corresponde à raiz quadrada da média do quadrado dos erros cometidos em cada época, ou seja, representa a dispersão das determinações em relação à coordenada conhecida da estação, com 68,3% de probabilidade (GPSPACE, 2000), para uma única época. Sendo assim, para cada dia do experimento, foi obtido o EMQ planimétrico e altimétrico. A partir desses valores calculou-se, então, a média mensal do EMQ e a redução média mensal do EMQ para o ano de 2006, em relação a 2001 e 2002 (Tabela 7).

Tabela 7 - Média mensal do EMQ e redução média mensal do EMQ em 2006 – Posicionamento por ponto

<b>Média do EMQ Janeiro/2002</b>		<b>Média do EMQ Janeiro/2006</b>		<b>Redução do EMQ em 2006</b>	
<b>Planimetria (m)</b>	<b>Altitude Geom (m)</b>	<b>Planimetria (m)</b>	<b>Altitude Geom (m)</b>	<b>Planimetria (%)</b>	<b>Altitude Geom (%)</b>
4,57	17,90	1,91	6,39	58	64

<b>Média do EMQ Julho/2002</b>		<b>Média do EMQ Julho/2006</b>		<b>Redução do EMQ em 2006</b>	
<b>Planimetria (m)</b>	<b>Altitude Geom (m)</b>	<b>Planimetria (m)</b>	<b>Altitude Geom (m)</b>	<b>Planimetria (%)</b>	<b>Altitude Geom (%)</b>
3,43	9,29	1,66	3,97	52	57

<b>Média do EMQ Outubro/2001</b>		<b>Média do EMQ Outubro/2006</b>		<b>Redução do EMQ em 2006</b>	
<b>Planimetria (m)</b>	<b>Altitude Geom (m)</b>	<b>Planimetria (m)</b>	<b>Altitude Geom (m)</b>	<b>Planimetria (%)</b>	<b>Altitude Geom (%)</b>
6,58	22,58	2,14	6,36	68	72

A avaliação dos dados expostos na Tabela 7 permite verificar, inicialmente, uma diminuição significativa da média mensal do EMQ no ano de 2006 (período de baixa atividade solar) em relação a 2001 e 2002 (período de alta atividade solar). Considerando que,

no processamento dos dados, procurou-se deixar predominante o erro devido à ionosfera minimizando outras fontes de erro, é possível estabelecer uma correlação direta entre a diminuição do número de manchas solares – e conseqüente diminuição da radiação eletromagnética e densidade de elétrons na ionosfera (Figura 23) – e a redução significativa dos erros nas posições estimadas para o ano de 2006, período de baixa atividade solar. De maneira geral, para o ano de 2006, essa redução do EMQ é de 59% em planimetria e 64% em altitude geométrica, aproximadamente.

Para facilitar a comparação dos resultados entre os meses, no período de alta e baixa atividade solar, a Figura 43 apresenta o EMQ mensal separado nas componentes planimétrica e altimétrica. Esses valores foram calculados a partir das discrepâncias entre as coordenadas calculadas e as conhecidas da estação para cada época, em cada dia dos meses do experimento. Sendo assim, os gráficos da Figura 43 representam a média mensal do EMQ a cada 2 horas para cada mês.

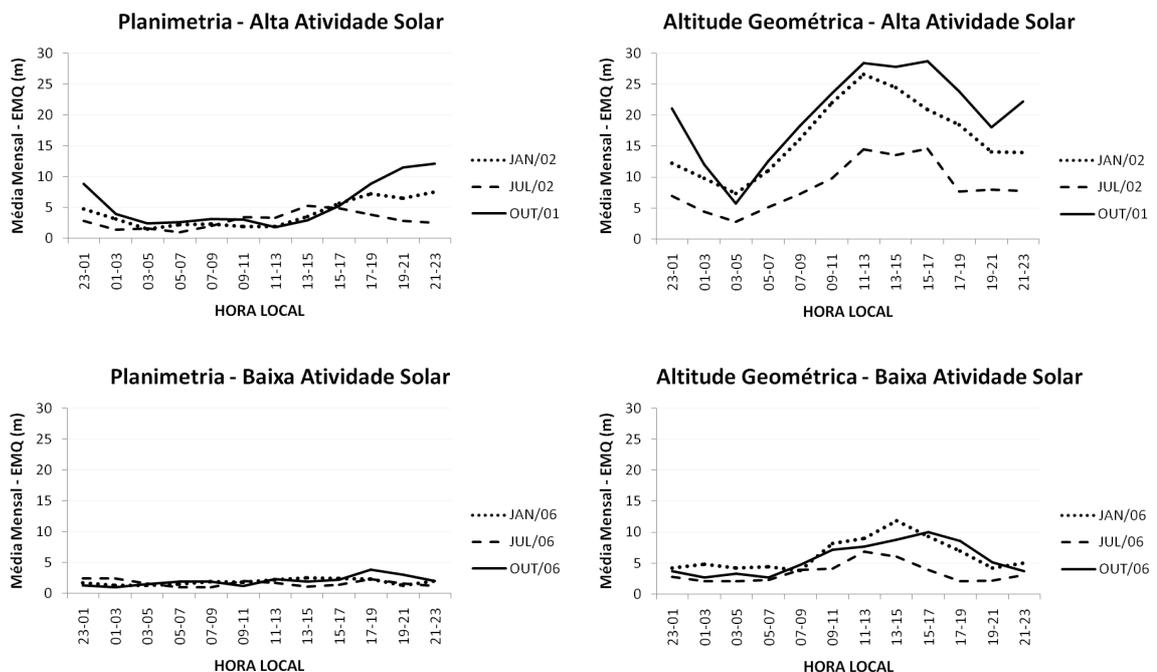


Figura 43 - EMQ mensal para o período de Alta e Baixa Atividade Solar – Posicionamento por ponto

Os dados da Figura 43 permitem estabelecer uma relação entre as variações sazonais do TEC e o comportamento do EMQ nos meses do experimento. Com efeito, especialmente para o período de alta atividade solar, os maiores erros são encontrados no mês de Outubro, próximo ao equinócio de primavera, e os menores erros são encontrados no mês de Julho, próximo ao solstício de inverno, acompanhando a variação sazonal do TEC para o mesmo período, analisada na seção 3.1. No ano de baixa atividade solar, a variação sazonal não é tão patente, devido às menores diferenças de erros entre os meses, acompanhando as menores diferenças entre os meses que também ficaram caracterizadas na análise do TEC. O mês de Outubro, que apresenta os maiores erros no período de alta atividade solar, também é o que apresenta a maior redução destes erros no período de baixa atividade solar. Retomando o que foi discutido na seção 3.1, verifica-se que também foi nesse mês que foram encontradas as maiores reduções de TEC, tanto em valores quanto em variações, entre o período de alta e baixa atividade solar, estabelecendo, mais uma vez, a relação entre a redução do TEC e a redução do erro no posicionamento com GPS.

Ainda é possível observar que os maiores erros são encontrados para a componente altimétrica, em todos os meses do experimento, tanto em período de alta quanto de baixa atividade solar, concordando com os resultados apresentados por Matsuoka (2007) e El Gizawy (2003), que referem que este comportamento tem relação com a geometria dos satélites, que favorece a compensação dos erros que contaminam as observáveis no plano horizontal, durante o ajustamento das observações. Por essa razão, uma menor correlação com o TEC é esperada para os erros encontrados na componente planimétrica.

De maneira a obter uma análise mais detalhada dos dados, a Figura 44 e Figura 45 apresentam a variação do EMQ em cada dia do experimento, com resolução de 2 horas, tanto para o período de alta, quanto de baixa atividade solar.

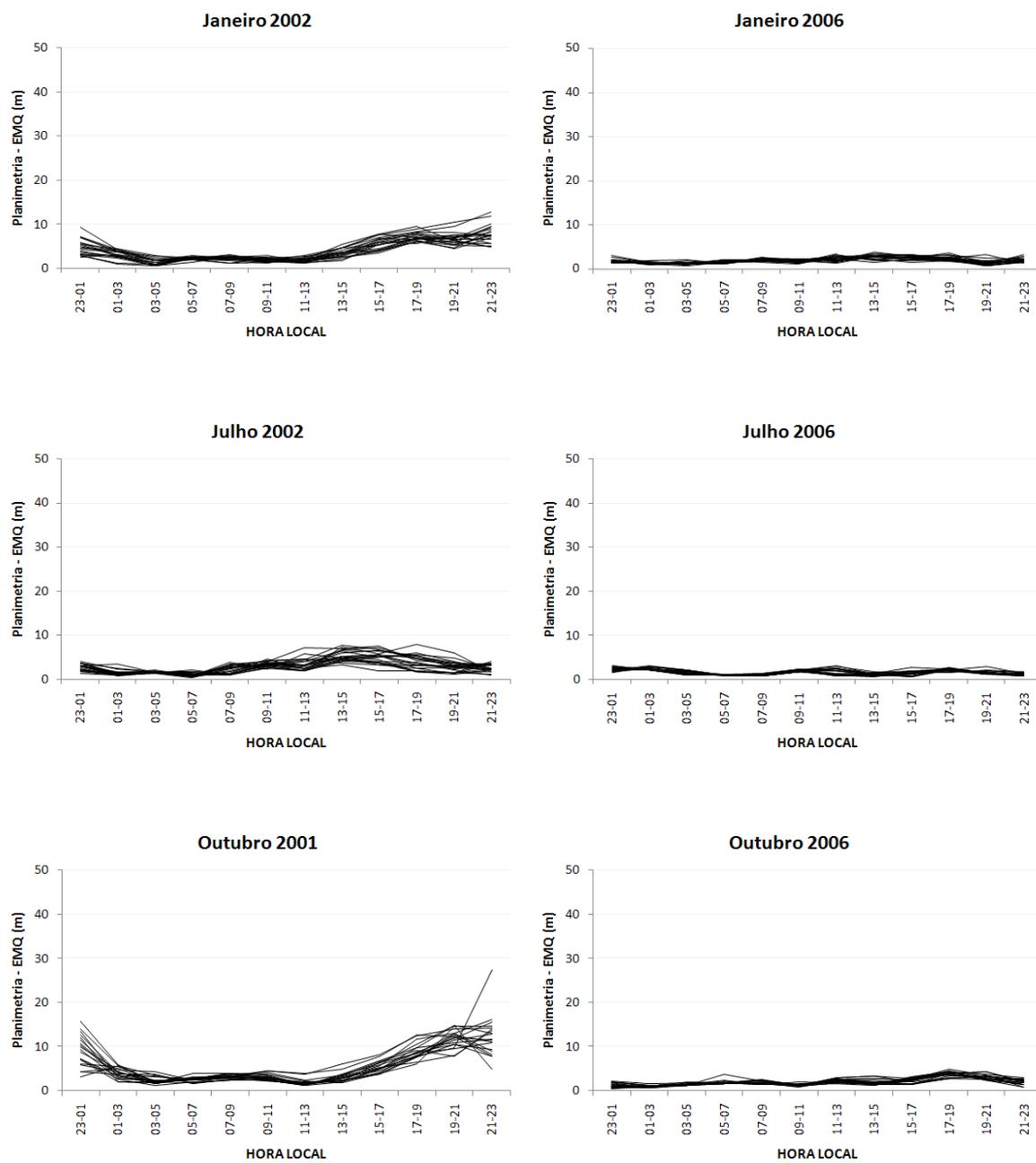


Figura 44 - EMQ em Planimetria para os dias do experimento – Posicionamento por ponto

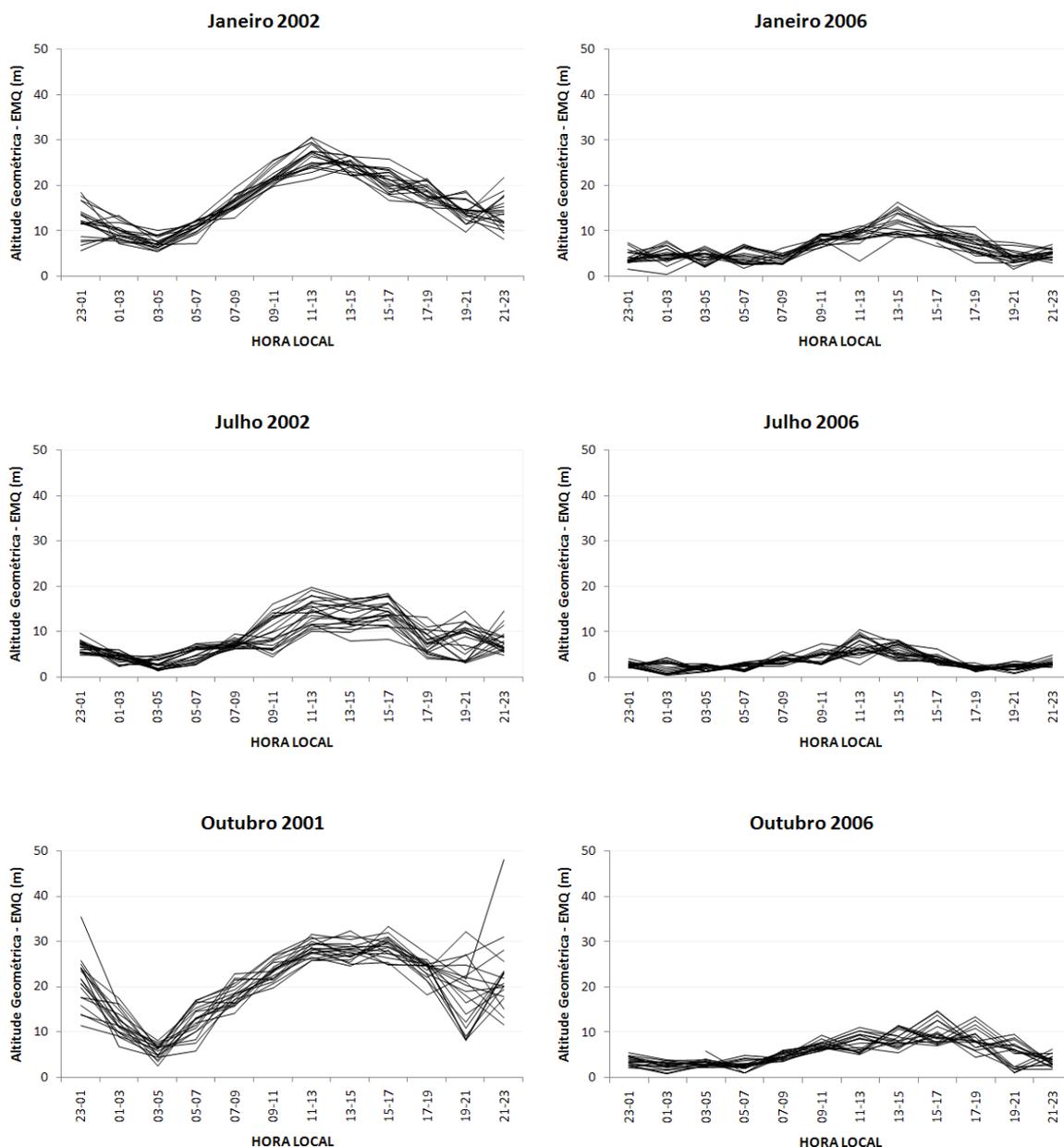


Figura 45 - EMQ em Altitude Geométrica para os dias do experimento – Posicionamento por ponto

Conforme já verificado na análise dos dados da Tabela 7 e da Figura 43, as Figuras 44 e 45 também permitem observar a redução geral do EMQ no ano de 2006, em relação a 2001 e 2002. Em 2006, além dos erros serem bem menores, eles também variam muito pouco ao longo do dia e apresentam comportamento semelhante em todos os meses, principalmente na componente planimétrica, onde o EMQ é quase uniforme ao longo do dia e

nunca ultrapassa 5 m, em todos os dias envolvidos no experimento. Ainda em 2006, verifica-se um pequeno aumento dos erros na componente altimétrica durante a tarde, caracterizando a influência da ionosfera, pois, em períodos de baixa atividade solar, é nesse horário que são encontrados os maiores valores do TEC no território brasileiro.

Na análise dos gráficos de EMQ referentes ao período de alta atividade solar, é possível observar, inicialmente, que, para todos os meses, os menores valores de erros são encontrados entre 03 e 05 HL, que também é o período onde são encontrados os menores valores e variações de TEC. De maneira geral, ainda é possível verificar um aumento dos erros com o aumento diário da radiação solar (aumento do TEC) e uma diminuição dos mesmos com o anoitecer (diminuição do TEC). Particularizando a análise para a componente altimétrica, verifica-se que, o mês de Outubro, caracteristicamente, apresenta um comportamento diferenciado do início da noite até as primeiras horas da madrugada, quando é possível observar, além de maiores variações nos erros entre os dias do experimento, um novo aumento dos mesmos. Esse período coincide com a formação da anomalia equatorial noturna no território brasileiro que, no mês de Outubro e em ano de alta atividade solar, apresenta-se de forma bastante intensificada (seção 3.1). Sabe-se também que, neste período, é comum a ocorrência de irregularidades ionosféricas (seção 2.2.2.3.1), as quais podem afetar as observáveis GPS. Nesse sentido, o aumento dos erros em altitude geométrica entre o início da noite e as primeiras horas da madrugada no mês de Outubro de 2001 estabelece uma possível relação com a formação da anomalia equatorial noturna, bastante intensificada durante esse período.

Essa possível relação com a formação da anomalia equatorial noturna surge novamente, de forma bastante interessante, na análise do EMQ na componente planimétrica para os meses de Outubro de 2001 e Janeiro de 2002 (alta atividade solar). Embora se espere pouca correlação entre o erro da componente planimétrica e o erro devido à ionosfera nas

observáveis GPS, percebe-se claramente, nos gráficos da Figura 44, um aumento significativo do EMQ planimétrico entre o início da noite e as primeiras horas da madrugada, enquanto no restante do dia são encontrados erros bem menores e praticamente constantes. Esse comportamento ocorre de forma mais intensa no mês de Outubro de 2001, mas também é perceptível no mês de Janeiro 2002.

Considerando a teoria e os resultados do experimento da seção 3.1, sabe-se que é nesse período, entre o início da noite e primeiras horas da madrugada, e em meses próximos aos equinócios e solstício de verão, que, em períodos de alta atividade solar, são encontradas as maiores variações espaciais de TEC sobre o território brasileiro, justamente por causa da formação da anomalia equatorial noturna. Relembrando que a compensação dos erros que contaminam as observáveis GPS no plano horizontal (favorecendo a componente planimétrica) está ligada à geometria (distribuição) dos satélites, é possível associar esse aumento dos erros planimétricos com a alta variação espacial do TEC no período, variação esta que faz com que possam ocorrer erros ionosféricos muito diferentes entre as pseudodistâncias obtidas para cada satélite observado em um mesmo instante, diminuindo assim a compensação dos erros no plano horizontal. Exemplificando: em um mesmo instante, a estação RIOD pode estar coletando dados de um satélite localizado na direção do equador geomagnético, onde baixos valores de TEC são encontrados (erros ionosféricos pequenos), e de outro satélite, cujo sinal pode ter atravessado a região da crista sul da anomalia equatorial (erros ionosféricos grandes). Em decorrência disso, espera-se uma menor compensação, no plano horizontal, dos erros devidos à ionosfera nesse período, o que, conseqüentemente, acaba por aumentar o EMQ da componente planimétrica.

Esse comportamento do EMQ planimétrico não é observado durante o período da tarde, o que pode ser explicado pelo fato de, durante a tarde, mesmo com a formação do primeiro pico da anomalia equatorial, a variação espacial do TEC é bem mais baixa no

território brasileiro, ou seja, as pseudodistâncias obtidas para cada satélite observado em um mesmo instante possuem erros (devidos à ionosfera) mais similares, favorecendo a compensação dos erros no plano horizontal e melhorando os resultados. Sabe-se também que, nos meses do período de baixa atividade solar e mesmo no período de alta atividade solar, nos meses próximos ao solstício de inverno, praticamente não é possível observar de forma destacada a anomalia equatorial noturna. Isso pode ser uma possível explicação para o fato de o comportamento noturno do EMQ planimétrico, observado em Outubro de 2001 e Janeiro de 2002, não ser observado em Julho de 2002 e em todos os meses do ano de 2006.

Também é possível observar, tanto na componente planimétrica (Figura 44), quanto na componente altimétrica (Figura 45) de Outubro de 2001, um dia com comportamento bastante diferenciado entre 19 e 21 HL. A análise dos índices geomagnéticos do dia em questão permite observar que o mesmo (11 de Outubro) foi classificado como geomagneticamente ativo, o que possivelmente influenciou nesse comportamento não padrão do EMQ.

### 3.3 EXPERIMENTO: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO RELATIVO

O posicionamento relativo trata da determinação da posição de um ponto em relação à posição de outro(s) cujas coordenadas são conhecidas (MONICO, 2000). No posicionamento relativo, a observável normalmente utilizada é a dupla diferença de fase e/ou pseudodistância (MONICO, 2000), onde usualmente grande parte do erro sistemático devido

à ionosfera pode ser cancelado, principalmente em linhas de base curtas, onde as observações GPS, feitas pelas estações, estão sob condições ionosféricas muito semelhantes, e o erro da ionosfera, que contamina as observáveis, é altamente correlacionado entre os receptores. No entanto, quando a linha de base é mais extensa, como a utilizada neste experimento, a ionosfera pode exercer grande influência nos resultados do posicionamento relativo com receptores de uma frequência, principalmente considerando que o território brasileiro, como visto na seção 3.1, se caracteriza por altas variações espaciais do TEC, em determinados horários e períodos, o que faz com que a maior parte do erro da ionosfera não possa ser eliminado, afetando assim a acurácia do posicionamento.

Um estudo preliminar foi realizado por Dal Poz, Camargo e Aguiar (2008) para verificar a melhora no desempenho do posicionamento relativo, em períodos de baixa atividade solar, utilizando dados GPS de duas estações RBMC em uma linha de base de aproximadamente 430 km (PSTE-PARA), para quatro dias do ano de 2001 e 2006. Esses dados foram processados, utilizando as duplas diferenças de fase e de código da portadora L1, para o período de alta atividade solar (2001), e comparados com dados processados para o período de baixa atividade solar (2006). Os primeiros resultados para o período de alta atividade solar mostraram efeitos significativos da ionosfera na componente altimétrica, principalmente em horários de maiores irregularidades e anomalias ionosféricas, sendo possível observar a variação sazonal da ionosfera nos erros, com piores resultados encontrados nos dias próximos aos equinócios (mês de Abril e Outubro). De maneira geral, mesmo com parte dos erros sendo eliminada através da dupla diferenciação das observáveis GPS, altos valores de discrepâncias foram observados nos 4 dias do período de máximo solar, atingindo cerca de 25 m, tanto na componente planimétrica, quanto na altimétrica. Já no período de baixa atividade solar, observou-se uma melhora muito significativa nos resultados dos 4 dias, sendo que o valor máximo de discrepância encontrado foi de aproximadamente 5,5

m, embora os erros tenham ficado, na maioria, abaixo de 0,5 m. Nesse período, não pôde ser verificada de forma significativa a variação sazonal da ionosfera nos resultados, mas os menores valores de erros foram encontrados para o dia próximo ao solstício de inverno.

Neste experimento, o objetivo é verificar a influência, no posicionamento relativo, das variações do TEC em períodos de alta e baixa atividade solar, utilizando uma amostra maior de dados. Para tanto, serão utilizados dados GPS dos mesmos dias e meses para os quais foi feita a avaliação do comportamento do TEC e do posicionamento por ponto, na seção 3.1 e seção 3.2 desse capítulo.

### 3.3.1 Tratamento dos dados, resultados e análises

Para o desenvolvimento desse experimento, utilizaram-se estações GPS pertencentes à RBMC, localizadas em uma região caracterizada por altos valores e altas variações espaciais de TEC. As estações escolhidas foram RIOD, localizada no Rio de Janeiro, e VICO, localizada em Minas Gerais, formando uma linha de base de aproximadamente 232 km, cuja posição dentro do território brasileiro é apresentada na Figura 46.

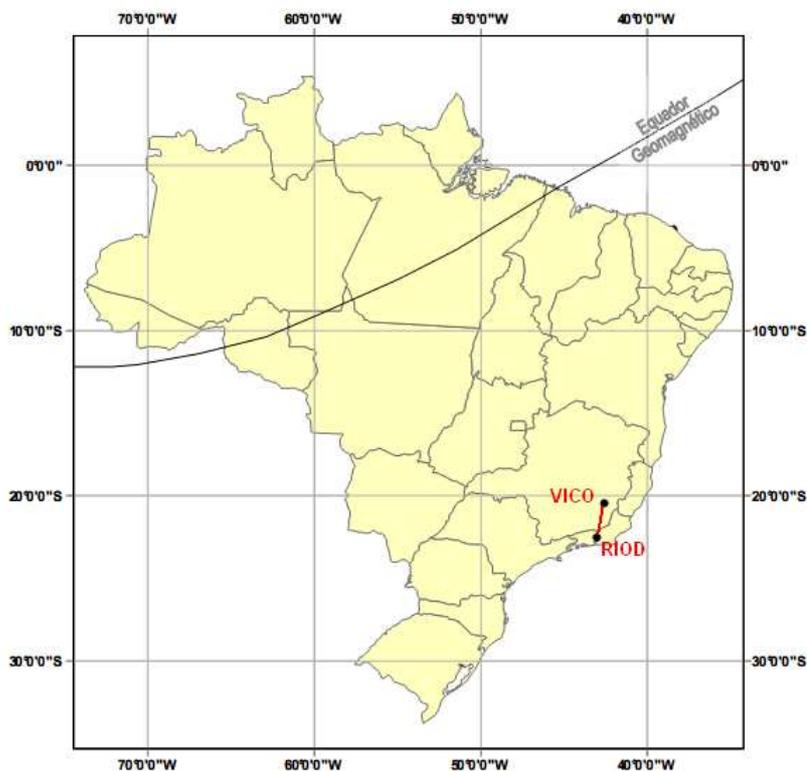


Figura 46 - Posição da linha de base RIOD-VICO (RBMC) no Brasil

Os dados foram processados utilizando o *software* GPSurvey 2.35, considerando como fixas as coordenadas conhecidas da estação RIOD (SIRGAS 2000). As posições de VICO foram estimadas a cada 2 horas para os mesmos dias dos experimentos anteriores (citados na Tabela 5), utilizando apenas os dados da portadora L1 (fase e código), ou seja, simulou-se que os receptores fossem de uma frequência e, portanto, altamente influenciados pela ionosfera. No processamento foram utilizadas efemérides transmitidas e máscara de elevação de 15°, não se aplicando modelo ionosférico, mas utilizando o modelo de Hopfield para correção do efeito da troposfera.

As coordenadas estimadas para a estação VICO foram comparadas com as consideradas verdadeiras (SIRGAS 2000), obtendo-se assim o erro posicional (discrepância) a cada 2 horas, para todos os dias do experimento. A partir da discrepância entre a coordenada estimada e a coordenada verdadeira, calculou-se o EMQ para cada mês do experimento,

apresentado nas Tabelas 8, 9 e 10, juntamente com a redução percentual do EMQ no período de baixa atividade solar (ano 2006), com relação ao período de alta atividade solar (2001 e 2002).

Tabela 8 - EMQ (Janeiro 2002 e 2006) e redução percentual do EMQ em 2006 – Posicionamento relativo

<b>Hora Local</b>	<b>EMQ Janeiro 2002</b>		<b>EMQ Janeiro 2006</b>		<b>Redução do EMQ em 2006</b>	
	<b>Planim (m)</b>	<b>Alt Geom (m)</b>	<b>Planim (m)</b>	<b>Alt Geom (m)</b>	<b>Planim (%)</b>	<b>Alt Geom (%)</b>
<b>23-01</b>	2,70	3,94	1,06	1,31	61	67
<b>02-03</b>	2,39	3,40	0,65	0,73	73	79
<b>03-05</b>	0,90	0,47	0,17	0,27	82	41
<b>05-07</b>	0,50	0,67	0,16	0,18	68	73
<b>07-09</b>	0,58	0,64	0,36	0,26	37	60
<b>09-11</b>	1,10	0,86	0,44	0,48	60	44
<b>11-13</b>	1,66	1,10	0,66	1,55	60	-41
<b>13-15</b>	1,87	1,61	1,03	0,94	45	41
<b>15-17</b>	1,83	3,74	0,87	1,10	52	71
<b>17-19</b>	1,52	2,51	0,62	0,81	59	68
<b>19-21</b>	5,34	6,44	0,52	0,37	90	94
<b>21-23</b>	5,41	6,21	1,11	0,63	79	90
<b>Média</b>	<b>2,15</b>	<b>2,63</b>	<b>0,64</b>	<b>0,72</b>	<b>64</b>	<b>57</b>

Tabela 9 - EMQ (Julho 2002 e 2006) e redução percentual do EMQ em 2006 – Posicionamento relativo

Hora Local	EMQ Julho 2002		EMQ Julho 2006		Redução do EMQ em 2006	
	Planim (m)	Alt Geom (m)	Planim (m)	Alt Geom (m)	Planim (%)	Alt Geom (%)
23-01	1,04	1,46	0,10	0,46	90	68
02-03	0,93	0,75	0,14	0,27	85	64
03-05	0,26	0,57	0,07	0,20	72	64
05-07	0,14	0,38	0,17	0,12	-22	69
07-09	0,31	0,49	0,16	0,13	48	74
09-11	1,08	0,78	0,47	0,27	56	65
11-13	1,87	0,79	1,53	0,78	18	1
13-15	2,14	1,01	0,43	0,65	80	35
15-17	2,25	2,33	0,25	0,35	89	85
17-19	0,93	1,17	0,14	0,17	85	86
19-21	1,76	1,33	0,30	0,22	83	83
21-23	1,14	0,96	0,22	0,16	81	83
<b>Média</b>	<b>1,15</b>	<b>1,00</b>	<b>0,33</b>	<b>0,32</b>	<b>64</b>	<b>65</b>

Tabela 10 - EMQ (Outubro 2001 e 2006) e redução percentual do EMQ em 2006 – Posicionamento relativo

Hora Local	EMQ Outubro 2001		EMQ Outubro 2006		Redução do EMQ em 2006	
	Planim (m)	Alt Geom (m)	Planim (m)	Alt Geom (m)	Planim (%)	Alt Geom (%)
23-01	4,08	9,82	0,72	0,54	82	94
02-03	1,91	5,33	0,69	0,42	64	92
03-05	0,79	1,62	0,32	0,25	59	85
05-07	0,74	0,56	0,24	0,30	67	46
07-09	0,85	0,65	0,19	0,12	78	82
09-11	1,32	0,66	0,40	0,23	69	65
11-13	1,15	1,00	0,78	0,37	33	63
13-15	1,11	0,87	0,98	1,08	12	-23
15-17	2,10	2,08	0,65	0,84	69	59
17-19	5,50	6,06	0,49	1,65	91	73
19-21	9,97	4,54	0,62	0,86	94	81
21-23	7,84	7,62	0,82	0,52	90	93
<b>Média</b>	<b>3,11</b>	<b>3,40</b>	<b>0,58</b>	<b>0,60</b>	<b>67</b>	<b>68</b>

Para facilitar a comparação dos resultados entre os meses, no período de alta e baixa atividade solar, a Figura 47 apresenta o EMQ mensal separado nas componentes planimétrica e altimétrica.

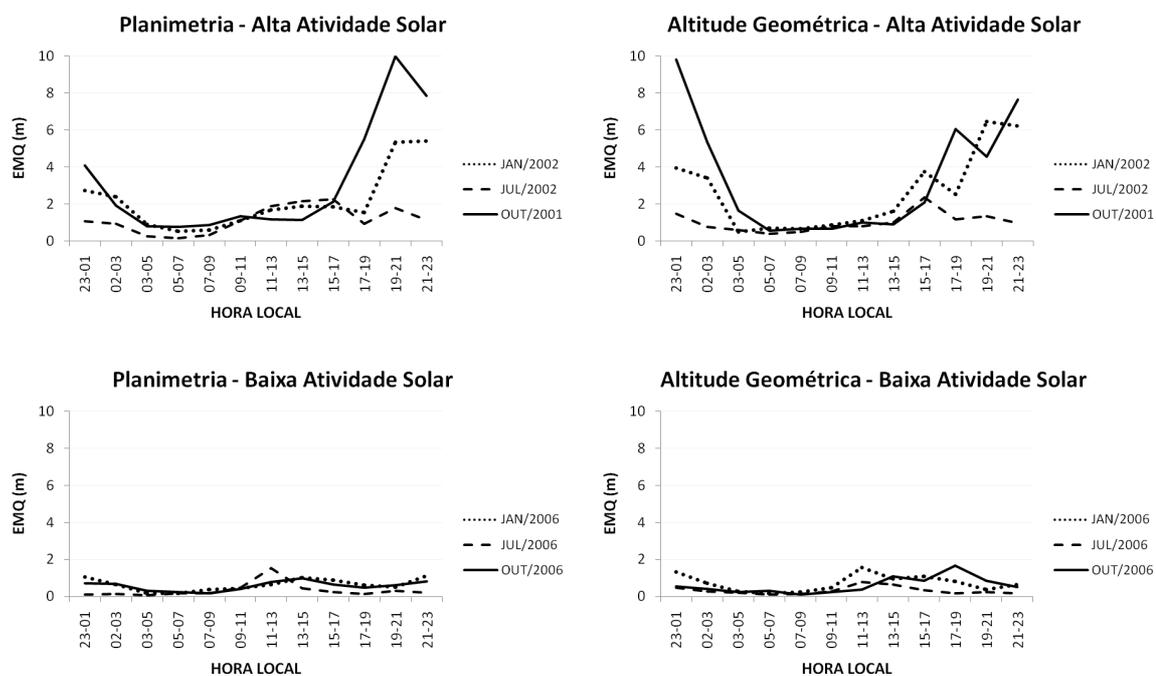


Figura 47 - EMQ mensal para o período de Alta e Baixa Atividade Solar – Posicionamento relativo

Analisando os valores de EMQ nas Tabelas 8, 9 e 10, durante o período de alta atividade solar, verifica-se que valores inferiores a 2 m são encontrados na maior parte do dia para os meses de Janeiro e Outubro, com exceção dos horários após o pôr-do-sol, onde valores de erro entre 5 e 10 m podem ser encontrados. No mês de Julho de 2002, o EMQ apresenta valores menores que 1 m durante a maior parte do dia, não ultrapassando nunca 2,5 m. Para todos os meses, os menores valores são encontrados próximo às 5 HL, que também é quando menores valores e variações espaciais de TEC são encontrados na ionosfera. Já os maiores valores de erro ocorrem no período da tarde, para o mês de Julho, e nas primeiras horas da noite até meia-noite local, para Janeiro e Outubro, sendo que, principalmente em Outubro, os valores de erro continuam altos até as primeiras horas da madrugada. Conforme

resultados da seção 3.1, o mês de Julho, próximo ao solstício de inverno, é o mês que apresenta menores valores e variações espaciais do TEC, sendo que esses valores e variações alcançam seu máximo (embora com valores baixos, se comparados a outros meses) no período da tarde. Já o mês de Janeiro, próximo ao solstício de verão, tem comportamento semelhante a Julho, mas é possível observar a formação da anomalia equatorial noturna, através do aumento do gradiente espacial do TEC no início da noite. Enquanto isso, no mês de Outubro, próximo ao equinócio de primavera, altos valores e altas variações espaciais do TEC são encontradas e a formação da anomalia equatorial noturna é perfeitamente definida, marcando sua presença até as primeiras horas da madrugada. Com base nesses resultados é possível estabelecer uma forte correspondência entre os horários em que os valores máximos de erros são encontrados nesse experimento e os horários de formação da anomalia equatorial noturna, que é caracterizada por altos gradientes espaciais de TEC, os quais provocam um aumento dos erros no posicionamento relativo. Além disso, sabe-se também que, em períodos de alta atividade solar, principalmente nos meses de primavera e verão, é comum a ocorrência de irregularidades ionosféricas (cintilação ionosférica, bolhas ionosféricas) durante o período da anomalia equatorial noturna (SAHAI *et al.*, 1994 *apud* SANTANA, 2001).

Para o período de baixa atividade solar, observa-se uma alta redução do EMQ e de suas variações ao longo do dia, para todos os meses, com ênfase para o mês de Outubro, onde são encontradas as maiores reduções percentuais. De forma geral, raramente os erros ultrapassam 1 m, tanto na componente planimétrica, quanto na altimétrica, ficando a redução média geral em torno de 65% na planimetria e 63% na altitude geométrica, em relação ao período de alta atividade solar. Retomando os resultados da seção 3.1, verifica-se novamente a correspondência entre esses resultados e a variação espacial do TEC que, em períodos de baixa atividade solar, é muito baixa ao longo de todo o dia. Assim, mesmo em uma linha de base de aproximadamente 232 km (longa), e utilizando apenas os dados da portadora L1, os

baixos valores de TEC (característicos do período de baixa atividade solar) e a baixa variação espacial do TEC entre as estações permitem uma melhora considerável nos resultados do posicionamento relativo em períodos de baixa atividade solar. Esses resultados estão bem explicitados nos gráficos da Figura 47, onde é possível verificar também a influência da variação sazonal do TEC no posicionamento relativo. Diferente do período de alta atividade solar, no período de baixa, a variação sazonal das discrepâncias não fica tão bem caracterizada, pois os resultados são muito semelhantes entre os meses.

Retornando aos dados das Tabelas 8, 9 e 10, constata-se que há pouca diferença na média mensal do EMQ entre a componente planimétrica e altimétrica para todos os meses do experimento. Esse resultado difere dos resultados encontrados para o posicionamento por ponto (onde os erros foram bem maiores para a altitude geométrica) na seção 3.2 e indica que a dupla diferenciação das observáveis GPS, no posicionamento relativo, realmente proporciona bons resultados na atenuação do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. Ainda assim, é possível observar erros um pouco maiores em altitude geométrica para os meses de Janeiro e Outubro no período de alta atividade solar, que, como citado anteriormente, também é quando maiores variações de TEC são encontradas na região brasileira, devido à intensificação da anomalia equatorial.

De modo a obter uma análise mais detalhada dos dados, a Figura 48 e a Figura 49 apresentam as discrepâncias encontradas para cada dia do experimento, tanto no período de alta, quanto de baixa atividade solar.

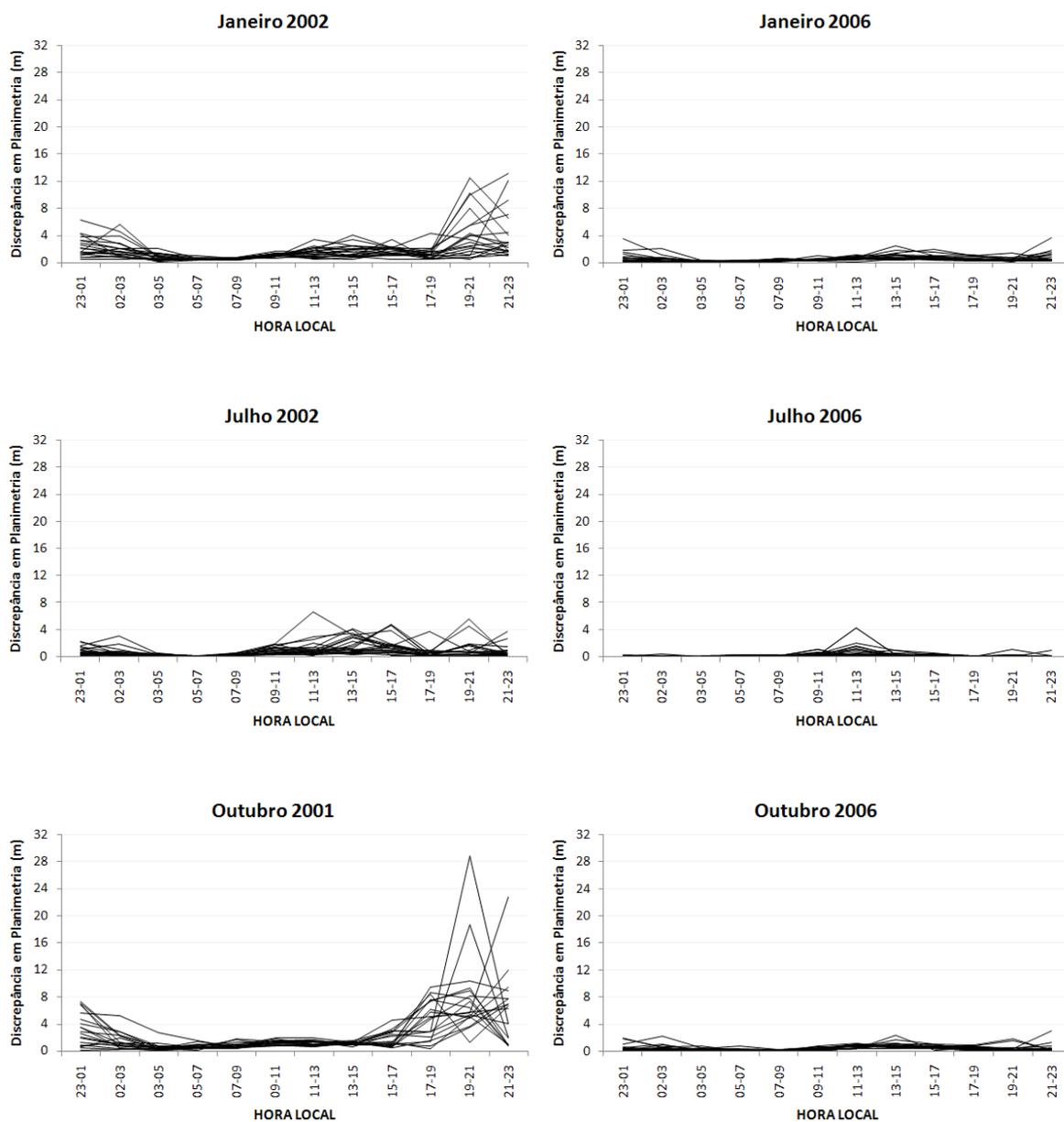


Figura 48 - Discrepâncias em Planimetria para os dias do experimento – Posicionamento relativo

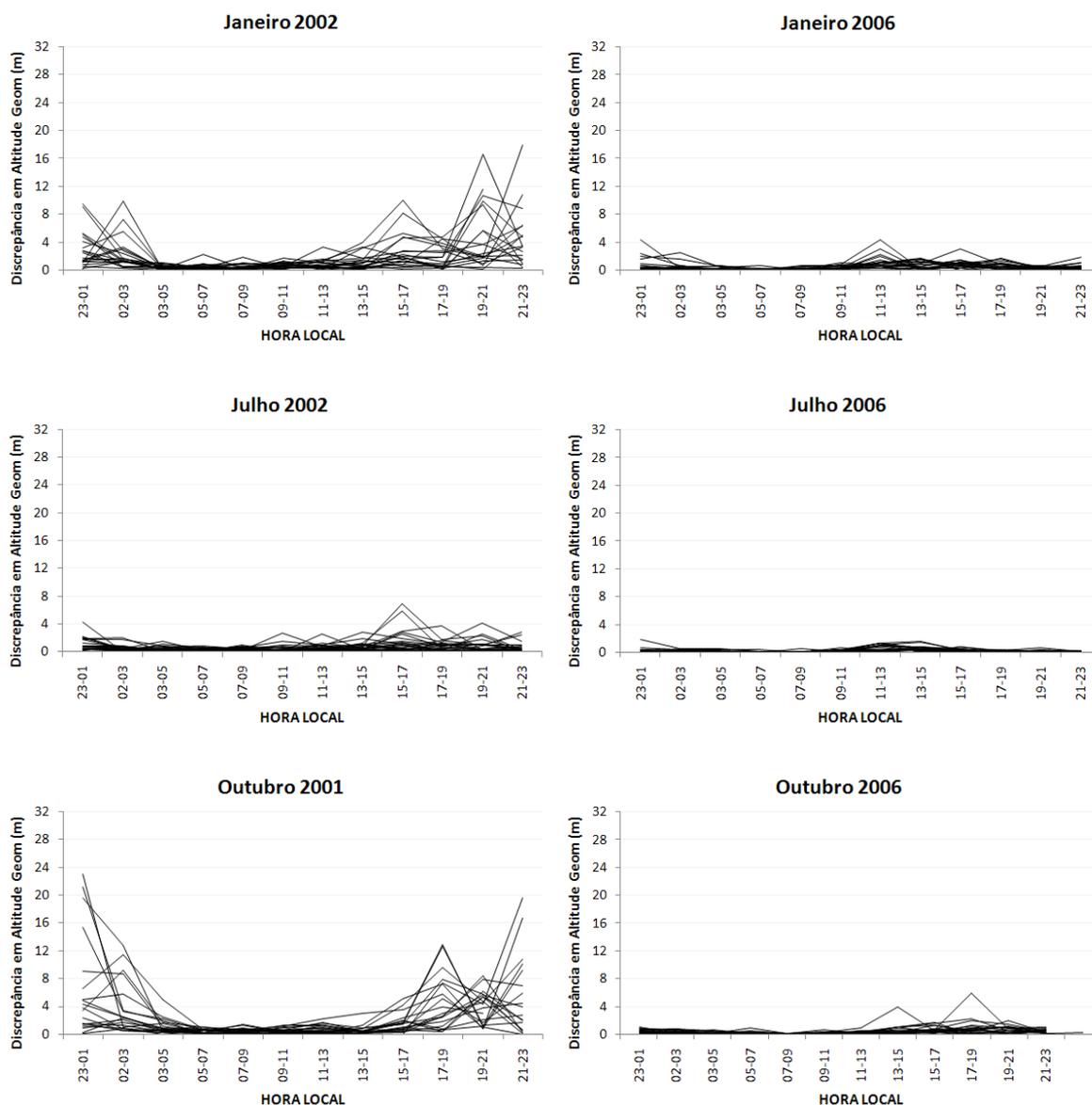


Figura 49 - Discrepâncias em Altitude Geométrica para os dias do experimento – Posicionamento relativo

Os gráficos referentes ao período de alta atividade solar, na Figura 48 e Figura 49, refletem a alta variação da ionosfera, tanto ao longo do dia, quanto ao longo do ano. No período pós pôr-do-sol até as primeiras horas da madrugada, maiores diferenças são encontradas entre os resultados dos dias do experimento no período de alta atividade solar, principalmente nos meses de Outubro e Janeiro, onde um aumento do erro e um comportamento bastante irregular do mesmo são verificados. Assim como a formação da anomalia equatorial noturna é uma possível explicação para os maiores valores de erros

encontrados nesse período, irregularidades ionosféricas – como a cintilação ionosférica que, segundo Skone (2000), também está associada à anomalia equatorial na região equatorial e de baixas latitudes – e a própria variação da atividade solar são possíveis explicações para as diferenças entre os dias do experimento para um mesmo mês. Como já foi verificado para o mês de Outubro de 2001, no experimento com o posicionamento por ponto na seção 3.2 deste capítulo, os dias mais alterados, no mês de Outubro de 2001 e, neste experimento, também no mês de Janeiro de 2002 (Figura 48 e Figura 49), correspondem a dias geomagneticamente ativos.

Os gráficos para o período de baixa atividade solar, na Figura 48 e Figura 49, expressam, por sua vez, que, além dos erros serem menores e variarem menos ao longo do dia, também variam menos entre os dias do experimento. E isso se deve ao comportamento mais regular da ionosfera em período de baixa atividade solar. Conforme apresentado na Figura 23, no início do capítulo, além do número de manchas solares e do nível de radiação eletromagnética diminuir em períodos de baixa atividade solar, também diminuem consideravelmente os eventos solares abruptos, como explosões e Ejeções Coronais de Massa, bem como irregularidades ionosféricas na região brasileira. Nos meses de 2006, o aumento das discrepâncias no período pós pôr-do-sol não é verificado, o que é justificado considerando-se a diminuição dos valores de TEC e a redução (e até a ausência) do pico pré-inversão (que produz a anomalia equatorial noturna) em períodos de baixa atividade solar.

### 3.4 CONCLUSÕES

Visando avaliar o comportamento do TEC e do posicionamento com GPS (por ponto e relativo) em períodos de alta e baixa atividade solar na região brasileira, foram desenvolvidos três experimentos, todos utilizando dados para os mesmos dias dos meses de Janeiro de 2002 e 2006 (próximo ao solstício de verão, no hemisfério sul), Julho de 2002 e 2006 (próximo ao solstício de inverno, no hemisfério sul), e Outubro de 2001 e 2006 (próximo ao equinócio de primavera, no hemisfério sul). É importante ressaltar que os dados utilizados – arquivos IONEX (IGS), arquivos SP3 (IGS) e arquivos GPS (RBMC) – são disponibilizados de forma gratuita na internet.

No primeiro experimento foram utilizados dados do Mapa Global da Ionosfera do IGS (arquivos IONEX) para avaliar o comportamento e as variações (diurna, sazonal, latitudinal) do TEC na região brasileira, em períodos de alta (ano 2001 e 2002) e baixa (ano 2006) atividade solar. A análise dos resultados demonstrou a relação entre o número de manchas solares e a densidade de elétrons na ionosfera: enquanto nos anos de 2001 e 2002 (maior número de manchas solares) altos valores de VTEC foram observados, com a diminuição do número de manchas solares – e conseqüente diminuição da radiação solar – no ano de 2006, observou-se uma redução média geral de aproximadamente 70% nos valores de VTEC na região brasileira.

Particularizando a análise para a variação diurna do VTEC, constatou-se que os menores valores médios de VTEC foram observados entre 05 e 06 HL, enquanto que os maiores valores médios de VTEC foram encontrados entre 14 e 17 HL, período caracterizado por alto fluxo de radiação eletromagnética e também pela formação do primeiro pico da anomalia equatorial. Esses resultados são válidos para todos os meses do experimento, tanto

em período de alta, quanto de baixa atividade solar. Especialmente no período de alta atividade solar, principalmente no mês de Outubro, altos valores de VTEC foram encontrados, nas regiões de baixas latitudes, até por volta da meia-noite, caracterizando a segunda formação da anomalia equatorial. Esse comportamento não foi observado no período de baixa atividade solar, ocorrendo uma queda gradual dos valores de VTEC após as 17 HL, em todos os meses do experimento.

Na análise da variação sazonal do VTEC, verificou-se que, em período de alta atividade solar, o mês com maiores valores e maiores variações do VTEC, é o mês de Outubro, enquanto que o mês com menores valores e variações de VTEC é o mês de Julho. Esses resultados encontram paralelo em resultados de experimentos anteriores realizados na região brasileira (MATSUOKA e CAMARGO, 2004; DAL POZ, 2005; MATSUOKA, 2007), onde maiores valores de VTEC foram encontrados próximos aos equinócios, e menores, próximos ao solstício de inverno. Já para o período de baixa atividade solar, observou-se uma menor diferença entre os valores e variações espaciais do VTEC entre os meses, ou seja, em períodos de baixa atividade solar, a variação sazonal do VTEC é menos acentuada.

A análise da variação latitudinal do VTEC, estudada para a longitude geográfica de 50°W, permitiu verificar que, no período de alta atividade solar, a variação latitudinal é alta em todos os meses e que, de maneira geral, as maiores variações são encontradas no período da tarde e início da noite, ou seja, nos horários de formação da anomalia equatorial. Caracteristicamente, o mês de Outubro apresentou as maiores variações latitudinais, verificando-se a presença da anomalia equatorial noturna (com a formação da crista sul na latitude geográfica aproximada de 22,5°S) até algumas horas após a meia-noite, de forma ainda mais intensa do que no período da tarde. A formação da crista sul também é observada durante o início da noite no mês de Janeiro, embora de forma menos acentuada. Esse resultado está relacionado à intensificação do efeito fonte nas horas próximas ao pôr-do-sol, o

qual ocorre em períodos de alta atividade solar, principalmente em períodos próximos aos equinócios e solstício de verão (BATISTA *et al.*, 1996; FEJER *et al.*, 1979). O efeito fonte desloca elétrons da região do equador geomagnético (onde não está mais ocorrendo produção de elétrons por causa do pôr-do-sol e do conseqüente cessamento da fotoionização) para as latitudes geomagnéticas entre  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 20^\circ$  aproximadamente, aumentando a variação latitudinal do TEC (na direção norte-sul) na região brasileira nas horas após o pôr-do-sol. Ainda segundo a teoria, essa variação latitudinal normalmente não é tão intensa no período da tarde porque, apesar do efeito fonte existir, continua ocorrendo produção de elétrons por fotoionização na região do equador geomagnético. Para o período de baixa atividade solar (ano 2006), verificou-se que a variação latitudinal é baixa ao longo de todo o dia – as maiores variações são encontradas no período da tarde –, não tendo sido possível observar a formação das cristas da anomalia equatorial, mesmo no mês de Outubro, onde os valores de VTEC são um pouco maiores. A não observância da anomalia equatorial noturna nos resultados de 2006 concorda novamente com a teoria, que diz que o pico pré-inversão (que dá origem à anomalia equatorial noturna) praticamente não ocorre em período de baixa atividade solar; quando ocorre, é somente em meses próximos aos equinócios e com menor intensidade, se comparado com períodos de alta atividade solar (além de apresentar baixa variação latitudinal), pois os valores de VTEC são mais baixos.

Os resultados desse experimento permitem, partindo da premissa que o TEC é proporcional ao erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, estabelecer expectativas quanto aos resultados do posicionamento com GPS na região brasileira, principalmente quando utilizando receptores de uma frequência. Considerando isso, piores resultados são esperados para o período de alta atividade solar, principalmente no período da tarde e em meses próximos ao equinócio de primavera e solstício de verão. De igual modo, é possível esperar uma melhora considerável nos resultados do posicionamento com GPS com a redução do

número de manchas solares, ou seja, nos períodos de baixa atividade solar, sobretudo considerando que, além dos valores de VTEC serem bem menores, a variação espacial também é muito pequena ao longo do dia no território brasileiro.

No segundo experimento, realizado com o objetivo de verificar a influência da ionosfera no posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar, foram utilizados dados GPS da estação RIOD da RBMC, localizada em uma região que sofre a influência da formação da crista sul da anomalia equatorial. No processamento foram utilizadas apenas as pseudodistâncias advindas do código C/A em L1, coletadas com ângulo de elevação superior a 15°. Ainda procurando minimizar os diversos erros envolvidos no posicionamento e deixar predominante a influência da ionosfera nos resultados, o processamento foi realizado utilizando as efemérides precisas do IGS e do NRCAN, disponibilizadas gratuitamente na internet. A análise inicial dos resultados demonstrou uma diminuição razoável da média mensal do EMQ no ano de 2006: de maneira geral, a redução do EMQ foi de 59% em planimetria e de 64% em altitude geométrica, concordando com a expectativa gerada pelos resultados do experimento anterior. Observou-se também que os maiores erros foram encontrados para a componente altimétrica, em todos os meses do experimento, tanto em período de alta, quanto de baixa atividade solar. Esse resultado acompanha resultados apresentados por Matsuoka (2007) e El Gizawy (2003), que referem que esse comportamento tem relação com a geometria dos satélites, que favorece a compensação dos erros que contaminam as observáveis GPS no plano horizontal.

A análise da variação diária do EMQ para o período de baixa atividade solar, permitiu verificar que, além dos erros serem bem menores em 2006, também variaram muito pouco ao longo do dia, apresentando comportamento semelhante entre os meses, principalmente na componente planimétrica. Na componente altimétrica foi possível verificar um pequeno aumento dos erros durante a tarde, caracterizando a influência da ionosfera, pois,

mesmo em períodos de baixa atividade solar, é nesse horário que são encontrados os maiores valores de TEC na região brasileira. Analisando a variação diária do EMQ para o período de alta atividade solar, verificou-se que os menores valores de erros são encontrados entre 03 e 05 HL, que é também o período aproximado onde são encontrados os menores valores e variações do TEC na ionosfera. Na componente altimétrica, de maneira geral, os erros acompanharam o comportamento do TEC, verificando-se um aumento dos erros com o aumento da radiação solar (aumento do TEC) e uma diminuição dos mesmos com o anoitecer (diminuição do TEC). No entanto, o mês de Outubro apresentou um novo aumento, bem como uma maior irregularidade dos erros, entre o pôr-do-sol e as primeiras horas da madrugada, caracterizando a possível influência da anomalia equatorial noturna no território brasileiro e a possível influência de irregularidades ionosféricas sobre os resultados. Já na componente planimétrica, observou-se um aumento significativo do EMQ entre o início da noite e as primeiras horas da madrugada nos meses de Janeiro de 2002 e Outubro de 2001. Embora se espere pouca correlação entre o erro da componente planimétrica e o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, é possível associar esse aumento dos erros planimétricos com a alta variação espacial do TEC causada pela formação da anomalia equatorial noturna, que faz com que possam ocorrer erros ionosféricos muito diferentes entre as pseudodistâncias obtidas para cada satélite observado em um mesmo instante, diminuindo assim a compensação dos erros no plano horizontal e aumentando o EMQ planimétrico.

A variação sazonal do EMQ acompanhou os resultados da variação sazonal do TEC, ou seja, para o período de alta atividade solar, os maiores erros foram encontrados no mês de Outubro e os menores erros no mês de Julho. Ainda concordando com os resultados do TEC no período de baixa atividade solar, a variação sazonal do EMQ não é tão patente, devido às menores diferenças entre os resultados dos meses. Em termos de redução do EMQ

em 2006, o mês de Outubro é o que apresenta as maiores reduções, estabelecendo, mais uma vez, a relação entre a redução do TEC e a redução do erro no posicionamento com GPS.

De maneira geral, os resultados desse segundo experimento expressaram uma forte correlação com o comportamento do TEC na ionosfera, principalmente na componente altimétrica e durante os horários de formação da anomalia equatorial noturna, característica dos meses próximos aos equinócios e solstício de verão, em períodos de alta atividade solar. Com efeito, a influência da anomalia equatorial noturna e do conseqüente aumento da variação espacial do TEC na região brasileira parece ter sido grande o suficiente para afetar, inclusive, a componente planimétrica nos meses (Janeiro e Outubro) em que essa anomalia se apresenta de forma mais intensificada.

No terceiro experimento deste capítulo, realizado com o objetivo de verificar a influência da ionosfera no posicionamento relativo na região brasileira, em períodos de alta e baixa atividade solar, foram utilizados dados GPS (arquivos RINEX) das estações RIOD e VICO da RBMC, formando uma linha de base de aproximadamente 232 km (longa) localizada em uma região caracterizada por altos valores e altas variações espaciais do TEC. No processamento foram utilizados apenas os dados da portadora L1 (fase e código), ou seja, simulou-se que os receptores fossem de uma frequência e, portanto, altamente influenciados pela ionosfera. De maneira geral, observou-se que, diferindo dos resultados do posicionamento por ponto, nos resultados desse experimento, encontrou-se pouca diferença entre o EMQ nas componentes planimétrica e altimétrica. Esse resultado indica que a dupla diferenciação das observáveis GPS no posicionamento relativo realmente proporciona bons resultados na atenuação do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS.

A análise da variação diária do EMQ, no período de alta atividade solar, permitiu verificar que os menores valores de erro foram encontrados, em todos os meses, por volta de

05 HL. Esse também é o horário aproximado onde foram encontrados os melhores resultados no posicionamento por ponto, e o período onde foram observados os menores valores e variações espaciais do TEC. Por sua vez, os maiores valores de erro foram encontrados entre o final da tarde e a meia-noite, nos meses de Janeiro e Outubro, e no período da tarde, no mês de Julho. Conforme verificado no primeiro experimento, no mês de Janeiro e Outubro há a presença intensificada da anomalia equatorial noturna, aumentando drasticamente a variação espacial do TEC na região brasileira durante a noite; o mês de Julho, no entanto, apresenta as maiores variações espaciais no período da tarde. Esse resultado, mais uma vez, estabelece uma forte correlação entre os resultados do posicionamento GPS e os horários de formação da anomalia equatorial na região brasileira. Para o período de baixa atividade solar, observou-se uma melhora considerável nos resultados, ficando a redução percentual média do EMQ em torno de 65% em planimetria e 63% em altitude geométrica. Assim, verifica-se que, mesmo em uma linha de base longa (232 km), e utilizando apenas os dados da portadora L1, os baixos valores e variações espaciais de TEC, característicos do período de baixa atividade solar, permitem uma melhora considerável nos resultados do posicionamento relativo em períodos de baixa atividade solar. Isso indica que resultados ainda mais promissores podem ser esperados no posicionamento relativo em linhas de base médias e curtas, em período de baixa atividade solar.

A análise mais detalhada dos dias envolvidos no experimento para os anos de alta atividade solar constatou que, no período pós pôr-do-sol até as primeiras horas da madrugada, maiores diferenças são encontradas entre os resultados dos dias. Nesse horário, também se verificou um comportamento bastante irregular do erro, principalmente nos meses de Janeiro e Outubro, o que indica uma maior variação do TEC entre os dias e uma possível contribuição de irregularidades ionosféricas, como a cintilação ionosférica, comum nesses meses em máximo solar. Já no ano de baixa atividade solar, os erros variaram menos entre os dias do

experimento, indicando que o comportamento mais regular da ionosfera e a diminuição considerável de eventos solares abruptos e de irregularidades ionosféricas contribuíram para resultados melhores e mais semelhantes entre os dias do experimento.

De maneira geral, esse terceiro experimento apresentou resultados melhores do que os encontrados com o posicionamento por ponto, corroborando a teoria sobre o assunto que diz que, no processamento relativo grande parte do erro sistemático devido à ionosfera pode ser cancelado através da dupla diferenciação das observáveis. Ainda assim, foi possível observar uma maior influência da ionosfera nos horários e meses em que uma maior variação espacial do TEC (devido à formação da anomalia equatorial) é observada sobre a região brasileira; nesses horários, piores resultados foram encontrados, possivelmente devido à menor correlação do erro devido à ionosfera entre as observáveis obtidas dos diferentes satélites.

#### 4 EFEITOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO POSICIONAMENTO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA: Estudo de caso

Durante o mês de Outubro e início do mês de Novembro de 2003, já no período de declínio do Ciclo Solar 23, três agrupamentos de manchas solares – 10484, 10486 e 10488 – mostraram-se extremamente ativos, gerando uma série de explosões solares classificadas na Classe X, conforme medidas dos satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). A Figura 50 apresenta uma imagem obtida pelo instrumento MDI (*Michelson Doppler Imager*), a bordo da SOHO, com a localização, à época, das manchas solares (*sunspot*) de onde essas explosões se originaram.

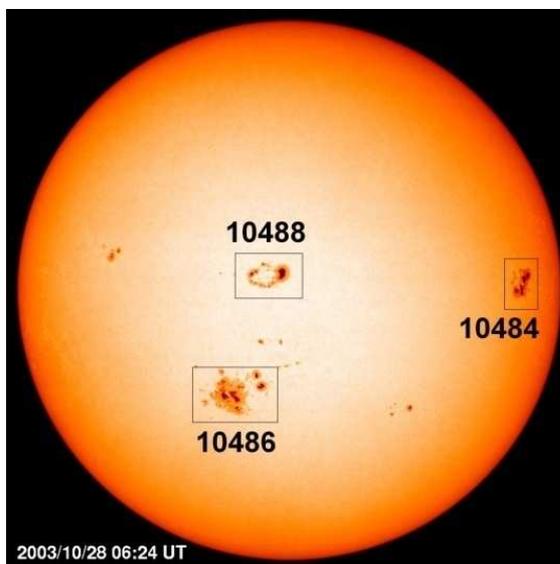


Figura 50 - Agrupamentos de manchas Solares 10484, 10486 e 10488  
Fonte: Adaptada de <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/bestofsoho.html> (Acesso em Maio, 2008)

Entre as onze explosões solares Classe X que ocorreram entre Outubro e Novembro de 2003, três se destacaram por sua magnitude e geofetividade: as explosões de

28 de Outubro, 29 de Outubro e 4 de Novembro (Tabela 11). Essa última, a maior explosão solar registrada nos últimos trinta anos, saturou os instrumentos do GOES, dificultando, inclusive, a classificação da explosão e a determinação de seus parâmetros (SOHO, 2008). No endereço eletrônico <http://www.spaceweather.com/solarflares/topflares.html> é apresentada uma lista das maiores explosões solares registradas desde 1976 (em função de medidas de raio-X).

Tabela 11 - Explosões solares Outubro/Novembro 2003

<b>Dia Mês</b>	<b>Hora do Início (UT)</b>	<b>Hora do Máximo (UT)</b>	<b>Hora do Fim (UT)</b>	<b>Região NOAA</b>	<b>Classe Raio-X</b>
28/Out	09:51	11:10	11:24	10486	X 17.2
29/Out	20:37	20:49	21:01	10486	X 10.0
04/Nov	19:29	19:50	20:06	10486	X 28.0+

Fonte: Adaptada de <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarflares.html>  
(Acesso em Maio, 2008)

Em associação com essas três explosões, ocorreram Ejeções Coronais de Massa (CME's) extremamente rápidas e intensas que alteraram drasticamente os parâmetros do vento solar. A Tabela 12 apresenta os horários de ocorrência – medidos pelo instrumento LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*) à bordo da SOHO – das CME's Halo associadas a essas três explosões.

Tabela 12 - CME's Halo - Outubro/Novembro 2003

<b>Dia/ Mês</b>	<b>Hora (UT)</b>
28/Out	11:30
29/Out	20:54
04/Nov	19:54

Fonte: Adaptada de [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)  
(Acesso em Maio, 2008)

Os primeiros efeitos desses eventos solares – o aumento da radiação eletromagnética na faixa do raio-X – foram percebidos em poucos minutos, através de Distúrbios Ionosféricos Súbitos no lado diurno da Terra. Horas mais tarde, com a chegada das CME's à Terra, severas tempestades geomagnéticas e ionosféricas – referidas na comunidade científica como Tempestades de *Halloween* – foram desencadeadas, e suas características e efeitos têm sido estudados e apresentados em diversos artigos, tais como: Tsurutani *et al.*, 2005; Mannucci *et al.*, 2005; Zhao, Wan e Liu, 2005; Gopalswamy *et al.*, 2005; Savian *et al.*, 2005; Batista *et al.*, 2006; Liu e Hayashi, 2006 e Becker-Guedes *et al.*, 2007.

Nessa pesquisa, no entanto, o estudo abrangerá somente a severa tempestade geomagnética iniciada em 29 de Outubro de 2003, em decorrência da chegada à Terra da CME ocorrida no dia anterior, com ênfase nas suas conseqüências sobre a ionosfera terrestre e o posicionamento relativo na região brasileira. Os efeitos do aumento da radiação eletromagnética associados à explosão solar de 28 de Outubro já foram estudados por Matsuoka, Camargo e Batista (2006), que realizaram um estudo do impacto no comportamento do TEC e do posicionamento por ponto na região brasileira, verificando um repentino aumento do TEC, perdas do sinal GPS e abrupto aumento do erro do posicionamento por ponto, minutos após a referida explosão solar.

#### 4.1 TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE 29 DE OUTUBRO DE 2003

Às 05:58 UT do dia 29 de Outubro de 2003, o instrumento MAG (*Magnetic Field Experiment*), à bordo do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), registrou a passagem da frente de choque da CME ocorrida em associação com a explosão solar X17.2 (ACE, 2008), ambas observadas no dia anterior, conforme Tabela 11 e Tabela 12. A Figura 51 apresenta uma imagem dessa CME obtida pelo instrumento LASCO a bordo da SOHO (telescópio C2).

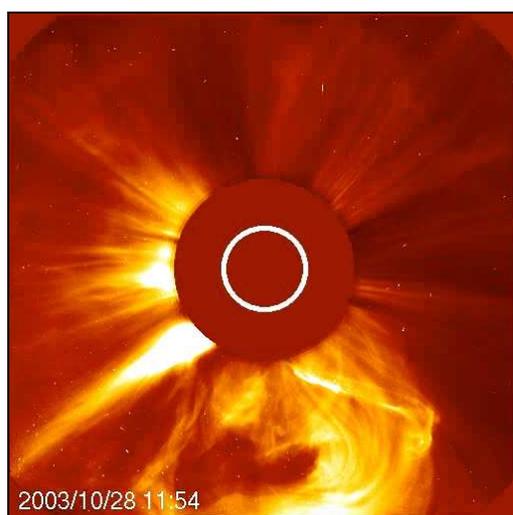


Figura 51 - CME ocorrida no dia 28 de Outubro de 2003  
Fonte: [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) (Acesso em Maio, 2008)

Alguns minutos depois, às 06:11 UT (03:11 HL) de 29 de Outubro, registrou-se o início de uma severa tempestade geomagnética (BATISTA *et al.*, 2006), a primeira de uma série de super eventos geomagnéticos ocorridos em outubro e novembro de 2003.

A Figura 52 apresenta os valores do índice Dst para os dias 29 e 30 de Outubro, onde as fases da tempestade ficam bem caracterizadas. Entre 06 e 07 UT de 29 de Outubro, observa-se um aumento do valor de Dst, atribuído à compressão da magnetosfera pelo vento

solar, intensificado pela CME; a seguir, desenvolve-se a fase principal da tempestade, com a queda brusca do índice atingindo um valor mínimo médio de -353 nT (entre 00 e 01 UT de 30 de Outubro), quando então inicia-se a fase de recuperação. O novo decréscimo do índice Dst nas horas finais do dia 30 de Outubro é atribuído à chegada a Terra de uma segunda CME, ocorrida em associação com a explosão solar do dia 29 de Outubro (Tabela 11 e Tabela 12), desencadeando uma segunda tempestade geomagnética.

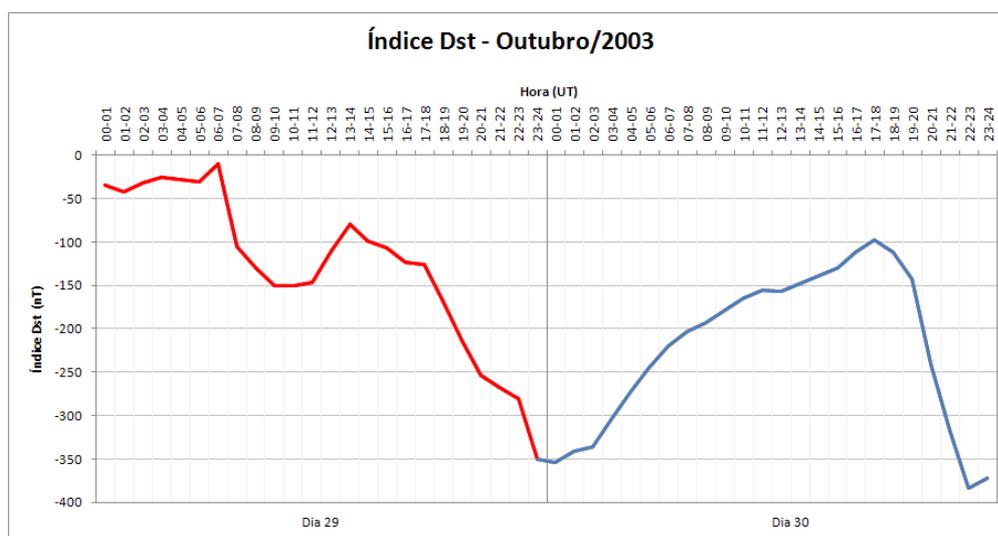


Figura 52 - Índice Dst para os dias 29 e 30 de Outubro de 2003  
 Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200310.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200310.html)

(Acesso em Maio, 2008)

Skoug *et al.* (2004) analisou os parâmetros do vento solar de alta velocidade decorrentes dos eventos solares do dia 28 de Outubro e concluiu que esta foi uma das maiores velocidades de vento solar já detectadas no espaço, atingindo valores superiores a 1850 km/s, segundo observações do instrumento SWEPAM (*Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor*), à bordo do satélite ACE, fazendo com que a CME atingisse a Terra em apenas aproximadamente 19 horas. Skoug *et al.* (2004) ainda salienta a dificuldade de estabelecer um valor de velocidade máxima para esse evento, pois os instrumentos do satélite foram afetados pelas partículas energéticas solares, ocasionando falhas nas medidas.

Matsuoka (2007) realizou um experimento para verificar o erro no posicionamento por ponto com GPS entre 14 e 24 HL do dia 29 de Outubro de 2003. O experimento foi realizado utilizando dados GPS de estações da RBMC (POAL, UEPP, BRAZ e CRAT), e no processamento, a observável pseudodistância (código C/A em L1) e efemérides precisas. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas conhecidas das estações, e uma primeira observação dos dados revelou uma maior influência do erro devido à ionosfera na determinação da altitude geométrica, corroborando resultados de outros experimentos. Comparando os resultados com um dia geomagneticamente calmo, também foi possível verificar, de maneira geral, uma variação bem mais irregular dos erros altimétrico e planimétrico, bem como uma maior intensidade desses erros no dia da tempestade.

#### 4.2 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Com o objetivo de avaliar a influência, no posicionamento relativo com GPS, da severa tempestade geomagnética iniciada em 29 de Outubro de 2003, foram escolhidas três linhas de base dentro do território brasileiro, utilizando seis estações da RBMC (Tabela 13).

Tabela 13 - Linhas de base e estações RBMC envolvidas no experimento

<b>Linha de base</b>	<b>Comprimento (km)</b>
FORT-CRAT	~387,5
POAL-SMAR	~253,9
UEPP-PARA	~430,2

A escolha das estações e linhas de base para o experimento levou em consideração a disposição latitudinal das mesmas em relação ao Equador Geomagnético (Figura 53), de forma a possibilitar a análise da influência da Anomalia Equatorial, intensificada com a tempestade geomagnética, no posicionamento relativo.

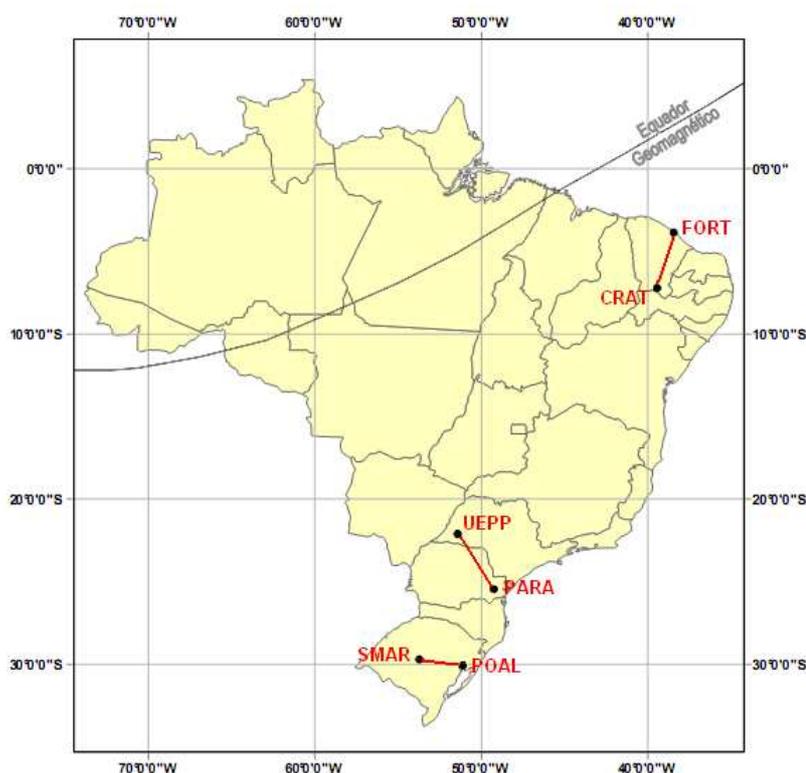


Figura 53 - Estações RBMC e linhas de base utilizadas no experimento

Para efeito comparativo, procurou-se um dia, dentro do mesmo mês, onde a atividade geomagnética fosse considerada calma, ou seja, com índice  $A_p$  menor que 8. Os índices  $A_p$  e as respectivas classificações quanto à atividade geomagnética para os dias envolvidos no experimento são explicitados na Tabela 14.

Tabela 14 - Atividade geomagnética nos dias envolvidos no experimento

<b>Dia/Mês</b>	<b>Índice Ap</b>	<b>Atividade Geomagnética</b>
11/Out	2	Calma
29/Out	204	Tempestade Severa

Fonte: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>  
(Acesso em Novembro, 2007)

É importante salientar que o mês de Outubro, próximo ao equinócio de primavera no hemisfério sul, é um mês característico, onde resultados piores no posicionamento com GPS já são esperados, mesmo em dias geomagneticamente calmos. Segundo experimentos realizados por Oliveira (2003), Matsuoka e Camargo (2004) e Dal Poz (2005), os efeitos da ionosfera no posicionamento com GPS (por ponto e relativo) são maiores próximos aos equinócios, ou seja, no período compreendido entre os meses de março/abril e setembro/outubro, maiores valores de TEC são observados sobre o território brasileiro. Nesse período, também se observa uma maior variação espacial e temporal do TEC devido à intensificação da anomalia equatorial, principalmente durante o seu segundo pico, nas horas próximas ao pôr-do-sol (MATSUOKA, 2007). Esse comportamento também foi observado em detalhes nos experimentos realizados nessa pesquisa, na seção 3.1 do capítulo 3. Conseqüentemente, maiores erros são esperados no posicionamento com GPS nessa época do ano e, por essa razão, foi escolhido, para comparação com o dia da tempestade, um dia dentro do mesmo mês (dia 11), submetido às mesmas características de variação sazonal do TEC, mas sem influência de tempestade geomagnética.

Embora isso já tenha sido comentando anteriormente, convém ressaltar também que, no processamento relativo, a observável normalmente utilizada é a dupla diferença de fase e/ou pseudodistância (MONICO, 2000), onde usualmente grande parte do erro sistemático devido à ionosfera pode ser cancelado, principalmente em linhas de base curtas, onde as observações GPS feitas pelas estações estão sob condições ionosféricas muito

semelhantes, e o erro da ionosfera, que contamina as observáveis, é altamente correlacionado entre os receptores. No entanto, quando a linha de base é mais extensa, como a utilizada nesse experimento, a ionosfera pode exercer grande influência nos resultados do posicionamento relativo, principalmente considerando que o território brasileiro, como visto na seção 3.1, se caracteriza por altas variações espaciais do TEC, em determinados horários e períodos, fazendo com que a maior parte do erro da ionosfera não possa ser eliminado, afetando a acurácia do posicionamento relativo.

As Figuras 54, 55 e 56 apresentam mapas do VTEC elaborados com arquivos IONEX disponibilizados pelo IGS. Os mapas horários de VTEC foram gerados no programa Surfer 7.0, utilizando o método de interpolação por Krigagem. Nos mapas, os valores de VTEC são expressos em unidades de TECU, e a Hora Local (HL) é referida ao meridiano 45°W.

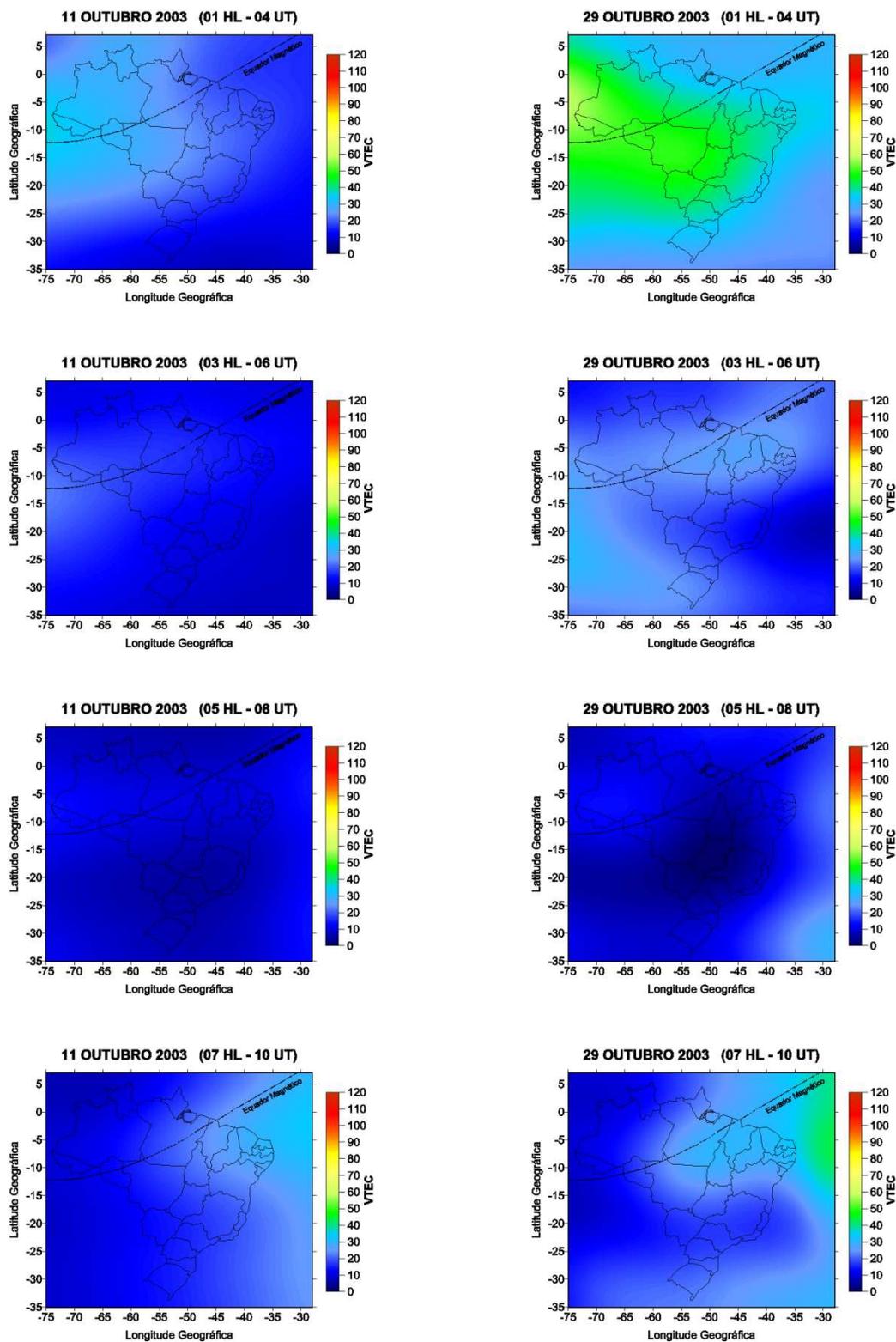


Figura 54 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (01-07 HL) (04-10 UT) e 29 Outubro 2003 (01-07 HL) (04-10 UT)

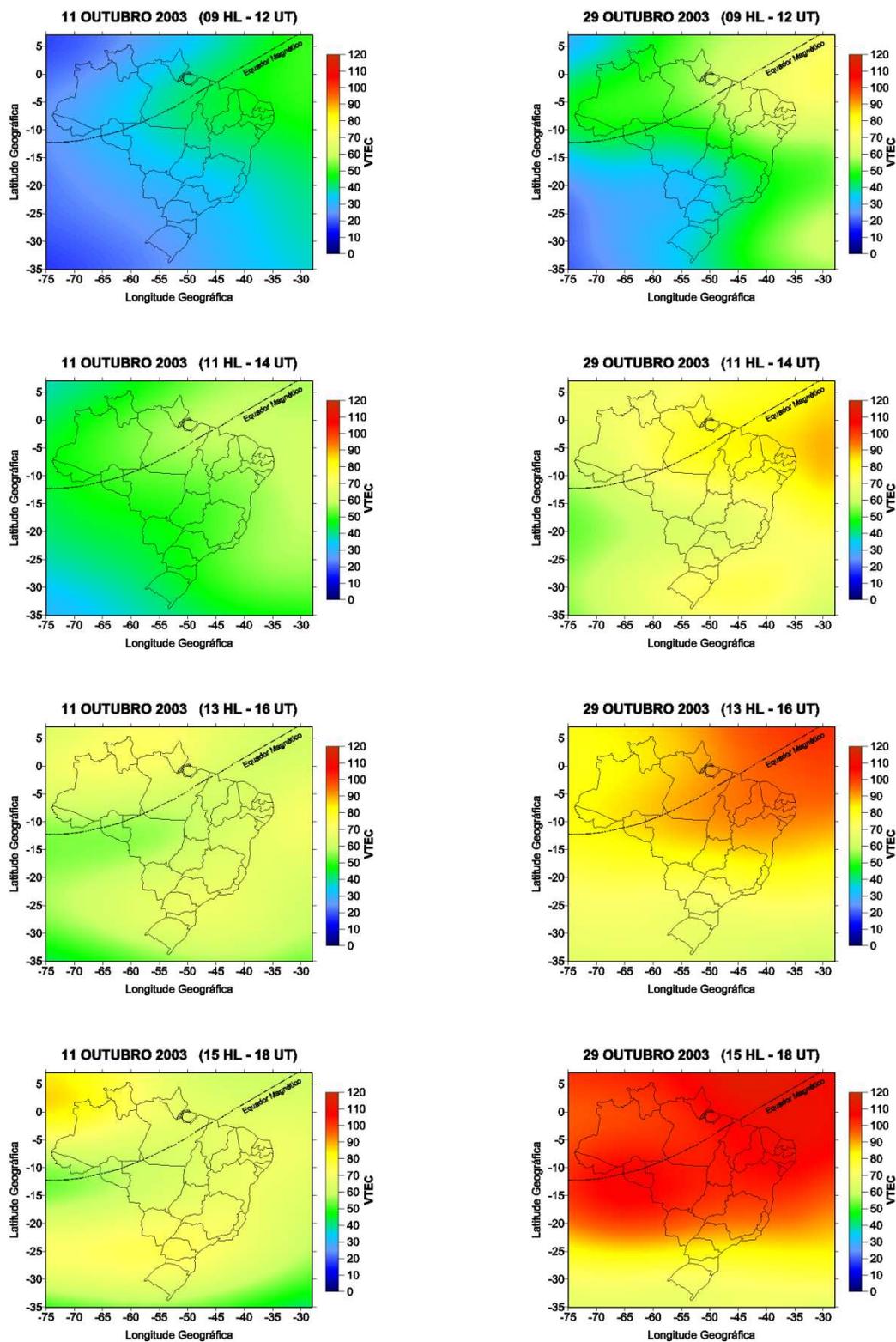


Figura 55 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (09-15 HL) (12-18 UT) e 29 Outubro 2003 (09-15 HL) (12-18 UT)

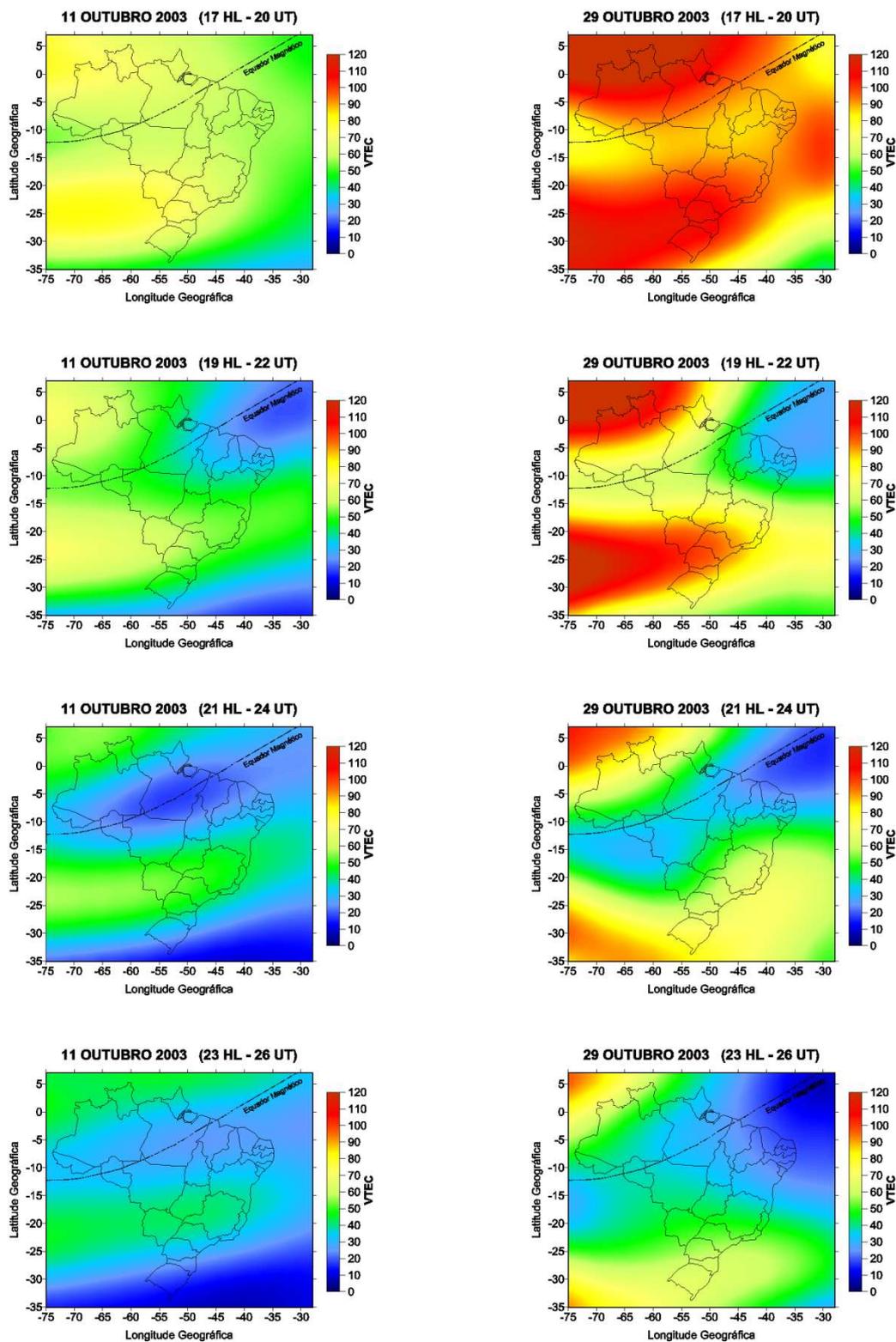


Figura 56 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (17-23 HL) (20-26 UT) e 29 Outubro 2003 (17-23 HL) (20-26 UT)

A inspeção visual dos mapas permite verificar a presença da anomalia equatorial aumentando o gradiente espacial do VTEC, principalmente na direção norte-sul e no período

da tarde. Embora a anomalia equatorial seja passível de identificação no dia 11, ela se destaca especialmente no dia 29, com altos valores e gradientes espaciais de VTEC, principalmente após as 19 HL. Comparando os mapas dos dois dias, verifica-se um aumento do TEC no período da tarde (a partir das 15 HL) no dia referente à tempestade geomagnética. Também se observa o aumento significativo do TEC na região da crista sul da anomalia equatorial noturna, bem como o deslocamento dessa região de crista para regiões mais ao sul do país, o que mostra a intensificação do efeito fonte no dia da tempestade. Essas características do TEC, observadas no dia da tempestade, possivelmente contribuem para uma mudança significativa do erro no posicionamento relativo das linhas de base processadas nesse período. Mais detalhes quando ao estudo do TEC no dia 29 de Outubro são apresentados em Batista *et al.* (2006) e Matsuoka (2007).

As linhas de base foram processadas utilizando o *software* GPSurvey 2.35, considerando como fixas as coordenadas conhecidas das estações FORT, POAL e UEPP (SIRGAS 2000). As posições para CRAT, SMAR e PARA foram estimadas a cada 2 horas no período compreendido entre 01 HL de 29 de Outubro de 2003 e 01 HL de 30 de Outubro de 2003, utilizando apenas os dados da portadora L1 (fase e código), ou seja, simulou-se que os receptores fossem de uma frequência e, portanto, altamente influenciados pela ionosfera. No processamento foram utilizadas efemérides transmitidas e máscara de elevação de 15°, não se aplicando nenhum modelo ionosférico, mas utilizando o modelo de Hopfield para correção do efeito da troposfera.

As linhas de base também foram processadas, nas mesmas condições, para o período compreendido entre 01 HL de 11 de Outubro de 2003 e 01 HL de 12 de Outubro de 2003, período classificado como geomagneticamente calmo.

As coordenadas estimadas no posicionamento relativo das estações CRAT, PARA e SMAR foram comparadas com as consideradas verdadeiras (SIRGAS 2000), obtendo-se assim, o erro posicional (discrepância) a cada 2 horas, para todos os dias do experimento.

As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam as discrepâncias obtidas em planimetria (Planim) e altitude geométrica (Alt Geom) para as estações utilizadas neste experimento. Também é apresentado o aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro, em termos percentuais. Nesse sentido, valores positivos significam um aumento das discrepâncias e valores negativos uma redução das discrepâncias.

Tabela 15 - Discrepâncias em Planimetria e Altitude Geométrica e percentual de aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro – Estação CRAT (linha de base FORT-CRAT)

Hora Local	Discrepâncias 11 Outubro 2003		Discrepâncias 29 Outubro 2003		Aumento das Discrepâncias Dia 29	
	Planim (m)	Alt Geom (m)	Planim (m)	Alt Geom (m)	Planim (%)	Alt Geom (%)
01-03	2,38	4,49	1,52	0,99	-36	-78
03-05	0,60	0,90	0,57	1,23	-5	37
05-07	0,83	0,81	1,56	0,19	89	-76
07-09	1,77	0,11	13,51	2,70	663	2345
09-11	1,17	0,51	4,87	2,37	318	369
11-13	2,22	2,11	1,23	1,62	-45	-23
13-15	1,43	2,07	1,35	0,73	-5	-65
15-17	0,80	1,21	2,96	4,87	272	301
17-19	6,56	6,50	3,18	3,22	-52	-51
19-21	4,61	11,34	10,96	4,55	138	-60
21-23	5,20	0,07	4,18	1,97	-20	2620
23-01	4,50	15,58	2,29	4,23	-49	-73

Tabela 16 - Discrepâncias em Planimetria e Altitude Geométrica e percentual de aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro – Estação SMAR (linha de base POAL-SMAR)

<b>Hora Local</b>	<b>Discrepâncias 11 Outubro 2003</b>		<b>Discrepâncias 29 Outubro 2003</b>		<b>Aumento das Discrepâncias Dia 29</b>	
	<b>Planim (m)</b>	<b>Alt Geom (m)</b>	<b>Planim (m)</b>	<b>Alt Geom (m)</b>	<b>Planim (%)</b>	<b>Alt Geom (%)</b>
01-03	0,13	0,17	0,31	0,29	134	68
03-05	0,04	0,19	1,49	1,29	3933	572
05-07	0,98	0,62	1,07	0,90	10	44
07-09	0,16	0,67	0,04	0,29	-78	-56
09-11	0,67	0,32	0,98	0,25	45	-23
11-13	0,74	0,59	1,24	0,64	68	9
13-15	0,41	0,33	2,42	2,70	484	707
15-17	0,54	0,04	2,51	0,37	362	877
17-19	0,91	8,93	15,30	10,96	1573	23
19-21	2,64	1,85	4,02	1,46	52	-21
21-23	1,10	0,31	5,75	1,10	423	253
23-01	0,24	1,08	5,00	9,49	2016	775

Tabela 17 - Discrepâncias em Planimetria e Altitude Geométrica e percentual de aumento das discrepâncias no dia 29 de Outubro – Estação PARA (linha de base UEPP-PARA)

<b>Hora Local</b>	<b>Discrepâncias 11 Outubro 2003</b>		<b>Discrepâncias 29 Outubro 2003</b>		<b>Aumento das Discrepâncias Dia 29</b>	
	<b>Planim (m)</b>	<b>Alt Geom (m)</b>	<b>Planim (m)</b>	<b>Alt Geom (m)</b>	<b>Planim (%)</b>	<b>Alt Geom (%)</b>
01-03	1,09	2,16	0,46	2,56	-58	18
03-05	0,86	0,12	1,16	1,02	34	744
05-07	0,47	0,85	1,95	1,32	315	56
07-09	0,60	0,11	0,35	0,59	-42	414
09-11	1,35	0,71	1,84	0,67	37	-6
11-13	1,38	1,34	0,45	0,98	-68	-27
13-15	1,97	0,39	1,11	0,67	-43	74
15-17	2,41	0,57	2,33	16,76	-3	2857
17-19	7,23	10,77	21,95	41,61	204	286
19-21	13,82	11,09	17,10	30,13	24	172
21-23	2,16	5,51	25,48	17,88	1078	225
23-01	4,67	16,74	13,12	1,77	181	-89

Para facilitar a interpretação das informações, os resultados são apresentados na forma de gráficos nas Figuras 57, 58 e 59 (Discrepâncias em Planimetria) e nas Figuras 60, 61 e 62 (Discrepâncias em Altitude Geométrica).

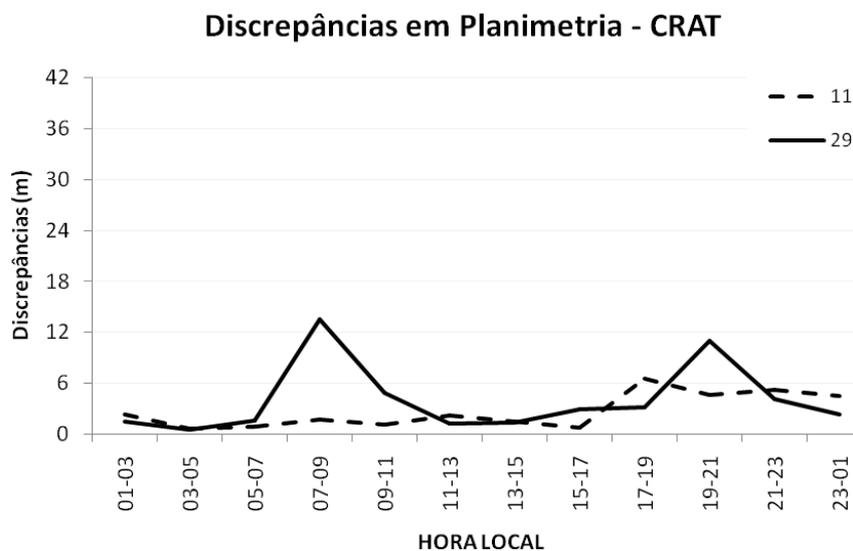


Figura 57 - Discrepâncias em Planimetria CRAT - 11 e 29 de Outubro de 2003

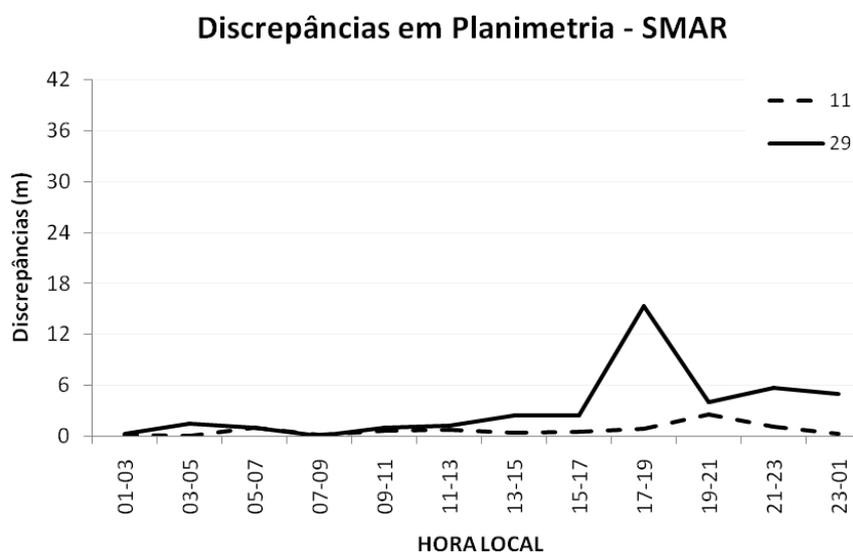


Figura 58 - Discrepâncias em Planimetria SMAR - 11 e 29 de Outubro de 2003

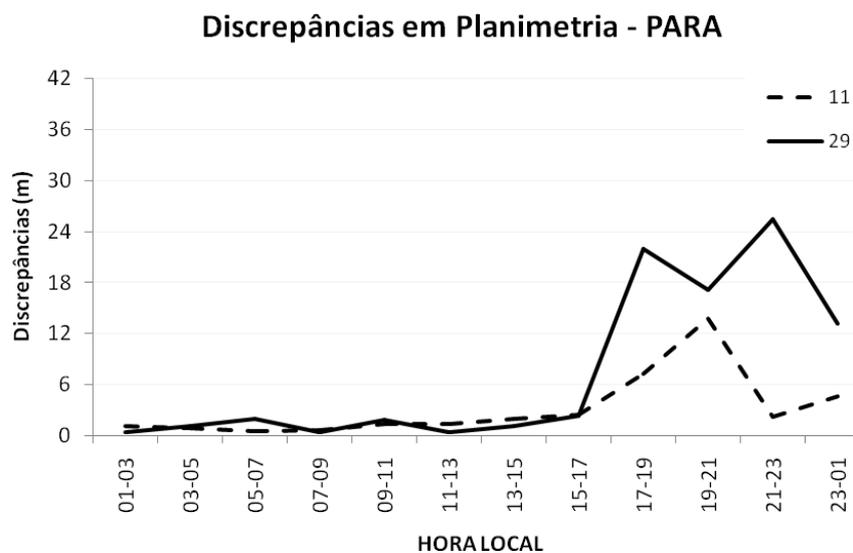


Figura 59 - Discrepâncias em Planimetria PARA - 11 e 29 de Outubro de 2003

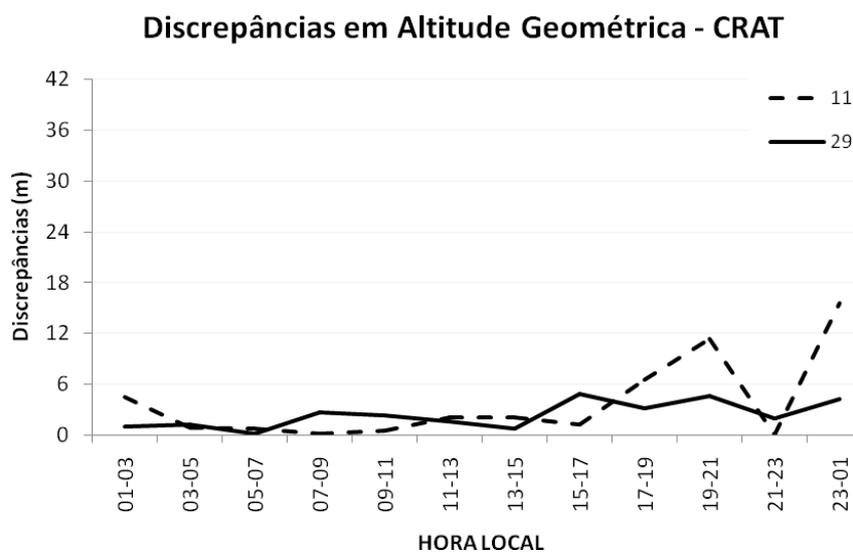


Figura 60 - Discrepâncias em Altitude Geométrica CRAT - 11 e 29 de Outubro de 2003

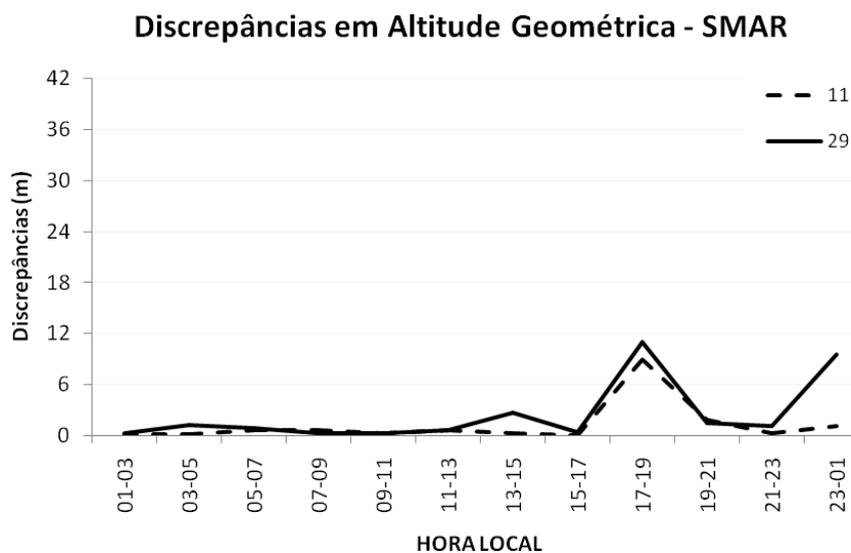


Figura 61 - Discrepâncias em Altitude Geométrica SMAR - 11 e 29 de Outubro de 2003

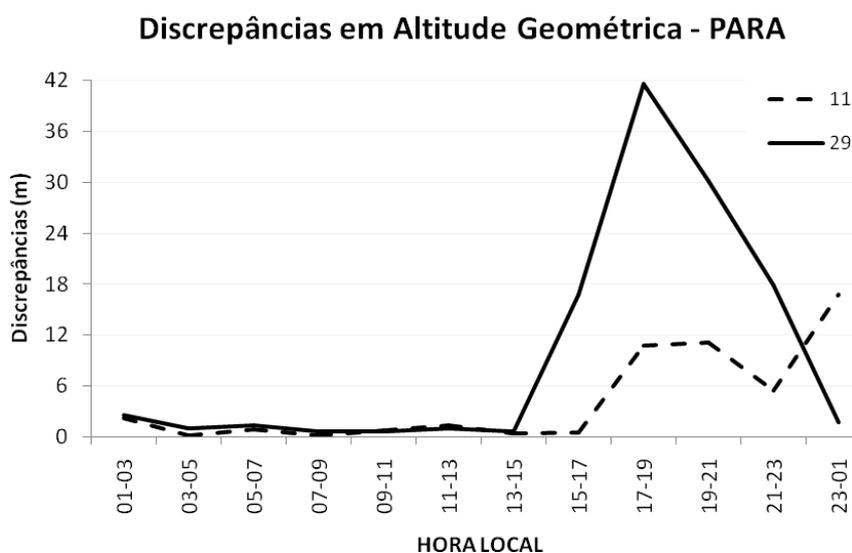


Figura 62 - Discrepâncias em Altitude Geométrica PARA - 11 e 29 de Outubro de 2003

A análise geral das Tabelas 15, 16 e 17 e dos gráficos nas Figuras 57 a 62 permite observar que o comportamento das discrepâncias é bastante semelhante durante a maior parte dos dias 11 e 29. Até por volta de 15 HL, as discrepâncias ficam abaixo de 3 m em ambos os dias (lembrando que são linhas de base longas e que foram utilizadas apenas as observáveis da portadora L1), para todas as linhas de base. É somente a partir desse horário que aumentam os valores das discrepâncias, assim como as diferenças entre os dois dias (com exceção da

estação CRAT, entre 07 e 09 HL do dia 29 de Outubro, que será abordada posteriormente). Considerando que o mês de Outubro é bastante perturbado ionosfericamente, que as linhas de base são bastante longas (entre 250 e 450 km), e que o processamento foi realizado utilizando apenas os dados da portadora L1 (fase e código), esse comportamento similar dos resultados entre boa parte dos dois dias, bem como o aumento das discrepâncias no final do dia, com amplitude maior no dia 29, reforça a relação entre os erros no posicionamento relativo e a variação espacial do TEC entre as estações das linhas de base. Retomando o que foi apresentado na análise dos mapas das Figuras 54, 55 e 56, verifica-se que um aumento das variações espaciais e dos valores do TEC começa a ocorrer em ambos os dias por volta das 15 HL; percebe-se também que há uma intensificação da anomalia equatorial no dia 29, principalmente no final do dia (anomalia equatorial noturna). Ou seja, há um aumento das variações espaciais na região brasileira, o que concorda tanto com o aumento das discrepâncias a partir das 15 HL em ambos os dias, quanto com o aumento percentual médio em todas as linhas de base (123% em planimetria e 57% em altitude geométrica), que é encontrado no dia 29 em relação ao dia 11, geomagneticamente calmo.

Particularizando a análise para os resultados do processamento no dia 29, dia sob efeito da severa tempestade geomagnética, uma primeira e importante observação é apresentada: no horário da chegada da CME à Terra e início da tempestade geomagnética (aproximadamente 03:11 HL do dia 29) não há nenhum aumento significativo nas discrepâncias nas linhas de base processadas nessas primeiras horas. Embora esse dado pareça contraditório, ele pode ser explicado considerando que, nesse horário, é madrugada sobre o território brasileiro, ou seja, a densidade de elétrons na ionosfera é muito baixa. Assim, mesmo que as alterações no campo magnético da Terra, devido à chegada da CME, estejam iniciando uma severa tempestade ionosférica, seus efeitos só deverão começar a ser sentidos de forma significativa sobre o território brasileiro com o início da atividade solar e aumento

do TEC na ionosfera, que acontece de forma suave até o período da tarde, com a formação da anomalia equatorial.

Esse aumento suave do TEC até o período da tarde é acompanhado pelo aumento suave das discrepâncias em todas as linhas de base nos dias do experimento, com exceção da linha de base FORT-CRAT no dia 29 que, como pode ser verificado na Figura 57, apresenta um pico anômalo nas discrepâncias da componente planimétrica entre 07 e 09 HL. A linha de base FORT-CRAT está localizada próxima ao equador geomagnético e esse comportamento anômalo pode ter relação com um estudo realizado por Batista *et al.* (2006), que relata que a análise de dados de digissondas (equipamento utilizado para medir parâmetros ionosféricos) localizadas na região do equador geomagnético e nas cristas da anomalia equatorial, bem como a análise de dados de TEC, revelaram um aumento do TEC na região brasileira durante as primeiras horas da manhã do dia 29, o que não é comum acontecer nesse horário. Nesse sentido, Abdu (1991) afirma que 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. Esse fenômeno aparece de forma destacada nos mapas de VTEC das primeiras horas da manhã, produzidos a partir de dados GPS da RBMC e da rede IGS, apresentados e discutidos por Batista *et al.* (2006) e reproduzidos na Figura 63. Também pode ser verificado nos mapas produzidos a partir dos arquivos IONEX (Figura 64), embora os mapas do IONEX apresentem resolução espacial mais baixa que os produzidos por Batista *et al.* (2006).

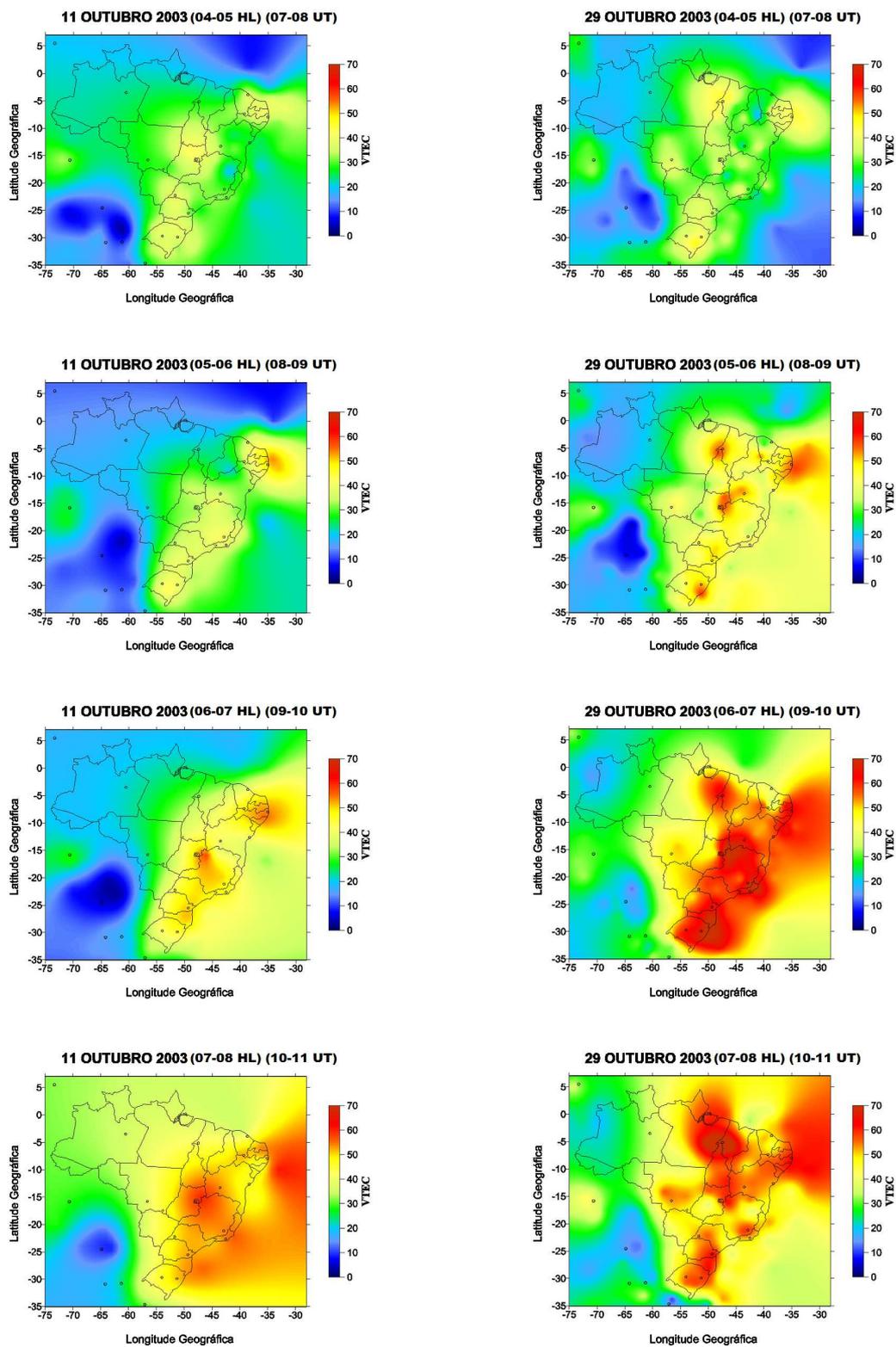


Figura 63 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (04-08 HL) (07-11 UT) e 29 Outubro 2003 (04-08 HL) (07-11 UT)  
 Fonte: Adaptado de Batista *et al.* (2006)

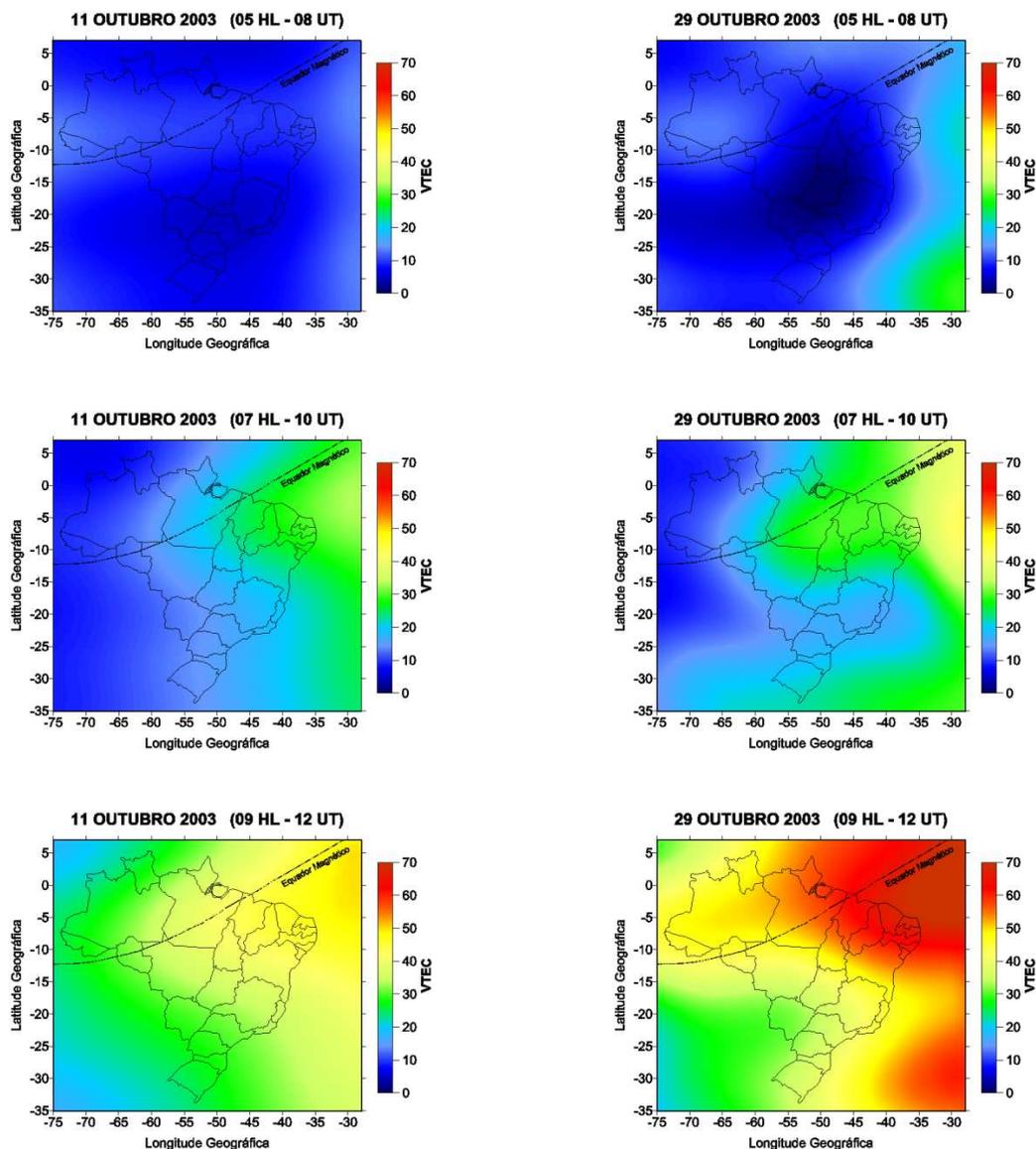


Figura 64 - Mapas horários: valores de VTEC para o Brasil em 11 Outubro 2003 (05-09 HL) (08-12 UT) e 29 Outubro 2003 (05-09 HL) (08-12 UT)

Esse aumento do TEC nas primeiras horas da manhã do dia 29 pode ter causado um aumento na variação espacial do TEC entre as estações FORT e CRAT, fazendo com que boa parte do erro devido à ionosfera não tenha sido cancelado, mesmo com o processamento relativo, sendo uma possível explicação para esse aumento não usual das discrepâncias planimétricas no início da manhã na linha de base FORT-CRAT. Fato curioso é que o mesmo aumento não foi verificado na componente altimétrica.

Como comentado anteriormente, é a partir das 15 HL que começam a ocorrer as maiores diferenças entre os resultados dos dois dias. No entanto, as discrepâncias encontradas nos resultados das linhas de base no final da tarde do dia 29 apresentam algumas particularidades interessantes. Por exemplo, verifica-se que, no final da noite do dia 29, os valores de discrepância da linha de base FORT-CRAT são menores que os encontrados no dia 11 (Tabela 15). Na linha de base UEPP-PARA (Tabela 17), verifica-se um aumento percentual acentuado das discrepâncias no início da noite, em relação ao dia 11, principalmente na componente altimétrica (Figura 62). Efetivamente, é nessa linha de base que os mais altos valores de discrepâncias são encontrados no dia 29. Contudo, no final da noite, as discrepâncias diminuem, chegando, no início da madrugada (entre 23 e 01 HL), a ficar menores (componente altimétrica) que as encontradas para o dia 11. Por sua vez, a linha de base POAL-SMAR (Tabela 16), que tem os melhores resultados no dia calmo, apresenta um aumento significativo das discrepâncias no final da noite e início da madrugada do dia da tempestade.

Para explicar os possíveis motivos para os comportamentos descritos anteriormente, verificados no final do dia 29, é preciso retomar o comportamento da anomalia equatorial no dia da tempestade. Matsuoka (2007), analisando os mapas de TEC (produzidos com os dados GPS de estações RBMC e da rede IGS) e os dados de digissonda para o dia 29, relata que, no período da tarde, ocorreu um aumento do TEC nas regiões próximas ao equador geomagnético, onde está localizada a linha de base FORT-CRAT. Mais tarde, por volta das 19:30 HL, foi observada uma intensificação da deriva vertical do plasma ionosférico na região equatorial e, em consequência do efeito fonte intensificado, ocorreu um deslocamento de elétrons para regiões ainda mais afastadas do equador, ou seja, as cristas da anomalia equatorial noturna foram deslocadas para regiões mais ao sul do equador geomagnético, com pode ser visualizado também nos mapas da Figura 56. Ressalta também que, por ter havido

essa intensificação de elétrons no equador geomagnético à tarde, espera-se que a densidade de elétrons nas regiões de cristas da anomalia equatorial após as 16 HL seja ainda maior.

Essa intensificação do efeito fonte no início da noite do dia 29 é uma possível explicação para a redução das discrepâncias (em relação ao dia 11) no final da noite na linha de base FORT-CRAT. Com a intensificação do efeito fonte, há uma redução da densidade de elétrons em uma região maior no entorno do equador geomagnético e, possivelmente, uma redução da variação espacial do TEC entre as estações FORT e CRAT, fazendo com que os resultados do posicionamento relativo sejam melhores nesse período, no dia da tempestade. A intensificação do deslocamento de elétrons para as regiões de cristas da anomalia, onde se encontra a linha de base UEPP-PARA, também explica o aumento das discrepâncias nessa linha de base no início da noite, quando é possível observar a passagem da crista sul intensificada da anomalia equatorial na região (Figura 56), causando um aumento da variação espacial do TEC. Possivelmente nesse período, as estações UEPP e PARA coletaram observações tanto de sinais GPS que atravessaram regiões de alta densidade de elétrons, como também de sinais que atravessaram regiões de baixa densidade de elétrons, diminuindo assim a compensação dos erros no processamento dos dados. O deslocamento da crista da anomalia equatorial noturna para regiões mais ao sul do equador geomagnético no final da noite e início da madrugada do dia da tempestade, além de ser o possível motivo para as discrepâncias diminuírem em UEPP-PARA no início da madrugada, também é o possível motivo para o aumento das discrepâncias no mesmo período na linha de base POAL-SMAR. A comparação dos mapas de VTEC do dia 11 e 29 (Figura 56) nesse período reforça ainda mais essa conclusão.

Confrontando os gráficos das Figuras 57 a 62, uma última observação pode ser feita: ao contrário do que pôde ser verificado com bastante clareza nos resultados do experimento com o posicionamento por ponto (seção 3.2) e, embora com menos intensidade,

nos resultados do experimento com o posicionamento relativo (seção 3.3), o resultado do posicionamento relativo em dia afetado por tempestades geomagnéticas severas, como é o caso desse experimento, mostra uma maior mudança do erro devido à ionosfera na planimetria, em relação à altitude geométrica. Ou seja, nos resultados do dia 29, exceto pela linha de base UEPP-PARA, as discrepâncias na componente planimétrica foram, em média, maiores do que as discrepâncias da componente altimétrica. Esses resultados indicam que, embora a planimetria tenha baixa correlação com o erro devido à ionosfera, em períodos de severas tempestades geomagnéticas ela também pode ser bastante afetada.

Relembrando que o dia 29 de Outubro de 2003 pertence a um dos períodos mais perturbados do Ciclo Solar 23, que a grande explosão solar ocorrida no dia anterior já havia produzido alterações significativas na densidade de elétrons da ionosfera e no posicionamento por ponto com GPS (MATSUOKA, CAMARGO e BATISTA, 2006), e que a CME que desencadeou a tempestade do dia 29 foi sucedida, pouco mais de 24 horas depois, por outra CME que desencadeou uma nova tempestade geomagnética na Terra ainda na fase de recuperação da tempestade do dia 29 (Tabela 11 e Tabela 12), há que se considerar que o comportamento da ionosfera estava muito fora dos padrões, mesmo para um período de alta atividade solar, o que, com certeza, teve grande influência nestes resultados não convencionais encontrados para o posicionamento com GPS, tanto no posicionamento por ponto (MATSUOKA, 2007) como no posicionamento relativo.

### 4.3 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desse experimento teve por objetivo verificar a influência da severa tempestade geomagnética, iniciada em 29 de Outubro de 2003, sobre a ionosfera e, conseqüentemente, sobre o posicionamento relativo com GPS na região brasileira. A avaliação do impacto no posicionamento por ponto no mesmo período foi estudada por Matsuoka (2007). Para o experimento foram utilizadas três linhas de base, com comprimentos variando entre aproximadamente 250 km e 430 km: FORT-CRAT (localizada nas proximidades ao equador geomagnético), UEPP-PARA (localizada nas proximidades da crista sul da anomalia equatorial) e POAL-SMAR (localizada na região do Rio Grande do Sul). No processamento realizado para o dia da tempestade (29) e também para um dia geomagneticamente calmo dentro do mesmo mês (11), foram utilizados apenas os dados da portadora L1 (fase e código), ou seja, simulou-se que os receptores fossem de uma frequência e, portanto, altamente influenciados pela ionosfera.

A análise do processamento, realizada através das discrepâncias entre as coordenadas processadas e as coordenadas oficiais das estações, mostrou que os resultados foram muito semelhantes entre os dois dias até por volta das 15 HL, em todas as linhas de base. No entanto, a partir desse horário, que também é o horário de início do aumento do TEC e de suas variações no dia da tempestade (29), maiores diferenças começaram a ser encontradas entre os dias, reforçando a influência da variação espacial do TEC no posicionamento com GPS, alterada no dia da tempestade em comparação ao dia calmo. O aumento percentual médio das discrepâncias nas linhas de base no dia 29, em relação ao dia 11, foi de 123% em planimetria e de 57% em altitude geométrica.

Particularizando a análise para os resultados do dia 29, verificou-se que, no horário de início da tempestade (aproximadamente 03:11 HL), não houve nenhum aumento significativo nas discrepâncias das linhas de base. Embora esse dado pareça contraditório, ele pode ser explicado considerando que esse é um horário em que baixos valores e variações espaciais do TEC são verificados na região brasileira, ou seja, mesmo com o início da tempestade, os baixos valores de TEC na ionosfera nesse período permitiram bons resultados no posicionamento com GPS. Com efeito, do início do dia 29 até o período da tarde, observou-se um aumento suave nas discrepâncias das linhas de base, acompanhando o aumento do TEC, com exceção da linha de base FORT-CRAT, que apresentou um pico anômalo nas discrepâncias planimétricas entre 07 e 09 HL. Retomando estudos de Batista *et al.* (2006), que verificou um aumento do TEC na região brasileira durante as primeiras horas da manhã do dia 29, é possível estabelecer uma relação entre essa presença matinal não usual da anomalia equatorial e o pico anômalo nas discrepâncias da linha de base FORT-CRAT, observado nas primeiras horas da manhã.

No final do dia 29, algumas particularidades interessantes foram observadas nos resultados, a saber: no final da noite, os valores de discrepância da linha de base FORT-CRAT foram inferiores aos encontrados no dia 11; na linha de base UEPP-PARA ocorreu um aumento acentuado das discrepâncias no início da noite, principalmente na componente altimétrica, mas até o final da noite as discrepâncias diminuíram, chegando a ficar menores que as encontradas no mesmo horário no dia 11; e, na linha de base POAL-SMAR, que apresentou os melhores resultados no dia calmo, um aumento significativo das discrepâncias foi observado no final da noite e início da madrugada do dia 29. Retomando o comportamento da anomalia equatorial no dia da tempestade, estudado por Matsuoka (2007), verifica-se que, no período da tarde do dia 29, ocorreu um aumento do TEC nas regiões próximas ao equador geomagnético. Mais tarde, por volta das 19:30 HL, foi observado um efeito fonte

intensificado, com deslocamento de elétrons e da crista sul da anomalia equatorial (intensificada) para regiões mais afastadas do equador (esse evento também foi observado nos mapas de VTEC gerados nesse experimento). Essa intensificação do efeito fonte é uma possível explicação para a melhora dos resultados em relação ao dia 11, na linha de base FORT-CRAT no final do dia 29, assim como também explica o aumento das discrepâncias em UEPP-PARA no início da noite. O deslocamento intensificado da crista sul da anomalia para regiões ainda mais afastadas do equador, por volta das 19:30 HL por sua vez, é o possível motivo para a melhora nas discrepâncias em UEPP-PARA e a piora das discrepâncias em POAL-SMAR no final da noite e início da madrugada do dia 29, com a chegada da crista sul da anomalia equatorial no Rio Grande do Sul.

Finalizando, os resultados desse experimento demonstraram também que, ao contrário do que foi observado nos experimentos do capítulo anterior, houve uma maior influência do erro devido à ionosfera na componente planimétrica, em relação à componente altimétrica, demonstrando que, embora a planimetria tenha baixa correlação com o erro devido à ionosfera, em períodos de severas tempestades geomagnéticas ela também pode ser bastante afetada. Considerando que o dia 29 de Outubro de 2003 pertence a um dos períodos mais perturbados do Ciclo Solar 23, e que a CME que iniciou a tempestade foi antecedida por uma grande explosão solar, há que se considerar que o estado da ionosfera estava muito fora dos padrões, o que, sem dúvida, contribuiu para esses resultados não convencionais no posicionamento relativo.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando que o Brasil, por suas dimensões continentais (que compreendem tanto a região equatorial quanto a região de baixas latitudes), é uma região afetada por circunstâncias ionosféricas especiais, como a presença da Anomalia Equatorial, a proximidade com a Anomalia Magnética do Atlântico Sul e até mesmo a ocorrência de irregularidades, como cintilação e bolhas ionosféricas; e considerando que a ionosfera é a principal fonte de erro sistemático das observáveis e do posicionamento com GPS, principalmente com a utilização de receptores de uma frequência, essa pesquisa se propôs a colaborar com o entendimento da relação entre a ionosfera e o GPS, aprofundando o estudo do comportamento do TEC e do seu impacto no posicionamento com GPS na região brasileira.

Nesse sentido, foram desenvolvidos experimentos para avaliar o comportamento do TEC e do posicionamento com GPS (por ponto e relativo) em períodos de alta e baixa atividade solar (utilizando-se dados dos meses de Janeiro de 2002 e 2006, Julho de 2002 e 2006, e Outubro de 2001 e 2006), bem como para avaliar o efeito de tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo com GPS na região brasileira. É importante ressaltar que os experimentos foram desenvolvidos utilizando dados (portadora L1) de estações GPS do Sistema de Controle Ativo Brasileiro (RBMC) e dados dos Mapas Globais da Ionosfera do IGS, todos disponibilizados de forma oficial e gratuita na internet.

Os resultados do experimento para avaliação do comportamento do TEC demonstraram uma relação direta entre o número de manchas solares e a densidade de elétrons na ionosfera: enquanto nos anos de alta atividade solar (maior número de manchas solares) a ionosfera apresentou altos valores de VTEC, com a diminuição do número de manchas solares (redução de aproximadamente 89% em 2006) – e conseqüente diminuição da

radiação solar – foi observada uma redução média geral de aproximadamente 70% nos valores de VTEC na região brasileira. Nesse experimento também foi possível avaliar o comportamento diário e sazonal do TEC, verificando-se, no período de alta atividade solar, que os horários (tarde e noite) e meses (Janeiro e Outubro) onde são encontrados os maiores valores e variações espaciais do TEC correspondem aos horários de formação da anomalia equatorial. Já no período de baixa atividade solar, com a redução considerável dos valores de VTEC, a presença da anomalia equatorial não ficou tão caracterizada, observando-se, além de um comportamento mais regular do TEC durante o dia, uma variação sazonal menos acentuada entre os meses do experimento.

As expectativas geradas pelos resultados da avaliação do comportamento do TEC foram refletidas nos resultados do experimento para avaliação do posicionamento por ponto e relativo. No experimento que tratou da avaliação do posicionamento por ponto com GPS, verificou-se uma diminuição considerável da média mensal do EMQ no período de baixa atividade solar (59% em planimetria e 64% em altitude geométrica), bem como uma maior influência da ionosfera sobre a componente altimétrica, justificada pelo fato que a geometria dos satélites favorece a compensação dos erros que contaminam as observáveis GPS no plano horizontal. No período de alta atividade solar, a análise da variação diária e sazonal do EMQ mostrou, de maneira geral, que o comportamento do erro seguiu o comportamento do TEC, sendo possível observar a influência da formação da anomalia equatorial noturna e da possível ocorrência de irregularidades ionosféricas, piorando os resultados entre o início da noite e as primeiras horas da madrugada, principalmente nos meses de Janeiro e Outubro, esse último, com maior intensidade. Para o período de baixa atividade solar, além da diminuição dos erros, também se constatou uma menor variação dos mesmos, tanto ao longo dos dias, quanto ao longo dos meses envolvidos no experimento.

No experimento que tratou da avaliação do posicionamento relativo com GPS, verificou-se uma redução percentual média do EMQ em torno de 65% em planimetria e 63% em altitude geométrica. Diferindo dos resultados do posicionamento por ponto, constatou-se ainda pouca diferença entre o EMQ na componente planimétrica e altimétrica, indicando que a dupla diferenciação das observáveis GPS no posicionamento relativo proporciona bons resultados na atenuação do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS. Em termos de variação diária e sazonal do erro, foi possível verificar, no período de alta atividade solar, piores resultados entre o final da tarde e meia-noite, para os meses de Janeiro e Outubro, e no período da tarde, para o mês de Julho, estabelecendo, mais uma vez a relação entre os resultados do posicionamento com GPS e os horários de formação da anomalia equatorial na região brasileira. No período de baixa atividade solar, os resultados acompanharam os experimentos anteriores, verificando-se uma diminuição considerável dos erros e suas variações, tanto ao longo dos dias, quanto ao longo dos meses.

O último experimento, que tratou dos efeitos de uma severa tempestade geomagnética sobre o posicionamento relativo com GPS na região brasileira, permitiu constatar que, durante eventos extraordinários como esse, o comportamento da ionosfera foge completamente dos padrões normais, mesmo para períodos de alta atividades solar, sendo possível observar, inclusive, a formação da anomalia equatorial em horários não usuais, bem como o deslocamento da crista da anomalia para regiões onde, costumeiramente, ela não é observada. Esse comportamento perturbado da ionosfera refletiu-se diretamente no posicionamento relativo, piorando os resultados em horários inesperados e em linhas de base normalmente não tão afetadas, devido a sua posição geográfica. Os resultados demonstraram também que, embora a planimetria tenha baixa correlação com o erro devido à ionosfera, em eventos extremos, como foi o caso dessa tempestade geomagnética, ela também pode ser bastante afetada.

De maneira geral, os resultados desses experimentos permitem concluir que a ionosfera realmente é um fator importante a ser considerado, principalmente no posicionamento com GPS de uma frequência e em regiões afetadas por altos gradientes espaciais do TEC, como é o caso da região brasileira, tanto no posicionamento por ponto, quanto no relativo. Estabelecida a correlação entre o parâmetro TEC e o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, torna-se possível afirmar que, em períodos de alta atividade solar, os períodos mais problemáticos para o posicionamento com GPS de uma frequência estão entre o início da tarde e o anoitecer, e, especialmente nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão, também entre o anoitecer e as primeiras horas da madrugada. Já no período de baixa atividade solar, apesar de, comparativamente, resultados muito melhores serem esperados em todos os dias e meses, o posicionamento é mais afetado durante a tarde, pois este é o horário em que maiores valores e variações do TEC são observados. De forma análoga, é aconselhável não realizar posicionamento com GPS durante períodos afetados por severas tempestades geomagnéticas devido às alterações não convencionais que esses eventos podem provocar na ionosfera. Cabe ressaltar, contudo, que severas tempestades geomagnéticas não ocorrem com muita frequência; de 2000 a 2008, apenas 14 dias estiveram sob influência de uma tempestade dessa categoria. A atividade geomagnética, que indica a ocorrência de abruptos eventos solares e geomagnéticos, pode ser acompanhada no endereço eletrônico <http://www.spaceweather.com> e <http://www.inpe.br/climaespacial/index.php>.

Finalmente, a partir do desenvolvimento dos trabalhos dessa pesquisa, têm-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliar a aplicação do Modelo da Ionosfera do IGS (arquivos IONEX) para correção do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, em períodos de alta e baixa atividade solar, na região brasileira;

- Produzir uma série de longo período (10 anos ou mais) de Mapas de VTEC para a região brasileira, utilizando os arquivos IONEX do IGS;
- Realizar o processamento do posicionamento por ponto e relativo de estações da RBMC (utilizando apenas os dados da portadora L1) para a produção de uma nova série de longo período (10 anos ou mais) de Mapas de VTEC, visando verificar, de forma mais detalhada, a relação entre a ionosfera e o posicionamento com GPS na região brasileira;
- Estudar o impacto de outras severas tempestades geomagnéticas no comportamento do TEC e no posicionamento com GPS, na região brasileira;
- Desenvolver metodologias para o estudo de irregularidades ionosféricas utilizando dados GPS da RBMC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): an overview. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, p. 757-771, 1991.

ACE. **ACE lists of disturbances and transients**. 2008. Disponível em: <[http://www.ssg.sr.unh.edu/mag/ace/acelists/obs\\_list.html#2003](http://www.ssg.sr.unh.edu/mag/ace/acelists/obs_list.html#2003)>. Acesso em: Maio, 2008.

AGUIAR, C. R. *et al.* **Determinação do erro sistemático na pseudodistância devido à Ionosfera: avaliação da performance do MOD\_ION e do modelo de Klobuchar**. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2003.

ANDREWS, M. D. **Characteristics of CMEs associated with big flares**. In: The 10th European Solar Physics Meeting, Prague, v. 2, p. 531-534, 2002.

BATISTA, I. S. *et al.* Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 887-892, 1996.

BATISTA, I. S. *et al.* Unusual early morning development of the Equatorial Anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006.

BECKER-GUEDES, F. *et al.* The ionospheric response in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm on 20 November 2003. **Annales Geophysicae**, v. 25, p. 863-873, 2007.

DAL POZ, W. R. **Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P.O.; AGUIAR, C. R. Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 1, 2008. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/11248>>. Acesso em: Junho, 2008.

DAVIES, K. **Ionospheric radio propagation**. New York: Dover, [1966]. 470 p.

ECHER, E. *et al.* O número de manchas solares, índice da atividade do Sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, 2003.

EL GIZAWY, M. L. **Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users**. 2003. 173 f. Thesis (Master of Science) – Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, 2003.

FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito de tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS**. 2003. 256 f. Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

FEDRIZZI, M. **Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados do GPS**. 1999. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FEJER, B. G. *et al.* Dependence of equatorial F region vertical drifts on Season and Solar Cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. 10, p. 792-796, 1979.

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para a avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GOODMAN, J. M. **Space weather & telecommunications**. Alexandria: Springer, 2005.

GOPALSWAMY, N. *et al.* Introduction to violent Sun-Earth connection events of October-November 2003. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 2005.

GPSPACE. **GPSPACE user's guide**. 2000. 58 f. Manual de *Software* – Geodetic Survey Division Canada, Natural Resources Canada, Canada, 2000.

HARTMANN, G. A. **A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: causas e efeitos**. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HATHAWAY, D. H. **Coronal Mass Ejections**. 2007. Disponível em:  
<<http://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml>>. Acesso em: Maio, 2008.

HATHAWAY, D. H. **The Sunspot Cycle**. 2008. Disponível em:  
<<http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>>. Acesso em: Junho, 2008.

HOLMAN, G. D. The Mysterious Origins of Solar Flares. **Scientific American**, v. 294, n. 4, p. 38-45, 2006.

HOWARD, R. A. **A historical perspective on Coronal Mass Ejections**. 2006. Disponível em: <<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/summerschool/lectures/>>. Acesso em: Outubro, 2007.

IBGE. **Resolução PR nº 5 – Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS.** 1993. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/normas\\_gps.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/normas_gps.pdf)>. Acesso em: Novembro, 2008.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.** 2008. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc\\_est.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc_est.shtm)>. Acesso em: Maio, 2008.

IGS. **IGS Products.** 2008. Disponível em: <<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: Maio de 2008.

JASKULSKI, T. *et al.* **Estudo do plasma ionosférico da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) utilizando riômetros.** In: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Ijuí, 2006.

KIRCHHOFF, W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial.** 1. ed. São Paulo: Nova Stella, 1991. 149 p.

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

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric effects on GPS.** In: Parkinson, B. W.; Spilker, J. J.. ed. *Global Positioning System: theory and applications.* Chapter 12. Washington: AIAA, v.1, 1996.

KOMJATHY, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System.** 1997. 248 f. Ph.D. Dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada, 1997.

LANGLEY, R. B. GPS, the Ionosphere, and the Solar Maximum. **GPS World**, 2000.  
Disponível em: <<http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/gpsworld.july00.pdf>>. Acesso em:  
Setembro, 2007.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560 p.

LIU, Y.; HAYASHI, K. The 2003 October-November fast Halo Coronal Mass Ejections and the large-scale magnetic field structures. **The Astrophysical Journal**, n. 640, p. 1135-1141, 2006.

LIU, Y.; WEBB, D. F.; ZHAO, X. P. Magnetic structures of solar active regions, full-halo, Coronal Mass Ejections and Geomagnetic Storms. **The Astrophysical Journal**, n. 646, p. 1335-1348, 2006.

MANNUCCI, A. J. *et al.* Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30, 2003 “Halloween Storms”. **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005.

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

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 264 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

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**, v. 56, n. 56/01, 2004.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando o modelo de Klobuchar e o regional da ionosfera: avaliação da performance do posicionamento por ponto. **Série em Ciências Geodésicas**, v. 2, p. 20-40, 2002.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando os mapas globais do TEC do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, p. 253-270, 2007.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: estudo de caso para o dia 28 de Outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, p. 315-334, 2006.

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 na 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. 237 p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: UNESP, 2000. 287 p.

OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

PHILLIPS, T. **Scientists Predict Big Solar Cycle**. 2006. Disponível em:  
<[http://science.nasa.gov/headlines/y2006/21dec\\_cycle24.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2006/21dec_cycle24.htm)>. Acesso em: Junho, 2008.

PHILLIPS, T. **Solar Cycle 24 Begins**. 2008. Disponível em:  
<[http://science.nasa.gov/headlines/y2008/10jan\\_solarcycle24.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2008/10jan_solarcycle24.htm)>. Acesso em: Junho, 2008.

RODRIGUES, F. S. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS**. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

SANTANA, D. C. **Estudos da evolução temporal/espacial das derivas das depleções do plasma ionosféricas por imagens digitais da aeroluminescência OI 630 nm noturna**. 2001. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SAVIAN, J. F.; *et al.* Análise de tempestades geomagnéticas super intensas e de estruturas do meio interplanetário relacionadas, através da observação de raios cósmicos de superfície de alta energia. **Revista Brasileira de Geofísica**, n. 23, p. 173-179, 2005.

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

SKONE, S. *et al.* **Performance evaluation of the Wide Area augmentation system for ionospheric storm events**. In: International Symposium on GNSS/GPS, p. 6-8, Australia, 2004.

SKONE, S. H. **GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions**. In: IGS Network Workshop, p. 12-14, Oslo, 2000.

SKONE, S.; KNUDSEN, K.; JONG, M. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions. **Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy**, v. 26, p. 613-621, 2001.

SKOUG, R. *et al.* Extremely high speed solar wind: October 29-30, 2003. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, 2004.

SOHO. **Solar and Heliospheric Observatory**. 2008. Disponível em:  
<[http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003\\_11\\_04](http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003_11_04)>. Acesso em: Maio, 2008.

SPACEWEATHER. **Spaceweather Glossary**. 2008. Disponível em:  
<<http://www.spaceweather.com/glossary/flareclasses.html>>. Acesso em: Maio, 2008.

SUGIURA, M.; KAMEI, T. **Índice Dst**. 2000. Disponível em: <<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>>. Acesso em: Setembro, 2007.

TSURUTANI, B. T. *et al.* The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005.

TSURUTANI, B. T.; GONZALES, W. D. **The interplanetary causes of magnetic storms: a review**. 1996. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2014/25038>>. Acesso em: Maio, 2008.

USGS. **USGS National Geomagnetism Program**. 2007. Disponível em:  
<<http://geomag.usgs.gov/intro.php>>. Acesso em: Maio, 2008.

VERONEZ, M. R. **Proposta de um modelo regional para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método seqüencial de ajustamento**. 2004. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

WEBB, D. P. **Coronal mass ejections: the key to major interplanetary and geomagnetic disturbances**. 1995. Disponível em: <<http://www.agu.org/revgeophys/webb01/webb01.html>>. Acesso em: Outubro, 2007.

WEBSTER, I. **A regional model for prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System**. 1993. Thesis (Master of Science) – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada, 1993.

WILSON, R. M.; HATHAWAY, D. H. **On the relationship between solar wind speed, geomagnetic activity, and the solar cycle using annual values**. Nasa, Marshall Space Flight Center, Alabama, 2008.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

ZHAO, B.; WAN, W.; LIU, L. Responses of equatorial anomaly to the October-November 2003 superstorms. **Annales Geophysicae**, n. 23, p. 693-706, 2005.