



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
FCT-FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

**WILLIAM RODRIGO DAL POZ**

**INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES SOBRE A INFLUÊNCIA DO  
CLIMA ESPACIAL NO POSICIONAMENTO RELATIVO COM  
GNSS**

**Tese de doutorado**

**Presidente Prudente  
Novembro/2010**

**WILLIAM RODRIGO DAL POZ**

**INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES SOBRE A INFLUÊNCIA  
DO CLIMA ESPACIAL NO POSICIONAMENTO RELATIVO  
COM GNSS**

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

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

**Presidente Prudente  
Novembro/2010**

D157i Dal Poz, William Rodrigo.  
Investigações preliminares sobre a influência do clima espacial no posicionamento relativo com GNSS / William Rodrigo Dal Poz. - Presidente Prudente : [s.n], 2010  
159 f. : il.

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

Orientador: Paulo de Oliveira Camargo

Banca: João Francisco Galera Monico, Edvaldo Simões da Fonseca Junior, Cláudia Pereira Krueger, Moisés Ferreira Costa  
Inclui bibliografia

1. Posicionamento relativo. 2. Linha de base. 3. GNSS. 4. Ionosfera. 5. Clima espacial. I. Autor. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

CDD 621.71

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO  
(Orientador)




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



PROF. DR. EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JÚNIOR  
(USP)



PROFA. DRA. CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER  
(UFPR)



PROF. DR. MOISÉS FERREIRA COSTA  
(UFV)



WILLIAM RODRIGO DAL POZ

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 03 DE NOVEMBRO DE 2010

RESULTADO: APROVADO

## RESUMO

O erro devido à ionosfera nas observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é diretamente proporcional à densidade de elétrons presente na ionosfera e inversamente proporcional a frequência do sinal. Da mesma forma que no posicionamento por ponto, os resultados obtidos no posicionamento relativo são afetados pelo efeito sistemático da ionosfera, que é uma das maiores fontes de erro no posicionamento com GNSS. Mesmo considerando que parte dos erros devido à ionosfera é cancelada na dupla diferenciação, a ionosfera pode causar fortes impactos no posicionamento relativo. O problema principal neste método de posicionamento é a variação espacial na densidade de elétrons, que pode ocorrer em função de vários fatores, tais como hora local, variação sazonal, localização do usuário, ciclo solar e atividade geomagnética. Dependendo das condições do clima espacial, que é controlado pelo Sol, a atividade geomagnética pode ser alterada de forma significativa, dando origem a uma tempestade geomagnética. Nesta pesquisa foram avaliados os efeitos da ionosfera no posicionamento relativo, com observações GNSS da fase da onda portadora (L1), nas regiões ionosféricas de latitude média e alta e na região equatorial. Nas duas primeiras regiões foram analisados os efeitos da ionosfera em períodos de irregularidades, decorrentes de tempestades geomagnéticas. Na região equatorial, que engloba o Brasil, foram analisados os efeitos da ionosfera em função da variação diária e sazonal. No processamento dos dados GNSS foi utilizado o GPSeq, que processa os dados na forma recursiva e fornece os Resíduos Preditos da Dupla Diferença da Fase (RPDDF). A análise dos resultados foi realizada a partir das discrepâncias calculadas entre os valores das coordenadas de referência e as estimadas pelo GPSeq. Além disso, foi realizada uma análise em função dos RPDDF. Foram verificados os efeitos da fase principal e de recuperação da tempestade. Em uma linha de base de 191 km, localizada na região de latitude alta, a discrepância em altimetria foi da ordem de 2,3 m, no período da fase principal da tempestade. Em contrapartida, na fase de recuperação da tempestade o valor da discrepância diminuiu aproximadamente 20 vezes (0,11 m), proporcionando discrepância em altimetria menor do que a obtida em uma linha de base de apenas 20 km. Na latitude média, no mesmo período analisado, não foi verificado efeito da tempestade em uma linha de base de 165 km, em função da hora local. Em contrapartida, foram verificados indícios dos efeitos da tempestade próximo do terminadouro, de acordo com os RPDDF. Na região ionosférica equatorial foi verificada forte influência da hora local nas discrepâncias obtidas, em linhas de base que variaram de 30 a 120 km. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que o clima espacial tem forte influência no posicionamento relativo com observações GNSS da portadora L1.

**Palavras chave:** Posicionamento relativo; Linha de base; GNSS; Ionosfera; Clima espacial.

## ABSTRACT

The error caused by ionosphere on GNSS (Global Navigation Satellite System) is directly proportional to the density of electrons from ionosphere and inversely proportional to the frequency squared of the signal GNSS. As in the case of point positioning, results in relative positioning are affected by systematic effect from ionosphere, which is one of major error sources in the GNSS positioning. Although some errors caused by ionosphere are canceled in double difference, strong impacts may be caused by ionosphere on the relative positioning. In this positioning the main problem is the spatial variation in electron density that can occur due local time, seasonal variation, user location, solar cycle, geomagnetic activity, etc. Depending on the conditions of space weather, in which is controlled by the Sun, the geomagnetic activity can be changed inducing geomagnetic storms. In this research the effects from ionosphere has been evaluated in GNSS relative positioning using L1 carrier phase observations, at the three regions of the ionosphere: middle and high latitudes and equatorial region. In regions of middle and high latitudes have been analyzed the effects from ionosphere in irregularities periods, caused by geomagnetic storms. In the equatorial region, including Brazil, have been analyzed the effects from ionosphere according daily and seasonal variation. In the processing GNSS data has been used GPSeq software. This software processes the data in a recursive form and provides the Predicted Residual of Carrier Phase Double Difference (PRCPDD). The analyses of the obtained results have been carried out from the discrepancies between the reference coordinates and corresponding ones obtained in the processing from GPSeq. Besides, the analysis also has been performed of according to the PRCPDD. Have been verified the effects of the storm main phase and recovery phase. For a baseline length of 191 km, at high latitude, the discrepancy value in altimetry was about 2.3 m, during the storm main phase. However, during storm recovery phase, the discrepancy decreased about 20 times (0.11 m). This value was smaller than the value obtained for a baseline length of only 20 km. At middle latitude, during the same period, have not been verified storm effects, for a baseline length of 165 km, due to local time. However, have been verified indications of storm effects near the terminator region, according to PRCPDD. At equatorial region, has been verified strong influence of the local time in the obtained discrepancies. In this case, the baseline lengths range from 30 to 120 km. According to the obtained results, has been verified that the space weather may exerts strong influence in GNSS relative positioning, with L1 carrier phase observations.

**Key Words:** Relative Positioning; Baseline; GNSS; Ionosphere; Space Weather

## LISTA DE SIGLAS

AE	<i>Auroral Electrojet</i>
AGU	<i>American Geophysical Union</i>
CCI	Com Correção da Ionosfera
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CORS	<i>Continuously Operating Reference Station</i>
CSRS	<i>Canadian Spatial Reference System</i>
DD	Dupla Diferença
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DIA	Detecção, Identificação Adaptação
DP_RPDDF	Desvio-Padrão do Resíduo Predito da Dupla Diferença de Fase
Dst	<i>Disturbance Storm-Time</i>
EUREF	<i>EUREF Permanent Network</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GOM	<i>Global Overall Model</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EMBRACE	Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUV	Extremo Ultravioleta
FCT/UNESP	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista
HF	<i>High Frequency</i>
HL	<i>Hora Local</i>
HSS	<i>High Speed Stream</i>
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IMF	<i>Interplanetary Magnetic Field</i>
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>

Kp	<i>Planetarische Kennziffer</i>
Mod_Ion	Modelo Regional da Ionosfera
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NGS	<i>National Geodetic Survey</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canadá</i>
PRGNSS	Posicionamento Relativo com GNSS
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	Serviço de Posicionamento Preciso
PZ-90	<i>Parametry Zemli – 1990</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RPDDF	Resíduo Predito da Dupla Diferença de Fase
RIBaC	Rede INCRA de Bases Comunitárias
SCI	Sem Correção da Ionosfera
SA	<i>Selective Availability</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SCA	Sistemas de Controle Ativo
SDF	<i>Sudden Disappearing Filaments</i>
SOHO	<i>The Solar &amp; Heliospheric Observatory</i>
SPS	Serviço de Posicionamento Padrão
SRB	<i>Solar Radio Burst</i>
STEREO	<i>Solar Terrestrial Relations Observatory</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>Total Electron Content Units</i>
TU	Tempo Universal
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VLF	Frequência muito baixa
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>

## **Dedicatória**

*Aos meus amados pais Helia Grando Dal Poz e  
Guilherme de Gentilim Dal Poz.*

*“É na educação dos filhos que se  
revelam as virtudes dos pais”. (Coelho Neto)*

*Aos meus queridos irmãos, Zinho e Aluir.*

*Pelo exemplo de perseverança e  
honestidade!*

*A minha amada esposa Aninha.*

*Não há melhor oportunidade na vida  
para um homem ter conhecimento da grandeza  
de uma mulher do que em momentos de  
dificuldades.*

*As minhas queridas sobrinhas, Maria Clara,  
Mariana e Ana Luiza.*

*Que alegria tê-las como sobrinhas!*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a DEUS pelo maior milagre de todos: A VIDA!

Agradeço ao meu amigo e orientador, Paulo de Oliveira Camargo, pelo apoio, compreensão e principalmente confiança. Parceiros desde o pico de atividade solar do ciclo 23, já se vão nove anos. Durante esse período, enquanto o ciclo 23 dava início ao período de declínio, minha admiração perante meu orientador dava início ao período de ascensão. Espero que nossa parceria dure pelo menos mais um ciclo solar, e que nossa amizade dure o máximo de ciclos possíveis!

Ao João Francisco Galera Monico, pela disponibilidade do GPSeq, que foi fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Departamento de Geodésia Matemática e Posicionamento, da Universidade de Tecnologia de Delft, em especial a Gabriele Giorgi, pela disponibilidade do SkyLab.

A todos os membros da banca examinadora: João Francisco Galera Monico, Edvaldo Simões da Fonseca Junior, Cláudia Pereira Krueger e Moisés Ferreira Costa, pelas importantes contribuições.

Ao Haroldo, pelas ajudas com o GPSeq, que foram decisivas, e ao Poleszuk, ou simplesmente Poli, pelas várias ajudas sobre vários assuntos.

A todos os professores do Departamento de Cartografia e Pós Graduação.

A todos os alunos da Pós-Graduação, em especial ao Marcelo (Gaúcho) e Yuri, pela voluntariedade e amizade.

Ao setor de Agrimensura e Cartografia da Universidade Federal de Viçosa-MG, pelo apoio e incentivo.

Aos amigos Wellington e Tânia, pelos vários momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa, sob a forma de bolsa de demanda social.

## EPÍGRAFE

*A natureza, por mais estranha, por mais diversa, por mais complexa que seja, nunca está em contradição com a lógica de nosso pensamento, quando este se liberta de seus preconceitos e dos esquemas limitados.*

*Piero Pasolini*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema Sol-Terra.....	32
Figura 2 – Representação esquemática das três camadas solares mais externas.....	33
Figura 3 – Foto do eclipse total mostrando a cromosfera.....	34
Figura 4 – Ilustração de HSS emanando dos buracos coronais.....	36
Figura 5 – Ilustração do IMF com o vento solar.....	37
Figura 6 – Magnetosfera formada pela interação do vento solar com o campo magnético da Terra...38	
Figura 7 – Possíveis divisões da atmosfera terrestre.....	42
Figura 8 – Processo de Fotoionização.....	44
Figura 9 – Ilustração da formação da ionosfera.....	45
Figura 10 – Densidade Eletrônica em função da altitude.....	48
Figura 11 – Imagem da superfície do Sol mostrando algumas manchas solares.....	50
Figura 12 – Número de manchas solares – Ciclos solares.....	51
Figura 13 – Número de manchas solares observadas – Ciclo 23.....	52
Figura 14 – Predição do número de manchas solares do ciclo 24.....	53
Figura 15 – Exemplo de buraco coronal, que aparece na imagem como região mais escura.....	54
Figura 16 – Modelo do campo magnético da Terra.....	55
Figura 17 – Influência do vento solar no campo geomagnético.....	57
Figura 18 – Matéria de um grande desaparecimento de filamento.....	59
Figura 19 – Taxas de ocorrência entre 1970 a 1983 dos três eventos solares que afetam a ionosfera.60	
Figura 20 – Relação entre distúrbios magnéticos e manchas solares.....	61
Figura 21 – Numero médio de dias com distúrbios em cada mês do ano 1932 – 1983.....	62
Figura 22 – Suscetibilidade do campo geomagnético estar sendo perturbado por eventos solares.....63	
Figura 23 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982.....	65
Figura 24 – Circulação devido ao vento solar.....	67
Figura 25 – Tempestades com início súbito e gradual.....	68
Figura 26 – Conseqüências de uma grande explosão solar.....	69
Figura 27 – Regiões geográficas da ionosfera.....	70
Figura 28 – Imagem de satélite do oval auroral.....	72
Figura 29 – Esquema de forças agindo no plasma.....	74
Figura 30 – Movimento de íons e elétrons na presença de campos elétricos e magnéticos.....	75
Figura 31 – Propagação da fase e do grupo.....	79

Figura 32 – Sistema ortogonal de eixos (x, y, z).....	82
Figura 33 – Conceito de giro-freqüência para íons e elétrons, na presença de um campo magnético.....	83
Figura 34 – Modelo da simples camada e o vetor indução geomagnética B.....	88
Figura 35 – Vetores de indução geomagnética plotados nas alturas dos pontos ionosféricos. ....	90
Figura 36 – Mapa global da ocorrência da cintilação ionosférica.....	93
Figura 37 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.....	94
Figura 38 – Variação sazonal da ocorrência de bolhas de plasma. ....	95
Figura 39 – Ilustração de onda polarizada linearmente (a) e circularmente à direita (b). ....	97
Figura 40 – Refração ionosférica em função do ângulo de elevação para as portadoras L1 e L2. ....	98
Figura 41 – Ilustração do espalhamento dos sinais GPS (espalhamento do sinal).....	99
Figura 42 – Formação da dupla diferença. ....	101
Figura 43 – Mancha solar 930.....	106
Figura 44 – RPDDF referentes à linha de base CAGS_NRC1.....	108
Figura 45 – Rastro dos satélites e <i>Skyplot</i> referentes à linha de base CAGS_NRC1.....	110
Figura 46 – RPDDF referentes à linha de base ELIZ_NTKA.....	114
Figura 47 – Rastro dos satélites e <i>Skyplot</i> referentes à linha de base ELIZ_NTKA. ....	115
Figura 48 – RPDDF referentes à linha de base ESCU_FRDN. ....	118
Figura 49 – Rastro dos satélites e <i>Skyplot</i> referentes à linha de base ESCU_FRDN.....	120
Figura 50 – RPDDF referentes à linha de base BELL_EBRE. ....	123
Figura 51 – Rastro dos satélites e <i>Skyplot</i> referentes à linha de base BELL_EBRE.....	124
Figura 52 – RPDDF referentes à linha de base EBRE_VALE.....	126
Figura 53 – RPDDF para o dia 14/12/2006 referentes à linha de base EBRE_VALE.....	129
Figura 54 – RPDDF para o dia 15/12/2006 referentes à linha de base EBRE_VALE.....	130
Figura 55 – RPDDF para o dia 17/12/2006 referentes à linha de base EBRE_VALE.....	130
Figura 56 – RPDDF para o dia 18/12/2006 referentes à linha de base EBRE_VALE.....	130
Figura 57 – RPDDF referentes à linha de base CTEG_CTGU. ....	132
Figura 58 – Rastro dos satélites e <i>Skyplot</i> referentes à linha de base CTEG_CTGU.....	133
Figura 59 – RPDDF obtidos para a linha de base de 30 km.....	139
Figura 60 – RPDDF obtidos para a linha de base de 40 km.....	140
Figura 61 – RPDDF obtidos para a linha de base de 60 km.....	141
Figura 62 – RPDDF obtidos para a linha de base de 80 km.....	142
Figura 63 – RPDDF obtidos para a linha de base de 100 km.....	143
Figura 64 – RPDDF obtidos para a linha de base de 120 km.....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação GPS/GLONASS/Galileo. ....	27
Tabela 2 – Principais fontes de erros e seus efeitos no GNSS. ....	28
Tabela 3 – Características das camadas ionosféricas. ....	48
Tabela 4 – Características decorrentes de SDF. ....	59
Tabela 5 – Valores dos índices Kp e condições da atividade geomagnética. ....	64
Tabela 6 – Classificação de uma tempestade geomagnética. ....	65
Tabela 7 – Efeito da ionosfera para diferentes frequências e erro residual na vertical para combinações entre duas frequências. ....	87
Tabela 8 – Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera. ....	87
Tabela 9 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base CAGS_NRC1. ....	109
Tabela 10 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base CAGS_NRC1 ....	112
Tabela 11 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base ELIZ_NTKA. ....	115
Tabela 12 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base ELIZ_NTKA. ....	117
Tabela 13 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base ESCU_FRDN. ....	119
Tabela 14 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base ESCU_FRDN. ....	121
Tabela 15 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linhas de base CAGS_NRC1 e ESCU_FRDN. ....	122
Tabela 16 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base BELL_EBRE. ....	124
Tabela 17 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base BELL_EBRE. ....	125
Tabela 18 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base EBRE_VALE. ....	127
Tabela 19 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base EBRE_VALE. ....	128
Tabela 20 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base CTEG_CTGU. ....	133
Tabela 21 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base CTEG_CTGU. ....	134
Tabela 22 – Discrepâncias calculadas para as quatro estações do ano. ....	136
Tabela 23 – Média do DP_RPDDF para todas as linhas de base e estações do ano. ....	145

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Considerações e Motivação.....	16
1.2 Objetivos .....	22
1.3 Justificativa .....	23
1.4 Conteúdo do Trabalho.....	25
2 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS).....	26
3 SISTEMA SOL-TERRA .....	31
3.1 Considerações Iniciais .....	31
3.2 O Sol.....	33
3.3 O meio Interplanetário e o Vento Solar.....	35
3.4 A Magnetosfera .....	38
4 IONOSFERA.....	42
4.1 Considerações Iniciais .....	42
4.2 Processo de Ionização.....	43
4.3 Estrutura da Ionosfera.....	45
4.4 Variações da Densidade de Elétrons .....	49
4.4.1 Variações temporais .....	49
4.4.2 Influência da variação da radiação solar .....	53
4.4.3 Influência do campo geomagnético.....	55
4.4.3.1 Tempestades geomagnéticas .....	56
4.4.3.1.1 Índices geomagnéticos.....	64
4.4.4 Regiões geográficas da ionosfera .....	70
4.4.4.1 Regiões de latitudes médias.....	70
4.4.4.2 Regiões de latitudes altas.....	71
4.4.4.3 Região equatorial.....	73
4.4.4.3.1 Anomalia equatorial ou anomalia de Appleton .....	73

5 IMPACTO DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS.....	77
5.1 Elementos de Propagação de Ondas.....	77
5.2 Índice de Refração da Ionosfera .....	81
5.2.1 Efeitos de primeira, segunda e terceira ordens da ionosfera .....	84
5.2.2 Cintilações de fase e amplitude .....	91
5.2.3 Outros efeitos ionosféricos.....	96
5.3 Influência da Ionosfera na Formação das Duplas Diferenças .....	100
6 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES .....	103
6.1 Considerações Iniciais .....	103
6.2 Primeiro Experimento .....	105
6.2.1 Resultados e análise.....	107
6.3 Segundo experimento .....	134
6.3.1 Resultados e análise.....	135
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

## 1 INTRODUÇÃO

*“A coisa mais bela que o homem pode experimentar é o mistério”*

*Einstein*

### 1.1 Considerações e Motivação

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma das tecnologias mais avançadas que surgiu recentemente, tendo revolucionado as atividades relacionadas com posicionamento a partir da tecnologia espacial. Um dos principais componentes do GNSS é o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelos Estados Unidos da América (EUA), que se encontra em plena operação, além do GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), similar ao GPS, desenvolvido na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas), e hoje sendo de responsabilidade da República da Rússia. O GLONASS foi declarado operacional em 1996, mas não teve a devida manutenção. No entanto, nos últimos anos o sistema foi recuperado, com lançamento de vários satélites. Em outubro deste ano, a constelação do GLONASS contava com 26 satélites, sendo 21 operacionais, 3 em manutenção e 2 de reserva (GLONASS, 2010).

Em dezembro de 2005 foi lançado o primeiro satélite (teste) do Galileo, que está sendo desenvolvido pela União Européia, devendo entrar em operação em 2013. Além desses, compõem o GNSS, os chamados SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), tais como o WAAS (*Wide Area Augmentation System*) nos EUA e EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) na Europa, além de outras iniciativas similares.

Um novo sistema, denominado *Beidou* (nome chinês) ou *Compass*, está sendo desenvolvido pela China, com base em satélites geoestacionários para serviços de navegação na China e em regiões vizinhas, e gradualmente poderá se tornar um sistema global (MONICO, 2008). A previsão é para que o sistema *Compass* esteja completo em 2020 (INSIDE GNSS, 2010a).

O posicionamento utilizando GNSS, basicamente, pode ser realizado na forma absoluta (por ponto) e relativa. No posicionamento por ponto, necessita-se de apenas um receptor, e a posição do ponto é determinada em tempo real ou pós-processada. Atualmente há vários serviços na rede mundial de computadores que permitem ao usuário calcular suas coordenadas com precisão (até poucos centímetros) na forma *on-line* tendo posse apenas do arquivo de observação,

abrindo perspectivas de uso do posicionamento por ponto até então não esperadas (MONICO, 2008). O JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) disponibiliza um serviço gratuito de posicionamento por ponto preciso (PPP). O NRCan (*Natural Resources Canadá*) também disponibiliza o serviço para processamento dos dados GNSS a partir do PPP. Outros serviços de PPP *on-line* podem ser encontrados na rede mundial de computadores. Dentre eles pode-se citar o serviço prestado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que faz uso do mesmo aplicativo de processamento desenvolvido pelo NRCan.

O DGPS (*Differential GPS*) foi desenvolvido com o objetivo de reduzir os efeitos da técnica SA (*Selective Availability*). Neste método um receptor estacionado em um ponto de coordenadas conhecidas (estação de referência) envia as correções de coordenadas ou de pseudodistâncias, por um meio de comunicação (por exemplo, via link de rádio), para o receptor que se deseja calcular a posição, que realiza o posicionamento por ponto.

No método de Posicionamento Relativo com GNSS (PRGNSS) normalmente são utilizadas as equações de duplas diferenças (DD) da fase da onda portadora. Este método de posicionamento é muito atrativo, pois proporciona uma boa relação entre ruído resultante da combinação e a eliminação de erros sistemáticos envolvidos nas observáveis originais (MONICO, 2008).

Com o surgimento dos Sistemas de Controle Ativo (SCA) não é mais necessário ocupar as estações base, o que implica na possibilidade de se utilizar apenas um receptor para realizar PRGNSS. Os dados dos SCA podem ser acessados via *Internet ou FTP (File Transfer Protocol)*. No Brasil a principal rede de referência ativa é a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), estabelecida pelo IBGE. A RBMC passou por um processo de modernização e atualmente vários dos receptores rastreiam observações do GPS e GLONASS. O Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) adquiriu 83 receptores de dupla frequência GPS/GLONASS, e os dados são disponibilizados pela RIBaC (Rede INCRA de Bases Comunitárias), bem como pela RBMC. Isto se deve a uma parceria entre o IBGE e o INCRA, oficializada em 2006 após a assinatura de um termo de cooperação técnica entre as instituições, que permitiu a integração da RBMC e a RIBaC, sendo denominadas então de RBMC/RIBaC (FORTES et al., 2007). Além disso, tem a Rede GPS Ativa do Estado de São Paulo (Rede SP) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP (FCT/UNESP), que conta com 12 receptores GNSS (GEGE, 2010).

Há vários SCA espalhados pelo mundo, sendo que os mais conhecidos são as redes CORS (*Continuously Operating Reference Station*), EUREF (*EUREF Permanent Network*) e a CSRS (*Canadian Spatial Reference System*).

A CORS é gerenciada pela NGS (*National Geodetic Survey*), e atualmente conta com mais de 1450 estações (NOAA, 2010). Boa parte das estações está localizada nas regiões de latitudes média e alta do hemisfério norte. A EUREF conta com 244 estações localizadas principalmente no continente Europeu, em latitude média. A CSRS conta com 50 estações, sendo que boa parte das estações estão localizadas na região ionosférica de alta latitude. Todas as estações estão instaladas no Canadá.

Diante de várias estações que são disponibilizadas de forma gratuita, principalmente nas regiões de médias e altas latitudes, atualmente trata-se de uma ótima oportunidade para a realização de estudos sobre a influência da ionosfera no GNSS, sem a necessidade de coleta de dados em campo. Devido a grande dimensão do Brasil, e ao baixo número de estações pertencentes à RBMC, comparado com as 3 redes ativas citadas, as distâncias entre as estações correspondem a linhas de base muito longas. Com isso, para realizar estudos desta natureza na região equatorial, há necessidade de coletar dados em campo, abrangendo linhas de base menores.

A ionosfera é uma das maiores fontes de erro sistemático no posicionamento com GNSS, principalmente, para os usuários de receptores GPS de uma frequência, no posicionamento por ponto, bem como no PRGNSS. No entanto, em períodos de irregularidades ionosféricas, mesmo com uso de receptores de dupla frequência, os resultados do PRGNSS podem ser afetados.

A ionosfera é definida como a parte superior da atmosfera onde existe ionização suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). O principal processo de formação de elétrons livres na ionosfera é a fotoionização que consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991). Desta forma, a atividade ionosférica é extremamente influenciada pelo comportamento da atividade solar. Vários são os efeitos que a ionosfera causa nos sinais GNSS, no entanto, dois dos mais significativos são devido ao avanço da fase e retardo do código (KLOBUCHAR, 1996). A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta o código e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do

caminho percorrido pelo sinal, ao passo que, no caso da fase da portadora, ocorre uma diminuição do comprimento aparente.

Outro efeito que afeta consideravelmente os sinais GNSS é a cintilação ionosférica. As cintilações ionosféricas podem ser definidas como sendo flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons, e, conseqüentemente, do índice de refração (RODRIGUES, 2003). Nota-se que, de acordo com esta definição, as ocorrências de cintilação ionosférica estão associadas com a existência de irregularidades na densidade de elétrons. Normalmente essas irregularidades que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altura (DAVIES, 1990). Trata-se de um assunto de grande interesse nacional e internacional, visto que seus efeitos podem afetar consideravelmente os sinais GNSS, podendo causar até perda de sinal. Com isso, várias aplicações podem ser prejudicadas, como por exemplo, a navegação aérea (CANAVITSAS, ASSIS e AMENDOLA, 2004). Alguns receptores foram desenvolvidos especialmente para monitorar o nível de cintilação ionosférica, denominados de SCINTMON (RODRIGUES, 2003).

O atraso do código e avanço da fase são inversamente proporcionais ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC), presentes ao longo do caminho do sinal entre o satélite e o receptor, dado por elétrons por metro quadrado ( $\text{el}/\text{m}^2$ ). O TEC varia no tempo e no espaço, e é influenciado por diversos fatores, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, campo geomagnético, entre outros. (KLOBUCHAR, 1991). Todos esses fatores ou variáveis são altamente dependentes do clima espacial (*Space Weather*), que é influenciado pelo Sol e pelos vários fenômenos solares, que podem aumentar ainda mais a variabilidade ionosférica, podendo comprometer de forma significativa o PRGNSS.

Vários estudos foram realizados sobre a influência da ionosfera no posicionamento por ponto. Camargo (1999) desenvolveu um modelo regional da ionosfera (Mod\_Ion), para aplicações em receptores de uma frequência. Os seus experimentos consistiram, basicamente, na análise do modelo no posicionamento por ponto. Em Dal Poz (2002) foi avaliado o Mod\_Ion no período de máxima atividade solar (2000-2001 – ciclo 23) no posicionamento por ponto. Nesta pesquisa também foram elaborados mapas do TEC para o Brasil, e, a partir destes, foi verificado que os maiores valores do TEC foram obtidos próximo aos equinócios (abril/outubro), e os

menores próximos aos solstícios (janeiro/junho). Isto também foi verificado em Camargo e Dal Poz (2002) e Oliveira (2003). Matsuoka (2003) avaliou várias funções de modelagem da ionosfera, bem como algumas funções de mapeamento, ambos no posicionamento por ponto. Na seqüência, Matsuoka (2007) pesquisou os efeitos da ionosfera no posicionamento por ponto na região brasileira em diversas condições ionosféricas. Recentemente, AGUIAR (2010) desenvolveu uma metodologia para gerar uma grade ionosférica para navegação e posicionamento por ponto, com informações da qualidade dos valores do VTEC (*Vertical TEC*).

Vários outros trabalhos relacionados com os efeitos da ionosfera no posicionamento por ponto foram realizados, tais como: Camargo, Monico e Ferreira (2000a), Camargo, Monico e Ferreira (2000b), Camargo et al., (2001a), Camargo, Monico e Matsuoka (2001a), Camargo, Monico e Matsuoka (2001b), Matsuoka e Camargo (2002), Aguiar et al., (2003), Matsuoka e Camargo (2003a), Matsuoka e Camargo (2003b), Matsuoka, Camargo e Dal Poz (2004), Camargo et al., (2004), Camargo, Matsuoka e Dal Poz (2004), Aguiar (2005), Camargo et al. (2008), Armendaris et al. (2009), Salomoni et al. (2009), dentre vários outros trabalhos. No posicionamento por ponto, os efeitos causados pela ionosfera são mais previsíveis, visto que os resultados são afetados pela magnitude do TEC, ao passo que no PRGNSS, os resultados são afetados diretamente pela variação espacial do mesmo, mesmo diante do fato de que grande parte dos erros da ionosfera pode ser cancelada pelas observações de DD.

Alguns estudos foram realizados considerando os efeitos da ionosfera no PRGNSS. Marques (2008) estimou os resíduos ionosféricos no contexto das DD e também eliminou os efeitos de segunda e terceira ordem no PRGNSS e no posicionamento por ponto. Marques et al. (2008) estimou os efeitos residuais da ionosfera nas equações de DD. Neste trabalho foram processadas linhas de base médias e longas e os resultados mostraram que a utilização dessa técnica proporciona estimativa das coordenadas com acurácia da ordem de poucos centímetros. Porém, os dados processados não são correspondentes a períodos de irregularidades da ionosfera.

Silva (2009) realizou avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS, incluindo o PRGNSS. Nesta pesquisa, ao considerar a modelagem estocástica em função da cintilação ionosférica, os resultados atingiram melhorias da ordem de 93 %, em relação à modelagem padrão. Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados no norte da Europa (linha de base de 125 km), os quais estão sob condições de cintilação ionosférica. No entanto, os dados

não estavam afetados por efeitos de tempestades geomagnéticas. Esses resultados também podem ser verificados em Silva et al. (2010).

É importante salientar que há vários trabalhos que avaliaram os efeitos da ionosfera no DGPS. SKONE e SHRESTHA (2002) apresentaram as limitações da acurácia do posicionamento DGPS em baixas latitudes durante máxima atividade solar do ciclo 23. Há alguns trabalhos também sobre a influência de tempestade geomagnética no desempenho de receptores GPS. Skone (2001) avaliou os impactos de tempestades geomagnéticas no desempenho de receptores GPS, no qual foi demonstrada a degradação no desempenho do rastreamento dos receptores GPS em baixas e altas latitudes durante um evento de tempestade. Porém, os efeitos da tempestade não foram avaliados na acurácia do posicionamento. Em Cosentino et al. (2006) é apresentada uma boa descrição sobre os efeitos da variação espacial do TEC no DGPS. Em períodos de irregularidades da ionosfera, podem ocorrer altas variações do TEC em distâncias de apenas 10 km. Em suma, é bem conhecido que a acurácia do DGPS pode ser severamente degradada em regiões de altas variações na densidade de elétrons.

Diante do exposto, em virtude da carência de estudos dos efeitos do clima espacial no PRGNSS, há a necessidade de realizar experimentos nesta direção, considerando as irregularidades e turbulências que podem ocorrer na ionosfera.

Como o erro devido à ionosfera depende do TEC da ionosfera e da frequência do sinal, usuários de receptores de dupla frequência podem efetuar correções deste efeito, por meio de combinações lineares das observáveis obtidas simultaneamente em ambas portadoras. Como exemplo, pode-se citar a observável denominada livre da ionosfera (*ionospheric free signal* ou simplesmente *ion free*). Essa observável elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera. No entanto, devido ao alto preço de receptores de dupla frequência, foram desenvolvidos modelos para correção do efeito da ionosfera na portadora  $L_1$ . A quantificação deste efeito pode ser feita por meio de (CAMARGO, 1999):

- Coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação, utilizando o modelo de Klobuchar (1987);
- Observações coletadas com receptores GPS de uma frequência.
- Observações coletadas com receptores GPS de dupla frequência (*Ion\_Free*).

Vale salientar que as duas primeiras técnicas são feitas a partir de modelagem, e são aplicadas, principalmente, no posicionamento por ponto. Além disso, em períodos de perturbações na ionosfera, decorrentes de alterações do clima espacial, o processo de modelagem pode não ser eficiente, na maioria dos casos, principalmente com uso do modelo de *Klobuchar*, que é mais eficiente nas regiões de latitudes médias ou em condições moderadas da ionosfera. No segundo caso faz-se uso das observações coletadas somente na portadora L1 (pseudodistância e fase). Modelos mais eficientes foram desenvolvidos, utilizando receptores GNSS de dupla frequência. No entanto, em períodos de fortes alterações do clima espacial a eficiência do modelo pode ser comprometida.

É muito importante diferenciar efeitos da ionosfera moderada (termo inglês normalmente utilizado *background* ou *benign*) da ionosfera perturbada ou eivada de distúrbios e irregularidades decorrentes de alterações do clima espacial. No primeiro caso, os efeitos da ionosfera são decorrentes de variações bem conhecidas pela comunidade científica, tais como variação diária, sazonal, localização do usuário, etc. Os modelos, ou técnicas de observação, são eficientes com relação a essas variações. Em contrapartida, em função de altas variações do clima espacial, decorrentes de fenômenos solares, o desempenho de modelos ou técnicas de observação pode ser seriamente comprometido.

As mesmas considerações são válidas no caso do PRGNSS. Em períodos de variações ionosféricas decorrentes da variação diurna, sazonal, localização do usuário, etc (ionosfera moderada), a DD pode minimizar grande parte dos erros ionosféricos. Em contrapartida, em períodos de perturbações e irregularidades na ionosfera, decorrentes de alterações do clima espacial, a acurácia do PRGNSS pode ser significativamente degradada.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto de doutorado consiste em uma análise da influência da ionosfera no PRGNSS nas três regiões ionosféricas. Sendo assim, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Realizar um estudo sobre a ionosfera, focando sua relação com o sistema Sol-Terra, e conseqüentemente com o clima espacial, e estudar a sua influência no PRGNSS;

- Analisar os efeitos de tempestades geomagnéticas no PRGNSS nas regiões ionosféricas de latitudes média e alta;
- Realizar uma análise diária e sazonal da ionosfera na região equatorial, em função do comprimento da linha de base, envolvendo dados coletados durante o período de declínio do ciclo solar 23;
- Contribuir quanto ao sinergismo entre áreas do conhecimento como a geodésia e geofísica espacial, bem como contribuir como subsídio a bibliografia nacional, considerando a relação entre GNSS e o clima espacial.

### 1.3 Justificativa

O erro devido à ionosfera é uma das maiores fontes de erro sistemático no posicionamento com receptores GNSS. Na América do Sul e na América Central (parte da região equatorial), as medidas GPS são afetadas por diversas condições ionosféricas, como por exemplo, o efeito da cintilação ionosférica e da anomalia equatorial (WANNINGER, SEEBER e CAMPOS, 1991 e 1992), (CAMPOS, WANNINGER e SEEBER, 1993) e (DAL POZ, 2005). Nas regiões ionosféricas de latitudes altas os efeitos da ionosfera são significativos, principalmente em decorrência de alterações do clima espacial. Seus efeitos podem ser expandidos para a região ionosférica de latitudes médias. Todos esses efeitos podem afetar de forma significativa no posicionamento com GNSS. Desta forma, investigações relacionadas com a ionosfera nas três regiões ionosféricas são de extrema importância. Além disso, os estudos realizados no Brasil utilizaram dados da RBMC ou foram coletados na região equatorial. Estudos nas outras regiões ionosféricas, que ainda não foram realizados, são de extrema importância.

Indiretamente, o clima espacial é o principal fator que altera as condições ionosféricas, devido a fenômenos solares. Basta ocorrer, por exemplo, uma explosão solar ou uma ejeção de massa coronal para que o clima espacial seja alterado, desde que a explosão ou a ejeção sejam

direcionadas para a Terra. Com isso, podem ocorrer altas variações na densidade de elétrons, comprometendo o desempenho do PRGNSS.

Nos últimos anos, o clima espacial tem despertado grande interesse nacional e principalmente internacional. Com o advento de várias missões com o objetivo de estudar o Sol por sensoriamento remoto, tais como a missão SOHO (*The Solar & Heliospheric Observatory*) e a mais recente missão STEREO (*Solar TERrestrial RELations Observatory*), dentre outras missões, houve um maior interesse em entender a influencia do Sol e o seu impacto nas tecnologias. Dentre essas tecnologias, pode ser citado o GNSS. Tradicionalmente os efeitos da ionosfera no GNSS foram estudados a partir do conhecimento detalhado da ionosfera, sem considerar sua relação com o clima espacial.

Após uma rápida pesquisa na rede mundial de computadores pode ser verificado um grande número de centros de pesquisas que fazem previsão do clima espacial. O NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) é responsável por um centro de previsão do clima espacial (*Space Weather Prediction Center*) <<http://www.swpc.noaa.gov/>>. A ESA (*European Space Agency*) também trabalha com previsões de mesma natureza.

A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) é responsável por um ótimo serviço disponível na rede mundial de computadores (<http://www.spaceweather.com>). Há várias informações sobre a ocorrência de tempestades geomagnéticas sobre as condições do vento solar, inclusive informações de previsão de tempestades geomagnéticas em latitudes média e alta. Vale destacar que os efeitos de tempestades nas latitudes altas podem ser propagados para a região equatorial.

No Brasil, o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), que vem se destacando no estudo de fenômenos espaciais, é responsável pelo programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial), que teve início em 2008. Tem como missão o monitoramento, modelagem e difusão da informação do clima espacial com investigação dos fenômenos e previsão dos efeitos significativos no espaço próximo e no território brasileiro, incluindo impactos em sistemas tecnológicos espaciais e terrestres (INPE, 2010).

Um ano após a criação do EMBRACE, em outubro de 2009 foi realizado o Primeiro *Workshop* sobre o Programa do Clima Espacial – EMBRACE. Teve como objetivo trazer para o EMBRACE as experiências internacionais de outros centros de previsão do clima espacial (INPE, 2010).

A AGU (*American Geophysical Union*) edita e publica periódicos (*Journal*) científicos de alta reputação. Recentemente, passou a publicar o “*Space Weather: The International Journal of Research and Applications (ISSN 1542-7390)*”. Trata-se de uma publicação *on-line* dedicada ao campo emergente do clima espacial e seus impactos nos sistemas tecnológicos, incluindo os sistemas de navegação por satélites (AGU, 2010).

Verifica-se, portanto, que recentemente, houve um crescente interesse nacional e internacional sobre o tema. Além disso, passa a ser um importante campo de pesquisa, envolvendo o GNSS. Trata-se de um momento oportuno para dar início ao sinergismo entre a geodésia e geofísica espacial, considerando a relação entre GNSS e o clima espacial, que ainda é pouco divulgado no Brasil.

#### **1.4 Conteúdo do Trabalho**

O conteúdo desse trabalho está dividido em sete capítulos, de modo a alcançar os objetivos propostos na pesquisa de doutorado. No segundo capítulo, é apresentada uma breve revisão sobre o GNSS, comparando os três principais sistemas. Além disso, é feito também um breve comentário sobre os erros no GNSS, focando o posicionamento relativo. No terceiro capítulo é apresentada uma revisão sobre o sistema Sol-Terra, bem como sua influência no clima espacial, visto que é de extrema importância para o entendimento dos efeitos ionosféricos nos sinais GNSS, principalmente no PRGNSS. Uma revisão sobre a ionosfera, contemplando o processo de ionização, estrutura da ionosfera e as causas das variações na densidade de elétrons, é apresentada no quarto capítulo. No capítulo quinto é abordado o assunto referente ao impacto da ionosfera na propagação dos sinais GNSS, descrevendo os elementos de propagação de ondas, os efeitos de primeira, segunda e terceira ordem da ionosfera, o efeito da cintilação ionosférica nos sinais GPS, dentre outros efeitos ionosféricos. Além disso, são feitos alguns comentários sobre os efeitos da ionosfera na formação da DD. Os experimentos realizados, bem como as análises dos resultados, são apresentados no capítulo sexto. As considerações finais, conclusões e recomendações são apresentadas no capítulo sétimo.

## 2 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE (GNSS)

*“Sem os recursos prodigiosos da astronomia, seria impossível a navegação. E a navegação foi o fator máximo do progresso da humanidade”*

*Amoroso Costa*

GPS não é o único sistema de navegação por satélites. Há também o GLONASS e o Galileo, bem como outros sistemas, como o SBAS, WASS, EGNOS e outras iniciativas similares. Um nome mais geral dado a esses sistemas é GNSS (*Global Navigation Satellite System*). O termo GNSS foi usado na X Conferência de Navegação Aérea em 1991, quando a ICAO (*International Civil Aviation Organization*) reconheceu que o GNSS será o sistema de navegação do século XXI. GNSS não inclui somente conceitos que são normalmente relacionados com posicionamento por satélites, tais como acurácia e precisão. Conceitos de integridade, disponibilidade e continuidade do serviço passaram a ser de fundamental importância (SEEBER, 2003).

Atualmente, pode ser encontrada de forma fácil na literatura uma descrição detalhada do GPS. Alguns exemplos clássicos de livros são: Parkinson e Spilker Jr. (1996), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001), Seeber (2003), Leick (1995), Monico (2008), dentre outros. Da mesma forma, o GLONASS que também é bem conhecido pelos pesquisadores da área, pode-se encontrar informações sobre o sistema em algumas das referências citadas. Além disso, atualmente há bons *sites* especializados no assunto, além de vários relatórios (*reports*) disponíveis na rede mundial de computadores. Diante do exposto, não serão detalhados neste capítulo os sistemas GPS e GLONASS, que já são adotados na prática. Da mesma forma não será detalhado o Galileo, que ainda está em fase de desenvolvimento. Contudo, por motivos de comparação, a tabela 01 mostra as principais diferenças entre os 3 sistemas GNSS (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2008).

Tabela 1 – Comparação GPS/GLONASS/Galileo.

Características	GPS	GLONASS	GALILEO
Primeiro lançamento	22/02/1978	12/10/1982	28/12/2005
Capacidade completa	17/07/1995	18/01/1996	2012-2013 <sup>(1)</sup>
Financiamento	Público	Público	Público e privado
Número nominal de Sat	24	24	27
Planos orbitais	6	3	3
Inclinação da órbita	55 <sup>0</sup>	64,8 <sup>0</sup>	56 <sup>0</sup>
Semi-eixo maior	26.560 km	25.508 km	29.601 km
Separação do plano orbital	60 <sup>0</sup>	120 <sup>0</sup>	120 <sup>0</sup>
Plano dentro da fase	Irregular	±30 <sup>0</sup>	±40 <sup>0</sup>
Período orbital	11h 57.96min	11h 15.73min	14h 4.75min
Efemérides	Elem. Keplerianos e coeficientes de correção	Posição, velocidade e vetores de aceleração	Elem. Keplerianos e coeficientes de correção
Sistema de Referência Geodésico	WGS-84	PZ-90	GTRF
Sistema de tempo	Tempo GPS, UTC (USNO)	Tempo GLONASS, UTC (SU)	Sistema de tempo Galileo
Leap seconds	Não	sim	sim
Separação do sinal	CDMA	FDMA	CDMA
Número de freqüências	3-L1, L2, L5	Um por 2 SV antipodal	3(4) – E1, E6, E5(a,b)
Freqüências (MHz)	L1: 1.575,420 L2: 1.227,600 L5: 1.176,450	G1: 1.602.000 G2: 1.246,000 G3: 1.204,704 <sup>1</sup>	E1: 1.575,420 E6: 1.278,750 E5: 1.191,795
Número de códigos	11	6 <sup>1</sup>	10
Integridade do sistema	Não (GPS III: sim)	Não (GLONASS-K: sim <sup>1</sup> )	Sim

<sup>1</sup> – A ser confirmado.

De acordo com a tabela 01 verifica-se que no futuro o número nominal de satélites será de 75, o que trará benefícios evidentes. Vale salientar que o DOP nem sempre melhorará de forma significativa, devido aos valores da inclinação das órbitas serem semelhantes, principalmente no caso dos sistemas GPS e Galileo. Contudo, com o aumento de redundância no processo de ajustamento, a acurácia posicional, disponibilidade, integridade e continuidade melhorarão de forma significativa.

Devido aos sistemas GPS e Galileo utilizarem o mesmo processo de separação do sinal (CDMA – *Code Division Multiple Access*), que identifica os satélites a partir do código exclusivo de cada satélite, os dois sistemas apresentam vantagens em termos de combinação. Infelizmente, combinação entre o GPS e o GLONASS não é tarefa trivial. Porém, antes mesmo do final deste ano, o GLONASS lançará o primeiro satélite GLONASS-K, que passará a utilizar o mesmo processo de separação do sinal do GPS e Galileo (INSIDE GNSS, 2010b).

É importante notar que o futuro da navegação mostrará inúmeras possibilidades de processamento dos dados. Caberá ao usuário escolher a mais adequada de acordo com os

objetivos. Evidentemente que devido as frequências dos satélites GPS e do Galileo serem semelhantes, além do fato de utilizarem a técnica CDMA para identificação dos satélites, combinações entre esses sistemas para formar a DD poderá ser realizada de forma mais fácil do que já foi feito com o GPS e o GLONASS.

As observáveis mais importantes proporcionadas pelo GNSS, a partir de informações dos sinais transmitidos pelos satélites são: pseudodistâncias, obtidas a partir do código e a fase de batimento da onda portadora, ou simplesmente medida de fase. Todo processo de observação ou medida está eivado de vários erros. Com o GNSS não é diferente, sendo que há inúmeras fontes de erros no sistema, desde o momento em que o sinal é transmitido pelos satélites até o momento em que o sinal é rastreado pelo receptor GNSS.

As observáveis GNSS estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros sistemáticos, geralmente, podem ser parametrizados (modelados como termos adicionais) ou reduzidos por técnicas especiais de observação e/ou processamento. Erros aleatórios são inevitáveis e considerados como uma característica da observação. Por fim, os erros grosseiros são oriundos de falhas humanas e/ou do equipamento e devem ser eliminados. Seeber (1993) e Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001) classificam os erros envolvidos no GNSS em três grupos principais, sendo eles: satélite, propagação do sinal e receptor. A tabela 2 apresenta uma relação das principais fontes de erros no GNSS, bem como seus efeitos.

Tabela 2 – Principais fontes de erros e seus efeitos no GNSS.

<b>Fontes</b>	<b>Efeitos</b>
Satélite	Erro orbital
	Erro no relógio do satélite
	Atraso interfrequencia do satélite
Propagação do sinal	Atraso do código e avanço da fase
	Refração troposférica
	Multicaminho
	Perdas de ciclo
Receptor	Erro no relógio do receptor
	Centro de fase da antena
	Atraso interfrequencia do receptor
	Ruído do receptor

Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001).

O tratamento desses erros de forma adequada é de extrema importância na obtenção de resultados de alta precisão. Em trabalhos de baixa precisão, muitos desses erros podem ser desconsiderados. O tratamento dos erros varia de acordo com a precisão requerida. Muitos deles são minimizados no PRGNSS ou pela combinação linear entre as portadoras. Outros são reduzidos na adoção de modelos matemáticos adequados.

Vale destacar que a influência de alguns erros dados na tabela 2 depende do comprimento da linha de base formada no PRGNSS. Conseqüentemente, no caso desse método de posicionamento, os erros podem ser subdivididos em erros correlacionados e não correlacionados espacialmente (RAQUET, 1998):

- Erros correlacionados: efeitos da atmosfera (troposfera e ionosfera) e erros de órbita; e
- Erros não correlacionados: efeitos do multicaminho e ruído das medidas de fase e pseudodistância.

Considerando que os erros do relógio dos receptores e dos satélites são minimizados no PRGNSS, por intermédio do processo de dupla diferenciação, os erros correlacionados espacialmente passam a ser decisivos no que se refere à precisão do PRGNSS. Dentre esses erros a ionosfera é o mais importante, visto que seus efeitos podem proporcionar fortes impactos no PRGNSS, principalmente em períodos de irregularidades, decorrentes de alterações do clima espacial.

No PRGNSS, a equação da DD é normalmente a observável preferida nos processamentos de dados GNSS envolvendo a fase da onda portadora. Ela parece proporcionar a melhor relação entre ruído resultante da combinação e a eliminação de erros sistemáticos envolvidos nas observáveis originais (MONICO, 2008).

Detalhes sobre as fontes de erros dadas na tabela 2 podem ser obtidos em Seeber (2003), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001), Leick (1995), Parkinson e Spilker Jr. (1996) e Monico (2008), entre outros.

Os erros relacionados com o atraso do código e avanço da fase são apenas dois dos vários efeitos ionosféricos que podem ocorrer nos sinais GNSS. No entanto, são os erros que normalmente são corrigidos ou modelados no processo de estimação das posições GNSS. Esses e

outros efeitos ionosféricos serão descritos com detalhes no capítulo 5. Contudo, como os efeitos ionosféricos dependem fundamentalmente do sistema Sol-Terra, bem como do clima espacial, o capítulo seguinte será dedicado a esse tema.

### 3 SISTEMA SOL-TERRA

*“A Terra era circundada por uma grande roda cósmica, cheia de fogo, e o Sol, um furo na superfície dessa roda, que deixava o fogo sair”*

*Anaximandro*

#### 3.1 Considerações Iniciais

Nos últimos anos cresceu de forma significativa estudos relacionados com um tema de grande interessa nacional e, principalmente internacional, relacionado com o clima espacial. Na literatura inglesa é conhecido como *Space Weather*. Também se pode encontrar o termo *Space Climate*, o que normalmente causa certa confusão com as seguintes traduções: clima espacial e tempo espacial. Contudo, no Brasil, tem-se adotado o termo clima espacial. Esta foi a razão pela adoção deste termo nesta pesquisa.

O clima espacial se refere às várias atividades solares, tais como manchas solares e explosões solares, e os efeitos que elas podem provocar na Terra, bem como nas tecnologias, incluindo o GNSS, que envolve, basicamente, conceitos de radio navegação. De uma forma mais ampla, o clima espacial envolve além de atividades solares, bem como a sua influencia na Terra, conceitos sobre vento solar, magnetosfera, meio interplanetário, plasmasfera, ionosfera, etc. Em suma, todos esses conceitos e regiões englobam o sistema Sol-Terra.

Na verdade, os vários efeitos ionosféricos que podem causar fortes impactos no GNSS são extremamente relacionados com o clima espacial. A atmosfera superior da Terra é ionizada por radiações eletromagnética e corpuscular, ambas oriundas do Sol. As radiações eletromagnéticas, como por exemplo, nas faixas do infravermelho, visível, ultravioleta, ondas de rádio, extremo ultravioleta e raios X, viajam diretamente entre o Sol e a Terra com um tempo de transição de aproximadamente 8.3 minutos (DAVIES, 1990). Em contrapartida, a radiação corpuscular, que corresponde às partículas do vento solar, demora normalmente alguns dias para atingir a Terra (McNAMARA, 1991).

Durante períodos de distúrbios oriundos do Sol, essas radiações podem ser significativamente alteradas, implicando em conseqüências drásticas na ionosfera terrestre, podendo causar sérios problemas em sistemas de comunicação e navegação, incluindo o GNSS. Entre o Sol e a Terra há varias regiões, que se interagem, de forma extremamente dinâmica. Essas

regiões são: o meio interplanetário, a magnetosfera terrestre, a atmosfera neutra da Terra e a ionosfera terrestre (DAVIES, 1990). No entanto, cada uma dessas regiões é extremamente complexa, como por exemplo, a magnetosfera terrestre e o Sol. Para entender os vários fenômenos que ocorrem na ionosfera terrestre, que afetam de forma direta o GNSS, deve-se entender primeiramente o sistema Sol-Terra, sobretudo a interação entre as várias regiões deste sistema. Com isso, pode-se ter um melhor entendimento da estrutura espacial e temporal da ionosfera terrestre. A figura 1 ilustra o sistema Sol-Terra, incluindo suas principais regiões e sub-regiões, bem como os tipos de radiação ionizante.

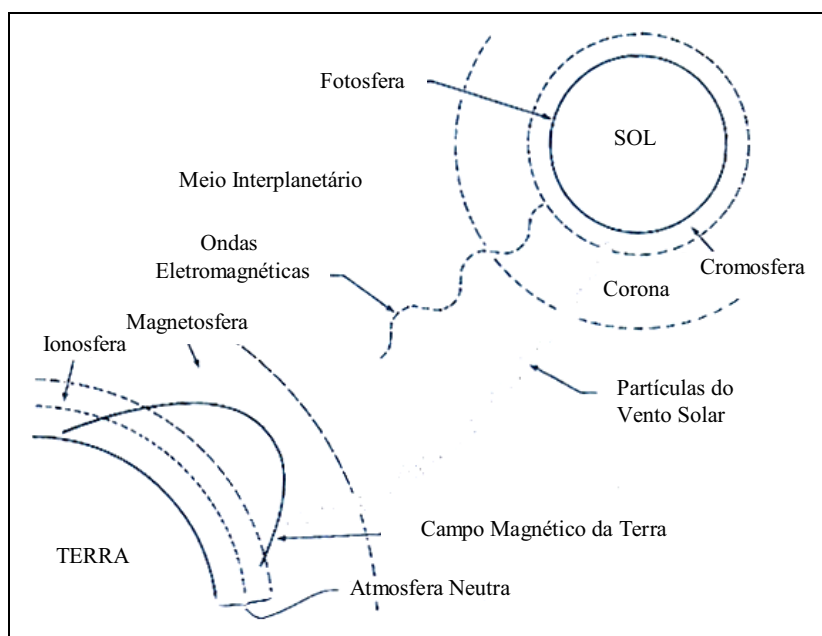


Figura 1 – Sistema Sol-Terra.  
Fonte: Adaptado de Davies (1990).

Vale salientar que a figura 1 mostra uma visão geral do sistema Sol-Terra. Obviamente que cada componente do sistema tem suas peculiaridades, e são, de certa forma, extremamente complexos. No entanto, o mais importante deste sistema é entender a correlação entre as várias regiões. Na verdade o sistema é extremamente dinâmico, sendo que o Sol é o astro responsável direto pelas mudanças ou alterações que eventualmente ocorrem no sistema como um todo, podendo causar, por sua vez, intensos impactos na ionosfera terrestre, e, conseqüentemente, no sistema GNSS.

### 3.2 O Sol

O Sol é uma estrela média com raio de aproximadamente 696000 km e com uma temperatura da superfície de 5800 K (fotosfera). O Sol consiste do interior solar, a superfície visível ou fotosfera, a cromosfera ou atmosfera solar mais baixa, e a corona ou atmosfera solar externa. O Sol é um corpo gasoso e não tem superfície como a Terra, pois a densidade solar diminui drasticamente à medida em que se afasta do centro do Sol. O fluxo da energia solar visível que atinge a superfície da Terra varia muito pouco dia a dia ou ano a ano ( $< 0,5\%$ ). Entretanto, emissões solares nos comprimentos de ondas mais curtos, no extremo ultravioleta a comprimentos de ondas no raio-X (que realmente ionizam), varia da ordem de magnitudes dependendo do número de manchas solares e da atividade solar. Esta é uma das razões da ionosfera ser altamente variável. A radiação solar, que é o principal responsável pelo processo de ionização na ionosfera, provém das três camadas da atmosfera solar, já mencionadas. A figura 2 ilustra essas camadas (KIRCHHOFF, 1991).

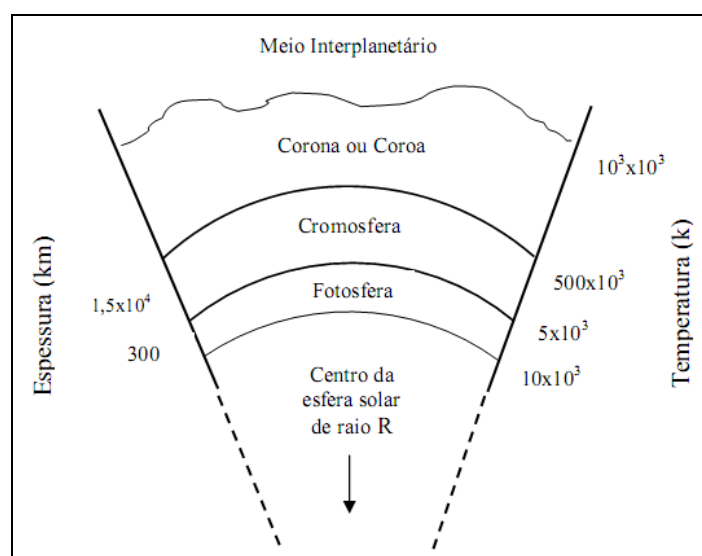


Figura 2 – Representação esquemática das três camadas solares mais externas.  
Fonte: Adaptada de Kirchhoff (1991).

A corona, também conhecida como coroa, é a camada mais externa e apresenta temperaturas muito altas, da ordem de milhões de Kelvin, e é a camada mais rarefeita do Sol. Vale salientar que o limite da corona não é bem definido, pois se confunde com o meio

interplanetário. A radiação mais intensa, situada no visível, origina-se de uma camada que tem cerca de 300 km de espessura, a denominada fotosfera. A cromosfera é a camada que se situa entre a corona e fotosfera, e tem cerca de 15000 km de espessura. Esta camada normalmente não é visível, porque sua radiação é muito mais fraca do que a da fotosfera (o mesmo ocorre com a corona). Ela pode ser observada, no entanto, durante os eclipses, quando a Lua esconde o disco da fotosfera (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2000). A figura 3 mostra a cromosfera (região clara da imagem), quando ocorreu um eclipse total no dia 04/11/1994.



Figura 3 – Foto do eclipse total mostrando a cromosfera.  
Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2000)

De acordo com a figura 2, nota-se que na cromosfera e corona a temperatura do Sol aumenta à medida que se distancia do centro do Sol. A temperatura na cromosfera pode variar de 5000 K até 500000 K, enquanto que na corona a temperatura pode variar de 500000 K até 1000000 K. Esse aquecimento da cromosfera e corona deve ter uma fonte de energia que não são os fótons produzidos no interior do Sol. Pois, se fosse essa fonte de energia, a cromosfera e a corona deveriam ser mais frias do que a fotosfera, no entanto, não é isso que ocorre. Atualmente, se pensa que a fonte de energia são campos magnéticos variáveis formados na fotosfera e transportados para a cromosfera e coroa por correntes elétricas, deixando parte de sua energia na cromosfera e coroa (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2000). Vale salientar que abaixo da fotosfera se encontra a zona radiativa, onde a energia flui por radiação. O núcleo do Sol é a região onde a energia é produzida, por reações termo-nucleares.

Além da radiação eletromagnética, o Sol também libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas: o vento solar (KIRCHHOFF, 1991), que preenche o meio interplanetário (SCHUNK e NAGY, 2000).

### 3.3 O meio Interplanetário e o Vento Solar

Antes dos anos 50, acreditava-se que o meio interplanetário era um vácuo, exceto quando ocorriam explosões solares. No entanto, a partir de medidas de satélites, agora é conhecido que o vento solar é uma fonte de plasma contínua, preenchendo o meio interplanetário. É importante relatar que a energia contida na radiação solar eletromagnética é sem dúvida mais dominante do que a contida no vento solar (SCHUNK e NAGY, 2000). Não se pode sentir o vento solar na superfície da Terra, pois a densidade do vento solar é muito baixa, sendo a mesma mais baixa do que qualquer “vácuo” já conseguido experimentalmente na Terra. No entanto, as partículas sendo eletricamente carregadas afetam o campo magnético da Terra e a ionosfera (McNAMARA, 1991).

Com a liberação do vento solar, que emana do Sol, ocorre uma perda anual de massa do Sol em aproximadamente  $10^{-13} \times M$ , sendo M a massa do Sol, que é aproximadamente  $2 \times 10^{30}$  kg. Sendo assim, o Sol perde, aproximadamente,  $2 \times 10^{17}$  kg de massa por ano, devido ao vento solar (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2000). O vento solar, que emana da coroa, pode-se tornar muito intenso devido às tempestades solares, o que pode implicar na alteração das condições geomagnéticas e ionosféricas.

Uma tempestade solar é caracterizada pelo aumento na radiação solar do extremo ultravioleta, na velocidade e concentração do vento solar, ou de ambos. Quando a radiação e as partículas alcançam a Terra, ocorrem os fenômenos chamados *tempestades ionosféricas* (mudanças drásticas da ionosfera) e *tempestades geomagnéticas* (mudanças drásticas do campo geomagnético). Normalmente, a perturbação solar causadora destes fenômenos é caracterizada por um aumento dos parâmetros do vento solar (densidade e velocidade), que podem ocorrer devido às explosões solares (*solar flares*), corrente de vento solar de alta velocidade solar (HSS – *High Speed Stream* – ver figura 4) provenientes de buracos na coroa (*coronal holes*) e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDF – *Sudden Disappearing Filaments*) (McNAMARA, 1991). A densidade do vento solar pode passar de  $10^6$  a  $10^7$   $\text{m}^{-3}$ , e sua velocidade pode variar de

300 até 900 ou 1000 km/s (KIRCHHOFF, 1991). Mais detalhes sobre esses fenômenos e suas relações com as tempestades geomagnéticas serão detalhadas no tópico 5.4.3.1.

Uma simples figura da corona solar tem dois tipos de regiões: aquelas onde as linhas de campo magnético são fechadas e o plasma é confinado e aquelas com as linhas de campo magnético abertas, sendo esta região denominada de buracos coronais, região onde o plasma coronal se expande para o meio ou espaço interplanetário e forma o vento solar. Como já mencionado, a velocidade típica do vento solar é de 300 km/s, podendo aumentar para até 1000 km/s durante períodos de distúrbios. A maior escala de estrutura no meio interplanetário são aquelas causadas pela rotação do Sol, devido a emissão de partículas radiais, como mostra a figura 4.

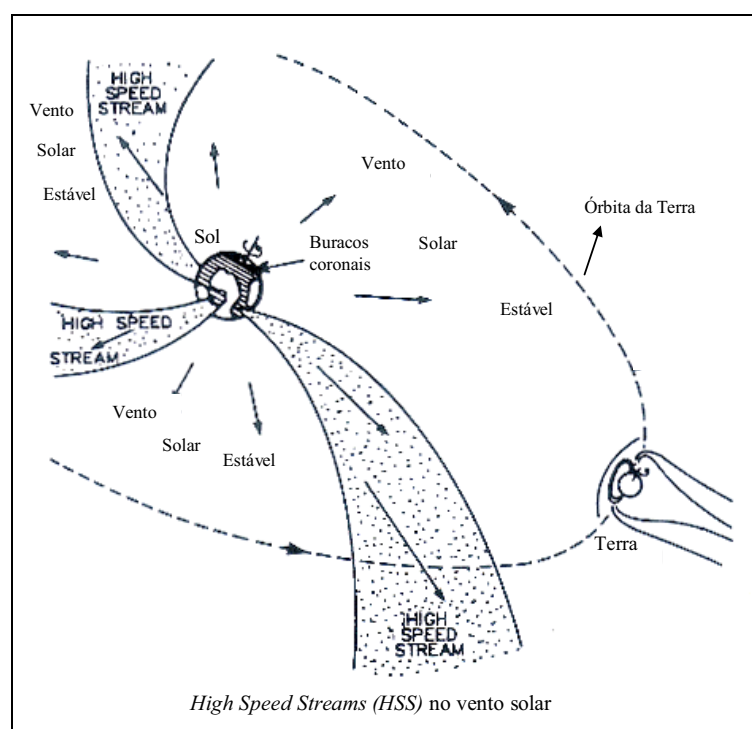


Figura 4 – Ilustração de HSS emanando dos buracos coronais.  
Fonte: McNamara (1991).

De acordo com a figura 4 pode-se verificar que a matéria flui radialmente, devido a rotação do Sol, que provoca o fluxo de matéria na forma de uma espiral. Verifica-se também na figura a ocorrência de HSS, que emanam dos buracos coronais, que são importantes fontes de

intensificação do vento solar. Uma HSS causa uma tempestade geomagnética e possivelmente uma tempestade ionosférica conforme ela se movimenta sobre a Terra.

A velocidade do vento solar é pequena próxima do Sol, mas aumenta com a distância radial e se torna supersônica na distância crítica de aproximadamente 5 raios solares acima da fotosfera.

O Sol também apresenta um campo magnético que está junto com o vento solar. Isto forma o campo magnético interplanetário (*Interplanetary Magnetic Field - IMF*). Em suma, o vento solar e o IMF se encontram no mesmo meio, ou seja, no meio interplanetário. O vento solar está na direção radial distante do Sol, e as linhas de campo magnéticas ficam encurvadas formando uma espiral na medida em que o Sol rotaciona vagarosamente, como mostra a figura 5.

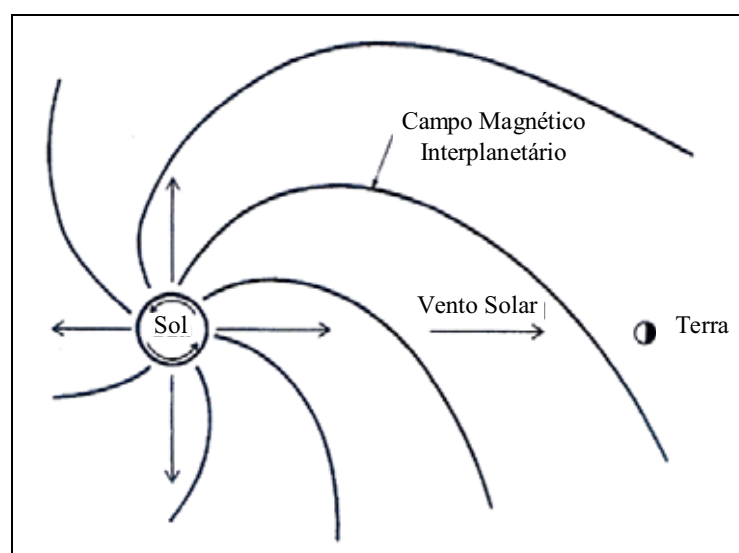


Figura 5 – Ilustração do IMF com o vento solar.  
Fonte: Schunk e Nagy (2000)

A rotação do Sol é extremamente lenta, durando aproximadamente 27 dias. O IMF tem um papel importante para o entendimento das tempestades geomagnéticas. Observa-se que há dois campos magnéticos: o IMF e o campo magnético interno da Terra. O plasma do vento solar flui em torno da magnetosfera, que protege a Terra do vento. No entanto, não somente o vento solar é desviado, mas também o IMF. As linhas do campo magnético terrestre podem se conectarem com as linhas do IMF, podendo causar as tempestades geomagnéticas.

### 3.4 A Magnetosfera

O vento solar circula em torno do campo magnético da Terra, produzindo uma cavidade geomagnética, como mostra a figura 6. A figura mostra a magnetosfera vista do plano equatorial.

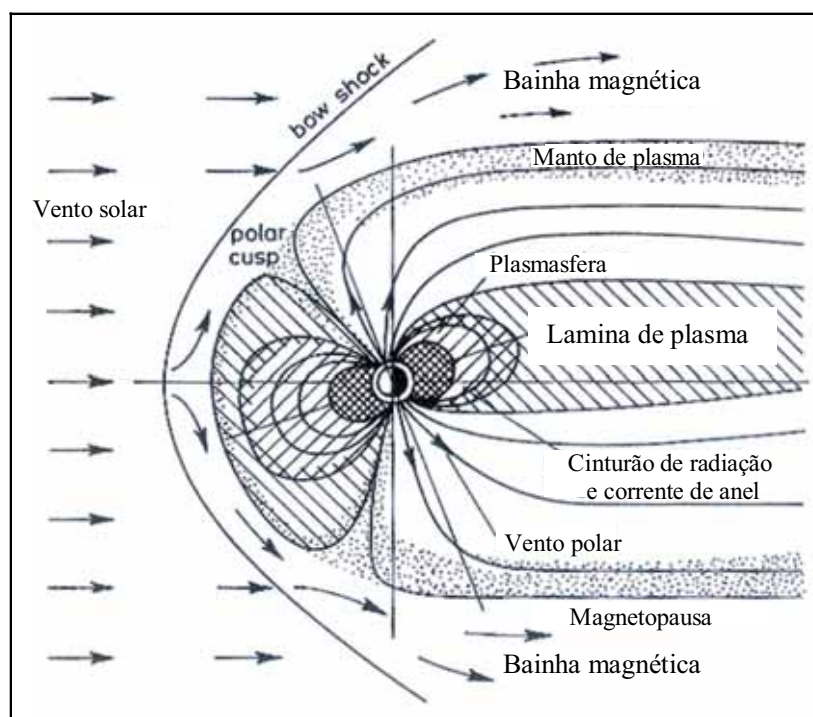


Figura 6 – Magnetosfera formada pela interação do vento solar com o campo magnético da Terra.  
Fonte: Adaptada de Davies (1990).

Verifica-se que de acordo com a figura 6, o campo magnético é comprimido no lado diurno, e alongado no lado noturno. A frente de impacto (também conhecida como onda de impacto ou ainda curvatura de impacto, ou no termo na língua inglesa como *bow shock*) é estabelecida contra o vento solar a aproximadamente 10 raios terrestres. A maior parte das partículas do vento solar desviadas pela frente de impacto continua a favor do vento. Entretanto, uma pequena fração do plasma interage com a magnetopausa e penetra na magnetosfera (DAVIES, 1990). Dentro da magnetosfera, movimento de partículas carregadas é dominada por forças devido aos campos elétrico e magnético da Terra. A cauda geomagnética se estende algumas centenas de milhares de quilômetros.

A magnetosfera pode ser definida como sendo o local onde o campo magnético da Terra é dominante (SCHUNK e NAGY, 2000). O vento solar passa através da frente de impacto, sendo desacelerado e aquecido, e desvia-se ao redor da Terra em uma região denominada de bainha magnética (FEDRIZZI, 2003). De acordo com a figura 6 percebe-se que a espessura desta região é variável, atingindo 3 raios terrestres no lado iluminado pelo Sol. Após a desaceleração proporcionada pela frente de impacto, o vento solar aquecido é acelerado novamente atingindo velocidades subsônicas à supersônicas fluindo como se movimentava antes. A fronteira que separa o plasma do vento solar magnetizado na bainha magnética do campo magnético da Terra confinado é denominada de magnetopausa. Esta fronteira é geralmente muito fina, com aproximadamente 100 km, e sua localização é determinada basicamente pelo balanço entre a pressão dinâmica do vento solar que colide e a pressão magnética do campo geomagnético comprimido.

Mais perto da Terra está a plasmasfera, que contém plasma relativamente frio, com alta densidade de plasma que tem sua origem na ionosfera terrestre. O plasma nesta região co-rotaciona com a Terra, mas ele também pode fluir ao longo das linhas de campo geomagnético de um hemisfério a outro. No plano equatorial, a plasmasfera tem uma extensão radial que se estende de 4 a 8 raios terrestres, dependendo da atividade magnética, e seu limite é denominado de plasmopausa. Este limite é essencialmente a fronteira entre o plasma que co-rotaciona com a Terra e o plasma que é influenciado por campos elétricos magnetosféricos.

Apesar do volume do vento solar ser desviado ao redor da Terra na bainha magnética, parte do vento pode atravessar a magnetopausa e entrar na magnetosfera. Entrada direta de plasma do vento solar ocorre no lado oposto ao Sol nas proximidades do denominado *polar cusp* (conhecido também por *cleft* (fenda – fenda polar)). Em baixas altitudes (~ 300 km), a fenda polar ocupa uma faixa latitudinal estreita que é centrada próximo ao meio dia, e que se estende também em longitude. Dentro desta faixa, as partículas do vento solar podem viajar ao longo das linhas de campo geomagnético e depositar suas energias na atmosfera superior.

Partículas do vento solar também podem entrar na magnetosfera pela sua cauda, no entanto este processo ainda não é bem conhecido. Essas partículas do vento solar, que escapam da atmosfera superior da Terra são transferidas para a cauda, na qual forma uma região conhecida como lamina de plasma. As partículas desta região têm uma energia 10 vezes maior do que as partículas encontradas na bainha de plasma e uma densidade que é mais baixa por um fator de 10

a 100. As partículas da lamina de plasma não estão “aprisionadas”, assim, tem acesso direto a atmosfera superior no lado noturno ao longo das linhas de campo geomagnético. As partículas energéticas próximas do centro da lamina de plasma se direcionam mais perto da Terra devido a ação de campos elétricos magnetosféricos e então ficam “aprisionadas” nas linhas de campo magnético fechadas, formando, conseqüentemente o cinturão de radiação de Van-Allen. Essas partículas altamente energizadas formam uma espécie de espiral na medida em que se movem ao longo das linhas de campo geomagnético fechadas em direção a Terra. Quando chegam próximo da Terra elas são refletidas, e então fazem o caminho inverso, e assim sucessivamente, para frente e para trás entre os hemisférios (SCHUNK e NAGY, 2000). Essas partículas que são aprisionadas pelo cinturão de radiação podem ser conduzidas para formar uma corrente de anel. Esta corrente de anel que rodeia a Terra tem papel fundamental para ocorrências da fase principal da tempestade geomagnética.

Nas baixas altitudes, essas linhas de campo convergem para uma região espacial que é estreita em latitude, e se estende em longitude ao redor da Terra, se unindo ao lado oposto ao Sol (*polar cusp*) para formar o que é conhecido como oval auroral, que ocorre nas regiões polares norte e sul. Como as partículas da lamina de plasma se movem continuamente em direção a Terra ao longo das linhas de campo, elas são aceleradas e então colidem com a atmosfera superior, na qual produzem o espetáculo auroral (SCHUNK e NAGY, 2000). Verifica-se também na figura 6 que há uma grande quantidade de plasma que passa pela magnetopausa, criando uma camada logo abaixo denominada de manto de plasma. Verifica-se também que a fenda polar ocorre sempre entre uma linha de força de campo aberta e outra fechada, sendo esta região responsável pela entrada de parte do vento solar na magnetosfera.

Na magnetosfera ocorrem vários processos de transporte de plasma. Nas altas latitudes, as linhas do campo geomagnético se estendem consideravelmente no espaço em direção contrária ao Sol. Ao longo dessas linhas de campo denominadas de abertas, íons e elétrons são capazes de escapar da parte mais alta da ionosfera num processo denominado de vento polar. Essa perda de plasma pode ter um efeito apreciável na estrutura da densidade do plasma. Em adição, há o campo elétrico do dínamo que é gerado por interação entre a magnetosfera e o vento solar (SCHUNK e NAGY, 2000).

Como já mencionado, todas as regiões do sistema Sol-Terra, descritos neste capítulo, se interagem de uma forma extremamente dinâmica, sendo que o principal responsável por todo

esse dinamismo é o Sol. Assim, basta ocorrer algum fenômeno solar, para que ocorra uma mudança drástica no clima espacial. Desta forma, intensos impactos podem ocorrer na ionosfera terrestre, tornando-a extremamente variável, podendo neste caso, causar sérios impactos no método de PRGNSS, de forma a comprometer significativamente a acurácia do posicionamento.

## 4 IONOSFERA

*“No mundo das partículas, as regras de existência são muito diversas das leis que regem o nosso mundo”*

*Piero Pasolini*

### 4.1 Considerações Iniciais

A ionosfera é definida como a parte da atmosfera superior onde existe ionização suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). A atmosfera terrestre, para propósitos práticos, pode ser considerada como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas a Terra. A sua estrutura está relacionada com diversos elementos, tais como: térmicos, químicos e eletromagnéticos. Estes parâmetros combinados variam sensivelmente em função da hora, da latitude, da longitude, da época do ano e da atividade solar.

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, da ionização, do campo magnético, da propagação de ondas eletromagnéticas (ou simplesmente propagação) e geral. A figura 7 apresenta um esquema simplificado dessas divisões (SEEBER, 2003).

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

Figura 7 – Possíveis divisões da atmosfera terrestre.  
Fonte: Adaptada de Seeber (2003)

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

A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura. Neste caso, a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995). Sendo assim, sinais UHF (*Ultra High Frequency*), que compreendem uma faixa de frequência de 300 MHz a 3GHz, onde estão incluídos os sinais GPS ( $L_1 = 1575,42$  MHz e  $L_2 = 1227,60$  MHz), são propagados de forma não dispersiva na troposfera.

A ionosfera, ao contrário da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. Caracteriza-se, principalmente, pela formação de íons e elétrons (processo de ionização), e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura. Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois, a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera. Esta pode ser definida como a região de altura superior a 1000 km onde a densidade atmosférica neutra é muito pequena e os íons positivos são predominantemente prótons; na altura de aproximadamente 30000 km, a plasmasfera diminui formando a plasmapausa que vem a ser a fronteira entre a plasmasfera e a magnetosfera (DAVIES, 1990).

O processo de ionização, a estrutura da ionosfera e as causas das variações da densidade de elétrons são outros assuntos abordados neste capítulo.

## **4.2 Processo de Ionização**

Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização. A fotoionização ionosférica consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros. A figura 8 ilustra o processo de fotoionização para o caso de um átomo de oxigênio.

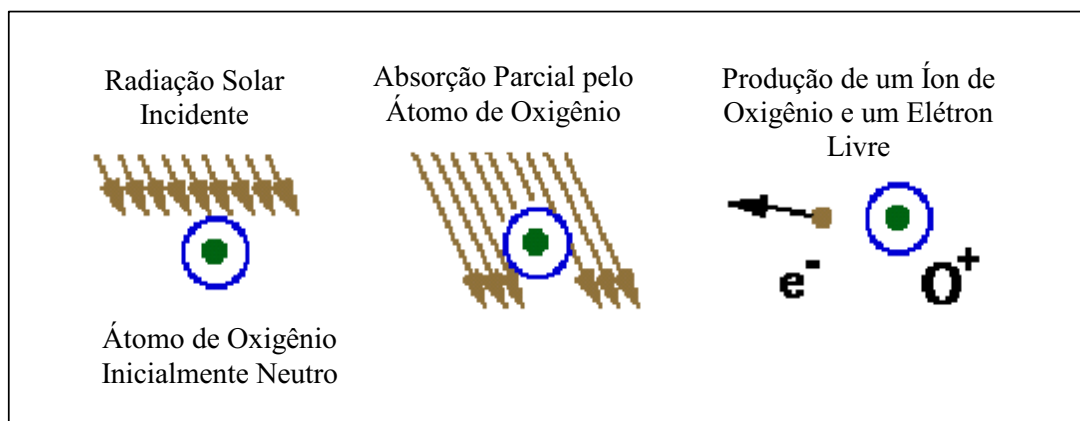


Figura 8 – Processo de Fotoionização.  
 Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003)

Quando a energia dos fótons incidentes sobre o elemento neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização, ocorre a perda de elétrons deste elemento, dando origem a um íon positivo e elétrons livres. No caso da ilustração da figura 8, foi originado um íon positivo  $O^+$  e um elétron livre ( $e^-$ ). Na verdade, somente os elétrons livres afetam a propagação de ondas de rádio, e não os íons, visto que os íons possuem uma massa cerca de 20 mil vezes maior do que a dos elétrons, e portanto, são muito pesados para responder às rápidas oscilações de uma onda de rádio (McNAMARA, 1991).

Deve-se salientar que ocorre um processo inverso da fotoionização, denominado de recombinação, sendo este o principal processo pelo qual elétrons livres são perdidos na parte superior da ionosfera.

Vale salientar que íons e elétrons não são produzidos somente pelo processo de fotoionização. Eles também podem ser produzidos por colisão com partículas energéticas carregadas de origem solar ou galáctica que penetram na atmosfera. No entanto, este processo ocorre principalmente em regiões de altas latitudes e na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (RODRIGUES, 2003).

Como já descrito no tópico 3.3, além da radiação eletromagnética, o Sol (na região da corona) também libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas: o vento solar, que da mesma forma da radiação eletromagnética, traz energia para a Terra e, conseqüentemente, contribuiu para a formação da ionosfera (KIRCHHOFF, 1991). Vale salientar que a estrutura da ionosfera varia de forma extremamente significativa, principalmente em função da altitude.

### 4.3 Estrutura da Ionosfera

A radiação solar na faixa espectral do extremo ultravioleta (EUV) e dos raios X, ao incidir sobre a atmosfera neutra produz uma grande quantidade de íons e elétrons livres, através do processo denominado de fotoionização.

Na medida em que a radiação solar penetra na atmosfera mais densa a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade de elétrons é máxima. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons (FEDRIZZI, 1999). A figura 9 ilustra a formação da ionosfera e a presença de um pico de ionização (RODRIGUES, 2003).

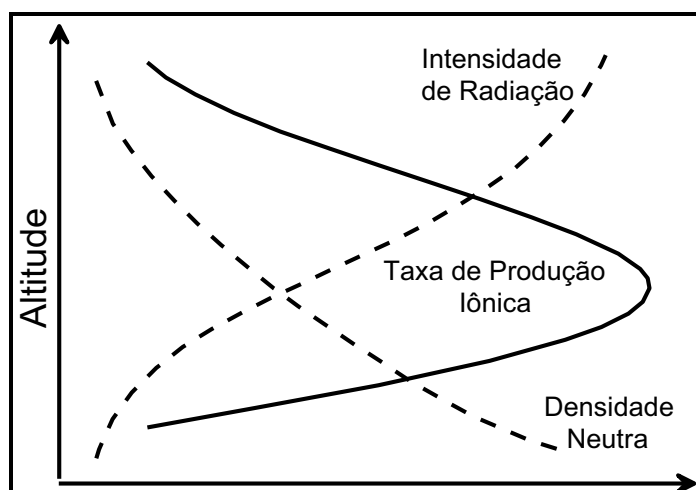


Figura 9 – Ilustração da formação da ionosfera.  
Fonte: Adaptada de Rodrigues (2003).

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

A camada D, que faz parte da região mais baixa da ionosfera, compreendendo uma região entre as alturas de 50 e 85 km, tem uma concentração máxima de elétrons por volta de 80 km de

altura, com uma densidade da ordem de  $10^3$  elétrons/cm<sup>3</sup> (el/cm<sup>3</sup>). Ela é importante na propagação de ondas, atuando como uma fonte refletora dos sinais de frequência baixa (LF) e de frequência muito baixa (VLF) (DAVIES, 1990). Esta camada é produzida por ionização de várias espécies de moléculas, por ser a parte da ionosfera mais densa em elementos neutros. É produzida por radiação em altas frequências, como por exemplo, raios X. Esta região não proporciona efeitos mensuráveis nas frequências GPS.

A camada E tem início e término, aproximadamente, nas alturas de 85 km e 140 km, respectivamente, e a concentração máxima de elétrons atinge um valor aproximado de  $10^5$  el/cm<sup>3</sup>. Nessa região, surge uma fina camada, designada de esporádica E, oriunda de variações na densidade de elétrons próximo à região compreendida entre 90 e 130 km (McNAMARA, 1991). Tais variações ocorrem devido à magnetosfera, meteoros, e outros fenômenos físicos. A contribuição da magnetosfera para a formação da esporádica E, se resume ao fato de que íons e elétrons são transportados pelo campo geomagnético que se encontra na magnetosfera, motivando as variações na densidade de elétrons na região onde se encontra a esporádica. Os meteoros também têm uma contribuição significativa para a formação da esporádica, pois, ao incidirem na região da atmosfera, ocorre uma produção de íons ao longo de seu trajeto, ocasionando variações na densidade de elétrons. Com respeito à propagação de ondas, a esporádica reflete ondas de rádio, com frequência até aproximadamente 100 MHz (DAVIES, 1990). Esta região apresenta efeitos mínimos nas frequências GPS (KLOBUCHAR, 1987).

A camada F compreende aproximadamente o intervalo da ionosfera entre as alturas de 140 km e 1000 km, sendo ainda subdividida entre duas camadas, denominadas de F1 e F2. A camada F1 é formada entre as alturas de 140 km e 200 km, e apresenta uma concentração de elétrons variando de  $2,5 \times 10^5$  el/cm<sup>3</sup> a  $4 \times 10^5$  el/cm<sup>3</sup>, para ocorrências de manchas solares mínimas e máximas, respectivamente. Esta região, combinada com a região E, pode totalizar até 10 % do atraso de tempo ionosférico (KLOBUCHAR, 1987).

Já a camada F2 compreende o intervalo da ionosfera entre as alturas de 200 km até aproximadamente 1000 km, e o pico na densidade de elétrons ocorre entre as alturas de 300 a 450 km, mas também pode ser muito maior ou um pouco menor sobre condições extremas. Valores típicos da densidade de elétrons para regiões de latitudes médias, às 15:00 horas TU (12:00 horas local), variam entre  $2,8 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> e  $5,2 \times 10^{11}$  el/m<sup>3</sup> (KOMJATHY, 1997). A camada F2 apresenta uma característica difusa devido à concentração de elétrons. Esse fenômeno é chamado

de *spread F* e ocorre principalmente à noite, provocando uma variação na densidade de elétrons com uma consequente cintilação nos sinais de rádio (JOHNSON, 1965). Em contrapartida, essas irregularidades são importantes em propagação de rádios que utilizam HF (DAVIES, 1990). É de extrema importância destacar que a camada F2 é a que apresenta a maior variabilidade da ionosfera, causando a maioria dos efeitos mais intensos nos sinais GNSS. É produzida principalmente por meio de ionização do átomo de oxigênio, o qual é o principal constituinte da atmosfera neutra nessas alturas (KLOBUCHAR, 1987).

Acima da última região da ionosfera (F2), que corresponde a alturas maiores do que 1000 km ainda há uma quantidade de elétrons. Esta região, acima de 1000 km de altura, é denominada de protonosfera. É a região que contém o hidrogênio ionizado, com uma contribuição inferior de gás hélio. É de baixa densidade, mas estende-se até aproximadamente a altura de órbita dos satélites GNSS e apresenta baixa variabilidade. Pode ser uma fonte significativa de densidade de elétrons para usuários GNSS. Estima-se que a contribuição da protonosfera possa variar de 10% do atraso total de tempo durante horas do dia quando a densidade de elétrons da F2 é mais alta, até aproximadamente 50% durante o período noturno, quando a densidade da F2 é mais baixa (KLOBUCHAR, 1987).

A ionosfera se comporta de forma distinta durante os períodos diurno e noturno. A diferença consiste basicamente na queda na densidade de elétrons durante o período noturno, devido à ausência da radiação solar. A figura 10 mostra a diferença na densidade de elétrons durante os dois períodos. Nota-se que durante o período noturno a densidade cai consideravelmente.

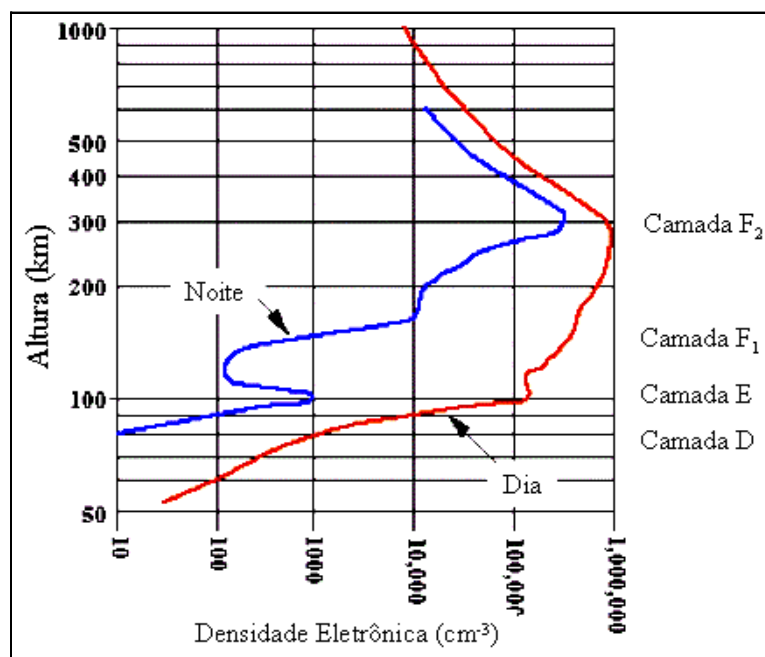


Figura 10 – Densidade Eletrônica em função da altitude.  
Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003).

Como já mencionado, a queda da densidade de elétrons no período noturno é devido ao processo de recombinação. Seeber (1993) apresenta uma tabela que resume as características das camadas ionosféricas, bem como a diferença de concentração máxima de elétrons nos períodos diurno e noturno, dada a seguir:

Tabela 3 – Características das camadas ionosféricas.

Camadas	Início e término das camadas (km)	Concentração máxima de elétrons (el/m <sup>3</sup> ) - dia	Concentração máxima de elétrons (el/m <sup>3</sup> ) – noite
D	60...90	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	---
E	85...140	10 <sup>5</sup>	2x10 <sup>3</sup>
F <sub>1</sub>	140...200	5x10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>
F <sub>2</sub>	200...1000	10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>5</sup>

Fonte: Seeber (1993)

De acordo com a tabela 3 nota-se que a camada D chega a desaparecer à noite e a concentração máxima de elétrons chega a atingir 10<sup>6</sup> el/m<sup>3</sup>, presentes na camada F<sub>2</sub>.

É importante frisar que neste tópico foi apresentada a estrutura da ionosfera em função da altitude. No entanto, deve ser lembrado que as camadas ionosféricas são concêntricas à Terra,

assim, ocorre também uma variação de cada uma das camadas em função da latitude. Neste contexto, a região F equatorial (região de baixas latitudes) é de extrema importância no que concerne aos efeitos ionosféricos nos sinais GNSS, visto que sua dinâmica é extremamente complexa.

Talvez a característica mais marcante da ionosfera é a alta variabilidade da densidade de elétrons, e os principais efeitos oriundos da ionosfera que ocorrem no PRGNSS são consequências desta alta variabilidade, além das irregularidades ionosféricas.

#### **4.4 Variações da Densidade de Elétrons**

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, é afetada, principalmente, pelas variações temporais, da radiação solar, do campo geomagnético e da latitude, sendo esta última responsável pela determinação das regiões geográficas da ionosfera.

##### **4.4.1 Variações temporais**

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

A principal razão da existência da variação diurna é devido à iluminação do Sol, ou seja, à radiação solar, fazendo com que a densidade de elétrons diminua de forma acentuada no período noturno. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da hora local (HL), sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12:00 e 16:00 horas local (WEBSTER, 1993).

As estações do ano também têm sua influência na variação da densidade de elétrons, devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, caracterizando as variações sazonais.

As variações de ciclos de longos períodos, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. As manchas solares foram descritas pela primeira vez por Teofrasto por volta do ano 325 a.C. (SCHAER, 1999). As manchas solares são regiões mais frias e escuras, que

aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta. Assim, o aumento desta radiação ocasiona uma mudança na densidade de elétrons presente na ionosfera. As manchas solares podem durar alguns dias ou até semanas. A figura 11 mostra uma imagem da superfície do Sol, onde se podem notar algumas manchas solares, que aparecem na imagem como manchas escuras.



Figura 11 – Imagem da superfície do Sol mostrando algumas manchas solares.

Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2000)

A figura 12 mostra registros de ciclos solares, desde 1700 até aproximadamente 2004. Vale salientar que, de 1700 até 1750, as médias dos números de manchas são anuais, ao passo que, de 1750 até os dias atuais, a contagem do número de manchas são dadas pela média mensal. Estes ciclos são definidos com relação ao número de manchas solares. O valor do TEC é proporcional ao aumento de atividade solar. Em períodos de máxima atividade, o TEC máximo diurno pode atingir valores até 50 % maiores do que em períodos de mínima atividade (BEARD, 1975 apud FEDRIZZI, 2003).

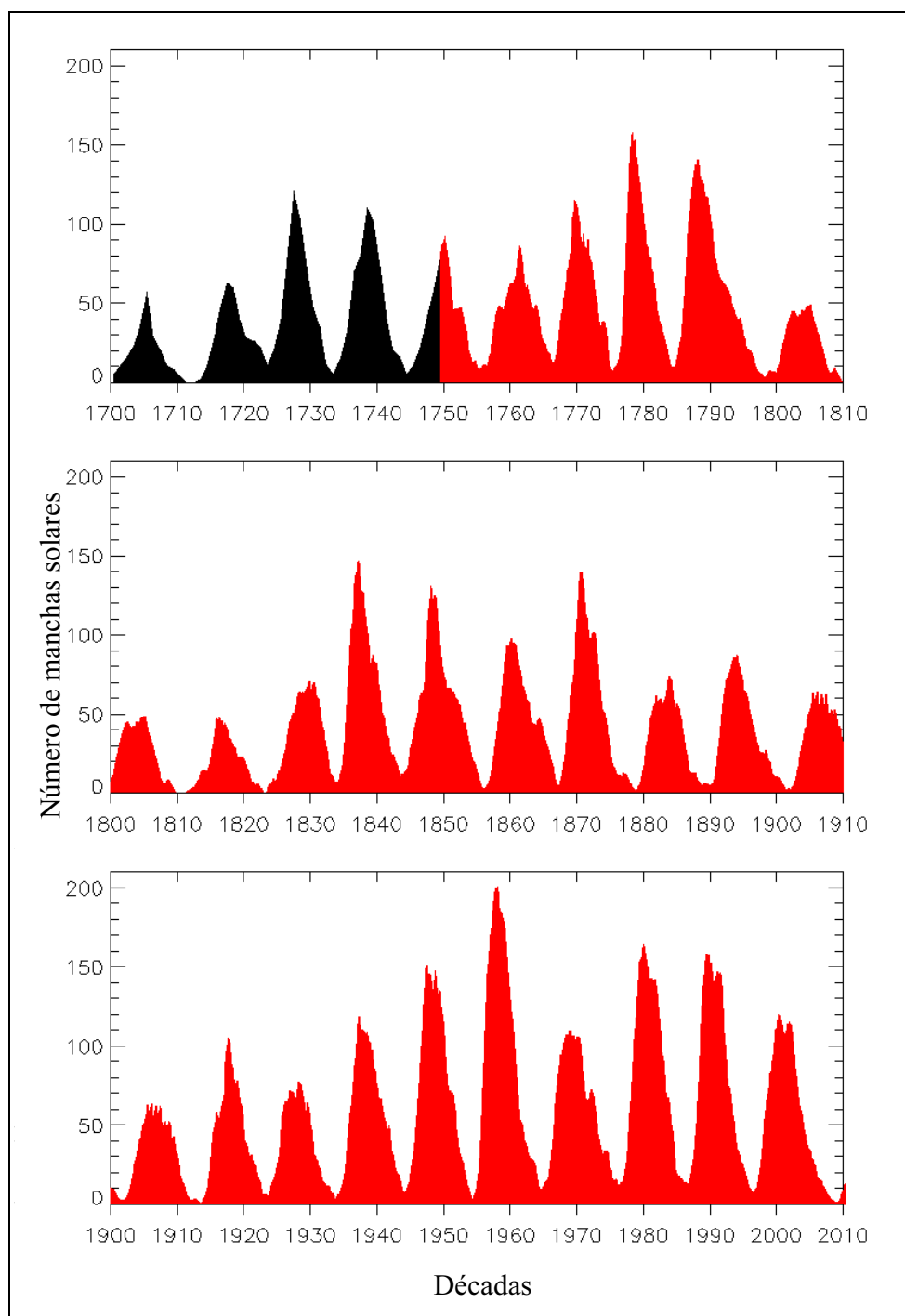


Figura 12 – Número de manchas solares – Ciclos solares.  
Fonte : <http://sidc.oma.be/html/wolfam1.html> - acesso em 10/2010

De acordo com a figura 12, verifica-se que a maior atividade do sol ocorreu alguns anos antes de 1960. No pico deste ciclo houve aproximadamente 200 manchas solares. Normalmente,

os ciclos solares não são simétricos (LEICK, 1995). A duração da transição do período mínimo para o máximo é menor do que a duração do máximo para o mínimo.

O último ciclo foi o de número 23 (KUNCHES, 2000), e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001, o que ocasionou um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na ionosfera. A figura 13 ilustra este ciclo isoladamente, que compreende uma contagem do número de manchas solares, desde 1997 até setembro de 2010.

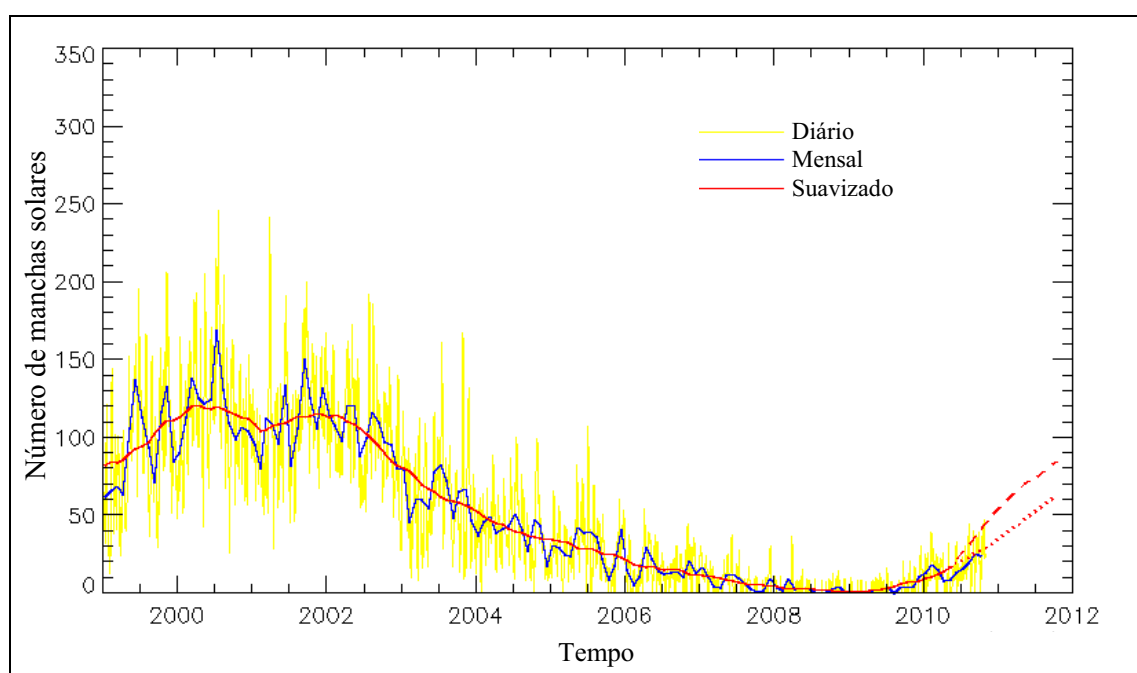


Figura 13 – Número de manchas solares observadas – Ciclo 23.  
 Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfjmms.html> - acesso em 10/2010

De acordo com a figura 13 nota-se o declínio do ciclo 23, onde em torno de 2009 o número de manchas atinge seus menores valores. No pico desse ciclo, o número de manchas era de aproximadamente 170 (valor mensal). Nota-se também a existência de outro pico, embora menor do que este, onde o número de manchas alcançou aproximadamente 150. A curva do gráfico mostra também uma previsão do número de manchas até aproximadamente 2012 (curva tracejada). A previsão atual do ciclo 24 prevê que o pico de manchas solares suavizado ocorrerá em junho de 2013 totalizando 66, como mostra a figura 14 (NASA, 2010).

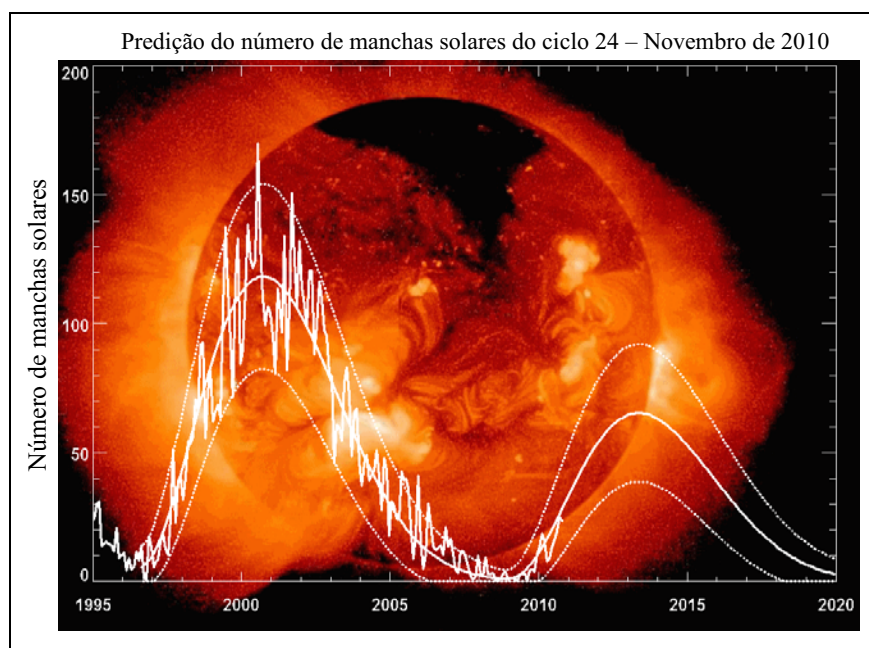


Figura 14 – Predição do número de manchas solares do ciclo 24.  
 Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml> - acesso em 10/2010

Interessante notar que o ciclo 24 será menos ativo do que o ciclo 23. O número de manchas solares suavizado é indicado pela curva contínua na figura 14.

Nos últimos anos o entendimento do ciclo solar tem se tornado alvo de grande interesse internacional, devido a sua relação com muitos efeitos que ocorrem sobre as tecnologias, ambos sobre a superfície terrestre e no clima espacial. Seus efeitos de forma indireta são notáveis nos sinais GNSS. Assim, é de extrema relevância estudos relacionados com efeitos ionosféricos no GNSS em função dos ciclos solares. No entanto, os efeitos em função dos ciclos solares podem se tornar mais brandos nos sinais GNSS, em períodos de mínima atividade solar. Isto foi verificado em Dal Poz, Camargo e Aguiar (2008), onde o desempenho do PRGNSS melhorou de forma significativa, mesmo em uma linha de base de 430 km, localizada na região equatorial, na qual apresenta fortes efeitos ionosféricos.

#### 4.4.2 Influência da variação da radiação solar

A variação na quantidade da emissão do raio ultravioleta emitida pelo Sol provoca um efeito no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que variam de minutos a semanas (WEBSTER, 1993). Três tipos de fenômenos estão associados a essa variação. O

primeiro deles é associado às explosões solares (*solar flares*), que são provocados por um rápido aumento de energia na superfície do Sol e emitida na forma de raios-X e ultravioleta. O segundo tipo de variação da radiação solar está associado aos buracos na coroa (*coronal holes*), que são as fontes das correntes do vento solar de alta velocidade, mais comuns no período de declínio da atividade. O vento solar escapa de buracos na coroa solar aquecida e forma a heliosfera. Quando ocorre esse fenômeno, as partículas que estão sendo emitidas do Sol pelo vento solar sofrem uma aceleração, aumentando consideravelmente sua velocidade. A figura 15 mostra um exemplo de ocorrência de buraco coronal. O terceiro efeito está relacionado com as manchas solares descritas na seção anterior.

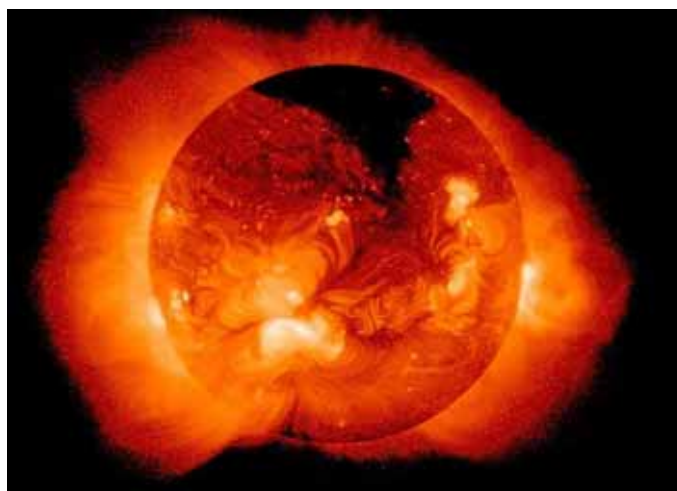


Figura 15 – Exemplo de buraco coronal, que aparece na imagem como região mais escura.  
Fonte: [http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Yohkoh\\_920508.jpg](http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Yohkoh_920508.jpg)

De acordo com a figura 15, verifica-se uma característica marcante do buraco coronal, que é sua ocorrência sempre próxima dos pólos do Sol, onde as linhas de campo magnético são abertas. Conseqüentemente, nessas regiões ocorre um fluxo do vento solar mais intenso do que o vento solar que emana de outras regiões (linhas de campo magnético fechado). Assim, tempestades podem ocorrer devido ao vento solar que emana dos buracos coronais. Tais tempestades apresentam características distintas de tempestades decorrentes de explosões solares e de desaparecimentos súbitos de filamentos.

#### 4.4.3 Influência do campo geomagnético

Próximo à superfície da Terra, o campo magnético terrestre ou campo geomagnético, pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra. A figura 16 ilustra as linhas de força do campo geomagnético e a não coincidência do eixo do dipolo com o eixo de rotação da Terra (McNAMARA, 1991).

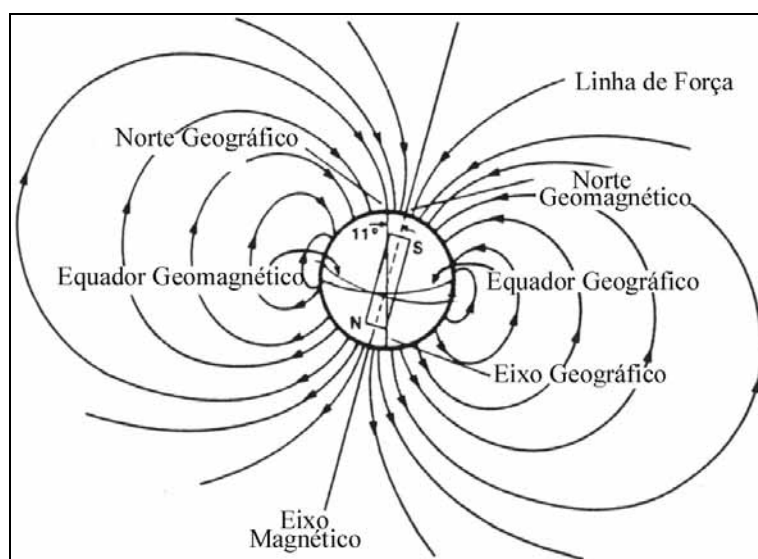


Figura 16 – Modelo do campo magnético da Terra.  
Fonte: Adaptada de McNamara (1991).

O campo geomagnético tem a forma aproximada de uma barra magnética, como um ímã, e tem dois 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.

O pólo norte geomagnético tem coordenadas aproximadas de 79 graus N e 70 graus O, enquanto que o pólo sul geomagnético tem as coordenadas de 79 graus S e 110 E. O plano do equador geomagnético é perpendicular ao eixo magnético, análogo ao plano do equador geográfico, que é perpendicular ao eixo geográfico. No entanto, os dois eixos não são coincidentes, pois os dois planos equatoriais não são coplanares. Na verdade o eixo magnético é inclinado com relação ao eixo geográfico ( $90^{\circ} - 79^{\circ} = 11$  graus), como mostra a figura 16. Análogo às latitudes e longitudes geográficas tem-se também as mesmas coordenadas

referenciadas ao equador geomagnético. Enquanto as coordenadas geográficas utilizam os pólos e equador geográficos, as geomagnéticas utilizam os pólos e equador geomagnéticos (McNAMARA, 1991).

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

O campo magnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons. Na ionosfera e na magnetosfera, o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns observadas no campo geomagnético são aquelas produzidas através das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer variações bruscas e muito intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991).

Vale salientar que o modelo do campo geomagnético mais simples é ilustrado na figura 16, onde o campo geomagnético é aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra. Sobre a influência do vento solar intensificado, devido à eventos solares, as linhas de força do campo geomagnético são comprimidas, que por sua vez exerce enorme influência na ionosfera terrestre, causando as tempestades geomagnéticas, sendo que estas implicam em tempestades ionosféricas.

#### **4.4.3.1 Tempestades geomagnéticas**

As emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar ocorrem continuamente, confinando e distorcendo o campo geomagnético em uma cavidade com uma cauda longa que se estende por centenas de raios terrestres no lado oposto ao Sol (FEDRIZZI, 2003). Esta cavidade denomina-se magnetosfera, já descrita no tópico 3.4. A figura 17 mostra a influência do vento solar no campo geomagnético, que também já foi ilustrada na figura 6 com maiores detalhes.

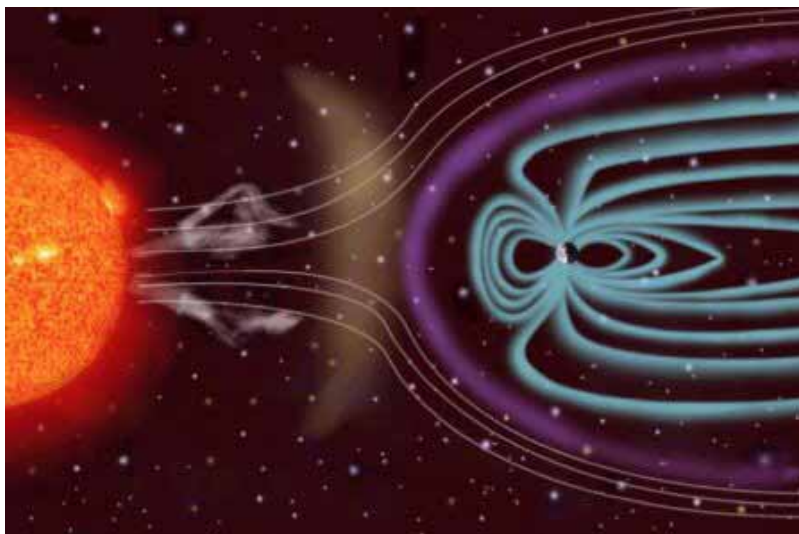


Figura 17 – Influência do vento solar no campo geomagnético.

Fonte: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=2569> - acesso em 02/2008

De acordo com a figura 17, pode-se notar que as linhas de força do campo geomagnético são comprimidas do lado iluminado pelo Sol, formando uma espécie de cauda no lado oposto ao Sol. Durante eventos solares intensificados, que por sua vez intensificam os ventos solares, a velocidade do vento solar pode passar de 300 para 1000 km/s. Dependendo da intensidade da perturbação o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) pode passar de 10 para 6 raios terrestres (BATISTA, 2003b). Em outras palavras, eventos solares (como por exemplo, explosões solares, HSS e SDF) são responsáveis pela alteração dos parâmetros do vento solar (velocidade e densidade). Consequentemente, ocorre uma alteração do campo geomagnético, que por sua vez contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas. Estas por sua vez, implicam em tempestades ionosféricas, que são respostas às tempestades geomagnéticas.

As tempestades geomagnéticas mais intensas são frequentemente relacionadas às ejeções de massa coronal provenientes do Sol (OULU, 2003 apud FEDRIZZI, 2003). As ejeções de massa coronal são bolhas de gás quente (plasma), de bilhões de toneladas, aquecidas pelos campos magnéticos do Sol. As ejeções de massa coronal viajam a aproximadamente 1 milhão km/h e levam de um a quatro dias para alcançar a Terra (UFRGS, 2004). Normalmente as explosões solares são responsáveis por grandes ejeções de massa coronal.

Além das tempestades geomagnéticas, ocorrem também as sub-tempestades geomagnéticas. Uma sub-tempestade é um processo transiente, iniciado no lado noturno da Terra,

através do qual uma quantidade significativa de energia derivada da interação vento-solar magnetosfera é depositada na magnetosfera e ionosfera auroral. Uma tempestade intensa pode ser acompanhada por sub-tempestades intensas e frequentes, no entanto, sub-tempestades intensas podem ocorrer na ausência de uma tempestade intensa (FEDRIZZI, 2003). Ambos os fenômenos de tempestade e sub-tempestade devem sua origem a processos físicos nos quais a energia proveniente do vento solar é redistribuída no sistema magnetosfera-ionosfera (GONZALEZ et al., 1994 apud FEDRIZZI, 2003).

Como já mencionado, tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas solares: explosões solares (*solar flare*), corrente de vento solar de alta velocidade solar provenientes de buracos na coroa (*coronal holes*) e desaparecimentos súbitos de filamentos (McNAMARA, 1991).

Os filamentos podem causar confusão com proeminências, pois, dependendo do ponto de vista, elas podem parecer coisas diferentes, sendo que na verdade são as mesmas coisas. Uma proeminência é uma grande nuvem de gás relativamente frio que está suspensa (ou detido) sobre a superfície do Sol por campos magnéticos que impedem que a nuvem caia (está suspenso). Quando esta nuvem é vista sobre a lateral do Sol, e do espaço, ela aparece brilhante e é conhecida como proeminência. Quando vista de frente para o Sol, ela aparece escura, pois é relativamente fria, e é conhecida como filamento (McNAMARA, 1991).

Filamentos podem atingir comprimentos  $3 \times 10^8$  km e alturas de  $10^5$  km sobre a fotosfera. Elas podem ser muito estáveis, durando meses, mas podem subitamente causar uma erupção e enviar uma nuvem de material solar em direção ao espaço. Se essa nuvem atinge a Terra pode causar mudanças no campo magnético da Terra, e conseqüentemente na ionosfera. Em suma, filamentos são grandes estruturas relativamente frias na cromosfera solar que aparecem como proeminências quando vistas de lado do Sol. Filamentos frequentemente desaparecem subitamente, jogando em toda parte material do filamento em direção ao espaço, similar ao efeito de uma explosão solar. Este evento é ilustrado na figura 18. O súbito desaparecimento de filamento pode afetar o campo magnético da Terra, e, conseqüentemente, a ionosfera. Esses fenômenos são características de altos níveis de atividade solar.

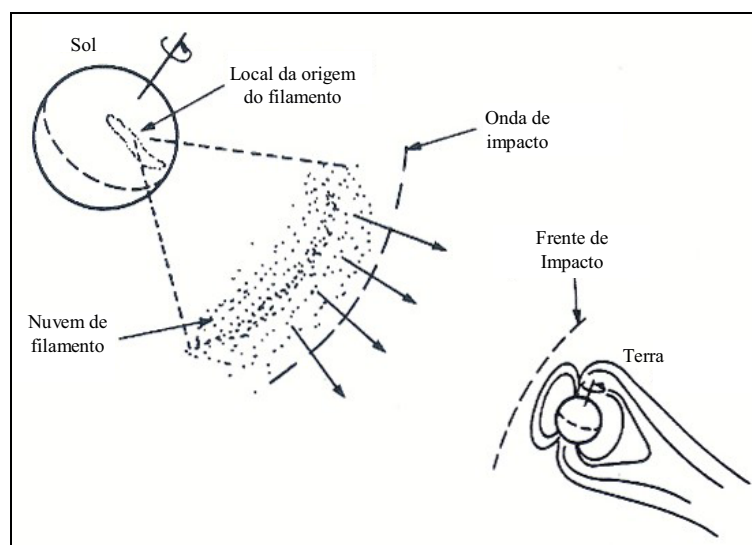


Figura 18 – Matéria de um grande desaparecimento de filamento.  
Fonte: Adaptada de McNamara (1991).

Se a onda de impacto atingir o campo magnético da Terra, pode causar um início súbito, que corresponde a fase principal da tempestade. A nuvem de filamento (de plasma), similar a uma nuvem de plasma que é liberada por uma explosão solar, pode ocasionar em uma tempestade geomagnética e possivelmente uma tempestade ionosférica. Vale salientar que a frente de impacto é uma característica permanente do campo magnético da Terra (como ilustrado nas figuras 6 e 17), devido a ação do vento solar. A tabela 4 mostra os fenômenos decorrentes de desaparecimento súbito de filamentos, bem como o tempo de propagação entre o Sol e a Terra (McNAMARA, 1991).

Tabela 4 – Características decorrentes de SDF.

Fenômeno	Tempo de propagação	Efeitos Terrestres
Onda de impacto	3-4 dias	Início súbito ( <i>Sudden commencement</i> )
Nuvem de filamento	3-10 dias	Tempestade geomagnética Tempestade ionosférica Auroras

Fonte: McNamara (1991).

Juntamente com as explosões solares e HSS os SDF são as três possíveis causas de ocorrência de tempestades geomagnéticas. Um exemplo das taxas de ocorrência de cada um

desses eventos solares para o período de 1970 à 1983 é mostrado na figura 19, bem como o número de manchas solares para fins de comparação. Eventos decorrentes de HSS já foram descritos no tópico 3.3, bem como os buracos coronais (figura 15). As consequências de uma explosão solar no campo geomagnético serão descritos no tópico 4.4.3.1.1.

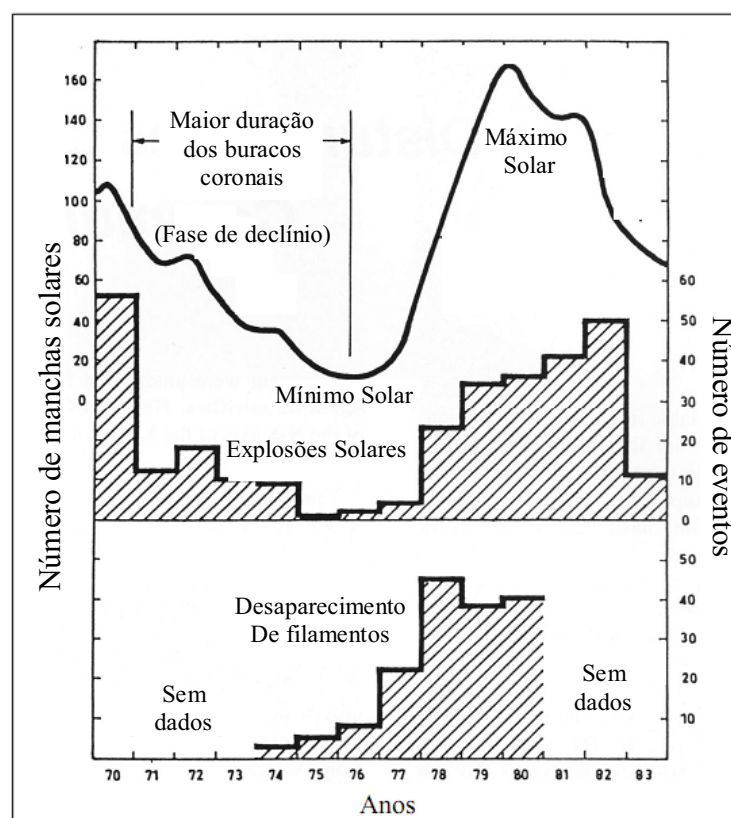


Figura 19 – Taxas de ocorrência entre 1970 a 1983 dos três eventos solares que afetam a ionosfera. Fonte: Adaptada de McNamara (1991).

De acordo com a figura 19, verifica-se que as explosões solares e os SDF ocorrem mais frequentemente durante períodos de alta atividade solar enquanto que os buracos na corona, que são as fontes das HSS, ocorrem principalmente durante a fase de declínio do número de manchas solares.

Tendência de ocorrência de distúrbios geomagnéticos é outra importante medida do progresso do ciclo solar, embora tenha uma distribuição mais complexa. Isto é ilustrado na figura 20, na qual mostra o número de mancha solar suavizado desde 1940 (declínio do ciclo 17) e o número de dias com distúrbios geomagnéticos, em cada ano desde então.

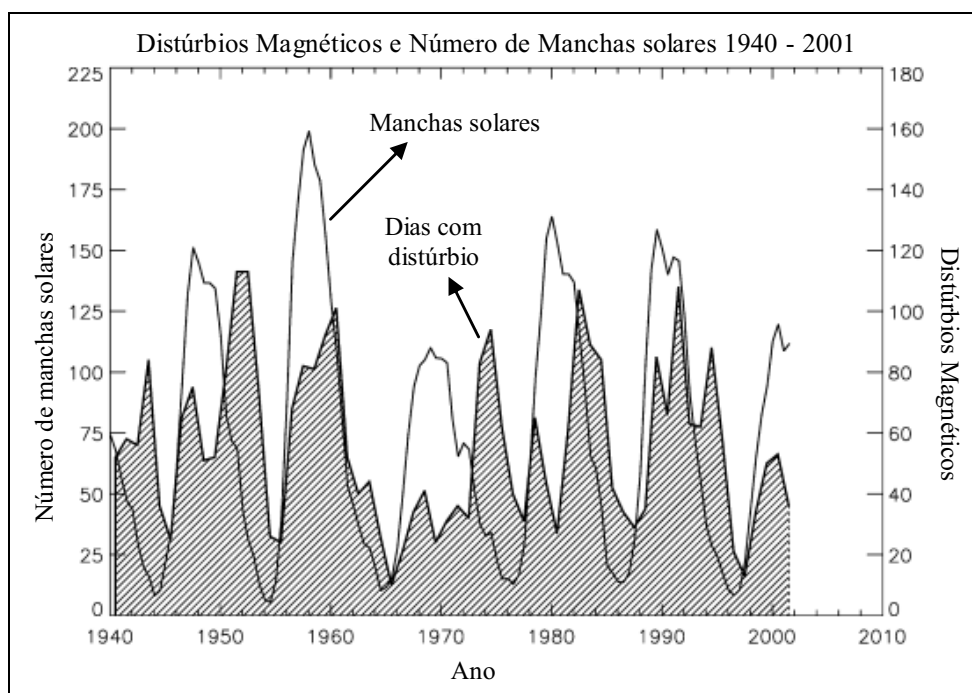


Figura 20 – Relação entre distúrbios magnéticos e manchas solares.  
 Fonte: Adaptado de Thompson e Kunches (2002).

De acordo com a figura 20 verifica-se claramente que no período de declínio do ciclo solar aumenta (em muitos casos) os dias de distúrbios magnéticos. Para o propósito do gráfico foi definido um dia com distúrbio magnético quando o valor do índice Ap (uma medida de distúrbio magnético global) em um determinado dia ultrapassa ou iguala o valor de 25. Trata-se de um distúrbio moderado, no entanto, é uma definição que fornece uma boa indicação de tendências de longo período.

Nota-se também que nos ciclos prévios, que ocorre um largo pico de dias com distúrbio no período de declínio. Isto é bem ilustrado no ciclo 20, no qual o pico de manchas solares ocorreu em 1968. Nesse ano o número de dias com distúrbio geomagnético foi extremamente baixo, e, anos após, no período de declínio deste ciclo, o número de dias com distúrbio geomagnético aumentou de forma significativa. O comportamento de distúrbio mostrado na figura 20 ainda não é completamente entendido, assim como vários fenômenos relacionados com o Sol.

A probabilidade que um determinado evento solar (explosão, HSS ou SDF) pode causar um efeito geomagnético depende da estação do ano e do TU, bem como, obviamente, das próprias características do evento.

A figura 21 mostra um exemplo da dependência da ocorrência de distúrbios magnéticos em função dos meses do ano entre 1932 e 1983. Foram considerados valores do índice Ap maiores do que 36. Os dados se referem a uma média dos meses entre os anos citados.

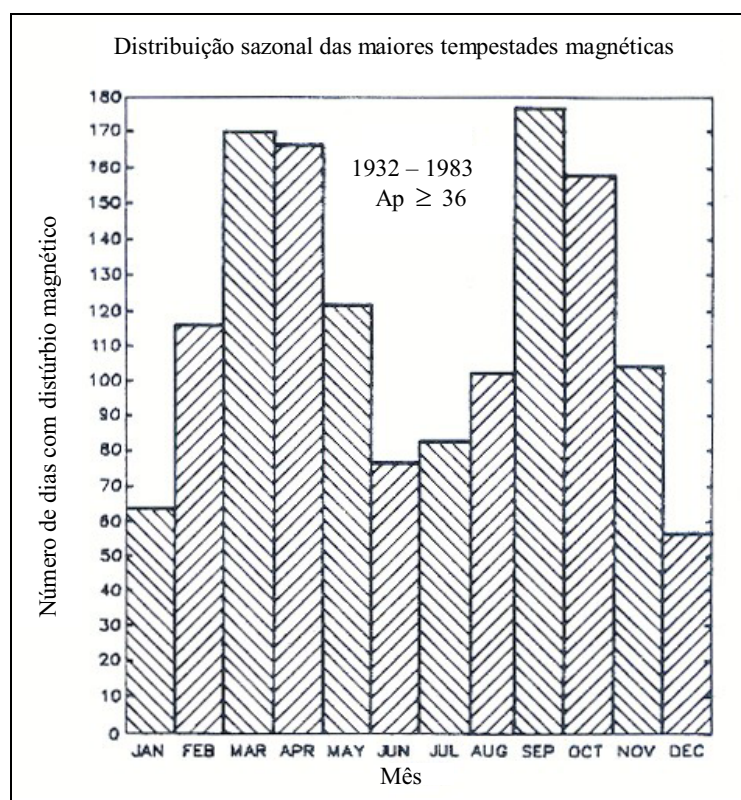


Figura 21 – Número médio de dias com distúrbios em cada mês do ano 1932 – 1983.  
Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

Verifica-se, de acordo com a figura 21, uma variação sazonal das maiores tempestades geomagnéticas ocorridas entre os anos 1932-1983. Em suma, próximo dos equinócios as ocorrências das tempestades foram maiores, do que com relação aos solstícios. O número de dias com distúrbios nos equinócios é duas vezes maior do que no período de solstícios. Em outras palavras, durante os equinócios o campo geomagnético é duas vezes mais susceptível a ocorrências de distúrbios causados por eventos solares.

A figura 22 mostra a susceptibilidade do campo geomagnético estar sendo perturbado devido a eventos solares, como função do TU e mês do ano.

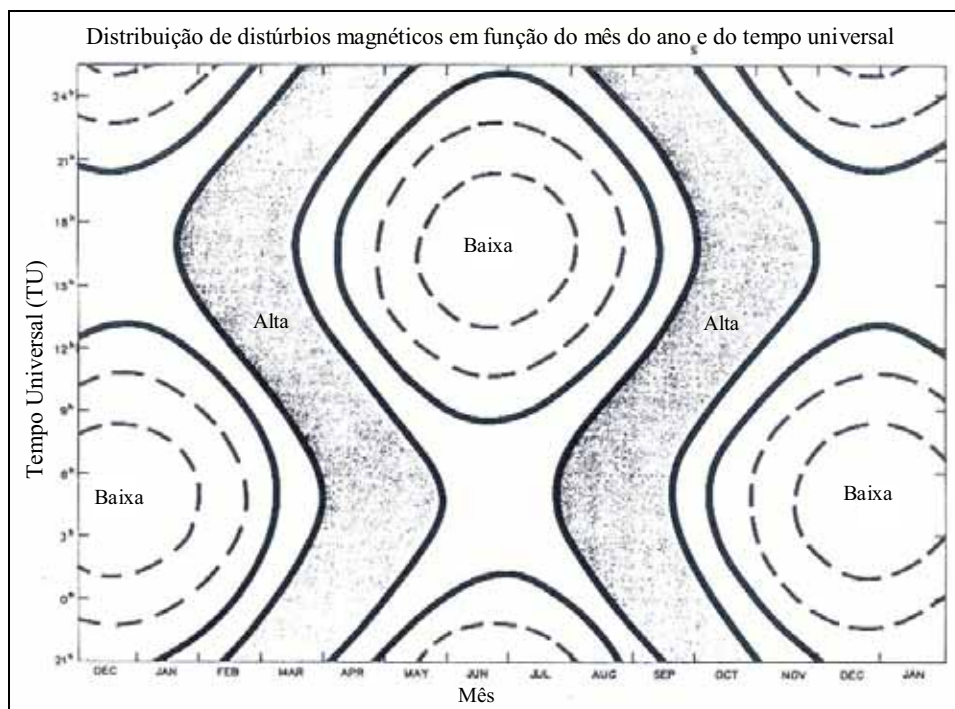


Figura 22 – Suscetibilidade do campo geomagnético estar sendo perturbado por eventos solares.  
Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

Percebe-se claramente, além da variação sazonal, a variação diária de susceptibilidade do campo geomagnético. Por exemplo, se uma nuvem de plasma oriunda de uma explosão atingir a Terra entre 15 e 18 TU em junho, há uma pequena chance do campo geomagnético sofrer distúrbios. Por outro lado, se a mesma nuvem na mesma hora TU atingir a Terra, mas em fevereiro ou março, deverá haver uma maior probabilidade do campo magnético da Terra sofrer distúrbios, afetando desta forma a ionosfera.

Em geral, efeitos geomagnéticos de uma dada explosão, HSS ou SDF serão maiores durante os equinócios do que durante os solstícios. O mesmo raciocínio obviamente é válido com relação aos efeitos ionosféricos no GNSS. Um corolário decorrente desta afirmação é que para um evento solar de pequena magnitude no período próximo aos equinócios poderá proporcionar maiores efeitos geomagnéticos do que uma grande explosão ocorrida próxima dos solstícios (McNAMARA, 1991).

Em suma, os vários eventos solares podem afetar o campo geomagnético. Estes distúrbios geomagnéticos são monitorados a partir de estações em terra, instaladas em observatórios magnéticos (KOMJATHY, 1997).

#### 4.4.3.1.1 Índices geomagnéticos

Índices geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2006). Os índices geomagnéticos mais frequentemente utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas são os índices *Disturbance Storm-Time* (Dst), *Planetarische Kennziffer* ou índice planetário (Kp) e *Auroral Electrojet* (AE) (FEDRIZZI, 2003). Antes de definir o índice Kp, é necessário definir o índice K, pois a partir desse índice é derivado o índice Kp.

O índice K é um índice local, quase logarítmico, que contém as variações ocorridas na atividade geomagnética, em intervalos de três horas, relativas à curva do dia calmo para um determinado observatório magnético (FEDRIZZI, 2003). Tais medidas são convertidas em uma escala quase logarítmica cujos valores variam de acordo com a tabela 5 (WRENN et al., 1987 apud FEDRIZZI, 2003).

Tabela 5 – Valores dos índices Kp e condições da atividade geomagnética.

<b>Atividade Geomagnética</b>	<b>Valor do índice Kp</b>
Muito calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2 <sup>-</sup>
Normal	2 <sup>-</sup> a 3 <sup>+</sup>
Perturbado	3 <sup>+</sup> a 4 <sup>+</sup>
Muito perturbado	4 <sup>+</sup> a 9

Fonte: WRENN et al. (1987) apud FEDRIZZI (2003)

O índice interplanetário Kp foi introduzido por J. Bartels em 1949, e é derivado do índice K padronizado (Ks) de 13 observatórios magnéticos (GFZ, 2007). O índice Kp é a média aritmética dos valores de Ks padronizados de 13 observatórios padrão, por todo o globo terrestre. Este índice representa uma média de valores obtidos no espaço de tempo de três horas, começando a zero hora. Portanto, cada dia tem oito valores de Kp (YAMASHITA, 1999).

O índice Dst (dado em nano Tesla - nT) representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999). É a partir desse parâmetro que se define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem

sempre um comportamento padrão. Logo antes do início da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por fase inicial ou início súbito. Após esse pico, desenvolve-se a fase principal da tempestade (ou negativa), que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice. Após alcançar o mínimo, o índice começa a subir de valor, cuja fase é conhecida como fase de recuperação, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999). A figura 23 mostra a curva do índice Dst obtida entre os dias 5-8 de setembro de 1982, quando ocorreu uma intensa tempestade geomagnética, com suas fases características.

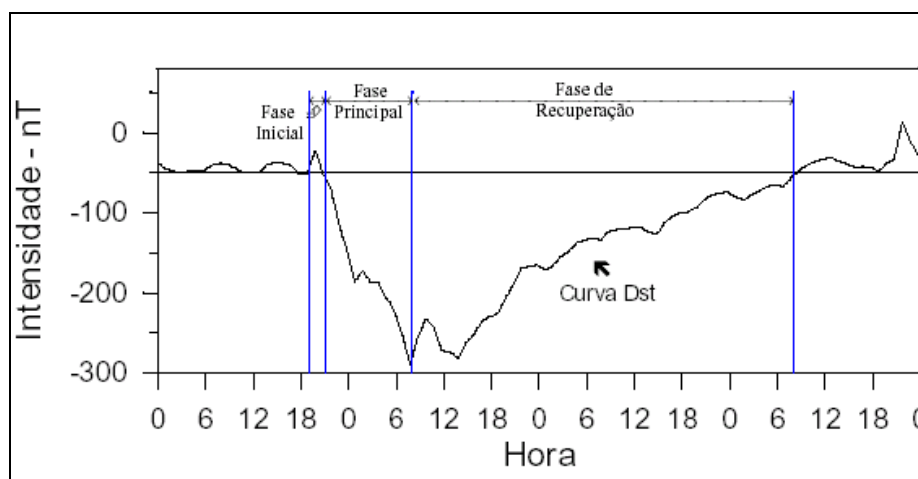


Figura 23 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982.

Fonte: Adaptada de Yamashita (1999).

A classificação de uma tempestade geomagnética é dada de acordo com a tabela 6 (FEDRIZZI, 2003).

Tabela 6 – Classificação de uma tempestade geomagnética.

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

Fonte: Fedrizzi (2003)

O estudo da atividade geomagnética na região auroral requer a utilização de um índice magnético que maximize a contribuição do eletrojato auroral. Neste caso, utiliza-se o índice AE, obtido a partir de medidas das variações da componente horizontal do campo geomagnético, coletadas em observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (YAMASHITA, 1999).

É importante destacar que a fase inicial de uma tempestade dura enquanto o IMF (campo magnético interplanetário, descrito no tópico 3.3) estiver dirigido para o norte. Eventualmente o IMF se inverte para o sul, possibilitando a injeção do plasma na magnetosfera interna. Esta situação é ilustrada na figura 24, que ilustra quando as linhas do campo magnético terrestre conectam-se às linhas do IMF sobre as calotas polares sendo, em seguida, transportadas pelo vento solar para o lado noturno da Terra e reconectando-se na cauda da magnetosfera.

Uma sub-tempestade é criada por um pulso rápido (30-60 min) de inversão para o sul do IMF. Quando o IMF permanece para o sul por um período mais longo a atividade torna-se mais complexa e ocorrerá uma sequência de sub-tempestades produzindo uma tempestade geomagnética. As partículas injetadas na magnetosfera interna sofrem uma deriva (prótons para oeste e elétrons para leste) criando um corrente de anel dirigida para oeste. Esta corrente causa grandes decréscimos na componente horizontal do campo magnético sobre toda a Terra. Esta é a chamada fase principal da tempestade. Enquanto durar a injeção de plasma a corrente se intensificará, até atingir uma condição de equilíbrio em que a taxa de perda se iguala a taxa de injeção. Assim que o IMF enfraquece, ou se inverte novamente para norte, a corrente de anel para de se intensificar e a perturbação na superfície terrestre começa a decrescer. Esta é a fase de recuperação da tempestade. Tempestades geomagnéticas normalmente duram de 1 a 5 dias (BATISTA, 2003b).

A fase inicial da tempestade pode ter uma duração de poucos minutos a mais de 15 horas. Já a fase principal dura em média, um dia. A fase de recuperação pode durar vários dias. Como já mencionado a fase principal da tempestade é produzida pela intensificação da corrente de anel, conduzida por partículas do cinturão de Van-Allen em torno de 305 raios terrestres. A fase de recuperação é causada pela perda de partículas dos cinturões de radiação, o que leva a um enfraquecimento da corrente de anel.

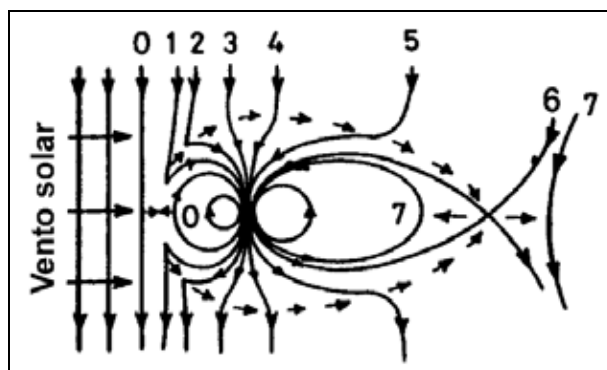


Figura 24 – Circulação devido ao vento solar.  
 Fonte: Hargreaves (1995) apud Fedrizzi (2003).

No que concerne às tempestades geomagnéticas, deve fazer uma diferenciação com relação a sua ocorrência. Há dois tipos de tempestades: com início súbito e gradual. As tempestades que apresentam início súbito são decorrentes de uma explosão solar ou SDF, enquanto que as que apresentam início gradual são decorrentes de HSS (McNAMARA, 1991).

A figura 25 mostra as diferenças entre os dois tipos de tempestades. A diferença consiste, basicamente, na forma em como ocorrem os inícios de uma tempestade, em função da componente horizontal da campo magnético da Terra.

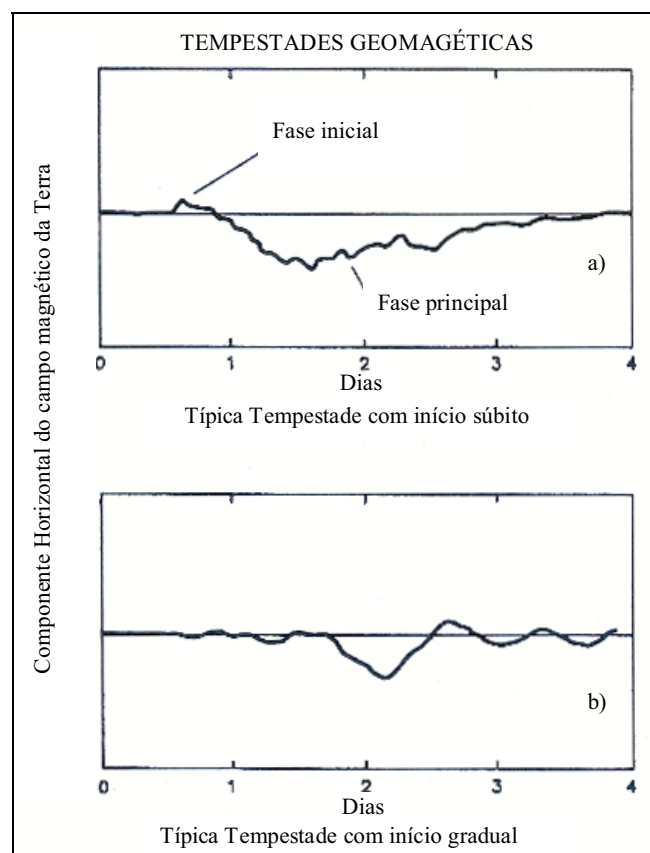


Figura 25 – Tempestades com início súbito e gradual.  
 Fonte: Adaptada de McNamara (1991).

De acordo com a figura 25 pode-se verificar as diferenças entre os dois tipos de tempestades. A figura 25a apresenta uma tempestade típica com início súbito, causada por uma explosão solar ou SDF. A tempestade típica com início gradual é mostrada na figura 25b, causada por HSS. Uma característica deste tipo de tempestade é que elas tendem a ocorrer periodicamente, a cada 27 dias, que coincide com o período de rotação solar. Assim, as tempestades causadas por HSS também são denominadas de tempestades recorrentes.

As maiores tempestades geomagnéticas são decorrentes de explosões solares. As explosões solares podem causar três eventos no espaço interplanetário, causando consequências distintas no campo geomagnético. A figura 26 mostra esses eventos.

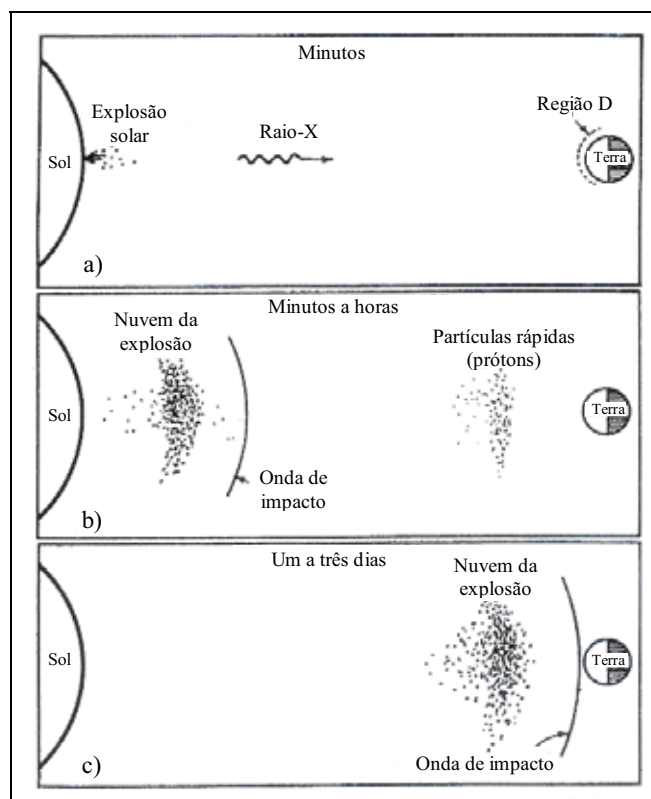


Figura 26 – Consequências de uma grande explosão solar.  
Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

De acordo com a figura 26, podem ocorrer três eventos no espaço interplanetário, decorrentes de uma grande explosão solar. Na figura 26a, verifica-se que ocorre de forma extremamente rápida (minutos) um aumento da radiação (Raio-X) emitida pelo Sol após uma explosão solar, fazendo com que a radiação atinja a Terra em aproximadamente 8 minutos. Na figura 26b, os prótons, que são partículas rápidas, atingem a Terra em questões de minutos a horas. Percebe-se que são seguidas de uma nuvem de explosão que se move de forma mais lenta, na qual é precedida por uma onda de impacto na posição onde as nuvens atingem o vento solar calmo. Na figura 26c, enfim, a nuvem da explosão atinge a Terra em poucos dias após a ejeção causada pela explosão. Vale destacar que pode ocorrer ejeção de massa coronal sem a ocorrência de explosões solares. Detalhes sobre as origens interplanetárias de tempestades geomagnéticas podem ser encontrados em Gonzalez et al. (1999).

#### 4.4.4 Regiões geográficas da ionosfera

A estrutura global da ionosfera não é homogênea, pois ela muda com a latitude, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação solar. As três maiores regiões ionosféricas são conhecidas como regiões de altas e médias latitudes e região equatorial. A figura 27 mostra a localização geográfica dessas regiões no globo terrestre (FONSECA JUNIOR, 2002).

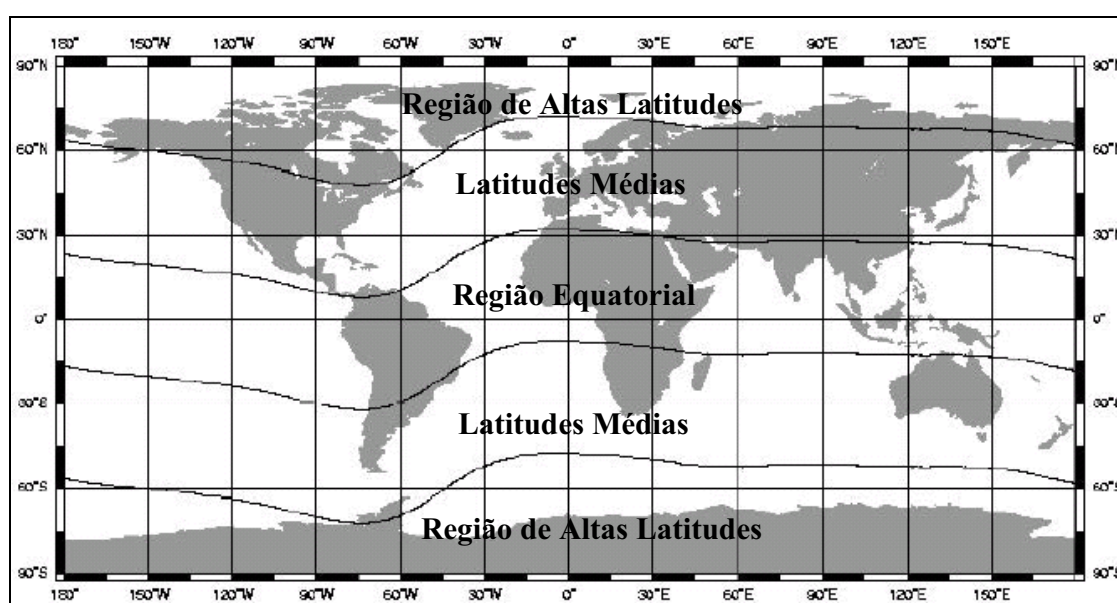


Figura 27 – Regiões geográficas da ionosfera.  
Fonte: Adaptada de Fonseca Junior (2002)

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

##### 4.4.4.1 Regiões de latitudes médias

A região de latitudes médias está localizada entre a região equatorial e de altas latitudes, e compreende, aproximadamente, as latitudes geográficas de  $\pm 30$  a  $\pm 50$  graus. Nessa região, a

ionosfera tem um comportamento menos variável do que em outras regiões. É uma zona de transição entre as regiões da ionosfera de latitudes baixa e alta e é a ionosfera em que mais se aproxima dos modelos ionosféricos clássicos (RODRIGUES, 2003). No entanto, severas tempestades geomagnéticas podem implicar em grandes impactos nos sinais GNSS, onde irregularidades na densidade de elétrons podem se estender da região equatorial para região de médias latitudes. Efeitos da cintilação ionosférica algumas vezes também podem ser detectados na região de médias latitudes, embora seus efeitos ocorram com maior frequência nas regiões equatorial e de altas latitudes. Efeitos de tempestades geomagnéticas também podem se estender para as regiões de médias latitudes.

Nas regiões de médias latitudes, o TEC pode apresentar valores consideravelmente maiores no inverno do que no verão, caracterizando a anomalia sazonal. Este fenômeno ocorre somente durante o dia e torna-se observável à medida que a atividade solar cresce (RISHBETH e GARRIOT, 1969 apud FEDRIZZI, 2003).

#### **4.4.4.2 Regiões de latitudes altas**

As regiões de latitudes altas, que estão próximas às regiões polares, são sem dúvida as piores regiões no que diz respeito às comunicações em alta frequência (HF). Isto se deve ao fato dessas regiões serem muito variáveis espacialmente e temporalmente (McNAMARA, 1991). As regiões de altas latitudes incluem as regiões da capa polar, auroral e sub-regiões aurorais (EL GIZAWY, 2003). Durante a precipitação de partículas, que aumenta a densidade de elétrons, mudanças da ordem de varias dezenas de TECU pode facilmente ocorrer na região de latitudes altas (SCHLEGEL, 2007).

A região da capa polar localiza-se acima das latitudes geomagnéticas de 75°. Irregularidades de pequena escala que causam cintilações, com tamanhos de poucos metros até 1 km encontram-se nessa região. O aumento na densidade de elétrons na região da capa polar está concentrado na região F, nas altitudes de 250 a 400 km (EL GIZAWY, 2003). Nessas latitudes, as linhas do campo magnético são abertas, o que permite que o plasma do vento solar tenha acesso nesta região.

A região auroral está localizada acima das latitudes geomagnéticas de 60° até 75°. Esta região é conhecida como oval auroral e é apresentada na figura 28 (EL GIZAWY, 2003). A largura do oval auroral pode-se expandir no lado noturno, durante períodos de tempestades

geomagnéticas. Sua expansão pode ser de até duas vezes sua largura média no lado noturno em condições de tempestades. A região auroral abrange o Canadá, Alaska, Norte da Europa e algumas partes da Rússia.

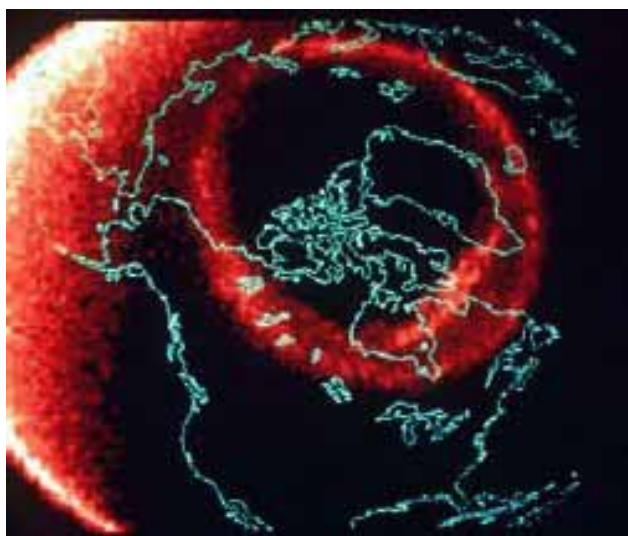


Figura 28 – Imagem de satélite do oval auroral.  
Fonte: El Gizawy (2003)

A região auroral é caracterizada pela presença de auroras. A interação entre partículas energéticas carregadas que fluem do Sol (vento solar) e o campo geomagnético produz uma aceleração de elétrons na região próxima à Terra. Elétrons energizados precipitam na direção de altas latitudes, ao longo das linhas de campo geomagnético. Na sequência podem ocorrer as auroras, que resultam de emissões óticas (EL GIZAWY, 2003).

Cintilações também são observadas durante eventos de sub-tempestades geomagnéticas nessa região. Isto pode dificultar a resolução da ambiguidade para posicionamento preciso e aplicações em redes regionais. Uma significativa degradação na acurácia do posicionamento com DGPS, bem como o desempenho do rastreamento de receptores GNSS pode ser observado durante eventos de sub-tempestades geomagnéticas na região de latitudes altas.

Vale salientar que a ocorrência de cintilação auroral está fortemente correlacionada com eventos de sub-tempestades geomagnéticas, enquanto que, a ocorrência de cintilação equatorial, está associada com variações diurna e sazonal do TEC (EL GIZAWY, 2003). A sub-região auroral está localizada alguns graus ao sul da região auroral. A densidade de elétrons nesta região

é bem menor do que a região auroral, no qual pode resultar em altos gradientes do TEC, entre a região auroral e o seu limite com a sub-região auroral (EL GIZAWY, 2003).

#### **4.4.4.3 Região equatorial**

A região equatorial limita-se, aproximadamente, entre  $\pm 30^\circ$ , do equador geomagnético. No entanto, segundo Batista (2003a), a região equatorial que comparece em muitos trabalhos científicos, é muito abrangente. Na verdade, esta região pode ainda ser subdividida em duas regiões: a região equatorial propriamente dita, que se limita a uma área que abrange aproximadamente as latitudes de  $\pm 5^\circ$ , e a região de baixa latitude, que se limita a uma área que abrange, aproximadamente, o intervalo entre as latitudes  $\pm 5$  a  $\pm 30^\circ$  graus de latitude geomagnética.

##### **4.4.4.3.1 Anomalia equatorial ou anomalia de Appleton**

Os campos elétricos do dínamo atmosférico que são gerados na região E são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a região F, devido à alta condutividade paralela. Durante o dia o campo elétrico é direcionado para leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por  $E \times B / B^2$ . 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. Este movimento ocorre devido à ação da gravidade ( $\vec{g}$ ) e gradiente de pressão ( $\nabla p$ ). Este movimento de elevação do plasma e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (SCHUNK e NAGY, 2000). Este nome foi dado devido à similaridade com o movimento de uma fonte (chafariz). Um esquema das forças agindo no plasma é mostrado na figura 29.

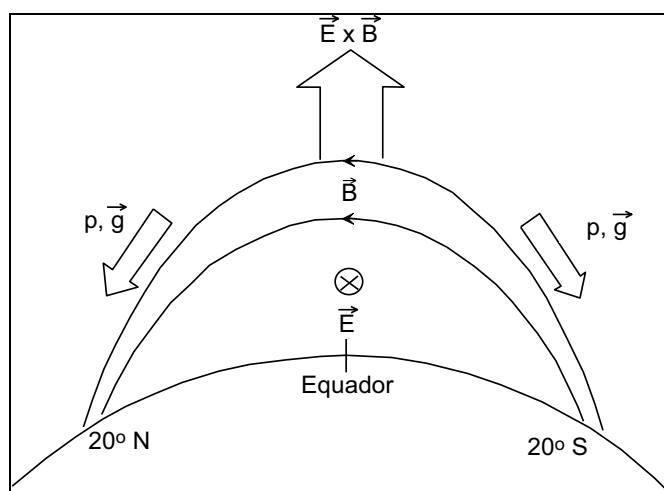


Figura 29 – Esquema de forças agindo no plasma.  
Fonte: Kelley (1989) apud Rodrigues (2003)

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que dois picos de ionização são formados nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10° e 20° de latitude. No equador geomagnético a ionização fica menos intensa. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial ou anomalia de Appleton (APPLETON, 1946).

Nas faixas da anomalia equatorial que se localizam no território brasileiro as densidades da ionosfera atingem valores maiores que em outras regiões da Terra. Tal fato desempenha importante influência nos enlaces de telecomunicações terrestre e espacial (SOBRAL, 2002). A maior intensidade desta anomalia, conforme já mencionado, ocorre nas latitudes geomagnéticas entre  $\pm 10$  e  $\pm 20$  graus, causando alta concentração de elétrons nos dois lados do equador geomagnético. No entanto, os valores máximos do TEC ocorrem nas latitudes aproximadas de  $\pm 15^\circ$  em relação ao equador geomagnético, que correspondem à região das cristas da anomalia equatorial (FEDRIZZI, 2003).

A anomalia equatorial varia ao longo do dia, passando por um máximo por volta das 17:00 TU (14:00 horas local), e por um segundo máximo, nas horas que precedem a meia noite, geralmente maior que o primeiro. Este segundo máximo em geral não ocorre durante períodos de baixa atividade solar (BATISTA, 2003b).

A figura 30 ilustra o movimento de íons e elétrons na presença de campos elétricos e magnéticos perpendiculares. Este é o princípio básico da elevação do plasma que ocorre na camada F.

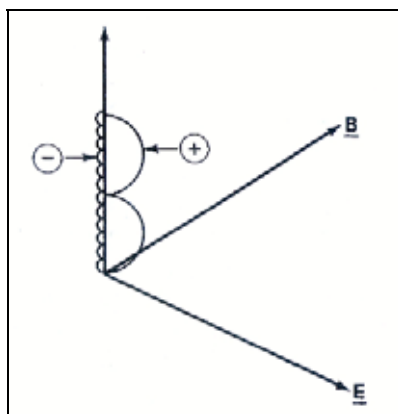


Figura 30 – Movimento de íons e elétrons na presença de campos elétricos e magnéticos.  
Fonte: Adaptada de Davies (1990)

De acordo com a figura 30, verifica-se que na presença de campos elétricos e magnéticos perpendiculares, os elétrons e íons se deslocam na direção perpendicular a ambos os campos com velocidade  $V$ , dado por  $V = (E \times B)/B^2$ . Em suma, qualquer intensificação no campo elétrico, causará uma intensificação do efeito fonte, e conseqüentemente da anomalia equatorial. Os processos de transporte de plasma na camada F, especificamente na camada  $F_2$ , são de extrema importância. Partículas energizadas que se precipitam na região auroral podem ser transportadas para a região equatorial, podendo intensificar a anomalia equatorial.

Fedrizzi (2003) verificou fortes intensificações da anomalia equatorial em função da ocorrência de tempestades geomagnéticas. Foram verificados aumentos significativos do TEC, bem como o deslocamento das cristas da anomalia equatorial na direção de latitudes mais altas. Vale salientar que com a intensificação da anomalia equatorial, há uma maior variação espacial do TEC na direção norte-sul, sendo que próximo do equador geomagnético há uma redução significativa na concentração de elétrons. Em uma das tempestades analisadas, que ocorreu no dia 15/07/2000, foram verificados fortes indícios de que a intensificação da anomalia equatorial, bem como sua expansão na direção de latitudes mais altas, estão relacionadas com a intensificação do efeito fonte devido a penetração de um campo elétrico para leste na ionosfera de latitude baixa. Em contrapartida, na fase de recuperação da tempestade valores do TEC diminuíram em até 70 % se comparado com o dia anterior a ocorrência da tempestade.

A tempestade geomagnética analisada por Fedrizzi (2003) ocorreu em função de uma forte explosão solar, que por sua vez alterou o clima espacial. Como consequência, houve uma alteração significativa da anomalia equatorial, que é formada na região de latitudes baixas ou região equatorial.

Vale destacar que os maiores valores e variações do TEC são observados na região equatorial. Variações de até 30 TECU/100 km foram observadas na direção norte-sul no período de pico de atividade do ciclo solar 23 (SKONE e SHRESTHA, 2002). Em contrapartida, variações do TEC na direção leste-oeste raramente excederam 10 TECU/100 km.

## 5 IMPACTO DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS

*“A luz e também as ondas de rádio, não são ondas de alguma coisa que vibra; são formas matemáticas para se saber como se distribuem no espaço”*

*Piero Pasolini*

Os sinais GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena receptora, propagam-se na atmosfera dinâmica, atravessando diferentes camadas, que possuem características bem distintas. O efeito da ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora. Se o valor do TEC fosse constante, os efeitos causados pela ionosfera seriam de fácil determinação. O problema é que o TEC varia no tempo e no espaço, em razão do fluxo de ionização solar, da atividade magnética, do ciclo de manchas solares, da estação do ano, da localização do usuário e da direção do raio vetor do satélite (KLOBUCHAR, 1991).

### 5.1 Elementos de Propagação de Ondas

No que diz respeito à propagação dos sinais GNSS na ionosfera, a fase da onda portadora sofre um avanço e o grupo de ondas sofre um retardo, provocando uma diminuição e um aumento na distância medida pela fase da onda portadora e pelo código, respectivamente. Para se obter um entendimento intuitivo deste fenômeno, é suficiente considerar uma situação simplificada de propagação de ondas em um meio homogêneo e isotrópico. Em um meio homogêneo o índice de refração é constante e a propriedade isotrópica implica que a velocidade de propagação em um dado ponto no meio é independente da direção da propagação.

Em um meio homogêneo e isotrópico uma onda harmônica com amplitude unitária é expressa por (LEICK, 1995):

$$\varphi = \cos\omega \left( t - \frac{x}{c_\varphi} \right). \quad (1)$$

O símbolo  $t$  denota o tempo,  $c_\varphi$  é a velocidade da fase em metros por segundo (m/s), e  $x$  é a distância da fonte transmissora. A frequência angular  $\omega$  dada em radianos por segundo (rad/s), a frequência  $f$  em Hertz (Hz), o comprimento de onda  $\lambda_\varphi$  em metros (m), e o número da onda ou constante  $k$  de propagação da fase (radianos por metro) são dados por:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2)$$

$$\lambda_\varphi = \frac{c_\varphi}{f}, \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_\varphi}. \quad (4)$$

Considerando uma onda  $\varphi_1$  e usando as relações entre as equações (2), (3) e (4) a equação da onda (1) pode ser escrita como:

$$\varphi_1 = \cos(\omega t - kx). \quad (5)$$

Agora, considerando-se outra onda  $\varphi_2$  com uma pequena diferença na frequência angular e na constante de propagação da fase  $k$  com relação a  $\varphi_1$ , tem-se:

$$\varphi_2 = \cos[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x]. \quad (6)$$

Estas duas ondas podem ser sobrepostas da seguinte forma, dando origem a onda  $\varphi_s$  ( $\varphi_1 + \varphi_2$ ):

$$\varphi_s = 2 \cos \frac{\Delta\omega t - \Delta kx}{2} \cos \left[ \left( \omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t - \left( k + \frac{\Delta k}{2} \right) x \right]. \quad (7)$$

A figura 31 mostra uma ilustração das ondas  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_s$ , expressas pelas equações (5), (6) e (7), respectivamente (LEICK, 1995).

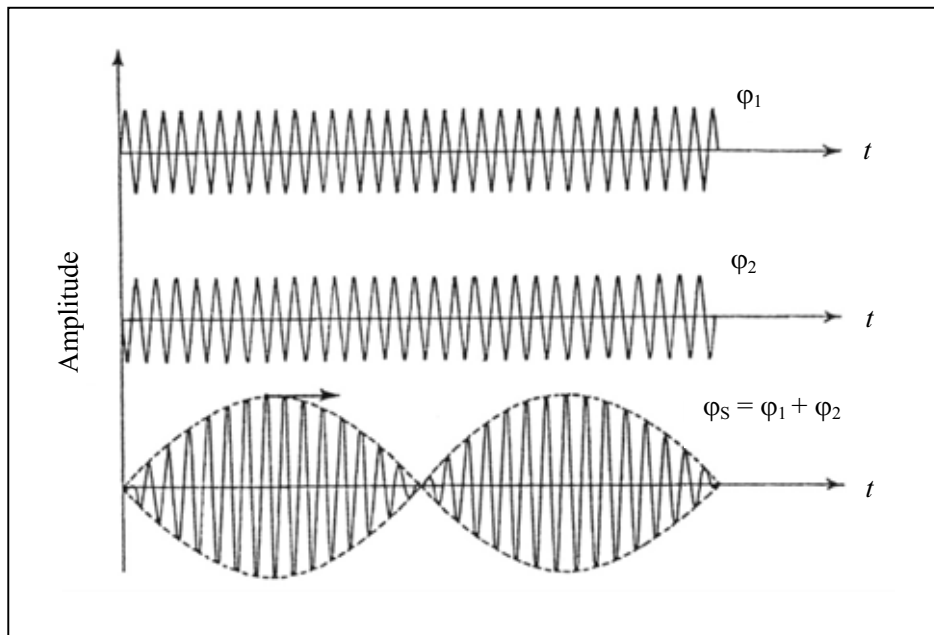


Figura 31 – Propagação da fase e do grupo.  
Fonte: Leick (1995)

O sinal combinado na figura 31 mostra duas componentes de ondas de frequência angular diferente. O primeiro termo co-seno da equação (7) representa a modulação envoltória, ou pulso do sinal:

$$\psi = 2 \cos \frac{\Delta\omega t - \Delta kx}{2}. \quad (8)$$

Analogamente a equação (1), a expressão (8) implica numa velocidade do pulso do sinal de:

$$V_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}. \quad (9)$$

Considerando que no limite,  $\Delta\omega \rightarrow 0$  e  $\Delta k \rightarrow 0$ , a equação (9) pode ser dada por:

$$V_g = \frac{d\omega}{dk}. \quad (10)$$

A quantidade  $V_g$  é chamada de velocidade de grupo. Ela é a velocidade pela qual a modulação ou energia viaja. Como a modulação (códigos P e C/A) é usada no posicionamento GPS em adição à fase da portadora, é importante estabelecer uma relação entre a velocidade de grupo e a velocidade de fase.

O segundo termo co-seno da equação (7) é a portadora. A frequência deste termo aproxima-se à  $\omega$  no limite.

O produto do índice de refração da fase ( $n_f$ ) e a velocidade da fase ( $V_f$ ) é igual a velocidade da luz ( $c$ ) no vácuo:

$$n_f V_f = c. \quad (11)$$

Seguindo uma analogia para o índice de refração e velocidade de grupo ( $n_g$  e  $V_g$ ) tem-se:

$$n_g V_g = c. \quad (12)$$

A partir das equações (2), (3), (4), (10), (11) e (12), pode-se obter o índice de refração do grupo, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{c}{V_g} = c \frac{dk}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{2\pi c}{\lambda_f} \right) = \frac{d}{d\omega} \left( n_f \frac{V_f}{c} \frac{2\pi c}{\lambda_f} \right) \\ n_g &= \frac{d}{d\omega} \left( n_f \frac{V_f}{c} \frac{2\pi c}{\lambda_f} \frac{\omega}{2\pi f} \right) \\ n_g &= \frac{d}{d\omega} (n_f \omega) = n_f + \omega \frac{dn_f}{d\omega} \\ n_g &= n_f + f \frac{dn_f}{df}. \end{aligned} \quad (13)$$

Se o índice de refração do grupo ( $n_g$ ) depende da frequência ( $f$ ) da fase da portadora, isto é, se a derivada:

$$\frac{dn_f}{df} \neq 0 \quad (14)$$

for diferente de zero, então o meio é chamado de dispersivo. As equações (10) a (14) implicam que a velocidade da fase ( $V_f$ ) e a do grupo ( $V_g$ ) diferem em um meio dispersivo. Vale ressaltar que para as frequências dos sinais transmitidos pelos satélites GNSS a ionosfera é dispersiva, enquanto que na troposfera é não dispersiva. Considerando-se a propagação de uma onda eletromagnética no vácuo, que se trata de um caso especial, ambos os índices de refração da fase e do grupo são iguais a 1. A sobreposição (equação 7) pode resultar em um índice de refração da fase ( $n_f$ ) menor do que 1. Isto implica uma velocidade da fase ( $V_f$ ) maior do que a velocidade da luz no vácuo, de acordo com a equação (11). O fato de  $V_f$  ser maior do que a velocidade da luz ( $c$ ) não conflita com a teoria da Relatividade, pois a energia, isto é, a modulação, viaja a uma velocidade ( $V_g$ ) menor do que a velocidade da luz ( $c$ ).

## 5.2 Índice de Refração da Ionosfera

A relação entre o índice de refração da fase e do grupo (equação 13) é denominada de equação de *Rayleigh* modificada. O índice de refração da fase ( $n_f$ ) na ionosfera pode ser expresso pela fórmula de Appleton-Hartree (DAVIES, 1990):

$$n_f^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[ \frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}}, \quad (15)$$

onde:

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

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

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

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

$\omega = 2\pi f$  = frequência angular do plasma;

$f$  = frequência da onda;

$f_H$  = girofrequência;

- $f_n$  - frequência de plasma;  
 $n_e$  - densidade de elétrons ( $\text{el}/\text{m}^3$ );  
 $e$  - carga do elétron =  $-1,602 \times 10^{-19}$  Coulomb;  
 $\epsilon_0$  - permissividade do espaço livre =  $8,854 \times 10^{-12}$  farad/m;  
 $\theta$  - ângulo entre a direção da onda e o campo magnético da Terra;  
 $m$  - massa do elétron =  $9,107 \times 10^{-31}$  kg;  
 $\nu$  - frequência de colisão;  
 $B$  - Campo magnético;  
 $i$  - Representa número imaginário.

O índice de refração apresentado na expressão 15 tem como base o seguinte sistema de coordenadas ortogonais.

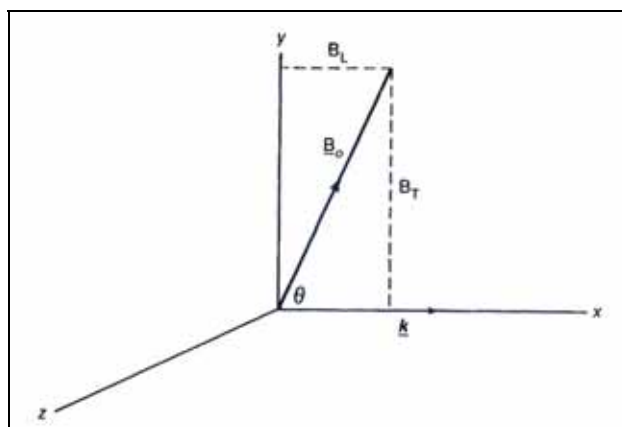


Figura 32 – Sistema ortogonal de eixos (x, y, z).  
 Fonte: Adaptada de Davies (1990).

Na figura 32 é considerado que uma onda eletromagnética plana propagando na direção x de um sistema ortogonal de eixos no qual o campo magnético externo ( $B_0$ ) está contido no plano x-y, formando um ângulo  $\theta$  com a direção de propagação.

O conceito de girofrequência é ilustrado na figura 33 (DAVIES, 1990). Nota-se que o elétron e o íon positivo giram em torno do campo magnético  $B_0$  em sentidos contrários. A frequência do plasma representa a frequência natural de oscilação do plasma quando o mesmo sofre uma perturbação.

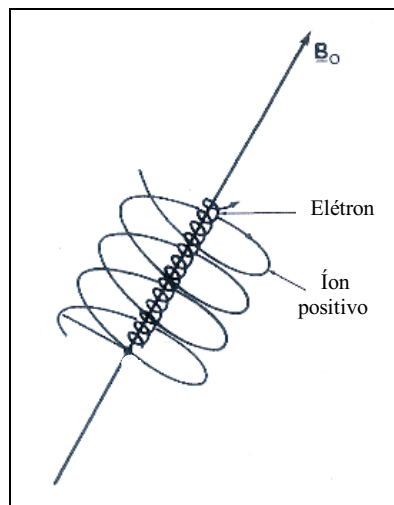


Figura 33 – Conceito de giro-frequência para íons e elétrons, na presença de um campo magnético. Fonte: Adaptada de Davies (1990).

Frequência de colisão num plasma com alta densidade de elementos neutros é maior do que com baixa densidade. Assim, nas camadas mais baixas da ionosfera, a frequência de colisão é um fator dominante, e nas altas camadas ionosféricas o fator dominante é o girofrequência.

O giro frequência do elétron ( $f_H$ ) é tipicamente 1.5 MHz; a frequência do plasma ( $f_n$ ) raramente excede 20 MHz; a frequência de colisão ( $\nu$ ) é aproximadamente 104Hz (KLOBUCHAR, 1996). Assim, para uma acurácia melhor que 1%, o índice de refração da ionosfera é dado da seguinte forma:

$$n_f = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{(2\pi)^2 n_e e^2}{2m\epsilon_0 (2\pi)^2 f^2}, \quad (16)$$

Pela substituição dos valores das constantes “e”, “m” e “ $\epsilon_0$ ” na equação (16), o índice de refração da fase pode ser dado por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2}. \quad (17)$$

Desta forma, pela equação (17) pode-se concluir que o índice de refração da fase depende principalmente da densidade de elétrons ( $n_e$ ) e da frequência ( $f$ ) da onda eletromagnética.

Uma expressão correspondente para o índice de refração de grupo ( $n_g$ ) pode ser derivada da relação apresentada na equação (13), tal que:

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} = \left(1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}\right) + \left(\frac{80,6 f n_e}{f^3}\right) \quad (18)$$

$$n_g = 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2} .$$

Pelas equações (17) e (18) pode-se notar que o índice de refração do grupo é sempre maior que o índice de refração da fase. Isto faz com que, na propagação dos sinais GNSS, ocorra um atraso na velocidade de grupo e um avanço na fase, provocando um aumento nas distâncias obtidas a partir do código, e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade, respectivamente. Na verdade, estes erros são apenas alguns dos vários efeitos que a ionosfera pode causar nos sinais GNSS. Devido ao fato do índice de refração da ionosfera ser diferente da unidade, podem ocorrer outros efeitos, tais como: efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera, a rotação da polarização do sinal, a curvatura ou refração da onda de rádio, a distorção na forma de onda de pulso, deslocamento Doppler e as cintilações da fase e amplitude do sinal. Na seção 5.2.1 serão descritos os efeitos de primeira, segunda e terceira ordens da ionosfera, na seção 5.2.2 os efeitos de cintilação da fase e amplitude, e na seção 5.2.3 serão feitos alguns comentários com relação aos outros efeitos ionosféricos.

### 5.2.1 Efeitos de primeira, segunda e terceira ordens da ionosfera

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

$$S = \int_r^s n \, ds, \quad (19)$$

onde  $n$  representa, de forma genérica, o índice de refração da fase ou do grupo. A distância medida ( $S$ ) é influenciada pelo índice de refração da ionosfera, e a integral é estendida ao longo do caminho do sinal. A distância geométrica ( $\rho$ ) entre o satélite e a antena receptora é obtida quando o índice de refração ( $n$ ) é unitário, logo:

$$\rho = \int_r^s ds \quad (20)$$

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

$$I_r^s = \int_r^s n ds - \int_r^s ds. \quad (21)$$

Substituindo os índices de refração da fase (17) e do grupo (18) na equação (21), se obtém os erros sistemáticos devido à ionosfera para a fase da portadora ( $I_{f_r}^s$ ) e para os sinais modulados pelo código ( $I_{g_r}^s$ ). Desta forma, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_{f_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (22)$$

ou

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (23)$$

e para os sinais modulados pelo código, tem-se que:

$$I_{g_r}^s = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (24)$$

ou

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (25)$$

onde a parcela variável ( $\int_r^s n_e ds$ ) caracteriza a densidade de elétrons ao longo do caminho do sinal entre o satélite e a antena receptora, que por sua vez representa o conteúdo total de elétrons (TEC), ou seja:

$$\text{TEC} = \int_r^s n_e ds. \quad (26)$$

A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado ( $\text{el}/\text{m}^2$ ). Substituindo a equação (26) nas equações (23) e (25), obtém-se o erro devido à ionosfera para a fase da portadora e para os sinais modulados pelo código em função do TEC e da frequência (LEICK, 1995):

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (27)$$

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (28)$$

O erro devido à ionosfera relacionada com o código ( $I_{g_r}^s$ ) é usualmente denominado de atraso ionosférico, ou atraso do grupo. De acordo com as equações (27) e (28), verifica-se que o erro devido à ionosfera, seja ela atribuída para a fase da portadora ou para os sinais modulados pelo código, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera. Na tabela 7 tem-se o efeito que a ionosfera causa na propagação para diferentes frequências e indica o erro residual na vertical para combinações entre duas frequências (SEEBER, 2003).

Tabela 7 – Efeito da ionosfera para diferentes frequências e erro residual na vertical para combinações entre duas frequências.

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

Fonte: Seeber (2003).

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, calculada pelas expressões (27) e (28) representa somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. O erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 2003). A tabela 8 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras  $L_1$ ,  $L_2$  do GPS e para a combinação linear livre da ionosfera ( $L_0$ ). Para direções inclinadas o erro devido à ionosfera pode aumentar em até 3 vezes.

Tabela 8 – Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.

<b>Frequência</b>	<b>Efeito de 1ª ordem</b> <b>(1 / f<sup>2</sup>)</b>	<b>Efeito de 2ª ordem</b> <b>(1 / f<sup>3</sup>)</b>	<b>Efeito de 3ª ordem</b> <b>(1 / f<sup>4</sup>)</b>
$L_1$	32,5 m	0,036 m	0,002 m
$L_2$	53,5 m	0,076 m	0,007 m
$L_0$	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Seeber (2003).

As expressões (27) e (28) representam os efeitos de primeira ordem da ionosfera. As expressões que permitem calcular os efeitos de segunda e terceira ordens serão apresentadas na sequência. Vale salientar que toda a descrição de como são calculados os efeitos de segunda e

terceira ordem da ionosfera será baseado em (ODIJK, 2002). Os efeitos de segunda ( $I^2$ ) e terceira ( $I^3$ ) podem ser calculados a partir das seguintes expressões:

$$I^2 = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \int \|B\| |\cos \theta| N_e dp \quad (29)$$

$$I^3 = \frac{3A^2}{8f^4} \int N_e^2 dp \quad (30)$$

onde  $N_e$  representa a densidade de elétrons livres em  $m^{-3}$ ,  $f$  é a frequência do sinal,  $e$  é uma constante natural igual a  $1,60218 \times 10^{-19}$  Coulomb para a carga do elétron,  $m_e$  é a massa do elétron, igual a  $9,10939 \times 10^{-31}$  kg,  $\|B\|$  representa o comprimento do vetor indução geomagnética ( $B$ ), sendo sua unidade dada por Tesla que é igual a Volt.segundo/metro<sup>2</sup>,  $\theta$  é o ângulo que fornece a direção de propagação do sinal em relação ao vetor indução geomagnética ( $B$ ). A figura 34 ilustra este vetor com relação ao modelo ionosférico da simples camada (*single-layer*), bem como o ângulo  $\theta$ .

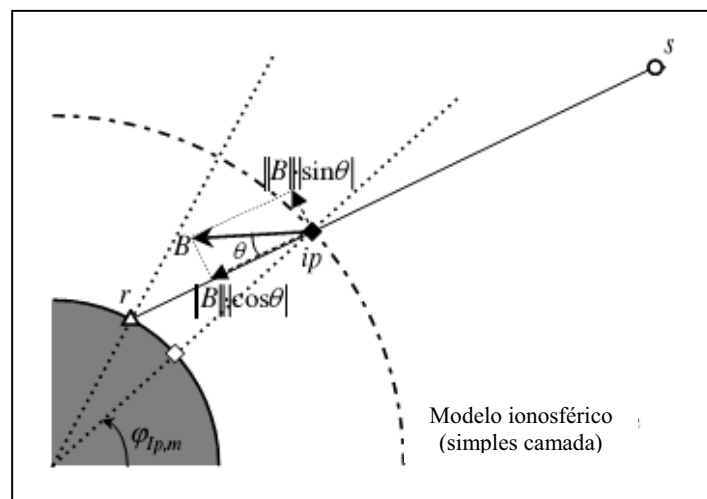


Figura 34 – Modelo da simples camada e o vetor indução geomagnética  $B$ .

Fonte: Adaptado de ODIJK (2002).

A quantidade  $A$  que comparece nas expressões (29) e (30) pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$A = \frac{e^2}{4\pi^2 m_e \epsilon_0} \quad (31)$$

sendo  $\epsilon_0$  é a permissividade do espaço livre, sendo igual a  $8.85419 \times 10^{-12}$  Farad/metro (Farad é unidade de capacidade elétrica). Os demais termos já são conhecidos. Substituindo os valores na expressão (31), obtém-se que o valor de A é igual a  $80,6 \text{ m}^3/\text{s}^2$ .

De acordo com a expressão (29), verifica-se que o efeito de segunda ordem da ionosfera depende da indução geomagnética no ponto onde o sinal cruza a camada da ionosfera e do ângulo deste sinal em relação ao vetor de indução geomagnética (ver figura 34). No entanto, os efeitos de terceira ordem, dado pela expressão 30, independem destes fatores. Com relação aos efeitos de primeira ordem da ionosfera, referentes à fase e ao código, são iguais (mesma magnitude), porém, de sinais opostos. O mesmo não se pode dizer com relação aos efeitos de segunda e terceira ordem, sendo também de sinais opostos, no entanto, não apresentam a mesma magnitude. O efeito de segunda ordem da fase é metade do efeito de segunda ordem do grupo, enquanto que o efeito de terceira ordem da fase é um terço do efeito de grupo. Para se calcular os efeitos de segunda e terceira ordem também em função do TEC, podem ser feitas algumas simplificações. A simplificação será feita assumindo uma aproximação da ionosfera como uma simples camada, de acordo com a figura 34. Usando uma fina camada para representar a ionosfera, pode-se assumir que o produto  $\|B\|\|\cos(\theta)\|$  é constante ao longo do caminho do sinal, assim, a integral pode ser “retirada” da expressão 29. Desta forma o efeito de segunda ordem pode ser escrito da seguinte forma:

$$I^2 = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \|B\|\|\cos \theta\| \int N_e dp = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \|B\|\|\cos \theta\| TEC \quad (32)$$

Assim, de acordo com a expressão 32, o atraso de segunda ordem pode ser escrito também em função do TEC, da mesma forma que são calculados os efeitos de primeira ordem da ionosfera. No entanto, para calcular o efeito de segunda ordem, além de se conhecer o TEC, deve-se conhecer o produto  $\|B\|\|\cos \theta\|$  (expressão 32). Esse produto pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$\|B\|\cos\theta = \left| \cos\phi'_m \sin z_m \cos a_m - 2 \sin\phi'_m \cos z_m \right| \left( \frac{R_e}{R_e + h_{ion}} \right) B_{eq} \quad (33)$$

sendo  $\phi'_m$  a latitude geomagnética do ponto ionosférico,  $B_{eq}$  a magnitude da indução geomagnética no equador geomagnético (na superfície terrestre),  $a_m$  o azimute,  $z_m$  o ângulo zenital do satélite no frame de referencia geomagnético,  $h_{ion}$  a altura da camada ionosférica sobre a superfície terrestre,  $R_e$  o raio médio da Terra (geralmente adotado como sendo 6.371 km). A altura da camada ionosférica ( $h_{ion}$ ) geralmente é adotada como sendo igual a 350 km, e a magnitude da indução geomagnética no equador como sendo igual a  $3.12 \times 10^{-5}$  T ( $B_{eq}$ ). Vale salientar que a magnitude do valor da indução geomagnética varia de um valor mínimo de  $2.6 \times 10^{-5}$  T, no ponto ionosférico sobre o equador geomagnético, até um valor máximo de  $5.2 \times 10^{-5}$  T sobre o pólo norte geomagnético, o qual é duas vezes o valor sobre o equador. A figura 35 ilustra esta variação da magnitude da indução geomagnética. No entanto, o valor adotado na expressão 33 é igual a  $3.12 \times 10^{-5}$  T, pois este valor se refere a indução sobre a superfície terrestre no equador geomagnético ( $B_{eq}$ ). Assim, deve ser ressaltado que a figura 35 mostra os valores sobre várias localizações na camada ionosférica.

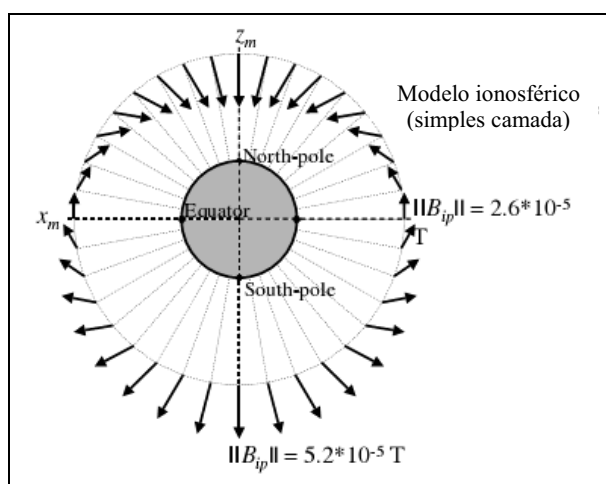


Figura 35 – Vetores de indução geomagnética plotados nas alturas dos pontos ionosféricos.

Fonte: Adaptado de ODIJK (2002).

Com relação ao efeito de terceira ordem, por causa do termo quadrático a integral é difícil de estimar (expressão 30). Uma aproximação para a integral que comparece na expressão (30) pode ser feita da seguinte forma:

$$I^{(3)} \approx \frac{3A^2}{8f^4} \eta N_{e,\max} \int N_e dp = \frac{3A^2}{8f^4} \eta N_{e,\max} \text{TEC}, \quad (34)$$

onde  $\eta = 0,66$ . A seguinte aproximação foi realizada:  $\int N_e^2 dp \approx \eta N_{e,\max} \int N_e dp$ .

Com a aproximação o efeito de terceira ordem, o mesmo também pode ser escrito em função do TEC, da mesma forma que os efeitos de primeira e segunda ordem. No entanto, no efeito de terceira ordem, comparece uma função adicional, dada pela densidade máxima de elétrons ( $N_{e,\text{Max}}$ ).

### 5.2.2 Cintilações de fase e amplitude

Rodrigues (2003) define as cintilações ionosféricas como sendo flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons, e, conseqüentemente, do índice de refração. Nota-se que, de acordo com esta definição, as ocorrências de cintilação ionosférica estão associadas com a existência de irregularidades na densidade de elétrons. Normalmente essas irregularidades que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altura (DAVIES, 1990).

Enfraquecimento na amplitude do sinal, ou cintilação de amplitude do sinal recebido, ocorre devido à irregularidades na densidade de elétrons na ordem de centenas de metros à quilômetros, enquanto que, rápidas mudanças em fase do sinal, que caracteriza a cintilação de fase, ocorrem basicamente devido à rápidas e muito pequenas variações na densidade de elétrons (KLOBUCHAR, 1996).

O processo físico básico do surgimento das irregularidades na ionosfera é referido como Instabilidade de *Rayleigh–Taylor* (FINN e KNIGHT, 1996). Este processo tem início após o pôr do Sol, onde a densidade do plasma nas regiões mais baixas da ionosfera decresce com a recombinação dos íons. Ao mesmo tempo, há um movimento ascendente para as camadas superiores, como resultado de forças eletromagnéticas. Isto faz com que os gradientes da densidade no plasma fiquem maiores, que por sua vez conduz à formação de irregularidades que aumentam de uma maneira instável. Nas regiões onde as latitudes geomagnéticas variam de  $\pm 30$  até  $\pm 60$  graus (latitudes médias), esses efeitos são geralmente negligenciáveis. Entretanto, nas

regiões de alta e baixa latitude, os efeitos da cintilação ionosférica podem causar sérios problemas na propagação de sinais de radiofrequência (RF), em particular, após algumas horas do pôr do Sol.

De acordo com Skone (1998), as causas de ocorrência de cintilação nas regiões de altas latitudes (região auroral) e de baixas latitudes são distintas. Isto se torna evidente, uma vez que na literatura são mencionados os termos cintilação equatorial e cintilação auroral. A cintilação auroral resulta, principalmente, de sub-tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas, onde elétrons energizados se precipitam nas altitudes de 100 à 150 km, resultando em emissões ópticas (*Northern Lights*). Intensificações aurorais podem ocorrer em escalas da ordem de 15 minutos, e, para eventos intensos, múltiplas intensificações podem ocorrer num período de horas. O oval auroral pode se expandir vários graus em direção ao equador durante eventos de sub-tempestades (por exemplo, no norte da Europa e Estados Unidos), e a magnitude e frequência das sub-tempestades são funções do ciclo solar. Assim, pode-se verificar que a ocorrência de cintilação será função da intensidade das sub-tempestades.

Como mencionado por Skone (1998), o oval auroral pode se expandir para o norte da Europa e EUA. De acordo com o mapa apresentado na figura 27, verifica-se que boa parte do norte dos EUA e Europa fazem parte da latitude média. Com isso, a ocorrência de cintilação nas médias latitudes está associada com eventos que ocorrem nas altas latitudes, que podem se expandir para as regiões de médias latitudes. O mesmo pode-se dizer da expansão de efeitos da região equatorial em direção à região de altas latitudes. Uma característica da ionosfera equatorial é a anomalia equatorial ou anomalia de Appleton, já descrita no tópico 4.4.4.3.1. Em períodos de máxima atividade solar a anomalia pode atingir um segundo pico próximo das 21:00 HL, com isso, pode aumentar a ocorrência de bolhas ionosféricas, resultando em aumento da ocorrência da cintilação ionosférica. A figura 36 ilustra a distribuição global da ocorrência de cintilação ionosférica (BASU et al., 1998 apud DAVIES, 1990).

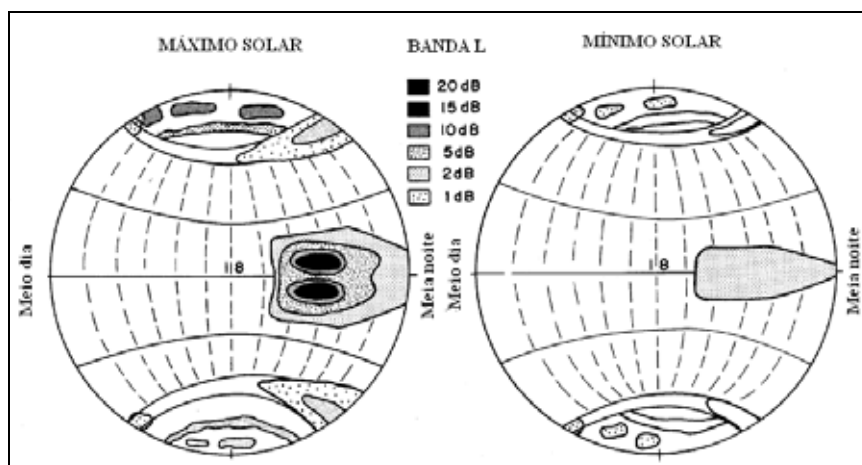


Figura 36 – Mapa global da ocorrência da cintilação ionosférica.  
 Fonte: Adaptada de Basu et al. (1988) apud Davies (1990).

De acordo com a figura 36 verifica-se a forte dependência da ocorrência da cintilação ionosférica da atividade solar, da HL e da latitude. É notado claramente que no período de mínima atividade solar seus efeitos são minimizados de forma significativa. Percebe-se também que na região equatorial e de altas latitudes ocorrem os maiores efeitos de cintilação, no entanto, na região equatorial, no qual se localiza o Brasil, os efeitos são maiores ainda. Por exemplo, nesta região pode ocorrer um enfraquecimento da ordem de 20 dB, em períodos de máxima atividade solar.

Verifica-se também que praticamente não ocorre cintilação nas regiões de médias latitudes, no qual a ionosfera se comporta de maneira mais previsível. Como já mencionado, nas regiões de latitudes médias podem ocorrer efeitos de cintilação, no entanto são decorrentes de efeitos que são expandidos das regiões polares ou equatoriais. No entanto, nessa região a ocorrência de cintilação é extremamente rara (ODIJK, 2002).

Em suma, cintilações que ocorrem nas regiões de altas latitudes (região auroral) e na região equatorial surgem de distintos fenômenos físicos. Na região auroral, a ocorrência da cintilação é devida às tempestades geomagnéticas. No caso da região equatorial, a cintilação está relacionada mais diretamente com a anomalia equatorial, e principalmente com as bolhas ionosféricas.

Cintilação ionosférica tem o potencial de afetar todos os serviços GPS, incluindo os Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) e Serviço de Posicionamento Preciso (PPS), no

rastreamento dos receptores de simples e dupla frequência, tanto no posicionamento por ponto como no relativo (FU et al., 1999).

Irregularidades do *spread f* equatorial são caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas. Essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação trans-ionosféricos e nos sinais de navegação, tais como GPS (SAHAI, FAGUNDES e BITTENCOURT, 2000).

De acordo com Santana et al., 1999 apud Soares, 2001, as bolhas ionosféricas são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida. Estendem-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético, alcançando extensões de 10000 km e cerca de 150 km a 300 km na direção perpendicular se estabelecendo na alta ionosfera. Ocorrem sempre após o por do Sol e principalmente no período noturno até a meia noite, não obstante durante algumas fases do ano aparecem durante a noite toda até o amanhecer. A figura 37 mostra um esquema didático da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.

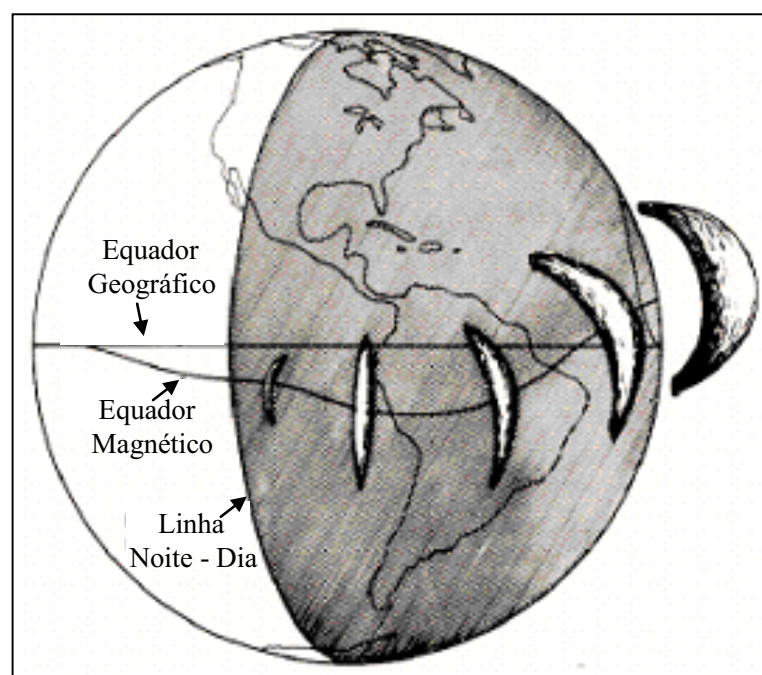


Figura 37 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.  
Fonte: Santana et al., 1999 apud Soares (2001).

No Brasil, as bolhas ionosféricas geralmente ocorrem entre os meses de outubro a março e variam de características com o ciclo de atividade solar. A figura 38 mostra a variação sazonal da ocorrência das bolhas de plasma, observadas durante alta atividade solar (AAS) e baixa atividade solar (BAS), no Brasil, Cachoeira Paulista (SAHAI, FAGUNDES e BITTENCOURT, 2000).

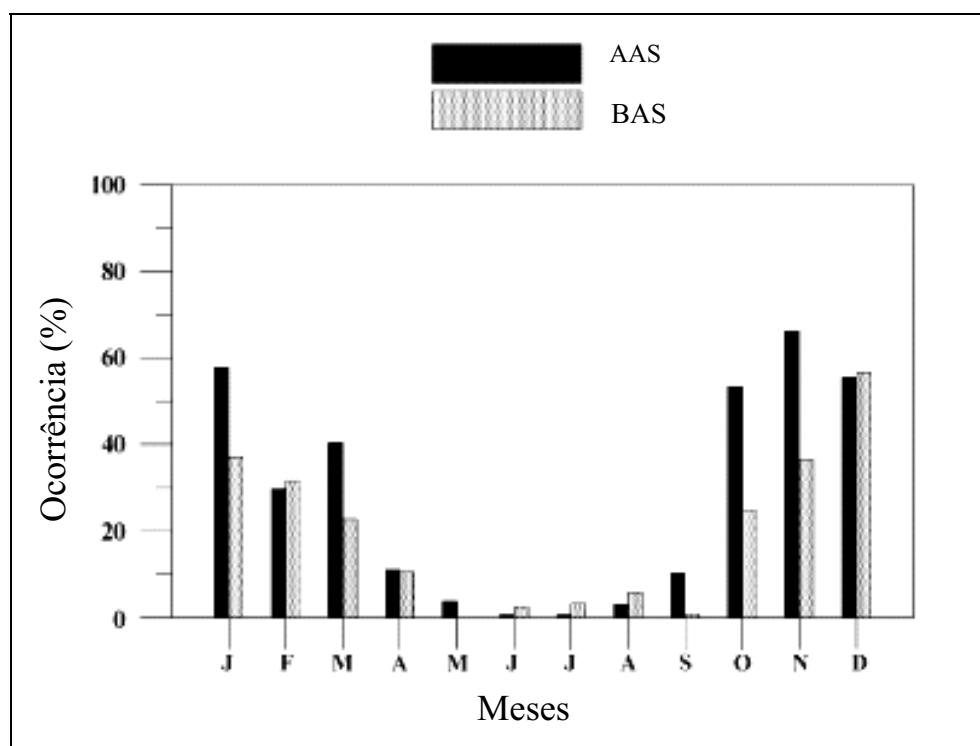


Figura 38 – Variação sazonal da ocorrência de bolhas de plasma.  
Fonte: Sahai, Fagundes e Bittencourt (2000).

As bolhas ionosféricas interferem na propagação de ondas eletromagnéticas devido à alta variação na densidade do plasma ionosférico nas bordas das bolhas. Pois, conforme já mencionado, no interior das bolhas a densidade do plasma é drasticamente reduzida, ao passo que, nas regiões externas às bolhas, existe uma maior concentração do plasma.

### 5.2.3 Outros efeitos ionosféricos

Além dos efeitos já descritos nas seções 5.2.1 e 5.2.2, que incluem os efeitos de primeira, segunda e terceira ordens da ionosfera e os efeitos de cintilação de fase e amplitude, têm-se ainda outros efeitos ionosféricos, tais como: a rotação da polarização do sinal (rotação Faraday), a curvatura ou refração da onda de rádio, a distorção na forma de onda de pulso e deslocamento Doppler (KLOBUCHAR, 1996). A descrição destes erros será baseada em Klobuchar (1996), sendo que todos os erros foram avaliados no GPS. Desta forma, neste tópico será utilizado o termo GPS, ao invés de GNSS.

Quando uma onda de rádio polarizada linearmente atravessa a ionosfera, a onda sofre uma rotação do plano da polarização linear. Este efeito é também conhecido por Rotação *Faraday*. Seu efeito depende da densidade de elétrons da ionosfera e da componente longitudinal do campo magnético da Terra. Muitos pesquisadores utilizaram esse efeito para fazer medidas do TEC da ionosfera, sendo que a partir do efeito de rotação Faraday é possível obter o TEC.

Para navegação por satélite o efeito de rotação da polarização Faraday era um fator limitante do sistema. No entanto, este problema foi superado pelo uso de polarização circular, que é utilizado pelo GPS, no qual os sinais são transmitidos com o uso de polarização circular a direita. A figura 39 ilustra os conceitos de polarização linear e circular a direita. Se a onda não fosse polarizada, da mesma forma que a luz natural, ela oscilaria em todas as direções (ODIJK, 2002). Assim, para uso na navegação por satélite, os sinais de ondas eletromagnéticas devem ser polarizados, sendo que há vários tipos de polarização: linear, circular, elíptica, etc. Na polarização linear, a direção do campo elétrico é constante no tempo, variando somente em amplitude. Como já mencionado, a polarização do GPS é circular a direita. Nesse caso, o campo elétrico forma um movimento na forma espiral no espaço, como mostra a figura 39.

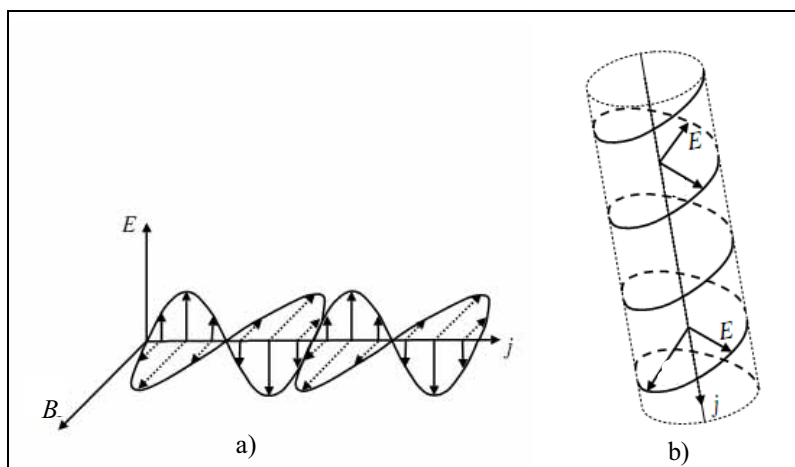


Figura 39 – Ilustração de onda polarizada linearmente (a) e circularmente à direita (b).  
 Fonte: Adaptado de ODIJK (2002).

Na figura 39 E representa o campo elétrico e B o campo magnético, e j o vetor da direção de propagação.

O índice de refração da ionosfera terrestre é responsável pela curvatura da onda de rádio, também conhecido como refração da onda de rádio. O sinal faz uma trajetória maior do que deveria fazer em linha reta entre o satélite e receptor, justamente devido à densidade de elétrons da ionosfera. Este efeito produz um ângulo de elevação aparente maior do que a elevação geométrica (em linha reta). Alguns pesquisadores relacionaram a refração com a curvatura angular resultante. Assim, os resultados são apresentados em segundos de arcos. Valores típicos do erro de refração para as portadoras L1 e L2, para valores do TEC de  $10^{18}$  el/m<sup>2</sup>, são mostrados na figura 40.

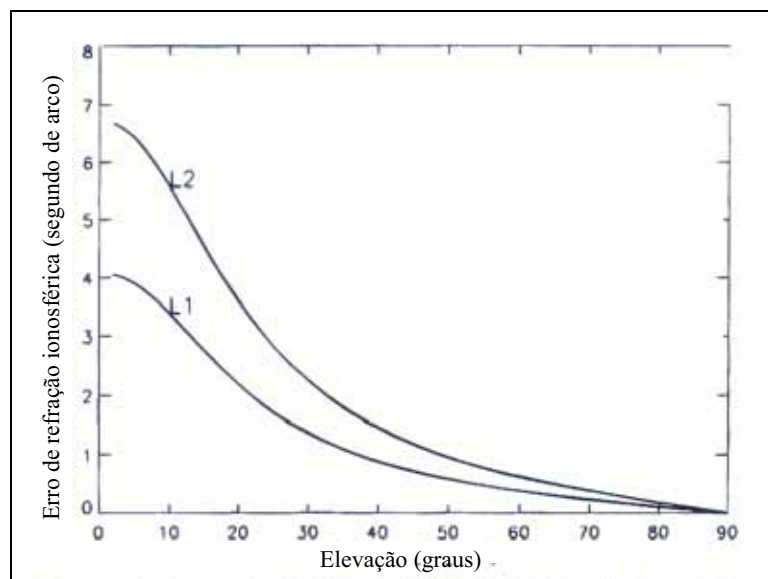


Figura 40 – Refração ionosférica em função do ângulo de elevação para as portadoras L1 e L2.  
Fonte: Adaptado de Klobuchar (1996).

Vale salientar que, normalmente, para usuários GPS, a pequena curvatura de ondas de rádio não é um problema, desde que sejam evitados ângulos de elevação menores do que 10 graus, o que ocorre na prática com o GPS. Além disso, para a portadora L1, que é a observável mais utilizada, o erro é menor do que a portadora L2, ficando bem próximo dos valores da portadora L2 para satélites próximos do zênite, sendo para este caso os erros de refração são praticamente desprezíveis.

A ionosfera pode também produzir distorção de pulsos de energia (distorção na forma de onda de pulsos), e está associado com o espalhamento espectral (*spread spectrum*), que se trata de uma técnica para transmitir dados GPS. Os espalhamentos espectrais dos sinais GPS têm larguras de banda de aproximadamente 2 MHz e 20 MHz para os códigos C/A e P, respectivamente, como mostra a figura 41 (SPILKER JR, 1996).

Esta técnica consiste na modulação de um sinal a ser transmitido com um código pseudo-aleatório, gerando um sinal que é espalhado numa faixa de frequência muito maior que a banda requerida. Assim, verifica-se que no domínio da frequência os sinais de rádio navegação são caracterizados por um espalhamento do espectro. Sistema de espalhamento do espectro é normalmente usado para comunicações, pois são mais resistentes a interferências (WELLS, 1987).

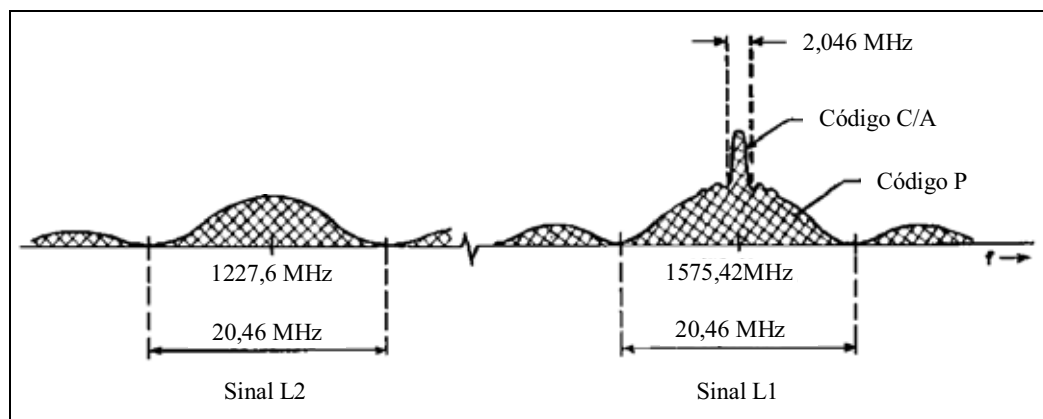


Figura 41 – Ilustração do espalhamento dos sinais GPS (espalhamento do sinal).  
Fonte: Spilker Jr. (1996).

Em suma, o efeito ionosférico relacionado com a distorção de pulsos de energia está associado com a dispersão do espalhamento do espectro dos sinais GPS, mas seu efeito é muito pequeno, para larguras de banda de 20 MHz, podendo ser ignorada. O termo dispersivo para distorção do pulso é diretamente proporcional ao TEC.

Outro efeito causado pela ionosfera nos sinais GPS é o deslocamento Doppler ionosférico, que ocorre devido à variação do TEC. Este deslocamento de frequência é geralmente pequeno se comparado com o deslocamento Doppler de frequência padrão. No limite de taxa de variação do TEC, para um usuário estático, é aproximadamente  $0,1 \times 10^{16}$  el/m<sup>2</sup> por segundo. Este valor proporciona um deslocamento de frequência de 0,085 Hz na portadora L1, no qual não é significativo com o uso de receptores GPS (KLOBUCHAR, 1996).

Obviamente que de todos os efeitos ionosféricos descritos, os maiores são: atraso da modulação, avanço da fase e cintilações de fase e amplitude. Para a maioria das aplicações GPS, já é suficiente considerar os efeitos de atraso do código e avanço da fase dos sinais. No entanto, efeitos de cintilação podem proporcionar fortes efeitos em várias aplicações, como por exemplo, na navegação, visto que devido aos seus efeitos pode ocorrer até mesmo a perda de sinal. Os outros efeitos ionosféricos podem ser negligenciados, para a grande maioria das aplicações. No entanto, como os efeitos ionosféricos são altamente variáveis, eles devem ser sempre considerados no PRGNSS, principalmente em períodos de variações do clima espacial e em linhas de base médias e longas. Nestas condições as observações de DD podem ser fortemente contaminadas por efeitos da ionosfera.

### 5.3 Influência da Ionosfera na Formação das Duplas Diferenças

Em Dal Poz (2005) foram apontados alguns aspectos relevantes sobre a influência da ionosfera no PRGNSS. Foi focada principalmente a influência da ionosfera na definição do comprimento da linha de base, e as consequências na elaboração de normas de levantamento com GNSS. Em contrapartida, não foi apontado nenhum aspecto com relação à influência da ionosfera na formação da DD considerando a direção entre os satélites que formam as DD. Além disso, foram realizados experimentos apenas com dados da região brasileira.

Os pares de satélites que formam as DD com dois receptores podem estar se deslocando no sentido leste-oeste, norte-sul ou em uma direção intermediária. Com isso, variações da ionosfera podem ser significativas na formação da DD dependendo da direção em que os pares de satélites estão se deslocando. Isto pode causar impactos no PRGNSS, principalmente em períodos de irregularidades e fortes variações ionosféricas, que normalmente ocorrem durante tempestades geomagnéticas.

Para ilustrar o problema, considere como exemplo a figura 42, que mostra o caso em que é formada uma única DD, formado pelos satélites p e q e pelos receptores i e j. No caso em que a ionosfera não esteja apresentando alta variação no momento de formação da simples diferença entre os receptores i e j e o satélite p ( $SD_{ij}^p$ ), a linha de base formada estará eivada de um valor muito pequeno do resíduo ionosférico remanescente. Isso será válido também no caso da formação da simples diferença entre os mesmos receptores com o satélite q ( $SD_{ij}^q$ ). Consequentemente, ao formar a DD, que é a diferença entre as duas simples diferenças, será formada uma equação da DD contaminada com baixo valor do resíduo ionosférico.

No entanto, a situação se inverte quando ocorre alta variação da ionosfera no momento da coleta dos dados. Neste caso, a simples diferença  $SD_{ij}^p$  pode apresentar um resíduo ionosférico significativamente diferente da simples diferença  $SD_{ij}^q$ . Nestas condições, ao formar a DD na mesma época, ocorrerá um alto valor do resíduo ionosférico da DD.

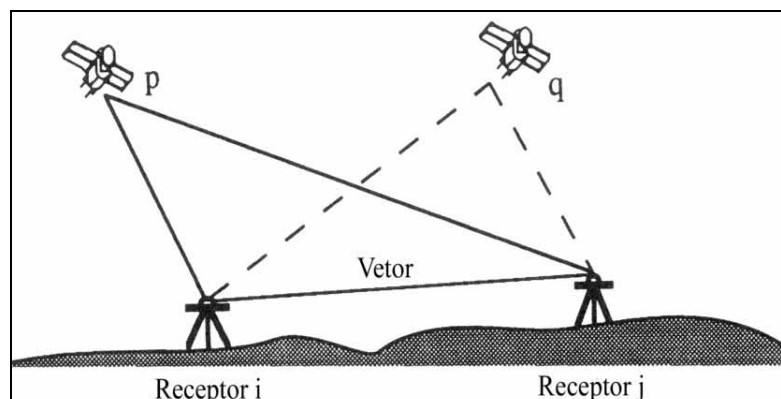


Figura 42 – Formação da dupla diferença.  
 Fonte: Adaptada de Leick (1995).

Diante do exposto, verifica-se que quanto menor a variação da ionosfera no momento de coleta dos dados se espera obter melhores resultados no PRGNSS, proporcionando resultados mais precisos e acurados. Este é o motivo pelo qual a ionosfera tem um papel decisivo no nível de precisão e acurácia no PRGNSS. Assim, da mesma forma que a ionosfera varia em função de vários fatores, tais como HL, variação sazonal, localização do usuário, ciclo solar e atividade geomagnética, o nível de precisão e acurácia no PRGNSS também dependerá desses fatores, que dependem fundamentalmente do Sol, que por sua vez controla o clima espacial.

Em suma, o efeito ionosférico na DD pode comprometer o nível de acurácia e precisão do PRGNSS, não somente em função do comprimento da linha de base, mas também em função da localização da linha de base. Os efeitos das tempestades geomagnéticas podem ser maiores em linhas de base menores, do que com relação a linhas de base maiores.

Variações da ionosfera podem ocorrer nas direções horizontal e vertical. No sentido horizontal pode haver fortes variações na ionosfera nos sentidos norte-sul e leste-oeste. Variação na ionosfera na direção norte-sul pode ser decorrente, por exemplo, devido a alta quantidade de elétrons na região equatorial e a mais baixa quantidade de elétrons na região de médias latitudes. A variação diurna da ionosfera é responsável pela variação da ionosfera no sentido leste-oeste. Neste caso, podem ocorrer altas variações da ionosfera, no caso em que o receptor coleta dados GNSS próximo do terminadouro (linha de transição noite-dia), principalmente em períodos de tempestades. Variações da ionosfera no sentido vertical estão relacionadas com a variação do pico da camada F2.

Outra questão importante se refere as regiões de latitudes altas, visto que em períodos de altas variações do clima espacial pode fazer com que o oval auroral seja expandido para o lado não iluminado pelo Sol. Com isso, pode ocorrer o caso em que os sinais dos satélites, enquanto se deslocam, atravessem o oval auroral, podendo implicar em fortes variações ionosféricas. Verifica-se, desta forma, a quantidade de variáveis relacionada com os efeitos ionosféricos no PRGNSS.

É bem conhecido que no método de PRGNSS, por intermédio das DD, os erros dos relógios dos satélites e receptores são minimizados, além da minimização dos efeitos atmosféricos (troposfera e ionosfera), desde que os mesmos estejam correlacionados espacialmente. Estes são os motivos pelo qual a DD é amplamente utilizada no processamento dos dados GNSS. Os efeitos sistemáticos não modelados remanescentes nas DD ficam implícitos nos resíduos do modelo.

Em contrapartida, o uso da DD no PRGNSS tem algumas desvantagens. Os erros não correlacionados espacialmente, tais como ruído do receptor e multicaminho, são amplificados por um fator de 2, quando comparados com as observações originais. Além disso, sempre há perda de informações quando se utiliza as equações de DD, ao contrário do posicionamento por ponto.

Mesmo diante das desvantagens das equações das DD, o seu uso ainda é o normalmente aplicado nos processamentos de dados GNSS envolvendo a fase da onda portadora. Contudo, diante do exposto, deve-se ter cuidados com a utilização de dados GNSS eivados de efeitos de tempestades.

## 6 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

*“A análise indutiva é necessária como condição, não é suficiente como causa”*

*Huberto Rohden*

### 6.1 Considerações Iniciais

Com o objetivo de analisar a influência da ionosfera no PRGNSS nas três regiões ionosféricas, foram realizados dois experimentos. No primeiro experimento foram analisados os efeitos do clima espacial no PRGNSS. Neste experimento foram utilizados dados das redes ativas CSRS, CORS e EUREF, compreendendo dados GNSS eivados pelos efeitos de tempestades geomagnéticas, abrangendo as regiões de latitude alta e média, no hemisfério norte. O segundo experimento consistiu em uma análise diária e sazonal da influencia da ionosfera, com dados GNSS coletados na região brasileira, correspondente a região equatorial. É importante destacar que neste experimento a análise dos efeitos ionosféricos será realizada focando a variação diária e sazonal em função do comprimento da linha de base, que variou de 30 a 120 km, formando seis linhas de base.

Devido ao baixo número de estações da RBMC, comparado com as redes CORS e EUREF, por exemplo, não foram realizados experimentos com dados GNSS eivados de efeitos de tempestades geomagnéticas. Na época da tempestade analisada nesta pesquisa (2006) a menor distância da linha de base era de aproximadamente 430 km, formada pelas estações UEPP (Presidente Prudente/SP) e PARA (Curitiba/PR). Não se trata do usual, no que concerne ao usuário, que normalmente processa dados GNSS de linhas de base com comprimentos significativamente menores. Adicionalmente, em linhas de base longas, já é bem conhecido pela comunidade científica os prováveis efeitos da ionosfera, bem como efeitos de órbita, que passam a ser de fundamental importância com relação a essas linhas de base, além dos efeitos da troposfera. A partir de 2007 teve início o processo de modernização e expansão da RBMC, sendo que a partir de então não houve nenhuma tempestade geomagnética intensa ( $Dst < -100$  nT).

Nos dois experimentos foram utilizados os Resíduos Preditos da Dupla Diferença da Fase da Onda Portadora (RPDDF), fornecidos pelo programa de processamento de dados GPS denominado GPSeq. Este programa foi desenvolvido por Monico et al. (2008), nas linguagens

FORTRAN 77, C (VISUAL C) e C++ Builder. As linguagens são integradas através do uso DLLs (*Dynamic Link Libraries*). Além dos RPDDF, foram calculadas as discrepâncias entre as coordenadas estimadas com as coordenadas de referência. O uso dos RPDDF em conjunto com as discrepâncias calculadas foi de extrema importância para o entendimento detalhado dos efeitos ionosféricos no PRGNSS. Foi possível avaliar os efeitos de tempestades geomagnéticas em cada uma das DD formadas.

O GPSeq realiza um ajustamento recursivo (processamento época por época) utilizando como observações as dupla diferenças da fase de batimento da onda portadora (L1) e da pseudodistância a partir do código C/A. As DD são implementadas através da técnica denominada de satélite base, onde combinam-se as observações oriundas de um dos satélites rastreados, o base, com as observações dos demais satélites. No entanto, se ocorrer, por algum motivo, a perda do sinal do satélite base, não será possível calcular as DD. Verifica-se, portanto, que para utilização do programa o usuário deve ter razoável conhecimento sobre o PRGNSS.

Uma recomendação importante consiste na sua utilização em linhas de base de até aproximadamente 20 km, dependendo da atividade ionosférica. Visto que o objetivo desta pesquisa consiste na análise dos efeitos da ionosfera no PRGNSS, este programa se mostrou adequado para estudos desta natureza, pois para linhas de base médias ou longas os efeitos da ionosfera se tornam dominantes nos RPDDF. Além disso, em linhas de base curtas (~ 20 km), os efeitos da ionosfera também podem ser dominantes nos RPDDF, porém em períodos de tempestades geomagnéticas.

O GPSeq tem implementado, no que se refere ao controle de qualidade, o procedimento DIA (Detecção, Identificação e Adaptação). Neste procedimento, para testar as hipóteses globais do modelo utiliza-se a estatística denominada GOM (*Global Overall Model*) (TEUNISSEN, 1998). Detalhes sobre os modelos estocástico e funcional utilizados pelo GPSeq podem ser encontrados em Monico et al. (2008).

Outro programa que foi importante na análise dos resultados foi o SkyLab, versão 2.0 (JOOSTEN, 2000). Sua utilização, em conjunto com a análise dos RPDDF foi muito importante para as análises do primeiro experimento, pois foi possível avaliar o impacto de tempestades geomagnéticas nas DD em função da direção. O SkyLab foi desenvolvido no Departamento de Geodésia Matemática e Posicionamento, na Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda. Inicialmente o programa foi implementado em linguagem Fortran, e depois em Matlab. Detalhes

sobre o programa e sobre seu desenvolvimento podem ser obtidos em Joosten (2000). O programa permite calcular o *skyplot* e o rastro dos satélites (*plot satellite tracks*). Assim, foi possível realizar algumas análises com relação aos efeitos ionosféricos no PRGNSS em função da direção dos pares de satélites que formam as DD.

É importante destacar algumas dificuldades encontradas com relação ao primeiro experimento. Mesmo com o enorme número de estações das redes ativas internacionais, houve muita dificuldade para a escolha das estações. A maioria das estações GNSS das redes ativas são recentes, correspondentes a períodos próximos de mínima atividade solar, sem a ocorrência de tempestades significativas. Além disso, no caso das estações mais antigas, as distâncias entre elas são muito longas. Normalmente é isto que ocorre, visto que primeiramente, no início da implantação das estações das redes, há uma preocupação em não concentrar as estações em uma área isolada, caso contrário a rede fica heterogênea. Somente após algum tempo, com a densificação das redes, que ocorre de forma contínua, é possível formar, a partir de várias estações, linhas de base curtas ou médias. Isto começou a ocorrer a partir de 2008, onde foi verificado um significativo aumento do número de estações até os dias atuais. Contudo, neste período não ocorreu nenhuma tempestade significativa.

Outro problema comum foi encontrar pares de estações que formam linhas de base curtas ou médias e não ser possível processar os dados. Mesmo com a utilização do TEQC (*Translate Edit Quality Check*) na edição dos dados não foi possível aproveitá-los. Isto ocorreu com frequência com os dados das redes CORS e EUREF.

## 6.2 Primeiro Experimento

Neste experimento o objetivo é avaliar os efeitos de tempestade geomagnética no PRGNSS nas regiões ionosféricas de latitude alta e média. Para isto serão utilizados dados das redes CSRS, EUREF e CORS, de forma a abranger as duas regiões ionosféricas. Diante das dificuldades expostas no tópico anterior, a solução encontrada foi utilizar dados eivados pelos efeitos da tempestade geomagnética ocorrida no dia 15/12/2006, que é a última tempestade significativa que ocorreu nos últimos anos. Vale salientar que neste ano a atividade solar era moderada, como mostra a figura 13. No entanto, de acordo com o índice Dst, esta tempestade é classificada como intensa, sendo que atingiu o valor de -135 nT no período da tempestade analisada (00:00 – 02:00 TU).

No dia 13/12/2006, as 02:40 TU, a mancha solar 930 (figura 43), desencadeou uma grande explosão solar, classificada como X. As explosões são classificadas em função do brilho liberado em raios-X no comprimento de onda de 1 a 8 Angstroms (SPACEWEATHER, 2010). A categoria X considera a explosão como sendo grande (*big*), alterando o clima espacial de forma significativa, podendo até causar blecaute (*blackout*) nas ondas de rádio. É interessante notar, de acordo com a figura 43, a imensidão da mancha solar, comparada com a Terra em escala.

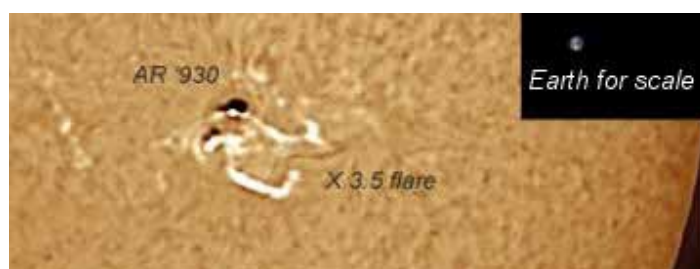


Figura 43 – Mancha solar 930.  
Fonte: spaceweather.com.

A explosão solar ocorrida no dia 13/12/2006, lançou uma ejeção de massa coronal em direção a Terra. No dia da explosão a velocidade do vento solar atingiu aproximadamente 845 km/s. É importante destacar que este fenômeno é ilustrado na figura 26, que mostra a sequência de eventos que ocorre após uma grande explosão solar. No dia 14/12/2006 a componente nortesul do IMF já havia se direcionado para o sul, favorecendo assim, a penetração de campos elétricos, desestabilizando a atividade auroral (NOGUEIRA, 2009). Em suma, quando o IMF se inverte para o sul, ocorre a injeção de plasma na magnetosfera interna, desencadeando as irregularidades ionosféricas, que ocorrem na fase principal da tempestade (ver tópico 4.4.3.1.1).

O índice Dst diminuiu significativamente no início do dia 15/12/2006, variando de -45 nT, a 00:00 TU, até -135 nT, as 02:00 TU (KYOTO, 2010). Escolheu-se, desta forma, este período para a análise dos resultados, que corresponde a fase principal da tempestade. Verifica-se que desde a explosão que ocorreu as 02:40 TU do dia 13/12/2006, que foi responsável pela alteração do clima espacial, foi necessário menos de 48 horas para ocorrer a tempestade geomagnética, de acordo com o índice Dst. A figura 26c ilustra a sequência de eventos em que uma nuvem de explosão (massa coronal) e a onda de impacto atingem a Terra. Este intervalo de tempo pode variar de 1 a 3 dias. No caso da explosão solar ocorrida no dia 15/12/2006 o intervalo de tempo foi menor do que dois dias. Obviamente que este intervalo de tempo é variável, em

função de vários fatores, tais como: nível de atividade solar, direção da ejeção de massa coronal, categoria da explosão solar, entre outros fatores.

### 6.2.1 Resultados e análise

Serão analisados os efeitos da tempestade ocorrida no dia 15/12/2006 em seis linhas de base, nas regiões de latitudes alta e média. A primeira linha de base analisada é de 20 km, formada pelas estações CAGS\_NRC1, da rede CSRS. Sempre será adotada como sendo a estação base a primeira sigla da estação, que neste exemplo é CAGS. Assim, as discrepâncias calculadas serão referentes à estação NRC1. As duas estações estão localizadas na região ionosférica de latitude alta ( $\sim 55,84^{\circ}$  de latitude geomagnética), no Canadá.

O receptor da estação NRC1 é um AOA BenchMark SNR-12, enquanto o receptor da estação CAGS é um ASHTECH Z-XII3. O processamento dos dados foi realizado durante o intervalo das 00:00 – 02:00 TU, para os dias 14, 15 e 16 de dezembro de 2006. Desta forma, a geometria foi mantida de forma aproximada para os três dias, fazendo com que o efeito da tempestade geomagnética seja dominante nos RPDDF. Em todos os processamentos foram utilizados dados da portadora L1 e para o cálculo das coordenadas dos satélites foram utilizadas as efemérides precisas. Para a correção do erro da troposfera o programa faz uso do modelo de Hopfield. O intervalo de gravação das observações GNSS é de 30 segundos. Desta forma, para o período da tempestade analisada, que corresponde a 2 horas, tem-se 240 instantes. A figura 44 ilustra os RPDDF (em metros) calculados para os dias 14/12/2006 (44a), 15/12/2006 (44b) e 16/12/2006 (44c).

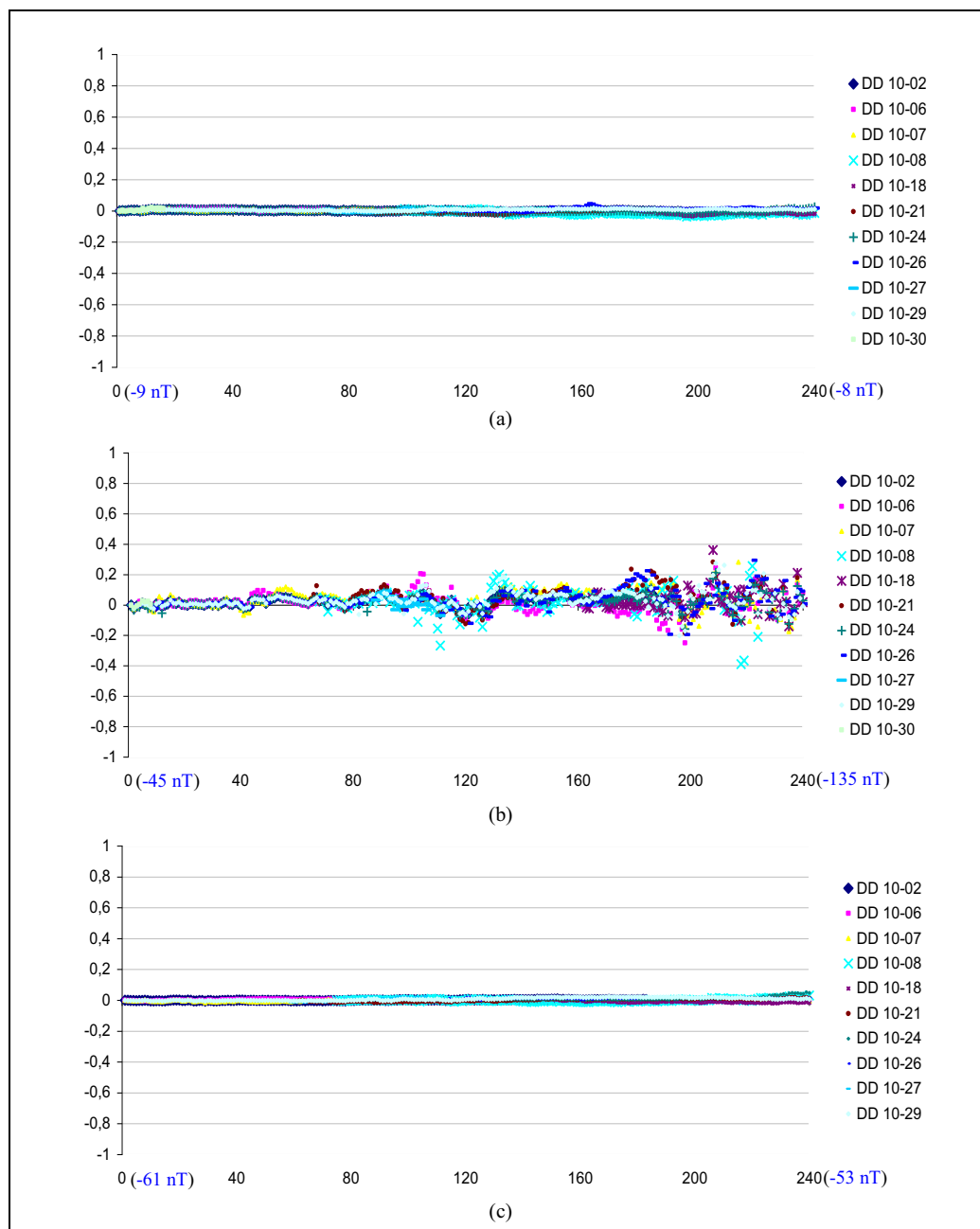


Figura 44 – RPDDF referentes à linha de base CAGS\_NRC1.

Na figura 44 também são mostrados os valores dos índices Dst durante o intervalo de processamento. Como o período de processamento foi de duas horas, e o índice Dst é calculado com intervalo de uma hora, são mostrados os dois valores do índice (em azul), sendo um no início do processamento (00:00 TU), e outro no final (02:00).

Diante das figuras 44a, 44b e 44c, verifica-se que no período da fase principal da tempestade, os valores dos RPDDF aumentaram para todas as DD. Além disso, percebe-se que os RPDDF se comportam de maneira irregular no período da tempestade, como mostra a figura 44b. A tabela 9 mostra o Desvio-Padrão dos RPDDF (DP\_RPDDF) para todas as DD formadas durante o intervalo de processamento, para os três dias. Para uma melhor avaliação dos desvios seus valores são dados em centímetros.

Tabela 9 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base CAGS\_NRC1.

<b>Dupla Diferença</b>	<b>Desvio Padrão do RPDDF (cm)</b>		
	<b>14/12/2006</b>	<b>15/12/2006</b>	<b>16/12/2006</b>
DD 10-02	0,409	3,112	0,313
DD 10-06	1,172	6,094	0,425
DD 10-07	0,591	6,475	0,607
DD 10-08	1,032	8,723	0,791
DD 10-18	1,132	7,519	0,598
DD 10-21	0,972	7,633	0,871
DD 10-24	0,487	4,534	1,067
DD 10-26	0,869	6,330	0,787
DD 10-27	0,769	3,833	1,063
DD 10-29	0,451	5,934	0,897

Diante da tabela 9, verifica-se que os DP\_RPDDF aumentaram para todas DD. No período da fase principal da tempestade (15/12/2006) todos os DP\_RPDDF são centimétricos, enquanto que antes da tempestade, no dia 14/12/2006 a maioria dos DP\_RPDDF são milimétricos. O mesmo ocorreu na fase de recuperação da tempestade, no dia 16/12/2006. Neste dia, para a maioria dos casos (6) os DP\_RPDDF foram menores do que o dia 14/12/2006, evidenciando a fase de recuperação da tempestade.

Para auxiliar nas análises a figura 45 mostra o rastro dos satélites (45a) e o *skypplot* (45b) que foram calculados para o dia 15/12/2006, referente ao período de análise (00:00 – 02:00 TU). A localização aproximada da região onde estão instalados os dois receptores será sempre indicada com um ponto verde (em função da escala), de acordo com a figura 45a. Deve ser salientado que para uma correta interpretação da figura 45b deve-se estar atento com o sentido do deslocamento do satélite no espaço. Os números que indicam os satélites da constelação GPS na figura 45b fornecem essa orientação. Ele é sempre indicado na figura no início do deslocamento dos satélites. Nestas condições, considera-se que o satélite 10 está se deslocando no sentido oeste

para leste. No caso do satélite 26, considera-se que está se deslocando no sentido de sul para norte, passando do hemisfério sul para o hemisfério norte.

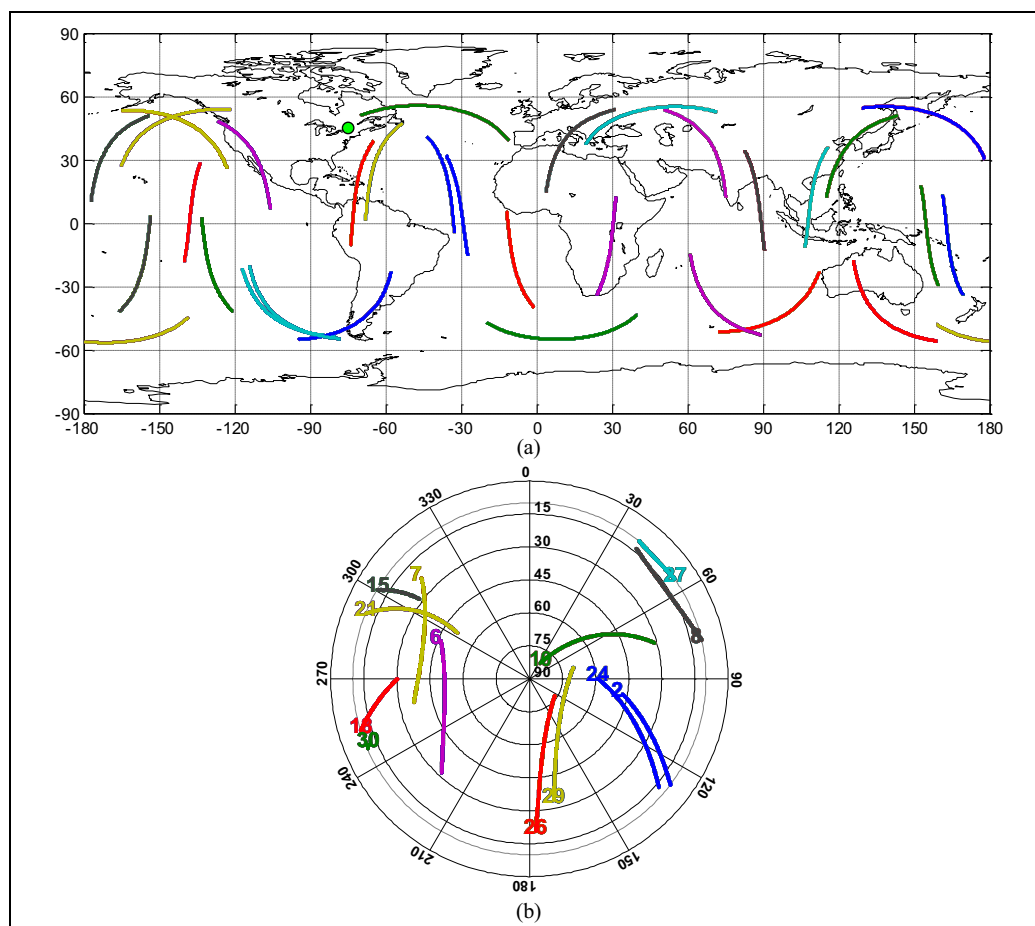


Figura 45 – Rastro dos satélites e *Skyplot* referentes à linha de base CAGS\_NRC1.

De acordo com a figura 45b, verifica-se que satélite 10 apresenta o maior ângulo de elevação ( $\sim 81^\circ$ ) no início do rastreamento dos dados. Por esta razão, este satélite foi escolhido como base. De acordo com a tabela 9, o satélite base formou DD com outros 10 satélites. É interessante destacar que durante a aquisição dos dados GNSS foram rastreados sinais de satélites que estavam deslocando acima do Canadá, por exemplo (satélite base), enquanto outros satélites estavam se deslocando acima do norte da América do Sul (satélites 26 e 29), ou acima da continente Africano (satélite 8) e Europeu (satélite 27). Nesses casos, altos valores de RPDDF podem ocorrer, em função da distância que os pares de satélites mantêm durante o deslocamento no espaço. Com isso, os sinais emitidos pelos satélites podem atravessar a ionosfera em locais de

alta variabilidade na densidade de elétrons. Outro aspecto importante que deve ser salientado diz respeito a direção que os pares de satélites formam durante o rastreo, como descrito no tópico 5.3.

De acordo com a tabela 9, verifica-se que em alguns casos o DP\_RPDDF aumentou cerca de 11 vezes (DD 10-07) e até 13 vezes (DD 10-29). No caso da DD 10-29, no início do processamento, o satélite base (PRN 10) estava se deslocando acima do local de instalação das duas estações (indicado por um ponto verde na figura 45a), com ângulo de elevação de  $81^{\circ}$ . Ao mesmo tempo, o satélite PRN 29 estava se deslocando acima do norte da América do Sul. O aumento da ordem de 13 vezes do DP\_RPDDF da DD 10-29 provavelmente pode ter ocorrido por variações na densidade de elétrons na direção norte-sul, que está diretamente relacionado com a anomalia equatorial, que pode ter sido intensificada no período da fase principal da tempestade, como discutido no tópico 4.4.4.3.1. Altas variações no sentido norte-sul podem ocorrer na região equatorial (SKONE e SHRESTHA, 2002), que podem ser amplificadas pelas tempestades geomagnéticas (FEDRIZZI, 2003). As mesmas considerações podem estar relacionadas com a DD 10-26. Neste caso o aumento do DP\_RPDDF foi da ordem de 7 vezes no período da fase principal da tempestade. No entanto, o valor do DP\_RPDDF foi maior do que a DD 10-29 no mesmo período. No caso do DP\_RPDDF da DD 10-07, prováveis variações no sentido leste-oeste foram aumentadas no período da tempestade, em função da variação diária da ionosfera. Neste caso, enquanto o satélite 10 se deslocava acima da região de instalação das estações GNSS o satélite 07 se deslocava aproximadamente acima do oeste do Canadá.

Com relação à magnitude do desvio, o maior valor foi obtido na DD 10-08. No início do rastreo dos dados GNSS o satélite 10, como já mencionado, estava se deslocando acima do leste do Canadá, e ao mesmo tempo, o satélite 08 estava se deslocando acima do continente africano. Este alto valor provavelmente ocorreu em função da variação diária da ionosfera, que foi acentuada no período da fase principal da tempestade geomagnética.

É importante ser lembrado que o período correspondente a fase principal da tempestade no dia 15/12 é entre 00:00 – 02:00 TU. Neste intervalo a ionosfera acima do continente africano não estava sendo iluminada pelo Sol, ao passo que parte do Canadá estava. Isto provavelmente foi responsável pelo maior valor DP\_RPDDF na DD 10-08. Além disso, há outro fator que pode ter influenciado neste resultado: o oval auroral (figura 28), que pode se expandir para o lado não iluminado pelo Sol em períodos de tempestades, podendo ter aumentado ainda mais a variação

espacial da ionosfera. Diante do exposto, há evidências de haver uma relação importante da influência da ionosfera em função da longitude (ou com o terminadouro) no PRGNSS, em decorrência de perturbações do clima espacial.

O aumento médio dos DP\_RPDDF para todas as DD, no período da tempestade, foi da ordem de 8 vezes. Na fase de recuperação da tempestade, ocorreu uma redução de mesma ordem nos DP\_RPDDF, comparado com a fase principal da tempestade. Assim, verifica-se a evidente influência da alteração das condições do clima espacial no RPDDF, em decorrência da fase principal da tempestade. Contudo, na fase de recuperação, os valores do RPDDF diminuem significativamente. A tabela 10 mostra as discrepâncias obtidas nos três períodos analisados, em altimetria e planimetria, bem como os valores do GOM obtidos no processamento.

Tabela 10 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base CAGS\_NRC1

	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	1,4	-6,5	6,6	-20,4	0,71
15/12/2006	-17,5	24,4	30,0	-52,0	12,74
16/12/2006	-0,1	-1,0	1,0	-11,5	0,55

Verifica-se diante da tabela 10 que houve um aumento nos valores das discrepâncias no período da tempestade, tanto na planimetria como na altimetria, em uma linha de base de apenas 20 km. Na resultante planimétrica o valor da discrepância aumentou cerca de 4 vezes no período da tempestade, enquanto que na altimetria a discrepância aumentou cerca de 2 vezes. No período da tempestade o índice Dst diminuiu significativamente, caracterizando a fase principal da tempestade, que por sua vez foi responsável pelo aumento dos valores das discrepâncias.

Em contrapartida, na fase de recuperação da tempestade, tanto em planimetria como em altimetria os valores das discrepâncias diminuíram, caracterizando a fase de recuperação da tempestade (fase em que o índice Dst começa voltar ao seu valor referente a atividade geomagnética normal). Na resultante planimétrica, no período de recuperação da tempestade, o valor da discrepância reduziu cerca de 30 vezes, enquanto que na altimetria a discrepância reduziu cerca de 4 vezes. Vale destacar que a fase de recuperação ficou extremamente evidenciada nas discrepâncias obtidas, em função da redução dos valores dos RPDDF nesse período, como mostra a figura 44c. Como descrito no tópico 4.4.3.1.1, assim que o IMF enfraquece, ou se inverte novamente para norte, a corrente de anel para de se intensificar e a perturbação na superfície terrestre começa a decrescer. Esta é a fase de recuperação da

tempestade, que ficou evidenciado nos resultados obtidos, mesmo em uma linha de base de apenas 20 km. Vale destacar que as duas estações estão localizadas na região de latitude alta, especificamente na região sub-auroral, como descrito no tópico 4.4.4.2. Esta região está localizada alguns graus ao sul da região auroral. A densidade de elétrons nesta região é bem menor do que a região auroral, no qual pode resultar em altos gradientes do TEC, entre a região auroral e o seu limite com a sub-região auroral. Com isso, mesmo em uma linha de base de apenas 20 km foi verificada a influencia do clima espacial, fazendo com que os valores das discrepâncias aumentassem na fase principal da tempestade, bem como o valor do GOM. De acordo com a tabela 10 verifica-se que o GOM aumentou de 0,71 para 12,74 no período da fase principal da tempestade. Em contrapartida, o GOM diminuiu para 0,55 na fase de recuperação da tempestade. Este valor foi menor do que o valor obtido para o dia 14/12/2006, antes da ocorrência da tempestade.

A segunda linha de base analisada é de 48 km, formada pelas estações ELIZ\_NTKA, também pertencentes a rede CSRS. As duas estações também estão localizadas na região ionosférica de latitude alta ( $\sim 55,4^{\circ}$  de latitude geomagnética), no Canadá. Ambos receptores das estações ELIZ e NTKA são da empresa LEICA, modelo CRS1000. A figura 46 mostra os RPDDF calculados para os dias 14/12/2006 (46a), 15/12/2006 (46b) e 16/12/2006 (46c).

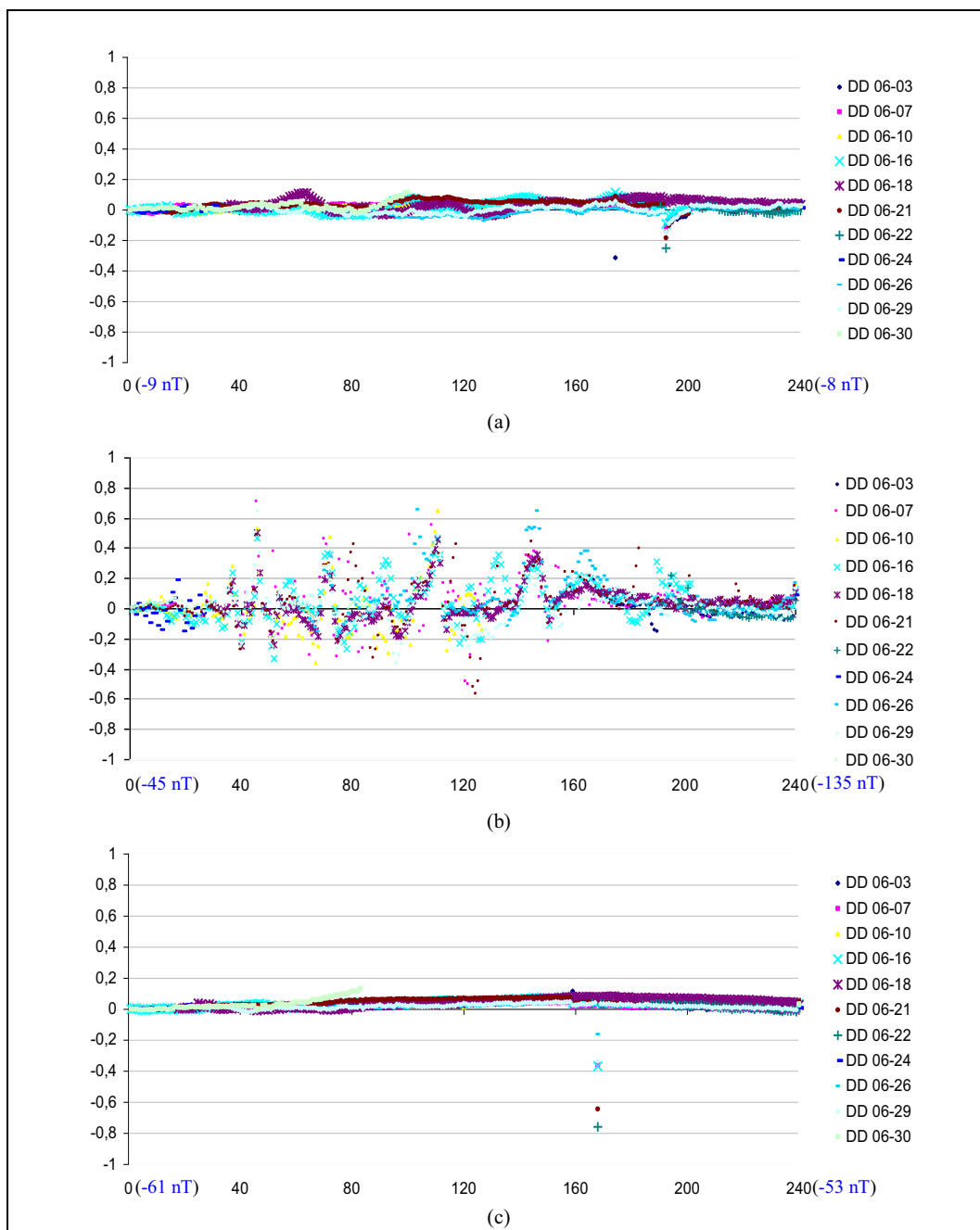
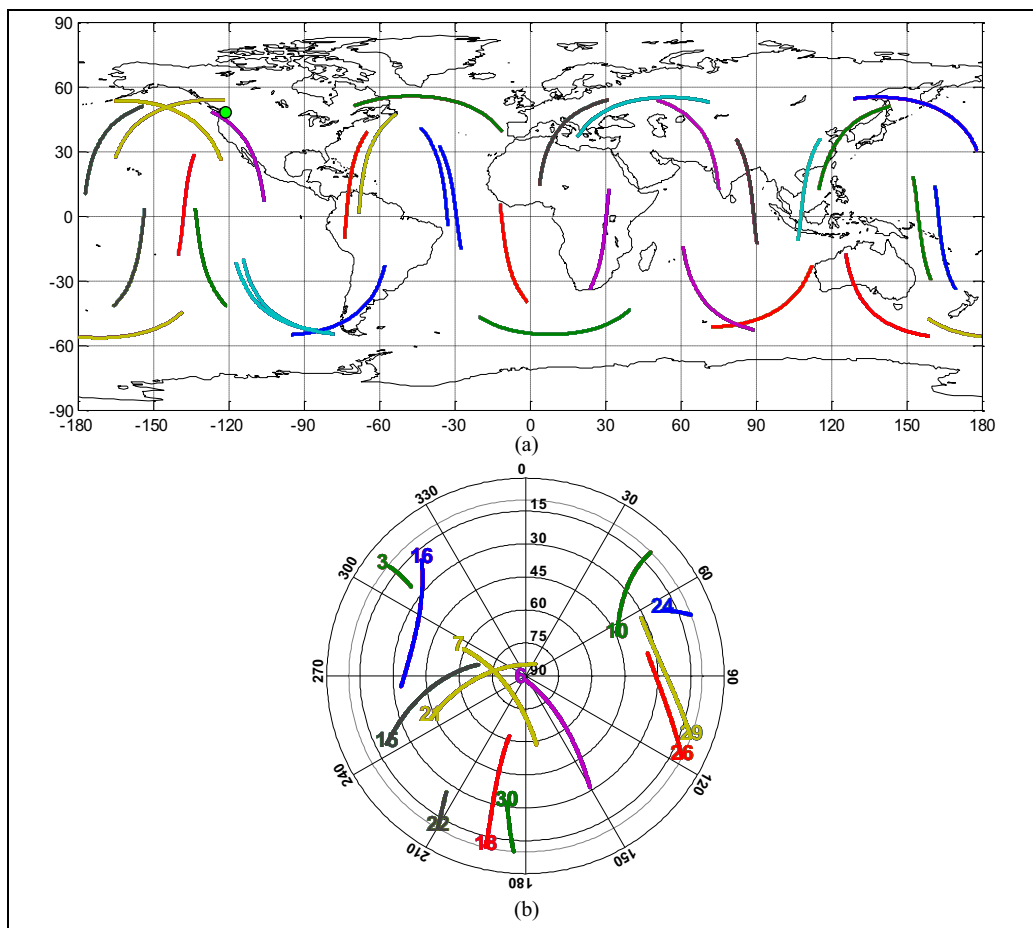


Figura 46 – RPDDF referentes à linha de base ELIZ\_NTKA.

Da mesma forma que a linha de base CAGS\_NRC1, pode-se verificar os efeitos da tempestade geomagnética nos RPDDF; porém, com magnitude maior, em função do aumento do comprimento da linha de base em 28 km. A tabela 11 mostra o desvio-padrão dos RPDDF para todas as DD formadas durante o intervalo de processamento, para os três dias. A figura 47 mostra o rastro dos satélites (47a) e o *skyplot* (47b).

Tabela 11 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base ELIZ NTKA.

Dupla Diferença	Desvio Padrão do RPDDF (cm)		
	14/12/2006	15/12/2006	16/12/2006
DD 06-03	5,499	6,360	2,047
DD 06-07	2,110	14,692	2,873
DD 06-10	1,434	16,964	1,144
DD 06-16	3,237	13,032	3,203
DD 06-18	3,229	11,407	2,548
DD 06-21	3,107	14,950	5,080
DD 06-22	1,483	5,530	1,336
DD 06-24	1,501	8,286	0,765
DD 06-26	2,505	16,248	1,707
DD 06-29	2,642	14,076	2,792
DD 06-30	2,551	10,378	3,243

Figura 47 – Rastro dos satélites e *Skyploot* referentes à linha de base ELIZ\_NTKA.

De acordo com a tabela 11 verifica-se um aumento também significativo no DP\_RPDDF no período da tempestade; porém, não tão significativo como no caso da linha de base CAGS\_NRC1. Em alguns casos na linha de base CAGS\_NRC1, os DP\_RPDDF aumentaram de forma mais significativa do que no caso da linha de base ELIZ\_NTKA, sendo que em dois casos aumentou mais de 10 vezes (aumentou em um caso até 13 vezes), e em muitos casos o aumento foi da ordem de 8 vezes. No caso da linha de base ELIZ\_NTKA o maior aumento no valor do DP\_RPDDF foi de aproximadamente 12 vezes em apenas um caso (DD 06-10), e na maioria dos casos o aumento foi da ordem de 5 vezes ou menos. O aumento médio dos DP\_RPDDF para todas as DD, no período da tempestade, foi de aproximadamente 4 vezes, menor do que a linha de base CAGS\_NRC1, que aumentou em torno de 8 vezes. Na fase de recuperação, a diminuição média dos DP\_RPDDF para todas as DD foi em torno de 5 vezes.

Verifica-se, diante do exposto, um maior aumento médio do DP\_RPDDF no período da fase principal da tempestade na linha de base CAGS\_NRC1, com relação a linha de base ELIZ\_NTKA, que é 28 km maior do que a outra linha de base. Isto provavelmente ocorreu em função da diferença em longitude ( $\sim 45^\circ$ ) da localização dos receptores e do período de processamento dos dados GNSS, que ocorreu entre às 00:00 – 02:00 TU. No caso da linha de base ELIZ\_NTKA, há uma diferença de 8 horas com relação ao TU. Assim, o período de processamento dos dados na linha de base ELIZ\_NTKA foi realizado entre às 16:00 – 18:00 HL. Nesse caso, a maioria dos sinais transmitidos pelos satélites GNSS passaram pela ionosfera na parte iluminada pelo Sol, não proporcionando grandes variações na densidade de elétrons. Contudo, no caso da linha de base CAGS\_NRC1, há uma diferença de 5 horas com relação ao TU. Assim, nesse caso, o período de processamento dos dados foi realizado entre às 19:00 – 21:00 HL. O início do processamento dos dados ocorreu próximo do terminadouro, o que pode ter provocado uma maior variação na densidade de elétrons. Além disso, podem ocorrer várias instabilidades ionosféricas próximo dos terminadores do amanhecer e crepúsculo (SCHUNK e NAGY, 2000).

A tabela 12 mostra as discrepâncias obtidas nos três períodos analisados, em altimetria e planimetria, para a linha de base ELIZ\_NTKA.

Tabela 12 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base ELIZ\_NTKA.

	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	-5,3	-1,5	5,5	-21,5	5,42
15/12/2006	10,4	1,4	10,5	-36,3	62,86
16/12/2006	-2,3	2,7	3,5	-27,7	4,36

De acordo com a tabela 12, no período da fase principal da tempestade, foi verificado um aumento na discrepância planimétrica na ordem de 2 vezes, bem como na altimetria. Na fase de recuperação da tempestade o valor de discrepância diminuiu tanto em planimetria como em altimetria, de forma mais acentuada na resultante planimétrica, que diminuiu em torno de 3 vezes. Interessante verificar que os efeitos da fase principal da tempestade, bem como na fase de recuperação, são mais evidentes na linha de base CAGS\_NRC1, provavelmente em função dos fatores já mencionados. Além disso, o aumento médio do DP\_RPDDF para todas as DD foram maiores na linha de base CAGS\_NRC1 (~ 8 vezes) do que com relação a linha de base ELIZ\_NTKA (~ 4 vezes), ambas na fase principal da tempestade. Nesta fase houve também um aumento significativo do GOM, como mostra a tabela 12. Na fase principal da tempestade o GOM aumentou de 5,42 para 62,86. Em contrapartida, na fase de recuperação da tempestade o GOM diminuiu para 4,36.

A terceira linha de base analisada é de 191 km, formada pelas estações ESCU\_FRDN, também pertencentes a rede CSRS. As duas estações também estão localizadas na região ionosférica de latitude alta (~ 57,68° de latitude geomagnética), no Canadá. O receptor da estação ESCU é um ASHTECH UZ-12, enquanto que o receptor da estação FRDN é um AOA SNT-12 ACT. A figura 48 mostra os RPDDF calculados para os dias 14/12/2006 (48a), 15/12/2006 (48b) e 16/12/2006 (48c).

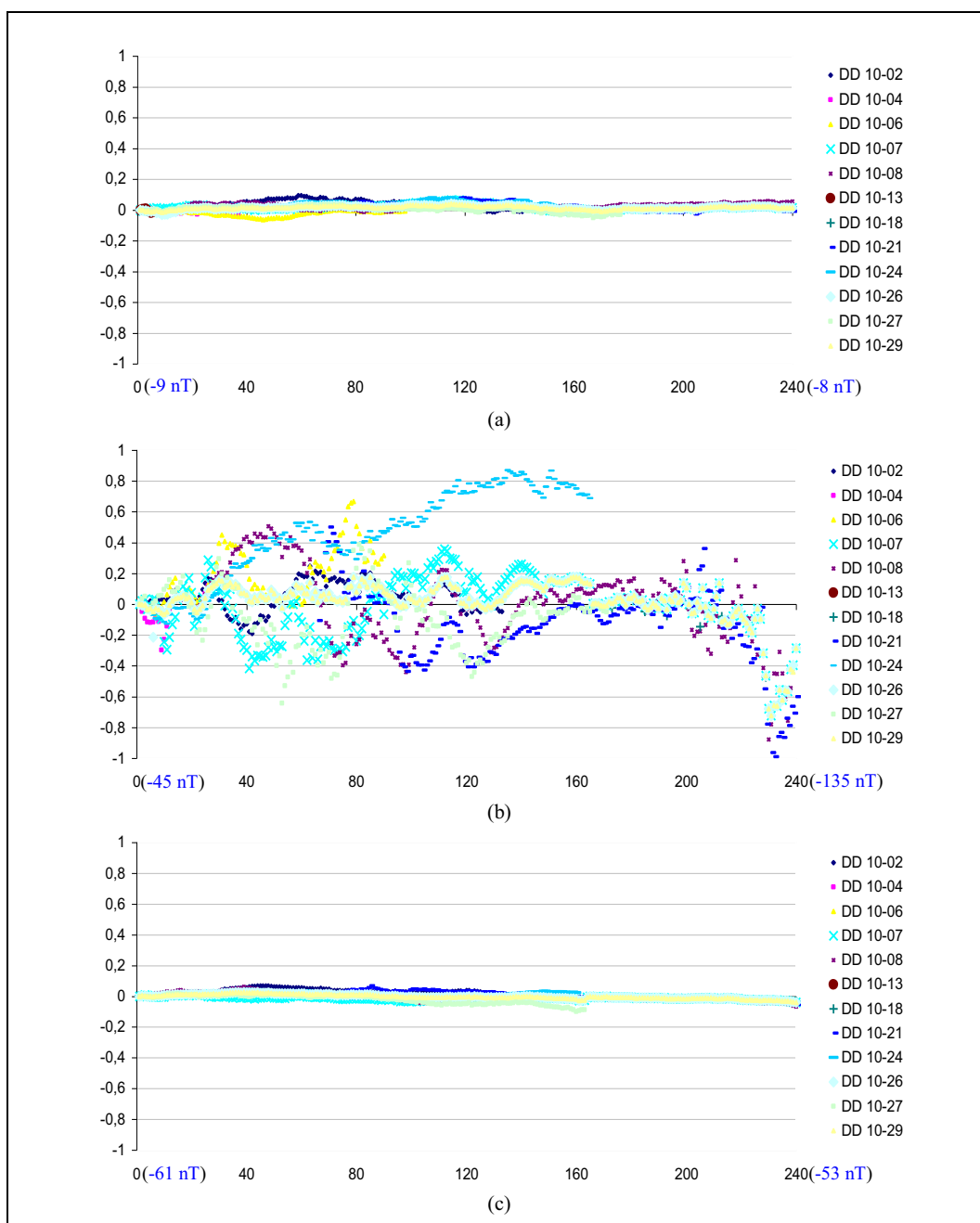


Figura 48 – RPDDF referentes à linha de base ESCU\_FRDN.

De acordo com a figura 48b, verifica-se um aumento significativo dos RPDDF, no período da fase principal da tempestade, maior do que as duas linhas já analisadas. Em alguns momentos o RPDDF quase atingiu o valor de 1 metro. Em contrapartida é evidente também os efeitos da fase de recuperação da tempestade, como mostra a figura 48c, onde os valores dos RPDDF diminuem de forma significativa. A tabela 13 mostra o DP\_RPDDF para todas as DD

formadas durante o intervalo de processamento, para os três dias. A figura 49 mostra o rastro dos satélites (49a) e o *skypplot* (49b).

Tabela 13 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base ESCU\_FRDN.

<b>Dupla Diferença</b>	<b>Desvio Padrão do RPDDF (cm)</b>		
	<b>14/12/2006</b>	<b>15/12/2006</b>	<b>16/12/2006</b>
DD 10-02	2,720	8,913	2,619
DD 10-04	0,973	10,364	0,706
DD 10-06	2,33	20,544	1,224
DD 10-07	1,606	20,816	1,019
DD 10-08	1,730	24,059	2,436
DD 10-18	0,623	24,288	0,852
DD 10-21	2,529	26,141	2,705
DD 10-24	2,074	37,447	1,977
DD 10-26	1,193	15,339	1,382
DD 10-27	1,878	19,425	2,959
DD 10-29	1,074	15,325	1,385

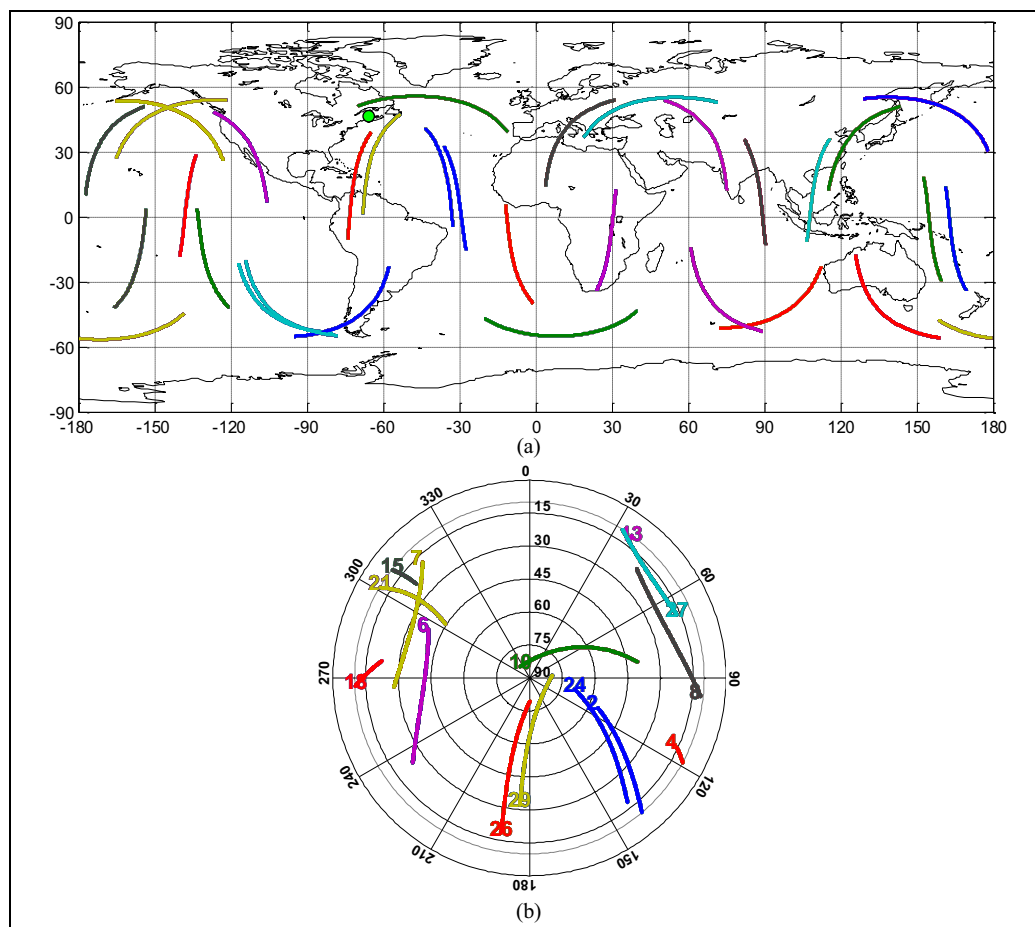


Figura 49 – Rastro dos satélites e *Skyplot* referentes à linha de base ESCU\_FRDN.

De acordo com a tabela 13 verifica-se que os efeitos da tempestade foi significativamente maior, com relação as linhas de base CAGS\_NRC1 e ELIZ\_NTKA. Isto se deve, principalmente em razão do comprimento da linha de base ser consideravelmente maior do que as outras duas linhas de base. Além disso, as estações ESCU e FRDN estão localizadas nas proximidades do terminadouro, similar ao caso da linha de base CAGS\_NRC1. Isto pode ser verificado nas figuras 45a e 49a. No caso da DD 10-18 o desvio padrão aumentou cerca de 40 vezes no período da fase principal da tempestade. De acordo com as figuras 49a e 49b verifica-se que há uma grande distancia na direção leste-oeste entre os satélites 10 e 18. Com isso, pode ter ocorrido alta variação neste sentido na densidade de elétrons nesta região. Além disso, o satélite 18, que forma a DD com o satélite 10, tem baixo ângulo de elevação no início do processamento dos dados, amplificando os efeitos da ionosfera.

Em magnitude, o maior valor do DP\_RPDDF foi obtido na DD 10-24 (~ 37 cm). Neste caso, enquanto o satélite base se deslocava no sentido oeste-leste, o satélite 24 se deslocava no sentido norte-sul. Com isso, pode ter havido altas variações devido a ionosfera na direção norte-sul (ver figuras 49a e 49b). O mesmo pode ter ocorrido para as DD 10-26 e DD 10-29, que também apresentaram altos valores de DP\_RPDDF.

O aumento médio do DP\_RPDDF para todas as DD, no período da fase principal da tempestade, foi de aproximadamente 12 vezes, maior do que os períodos da fase principal da tempestade das linhas de base anteriores. No entanto, no período de recuperação da tempestade, os RPDDF diminuíram significativamente com relação ao período da fase principal da tempestade, também em aproximadamente 12 vezes. Ficam evidentes, mais uma vez, os efeitos oriundos da tempestade geomagnética. A tabela 14 mostra as discrepâncias obtidas nos três períodos analisados, em altimetria e planimetria.

Tabela 14 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base ESCU\_FRDN.

	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	-4,0	3,8	5,5	19,9	2,85
15/12/2006	45,9	63,4	78,2	227,3	271,86
16/12/2006	10,6	-5,2	11,8	11,2	2,23

De acordo com a tabela 14, verifica-se que os resultados estão bem correlacionados com os efeitos da tempestade geomagnética. Na resultante planimétrica houve um aumento na discrepância na ordem de 14 vezes no período da fase principal da tempestade. Em contrapartida, na fase de recuperação diminuiu em aproximadamente 6 vezes. Na componente altimétrica a discrepância aumentou em aproximadamente 11 vezes na fase principal da tempestade, enquanto que no período da recuperação a discrepância diminuiu em torno de 20 vezes.

Na linha de base ESCU\_FRDN o valor da discrepância na componente altimétrica aumentou uma ordem de magnitude no período da fase principal da tempestade, atingindo a ordem do metro (~2,30 m). O GOM também aumentou de forma significativa, aumentando de 2,85 para 271,86. Em contrapartida, na fase de recuperação o GOM diminuiu para 2,23.

Um aspecto que merece destaque é a comparação dos valores da discrepância na componente altimétrica, referente a linha de base ESCU\_FRDN, com relação a linha de base CAGS\_NRC1. Primeiramente, deve-se salientar que a linha de base ESCU\_FRDN é aproximadamente 171 km, maior do que a linha de base CAGS\_NRC1, que tem apenas 20 km.

Contudo, a discrepância em altimetria obtida na linha de base ESCU\_FRDN, no período de recuperação da tempestade, foi menor do que no caso da linha de base CAGS\_NRC1. Em função de uma melhor análise entre essas linhas de base, a tabela 15 mostra os dois resultados obtidos, por motivos de comparação.

Tabela 15 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linhas de base CAGS\_NRC1 e ESCU FRDN.

<b>Linha de Base ESCU FRDN: 191 km</b>					
	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	-4,0	3,8	5,5	19,9	2,85
15/12/2006	45,9	63,4	78,2	227,3	271,86
16/12/2006	10,6	-5,2	11,8	11,2	2,23
<b>Linha de Base CAGS NRC1: 20 km</b>					
14/12/2006	1,4	-6,5	6,6	-20,4	0,71
15/12/2006	-17,5	24,4	30,0	-52,0	12,74
16/12/2006	-0,1	-1,0	1,0	-11,5	0,55

De acordo com a tabela 15, verifica-se que mesmo no período anterior da tempestade, a discrepância em altimetria foi menor do que no caso da linha de base CAGS\_NRC1. No entanto, no período da fase principal da tempestade, as discrepâncias obtidas nas componentes altimétrica e planimétrica sofrem um aumento significativamente maior no caso da linha de base ESCU\_FRDN, se comparado com a linha de base CAGS\_NRC1, principalmente na altimetria, que atingiu aproximadamente 2,3 m.

Diante do exposto verificam-se fortes efeitos decorrentes de alterações do clima espacial no PRGNSS. Contudo, em períodos de recuperação da tempestade, suas consequências podem ser benéficas no desempenho do PRGNSS. Um detalhe importante que deve ser ressaltado é que a tempestade tem início após variações do clima espacial, sendo que essas variações são desencadeadas por fenômenos solares. Em seguida, em função da busca de um equilíbrio no sistema interno da magnetosfera, ocorre a fase de recuperação da tempestade.

A quarta linha de base analisada é formada pelas estações BELL\_EBRE, da rede EUREF. Ambos os receptores das estações são da TRIMBLE, modelo NETRS, e estão instalados na Espanha. O comprimento da linha de base é de 115 km. As duas estações estão localizadas na região ionosférica de latitude média ( $\sim 43,5^{\circ}$  de latitude geomagnética). A figura 50 mostra os RPDDF calculados para os dias 14/12/2006 (50a), 15/12/2006 (50b) e 16/12/2006 (50c).

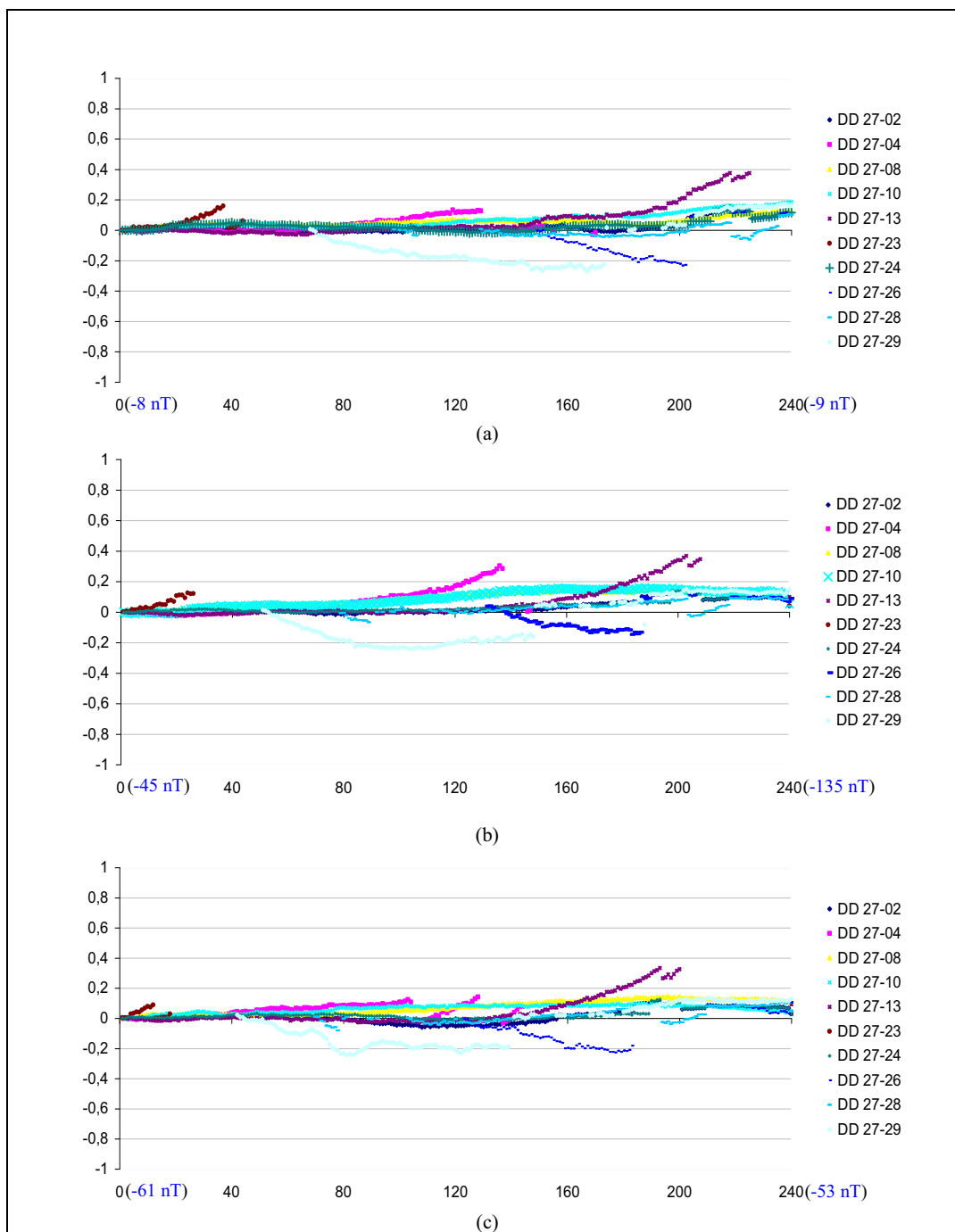


Figura 50 – RPDDF referentes à linha de base BELL\_EBRE.

As figuras 50a, 50b e 50c, mostram um resultado interessante, pois não é verificado nenhum efeito da tempestade geomagnética. Fica evidenciado como o efeito da geometria foi mantido para os três períodos, pois os RPDDF apresentaram um comportamento similar.

A tabela 16 mostra o DP\_RPDDF para todas as DD formadas durante o intervalo de processamento, para os três dias. A figura 51 mostra o rastro dos satélites (51a) e o *skyplot* (51b).

Tabela 16 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base BELL\_EBRE.

Dupla Diferença	Desvio Padrão do RPDDF (cm)		
	14/12/2006	15/12/2006	16/12/2006
DD 27-02	3,974	4,327	4,587
DD 27-04	4,241	8,341	3,910
DD 27-08	2,559	4,740	4,551
DD 27-10	4,918	5,369	2,578
DD 27-13	10,219	9,937	9,339
DD 27-23	4,373	4,106	3,094
DD 27-24	3,479	3,639	3,142
DD 27-26	11,180	8,913	10,650
DD 27-28	3,467	3,850	4,657
DD 27-29	14,696	14,740	12,973

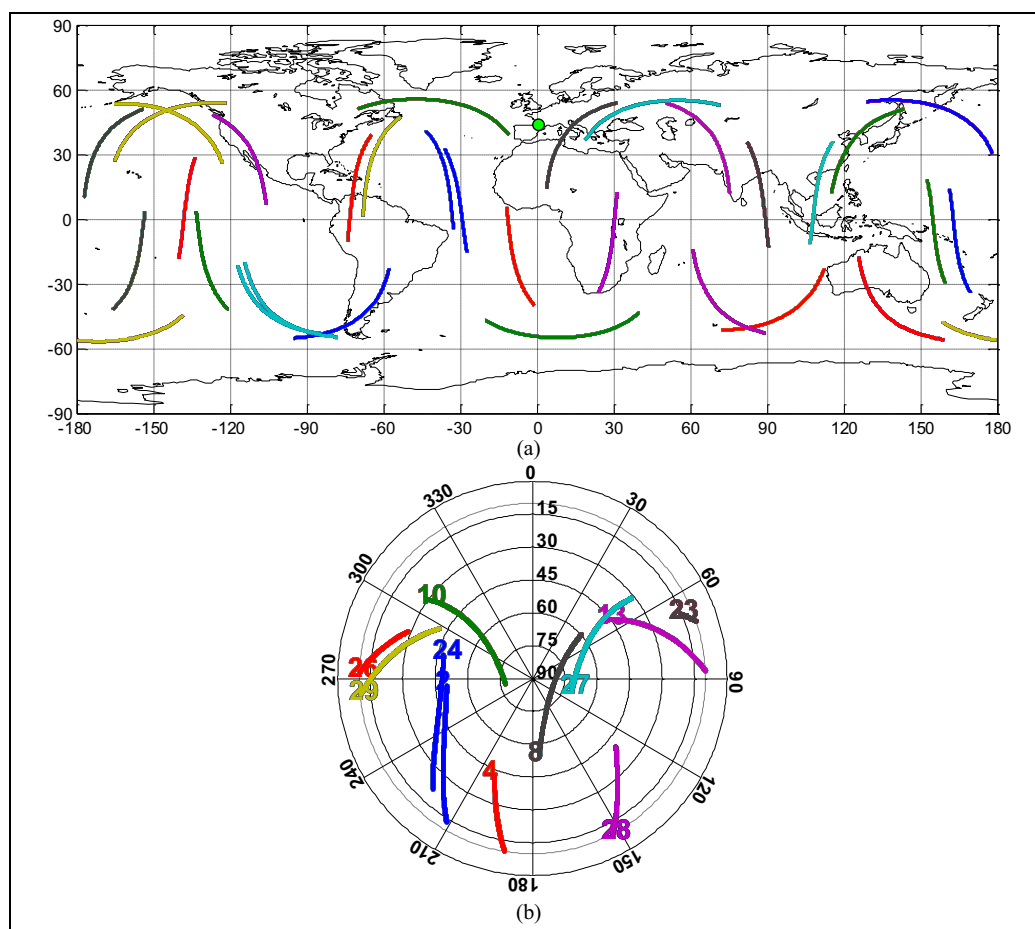


Figura 51 – Rastro dos satélites e *Skyplot* referentes à linha de base BELL\_EBRE.

De acordo com a tabela 16 verifica-se que os resultados nos três períodos são similares, não evidenciando os efeitos da fase principal e da fase de recuperação da tempestade. Contudo, deve ser mencionada uma questão importante, que está relacionada com a HL. De acordo com a figura 51a, verifica-se que as estações estão localizadas próximas da longitude de  $00^0$ . Neste caso, a HL coincide com o TU. Nestas condições, os sinais emitidos pelos satélites atravessaram a ionosfera na grande maioria na parte não iluminada pelo Sol. Com isso, não foi verificado aumentos no DP\_RPDDF na fase principal da tempestade, como mostra a tabela 16. Além disso, a região ionosférica é de latitude média, que tem um comportamento mais estável, se comparado com as outras regiões ionosféricas.

A tabela 17 mostra as discrepâncias obtidas nos três períodos analisados, em altimetria e planimetria.

Tabela 17 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base BELL EBRE.

	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	33,7	23,9	41,3	-65,8	38,95
15/12/2006	23,8	37,8	44,6	-79,8	39,82
16/12/2006	16,6	50,9	53,5	-83,0	33,28

Diante da tabela 17 não se verifica nenhum efeito da tempestade, de acordo com as discrepâncias. Contudo, vale frisar que se esperavam valores menores de discrepância, fato que não ocorreu. Provavelmente, isto ocorreu em função da elevada diferença em altitude entre as duas estações. Enquanto o receptor da estação BELL está instalado a 853 m de altitude, o receptor da estação EBRE está instalado a 108 m de altitude, representando uma diferença de altitude de 745 m. Com isso, os RPDDF podem estar eivados de efeitos troposféricos, bem como outros efeitos não correlacionados espacialmente, propagando os efeitos nas coordenadas estimadas. Os valores do GOM também foram similares para os três períodos analisados.

A quinta linha de base analisada é formada pelas estações EBRE\_VALE, também da rede EUREF, localizada na região ionosférica de latitude média. Ambos os receptores também são da TRIMBLE, modelo NETRS, e estão instalados na Espanha. Verifica-se que uma das estações é a mesma utilizada na quarta linha de base, a EBRE. Assim, a região em que a linha de base foi formada está localizada nas proximidades da região anterior. A diferença básica consiste na diferença de altitude entre as estações. Neste caso, a diferença de altitude entre as duas estações

foi reduzida de 745 m para apenas 30 m. Além disso, o comprimento da linha de base formada é 50 km maior (165 km) do que a quarta linha de base (115 km).

A figura 52 mostra os RPDDF calculados para os dias 14/12/2006 (52a), 15/12/2006 (52b) e 16/12/2006 (52c).

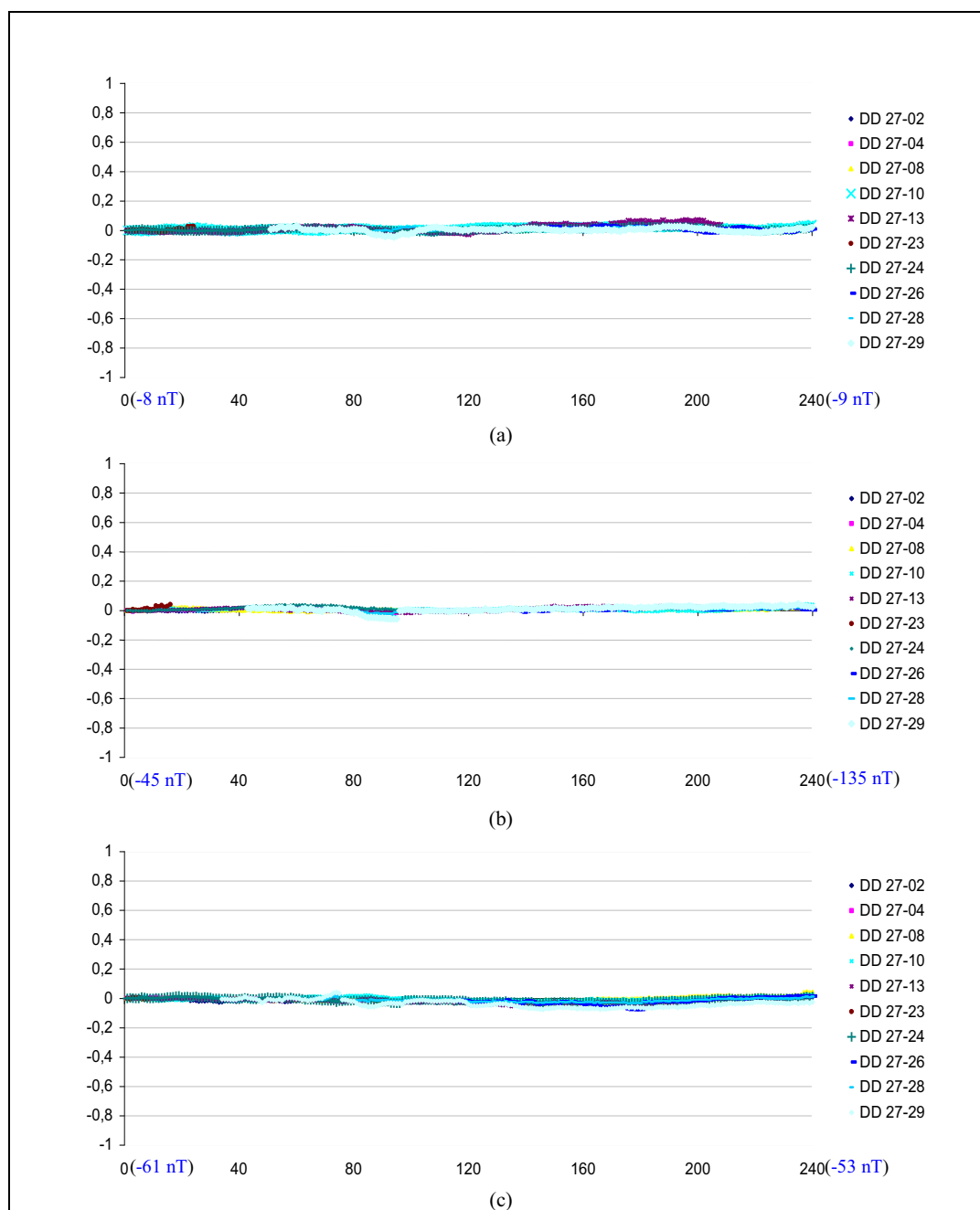


Figura 52 – RPDDF referentes à linha de base EBRE\_VALE.

De acordo com as figuras 52a, 52b e 52c, verifica-se uma redução significativa dos RPDDF, em uma linha de base de 165 km. Da mesma forma que a linha de base BELL\_EBRE, não foi verificado efeitos da tempestade geomagnética. As mesmas considerações feitas para a linha de base BELL\_EBRE são válidas para a linha de base EBRE\_VALE.

A tabela 18 mostra o DP\_RPDDF para todas as DD formadas durante o intervalo de processamento, para os três dias. O rastro dos satélites e o *skyplot* é o mesmo apresentado na figura 51.

Tabela 18 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base EBRE VALE.

<b>Dupla Diferença</b>	<b>Desvio Padrão do RPDDF (cm)</b>		
	<b>14/12/2006</b>	<b>15/12/2006</b>	<b>16/12/2006</b>
DD 27-02	0,921	0,785	1,105
DD 27-04	0,669	0,635	0,915
DD 27-08	0,920	0,674	1,289
DD 27-10	1,083	0,796	1,025
DD 27-13	2,376	1,272	1,402
DD 27-23	1,066	1,377	0,591
DD 27-24	0,867	1,012	1,282
DD 27-26	1,219	0,878	2,298
DD 27-28	0,907	1,033	1,154
DD 27-29	1,397	2,006	2,491

De acordo com a tabela 18, verifica-se a redução significativa dos DP\_RPDDF, para os três períodos. No caso da linha de base BELL\_EBRE o DP\_RPDDF chegou a atingir 14,740 cm, enquanto que na linha de base EBRE\_VALE o valor máximo foi de apenas 2,491 cm. Fica evidenciado, da mesma forma da quarta linha de base, que os efeitos da tempestade são imperceptíveis. Contudo, como já mencionado na linha de base BELL\_EBRE, isto provavelmente ocorreu em função da HL.

Além disso, fica evidenciada outra característica que merece destaque, que é o provável efeito da troposfera nos RPDDF na linha de base BELL\_EBRE. É importante destacar que a linha de base EBRE\_VALE é 50 km mais longa do que a linha de base BELL\_EBRE. Contudo, mesmo nessas condições, os RPDDF diminuíram significativamente. Provavelmente isto ocorreu devido à redução em diferença de altitude entre as duas estações (EBRE\_VALE). Com isso, verifica-se que há indícios de efeitos troposféricos na linha de base BELL\_EBRE.

Com o objetivo de verificar se há diferença no comportamento da troposfera acima das estações BELL, EBRE e VALE, foi realizado o PPP utilizando o serviço *on-line* oferecido pelo NRCan para as três estações. Além das coordenadas de interesse, o serviço do NRCan calcula o atraso zenital troposférico (ZTD) com intervalo de 30 segundos. Com isso, foram calculadas as médias do ZTD durante o período de análise para as três estações. Para a estação BELL o ZTD médio durante o período das 00:00 – 02:00 TU foi igual a 2,183 m. Para a estação EBRE foi igual a 2,411 m e para a estação VALE igual a 2,437 m. A diferença da média do ZTD entre as estações BELL e EBRE é igual a -0,228 m, enquanto a diferença entre as estações EBRE e VALE é igual a apenas 0,026 m, o que evidencia os prováveis efeitos troposféricos presentes nos RPDDF calculado para a linha de base BELL\_EBRE.

A tabela 19 mostra as discrepâncias obtidas nos três períodos analisados, em altimetria e planimetria.

Tabela 19 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base EBRE\_VALE.

	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	9,60	9,50	13,5	-8,6	0,76
15/12/2006	9,32	11,0	14,4	-7,6	0,64
16/12/2006	10,50	9,60	14,2	6,1	1,54

De acordo com a tabela 19 fica evidente nenhum efeito de tempestade nas discrepâncias obtidas. Destaque deve ser dado para as discrepâncias em altimetria, visto que todos os valores foram menores do que 0,10 m, em uma linha de base de 165 km. Os valores das discrepâncias na resultante planimétrica foram maiores, mas da mesma forma do que na altimetria, não foram verificados os efeitos da tempestade. Provavelmente, como já mencionado, isto ocorreu em função da localização da linha de base (latitude média) e também em função da HL. Em função da ocorrência da tempestade e do período de processamento, que corresponde ao período das 00:00 – 02:00 TU, provavelmente não ocorreu efeitos em função da variação diária da ionosfera. Além disso, a ionosfera na região de latitude média apresenta as menores variações na densidade de elétrons. Isto também é refletido nos valores do GOM, mostrados na última coluna da tabela 19. Com exceção do GOM obtido no dia 16/12/2006, os valores do GOM foram menores do que o valor 1.

Contudo, com o objetivo de avaliar se houve algum efeito da tempestade geomagnética em períodos do amanhecer (próximo do terminadouro), foram processados os dados das mesmas

estações (EBRE\_VALE), porém para o período de 24 h. Como há indícios de que os RPDDF obtidos para a linha de base BELL\_EBRE estão eivados de efeitos da troposfera, escolheu-se processar os dados da linha de base EBRE\_VALE, pois neste caso, os efeitos da tempestade podem ser dominantes nos RPDDF, em função dos menores valores obtidos nesta linha de base, podendo evidenciar possíveis efeitos da tempestade geomagnética. Como os RPDDF calculados para linha de base BELL\_EBRE foram maiores e mais irregulares, os mesmos podem mascarar algum possível efeito da tempestade. Neste caso, para o dia 16/12/2006 não foi possível processar os dados. Diante do exposto, as figuras 53, 54, 55 e 56 mostram, respectivamente, os valores dos RPDDF obtidos durante o período de 24 horas para os dias 14/12/2006, 15/12/2006, 17/12/2006 e 18/12/2006. Como o processamento dos dados corresponde ao período de 24 h (2880 instantes), não será mostrada a legenda das DD, pois durante este período várias DD são formadas, impossibilitando inseri-las na legenda dos gráficos. Além disso, em vários momentos o satélite base é alterado.

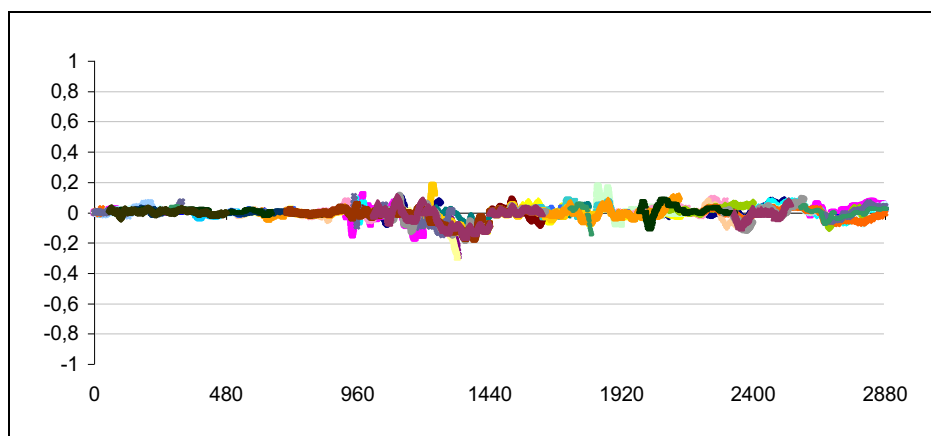


Figura 53 – RPDDF para o dia 14/12/2006 referentes à linha de base EBRE\_VALE.

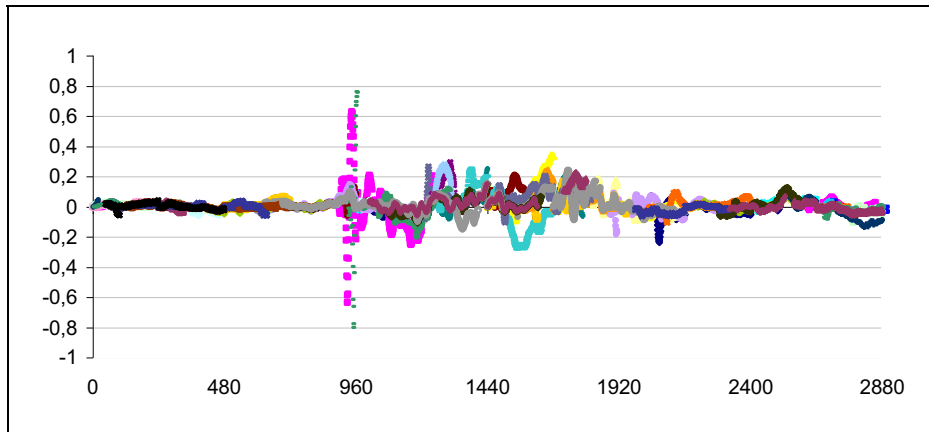


Figura 54 – RPDDF para o dia 15/12/2006 referentes à linha de base EBRE\_VALE.

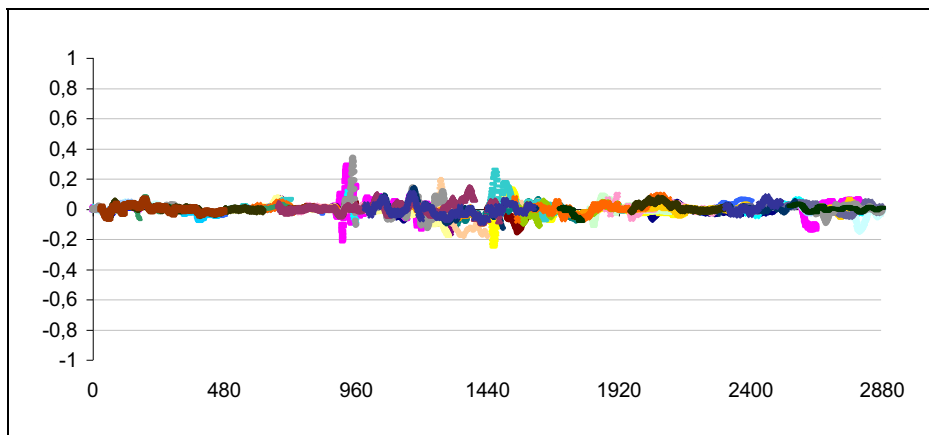


Figura 55 – RPDDF para o dia 17/12/2006 referentes à linha de base EBRE\_VALE.

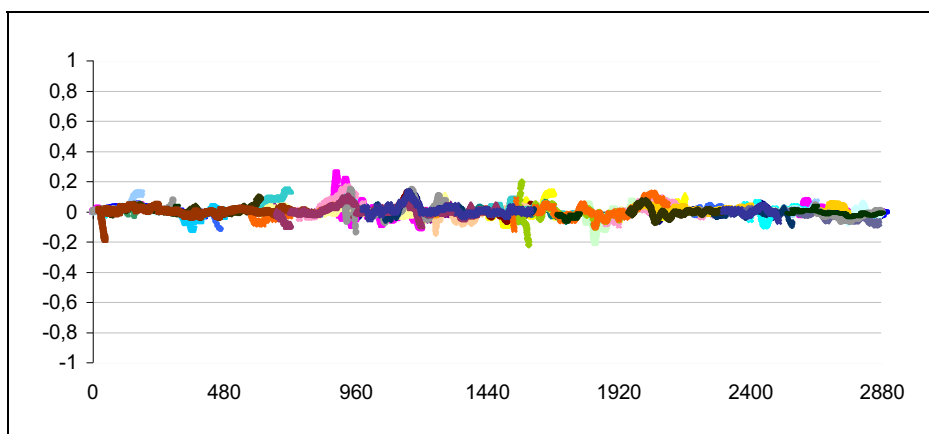


Figura 56 – RPDDF para o dia 18/12/2006 referentes à linha de base EBRE\_VALE.

Diante das figuras 53, 54, 55 e 56, verifica-se um aumento sensível dos RPDDF aproximadamente a partir do instante 900 (aproximadamente 07:30 TU), no dia da tempestade (figura 54). Este período corresponde ao período próximo do terminadouro do amanhecer. Com isso, há indícios de que os efeitos da tempestade foram propagados para a linha de base EBRE\_VALE, mesmo localizada na região de latitude média. Vale salientar que a tempestade no período do amanhecer ainda estava na fase principal. É importante destacar que o possível efeito da tempestade detectado no dia de ocorrência da tempestade não ocorreu nos outros 3 dias de processamento.

A sexta linha de base analisada é formada pelas estações CTEG\_CTGU, ambas da rede CORS. Ambos receptores são da Trimble, modelo 5700. Essas estações formam uma linha de base de a 70 km. A figura 57 mostra os RPDDF calculados para os dias 14/12/2006 (57a), 15/12/2006 (57b) e 16/12/2006 (57c). As duas estações estão localizadas na região ionosférica de latitude alta ( $\sim 51,8^{\circ}$  de latitude geomagnética), embora muito próxima na região de média latitude.

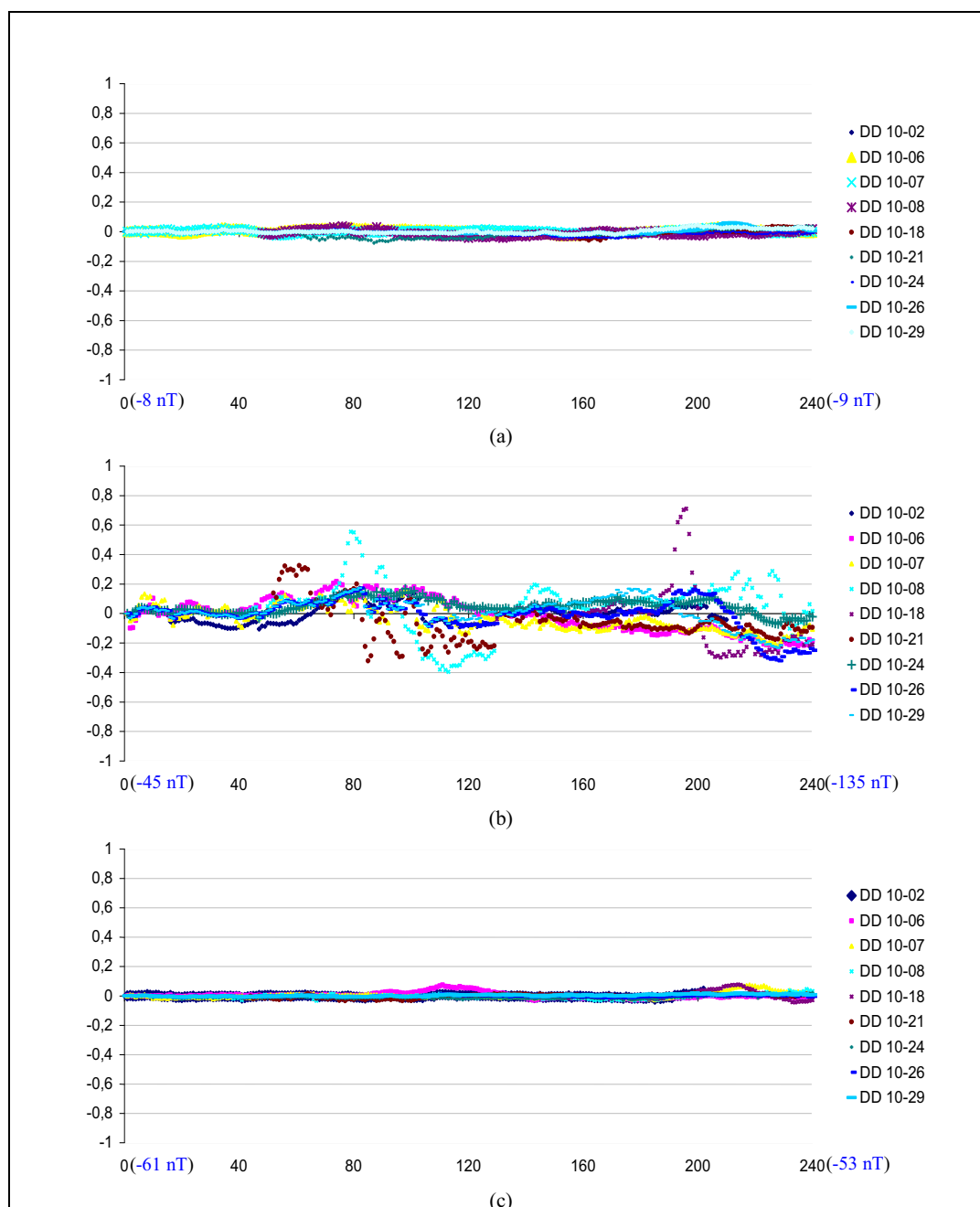
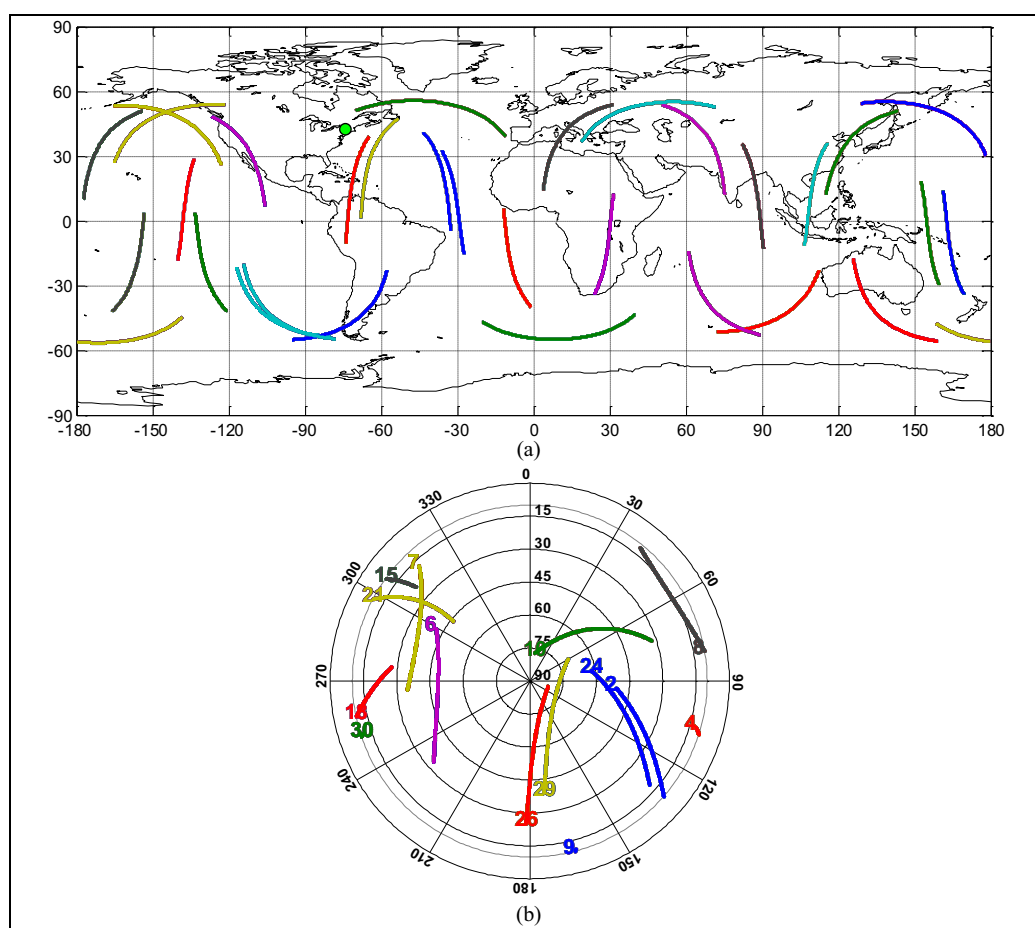


Figura 57 – RPDDF referentes à linha de base CTEG\_CTGU.

Verificam-se novamente os efeitos da fase principal da tempestade para todas as DD, como mostra a figura 57b. Além disso, de acordo com a figura 57c, verificam-se os efeitos da fase de recuperação da tempestade, onde os valores dos RPDDF diminuem significativamente. A tabela 20 mostra os DP\_RPDDF para os três períodos e a figura 58 mostra o rastro dos satélites (58a) e o *skyplot* (58b).

Tabela 20 – Desvios-padrão dos RPDDF - Linha de base CTEG CTGU.

Dupla Diferença	Desvio Padrão do RPDDF (cm)		
	14/12/2006	15/12/2006	16/12/2006
DD 10-02	1,021	6,401	0,713
DD 10-06	1,225	11,392	2,019
DD 10-07	1,059	8,438	1,953
DD 10-08	1,619	17,784	1,462
DD 10-18	2,318	20,718	2,731
DD 10-21	2,737	12,932	1,212
DD 10-24	1,427	4,9372	0,912
DD 10-26	1,606	10,542	0,495
DD 10-29	1,487	9,236	0,697

Figura 58 – Rastro dos satélites e *Skyplot* referentes à linha de base CTEG\_CTGU.

De acordo com a tabela 20 verifica-se o aumento do DP\_RPDDF no período da fase principal da tempestade. Houve um aumento médio do DP\_RPDDF para todas as DD da ordem de 7 vezes. Em contrapartida, na fase de recuperação houve uma diminuição da ordem de 8

vezes, comparado com a fase principal da tempestade. No caso das DD 10-18 e DD 10-08 foram encontrados os maiores valores do DP\_RPDDF (20,718 e 17,784, respectivamente), diante da grande distância entre eles que foi mantida no período do processamento, além da provável alta variação diária da ionosfera no sentido leste-oeste. As mesmas considerações são válidas para os casos das DD 10-26 e DD 10-29. No entanto, nesse caso deve-se, provavelmente, a variações no sentido norte-sul. É importante destacar que no início do processamento, os satélites PRN 26 e PRN 29 estavam se deslocando no sentido de sul para norte, acima da região noroeste da América do Sul.

A tabela 21 mostra as discrepâncias obtidas nos três períodos analisados, em altimetria e planimetria.

Tabela 21 – Discrepâncias em altimetria e planimetria (E,N) - Linha de base CTEG CTGU.

	<b>N (cm)</b>	<b>E (cm)</b>	<b>Resultante (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>GOM</b>
14/12/2006	3,4	-2,1	3,9	-5,9	39,27
15/12/2006	42,49	75,9	86,9	-46,9	275,79
16/12/2006	0,1	-0,7	0,7	-2,7	27,39

De acordo com a tabela 21, verifica-se um aumento significativo nas discrepâncias no período da fase principal da tempestade. Na componente planimétrica o aumento foi da ordem de 22 vezes, enquanto na altimetria o aumento foi da ordem de 8 vezes. Em contrapartida, no período de recuperação da tempestade, tanto na altimetria como na resultante planimétrica, houve uma redução significativa nos valores das discrepâncias. Na fase principal da tempestade o GOM aumentou de 39,27 para 275,79. No entanto, na fase de recuperação da tempestade o GOM diminuiu para 27,39.

### 6.3 Segundo experimento

Nesse experimento foram utilizados dados GNSS coletados na Rodovia Raposo Tavares, próximo a região de Presidente Prudente, nas quatro estações do ano, em seis estações, formando linhas de base de 30, 40, 60, 80, 100 e 120 km. Foi adotado o seguinte tempo de rastreamento na coleta dos dados: 2 horas para as linhas de base de 30 e 40 km, 3 horas para as linhas de base de 60, 80 e 100 km e 4 horas para a linha de base de 120 km. Esses dados foram coletados por Dal Poz (2005).

No processamento dos dados GPS foi utilizado o programa GPSurvey, versão 2.35. Todas as linhas de base foram processadas com relação à estação UEPP da RBMC, atualmente designada como PPTE.

Os dados utilizados compreendem as quatro estações do ano. Com isso será realizada uma análise sazonal do efeito da ionosfera, bem como uma análise diária. Em três estações do ano os dados foram coletados com um Trimble 4600 LS (verão, outono e primavera). No inverno os dados foram coletados com receptor de dupla frequência Ashtech ZXII. Como o receptor da estação UEPP é um Trimble 4000 SSI de dupla frequência, foi possível nesse caso aplicar no processamento dos dados a combinação linear livre dos efeitos da ionosfera ( $L_0$ ). As coordenadas obtidas nesse caso foram consideradas como referência para comparação com os valores estimados com relação aos processamentos realizados nas quatro estações do ano. Após o cálculo das coordenadas de referência foi realizado um novo processamento com os dados do receptor ZXII, somente com dados da fase da portadora L1.

O procedimento para verificar a influência da ionosfera foi realizado por meio da comparação dos valores de referência das coordenadas das linhas de base estimadas ( $L_0$ ) por intermédio da combinação livre da ionosfera, com o processamento da DD da fase (L1) com correção da ionosfera (CCI) e sem correção da ionosfera (SCI). Para a correção das observações dos efeitos da ionosfera foi utilizado o Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion), desenvolvido por Camargo (1999). O objetivo neste caso é verificar se a correção dos efeitos da ionosfera por intermédio do modelo é eficiente, visto que parte dos efeitos da ionosfera são cancelados no processo de formação da DD. No processamento foi utilizado o modelo de Hopfield para correção dos efeitos da troposfera. Para o cálculo das coordenadas dos satélites foram utilizadas as mensagens de navegação, e a máscara de elevação adotada foi igual a  $10^0$ .

### 6.3.1 Resultados e análise

A tabela 22 mostra as discrepâncias obtidas na resultante planimétrica (RP) e em altimetria, para os seguintes casos: com correção da ionosfera (CCI) e sem correção da ionosfera (SCI). A tabela mostra as discrepâncias para as quatro estações do ano (abril-outono, outubro-primavera, jan/fev-verão e julho-inverno) para as seis linhas de base formadas. Na tabela também são mostrados o período de rastreamento na HL, para análise da variação diária da ionosfera.

Tabela 22 – Discrepâncias calculadas para as quatro estações do ano.

<b>Discrepâncias na Resultante Planimétrica e Altimetria – Abril/Outono-2004</b>					
<b>Linha de base (km)</b>	<b>Período de rastreio (HL)</b>	<b>RP (m)</b>		<b>Altimetria (m)</b>	
		<b>SCI</b>	<b>CCI</b>	<b>SCI</b>	<b>CCI</b>
30	10:25 – 12:25	0,106	0,133	0,252	0,336
40	11:00 – 13:00	0,158	0,049	-0,067	-0,014
60	14:00 – 17:00	0,596	0,319	-1,575	-1,386
80	15:25 – 18:25	0,768	0,513	-1,448	-1,337
100	09:00 – 12:00	0,027	0,117	0,236	0,207
120	12:40 – 16:40	1,125	0,499	-1,941	-1,882
<b>Discrepâncias na Resultante Planimétrica e Altimetria – Outubro/Primavera-2003</b>					
30	10:42 – 12:42	0,059	0,027	0,122	0,101
40	11:32 – 13:32	0,236	0,073	0,085	0,096
60	14:10 – 17:10	0,713	0,410	-0,672	-0,559
80	09:30 – 12:30	0,149	0,088	-0,101	-0,071
100	09:45 – 12:45	0,200	0,087	-0,172	-0,123
120	13:22 – 17:22	1,263	0,644	-1,029	-0,860
<b>Discrepâncias na Resultante Planimétrica e Altimetria – Jan/Fev/Verão-2004</b>					
30	12:00 – 14:00	0,059	0,033	-0,087	-0,001
40	13:00 – 15:00	0,052	0,042	-0,018	0,083
60	09:05 – 12:05	0,146	0,023	-0,299	-0,125
80	09:45 – 12:45	0,134	0,071	-0,238	-0,120
100	11:50 – 14:50	0,043	0,127	0,243	0,139
120	12:40 – 16:40	0,221	0,057	-0,152	-0,140
<b>Discrepâncias na Resultante Planimétrica e Altimetria – Julho/Inverno-2003</b>					
30	11:50 – 13:50	0,026	0,115	0,138	0,136
40	09:30 – 11:30	0,047	0,094	-0,080	-0,052
60	09:50 – 12:50	0,067	0,324	0,267	0,330
80	15:25 – 18:25	0,033	0,057	0,492	0,433
100	14:25 – 17:25	0,063	0,244	0,179	0,088
120	09:40 – 13:40	0,016	0,377	0,142	0,311

Primeiramente será realizada uma análise no caso sem a correção da ionosfera (SCI). De acordo com a tabela 22 verifica-se uma forte influência da variação diurna da ionosfera no PRGNSS. Isto pode ser verificado pelo fato de que nem sempre a discrepância é proporcional ao comprimento da linha de base. Em suma, em todos os casos, tanto em altimetria como na resultante planimétrica, a discrepância nem sempre aumenta na medida em que o comprimento da linha de base aumenta. Isto ocorre principalmente devido a variação diurna da ionosfera. De acordo com a segunda coluna da tabela, em função da HL, verifica-se esta influência. A discrepância em altimetria obtida em abril, na linha de base de 100 km, diminuiu cerca de 6

vezes, comparado com a linha de base de 80 km. Na RP a redução foi da ordem de 4 vezes. Verifica-se claramente que esta diminuição ocorreu em função da hora da coleta dos dados da linha de base de 100 km, que foi realizado entre 09:00 – 12:00 HL, período de baixa variação ionosférica. Em contrapartida, na linha de base de 80 km, a coleta de dados foi realizada entre 15:25 – 18:25 HL, período de maior variação ionosférica. Como descrito no tópico 4.4.1, ao longo do dia a densidade de elétrons depende da HL, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12:00 e 16:00 HL.

Na linha de base de 120 km, referente ao mês de abril, a discrepância atingiu -1,941 m em altimetria, visto que a coleta de dados foi realizada no período de maior variação diária da ionosfera, que corresponde ao intervalo entre 12:40 – 16:40 HL. Na RP a discrepância foi da ordem de 1,125 m. As mesmas considerações são válidas para julho, com relação as linhas de base de 120 e 100 km, porém com magnitude menor. Na linha de base de 120 km, a discrepância em altimetria foi igual a 0,142 m, enquanto que na RP a discrepância atingiu somente 0,016 m. Em contrapartida, na linha de base de 100 km, a discrepância em altimetria foi igual a 0,179 m, maior do que a discrepância obtida na linha de base de 120 km. A discrepância na RP foi igual a 0,063 m, maior do que a linha de base de 120 km. No caso da linha de base de 100 km, a coleta dos dados foi realizada entre 14:25 – 17:25 HL, período de máxima atividade diária da ionosfera. Em contrapartida, na linha de base de 120 km, a coleta foi realizada entre 09:40 – 13:40 HL, período de baixa atividade.

Verifica-se, de uma forma geral, em ambos os casos, referentes ao mês de abril e julho, a influência da variação sazonal da ionosfera. Enquanto que em abril, próximo ao equinócio de outono, os valores das discrepâncias em várias linhas de base, em altimetria, foram maiores do que 1 m, em julho, próximo do solstício de inverno, nenhum valor da discrepância foi maior do que 0,05 m. No caso da RP, em abril, com exceção da linha de base de 100 km, todas as discrepâncias foram maiores do que 0,10 m, e no caso da linha de base de 120 km foi maior do que 1m. Em contrapartida, em julho, referente a RP, nenhum valor da discrepância ultrapassou 0,10 m. Somente em dois casos a discrepância foi maior do que 0,05 m (linhas de base de 60 e 100 km).

De uma forma geral, próximo ao equinócio de primavera, em outubro, também foram verificados altos valores de discrepância, se comparado com os meses de janeiro, próximo ao solstício de verão, e em julho, próximo ao equinócio de inverno. Em outubro, com exceção da

linha de base de 30 km na RP, e na linha de base de 40 km em altimetria, todos os valores de discrepâncias foram maiores do que 0,10 m, sendo que em dois casos ultrapassou o valor de 1 m. Diante do exposto, verifica-se que de forma geral, próximo aos equinócios, os valores das discrepâncias são maiores do que próximos aos solstícios.

Com relação aos resultados obtidos com aplicação do modelo da ionosfera (CCI), verifica-se que nem sempre o modelo melhora os resultados, principalmente quando a discrepância obtida sem a correção (SCI) apresenta baixo valor. Isto pode ser verificado em vários casos, como por exemplo, nas seguintes linhas de base: 30 km em altimetria e na RP e na linha de base de 100 km na RP, todos referentes ao mês de abril. No entanto, não se trata de uma regra geral, pois no caso da linha de base de 40 km, as discrepâncias em altimetria e na RP apresentavam baixo valor, antes da aplicação do modelo da ionosfera. Mesmo nestas condições, a discrepância diminuiu após a aplicação do modelo.

Há outros exemplos em que o modelo da ionosfera não melhora os resultados no PRGNSS, principalmente quando a discrepância calculada SCI já apresenta baixos valores. Isto pode ser verificado com maior frequência em julho, próximo ao solstício de inverno. Provavelmente, nesses casos, o processo de formação das duplas diferenças já é responsável pela minimização de grande parte dos erros devido a ionosfera. Com isso, o modelo não traz benefícios. Vale salientar que próximo ao solstício de inverno a ionosfera apresenta uma das menores variabilidades, comparado com os outros meses do ano.

Considerando os quatros meses analisados, em altimetria e na RP, há um total de 48 discrepâncias calculadas. Desse total, o modelo melhorou os resultados em aproximadamente 71% dos casos, equivalente a um valor de 34 discrepâncias calculadas. Desta forma, verifica-se que o modelo, de forma geral, foi eficiente. Vale salientar que em alguns casos a melhoria foi significativa, e em outros casos não.

As figuras 59 (59a, 59b, 59c e 59d), 60 (60a, 60b, 60c e 60d), 61 (61a, 61b, 61c), 62 (62a, 62b, 62c e 62d), 63 (63a, 63b, 63c e 63d) e 64 (64a, 64b, 64c e 64d) mostram os RPDDF para as seis linhas de base, calculados com o GPSeq. Cada figura agrupa, para cada linha de base, os resultados obtidos nas quatro estações do ano. É importante destacar que na linha de base de 60 km não foi possível processar os dados coletados no inverno utilizando o GPSeq. Por esta razão, na figura 61 serão apresentadas os RPDDF referentes as outras estações do ano.

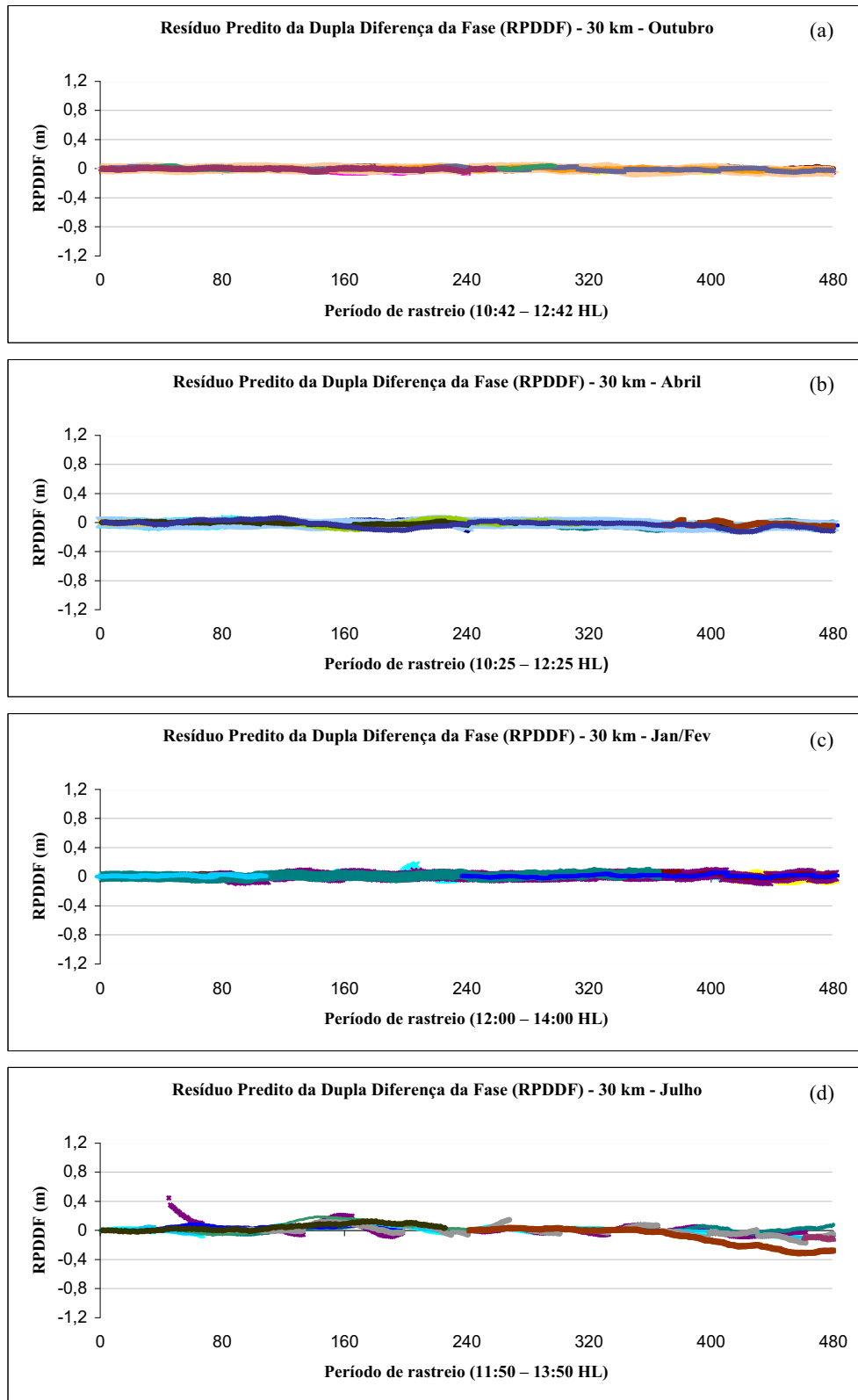


Figura 59 – RPDDF obtidos para a linha de base de 30 km.

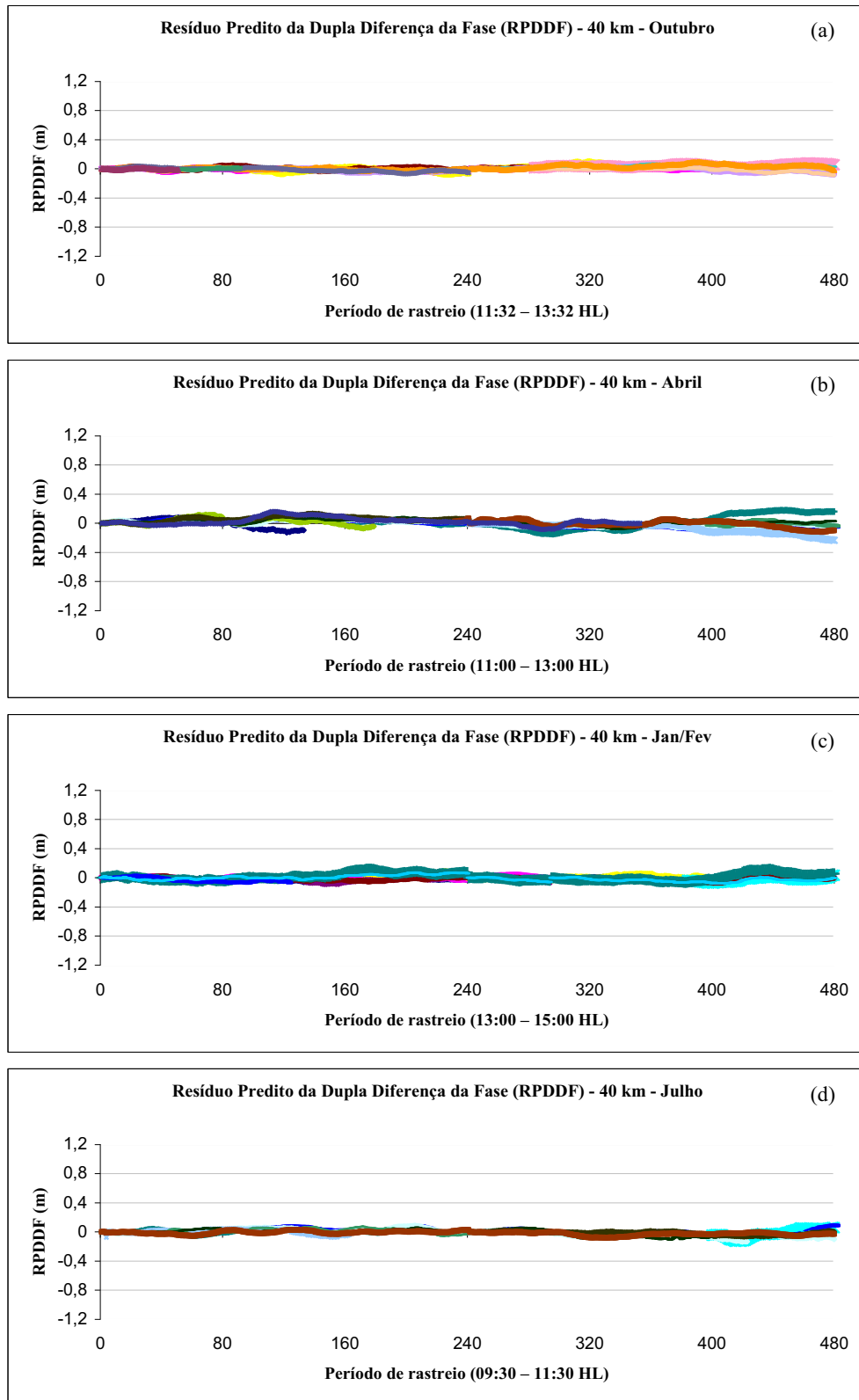


Figura 60 – RPDDF obtidos para a linha de base de 40 km.

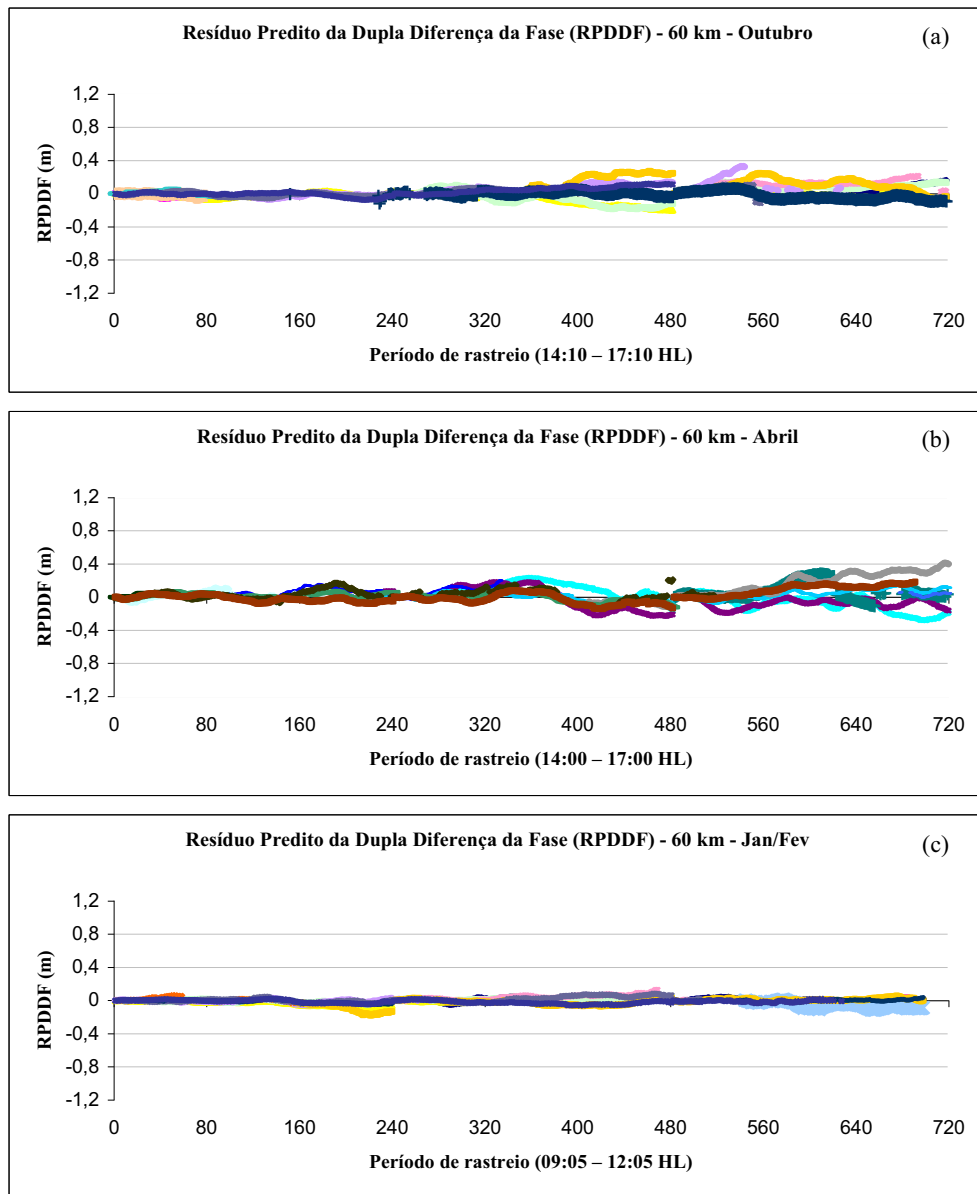


Figura 61 – RPDDF obtidos para a linha de base de 60 km.

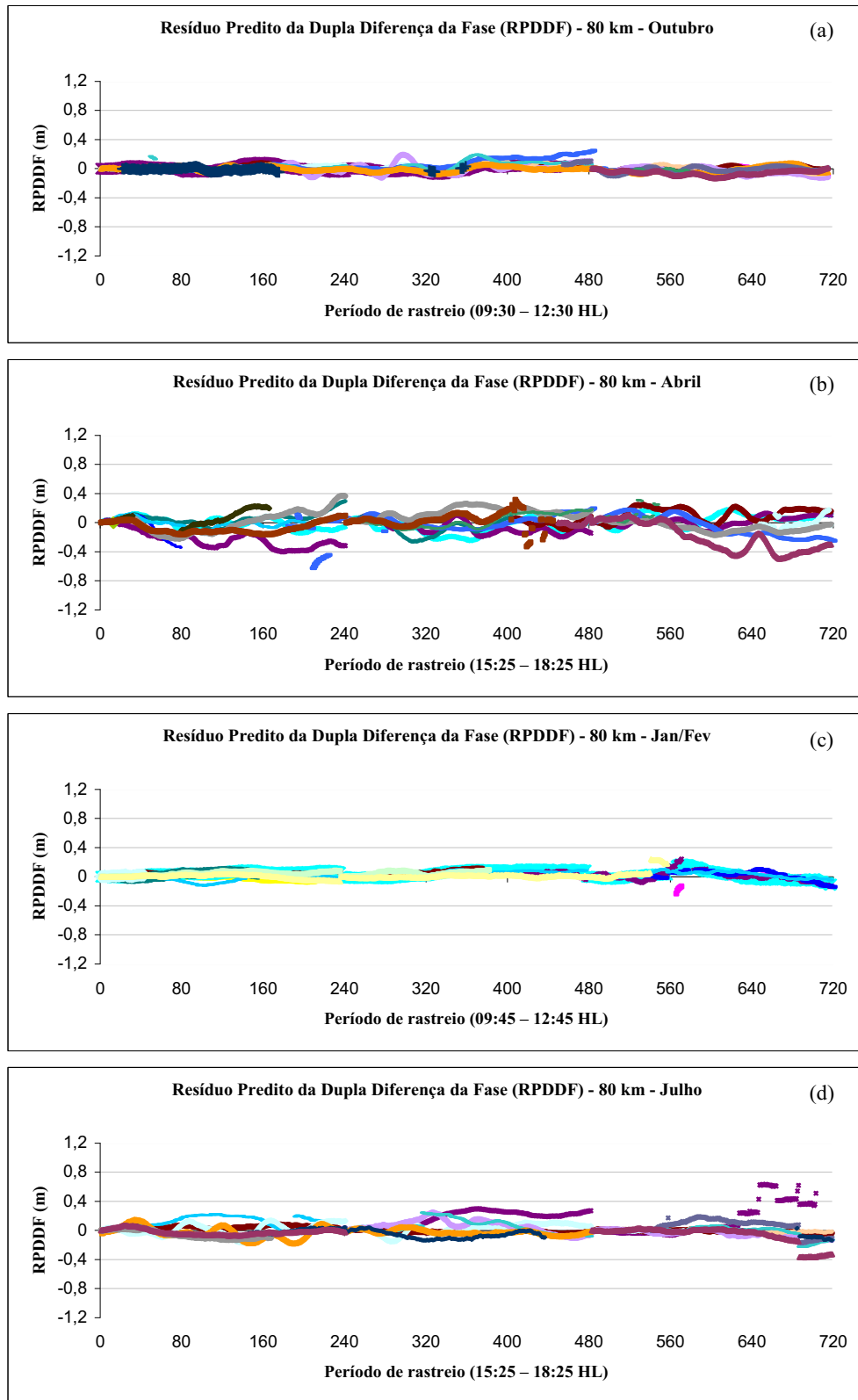


Figura 62 – RPDDF obtidos para a linha de base de 80 km.

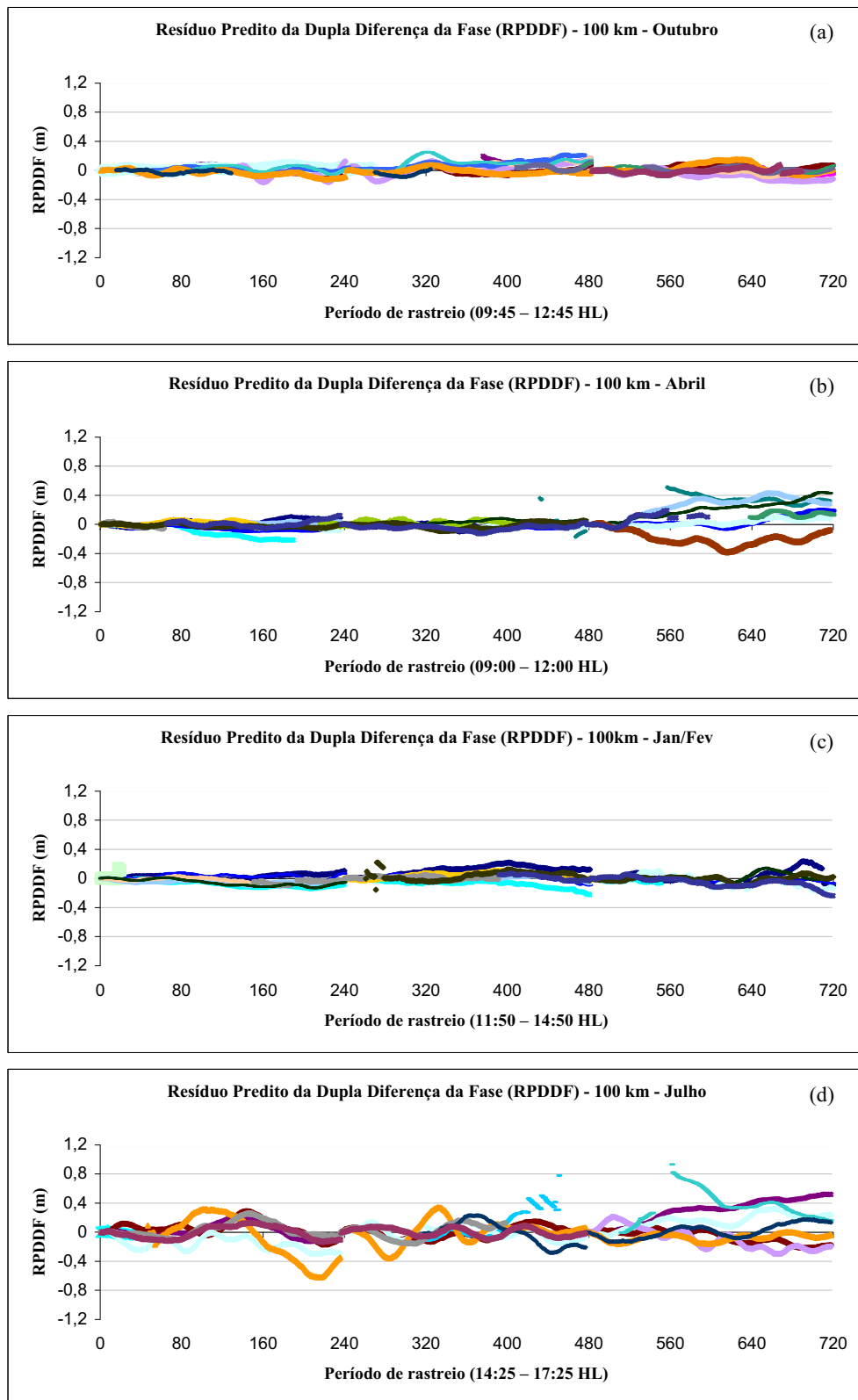


Figura 63 – RPDDF obtidos para a linha de base de 100 km.

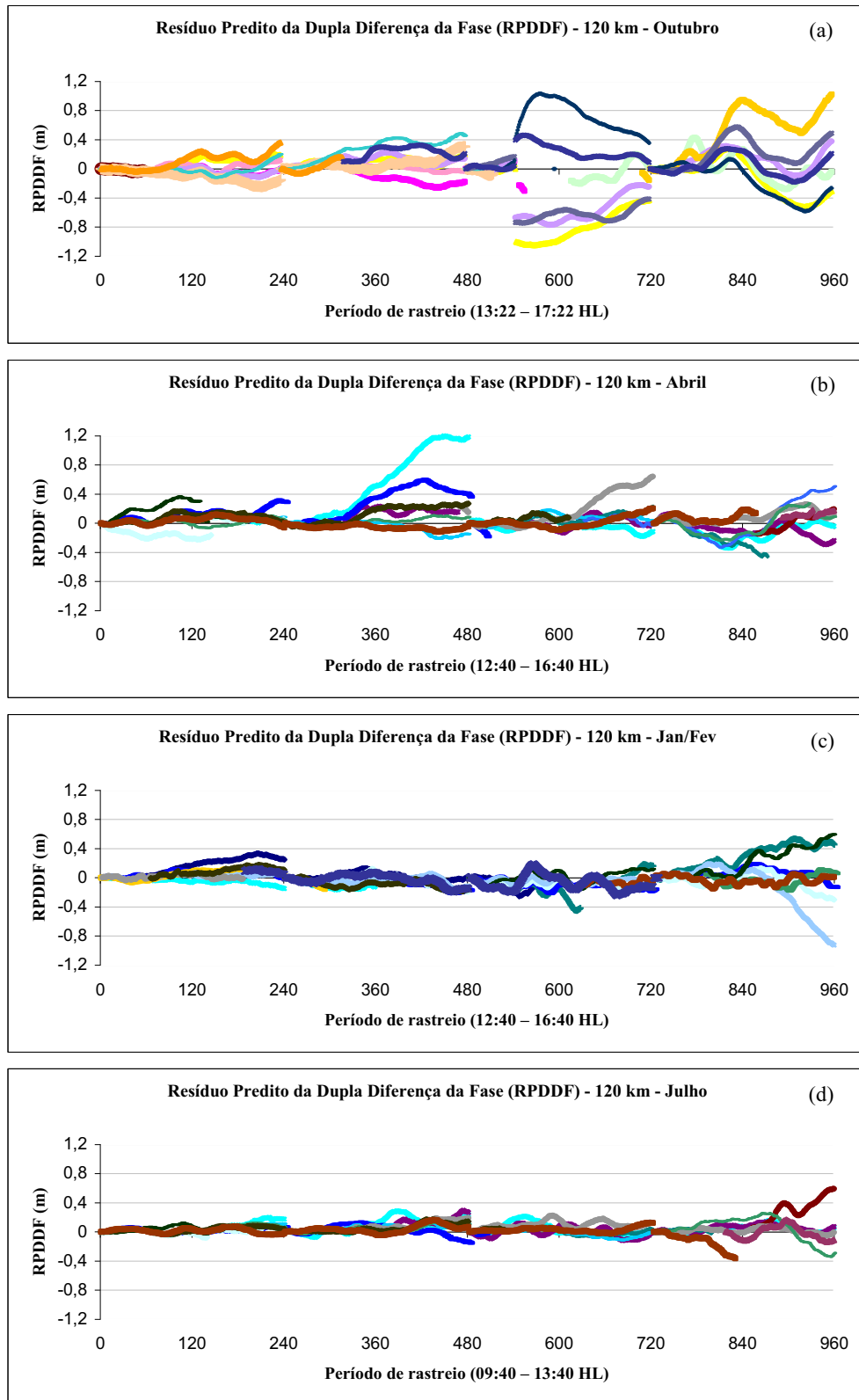


Figura 64 – RPDDF obtidos para a linha de base de 120 km.

Como comentado anteriormente, em virtude da variação diária da ionosfera, resultados melhores podem ser obtidos em linhas de base maiores. Isto pode ser verificado claramente nos RPDDF. De acordo com a tabela 22, a discrepância obtida em abril, na linha de base de 100 km, foi menor do que no caso da linha de base de 80 km. Como já apontado, isto ocorreu devido à variação diária da ionosfera, como pode ser verificado nas figuras 62b e 63b. Na figura 62b, referente a linha de base de 80 km, verifica-se claramente uma maior variação dos RPDDF, comparada com a variação ilustrada na figura 63b, referente a linha de base de 100 km. Por esta razão, a discrepância em altimetria atingiu apenas 0,236 m e na RP somente 0,027 m, referentes a linha de base de 100km, considerando o caso SCI. Em contrapartida, na linha de base de 80 km, a discrepância em altimetria atingiu -1,448 m, e na RP atingiu 0,768 m. Na linha de base de 120 km, a discrepância atingiu em altimetria -1,941 m, e na RP atingiu 1,125 m. Neste caso, os RPDDF também variaram de forma significativa, em função da HL (12:40 – 16:40 HL), como mostra a figura 64b.

As mesmas considerações são válidas para julho, com relação as linhas de base de 120 e 100 km, porém com magnitude menor. Na linha de base de 120 km, a discrepância atingiu 0,142 m, menor do que a linha de base de 100 km, que atingiu 0,179 m. Os RPDDF apresentaram variação maior no caso da linha de base de 100 km, comparado com a linha de base de 120 km, que pode ser verificado nas figuras 63d e 64d. Verifica-se que a partir das linhas de base de 80 km os RPDDF começam a se comportar de forma mais regular, apresentando maiores valores.

A tabela 23 mostra a média do DP\_RPDDF (cm) calculado para todas as linhas de base e estações do ano.

Tabela 23 – Média do DP\_RPDDF para todas as linhas de base e estações do ano.

<b>Linha de base</b>	<b>Julho</b>	<b>Outubro</b>	<b>Janeiro/Fevereiro</b>	<b>Abril</b>
30 km	5,36	1,60	1,75	2,28
40 km	3,63	2,16	3,06	5,03
60 km	---	5,04	2,61	7,57
80 km	7,71	4,04	4,10	11,38
100 km	13,49	4,91	4,92	7,08
120 km	7,11	20,95	10,63	13,93

De acordo com a tabela 23 verificam-se altos valores dos desvios-padrão para o mês de julho. Isto pode ter ocorrido em função das diferenças ente os modelos dos receptores utilizados no processamento dos dados. No caso de julho, o receptor base é da marca Trimble, modelo 4000

SSI, enquanto que o receptor móvel é da marca Ashtech, modelo ZXII. Podem ter ocorrido maiores valores dos resíduos devido ao ruído dos receptores que são diferentes. Isto fica evidente nas linhas de base menores, que apresentaram altos valores da média dos DP\_RPDDF. Nesses casos, como a linha de base são curtas, provavelmente os ruídos residuais da dupla diferença foram dominantes nos RPDDF. Em contrapartida, verifica-se que a média do DP\_RPDDF calculado em julho é o menor obtido na linha de base de 120 km. No entanto, neste período o horário de coleta dos dados foi realizado em período de baixa variação da ionosfera. Novamente verifica-se que a variação diária da ionosfera apresenta forte influência nos resultados obtidos.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

*“O conhecimento é como um jardim: se não for cultivado, não pode ser colhido”*

*Provérbio Africano*

De acordo com os experimentos, foi possível alcançar os objetivos propostos na pesquisa. Foram feitos experimentos em três diferentes regiões ionosféricas. Nas regiões de latitude média e alta foram avaliados os efeitos de tempestades geomagnéticas, decorrentes de forte alteração do clima espacial, enquanto que na região ionosférica equatorial foram avaliados os efeitos da variação diária e sazonal da ionosfera em função do comprimento da linha de base.

No primeiro experimento foi verificada a influência do clima espacial nos resultados obtidos em função de uma forte explosão solar, classificada como X, o que equivale a uma grande explosão. Esta explosão, que ocorreu em período próximo de mínima atividade solar, fez com que ocorresse uma tempestade intensa. Foram notados efeitos da fase principal e de recuperação da tempestade. Na linha de base ESCU\_FRDN de 191 km, o erro em altimetria foi da ordem do metro (2,3 m), no período da fase principal da tempestade. Em contrapartida, na fase de recuperação da tempestade o erro diminuiu aproximadamente 20 vezes, proporcionando discrepância em altimetria menor do que a obtida em uma linha de base de apenas 20 km (CAGS\_NRC1). Essas linhas de base estão localizadas na região de latitude alta, que estão mais próximas às regiões polares. Durante a precipitação de partículas, que aumenta a densidade de elétrons, mudanças da ordem de várias dezenas de TECU pode facilmente ocorrer na região de latitudes altas.

Em função da hora local e do período de processamento dos dados, que foi realizado durante o intervalo de tempo entre 00:00 – 02:00 TU, não ficou evidenciado nenhum efeito da tempestade geomagnética nas linhas de base localizadas em médias latitudes (BELL\_EBRE e EBRE\_VALE). Nesses casos, a hora local coincide com o tempo universal. Neste período, os sinais transmitidos pelos satélites atravessaram a ionosfera em grande parte somente no lado não iluminado pelo Sol. Contudo, a partir do processamento dos dados para o período de 24 horas, foi possível verificar uma sensível variação no comportamento do RPDDF próximo do terminadouro ( $\sim 07:30$  HL =  $07:30$  TU). Com isso, há indícios de que os efeitos da tempestade foram propagados na linha de base localizada na região de latitude média.

Em contrapartida, em uma linha de base de apenas 20 km (CAGS\_NRC1), localizada na região ionosférica de latitude alta, a discrepância em altimetria aumentou de -20,45 cm para -52,04 cm no período da fase principal da tempestade. Na fase de recuperação, a discrepância diminuiu para -11,55 cm, evidenciando as fases características de uma tempestade geomagnética. Na resultante planimétrica, a discrepância aumentou de 6,649 cm para 30,026 cm na fase principal da tempestade, enquanto que na fase de recuperação diminuiu para apenas 1,005 cm.

Em todos os experimentos realizados na região ionosférica de latitude alta o GOM aumentou significativamente no período da fase principal da tempestade, reduzindo em seguida na fase de recuperação.

De acordo com experimentos realizados na linha de base BELL\_EBRE (115 km), localizada na região de latitude média, foram verificados indícios de efeitos troposféricos, devido a diferença de altitude entre as estações, que é de aproximadamente 745 m. As discrepâncias obtidas neste caso foram elevadas, comparadas com as outras linhas de base. No entanto, não foi verificado efeitos da tempestade geomagnética. Vale destacar que esta linha de base está localizada na região de latitude média.

Em outro experimento, com dados GNSS da linha de base EBRE\_VALE, porém na mesma região, os RPDDF diminuíram de forma significativa. Neste caso a diferença de altitude entre as estações era de apenas 30 m. Assim, as discrepâncias em altimetria foram todas menores que 10,0 cm, em uma linha de base de 165 km, 50 km maior do que a BELL\_EBRE. Nos dois casos os RPDDF foram similares para os três períodos, evidenciando nenhum efeito da tempestade. Os valores do GOM também foram similares para as duas linhas de base, porém significativamente menores para a linha de base EBRE\_VALE.

Com relação ao segundo experimento, considerando o caso SCI, foi verificada forte influência da variação diária da ionosfera. Em alguns casos, os RPDDF foram maiores em linhas de base menores, em razão da hora local. Por exemplo, em abril, na linha de base de 100 km, o valor da discrepância na resultante planimétrica foi igual a 2,7 cm, e em altimetria igual a 23,6 cm. Em contrapartida, na linha de base de 80 km, a discrepância planimétrica foi igual a 76,8 cm, enquanto que em altimetria foi igual a -144,8 cm. Situação similar ocorreu em julho, referente as linhas de base de 100 e 120 km, porém com magnitude menor. Os dados GNSS das linhas de base menores (abril e julho) foram coletadas durante parte do período correspondente ao pico de

atividade diária da ionosfera, que compreende ao período entre 12:00 – 16:00 HL. Não ficou evidenciada de forma significativa a variação sazonal da ionosfera.

Após aplicar o modelo da ionosfera nas observáveis GNSS, considerando os quatros meses analisados, em altimetria e na planimetria, os resultados melhoraram em 71 % dos casos. Desta forma, verifica-se que o modelo, de forma geral, foi eficiente. Contudo, vale salientar que em alguns casos a melhoria foi significativa, e em outros casos não. Em julho, próximo ao solstício de inverno, que corresponde a baixa atividade anual ionosférica, o modelo não foi eficiente. Isto provavelmente ocorreu em razão da eficiência da minimização dos efeitos da ionosfera em função das duplas diferenças, devido à baixa variação da ionosfera, próximo ao solstício de inverno.

Recomenda-se, em razão do pico de atividade solar do ciclo 24 que se está previsto para ocorrer em 2013, realizar experimentos com dados GNSS eivados de efeitos de tempestades geomagnéticas, que provavelmente ocorrerão, principalmente no período de declínio do ciclo. Será uma ótima oportunidade para realizar estudos de efeitos do clima espacial no PRGNSS na região brasileira. Durante o período entre os anos 2007 - 2010 houve um aumento significativo de estações da RBMC. A densificação da rede terá continuidade ao longo dos anos, e tende a ser contínua. Além disso, haverá também disponibilidade dos dados da Rede GNSS do estado de São Paulo. Trata-se, portanto, de uma grande oportunidade, pois, pela primeira vez, desde o advento do GPS, será possível avaliar os efeitos do clima espacial no Brasil de forma mais adequada.

É importante salientar que no pico do ciclo 23 (2000-2001), bem como no período de declínio da atividade solar, pela primeira vez houve um grande número de satélites, das mais variadas missões, expostos aos efeitos do clima espacial. Vários fenômenos solares foram responsáveis pela ocorrência de tempestades intensas e super intensas. Nesse período, o GPS sofreu efeitos significativos em função dessas fortes alterações do clima espacial. Contudo, na época, a comunidade científica preocupou-se em buscar soluções para minimizar os efeitos da ionosfera sem considerar sua relação com o clima espacial. Convém frisar que durante a completa operacionalização do GPS (1993) até maio de 2000 a maior fonte de erro era a técnica S/A.

Diante do exposto, após as experiências adquiridas com o ciclo 23, houve uma preocupação maior no que se referem aos efeitos causados pelo clima espacial, que podem causar fortes efeitos no posicionamento com GNSS, tais como os efeitos de tempestades geomagnéticas. Com isso, várias instituições passaram a se preocupar com os efeitos causados pelo clima

espacial, bem como seus impactos no posicionamento com GNSS. Há uma preocupação evidente com os efeitos do clima espacial no GNSS, que consiste basicamente na experiência de eventos extremos que ocorreram no passado. É importante destacar que a tempestade analisada nesta pesquisa corresponde a uma tempestade intensa. Neste caso o índice Dst atingiu apenas  $-135$  nT no período analisado. A tempestade de outubro de 2003, por exemplo, atingiu  $-383$  nT.

Diante do exposto, deve ser dada continuidade nos estudos dos efeitos do clima espacial no posicionamento relativo com GNSS, visto que no Brasil ocorrem várias irregularidades ionosféricas, que podem ser intensificadas por tempestades geomagnéticas. Como já mencionado, o Brasil estará dispoindo de uma infra-estrutura melhor para estudos desta natureza, em virtude da densificação da RBMC/RIBaC. Nesta pesquisa, devido aos problemas de disponibilidade de dados, não foi realizada nenhuma relação com os efeitos de tempestades nas regiões ionosféricas de latitude alta e baixa (região equatorial). Assim outra recomendação de extrema importância é relacionar os efeitos de tempestades nessas regiões, e principalmente, avaliar a correlação dos efeitos das tempestades. Pesquisas já foram desenvolvidas sobre o comportamento do TEC em períodos de tempestades. Foi verificado que durante eventos de tempestades as cristas da anomalia equatorial se deslocam para latitudes mais altas. Além disso, ocorre uma alta variabilidade do TEC, podendo comprometer o posicionamento relativo com GNSS. Com a disponibilidade de mais dados GNSS referentes as 3 regiões ionosféricas, será possível verificar se ocorre a propagação dos efeitos de altas latitudes, ou da região equatorial, para a região de latitude média.

É evidente que no futuro, com a continuidade da modernização do GPS e GLONASS, bem como a operacionalização do Galileo, ocorrerão benefícios evidentes aos usuários GNSS. O custo de receptores de dupla frequência diminuirá e o usuário terá acesso mais fácil a esses tipos de receptores. Com isso, os efeitos da ionosfera moderada (*background*) serão de menor importância, pois com a combinação linear livre da ionosfera os efeitos de primeira ordem são eliminados. Em contrapartida, em períodos de alta variação do clima espacial, e mesmo considerando a modernização do GNSS, o desempenho do PRGNSS poderá ser seriamente comprometido. Há motivos para se preocupar com as conseqüências de tempestades no GNSS no futuro, em virtude das fortes alterações que podem ocorrer com o clima espacial. Em média, por ano, ocorrem 5 tempestades severas no ciclo solar máximo, ou duas tempestades por ano durante todo o ciclo (DoD, 2000).

O usuário GNSS deverá considerar no futuro os efeitos do clima espacial, levando em consideração as irregularidades e turbulências que podem ocorrer na ionosfera, que está fortemente relacionada com efeitos de cintilação. Em suma, uma das principais preocupações no GNSS estará relacionada com o clima espacial, principalmente nas aplicações em tempo real. Desta forma, recomenda-se ao usuário GNSS usar os serviços de predição do clima espacial para o planejamento de seus trabalhos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGU (*American Geophysical Union*) – on line – endereço eletrônico: <http://www.agu.org/journals/sw/?content=about>, acesso em setembro de 2010.

AGUIAR, C.R., CAMARGO, P.O., DAL POZ, W.R., MATSUOKA, M.T.. *Determinação de erro sistemático na pseudodistâncias devido à ionosfera: avaliação da performance do MOD\_ION e do modelo de Klobuchar*. In: Curso de Pós-Grad.em Ciências Geodésicas(Mitishita, Edson A). (Org.). Série em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2003, v. 3, p. 119-132.

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

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

APPLETON, E.V. *Two anomalies in the ionosphere*. Nature, 157, 691.1946.

ARMENDARIS, O.C.; MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Desempenho do modelo global da ionosfera do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, p. 208-223, 2009.

BATISTA, I.S.. *Comunicação Pessoal*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2003a.

BATISTA, I.S.. Notas de aula do curso “*Introdução à ionosfera e a propagação de ondas*” ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003b.

SCHLEGEL, K.. *Ionospheric Response (Chapter 7)*. In: *Bothmer, V.; Daglis, I.A.. Space Weather: Physics and Effects*. Chichester, UK, Praxis Publishing – Springer, 2007, 438p.

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

CAMARGO, P.O., MONICO, J.F.G., FERREIRA, L.D.. *Application of Ionospheric Corrections in the Equatorial Region for L1 GPS Users*. Earth Planets And Space, Japão, v. 52, n. 11, p. 1083-1089, 2000(a).

CAMARGO, P.O., MONICO, J.F.G., FERREIRA, L.D.D.. *Influência da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS*. In: *COBRAC 2000 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, Florianópolis. Anais do 4o. COBRAC 2000 - CD ROOM. Florianópolis: Lab. FSG, 2000(b).

CAMARGO, P.O., MONICO, J.F.G., MATSUOKA, M.T.. *Analysis of an Ionosphere Regional Model (Mod\_Ion) During the Period of Maximum Solar Activity: A Case Study in Brazil..* In: ION GPS 2001, 14 International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2001, Salt Lake City, Utah. CD ROM, 2001(a).

CAMARGO, P.O., MONICO, J.F.G., MATSUOKA, M.T.. *Influence of the ionosphere in the GPS point positioning: a case study in the equatorial region.* In: IAG - Scientific Assembly, Budapest. Abstracts IAG Scientific Assembly, 2001(b).

CAMARGO, P.O., DAL POZ, W.R.. *Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: Primeira experiências na FCT/UNESP.* In: Curso de Pós-Grad.em Ciências Geodésicas; Mitishita, Edson Aparecido (Editor Chefe). (Org.). Séries em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2002, v. 2, p. 80-99.

CAMARGO, P.O., DAL POZ, W.R., AGUIAR, C.R., MATSUOKA, M.T.. *Variação do TEC obtido com GPS durante a tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003.* VII Latin-American Conference on Space Geophysics - Space Sciences for the XXI Century. Atibaia, SP, 2004.

CAMARGO, P.O., MATSUOKA, M.T., DAL POZ, W.R.. *Ionosfera e a performance do posicionamento com GPS.* In: XII Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital, Ubatuba. Livros de Resumos do XII CBDO, 2004. v. 1. p. 18.

CAMARGO, P. O.; MATSUOKA, M.T.; DAL POZ, W.R.. *Ionosphere and the performance of the GPS positioning.* In: Prado, A.F.B.A.; Gomes, V.M.. (Org.). *Advances in Space Dynamics 5: Celestial Mechanics and Astronautics.* 1 ed. São José dos Campos: INPE, 2008, v. 5, p. 139-148.

CAMPOS, M.A.; WANNINGER, L.; SEEBER, G.. *Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS.* In: 3o. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica – Resumos Expandidos, Rio de Janeiro/RJ, p.601-604, 7 a 11 de novembro, 1993.

CANAVITSAS, A.A.C.; ASSIS, M.S.; AMENDOLA, G.V.. *Variações dos sinais GPS na propagação transionosférica, afetando os futuros sistemas de radionavegação aeronáutica.* 2004. Revista Digital Online. [www.revdigonline.com](http://www.revdigonline.com). Acesso em outubro de 2005.

CORS (Continuously Operating Reference Station) – on line - endereço eletrônico: <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>, acesso em outubro de 2010. 109p. Dissertação -

COSENTINO, R.J.; DIGGLE, D.W.; UIJT de HAAG, M.; HEGARTY, C.J.; MILBERT, D.; NAGLE, J.. *Differential GPS.* In: KAPLAN E.D.; HEGARTY, C.J.. *Understanding GPS: Principles and Applications.* 2. ed. Artech House, Inc., 2006. Cap. 8, p. 379-458.

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

DAL POZ, W.R. *Posicionamento Relativo na Região Equatorial em Diversas Condições Ionosféricas*. 2005. 161p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

DAL POZ, W.R., CAMARGO, P.O., AGUIAR, C.R.. Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo (no prelo). In: *Boletim de Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2008.

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

DoD (Department of Defense). *Space Weather Architecture Transition Plan*. 2000, 69p. Endereço eletrônico: <http://www.ofcm.gov/Tplan/FnlTPlanSSGversion052200.doc>, acesso em outubro de 2009.

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

ESWW (European Space Weather Week) – on-line – endereço eletrônico: <http://sidc.be/esww7/>, acesso em novembro de 2010.

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

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

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

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

FORTES, L.P.S.; COSTA, S.M.A.; ABREU, M.A.; MOURA JUNIOR, N.J.; DA SILVA, A.L.; LIMA, M.A.A.; MONICO, J.F.G.; SANTOS, M.C.. Plano de Expansão e Modernização das Redes Ativas RBMC/RIBaC. In: *XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007*.

FU, W.X., HAN, S., RIZOS, C., KINGHT, M., FINN, A. Some Results on the Nonparametric Statistics of GPS Signal Scintillation. *Int. Symp. on GPS: Application to Earth Sciences & Interaction with Other Space Geodetic Techniques*, Tsukuba, Japan, 18-22 October, 1999.

GEGE (Grupo de Estudos em Geodésia Espacial) – on line – endereço eletrônico: [http://gege.fct.unesp.br/index\\_port.php?p=50](http://gege.fct.unesp.br/index_port.php?p=50), acesso em outubro de 2010.

GFZ (GeoForschungsZentrum) – on line – endereço eletrônico: [http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp\\_index/](http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/), acesso em outubro de 2007.

GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) – on line - endereço eletrônico: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:20:5141865106721542::NO>. ACESSO EM 12/10/2010.

GONZALEZ, W.D., TSURUTANI, B.T., CLUÁ DE GONZALEZ, A.L.. Interplanetary Origin of Geomagnetic Storms. *Space Science Reviews*, 88, p. 529-562, 1999.

GPSWORLD, - on line – endereço eletrônico: <http://www.gpsworld.com/gps/news/gps-inside-october-2004-1269>, acesso em outubro de 2010.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. *Global Positioning System Theory and Practice*. 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E.. *Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, GALILEO and more*. SpringerWienNewYork, 2008, 516p.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) – on line – endereço eletrônico: <http://www.inpe.br/climaespacial/>, acesso em setembro de 2010.

INSIDE GNSS – on line – endereço eletrônico: <http://www.insidegnss.com/node/2134>, acesso em outubro de 2010(a).

INSIDE GNSS – on line – endereço eletrônico: <http://www.insidegnss.com/node/2355>, acesso em novembro de 2010(b).

ISGI (International Service of Geomagnetic Indices) – online – endereço eletrônico: <http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/indicegeo.htm>, Acesso em: 13 mar. 2006.

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

JOOSTEN, P.. *SkyLab: Skyplot for Matlab<sup>TM</sup>*. Delft University of Technology, The Netherlands, Version 2.0, 2000.

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

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

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric Effects on GPS. *GPS World*, vol. 2, n.4, April 1991, p.48-51.

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

KOMJATHY, A. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. 1997. 248p. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report nº 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

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

KYOTO, - on-line - endereço eletrônico - [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/200612/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/200612/index.html), acesso em: 10 out. 2010.

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

MARQUES, H.A.. *Influência da Ionosfera no Posicionamento GPS : Estimativa do Resíduos no Contexto de Duplas Diferenças e Eliminação dos Efeitos de 2ª e 3ª ordem*. 2008. 151p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MARQUES, H.A.; MONICO, J.F.G.; AQUINO, M.; ALVES DA SILVA, H.. Posicionamento GNSS Relativo com Estimativa Estocástica dos Resíduos Ionosféricos das Duplas Diferenças. In: *II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife – PE, 8-11 Setembro, 2008.

MATSUOKA, M.T., CAMARGO, P.O.. Correção Ionosférica Utilizando o Modelo de Klobuchar e o Modelo Regional da Ionosfera: Avaliação da Performance no Posicionamento Por Ponto. In: Curso de Pós-Grad.em Ciências Geodésicas; Mitishita, Edson Aparecido (Editor Chefe). (Org.). Séries em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2002, v. 2, p. 20-40.

MATSUOKA, M.T., CAMARGO, P.O.. Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS. In: Curso de Pós-Grad.em Ciências Geodésicas(Mitishita, Edson A). (Org.). Série em Ciências Geodésicas. Curitiba, v. 3, p. 167-181. 2003(a)

MATSUOKA, M. T., CAMARGO, P.O.. Evaluation of Functions for Modelling of the Effect of the Ionospheric Refraction in the Propagation of the GPS Signals . In: ION GPS/GNSS 2003, Portland, Oregon. ION GPS/GNSS MEETING PROCEEDINGS. Virginia: The Institute of Navigation, p. 1736-1741. 2003(b)

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

MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; DAL POZ, W.R.. Declínio do número de manchas solares do ciclo 23: Redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS. In: *Boletim de Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2004. vol.10, n.2, p.141-157.

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

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

MONICO, J.F.G.. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. da Unesp, 2<sup>o</sup> ed., 2008. 476p.

MONICO, J.F.G.; MENEZES DE SOUZA, E.; POLEZEL, W.G.C.; MARQUES, H.A.; MACHADO, W.C.. GPSeq: Manual do usuário, versão L1 1.1 Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade Estadual Paulista, FCT/Unesp. 2008.

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) – on line – endereço eletrônico: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>, acesso em setembro de 2010.

NOGUEIRA, P.A.B.. *Estudo da anomalia de ionização equatorial e dos ventos termosféricos meridionais durante períodos calmos e perturbados na região de baixas latitudes brasileira*. 2009. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo.

NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) – on line – endereço eletrônico: <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>, acesso em setembro de 2010.

ODIJK, D. Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays, The Netherlands: Optima Grafische Communicatie, 2002. 242p.

OLIVEIRA, A.B.V.. *Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial*. 2003. 144p. Tese (Mestrado na Área de Concentração em Telecomunicações) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP.

OLIVEIRA FILHO, K.S.O; SARAIVA, M.F.O.. *Astronomia e Astrofísica*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física. 2000. 708 p.

PARKINSON, B. W.; SPILKER Jr., J. J.. *Global Positioning System: theory and applications*. Washington: AIAA, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, v.163).

RAQUET, J.F.. *Development of a method for kinematic GPS carrier-phase ambiguity resolution using multiple reference receivers*. 1998. 259p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20116, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

RODRIGUES, F.S.R.. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

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

SALOMONI, C.S.; MATSUOKA, M.T.; SOUZA, S.F.; CAMARGO, P.O.. Análise e comparação do comportamento da ionosfera e do posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, p. 333-351, 2009.

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

SCHAER, S. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. 205p. Ph.D. dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland.

SCHUNK, R.W.; NAGY, A.F.. *Ionosphere: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 554p.

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

SILVA, H.A.. *Avaliação de Modelos Estocásticos no Posicionamento GNSS*. 2009. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

SILVA, H.A.; CAMARGO, P.O.; MONICO, J.F.G.; AQUINO, M.; MARQUES, H.A.; DE FRANCESCHI, G.; DODSON, A.. Stochastic modelling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point positioning. In: *Advances in Space Research*. 2010, v. 45, ed. 9, p. 1113-1121.

SKONE, S.. *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*. 1998. 198p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20123, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

SKONE, S.. The impact of magnetic storms on GPS receiver performance. *Journal of Geodesy*, 2001, v. 75, n° 09-10, p. 457-468.

SKONE, S.; SHRESTHA, S.M.. Limitations in DGPS Positioning Accuracies at Low Latitudes During Solar Maximum. *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n° 10, 2002.

SOARES, A.P. *Monitoração de anomalias em comunicações via satélite*. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, Brasil, 21 a 26 de outubro, 2001.

SOBRAL, J. H. A.. *Sobre a Importância Estratégica da Ciência Espacial para o Brasil*. <<http://www.agespacial.gov.br/Artigos/revista8.pdf>>, 2002, acesso em março de 2002.

SPACEWEATHER – on line – endereço eletrônico: <http://www.spaceweather.com/archive.php?month=12&day=13&year=2006&view=view>, acesso em outubro de 2010.

SPIPKER Jr, J.J.. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER Jr., J. J.. *Global Positioning System: theory and applications*. Washington: AIAA, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, v.163) p.517-546.

TEUNISSEN, P. J. G. Quality control and GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. *GPS for geodesy*. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1998. Cap. 7, p. 271-318.

THOMPSON, R.; KUNCHES, J. M.. Solar Cycle Number 23 – a progress report. *GPS Solutions* (2002). Vol. 6 p.121-123.

UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) – on line – endereço eletrônico: <<http://www.if.ufrgs.br/~kepler/fis207/esol/esol.htm>> Acesso em: 17 mar. 2004.

WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A.. Use of GPS in the south of Brazil under severe ionospheric conditions. In: *IAG Symposium 111*, Heidelberg, Aug. 13, 1991.

WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A.. Limitations of GPS in equatorial regions due to the ionosphere. In: *VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, May 10-14, 1993. In: International Conference Cartography - Geodesy, Maracaibo, Venezuela, Nov. 24 - Dec. 4, 1992.

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

WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANICEK, P.. *Guide to GPS positioning*. Fredericton: Canadian GPS Associates, 1986.

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