

**WILLIAM RODRIGO DAL POZ**

**POSICIONAMENTO RELATIVO NA REGIÃO  
EQUATORIAL EM DIVERSAS CONDIÇÕES IONOSFÉRICAS**

**Dissertação de Mestrado**

**Presidente Prudente  
2005**

**WILLIAM RODRIGO DAL POZ**

**POSICIONAMENTO RELATIVO NA REGIÃO EQUATORIAL  
EM DIVERSAS CONDIÇÕES IONOSFÉRICAS**

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

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

**Presidente Prudente  
2005**



## DEDICATÓRIA

*Aos meus amados pais Helia Grando Dal Poz e  
Guilherme de Gentilim Dal Poz, aos meus  
queridos irmãos Zinho e Aluir e a minha querida  
noiva Aninha.*

*Pelo incentivo, amor e compreensão.  
Sem vocês eu não conseguiria!*

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

*Pelo carinho e momentos de alegria!*

*Ao meu grande amigo e conselheiro Jairo Roberto  
Alvares (in memoriam).*

*“Saudade – presença dos ausentes”.  
(Olavo Bilac)*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à DEUS, pelo primeiro gesto de amor: a vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo pelo apoio, compreensão e confiança, desde a iniciação científica. A todos os professores do Departamento de Cartografia e Pós Graduação, pelos ensinamentos. A todos os amigos do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE), especialmente ao Prof. Dr. João Francisco Galera Monico, pela dedicação e empenho em manter “firme e forte” o GEGE. À CAPES, pelo apoio financeiro por concessão de uma bolsa de estudo. Aos professores Drs. Inez Staciarini Batista, Ivan Jelinek Kantor, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela disciplina ministrada durante o curso de pós-graduação, intitulada “Introdução à ionosfera e propagação de ondas”. Ao amigo Tomio (o “filósofo”), pelas várias discussões teóricas e práticas sobre a “vida” e pela parceria nos assuntos “ionizantes”. Ao amigo Claudinei (Nerds), pela parceria nas disciplinas cursadas e pela prontidão nos momentos de necessidade. Aos amigos Marco Aurélio (Salgadinho), Rodrigo (“Danone” ou “Peixe”), Thiago, Miriam, Zaqueu, Oludare, Edgar e a todos os alunos do PPGCC, especialmente ao Marcelo (Gaúcho) pelo apoio técnico e voluntariedade. Aos amigos que me ajudaram na coleta de dados GPS, Michele, Igor, Mãozinha, Palma, Christopher e Marcos Aurélio. Ao Nivaldo (Parreira), pelos momentos de descontração nas várias horas de coleta de dados GPS em campo. Aos amigos de Assis: Sérgio, Divani, Alcides e Claudinho, pelos vários momentos de descontração. Por fim, a todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram na execução deste projeto de mestrado.

## **EPIGRAFE**

*Muito sabe quem conhece a própria ignorância.*

*(Confúcio)*

## RESUMO

Assim como no posicionamento por ponto, os resultados obtidos no posicionamento relativo a partir de receptores de uma frequência são afetados pelo efeito sistemático da ionosfera, que atualmente é uma das maiores fontes de erro no posicionamento com GPS. O problema principal no posicionamento relativo é devido ao gradiente espacial do conteúdo total de elétrons (TEC) presente na ionosfera, enquanto que no posicionamento por ponto o principal problema é a magnitude do TEC. Assim, no posicionamento relativo fica mais complicado de se analisar o efeito da ionosfera nos resultados obtidos, principalmente na região equatorial, onde várias irregularidades e anomalias ocorrem. Este projeto analisa o efeito da ionosfera no posicionamento relativo estático na região equatorial, em diversas condições ionosféricas, a partir de uma abordagem teórica e prática. Foram processados dados somente da portadora  $L_1$  com a dupla diferença da fase e do código. A análise dos resultados foi realizada a partir das discrepâncias das coordenadas consideradas verdadeiras com as obtidas no processamento das linhas de base. Três experimentos foram realizados, no qual foi possível analisar a influência da ionosfera no posicionamento relativo a partir de vários aspectos. De uma forma geral, verificou-se na prática a complexidade de definir se determinada linha de base é curta ou média, devido ao gradiente espacial do TEC. Também foram verificados efeitos da cintilação ionosférica e de uma tempestade geomagnética nos resultados obtidos.

**palavras-chave:** Efeito da Ionosfera. GPS. Posicionamento Relativo Estático. Comprimento de Linha de base.

## ABSTRACT

The obtained results in the relative positioning, as well as in the point positioning, are affected by the ionosphere systematic effects, which is one of major error sources in the GPS positioning. The main problem in the relative positioning is due to the Total Electron Content (TEC) variation of the ionosphere, while in the point positioning the main problem is the magnitude of the TEC. Thus, the effects of the ionosphere in the relative positioning are more difficult to analyze, mainly in the equatorial region, where several irregularities and anomalies occur. This research analyzes the ionosphere effect in the relative positioning in the equatorial region considering several ionosphere conditions, both from theoretical and practical standpoints. Only  $L_1$  carrier data have been processed using  $L_1$  phase and C/A-code double-differences. The analyze of the obtained results have been carried out from the discrepancies between the “true” coordinates and corresponding ones obtained in the processing of the baselines. Three experiments have been accomplished, in which it was possible to analyze the ionosphere influence in the relative positioning considering several aspects. In general, due to TEC variations, it has been verified, in practice, the complexity of defining whether a given baseline length is short or medium. It has been also verified in the results the effects of the ionospheric scintillation and of a geomagnetic storm.

**Key-words:** Ionosphere Effect. GPS. Relative Positioning. Baseline Length.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Estações da RBMC.....	16
Figura 02 – Modulação do código sobre a onda portadora.....	27
Figura 03 – Estrutura básica dos sinais GPS. ....	27
Figura 04 – Princípio da medida de pseudodistância. ....	30
Figura 05 – Desvio padrão da pseudodistância filtrada pela fase da portadora.....	56
Figura 06 – Valores do TEC usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase.....	58
Figura 07 – Combinações entre diferentes satélites, épocas e estações.....	59
Figura 08 – Formação da simples diferença. ....	60
Figura 09 – Formação da dupla diferença. ....	63
Figura 10 – Formação da tripla diferença. ....	64
Figura 11 – Possíveis divisões da atmosfera terrestre. ....	66
Figura 12 – Representação esquemática das três camadas solares mais externas. ....	68
Figura 13 – Processo de Fotoionização. ....	69
Figura 14 – Ilustração da formação da ionosfera.....	72
Figura 15 – Conteúdo Total de Elétrons em função da altitude. ....	74
Figura 16 – Imagem da superfície do Sol mostrando algumas manchas solares.....	76
Figura 17 – Número de manchas solares – Ciclos solares.....	77
Figura 18 – Número de manchas solares observadas e previstas – Ciclo 23. ....	78
Figura 19 – Modelo do campo magnético da Terra.....	80
Figura 20 – Influência do vento solar no campo geomagnético. ....	82
Figura 21 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982 .....	86
Figura 22 – Regiões geográficas da ionosfera.....	87
Figura 23 – Esquema de forças agindo no plasma.....	89
Figura 24 – Propagação da fase e do grupo.....	93
Figura 25 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.....	105
Figura 26 – Variação sazonal da ocorrência de bolhas de plasma.....	106
Figura 27 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Junho (2003).....	118
Figura 28 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Outubro (2003) .....	118
Figura 29 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Jan - Fev (2004).....	119
Figura 30 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Abril (2004).....	119

Figura 31 – Mapas do TEC para o Brasil .....	123
Figura 32 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Junho (2003) .....	127
Figura 33 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Outubro (2003) .....	128
Figura 34 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Jan-Fev (2004).....	128
Figura 35 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Abril (2004) .....	128
Figura 36 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Janeiro (2001) .....	131
Figura 37 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Abril (2001).....	131
Figura 38 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Junho (2001) .....	132
Figura 39 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Outubro (2001).....	132
Figura 40 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Janeiro (2001) .....	134
Figura 41 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Abril (2001) .....	134
Figura 42 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Junho (2001) .....	135
Figura 43 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Outubro (2001) .....	135
Figura 44 – Discrepâncias das resultantes planimétricas – Ciclo 23 .....	136
Figura 45 – Discrepâncias das componentes altimétricas – Ciclo 23.....	137
Figura 46 – Imagem da superfície do Sol mostrando a mancha solar 9393 .....	139
Figura 47 – Índice $K_p$ para os dias 30 e 31 de março e 01 de abril de 2001 .....	140
Figura 48 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Dia da explosão .....	141
Figura 49 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Dia da tempestade .....	142
Figura 50 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Um dia após a tempestade.....	142
Figura 51 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Dois dias após a tempestade..	142
Figura 52 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Dia da explosão.....	143
Figura 53 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Dia da tempestade. ....	144
Figura 54 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Um dia após a tempestade.....	144
Figura 55 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Dois dias após a tempestade.....	144
Figura 56 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas.....	146
Figura 57 – Discrepâncias entre as componentes altimétricas. ....	146

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 – Principais fontes de erros e seus efeitos no GPS. ....	36
Tabela 02 – Relação sinal e ruído dos códigos C/A, P e onda portadora .....	44
Tabela 03 – Características das camadas ionosféricas.....	75
Tabela 04 – Valores dos índices Kp e condições da atividade geomagnética. ....	85
Tabela 05 – Classificação de uma tempestade geomagnética .....	86
Tabela 06 – Efeito da ionosfera para diferentes frequências e erro residual na vertical para combinações entre duas frequências. ....	101
Tabela 07 – Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera. ....	102
Tabela 08 – Relação entre tempo de rastreamento e comprimento da linha de base .....	114
Tabela 09 – Informações sobre a coleta de dados – Junho 2003 .....	116
Tabela 10 – Informações sobre a coleta de dados – Outubro 2003 .....	116
Tabela 11 – Informações sobre a coleta de dados – Janeiro – Fevereiro 2004.....	117
Tabela 12 – Informações sobre a coleta de dados – Abril 2004.....	117
Tabela 13 – Solução da ambigüidade para as quatro campanhas de coleta de dados GPS. ....	125

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Descrição Geral .....	14
1.2	Objetivos.....	21
1.3	Justificativa.....	22
1.4	Conteúdo do Trabalho .....	23
2	SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL.....	25
2.1	Considerações Iniciais .....	25
2.2	Características dos Sinais GPS .....	26
2.3	Observáveis GPS .....	29
2.3.1	Pseudodistância.....	30
2.3.2	Fase da onda portadora .....	34
2.4	Erros Envolvidos nas Observáveis .....	36
2.5	Modernização do GPS .....	45
3	COMBINAÇÕES LINEARES DAS OBSERVÁVEIS GPS .....	48
3.1	Combinações Lineares Entre Observações de Mesmo Tipo .....	49
3.2	Combinações Lineares entre Observações de Diferentes Tipos .....	53
3.3	Combinações Lineares Entre Observações de Diferentes Estações .....	59
3.3.1	Simples diferença.....	60
3.3.2	Dupla diferença.....	62
3.3.3	Tripla diferença.....	64
4	IONOSFERA.....	66
4.1	Considerações Iniciais .....	66
4.2	Processo de Ionização.....	68
4.3	Estrutura da Ionosfera.....	71
4.4	Variações do Conteúdo Total de Elétrons .....	75
4.4.1	Variações temporais.....	75
4.4.2	Influência da variação da radiação solar.....	79
4.4.3	Influência do campo geomagnético .....	79
4.4.3.1	Tempestades geomagnéticas.....	82
4.4.3.1.1	Índices geomagnéticos.....	84
4.4.4	Regiões geográficas da ionosfera .....	87

4.4.4.1 Região equatorial .....	88
4.4.4.1.1 Anomalia equatorial ou anomalia de Appleton .....	88
5 IMPACTO DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS .....	91
5.1 Elementos de Propagação de Ondas .....	91
5.2 Índice de Refração da Ionosfera .....	96
5.3 Erro Devido à Ionosfera nos Sinais GPS .....	99
5.4 Cintilação Ionosférica .....	102
6 POSICIONAMENTO RELATIVO .....	107
6.1 Considerações Teóricas Sobre a Influência da Ionosfera na Definição do Comprimento de uma Linha de Base .....	109
7 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES .....	113
7.1 Primeiro Experimento .....	114
7.1.1 Estratégia de processamento .....	114
7.1.1.1 Resultados e análises .....	118
7.2 Segundo Experimento .....	130
7.2.1 Estratégia de processamento .....	130
7.2.1.1 Resultados e análises .....	131
7.3 Terceiro Experimento .....	139
7.3.1 Considerações iniciais .....	139
7.3.1.1 Resultados e análises .....	141
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	153

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Descrição Geral

O Sistema de Posicionamento Global, conhecido por GPS (*Global Positioning System*) ou NAVSTAR-GPS, é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD – Department of Defense*), visando ser o principal sistema de navegação das forças armadas americana. Devido à alta acurácia proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, etc.) (MONICO, 2000).

O GPS foi concebido de tal forma que, em qualquer lugar da superfície terrestre, e a qualquer instante, existam pelo menos, quatro satélites acima do horizonte do usuário. Este número de satélites permite que se realize posicionamento em tempo real. A necessidade de se ter no mínimo quatro satélites é para determinar, além das três coordenadas do ponto de interesse, o não sincronismo entre os relógios dos receptores e dos satélites.

O posicionamento utilizando GPS pode ser realizado na forma absoluta (pontual), relativa ou diferencial (DGPS). No posicionamento por ponto, necessita-se de apenas um receptor, e a posição do ponto é determinada em tempo real ou pós-processada. Este método de posicionamento é muito utilizado em navegação e levantamentos que não necessitem de alta precisão. Na concepção inicial do posicionamento relativo, o usuário deveria dispor de no mínimo dois receptores, visto que a estação base deveria ser ocupada com um dos receptores. Essa concepção inicial era devido às denominadas redes passivas, pois, nesse caso, é necessário ocupar as estações base. Existem várias redes geodésicas passivas, como por exemplo, a Rede GPS do Estado de São Paulo (FONSECA JUNIOR, 1996), do estado do Paraná (SEMA, 1996), a

Rede do Instituto Nacional de Terras do Estado de São Paulo – ITESP (MARINI, 2002), dentre outras.

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 posicionamento relativo. Os dados dos SCA podem ser acessados via Internet, ftp, ou através do uso de tecnologias de armazenamento de dados.

No Brasil teve início, em 1991, pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o projeto de estabelecimento do primeiro SCA, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC, que é a rede de referência ativa mais importante do país. Detalhes sobre a operacionalização da RBMC podem ser encontrados em Fortes (1997). Em 1996, o IBGE começou a estabelecer a rede. Suas estações coletam continuamente as observáveis GPS, sendo a mesma, a principal ligação com redes internacionais e com os sistemas de referência adotados globalmente (COSTA e FORTES, 2000). Atualmente, a RBMC possui 20 estações (figura 1), equipadas com receptores GPS de dupla frequência que operam continuamente.



Figura 1 – Estações da RBMC.

Fonte: adaptada de [www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc).

No Brasil, além da RBMC, os usuários têm a sua disposição dados de outras redes ativas, como é o caso da rede do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA, denominada de Rede INCRA de Bases Comunitárias do GPS (RIBaC). A RIBaC é um conjunto de quarenta e quatro estações GPS, equipadas com receptores GPS de uma frequência, implantadas em diversos pontos do território brasileiro, que tem a finalidade de auxiliar na execução dos serviços de agrimensura e cartografia desenvolvidos, direta ou indiretamente, pelo INCRA. Pode-se ainda citar as redes ativas de empresas privadas, como por exemplo, a rede GPS da Santiago e Cintra (Hyper CBS).

No DGPS, 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.



Um aspecto importante no DGPS é o intervalo de transmissão das correções e suas variações. Quanto maior o intervalo de transmissão, menor será a acurácia da posição corrigida (MONICO, 2000). Outro aspecto relevante que deve ser salientado, diz respeito à distância entre a estação de referência e o receptor que se deseja aplicar as correções (estação móvel). Estando a estação de referência, localizada nas proximidades da região onde se localiza a estação móvel, pode-se dizer que existe uma forte correlação entre os erros das duas estações. Um exemplo desta forte correlação, diz respeito às condições atmosféricas, pois, neste caso, espera-se que elas sejam semelhantes, devido à proximidade das estações. Assim, os erros relacionados com a ionosfera e a troposfera, também possuirão magnitudes aproximadamente iguais para as duas estações. Para explorar todo o potencial do DGPS centenas de estações DGPS deveriam ser estabelecidas para atender aos mais diversos tipos de usuários de uma área ampla (MONICO, 2000). Visando reduzir as deficiências inerentes ao DGPS, foi desenvolvido o WADGPS (*Wide Area DGPS*), sem a necessidade de estabelecer um grande número de estações de referência.

Atualmente, com a desativação da técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva), o erro devido à ionosfera torna-se uma das maiores fontes de erro sistemático no posicionamento com GPS, principalmente, para os usuários de receptores GPS de uma frequência, na solução do posicionamento por ponto, bem como no posicionamento relativo. O erro devido à ionosfera é inversamente proporcional 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. O TEC é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e geomagnética (CAMARGO, 1999). Essas variáveis provocam variações diárias, sazonais e ciclos de longos períodos (ciclos solares) na ionosfera. Estes ciclos ocorrem com períodos de aproximadamente 11 anos, e estão associados com o aumento de manchas solares na superfície do Sol, sendo que o aumento de ionização da ionosfera

é proporcional ao número de manchas. Essas manchas são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol, originadas por intensos campos magnéticos, que inibem o fluxo de energia proveniente das camadas internas e aprisionam os gases da atmosfera solar, que ficam mais quentes e brilhantes, formando regiões ativas, onde ocorrem explosões solares (INPE, 1997). Atualmente o Sol está no ciclo denominado “ciclo 23” (KUNCHES, 2000), e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001, o que ocasionou um aumento do número de elétrons presentes 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*). No entanto, receptores GPS de dupla frequência, são equipamentos caros, implicando em uma ampla utilização de receptores GPS de uma frequência no posicionamento com GPS. Conseqüentemente, alguns métodos são empregados para estimar o efeito sistemático devido à ionosfera na portadora  $L_1$ , para aplicação em receptores GPS de uma frequência. A quantificação deste efeito pode ser feita por meio de (CAMARGO, 1999):

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

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites do sistema GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma

freqüência, utilizando o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987). Vários estudos realizados mostraram que o modelo de Klobuchar pode remover algo em torno de 50% do efeito da ionosfera (NEWBY e LANGLEY, 1992). A porcentagem remanescente do atraso ionosférico diz respeito, principalmente, às variações diárias da ionosfera, que são difíceis de modelar (COCO, et al. 1991).

A técnica de modelagem que utiliza observações coletadas com receptores de simples freqüência é a que proporciona os resultados com menor grau de precisão, devido, principalmente, à baixa precisão das medidas do código, do ruído do receptor e do efeito do multicaminho nas medidas de pseudodistância. O princípio desse método se baseia na diferença entre as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora, ambas coletadas na portadora  $L_1$ . Alguns trabalhos nesta direção já foram realizados, como por exemplo, Cohen, Pervan e Parkinson (1992), Xia (1992) e Qiu, Lachapelle e Cannon (1995). Mais recentemente Alechetchkine et al. (2002) também realizou experimentos nesta direção utilizando um receptor de uma freqüência GLONASS (*Global Navigation Satellite System*)/GPS.

Visando uma estimativa mais acurada do efeito sistemático da ionosfera na portadora  $L_1$ , alguns modelos que utilizam dados de receptores GPS de dupla freqüência foram desenvolvidos. Georgiadiou (1994) estimou os coeficientes de um modelo regional da ionosfera, com dados GPS de um receptor de dupla freqüência do Sistema Ativo de Referência GPS da Holanda. Lanyi e Roth (1988) e Coco et al. (1991) também utilizando uma estação GPS estimaram o TEC. Georgiadiou (1994), ao contrário desses pesquisadores, estimou o erro sistemático na portadora  $L_1$ . Sardón, Rius e Zarraoa (1994) utilizaram diversas estações GPS para esta finalidade.

Vale salientar que estas técnicas são feitas a partir de modelagem, enquanto que no posicionamento relativo a minimização dos erros pode ser realizada a partir da dupla

diferença, ou seja, a partir de combinações entre as observáveis. Vários estudos foram realizados sobre a influência da ionosfera no posicionamento por ponto, no entanto, poucos são os estudos relacionados com o posicionamento relativo. Estes estudos são de extrema importância, visto que no posicionamento relativo definir o comprimento de uma linha de base é extremamente complicado, devido ao gradiente espacial do TEC. Mesmo até em linhas de bases curtas, o vetor ambigüidade pode não ser solucionado como números inteiros (solução “*fixed*”), devido ao alto gradiente espacial do TEC. Nesse caso, um dos receptores poderá estar em um local onde o efeito da ionosfera é mais ou menos ativo do que com relação ao outro. Logo, mesmo na diferenciação entre as observáveis no posicionamento relativo, os erros devido à ionosfera não serão totalmente cancelados, devido à variação do TEC. Desta forma, os resíduos ionosféricos das duplas diferenças dificultarão na solução da ambigüidade, mesmo em linhas de bases curtas. Assim, definir qual o comprimento de uma linha de base não é tarefa fácil, devido principalmente ao gradiente espacial do TEC, que é dependente da hora local, da localização geográfica, do ciclo solar, etc.

Este trabalho apresenta uma análise da influência da ionosfera no posicionamento relativo na região equatorial, em diversas condições ionosféricas, com receptores GPS de uma frequência. Para isso foram realizados três experimentos, sendo que no primeiro foram coletados dados GPS, nas quatro estações do ano, formando linhas de base que variam de 05 a 120 km com relação à estação UEPP, localizada em Presidente Prudente, pertencente à RBMC. Nesses experimentos os valores considerados verdadeiros foram obtidos a partir do processamento com a observação linear livre da ionosfera ( $L_0$ ), pois essa combinação elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Em seguida foram realizados processamentos com a dupla diferença do código e a fase (portadora  $L_1$ ), com o objetivo de obter as discrepâncias para analisar o efeito da ionosfera no posicionamento relativo. No segundo experimento foram

utilizados dados da RBMC das estações PARA (Curitiba) e UEPP (Presidente Prudente), formando uma linha de base de aproximadamente 430 km. Nesse caso os valores considerados verdadeiros foram as coordenadas referenciadas ao SIRGAS 2000, disponível pelo IBGE. Esses dados foram coletados durante o período de máxima atividade solar (2000 - 2001). No terceiro experimento foram utilizados dados dessas mesmas estações, porém, esses dados foram coletados durante uma explosão solar, que por sua vez causou uma tempestade geomagnética. Com isso, foi possível analisar a influência da ionosfera no posicionamento relativo a partir de vários aspectos.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa de mestrado consiste na avaliação do efeito da ionosfera no posicionamento relativo estático, utilizando observáveis GPS da portadora  $L_1$  (código e fase). Sendo assim, os objetivos secundários consistem em:

- Realizar uma ampla revisão bibliográfica sobre a ionosfera e estudar a sua influência no posicionamento com GPS;
- Analisar a influencia do efeito da ionosfera no posicionamento relativo estático de linhas de base que variam de 05 a 120 km;
- Analisar a influência do efeito da ionosfera numa linha de base de aproximadamente 430 km no período de máxima atividade solar (2000 - 2001) e durante uma tempestade geomagnética;
- Análise da solução da ambigüidade em função do comprimento da linha de base; e

- Contribuir como subsídio a bibliografia nacional, levando em conta a dificuldade de se encontrar na literatura nacional pesquisas do gênero.

### **1.3 Justificativa**

O erro devido à ionosfera é uma das maiores fontes de erro sistemático no posicionamento com receptores GPS de uma frequência. Na América do Sul e na América Central, as medidas GPS são afetadas por diversas condições ionosféricas, como por exemplo, o efeito da cintilação ionosférica e da anomalia equatorial (WANNINGER, SEEGER e CAMPOS, 1991 e 1992), (CAMPOS, WANNINGER e SEEGER, 1993). Estas conclusões foram obtidas a partir dos resultados de duas campanhas GPS, denominadas de BRASION'91 e BRASION'92. Assim, investigações relacionadas com a ionosfera na região brasileira são de extrema importância.

Vários estudos já foram realizados no Brasil no que diz respeito à influência da ionosfera no posicionamento por ponto. A influência da ionosfera neste caso é mais previsível, ou seja, se o valor do TEC é alto, os efeitos nos resultados serão maiores, e, em contrapartida, se o valor do TEC for baixo, os resultados no posicionamento por ponto serão menos afetados pela ionosfera. Contudo, no caso do posicionamento relativo isso não é válido. Nesse caso o parâmetro principal que influencia nos resultados é o gradiente espacial do TEC. Por conta disso, nem sempre é válida a afirmação de que à medida que aumenta o comprimento de uma linha de base os erros entre as estações estejam menos correlacionados do que uma linha de base mais curta. Com isso, definir no posicionamento relativo uma linha de base como curta ou média não é tarefa simples. Sua definição depende de vários aspectos, tais como: variação diária da ionosfera, variação sazonal, localização geográfica, entre outros.

Devido ao gradiente espacial do TEC, mesmo até em linhas de bases curtas, pode ser difícil solucionar a ambigüidade. Nesse caso, um dos receptores poderá estar em um local onde o efeito da ionosfera é mais ou menos ativo do que com relação ao outro. Logo, mesmo na diferenciação entre as observáveis no posicionamento relativo, os erros devido à ionosfera não serão totalmente cancelados, devido à variação do TEC. Desta forma, os resíduos ionosféricos dificultarão a resolução da ambigüidade, mesmo em linhas de bases curtas. Em períodos de gradientes horizontais do TEC muito altos, até mesmo utilizando receptores de dupla frequência no posicionamento relativo, podem-se encontrar limitações devido à atividade ionosférica (WANNINGER, SEEBER e CAMPOS, 1991). No Brasil, os efeitos da ionosfera são intensos e várias anomalias e irregularidades ocorrem. Assim, torna-se de fundamental importância realizar um estudo da influência do efeito da ionosfera no posicionamento relativo na região brasileira.

#### **1.4 Conteúdo do Trabalho**

O conteúdo desse trabalho está dividido em oito capítulos, de modo a alcançar os objetivos propostos na pesquisa de mestrado. No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica sobre o GPS, contemplando as características dos sinais, as observáveis, os erros envolvidos nas observáveis, e um breve comentário sobre a modernização do GPS, com ênfase na nova estrutura dos sinais. No terceiro capítulo, são apresentados os modelos matemáticos mais utilizados das observáveis GPS no processo de estimação de parâmetros, abrangendo as combinações lineares entre observações de mesmo tipo, de diferentes tipos e entre observações de diferentes estações. Uma revisão sobre a ionosfera, contemplando o processo de ionização, estrutura da ionosfera e as causas das variações do conteúdo total de elétrons (TEC), é

apresentada no quarto capítulo. No quinto capítulo é abordado o assunto referente ao impacto da ionosfera na propagação dos sinais GPS, descrevendo os elementos de propagação de ondas, o erro devido à ionosfera e o efeito da cintilação ionosférica nos sinais GPS. O método de posicionamento relativo é descrito no sexto capítulo, dando ênfase a uma discussão teórica sobre a influência da ionosfera na definição do comprimento de uma linha de base. Os experimentos, bem como a análise dos resultados obtidos são apresentados no sétimo capítulo. Por fim, no oitavo capítulo, são apresentadas as considerações finais, conclusões e recomendações.



## 2 SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

### 2.1 Considerações Iniciais

O Sistema de Posicionamento Global, conhecido por GPS (*Global Positioning System*) ou NAVSTAR-GPS, é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD – Department of Defense*), visando ser o principal sistema de navegação das forças armadas americana. Devido à alta acurácia proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, etc.) (MONICO, 2000). Este sistema apresenta vantagens sobre os métodos de posicionamento convencionais, tais como rapidez na obtenção de coordenadas, disponibilidade em quaisquer condições climáticas e a não necessidade de visibilidade entre as estações.

A configuração da constelação dos satélites foi concebida de tal forma que, em qualquer lugar da superfície terrestre, e a qualquer instante, existam pelo menos, quatro satélites acima do horizonte do usuário (MONICO, 2000).

As órbitas dos satélites GPS são aproximadamente circulares, com período de órbita de aproximadamente 12 horas siderais (~11 horas e 58 minutos). O semi-eixo maior de uma órbita GPS é de aproximadamente 26560 km, isto é, a altura dos satélites é de aproximadamente 20200 km da superfície terrestre (El-RABBANY, 2002).

O princípio básico de navegação consiste na medida das chamadas pseudodistâncias entre a antena receptora e no mínimo quatro satélites. Este número mínimo de satélites permite que se realize posicionamento em tempo real. A necessidade de se ter no

mínimo quatro satélites é para determinar, além das três coordenadas do ponto de interesse, o não sincronismo entre os relógios do receptor e dos satélites (MONICO, 2000).

## 2.2 Características dos Sinais GPS

Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras na banda L do espectro, que permitem operações em quaisquer condições de tempo, denominadas de  $L_1$  e  $L_2$ . Elas são geradas através da multiplicação eletrônica da frequência fundamental ( $f_0$ ) de 10,23 MHz que é produzida por osciladores altamente estáveis (relógios atômicos de césio e rubídio), com estabilidade entre  $10^{-12}$  e  $10^{-13}$  segundos.

Os sinais GPS devem fornecer meios para determinar não somente posições acuradas em tempo real, mas também velocidades. Isto é possível modulando a portadora com códigos pseudo-aleatórios (PRN - *pseudorandom noise codes*) (LANGLEY, 1998).

Os PRNs são códigos binários criados por algoritmos que geram seus valores em uma seqüência de -1 e +1 ou 0 e 1, que parecem ter uma característica aleatória, no entanto, não é isso que ocorre, motivo pelo qual da origem ao nome pseudo-aleatório. A modulação é feita por um deslocamento de  $180^\circ$  na fase da portadora quando ocorre a mudança de estado. Este processo de modulação é ilustrado na Figura 2 (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001).

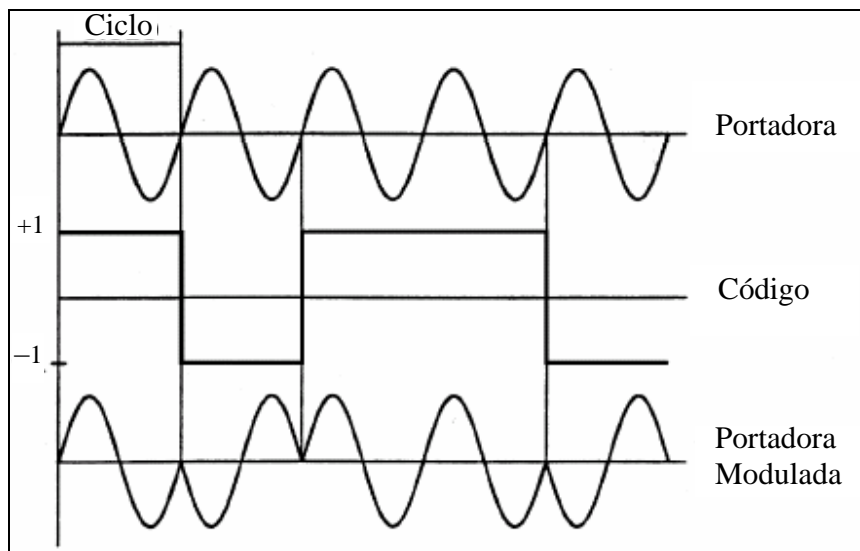


Figura 2 – Modulação do código sobre a onda portadora.  
 Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001).

Dois códigos PRN diferentes são transmitidos por cada satélite GPS: o código C/A (*Coarse Acquisition* - fácil Aquisição) e o código P (*Precise or Protected* – preciso ou protegido). Os satélites GPS podem ser identificados através de um número relacionado a um segmento particular do PRN. A figura 3 mostra, de forma simplificada, como são obtidos os sinais emitidos pelos satélites GPS e os códigos modulados (C/A e P) nas portadoras L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>.

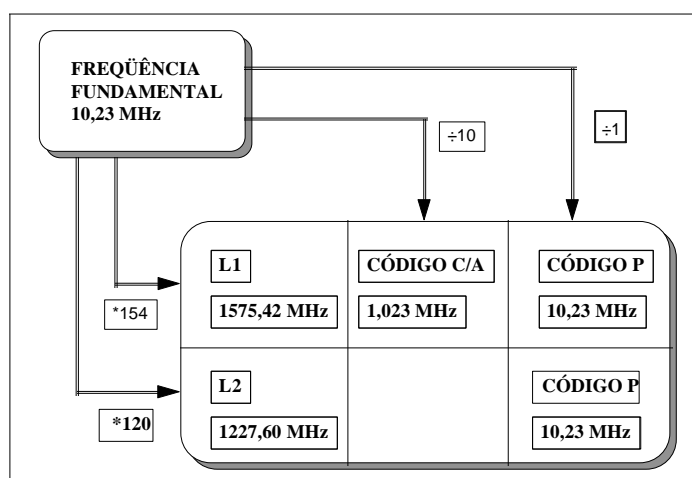


Figura 3 – Estrutura básica dos sinais GPS.  
 Fonte: Monico (2000).

As portadoras  $L_1$  e  $L_2$  têm suas frequências derivadas pela multiplicação da frequência fundamental por 154 e 120, respectivamente, ou seja:

$$f_1 = 154 \times f_0 = 1575,42 \text{ MHz}, \quad (1)$$

e

$$f_2 = 120 \times f_0 = 1227,60 \text{ MHz}, \quad (2)$$

cujos comprimentos de onda são, respectivamente:

$$\lambda_1 \cong 19,04 \text{ cm}, \quad (3)$$

e

$$\lambda_2 \cong 24,45 \text{ cm}. \quad (4)$$

A portadora  $L_1$  é modulada em fase com os dois códigos (C/A e P) e com as mensagens de navegação. Já a portadora  $L_2$  é modulada apenas pelo código P, juntamente com as mensagens de navegação.

A frequência do código C/A ( $f_{C/A} = 1,023 \text{ MHz}$ ) corresponde a 10% da frequência fundamental, e a frequência do código P ( $f_P = 10,23 \text{ MHz}$ ) é coincidente com a da frequência fundamental. Logo, para os códigos C/A e P, se obtém, respectivamente, os comprimentos de *chip* da ordem de 293,1 m e 29,31 m.

Conforme já mencionado, os dois códigos binários (C/A e P) são gerados por algoritmos, que, de forma pseudo-aleatória, fazem com que seus valores resultem numa sequência de (+1) e (-1). É através dessa sequência pseudo-aleatória que os códigos transportam informações aos receptores.

Somente usuários autorizados têm acesso aos códigos P quando o AS (*Anti-Spoofing*) está ativado. O AS refere-se à não permissão de acesso ao código P, através da aplicação de criptografia, resultando num código protegido, denominado de Y. O código Y é resultante de uma combinação dos códigos P e W. Este último é gerado numa razão de 50 bps, ao passo que o P apresenta uma razão de  $10,23 \times 10^6$  bps. O AS foi implementado em 31 de janeiro de 1994, em todos os satélites do Bloco II, e pode ser ativado e desativado (MONICO, 2000).

### 2.3 Observáveis GPS

Das observáveis obtidas, a partir de informações dos sinais transmitidos pelos satélites GPS, podem-se identificar quatro tipos (SEEBER, 2003):

- medições de pseudodistâncias, a partir dos códigos (C/A ou P);
- diferenças de pseudodistâncias, a partir da contagem integrada Doppler;
- fase de batimento da onda portadora ou diferença da fase de batimento da onda portadora; e
- diferenças do tempo de viagem do sinal, a partir das medições interferométricas.

Destes quatro tipos de observáveis GPS, duas são mais importantes e utilizadas em posicionamento: a pseudodistância e a fase de batimento da onda portadora, também referida como fase da onda portadora ou simplesmente fase da portadora. Na seqüência serão descritas essas duas observáveis.

### 2.3.1 Pseudodistância

A pseudodistância representa a distância medida entre a antena do satélite e a antena receptora, e pode ser obtida através dos códigos C/A sobre a portadora  $L_1$  e/ou com o código P sobre as portadoras  $L_1$  e  $L_2$ . Ela é obtida pela multiplicação do tempo de propagação do sinal pela velocidade da luz no vácuo, considerando um modelo teórico. As medidas de distância entre o satélite e o receptor, ou seja, as pseudodistâncias baseiam-se nos códigos gerados nos satélites ( $G^S(t)$ ) e no receptor ( $G^R(t)$ ). O receptor gera uma réplica do código produzido no satélite, sendo que o retardo entre a chegada de uma transmissão particular do código, gerado no satélite, e a sua réplica, gerada no receptor, nada mais é do que o tempo de propagação do sinal no trajeto entre as antenas do satélite e receptor. O tempo de propagação do sinal corresponde ao tempo de deslocamento necessário para que haja a máxima correlação da seqüência do código emitido pelo satélite e a réplica gerada pelo receptor. Este tempo multiplicado pela velocidade da luz no vácuo gera a pseudodistância, em condições ideais, ou seja, num modelo teórico, sem considerar os erros inerentes ao deslocamento do sinal GPS até o rastreo pelo receptor. A figura 4 mostra o princípio da medida de pseudodistância (MONICO, 2000).

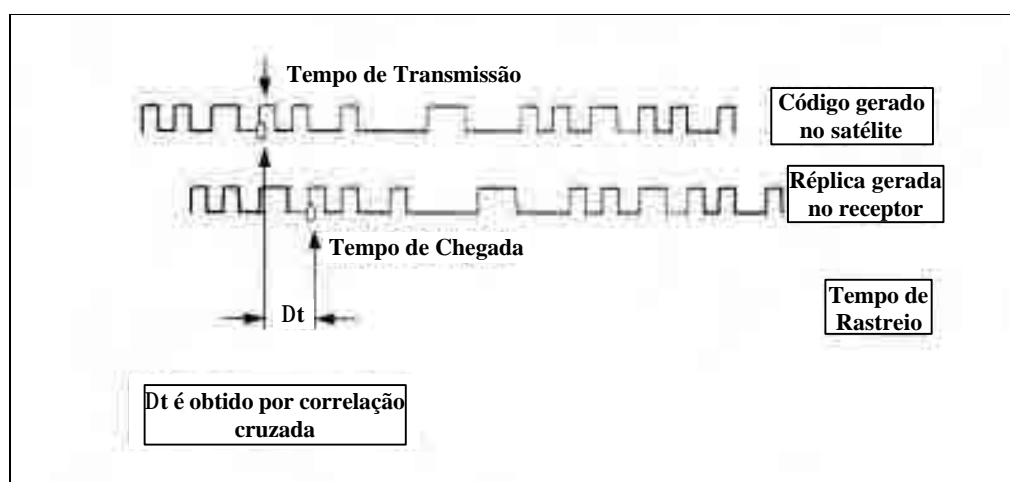


Figura 4 – Princípio da medida de pseudodistância.  
Fonte: Monico (2000)

A técnica de correlação do código é aplicada, para acessar a portadora, quando o AS não está ativado. Nessa técnica, todos os componentes envolvidos no sinal do satélite são obtidos: leitura do relógio do satélite, mensagens de navegação e a portadora sem modulação (MONICO, 2000). Ela é, normalmente, empregada, para acessar a portadora  $L_1$ , através do código C/A, e o acesso à portadora  $L_2$  é conseguido somente pelos usuários que têm permissão para utilizar o código P criptografado, ou seja, o código Y. Como a portadora  $L_2$  tem modulada sobre ela apenas o código P, que está sujeito ao AS, ela só pode ser acessada por uma das várias técnicas disponíveis para o processamento do sinal, tais como: quadratura do sinal, correlação cruzada e a técnica denominada Z (MONICO, 2000). Dependendo do receptor, pode-se obter uma, duas ou três pseudodistâncias, através dos códigos C/A e  $P_1$  em  $L_1$  e do código  $P_2$  em  $L_2$ . Futuramente, com a modernização do GPS, no qual será incluído um novo código civil na portadora  $L_2$ , será possível obter quatro medidas de pseudodistâncias. Na seção (2.5) será abordado brevemente o assunto sobre a modernização do GPS.

Os relógios dos receptores e dos satélites não são sincronizados entre si e não coincidem com o sistema de tempo GPS. Devido ao não sincronismo entre os relógios dos receptores e dos satélites, dos quais derivam os códigos, a quantidade medida difere da distância geométrica entre o satélite e o receptor, e por isso é denominada pseudodistância. Além disto, a propagação do sinal, através da troposfera e da ionosfera, afeta diretamente a medida da pseudodistância.

Sem considerar os erros inerentes à obtenção da pseudodistância, num sistema teórico, ela pode ser dada por (MONICO, 2000):

$$P_r^s = c (t_r - t^s), \quad (5)$$

onde:

$P_r^s$  - representa a pseudodistância medida entre a antena do satélite (s) e a antena do receptor (r);

$c$  - é a velocidade da luz no vácuo;

$t_r$  - é o tempo de recepção do sinal no receptor; e

$t^s$  - é o tempo de transmissão do sinal pelo satélite.

Os estados dos relógios do satélite e do receptor, que representam o erro de sincronismo entre o sistema de tempo GPS ( $T_{GPS}$ ) e os respectivos relógios, são relacionados com os mesmos, a partir das seguintes expressões (MONICO, 2000):

$$T_{GPS}^s = t^s - dt^s, \quad (6)$$

$$T_{GPS_r} = t_r - dt_r, \quad (7)$$

no instante de transmissão e recepção do sinal, respectivamente, onde:

$dt^s$  - é o erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante  $t^s$ ; e

$dt_r$  - é o erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante  $t_r$ .

Os subscritos e sobrescritos referem-se, respectivamente, as quantidades relacionadas ao receptor (r) e ao satélite (s).

Assim, depois de algumas operações algébricas com as equações (5), (6) e (7), obtém-se que:



$$P_r^s = c(T_{GPS_r} - T_{GPS}^s) + c(dt_r - dt^s), \quad (8)$$

que pode ser reescrita considerando, também, os efeitos da atmosfera e de órbita, da seguinte forma (WELLS et al., 1986):

$$P_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dp + e_{p_r^s}, \quad (9)$$

onde:

$I_r^s$  - é o erro sistemático, devido à ionosfera;

$T_r^s$  - é o erro sistemático, devido à refração troposférica;

$dp$  - é o erro de órbita; e

$e_{p_r^s}$  - representa os erros aleatórios e demais erros sistemáticos na medida de pseudodistância.

As coordenadas da antena receptora e do satélite estão implícitas na distância geométrica  $\rho_r^s$  dada por:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}, \quad (10)$$

onde:

$X^s, Y^s, Z^s$  - são as coordenadas cartesianas do satélite (s); e

$X_r, Y_r, Z_r$  - são as coordenadas cartesianas da antena receptora (r).

### 2.3.2 Fase da onda portadora

A fase da onda portadora é a observável básica para a maioria dos levantamentos geodésicos. A medida da fase da portadora é obtida pela diferença entre a fase do sinal recebido do satélite ( $\phi^s$ ) e sua réplica gerada pelo receptor ( $\phi_r$ ), o que resulta em uma parte fracionária. Quando um receptor é ligado, além dessa parte fracionária medida, inicia-se um contador de ciclos inteiro. Durante o rastreamento, o contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase fracionária muda de  $2\pi$  para 0. Assim, numa determinada época, a fase instantânea acumulada é a soma da medida fracionária da fase com um determinado número de ciclos inteiros (LEICK, 1995).

Quando é utilizada a medida da fase da onda portadora como observável, torna-se necessário determinar o número de ciclos inteiros envolvidos entre os centros de fase, no instante da primeira medida. Esse número é denominado ambigüidade GPS ( $N_r^s$ ), o qual permanece constante, caso não ocorra obstrução do sinal (LEICK, 1995).

Como já mencionado, na primeira medida a observável é a parte fracionária de um ciclo. Assim, não se conhece na primeira época de observação a ambigüidade GPS. A partir disso, o receptor realiza a contagem de ciclos inteiros. Isto faz com que a medida da fase da onda portadora seja ambígua, com relação a um número de ciclos inteiros, envolvidos entre a antena receptora e os satélites na primeira época de observação.

A fase observada ( $\phi_r^s$ ) no instante de recepção, na escala de tempo do receptor, em unidades de ciclos, é dada por (MONICO, 2000):

$$\phi_r^s = \phi^s - \phi_r + N_r^s + e_{\phi_r^s}, \quad (11)$$

onde:

$\phi^s$  - é a fase da portadora gerada no satélite s e recebida na estação r no instante de recepção;

$\phi_r$  - é a fase gerada no receptor no instante de recepção;

$N_r^s$  - é a ambigüidade da fase; e

$e_{\phi}$  - representa os erros aleatórios e demais erros sistemáticos na medida de fase da onda portadora

Uma expressão similar à equação (9) em unidades de comprimento e de forma completa, é apresentada por (WELLS et al., 1986):

$$\lambda\phi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_r^s + T_r^s + dp + \lambda N_r^s + e_{\phi_r^s}, \quad (12)$$

sendo  $\lambda$  o comprimento da onda do sinal da portadora ( $L_1$  ou  $L_2$ ). Os demais termos já foram descritos.

Devido ao avanço sofrido pela observável fase da onda portadora, ao atravessar a ionosfera, o efeito deste comporta-se de maneira oposta ao caso da equação da pseudodistância, que por sua vez, sofre um retardo. Tal fato fica evidenciado pelo sinal negativo do erro sistemático ( $I_r^s$ ) devido à ionosfera, pois um avanço na fase provoca uma diminuição na distância obtida a partir do mesmo. Outra diferença entre a observável da fase e a pseudodistância é o termo da ambigüidade, presente somente na observação da fase.

Se a ambigüidade for solucionada como um número inteiro, e após seu valor ter sido acrescido da fase da onda portadora, que é medida com precisão milimétrica, ter-se-á, na verdade, uma “pseudodistância” com precisão milimétrica. A precisão da medida da fase da onda portadora é da ordem de 1000 vezes melhor do que a medida de pseudodistância, pois a precisão desta última é métrica. No entanto, com relação ao modelo matemático da fase da onda portadora, além das coordenadas de interesse como incógnitas, têm-se as ambigüidades como incógnitas adicionais. Estas são estimadas no processo de ajustamento como números reais (solução *float*), e requerem procedimentos não convencionais de estimar tais parâmetros como números inteiros (solução *fixed*). Este processo de estimar as ambigüidades *float* como números inteiros é conhecida como solução da ambigüidade, e não se trata de um problema trivial.

## **2.4 Erros Envolvidos nas Observáveis**

As observáveis GPS 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 GPS em três grupos principais, sendo eles: satélite, propagação do sinal e receptor.

A tabela 1 apresenta uma relação das principais fontes de erros no GPS, bem como seus efeitos.

Tabela 1 – Principais fontes de erros e seus efeitos no GPS.

<b>Fontes</b>	<b>Efeitos</b>
Satélite	Erro orbital Erro no relógio do satélite Atraso instrumental 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 instrumental 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. Assim, nota-se que o tratamento dos erros varia de acordo com a precisão requerida. Muitos deles são minimizados no posicionamento relativo ou pela combinação linear entre as portadoras  $L_1$  e  $L_2$ . Outros são reduzidos na adoção de modelos matemáticos adequados. Vale salientar ainda que vários desses erros dependem do comprimento da linha de base formada no posicionamento relativo. Conseqüentemente, no caso desse método de posicionamento, os erros podem ser subdivididos em erros correlacionados e não correlacionados espacialmente, a saber (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.

Nessa seção, serão descritos brevemente os erros relacionados na tabela 1. Informações adicionais podem ser obtidas em Seeber (1993), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001), Leick (1995), Parkinson e Spilker Jr. (1996) e Monico (2000).

A partir das efemérides transmitidas, precisas ou preditas é possível calcular as coordenadas dos satélites em um dado instante. No entanto, as coordenadas calculadas diferem das suas coordenadas “verdadeiras”, devido, principalmente, à incapacidade de modelar completamente as forças que agem nos satélites. Essas discrepâncias são denominadas de erros orbitais. No posicionamento por ponto, os erros orbitais são propagados diretamente para a posição do usuário. No posicionamento relativo os erros orbitais são praticamente eliminados, mas os erros remanescentes degradam a acurácia da linha de base, conforme esta se torna mais longa (MONICO, 2000).

Como regra prática, o efeito do erro orbital na determinação de uma determinada linha de base pode ser obtido de acordo com a seguinte expressão (WELLS et al., 1986):

$$\Delta b = b \frac{\Delta_r}{r}, \quad (13)$$

onde:

$\Delta b$  - e o erro resultante na linha de base;

$b$  - é o comprimento da linha de base (km);

$\Delta_r$  - é o erro na posição do satélite (erro orbital); e

$r$  - é a distância do satélite ao receptor ( $\cong 20.200$  km).

Mesmo considerando a alta estabilidade dos relógios dos satélites, os mesmos não estão perfeitamente sincronizados com o tempo GPS. O valor pelo qual eles diferem do tempo GPS faz parte das mensagens de navegação, na forma de coeficientes de um polinômio de segunda ordem, dado por (MONICO, 2000):

$$dt^s(t) = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2, \quad (14)$$

sendo:

$dt^s(t)$  - erro do relógio no instante  $t$  da escala de tempo GPS;

$t_{oc}$  - instante de referência do relógio;

$a_0$  - estado do relógio no instante de referência;

$a_1$  - marcha linear do relógio, e;

$a_2$  - variação da marcha do relógio.

Desta forma os erros dos relógios dos satélites podem ser calculados e considerados no processo de estimação das coordenadas. Da mesma forma que os relógios dos satélites, os relógios dos receptores não estão sincronizados com o tempo GPS. No posicionamento por ponto o erro do relógio é uma das incógnitas do modelo e pode ser estimado com precisão de  $10^{-8}$  do segundo (MONICO, 2000). No entanto, no posicionamento relativo o erro do relógio do receptor é minimizado. Um fator de extrema importância no posicionamento relativo diz respeito à simultaneidade das observações. Nesse caso, para se obter resultados de alta precisão, o erro do relógio de cada receptor envolvido no posicionamento deve ser conhecido no nível de  $10^{-6}$  do segundo em relação ao tempo GPS, isto é, um microssegundo, e a diferença entre eles não deve exceder um milissegundo (LEICK, 1995).

A diferença entre os caminhos percorridos pelas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , através dos dispositivos internos do satélite e do receptor é designada de atraso instrumental interfrequência do receptor e do satélite, respectivamente (MONICO, 2000). O atraso instrumental para cada satélite pode ser obtido pelo valor do TGD (*Time Group Delay*) que consta nas mensagens de navegação (WILSON et al., 1999) ou de produtos da ionosfera do *International GNSS Service* (IGS).

No caso dos receptores, a estimativa do atraso instrumental interfrequência é realizada a partir de técnicas apropriadas de modelagem (exemplos: LANYI e ROTH, 1988; COCO et al., 1991; WILSON e MANNUCCI, 1993; SARDÓN, RIUS e ZARRAOA, 1994; KOMJATHY, 1997; CAMARGO, 1999; entre outros). Nestas técnicas também se estima o atraso instrumental dos satélites. Uma característica importante do atraso instrumental interfrequência (satélite e receptor) é que seu valor é praticamente constante durante um longo período. Sardón e Zarraoa (1997) mostram em seus experimentos que durante um período de 19 meses de estudo, a variação do atraso instrumental interfrequência dos satélites e dos receptores entre dois dias consecutivos é na maioria dos casos menor do que 0,5 ns e 1 ns, respectivamente.

Na troposfera, a propagação do sinal é influenciada pelo conteúdo do vapor de água, da pressão do ar e da temperatura. Para frequências inferiores a 30 GHz, a refração troposférica independe da frequência do sinal transmitido (LEICK, 1995).

No que concerne aos erros relacionados com a troposfera, podem-se citar três efeitos (SPILKER Jr., 1996):

- atenuação atmosférica;
- cintilação troposférica; e
- refração troposférica.



No entanto, devido à frequência utilizada pelo GPS, a atenuação atmosférica e a cintilação troposférica podem ser negligenciadas, exceto para pequenos ângulos de elevação (menores que 10 graus). Sendo assim, o atraso troposférico é a principal fonte de erro no posicionamento com GPS devido à troposfera. Seu efeito é gerado pela influência da atmosfera hidrostática e úmida. No primeiro caso o efeito corresponde a aproximadamente 2,3 m no zênite. No segundo caso, o efeito é geralmente menor, variando de 1 a 30 cm no zênite. No entanto, sua variação é maior do que no primeiro caso, o que torna impossível sua predição com boa precisão (MONICO, 2000).

A minimização do efeito da refração troposférica é feita por meio de técnicas de processamento, ou por meio de modelos, como por exemplo, o de Hopfield (SEEBER, 2003) e o de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973), que são os modelos mais conhecidos.

De uma forma geral, a refração troposférica é aproximada como a soma das componentes hidrostática e úmida, da seguinte forma (MONICO, 2000):

$$T_r^s = [T_{zh} mh(E) + T_{zw} mw(E)], \quad (15)$$

onde:

$T_r^s$  - representa o valor da refração troposférica total;

$T_{zh}$  - representa o atraso zenital da componente hidrostática;

$T_{zw}$  - representa o atraso zenital da componente úmida, e

$mh(E)$  e  $mw(E)$  - funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida com o ângulo de elevação (E) do satélite, respectivamente.

Vale salientar que, basicamente, os modelos de Hopfield e Saastamoinen se diferem na forma pela qual modelam os atrasos zenitais (úmido e hidrostático) e relacionam os atrasos das componentes úmida e hidrostática com o ângulo de elevação (E) do satélite. Outros modelos também foram desenvolvidos, tais como o modelo *Black e Eisner* (SPILKER Jr., 1996), dentre outros.

O multicaminho ocorre quando a antena do receptor recebe, além do sinal direto do satélite, sinais refletidos por superfícies e objetos localizados nas proximidades da antena. Sendo assim, a ocorrência desse efeito depende do meio onde a antena do receptor esteja instalada. Sinais com frequências distintas são afetados diferentemente pelo multicaminho. Várias são as técnicas que podem ser tomadas para redução de multicaminho, tais como: evitar a presença de superfícies refletoras nas proximidades das antenas receptoras, bem como, utilizar antenas apropriadas (ex: *choke-ring*). Outras técnicas para redução de multicaminho podem ser encontradas em Menezes de Souza (2003), tais como: processamento espacial de várias antenas, calibrações de estações para o efeito de multicaminho, observação de sinal por longo tempo e técnicas de *software* ou métodos de processamento.

O efeito do multicaminho sobre as medidas de pseudodistância é maior do que sobre as medidas de fase (MONICO, 2000). Vários estudos foram realizados com relação ao multicaminho na fase da onda portadora, onde se concluiu que (LEICK, 1995):

- O erro máximo é de aproximadamente  $1/4$  do comprimento de onda;
- A frequência do multicaminho está em função do ângulo de elevação do satélite; e

- O efeito do multicaminho é proporcional a distância perpendicular entre a antena e a superfície refletora e inversamente proporcional ao comprimento de onda do sinal.

Quando o sinal de um ou mais satélites rastreados pelo receptor for interrompido, ocorre uma perda da contagem dos ciclos acumulados da fase. Essa perda de contagem dos ciclos é conhecida como perda de ciclo. Como consequência de uma perda de ciclo, é introduzido um salto de um número inteiro de ciclos nas observações realizadas, sendo que a parte fracionária da medida de fase da onda portadora não é afetada por esta descontinuidade na contagem dos ciclos (LEICK, 1995). A perda de ciclos pode ocorrer de um instante para outro, ou durante um intervalo de vários instantes. Durante o rastreamento de sinais GPS, podem ocorrer várias perdas de ciclos, sendo que o número de ciclos pode variar de um a milhões de ciclos (LEICK, 1995). No caso da detecção de perdas de ciclos, podem-se corrigir as observações somando-se o número de ciclos que provocou o salto nas observações afetadas, ou ainda desconsiderar os dados ou adicionar novas incógnitas no modelo.

O centro de fase eletrônico da antena é o ponto no qual as medidas dos sinais são referenciadas, e geralmente não coincide com o centro geométrico da antena. A discrepância varia de acordo com a intensidade e direção dos sinais, e é diferente para cada uma das duas portadoras (MONICO, 2000). Um modo prático para minimizar os efeitos oriundos da variação do centro de fase da antena consiste na utilização de antenas do mesmo modelo, desde que sempre sejam instaladas na mesma direção, como por exemplo, o norte magnético. Este é o motivo no qual alguns receptores possuem uma marca indicando o norte magnético (SEEBER, 1993). Assim, espera-se que o seu efeito, no caso do posicionamento relativo, sejam aproximadamente iguais em ambos receptores. Consequentemente, no processo de diferenciação

das observáveis os erros serão minimizados. Vale salientar que seus efeitos são normalmente tratados no posicionamento de alta precisão.

Durante o processo de medição, o receptor produz ruído, gerando desta forma observáveis de pseudodistância e fase “ruidosas”. Como regra geral, a resolução de uma observação para receptores é de aproximadamente 1% do comprimento de onda ou de *chip* (SEEBER, 1993). Assim, no caso dos sinais GPS se tem a seguinte situação (SEEBER, 1993):

Tabela 2 – Relação sinal e ruído dos códigos C/A, P e onda portadora

Sinal	Comprimento de onda ou <i>chip</i>	Ruído
Código C/A	300 m	3m
Código P	30 m	30 cm
Onda Portadora	20 cm	2 mm

Fonte: Seeber (1993).

No entanto, recentes desenvolvimentos demonstram que uma melhor precisão é atingida (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001). De fato, por exemplo, Gao, Liao e Liu (2002) salientam que tipicamente tem-se uma precisão de 0,2 a 0,3 m para a pseudodistância advinda do código C/A em  $L_1$ . Esse valor está condizente com o valor da precisão para a pseudodistância (C/A) das estações da RBMC. Com relação às observações advindas do código P em  $L_2$  para a maioria das estações da RBMC tem-se uma precisão da ordem de 0,7 a 0,8 m (PEREIRA, FAZAN e FORTES, 2003). Baixo ruído nas observações do código é importante para solução da ambigüidade em tempo real (SEEBER, 1993). Vale salientar que o nível de multicaminho é uma função da tecnologia de rastreamento dos receptores, do tipo de antena e do local de instalação da mesma, enquanto que, o erro devido ao ruído do receptor é função somente da tecnologia utilizada pelo receptor (ALVES, 2004).

Os erros relacionados com o atraso do código e avanço da fase serão descritos com detalhes no capítulo (5).

## 2.5 Modernização do GPS

A atual estrutura dos sinais GPS foi proposta no início de 1970, ou seja, mais de 30 anos atrás. Várias evoluções tecnológicas ocorreram no decorrer desses anos, sendo assim, era inevitável uma proposta de modernização na estrutura dos sinais GPS.

Em janeiro de 1999, os EUA anunciaram uma iniciativa de 400 milhões de dólares para a futura modernização do GPS. A principal característica desta iniciativa é a implementação de uma nova estrutura dos sinais GPS (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001). No presente momento, o código C/A é modulado somente sobre a portadora  $L_1$ , enquanto que o código P é transmitido em ambas as portadoras  $L_1$  e  $L_2$ . Com a modernização do GPS, um novo código civil (C/A) será implementado na portadora  $L_2$ . Esse código será mais robusto do que o código C/A modulado na portadora  $L_1$  e uma melhor qualidade nas medidas de pseudodistâncias serão obtidas. A frequência de um terceiro sinal civil, conhecida como  $L_5$ , foi escolhida em janeiro de 1999. A frequência desse sinal é de 1176,45 MHz, e compreende a porção do espectro que está reservado para serviços aeronáuticos de radio-navegação (ARNS), que é essencial para a navegação (SHAW, SANDHOO e TURNER, 2000).

A portadora  $L_5$  foi especificada para ser melhor do que a  $L_1$  em várias formas, tais como (SHAW, SANDHOO e TURNER, 2000):

- Mais potente;
- Mais resistente a interferências;

- Terá uma componente desprovida de dados, o que melhorará a capacidade de rastreamento; e
- Melhor acurácia, mesmo na presença de multicaminho.

Com a adição de um segundo código civil (C/A em L<sub>2</sub>) e um terceiro sinal (L<sub>5</sub>), a redundância das observações será maior, o que implicará em um melhor nível de acurácia no posicionamento, melhora da disponibilidade<sup>1</sup> e integridade<sup>2</sup> do sinal, e também da garantia da continuidade do serviço. Essas melhorias referem-se ao Serviço de Posicionamento Padrão (SPS – *Standard Positioning Service*). Melhorias também serão realizadas no Serviço de Posicionamento Preciso (PPS – *Precise Positioning Service*), devido à necessidade do desenvolvimento de medidas para prevenir o uso hostil do GPS, assegurando assim que os Estados Unidos e seus aliados tenham uma vantagem militar. Para isso, foi designado o que é referido como os três “Ps” (SHAW, SANDHOO e TURNER, 2000):

- **Proteção** de serviços militares em locais de operação;
- **Prevenção** de exploração adversária dos serviços GPS;
- **Preservação** dos serviços civis fora dos locais de operação.

Para realizar com sucesso os três “Ps”, os militares terão que ter a capacidade de habilitar e desabilitar seletivamente os sinais GPS nos locais onde possam ser utilizados hostilmente, sem interferir no uso do GPS pelos civis em outros locais. Para atingir esses

---

<sup>1</sup> É necessária para que usuários estejam certos que o serviço é acessível quase que 100% do tempo.

<sup>2</sup> É a capacidade de alertar os usuários, dentro de um número de segundos pré-estabelecido, quando o GPS não deve ser usado.

objetivos com êxito, será necessário separar a porção do espectro civil dos militares. Para isso, na modernização do GPS terão que ser criados novos códigos militares, denominados coletivamente de código M (implementados nos satélites do bloco IIR-M), que reutilizará porções do espectro das portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , de tal forma que será possível distinguir espectralmente os códigos M dos códigos C/A modulados nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ .

O *U.S. Coast Guard Navigation Center* mantém um *site* do GPS, onde várias informações e artigos sobre a modernização do GPS também podem ser encontrados, no seguinte endereço: <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/>.

### 3 COMBINAÇÕES LINEARES DAS OBSERVÁVEIS GPS

As observáveis mais importantes e utilizadas no posicionamento com GPS são a pseudodistância, obtida a partir do código (C/A ou P), e a fase da onda portadora. Enquanto a primeira observação é utilizada em navegação, a segunda é utilizada em levantamentos geodésicos.

A partir de combinações lineares das observáveis, podem-se formar vários modelos matemáticos para o processo de estimação dos parâmetros incógnitos (posições, erros não modelados, etc.). Dependendo do tipo de aplicação e do nível de precisão desejada, podem-se fazer os seguintes tipos de combinações lineares entre as observáveis de (SEEBER, 2003):

- diferentes estações;
- diferentes satélites;
- diferentes épocas;
- mesmo tipo; e
- diferentes tipos.

Neste tópico serão descritas as combinações entre observações de mesmo tipo, entre diferentes tipos e entre diferentes estações, pois estas são as mais empregadas no processo de estimação de parâmetros.



### 3.1 Combinações Lineares Entre Observações de Mesmo Tipo

Uma quantidade não limitada de combinações pode ser realizada entre observações de mesmo tipo, com diversos interesses, dentro dos quais se destacam (WÜBBENA 1989):

- produzir ambigüidade inteira, através de coeficientes inteiros;
- ter um razoável comprimento de onda, para ajudar a fixar as ambigüidades;
- eliminar a influência de primeira ordem da ionosfera, e;
- manter pequena a medida do ruído.

Uma combinação linear ( $CL_i$ ) das fases das portadoras  $\phi_1$  e  $\phi_2$ , respectivamente em L1 e L2, é dada por (MONICO, 2000):

$$CL_i = m_1\phi_1 + m_2\phi_2, \quad (16)$$

onde o sub índice i identifica a combinação linear,  $m_1$  e  $m_2$  são coeficientes,  $\phi_1$  é a fase medida da portadora L1 e  $\phi_2$  a fase medida da portadora L2.

Da relação entre tempo, fase e frequência ( $t = \phi_1 / f_1$ ) tem-se que:

$$\phi_1 = f_1 t, \quad (17)$$

logo, a expressão (16) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$CL_i = m_1 f_1 t + m_2 f_2 t = f_{m_1 m_2} t, \quad (18)$$

onde:

$$f_{m_1 m_2} = m_1 f_1 + m_2 f_2, \quad (19)$$

é a frequência derivada do sinal. O comprimento de onda da combinação linear é dado por:

$$\lambda_{m_1 m_2} = c / f_{m_1 m_2}, \quad (20)$$

e a nova ambigüidade por:

$$N_{m_1 m_2} = m_1 N_1 + m_2 N_2 \quad (21)$$

O desvio padrão ( $\sigma_{CL_i}$ ) da combinação linear das fases é obtido através da propagação de covariância das observações das fases originais, em unidades de ciclos. Se não há correlação entre  $\phi_1$  e  $\phi_2$ , tem-se que:

$$\sigma_{CL_i} = \sqrt{(m_1)^2 \sigma_{\phi_1}^2 + (m_2)^2 \sigma_{\phi_2}^2}, \quad (22)$$

Admitindo que os desvios padrão das fases medidas em L1 e L2 são iguais ( $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = \sigma_{\phi}$ ), então, a expressão (22) fica da seguinte forma:

$$\sigma_{CL_1} = (\sqrt{m_1^2 + m_2^2}) \sigma_\phi, \quad (23)$$

A expressão (23) é dada em unidades de ciclos. Para obter o resultado em unidades de comprimento, basta multiplicar pelo comprimento de onda resultante da combinação linear, de acordo com a expressão (20), da seguinte forma:

$$\sigma_{CL_1} = \lambda_{m_1 m_2} (\sqrt{m_1^2 + m_2^2}) \sigma_\phi, \quad (24)$$

As combinações mais simples são conhecidas como *wide lane* ( $L_W$ ) e *narrow lane* ( $L_N$ ). A observável obtida com a *wide lane* é resultante da combinação linear da fase da portadora em L1 e L2, com  $m_1 = 1$  e  $m_2 = -1$ , e a *narrow lane* é derivada com  $m_1 = m_2 = 1$ . A partir da equação 16, ambas são dadas, respectivamente, por (SEEBER, 2003):

$$\begin{aligned} L_W &= \phi_1 - \phi_2, \\ L_N &= \phi_1 + \phi_2. \end{aligned} \quad (25)$$

Os correspondentes comprimentos de ondas das combinações expressas pela expressão (25) são dados por:

$$\begin{aligned} \lambda_W &= 86,2 \text{ cm}, \quad \text{com} \quad \sigma_{L_W} = 19,4 \text{ mm}, \\ \lambda_N &= 10,7 \text{ cm}, \quad \text{com} \quad \sigma_{L_N} = 2,1 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (26)$$

Nota-se que o comprimento de onda do sinal obtido com *wide lane* é por volta de quatro vezes maior que as originais. Isto pode facilitar na solução da ambigüidade, no entanto, é influenciado pelo efeito da ionosfera, que não é eliminado, e apresenta um ruído seis vezes maior do que as observações originais (SEEBER, 2003). Na combinação *narrow lane*, o comprimento da onda do sinal é duas vezes menor que as originais, o que torna difícil a solução da ambigüidade. O seu uso se restringe, principalmente, a linhas de bases muito curtas, com o uso de dados da portadora  $L_1$ , e, devido ao baixo ruído das observações, produz melhores resultados (SEEBER, 1993).

Uma combinação linear muito importante é a denominada livre da ionosfera (*ionospheric free observable -  $L_0$* ) (MONICO, 2000). Os efeitos de primeira ordem da ionosfera são reduzidos nessa observável. Trata-se da combinação linear normalmente utilizada no posicionamento geodésico de alta precisão, especialmente em redes envolvendo bases longas (MONICO, 2000). Substituindo na expressão (16) os seguintes valores para  $m_1 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)$  e  $m_2 = -f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)$ , obtém-se a combinação linear livre da ionosfera ( $L_0$ ), dada a seguir:

$$L_0 = [f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)]\phi_1 - [f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)]\phi_2, \quad (27)$$

com comprimento de onda ( $\lambda_0$ ) e desvio padrão ( $\sigma_0$ ) dados por:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 19,0 \text{ cm}, \\ \sigma_0 &= 9,0 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (28)$$

Vale salientar que, em redes que envolvem linhas de bases curtas, onde os efeitos da ionosfera são minimizados, o ruído da observável  $L_0$  torna-se dominante, não oferecendo vantagens na sua utilização.

Outra combinação importante, diz respeito à denominada sinal ionosférico ( $L_1$ ), formada entre as observáveis *wide lane* e *narrow lane*, porque contém o efeito total da ionosfera. Sua expressão é dada da seguinte forma (SEEBER, 2003):

$$L_1 = L_N - L_W. \quad (29)$$

Combinações lineares entre diferentes observações numa única estação também são possíveis de serem realizadas. Trata-se da combinação que envolve medidas da pseudodistância e fase da onda portadora. É um procedimento que envolve a filtragem da pseudodistância pela fase da onda portadora (MONICO, 2000). É conhecida também como suavização da pseudodistância.

### 3.2 Combinações Lineares entre Observações de Diferentes Tipos

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

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

$$D_{k-1,k}^1 = \lambda_1 \phi_{1r k}^s - \lambda_1 \phi_{1r k-1}^s, \quad (30)$$

e

$$D_{k-1,k}^2 = \lambda_2 \phi_{2r k}^s - \lambda_2 \phi_{2r k-1}^s. \quad (31)$$

A partir das equações (30) e (31) uma distância relativa livre do efeito da ionosfera pode ser obtida, por meio da expressão:

$$D_{k-1,k} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^2. \quad (32)$$

Fazendo duas vezes a equação (32) menos as equações (30) e (31), pode-se projetar a diferença em distância da fase da portadora em equivalente diferença em distância da pseudodistância, respectivamente para  $L_1$  e  $L_2$ . Assim:

$$M_{k-1,k}^i = 2D_{k-1,k} - D_{k-1,k}^i, \quad (33)$$

para  $i = 1, 2$ .

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

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

$$P_{irk/k-1}^s = P_{irk-1/k-1}^s + M_{k-1,k}^i, \quad (34)$$

para  $i = 1, 2$  e  $k = 1, 2, \dots, t_k$ . Na equação (34) ( $P_{irk-1/k-1}^s$ ) representa a pseudodistância filtrada na época  $t_{k-1}$ .

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

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{1}{k+1} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s) \quad (35)$$

Teunissen (1991) mostra que a equação (35) não é estritamente um estimador de mínimos quadrados recursivo, já que a suposição de que a variância da fase da portadora é zero, é implicitamente feita. A expressão teórica para a filtragem da pseudodistância é dada por:

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2}{k (\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s), \quad (36)$$

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

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

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

$$\sigma_{P_i^s k/k}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2 (\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2)}{k (\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)}, \quad (37)$$

para  $i = 1, 2$ .

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

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_{P_i^s k/k}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2}{1 + (\sigma_{\phi_i}^2 / \sigma_{P_i}^2)}, \quad (38)$$

para  $i = 1, 2$ .

A figura 5 mostra a precisão para as pseudodistâncias (C/A ( $P_1$ ),  $P_2$ ) filtradas pela fase, obtida com a equação (37), considerando  $\sigma_{P_1} = 1$  m,  $\sigma_{P_2} = 1,5$  m,  $\sigma_{\phi_1} = 0,003$  m e  $\sigma_{\phi_2} = 0,0039$  m, para  $k_i = 1, 2, \dots, t_k$ , com  $i = 1, 2$ .

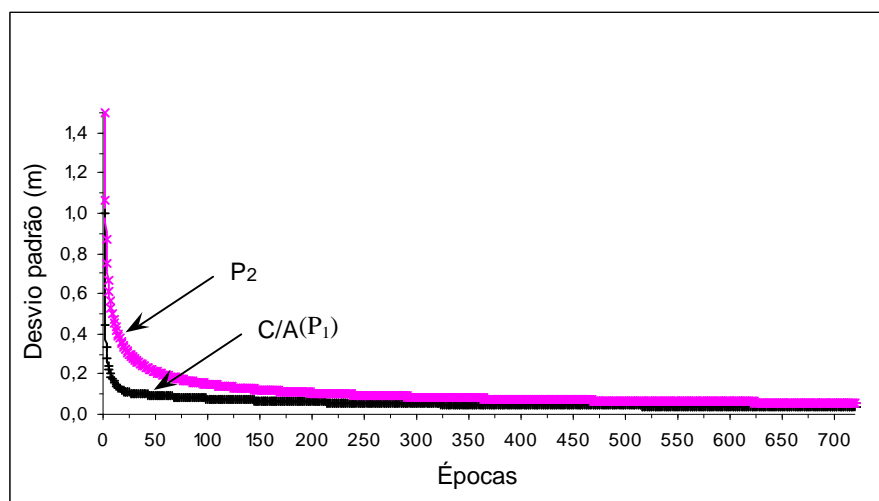


Figura 5 – Desvio padrão da pseudodistância filtrada pela fase da portadora.  
Fonte: Camargo (1999)



Pode-se notar na figura 5 a melhora na precisão das pseudodistâncias ao se utilizar a técnica de filtragem pela fase, sendo que os valores do desvio padrão se estabilizam após algumas épocas. É importante salientar que a cada perda de sinal o algoritmo deve ser reinicializado e o desvio padrão volta a ser o da pseudodistância original e demorará alguns instantes para diminuir e se estabilizar, ou seja, para o algoritmo convergir novamente.

As pseudodistâncias filtradas pela fase da onda portadora apresentam vantagens na sua utilização na obtenção do TEC em relação as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora. O TEC pode ser obtido pela combinação linear entre as observações de pseudodistância ou fase nas frequências  $L_1$  e  $L_2$ . As medidas de TEC obtidas a partir da pseudodistância são bastante ruidosas, e as obtidas pela fase são influenciadas pela diferença entre as ambigüidades em  $L_1$  e  $L_2$ . A figura 6 mostra um gráfico com os valores do TEC calculados usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase, para estação UEPP, satélite 25, para o dia 27/10/2003. Pode-se notar claramente a melhora na estimativa dos valores do TEC usando a técnica de filtragem da pseudodistância pela fase.

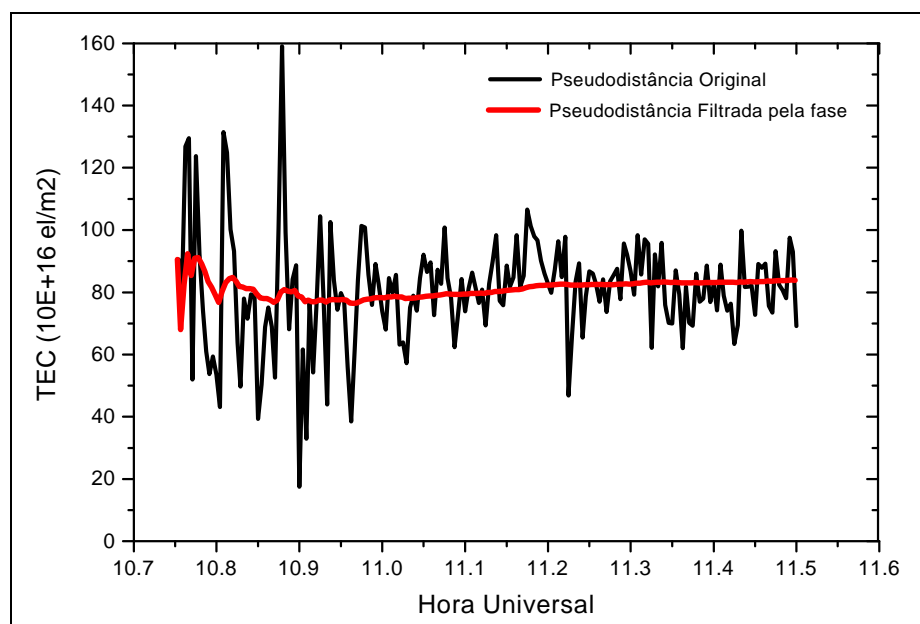


Figura 6 – Valores do TEC usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase  
 Fonte: Dal Poz e Matsuoka (2004)

O procedimento descrito neste tópico para suavizar a pseudodistância pela fase da onda portadora utiliza observações das duas portadoras. No entanto, considerando a existência de receptores de simples frequência, alguns autores têm discutido a filtragem de observações do código a partir de dados somente da portadora  $L_1$ , como por exemplo, Goad (1990) e Jim (1996).

Considerando que somente dados de receptores de simples frequência são disponíveis, uma distância relativa livre do efeito da ionosfera não pode ser mais obtida (expressão 32). Nesse caso, troca-se  $M_{k-1,k}^i$  da expressão (34) pela expressão (30) ( $D_{k-1,k}^i$  - *Delta range* em  $L_1$ ), pois essa expressão contém apenas dados da portadora  $L_1$ . Assim, um valor predito para a pseudodistância, para uma época ( $t_k$ ), somente com dados da portadora  $L_1$ , pode ser obtido pela expressão (JIN, 1996):

$$P_{irk/k-1}^s = P_{irk-1/k-1}^s + D_{k-1,k}^i \quad (39)$$

Assim, a partir das expressões 35 e 39, podem-se obter observações de pseudodistâncias filtradas a partir de dados somente da portadora  $L_1$ .

### 3.3 Combinações Lineares Entre Observações de Diferentes Estações

As combinações lineares descritas na seção anterior referem-se a combinações entre observáveis coletadas numa mesma estação. Nesta seção serão descritas as combinações entre observáveis de diferentes estações. Vale salientar que as observações também podem ser combinadas entre diferentes satélites e épocas. A figura (7) ilustra os três tipos de combinações possíveis (WELLS et al., 1986).

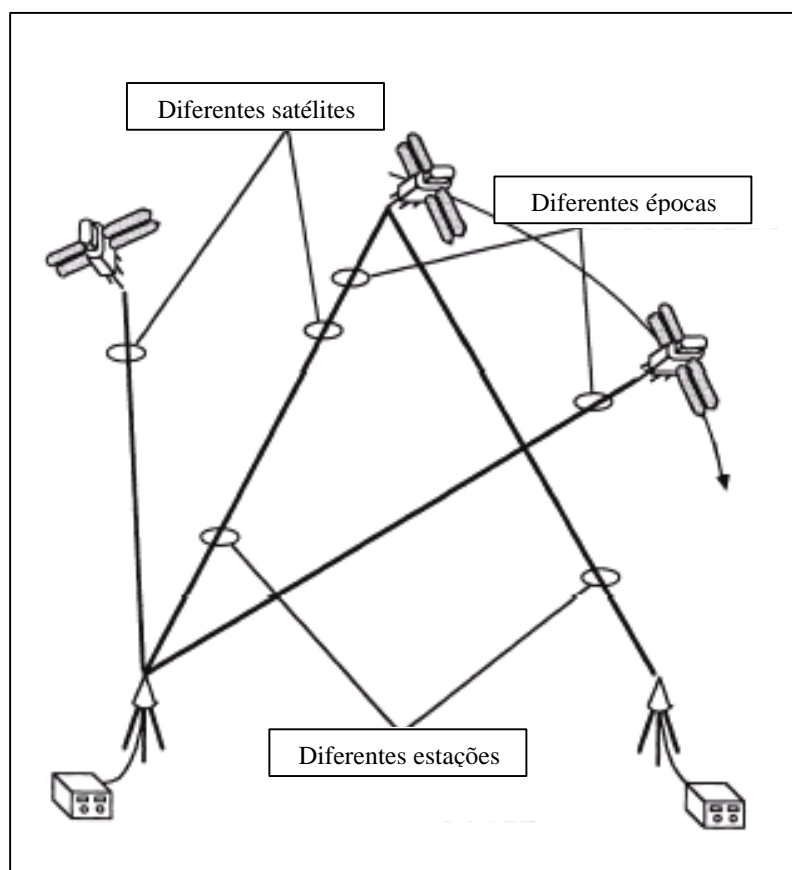


Figura 7 – Combinações entre diferentes satélites, épocas e estações.  
Fonte: Wells et al. (1986)

No caso de combinações entre observáveis de diferentes estações, tem-se o posicionamento relativo (MONICO, 2000). No posicionamento relativo, numa linha de base, assume-se que uma das estações dispõe de coordenadas conhecidas, a partir das quais se determinam as coordenadas da outra estação. Uma vantagem no posicionamento relativo é que erros presentes nas observações originais são reduzidos quando se formam diferenças entre as observáveis das estações. Essas observáveis secundárias, derivadas das originais, são usualmente denominadas simples, duplas e triplas diferenças (MONICO, 2000). Cada uma dessas diferenças elimina determinados tipos de erros, sendo que cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens.

### 3.3.1 Simples diferença

A simples diferença das observáveis pode ser formada entre dois receptores ( $\Delta$ ), dois satélites ( $\nabla$ ) e duas épocas ( $d$ ). A simples diferença entre dois receptores é usualmente a mais utilizada (diferentes estações). A figura (8) ilustra o princípio da simples diferença entre dois receptores ( $i$  e  $j$ ), rastreando, simultaneamente, o mesmo satélite ( $p$ ) (LEICK, 1995).

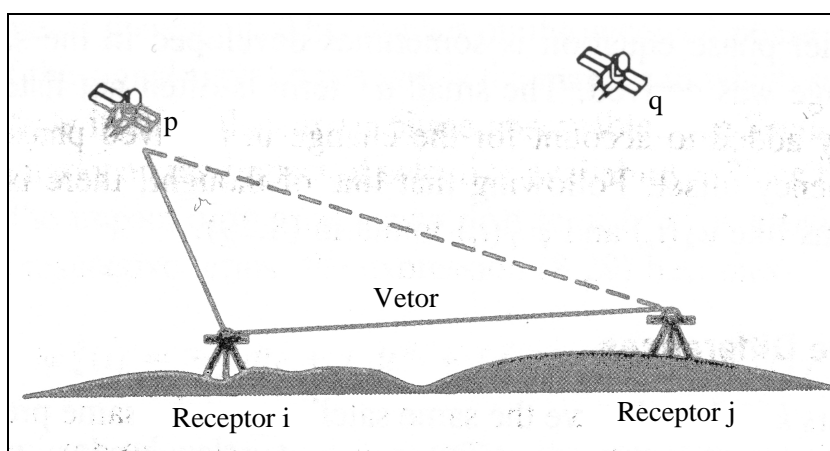


Figura 8 – Formação da simples diferença.  
Fonte: Adaptada de Leick (1995)

Quando se têm medidas simultâneas de pseudodistâncias (código P ou C/A) que foram realizadas em ambos os receptores ao mesmo satélite, pode se formar a simples diferença de pseudodistância, da seguinte forma:

$$\Delta P_{ij}^P = \Delta \rho_{ij}^P + c \Delta dt_{ij}^P + \Delta I_{ij}^P + \Delta T_{ij}^P + \Delta dp_{ij}^P + \varepsilon_{\Delta P_{ij}^P}, \quad (40)$$

sendo  $\Delta dt_{ij}^P$ ,  $\Delta I_{ij}^P$ ,  $\Delta T_{ij}^P$  e  $\Delta dp_{ij}^P$  as correções diferenciais, respectivamente, para os relógios dos receptores, para a ionosfera, troposfera e órbita, e  $\varepsilon_{\Delta P_{ij}^P}$  representa a diferença entre os erros aleatórios e não modelados das observáveis.

Para o caso da observável da fase da onda portadora, tem-se a seguinte expressão para a simples diferença:

$$\Delta \lambda \phi_{ij}^P = \Delta \rho_{ij}^P + c \Delta dt_{ij}^P - \Delta I_{ij}^P + \Delta T_{ij}^P + \lambda \Delta N_{ij}^P + \Delta dp_{ij}^P + \varepsilon_{\Delta \lambda \phi_{ij}^P}, \quad (41)$$

sendo  $\Delta N_{ij}^P = N_i^P - N_j^P$ .

A simples diferença entre dois satélites ( $\nabla$ ) observados, simultaneamente, pela mesma estação, é livre do erro devido ao relógio do receptor. Na simples diferença entre épocas, para o mesmo satélite e receptor, a ambigüidade é eliminada, pois a mesma permanece constante ao longo do tempo, desde que nenhuma perda de ciclos ocorra (SEEBER, 2003).

Na simples diferença entre dois receptores, o erro do relógio (dts) do satélite é eliminado. Para bases curtas, os erros devidos à ionosfera e troposfera, bem como os de órbitas, são minimizados, supondo que exista uma correlação espacial entre as estações.

Com relação aos erros relacionados com a ionosfera, no que diz respeito à sua minimização, quando se efetuam as simples diferenças para bases curtas, deve-se fazer uma ressalva. Para definir no posicionamento relativo, qual o comprimento de uma linha de base curta, de uma média e de uma longa é complicado, devido à alta dependência desta com relação à variação (gradiente espacial) e as irregularidades presentes na ionosfera (FORTES, 2002). O erro ionosférico residual remanescente nas simples diferenças depende de dois parâmetros: do TEC e de seu gradiente espacial (WARNANT, 1997). Por exemplo, definir o comprimento de uma base que minimize consideravelmente o erro da ionosfera exige um conhecimento aprofundado do comportamento da ionosfera na região de interesse. Em períodos de gradientes horizontais do TEC muito altos, até mesmo utilizando apenas receptores de dupla frequência no posicionamento relativo, podem-se encontrar limitações devido à atividade ionosférica (WANNINGER, SEEBER e CAMPOS, 1991).

### **3.3.2 Dupla diferença**

A dupla diferença é obtida fazendo a diferença entre duas simples diferenças. Sendo assim, envolve dois receptores e dois satélites. A figura 9 ilustra o princípio da dupla diferença (LEICK, 1995).

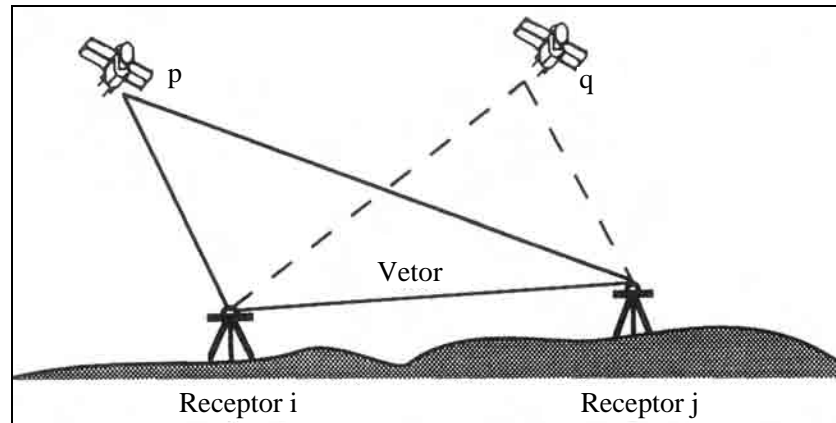


Figura 9 – Formação da dupla diferença.

Fonte: Adaptada de Leick (1995)

A equação da dupla diferença entre dois receptores (i e j) e dois satélites (p e q), para as pseudodistâncias, é dada da seguinte forma:

$$\nabla\Delta P_{ij}^{pq} = \nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} + \nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \nabla\Delta d\rho_{ij}^{pq} + \epsilon_{\nabla\Delta P_{ij}^{pq}} \quad (42)$$

Para medidas da fase da onda portadora, a dupla diferença é dada da seguinte forma:

$$\nabla\Delta\lambda\phi_{ij}^{pq} = \nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} - \nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \lambda\nabla\Delta N_{ij}^{pq} + \nabla\Delta d\rho_{ij}^{pq} + \epsilon_{\nabla\Delta\lambda\phi_{ij}^{pq}}, \quad (43)$$

onde:

$$\nabla\Delta N_{ij}^{pq} = \Delta N_{ij}^p - \Delta N_{ij}^q = (N_i^p - N_j^p) - (N_i^q - N_j^q). \quad (44)$$

Além dos erros minimizados na simples diferença entre receptores a dupla diferença faz com que os erros dos relógios dos receptores sejam cancelados. A equação da dupla

diferença é a observável preferida nos processamentos de dados GPS envolvendo a fase da onda portadora. Essa combinação parece proporcionar a melhor relação entre ruído resultante e a eliminação de erros sistemáticos envolvidos nas observáveis originais (MONICO, 2000). As observações de dupla diferença são as observações básicas em várias técnicas usadas para a solução de ambigüidade (SEEBER, 2003).

### 3.3.3 Tripla diferença

Na tripla diferença é realizada a diferença entre duas duplas diferenças de duas épocas ( $t_1$  e  $t_2$ ), envolvendo os mesmos receptores ( $i$  e  $j$ ) e satélites ( $p$  e  $q$ ). A figura 10 ilustra o princípio da tripla diferença (LEICK, 1995).

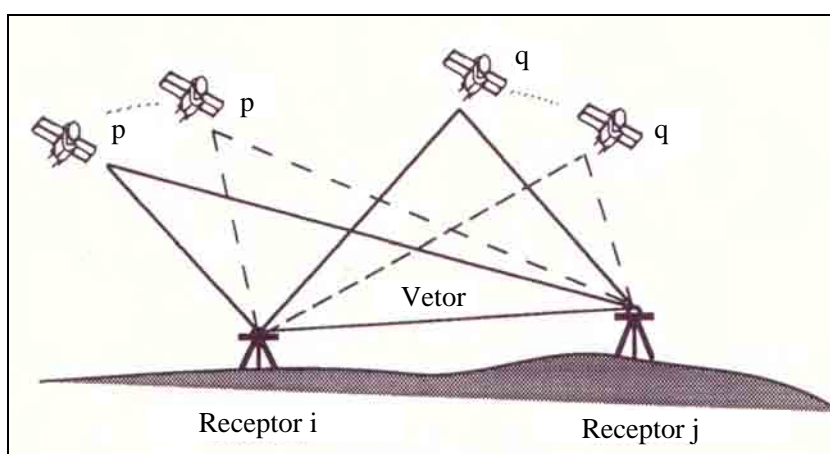


Figura 10 – Formação da tripla diferença.  
Fonte: Adaptada de Leick (1995)

A expressão da tripla diferença para a pseudodistância é dada por:

$$\delta \nabla \Delta P_{ij}^{pq} = \delta \nabla \Delta \rho_{ij}^{pq} + \delta \nabla \Delta I_{ij}^{pq} + \delta \nabla \Delta T_{ij}^{pq} + \delta \nabla \Delta d\rho_{ij}^{pq} + \epsilon_{\delta \nabla \Delta P_{ij}^{pq}} \quad (45)$$



No caso da medida da fase da onda portadora, a tripla diferença é dada por:

$$\delta\nabla\Delta\lambda\phi_{ij}^{pq} = \delta\nabla\Delta\rho_{ij}^{pq} - \delta\nabla\Delta I_{ij}^{pq} + \delta\nabla\Delta T_{ij}^{pq} + \delta\nabla\Delta dp_{ij}^{pq} + \varepsilon_{\delta\nabla\Delta\lambda\phi_{ij}^{pq}}. \quad (46)$$

O último termo das equações (45) e (46) contém os erros aleatórios e não modelados.

A tripla diferença de pseudodistância não oferece vantagens sobre as outras combinações de pseudodistâncias (MONICO, 2000). Sua expressão é idêntica à tripla diferença da fase da onda portadora, exceto para o sinal do efeito da ionosfera. Essa igualdade ocorre devido à eliminação da ambigüidade na expressão da tripla diferença da fase. Essa observável é sensível à perda de ciclos, razão pela qual é muito utilizada na detecção de perdas de ciclos na fase de pré-processamento dos dados (MONICO, 2000). No entanto, normalmente ela não é usada na solução final, uma vez que o ruído da observável é maior, além de introduzir correlação temporal entre as várias combinações de épocas distintas.

## 4 IONOSFERA

### 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, latitude, longitude, época do ano e atividade solar.

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético, propagação de ondas eletromagnéticas (ou simplesmente propagação) e geral. A figura 11 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 11 – Possíveis divisões da atmosfera terrestre.

Fonte: Adaptada de Seeber (2003)

Em função do enfoque deste estudo, a divisão relacionada com a propagação de ondas eletromagnéticas será descrita. Neste caso, a atmosfera terrestre é dividida em troposfera e ionosfera, pois, as ondas eletromagnéticas ao 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 do conteúdo total de elétrons (TEC) são outros assuntos abordados neste capítulo.

## 4.2 Processo de Ionização

Um dos principais responsáveis pelo processo de ionização (formação de íons e elétrons) é a radiação solar, que provém de três camadas da atmosfera solar. A figura 12 ilustra essas camadas (KIRCHHOFF, 1991).

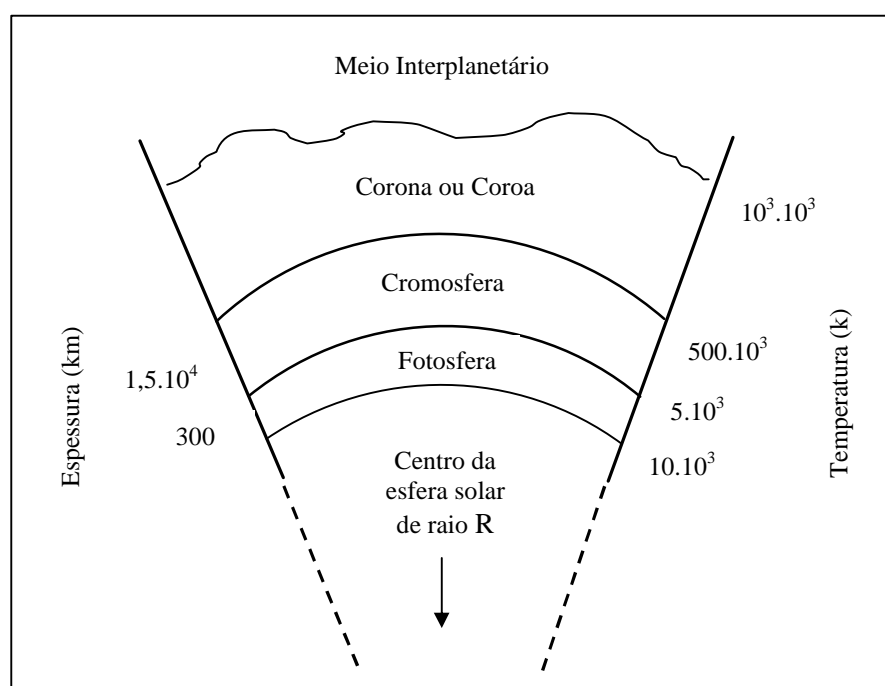


Figura 12 – Representação esquemática das três camadas solares mais externas.  
Fonte: Adaptada de Kirchoff (1991)

A coroa, também conhecida como coroa, é a camada mais externa e apresenta temperaturas muito altas, da ordem de milhões de Kelvin, e é a camada mais rarefeita do Sol. Vale salientar que o limite da coroa não é bem definido, pois se confunde com o meio interplanetário. A radiação mais intensa, situada no visível, origina-se de uma camada que tem cerca de 300 km de espessura, a denominada fotosfera. A cromosfera é a camada que se situa entre a coroa e fotosfera, e tem cerca de 15000 km de espessura. Esta camada normalmente não

é visível, porque sua radiação é muito mais fraca do que a da fotosfera (o mesmo ocorre com a corona).

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 13 ilustra o processo de fotoionização para o caso de um átomo de oxigênio.

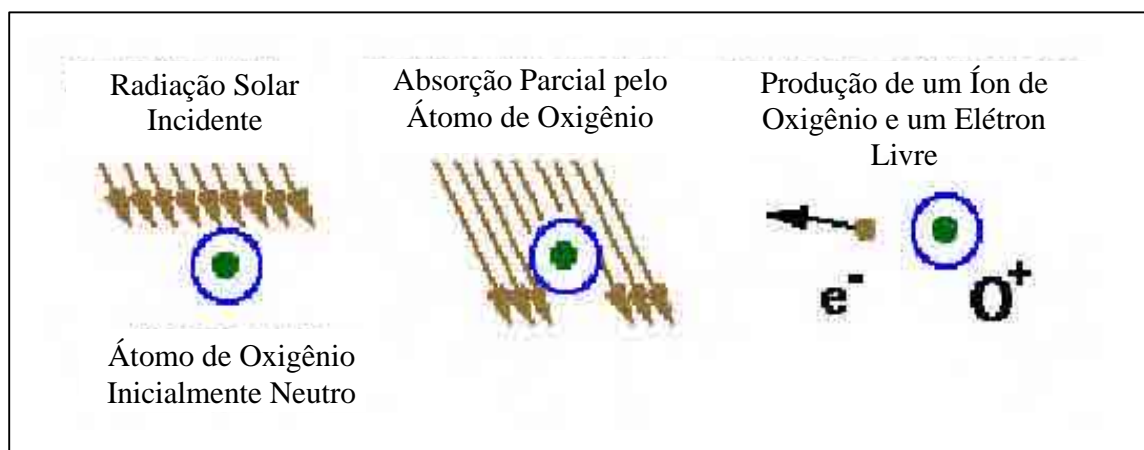


Figura 13 – Processo de Fotoionização.  
Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003)

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 13, foi originado um íon positivo  $O^+$  e um elétron livre ( $e^-$ ).

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).

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

Não se pode sentir o vento solar na superfície da Terra, pois a densidade do vento solar é muito baixa, sendo esta densidade mais baixa do que qualquer vácuo já conseguido na Terra (McNAMARA, 1991). No entanto, as partículas sendo eletricamente carregadas, afetam o campo magnético da Terra e a ionosfera (McNAMARA, 1991). O vento solar, que emana da coroa, pode-se tornar muito intenso devido, por exemplo, às explosões solares, o que implica 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). Esses fenômenos alteram significativamente o comportamento da ionosfera, e serão comentados posteriormente. Normalmente, a perturbação solar causadora destes fenômenos é caracterizada por um aumento dos parâmetros do vento solar (densidade e velocidade). A densidade do vento solar pode passar de  $10^6$  a  $10^7$   $\text{m}^{-3}$ , e sua velocidade pode variar de 300 até 900 ou 1000 km/s (KIRCHHOFF, 1991).

### **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 14 ilustra a formação da ionosfera e a presença de um pico de ionização (RODRIGUES, 2003).

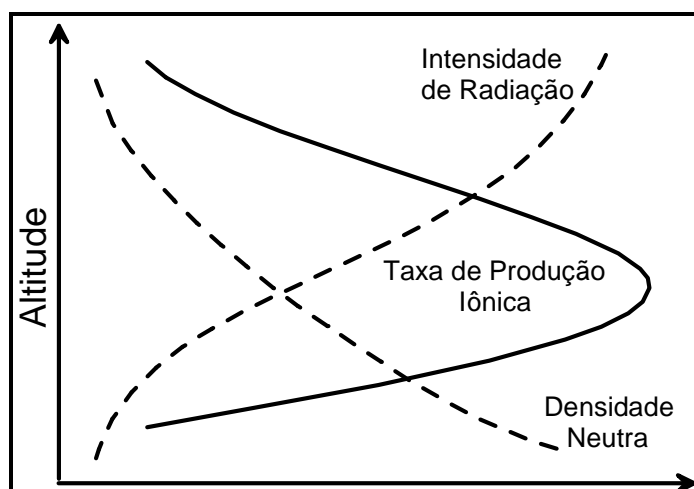


Figura 14 – Ilustração da formação da ionosfera.

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).

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 dessa 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).

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. Porém, à noite, essa região desaparece (JOHNSON, 1965). 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. 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 conseqüente cintilação nos sinais de rádio (JOHNSON, 1965). Em contrapartida, essas irregularidades são importantes em propagação de rádios que utilizam HF (DAVIES, 1990). Ocorre um acréscimo na densidade de elétrons de acordo com o aumento da altitude. Após a concentração máxima de elétrons que ocorre na camada F, a densidade de

elétrons decresce, até fundir-se com o vento solar. Vale salientar que recentemente foi observada uma terceira sub-camada na região F, a camada F3, cuja formação e dinâmica ainda estão sendo estudadas (BATISTA *et al.*, 2002).

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 15 mostra a diferença na densidade de elétrons durante os dois períodos. Nota-se que durante o período noturno a densidade cai consideravelmente.

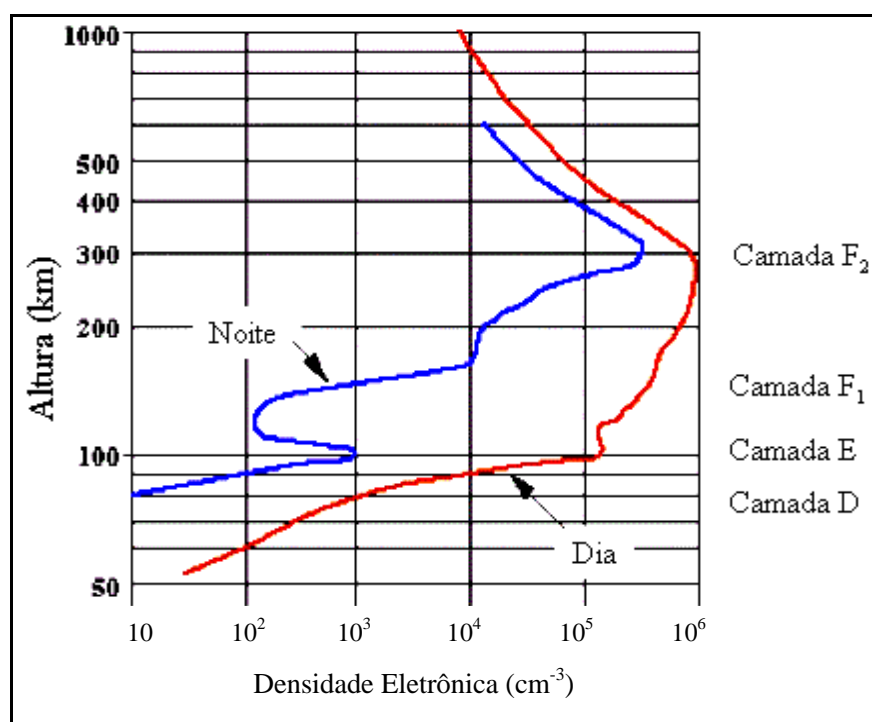


Figura 15 – Conteúdo Total de Elétrons em função da altitude.  
Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003)

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>.

#### 4.4 Variações do Conteúdo Total de Elétrons

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

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



Figura 16 – Imagem da superfície do Sol mostrando algumas manchas solares.  
Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2000)

A figura 17 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).

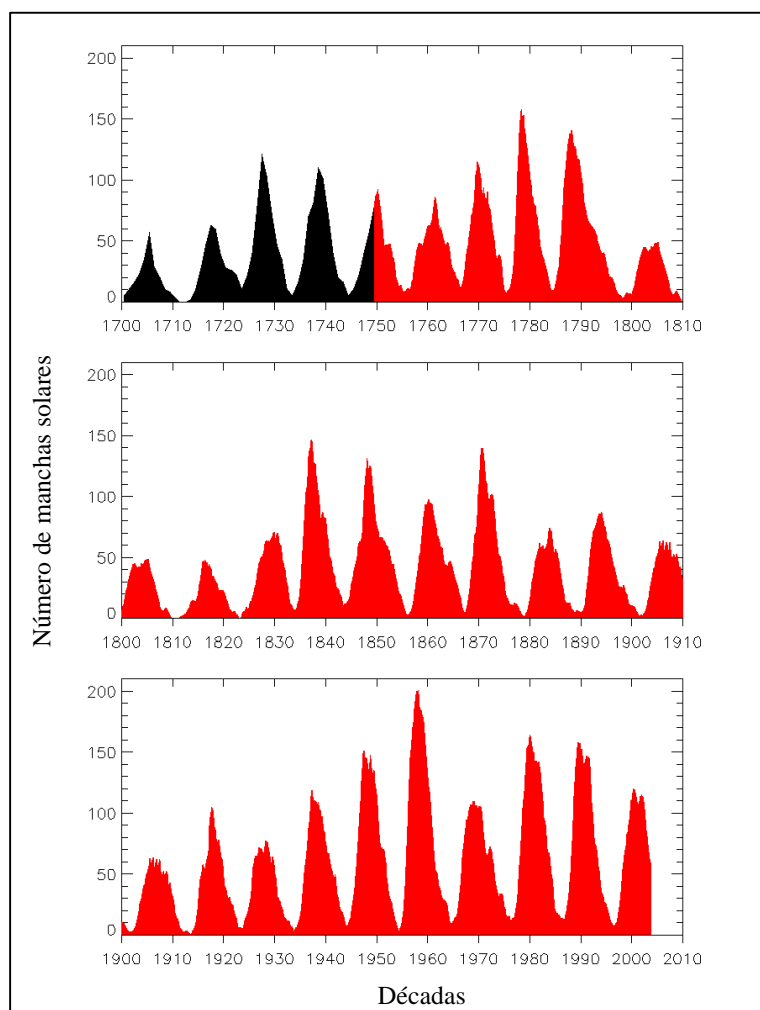


Figura 17 – Número de manchas solares – Ciclos solares.  
Fonte : <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html> - acesso em 05/2004

De acordo com a figura 17, verifica-se que, além dos ciclos de 11 anos, podem-se notar também ciclos mais longos, de aproximadamente 80 anos. Normalmente, também existe uma periodicidade de aproximadamente 27 dias, associadas com a rotação solar (DAVIES, 1990). Os ciclos solares são normalmente não-simétricos (LEICK, 1995). A duração da transição do período mínimo para o máximo é menor do que a duração do máximo para o mínimo.

Atualmente o Sol está no ciclo denominado “ciclo 23” (KUNCHES, 2000), e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001, o que ocasionou um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na ionosfera. A figura 18 ilustra este ciclo isoladamente, que compreende uma contagem do número de manchas solares, desde 1998 até uma predição para o ano de 2009.

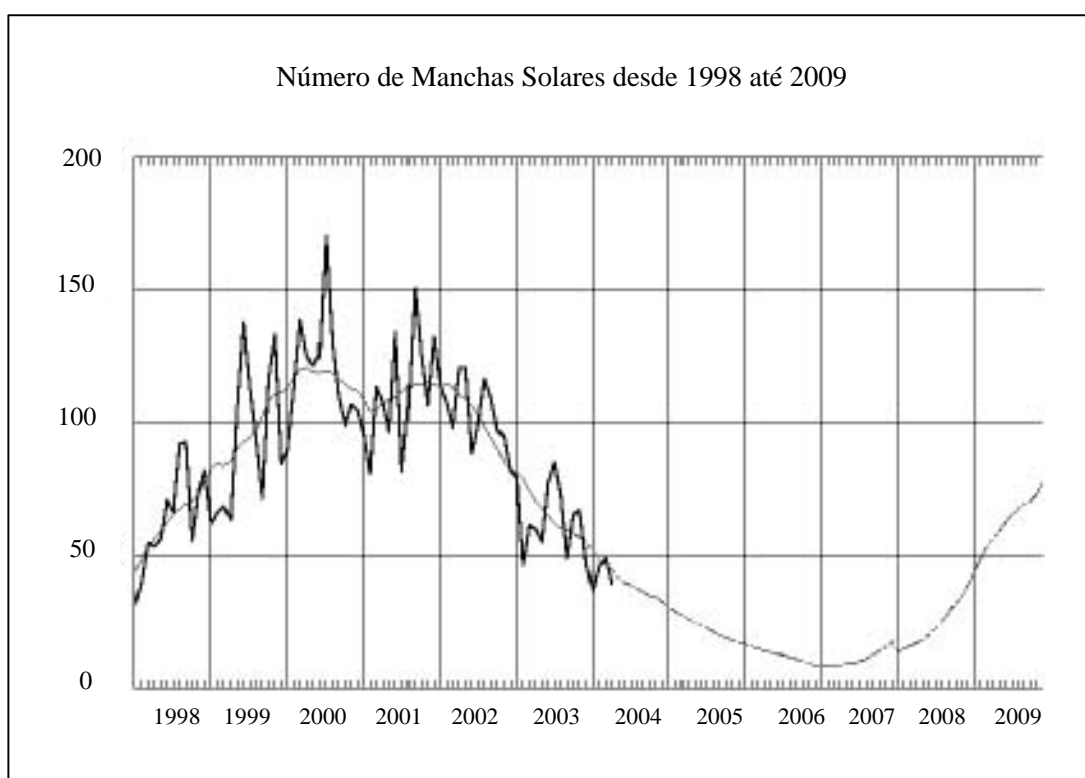


Figura 18 – Número de manchas solares observadas e preditas – Ciclo 23.  
Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfjmms.html> - acesso em 05/2004

De acordo com a figura 18 nota-se o declínio do ciclo 23, onde em 2004 o número de manchas cai até aproximadamente 40. No pico desse ciclo, o número de manchas era de aproximadamente 180. 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 uma predição do número de manchas até 2009, onde se verifica que entre 2006 e 2007 terá início um novo ciclo (ciclo 24). A curva mais irregular do gráfico mostra o número de manchas solares observadas.

#### **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. O terceiro efeito está relacionado às manchas solares descritas na seção anterior.

#### **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

(FONSECA JUNIOR, 2002). A figura 19 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).

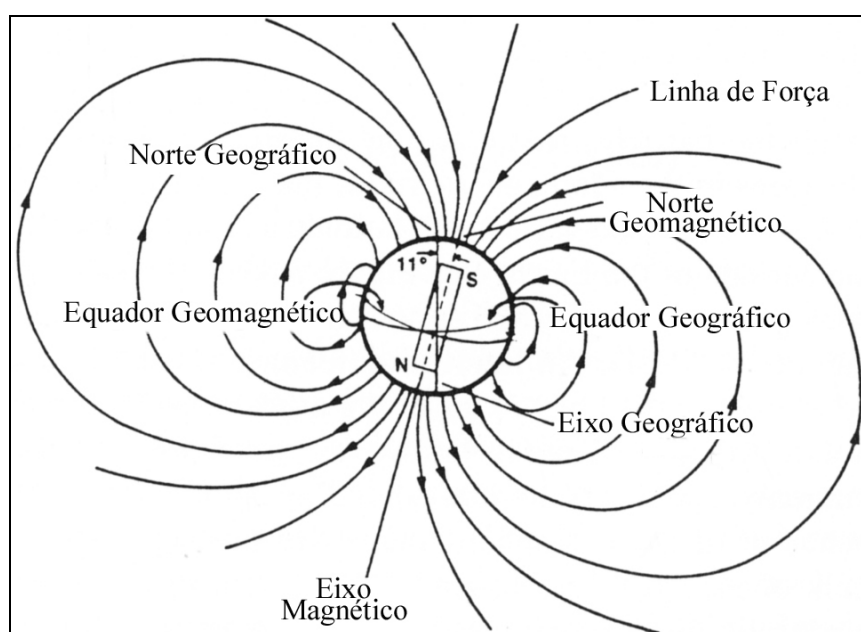


Figura 19 – Modelo do campo magnético da Terra.  
Fonte: Adaptada de McNamara (1991)

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 (NRCAN, 2004).

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 ( $90 - 79 = 11$  graus), de acordo com a figura 19.



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). Vale salientar que, da mesma forma que as coordenadas geográficas, as coordenadas geomagnéticas variam em função do tempo.

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 19, 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 oposto ao Sol (FEDRIZZI, 2003). Esta cavidade denomina-se magnetosfera. A figura 20 mostra a influência do vento solar no campo geomagnético.

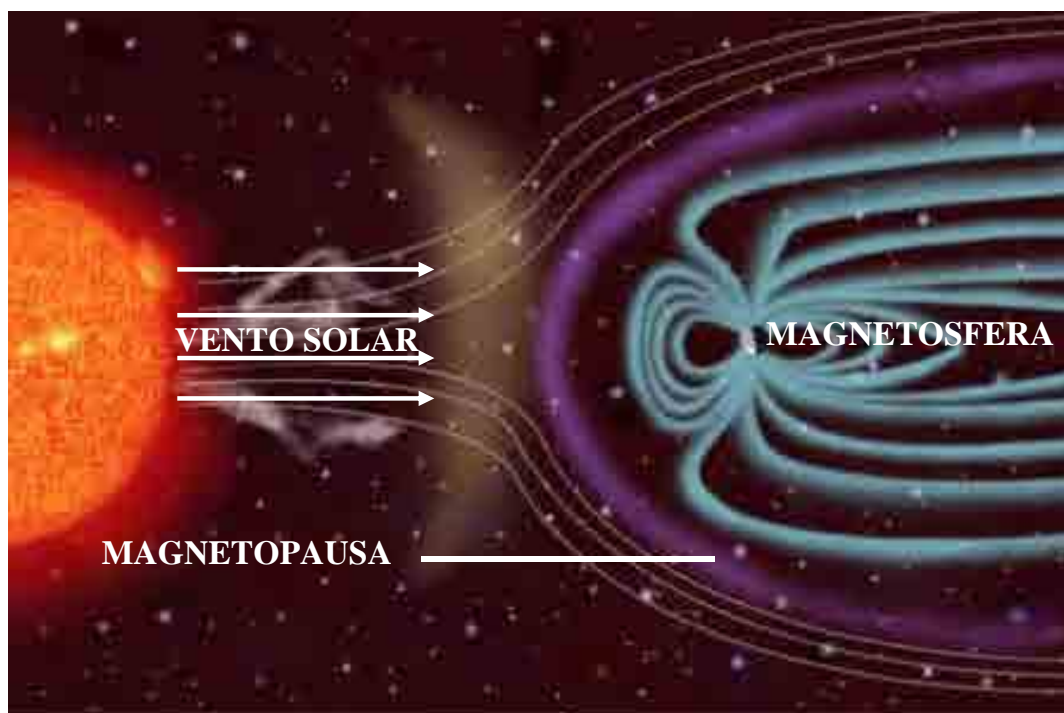


Figura 20 – Influência do vento solar no campo geomagnético.

Fonte: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=2569> - acesso em 03/2004

De acordo com a figura 20, 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) são responsáveis pela alteração dos parâmetros do vento solar (velocidade e densidade). Conseqüentemente, ocorre uma alteração do campo geomagnético, que por sua vez contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas. Estas por sua vez, implicam em tempestades ionosféricas, que são respostas às tempestades geomagnéticas. Tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas, como por exemplo, as explosões solares (McNAMARA, 1991).

As tempestades geomagnéticas mais intensas são freqüentemente 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).

A atividade geomagnética tem uma variabilidade sazonal com um máximo nos equinócios e tende a aumentar durante a fase descendente do ciclo solar, próximo ao mínimo solar. Todavia, as tempestades intensas tendem a apresentar dois picos dentro do ciclo solar, sendo um deles um pouco anterior ou no período de máximo solar e o outro 2-3 anos após o máximo solar (GONZALEZ et al., 1994 apud FEDRIZZI, 2003).

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 freqüentes, 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).

Os vários fenômenos que ocorrem devido ao Sol, afetam o campo geomagnético. Os 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, 2004). Os índices geomagnéticos mais freqüentemente utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas são os índices *Disturbance Storm-Time* (Dst), *Planetarische Kennziffer* ou índice planetário (Kp) e *Auroral Electrojet* (AE) (FEDRIZZI, 2003). Antes de definir o índice Kp, é necessário definir o índice K, pois a partir desse índice é derivado o índice Kp.

O índice K é um índice local, quase logarítmico, que contém as variações ocorridas na atividade geomagnética, em intervalos de três horas, relativas à curva do dia quieto para um determinado observatório magnético (FEDRIZZI, 2003). Tais medidas são convertidas em uma escala quase logarítmica cujos valores variam de acordo com a tabela 4 (WRENN et al., 1987 apud FEDRIZZI, 2003).

Tabela 4 – 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, 2004). 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 21 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.

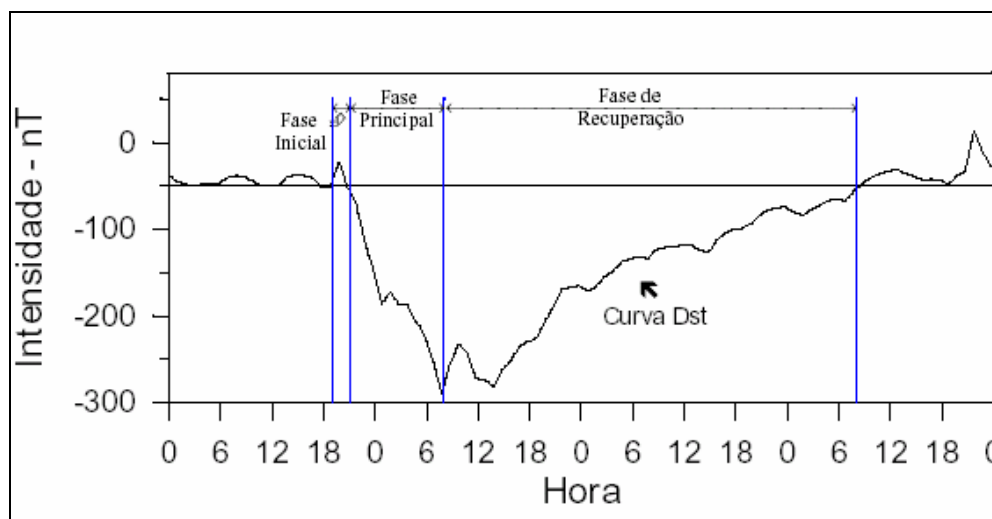


Figura 21 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982  
 Fonte: Adaptada de Yamashita (1999)

A classificação de uma tempestade geomagnética é dada de acordo com a tabela 5 (FEDRIZZI, 2003).

Tabela 5 – 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).

#### 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 22 mostra a localização geográfica dessas regiões no globo terrestre (FONSECA JUNIOR, 2002).

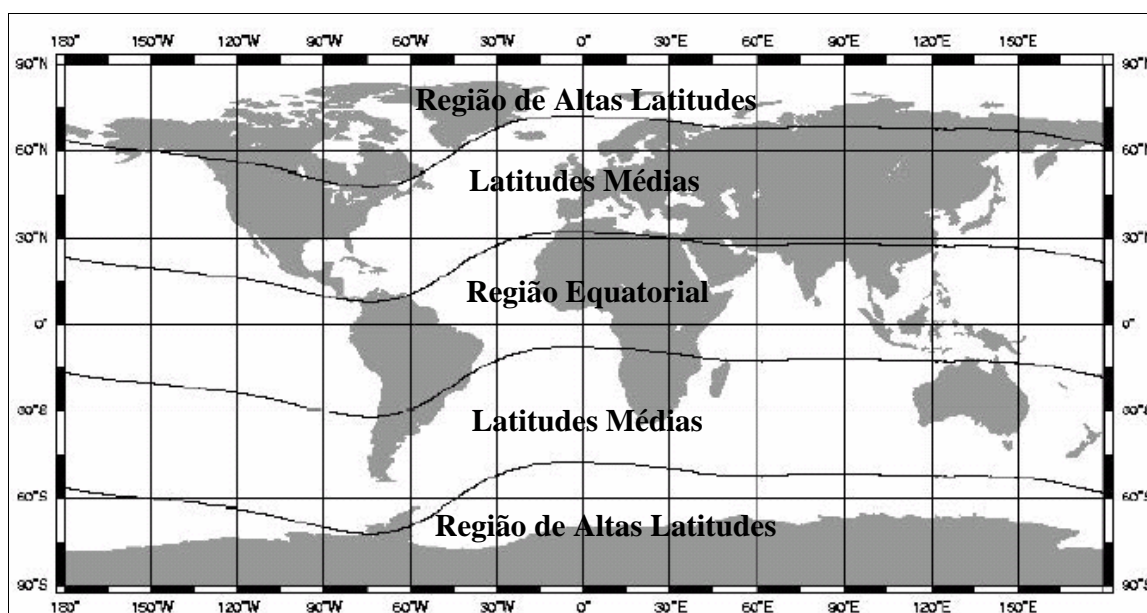


Figura 22 – Regiões geográficas da ionosfera  
Fonte: Adaptada de Fonseca Junior (2002)

A ionosfera sobre os pólos sul e norte, alternativamente denominadas de ionosfera polar ou de altas latitudes, é extremamente complicada (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. No próximo tópico será descrita a anomalia

equatorial, que ocorre, como o nome sugere, na região equatorial. Trata-se de um fenômeno de extrema importância, e que afeta consideravelmente no posicionamento com GPS.

#### **4.4.4.1 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.

##### **4.4.4.1.1 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  $\mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$ . 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 ( $\bar{g}$ ) 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



(RODRIGUES, 2003). 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 23.

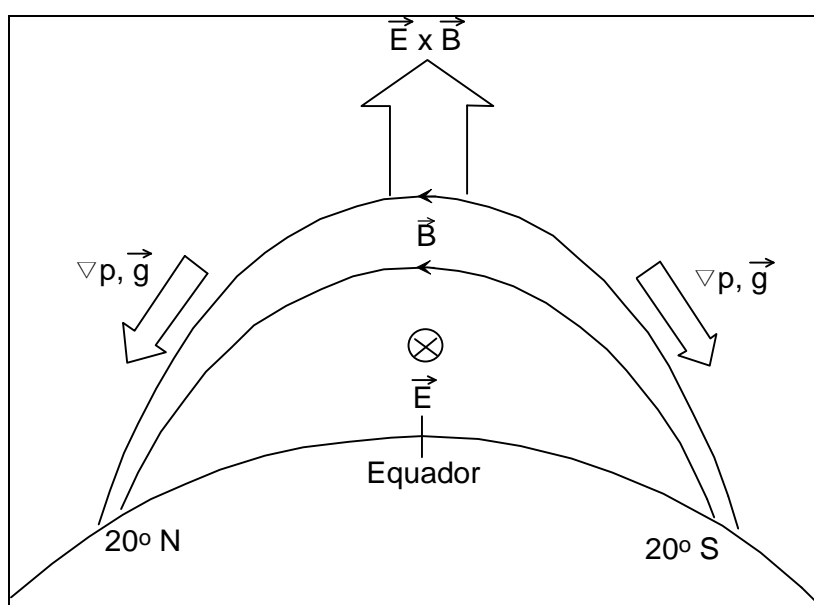


Figura 23 – Esquema de forças agindo no plasma  
Fonte: Kelley (1989) apud Rodrigues (2003)

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.

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).

## **5 IMPACTO DA IONOSFERA NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS**

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 varia 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, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite (CAMARGO, 1999).

### **5.1 Elementos de Propagação de Ondas**

A descrição a ser apresentada é baseada na teoria sobre elementos de propagação de ondas contidas em Leick (1995) e Davies (1990).

No que diz respeito à propagação dos sinais GPS 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:

$$\varphi = \cos\omega \left( t - \frac{x}{c_\varphi} \right). \quad (47)$$

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 (em rad/m) são dados por:

$$\omega = 2\pi f, \quad (48)$$

$$\lambda_\varphi = \frac{c_\varphi}{f}, \quad (49)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_\varphi}. \quad (50)$$

Considerando uma onda  $\varphi_1$  e usando as relações entre as equações (48), (49) e (50) a equação da onda (47) pode ser escrita como:

$$\varphi_1 = \cos(\omega t - kx). \quad (51)$$

Agora, considerando-se uma 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:

$$\varphi_2 = \cos[(\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x]. \quad (52)$$

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

$$\varphi_s = 2 \cos \frac{\Delta\omega t - \Delta kx}{2} \cos \left[ \left( \omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t - \left( k + \frac{\Delta\omega}{2} \right) x \right]. \quad (53)$$

A figura 24 mostra uma ilustração das ondas  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_s$ , expressas pelas equações (51), (51) e (53), respectivamente.

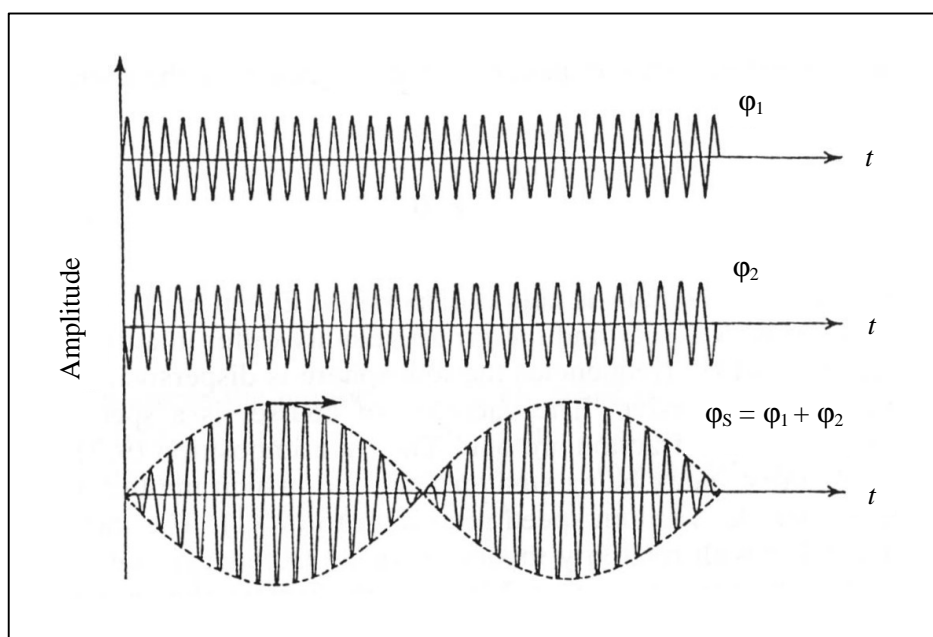


Figura 24 – Propagação da fase e do grupo  
Fonte: Leick (1995)

O sinal combinado na figura 24 mostra duas componentes de ondas de frequência significativamente diferente. O primeiro termo co-seno da equação (53) representa a modulação envoltória, ou pulso do sinal:

$$\Psi = 2 \cos \frac{\Delta\omega t - \Delta k x}{2}. \quad (54)$$

Analogamente a equação 47, a expressão (54) implica numa velocidade do pulso do sinal de:

$$V_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}. \quad (55)$$

Considerando que no limite,  $\Delta\omega \rightarrow 0$  e  $\Delta k \rightarrow 0$ , a equação (55) pode ser dada por:

$$V_{g\text{eg}} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (56)$$

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 (53) 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:

$$n_f V_f = c. \quad (57)$$

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

$$n_g V_g = c. \quad (58)$$

A partir das equações (48), (49), (50), (56), (57) e (58), pode-se obter o índice de refração do grupo, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{c}{V_g} = c \frac{dk}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{2\pi c}{\lambda_f} \right) = \frac{d}{d\omega} \left( n_f \frac{V_f}{c} \frac{2\pi c}{\lambda_f} \right) \\ n_g &= \frac{d}{d\omega} \left( n_f \frac{V_f}{c} \frac{2\pi c}{\lambda_f} \frac{\omega}{2\pi f} \right) \\ n_g &= \frac{d}{d\omega} (n_f \omega) = n_f + \omega \frac{dn_f}{d\omega} \\ n_g &= n_f + f \frac{dn_f}{df}. \end{aligned} \quad (59)$$

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

$$\frac{dn_f}{df} \neq 0 \quad (60)$$

for diferente de zero, então o meio é chamado de dispersivo. As equações (56) a (60) 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 GPS 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 53) 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 (57). 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 59) é denominada de equação de *Rayleigh* modificada. O índice de refração da fase ( $n_f$ ) na ionosfera pode ser expressa pela fórmula de Appleton-Hartree (DAVIES, 1990):

$$n_f^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[ \frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}}, \quad (61)$$

onde:

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

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

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

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



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

$f$  = freqüência da onda;

$f_H$  = girofreqüência;

$f_n$  - freqüência 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;

$u$  - freqüência de colisão;

$B$  - Campo magnético;e

$i$  - Representa números complexos.

A equação (61) pode ser simplificada ignorando termos de ordens superiores a

1. Isto porque, segundo Brunner e Gu (1991) apud Skone (1998) a contribuição destes termos é de apenas 1 a 2 mm de erro na distância para usuários GPS durante condições de atividade solar máxima. Neste sentido, o índice de refração da fase ( $n_f$ ) pode ser aproximado por (SKONE, 1998):

$$n_f = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{(2\pi)^2 n_e e^2}{2m\epsilon_0 (2\pi)^2 f^2} , \quad (62)$$

Pela substituição dos valores das constantes “e”, “m” e “ $\epsilon_0$ ” na equação (62), o índice de refração da fase pode ser dado por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} . \quad (63)$$

Desta forma, pela equação (63) se pode 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 (59), tal que:

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} = \left( 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \right) + \left( \frac{80,6 f n_e}{f^3} \right) \quad (64)$$

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

Pelas equações (63) e (64) pode-se notar que o índice de refração do grupo é sempre maior que o índice de refração da fase. Isto faz com que, na propagação dos sinais GPS, ocorra 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.

Em seguida, com base nos índices de refração da ionosfera serão obtidos os erros devido à ionosfera nas medidas de distâncias advindas do código e da fase.

### 5.3 Erro Devido à Ionosfera nos Sinais GPS

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

$$S = \int_r^s n \, ds, \quad (65)$$

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:

$$\rho = \int_r^s ds \quad (66)$$

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:

$$I_r^s = \int_r^s n \, ds - \int_r^s ds. \quad (67)$$

Substituindo os índices de refração da fase (63) e do grupo (64) na equação (67), se obtém os erros sistemáticos devido à ionosfera para a fase da portadora ( $I_{r_r}^s$ ) e para os sinais modulados pelo código ( $I_{g_r}^s$ ). Desta forma, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_{f_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho \quad (68)$$

ou

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (69)$$

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

$$I_{g_r}^s = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (70)$$

ou

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (71)$$

onde a parcela variável  $\left(\int_r^s n_e ds\right)$  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:

$$\text{TEC} = \int_r^s n_e ds. \quad (72)$$

A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado ( $\text{el}/\text{m}^2$ ). Substituindo a equação (72) nas equações (69) e (71), 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:

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \quad (73)$$

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}. \quad (74)$$

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 (73) e (74), 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 6 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 6 – 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 (73) e (74) 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 7 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras  $L_1$ ,  $L_2$  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 7 – Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.

<b>Frequência</b>	<b>Efeito de 1ª ordem (1 / f<sup>2</sup>)</b>	<b>Efeito de 2ª ordem (1 / f<sup>3</sup>)</b>	<b>Efeito de 3ª ordem (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).

Vale salientar que os sinais GPS também sofrem o efeito de uma camada localizada acima da ionosfera, conhecida por plasmasfera. No entanto, a camada F2 por ser mais densa e por ser altamente variável é a que causa a maior parte dos efeitos na propagação dos sinais GPS (KLOBUCHAR, 1996).

#### **5.4 Cintilação Ionosférica**

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).

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.

Segundo Skone (2000), os efeitos mais intensos da cintilação ionosférica ocorrem nas regiões de baixa latitude geomagnética ( $\pm 10$  até  $\pm 20$  graus), nas regiões onde ocorrem as auroras (65 até 75 graus de latitude geomagnética) e na região que envolve a capa polar (latitudes geomagnéticas maiores que 75 graus). Cintilações que ocorrem nas regiões de altas latitudes (região auroral) e na região equatorial surgem de distintos fenômenos físicos. Na região auroral, a ocorrência da cintilação é devido às tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas. No caso da região equatorial, a cintilação está relacionada mais diretamente com a anomalia equatorial, e produzem um maior impacto na performance de rastreamento dos receptores do que na região de altas latitudes (SKONE, 2000).

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 25 mostra um esquema didático da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.



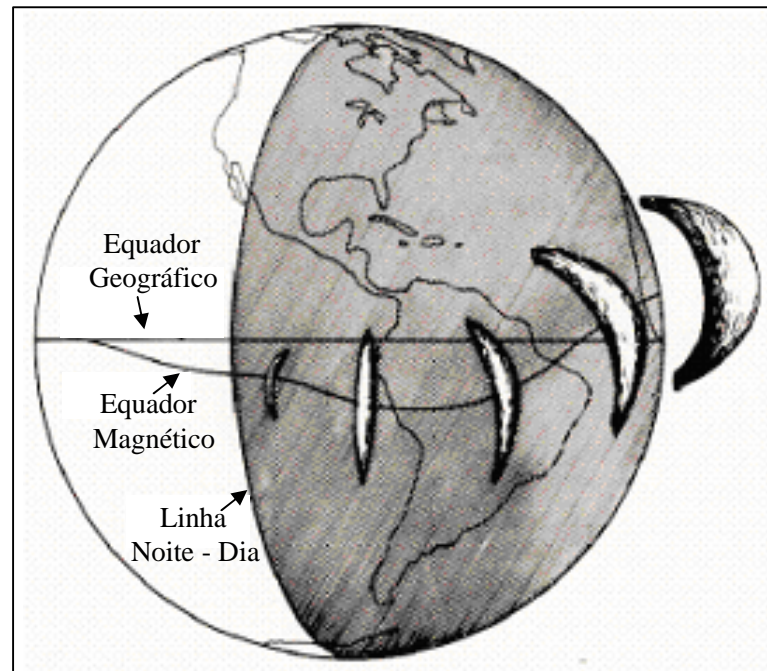


Figura 25 – Ilustração da evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.  
 Fonte: Santana et al., 1999 apud Soares (2001)

No Brasil, as bolhas ionosféricas geralmente ocorrem entre os meses de outubro a março e variam de características com o ciclo de atividade solar cujo período é de cerca de 11 anos. A figura 26 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).

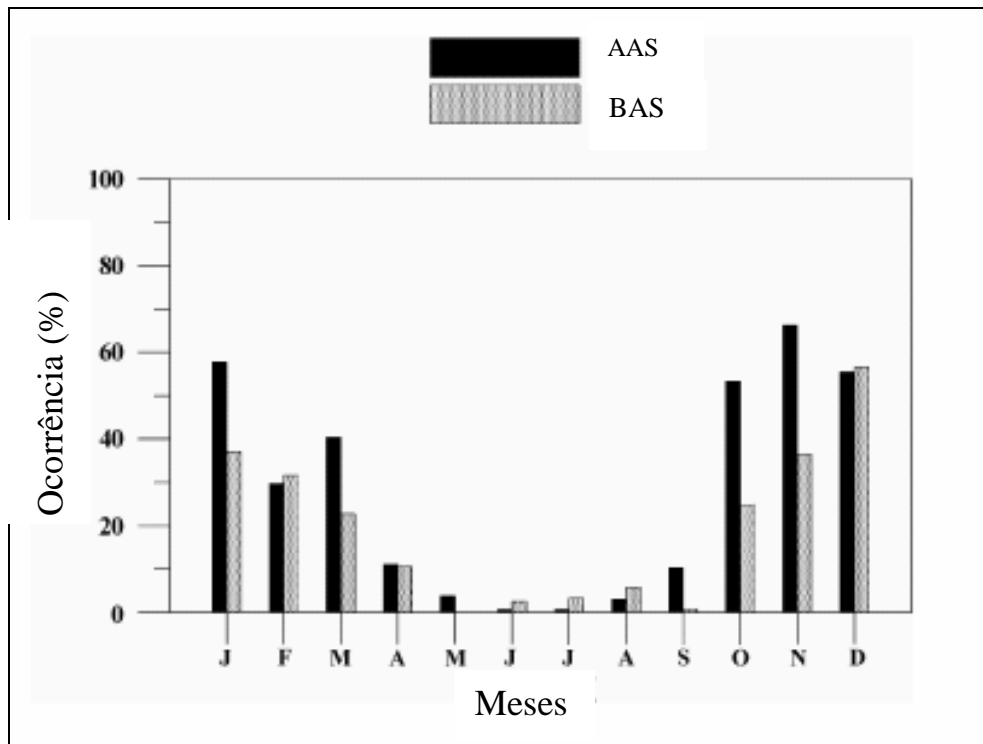


Figura 26 – Variação sazonal da ocorrência de bolhas de plasma.  
 Fonte: Sahai, Fagundes e Bittencourt (2000).

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.

## 6 POSICIONAMENTO RELATIVO

No posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação à de outro(s), cujas coordenadas são conhecidas. As coordenadas do(s) ponto(s) conhecido(s) normalmente estão referenciadas ao WGS 84, ou a um sistema compatível, como o SIRGAS (Sistema de Referência para as Américas) ou ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Vale salientar que, atualmente, devido ao advento dos Sistemas de Controle Ativo (SCA) o usuário pode utilizar apenas um receptor para realizar posicionamento relativo. Os dados dos SCA podem ser acessados via Internet, ftp, ou através do uso de tecnologias de armazenamento de dados (disquetes, ZIP-DRIVE, CD, etc). No Brasil o principal exemplo de SCA é a RBMC.

Deve ser salientada a questão da simultaneidade das observações no posicionamento relativo. Nesse caso, têm-se duas situações possíveis de ocorrer a simultaneidade. A primeira forma é considerar a simultaneidade das observações no momento de transmissão e a segunda no momento de recepção. Entretanto, normalmente, observações recebidas no mesmo instante são transmitidas em instantes diferentes e as transmitidas no mesmo instante são recebidas em instantes diferentes. Isto ocorre porque, na sua grande maioria, o satélite se encontra a distâncias diferentes com relação às duas estações. Diante do exposto, os erros dos relógios dos satélites e receptores não são totalmente eliminados no processo de diferenciação entre as observáveis, ou seja, são minimizados.

Como já mencionado, no posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada em relação à de outro(s), cujas coordenadas são conhecidas (estação base). Na verdade existe um vetor ligando a estação base e a estação de coordenadas desconhecidas. Esse vetor que une as duas estações é conhecido como linha de base. Quando vários receptores estão

rastreando simultaneamente os mesmos satélites, têm-se várias linhas de base. Os elementos que compõem a linha de base ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ ) podem ser estimados pelo método de ajustamento paramétrico (MONICO, 2000). Conseqüentemente, após o acréscimo das componentes da linha de base nas coordenadas da estação base se obtém as coordenadas da estação de interesse. Nota-se, no entanto, que o posicionamento relativo difere do DGPS, pois, no DGPS, aplicam-se as correções estimadas na estação de referencia nas coordenadas ou observações da estação a determinar, enquanto que, no posicionamento relativo, existe um vetor ligando as duas estações.

Dentro do contexto de posicionamento relativo, podem-se citar os seguintes métodos de posicionamento (MONICO, 2000):

- Posicionamento relativo estático;
- Posicionamento relativo estático rápido;
- Posicionamento relativo semicinemático; e
- Posicionamento relativo cinemático.

Detalhes relacionados sobre os outros métodos de posicionamento relativo podem ser encontrados em Monico (2000), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001), Seeber (1993) e Leick (1995).

O método de posicionamento relativo utilizado nesta pesquisa com o objetivo de analisar a influência da ionosfera no mesmo é o relativo estático. Nesse método, o tempo de rastreo é superior a pelo menos 20 minutos, e os receptores permanecem no mesmo lugar no momento de rastreo. Vale salientar um aspecto de extrema importância no contexto do posicionamento relativo: como definir se uma linha de base é curta, média ou longa? Tal definição depende de vários aspectos, principalmente do gradiente espacial do TEC da ionosfera.

## **6.1 Considerações Teóricas Sobre a Influência da Ionosfera na Definição do Comprimento de uma Linha de Base**

No posicionamento relativo a observável normalmente utilizada nos processamentos é a dupla diferença da fase. Após a aplicação do processo da dupla diferenciação os efeitos da ionosfera não são cancelados, e sim minimizados. Este valor remanescente do erro devido à ionosfera é denominado de resíduo ionosférico da dupla diferença. Quanto maior a correlação entre as duas estações, maior é a possibilidade de solucionar o vetor ambigüidade como números inteiros. No entanto, o fato de uma linha de base ser mais longa do que outra não implica que na linha de base mais longa os erros estejam menos correlacionados do que na mais curta. Isso depende de vários fatores, como localização geográfica, hora local, ciclo solar, etc.

Por exemplo, definir o conceito de linha de base curta não é fácil (GOAD, 1998), principalmente no que diz respeito aos efeitos da ionosfera. Os efeitos da troposfera também devem ser considerados, pois a partir de aproximadamente 15 km tem início a decorrelação do erro troposférico entre duas estações GPS (GOAD, 1998). Contudo, sua magnitude é menor do que o resíduo ionosférico. Sendo assim, devido ao gradiente espacial do TEC da ionosfera, deve-se tomar muito cuidado no momento de definir se uma linha de base é curta, média ou longa. Por exemplo, uma determinada linha de base considerada média localizada nas regiões de médias latitudes pode ser considerada curta na região equatorial, onde o gradiente espacial do TEC é alto, devido às várias anomalias e irregularidades que ocorrem nessa região, ao passo que na região de média latitude o comportamento da ionosfera é mais calmo, bem como o gradiente espacial do TEC. Diante do exposto, a ambigüidade pode ser solucionada mais facilmente na região de média latitude do que nas regiões equatoriais.

Goad (1998) mostra um exemplo da dependência da solução da ambigüidade em função dos ciclos solares, visto que estes são dependentes das manchas solares. Em 1983,

quando o número de manchas solares foi baixo, foi possível solucionar o vetor ambigüidade como número inteiro para linhas de base de até 60 km. Em contrapartida, em 1990 – 1991, período de máxima atividade solar, às vezes foi difícil solucionar o vetor ambigüidade para linhas de base de 10 km. Nos experimentos foram utilizados receptores de simples frequência. Mais complicado ainda fica definir qual linha de base pode ser considerada como média, pois esta se encontra entre a curta e a longa. Bock (1998) afirma que é impossível definir precisamente uma distância que possa ser chamada de “média”. O problema principal consiste na diferenciação de uma linha de base curta de uma média.

Deve-se evitar atribuir valor numérico a uma determinada linha de base com o objetivo de qualificá-la como curta, média ou longa. Uma solução para o problema consiste numa definição genérica. Assim, a partir de tal definição, pode-se definir se uma linha de base é curta, média ou longa, independente da região geográfica da ionosfera, do ciclo solar, da hora local, etc. Duas propostas são apresentadas por Bock (1998) com o objetivo de diferenciar uma linha de base curta de uma média. A primeira forma leva em consideração os resíduos ionosféricos e os erros de caráter local, tais como efeitos de multicaminho, ruído do receptor, atraso da onda portadora, etc. Uma linha de base passa a ser considerada como média a partir do momento em que o resíduo ionosférico da dupla diferença passa a ser maior do que o resíduo dos erros de caráter local. Seguindo essa linha de raciocínio, pode-se considerar, se uma linha de base é curta ou média, da seguinte forma:

- Linha de base curta: o resíduo dos erros de caráter local é maior do que o resíduo ionosférico da dupla diferença;
- Linha de base média: o resíduo ionosférico da dupla diferença é maior do que o resíduo dos erros de caráter local.

A segunda forma de definir de uma forma geral se uma linha de base é curta ou média é baseada no tipo de receptor utilizado no rastreamento dos dados GPS. Quando a observável livre dos efeitos da ionosfera ( $L_0$ ), obtida a partir de receptores de dupla frequência, começar a proporcionar melhores resultados do que os obtidos com receptores de simples frequência a linha de base pode ser considerada média. Assim, seguindo essa linha de raciocínio, pode-se considerar, se uma linha de base é curta ou média, da seguinte forma:

- Linha de base curta: ruído da observável livre da ionosfera ( $L_0$ ) é dominante;
- Linha de base média: resíduo ionosférico da dupla diferença é dominante.

De acordo com a segunda definição, pode-se notar que, se os erros entre as duas estações estiverem muito correlacionados, o resíduo ionosférico da dupla diferença será o menor possível, de tal forma, que o ruído da observável livre da ionosfera torna-se dominante. Nesse caso, a linha de base pode ser considerada curta. Caso contrário, a linha de base é considerada média. Vale ressaltar que é possível definir de outras maneiras, de uma forma geral, se uma determinada linha de base é curta ou média. Por exemplo, se o vetor ambigüidade da dupla diferença é fixado com alta confiança (baseada em algum critério de análise de validação), a linha de base é considerada curta. Caso contrário, a linha de base é considerada média.

Diante do exposto pode-se verificar a complexidade na definição de uma determinada linha de base. Consequentemente pode-se também imaginar a complexidade de se elaborar normas de levantamento com GPS, principalmente no Brasil, onde várias irregularidades e anomalias ocorrem. Com isso, fica praticamente impossível elaborar uma norma, no caso do

posicionamento relativo, sem antes conhecer de forma aprofundada a ionosfera na região brasileira. Inicialmente se deve evitar atribuir valores numéricos com o objetivo de qualificar se uma determinada linha de base é curta ou média. Outra questão importante diz respeito ao tempo de rastreamento dos dados em função do comprimento da linha de base. Trata-se de outro aspecto complicado de ser determinado, devido, principalmente, à variação diária da ionosfera. Por exemplo, não se pode afirmar que numa determinada linha de base os resultados obtidos serão melhores se o período de coleta de dados for maior, pois, mais importante do que o tempo de coleta, é saber qual o melhor momento para se coletar dados, ou seja, em quais momentos a ionosfera está menos ativa. Talvez seja melhor coletar dados por uma hora no período da manhã do que coletar dados por 4 horas no período da tarde, como por exemplo, das 15:00 até 19:00 TU (12:00 até 16:00 HL), período em que a ionosfera está no pico da atividade diária, implicando num alto gradiente espacial do TEC, que por sua vez aumentará o resíduo ionosférico da dupla diferença. Vale salientar que nesse caso só está sendo considerada a variação diária da ionosfera.

Mais um aspecto importante é a atividade solar, pois, dependendo do período do ciclo solar, até mesmo no período da manhã a ionosfera pode apresentar altos gradientes espaciais do TEC. Outro aspecto importante diz respeito à ocorrência de bolhas ionosféricas, que por sua vez, aumentam a ocorrência da cintilação ionosférica, podendo neste caso, até mesmo no período da madrugada proporcionar problemas no posicionamento com GPS. Em períodos de alta atividade solar frequentemente ocorre um segundo pico da anomalia equatorial, geralmente maior do que o primeiro, nas horas que precedem à meia noite. Assim, nesse período os resultados podem ser influenciados pelo alto gradiente do TEC. Esse segundo pico pode apresentar maiores problemas do que o primeiro pico, pois, como no período noturno a densidade de elétrons é consideravelmente menor do que o período diurno, no momento da passagem do segundo pico da anomalia, ocasionará num maior gradiente espacial do TEC do que o primeiro pico.



## 7 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Com o objetivo de analisar a influência da ionosfera no posicionamento relativo estático foram realizados três experimentos. No primeiro foram coletados dados no período de declínio da atividade solar do ciclo 23 (2003 - 2004) nas quatro estações do ano, em nove estações, formando linhas de base que variam de 05 à 120 km com relação à estação UEPP da RBMC. A partir desse experimento foi possível verificar o efeito da ionosfera em função da variação do comprimento da linha de base. Nesse experimento foi possível discutir questões relativas à definição de uma linha de base, bem como a variação diária da ionosfera no posicionamento relativo estático. Nesse experimento, devido à utilização de diferentes receptores na coleta de dados no inverno, não foi possível realizar uma análise sazonal mais realística nessa estação do ano, pois os resultados estavam influenciados pelo ruído residual da dupla diferença.

Com o objetivo de analisar a variação sazonal da ionosfera, de forma mais realística, foi realizado um segundo experimento com dados coletados nas quatro estações do ano, no período de máxima atividade solar (2000-2001). Nesse caso a linha de base foi formada com dados das estações PARA (Curitiba/PR) e UEPP (Presidente Prudente/SP), ambas da RBMC, que utilizam receptores do mesmo fabricante. Com dados coletados nessas mesmas estações foi realizado um terceiro experimento. Foram utilizados dados coletados durante e após uma explosão solar, que causou uma forte tempestade geomagnética. Assim, foi possível analisar a influência de um evento solar, que por sua vez pode alterar de forma significativa as condições ionosféricas.

Em suma, a partir dos experimentos realizados foi possível discutir questões relativas à complexidade na definição de uma linha de base, em função da variação diária da ionosfera. Também foi possível realizar uma análise sazonal do efeito da ionosfera, bem como a

influência de uma tempestade geomagnética, causada por uma forte explosão solar. Todos os dados utilizados nos experimentos são referentes à região equatorial, assim, não foi possível realizar uma análise da influência da ionosfera em função da localização geográfica, que também afeta consideravelmente no posicionamento relativo com receptores de simples frequência.

### 7.1 Primeiro Experimento

Nesse experimento foram coletados dados GPS na rodovia Raposo Tavares, próximo à região de Presidente Prudente, nas quatro estações do ano, em nove estações, formando linhas de base de 05 à 120 km. O tempo de rastreamento adotado para coleta de dados GPS em função do comprimento da linha de base é dado na tabela 8.

Tabela 8 – Relação entre tempo de rastreamento e comprimento da linha de base

<b>Comprimento da linha de base</b>	<b>Tempo de rastreamento (minutos)</b>
< 20 km	40
20...50	120
50...100	180
>100	240

Vale salientar que o tempo adotado na coleta de dados teve como base a Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais, que trata da relação entre tempo de ocupação e distância entre as estações para levantamento de controle (INCRA, 2003).

#### 7.1.1 Estratégia de processamento

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. O

receptor da estação UEPP é um Trimble 4000 SSI de dupla frequência. Com o objetivo de obter as componentes das linhas de base “consideradas verdadeiras”, uma primeira coleta de dados GPS foi realizada com um receptor de dupla frequência Ashtech ZXII nas estações móveis no mês de julho (próximo ao solstício de inverno). Assim foi possível aplicar no processamento das linhas de base a combinação linear livre da ionosfera ( $L_0$ ). No entanto, como para linhas de base de até aproximadamente 15 km o ruído da observável  $L_0$  torna-se dominante, então se optou em aplicar o modelo de Klobuchar no processamento dessas linhas de base.

Também foram coletados dados nas outras três estações do ano, com o objetivo de realizar uma análise sazonal da influência da ionosfera. No inverno, como já mencionado, foi utilizado o receptor Ashtech ZXII, enquanto que no verão, outono e primavera foram utilizados receptores de simples frequência nas estações móveis (Trimble 4600 LS). No caso do receptor Ashtech ZXII, após o processamento com  $L_0$ , foram reprocessadas as linhas de base somente com dados da portadora  $L_1$  (código e fase), pois o objetivo desta pesquisa é analisar o efeito da ionosfera no posicionamento relativo com receptores de simples frequência.

O procedimento para verificar a influência da ionosfera foi realizado por meio da comparação dos valores considerados “verdadeiros” das coordenadas das linhas de base estimadas ( $L_0$ ) com os seguintes casos:

- Processamento com dupla diferença do código (DDC); e
- Processamento com dupla diferença da fase (DDF).

As tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam várias informações, tais como: linhas de base, período de rastreamento (Tempo Universal - TU), dia Juliano e dia do ano, com relação aos meses de junho (2003 – próximo ao solstício de inverno), outubro (2003 – próximo ao equinócio

de outono), janeiro – fevereiro (2004 – próximo ao solstício de verão) e abril (2004 – próximo ao equinócio de primavera). Os dois números ao lado direito da sigla RT (Raposo Tavares) da primeira coluna indicam o comprimento aproximado (km) das linhas de base com relação à estação UEPP.

Tabela 9 – Informações sobre a coleta de dados – Junho 2003

<b>INVERNO – JUNHO/2003</b>			
<b>Linhas de base</b>	<b>Período de Rastreio (UT)</b>	<b>Dia Juliano</b>	<b>Dia do ano</b>
UEPP – RTO5	13:20 – 14:00	08/06/2003	159
UEPP – RT15	14:30 – 15:10	08/06/2003	159
UEPP – RT20	15:50 – 16:30	08/06/2003	159
UEPP – RT30	14:50 – 16:50	15/06/2003	166
UEPP – RT40	12:30 – 14:30	15/06/2003	166
UEPP – RT60	12:50 – 15:50	28/06/2003	179
UEPP – RT80	18:25 – 21:25	28/06/2003	179
UEPP – RT100	17:25 – 20:25	29/06/2003	180
UEPP – RT120	12:40 – 16:40	29/06/2003	180

Tabela 10 – Informações sobre a coleta de dados – Outubro 2003

<b>OUTONO – OUTUBRO/2003</b>			
<b>Linhas de base</b>	<b>Período de Rastreio (UT)</b>	<b>Dia Juliano</b>	<b>Dia do ano</b>
UEPP – RTO5	11:12 – 11:52	18/10/2003	291
UEPP – RT15	12:20 – 13:00	18/10/2003	291
UEPP – RT20	13:15 – 13:55	18/10/2003	291
UEPP – RT30	13:42 – 15:42	18/10/2003	291
UEPP – RT40	14:32 – 16:32	18/10/2003	291
UEPP – RT60	17:10 – 20:10	18/10/2003	291
UEPP – RT80	11:30 – 14:30	19/10/2003	292
UEPP – RT100	11:45 – 14:45	19/10/2003	292
UEPP – RT120	15:22 – 19:22	19/10/2003	292

Tabela 11 – Informações sobre a coleta de dados – Janeiro – Fevereiro 2004

<b>VERÃO – JANEIRO e FEVEREIRO/2004</b>			
<b>Linhas de base</b>	<b>Período de Rastreio (UT)</b>	<b>Dia Juliano</b>	<b>Dia do ano</b>
UEPP – RTO5	11:20 – 12:00	26/02/2004	057
UEPP – RT15	12:40 – 13:20	26/02/2004	057
UEPP – RT20	13:05 – 13:45	26/02/2004	057
UEPP – RT30	14:00 – 16:00	28/01/2004	028
UEPP – RT40	15:00 – 17:00	28/01/2004	028
UEPP – RT60	11:05 – 14:05	03/02/2004	034
UEPP – RT80	11:45 – 14:45	03/02/2004	034
UEPP – RT100	14:50 – 17:50	26/02/2004	057
UEPP – RT120	15:40 – 19:40	26/02/2004	057

Tabela 12 – Informações sobre a coleta de dados – Abril 2004

<b>PRIMAVERA – ABRIL/2004</b>			
<b>Linhas de base</b>	<b>Período de Rastreio (UT)</b>	<b>Dia Juliano</b>	<b>Dia do ano</b>
UEPP – RTO5	11:10 – 11:50	14/04/2004	105
UEPP – RT15	12:15 – 12:55	14/04/2004	105
UEPP – RT20	12:40 – 13:20	14/04/2004	105
UEPP – RT30	13:25 – 15:25	14/04/2004	105
UEPP – RT40	14:00 – 16:00	14/04/2004	105
UEPP – RT60	17:00 – 20:00	14/04/2004	105
UEPP – RT80	18:25 – 21:25	14/04/2004	105
UEPP – RT100	12:00 – 15:00	28/04/2004	119
UEPP – RT120	15:40 – 19:40	28/04/2004	119

No processamento dos dados foram utilizadas as efemérides transmitidas, e o modelo adotado para corrigir o efeito da troposfera foi o de Hopfield. As observáveis abaixo de 15 graus de elevação não participaram do processamento.

### 7.1.1.1 Resultados e análise

As figuras 27, 28, 29 e 30 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das coordenadas resultantes planimétricas (N, E) com relação às coordenadas consideradas verdadeiras, para as campanhas dos meses de junho (2003), outubro (2003), janeiro e fevereiro (2004) e abril (2004), ambos com o processamento da DDC e da DDF.

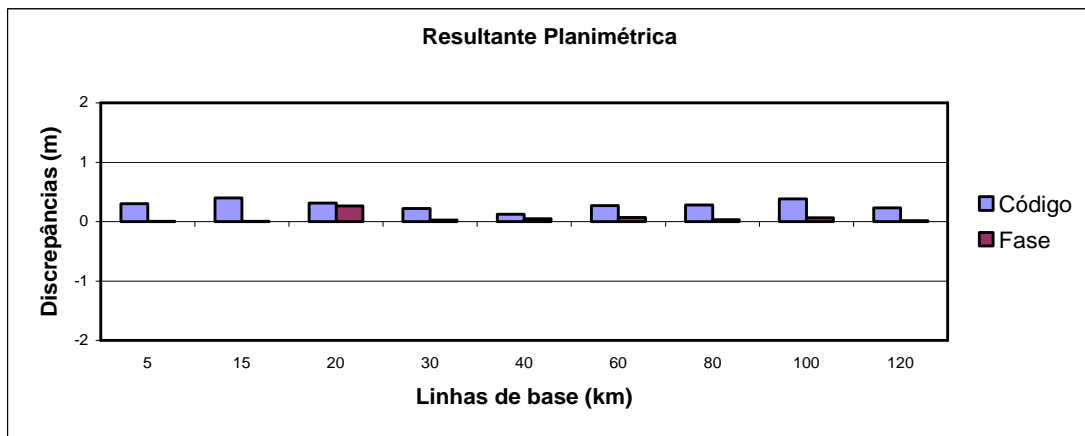


Figura 27 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Junho (2003)

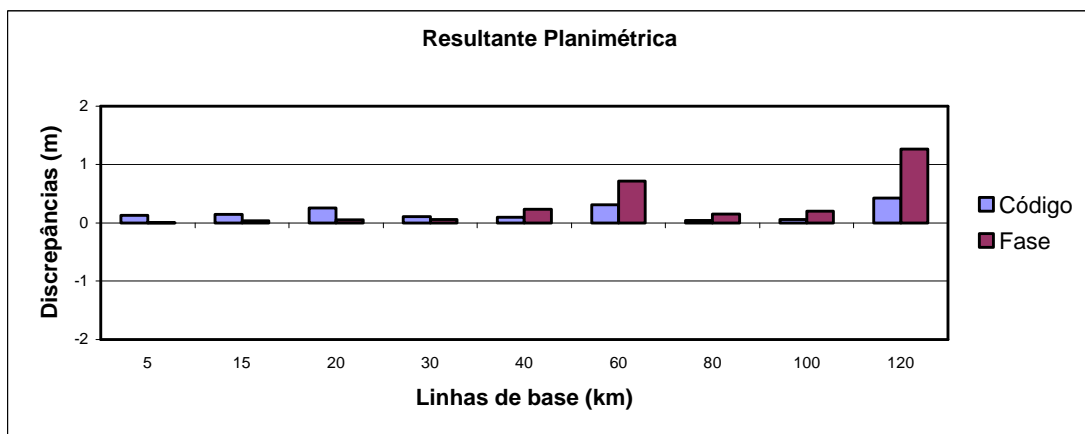


Figura 28 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Outubro (2003)

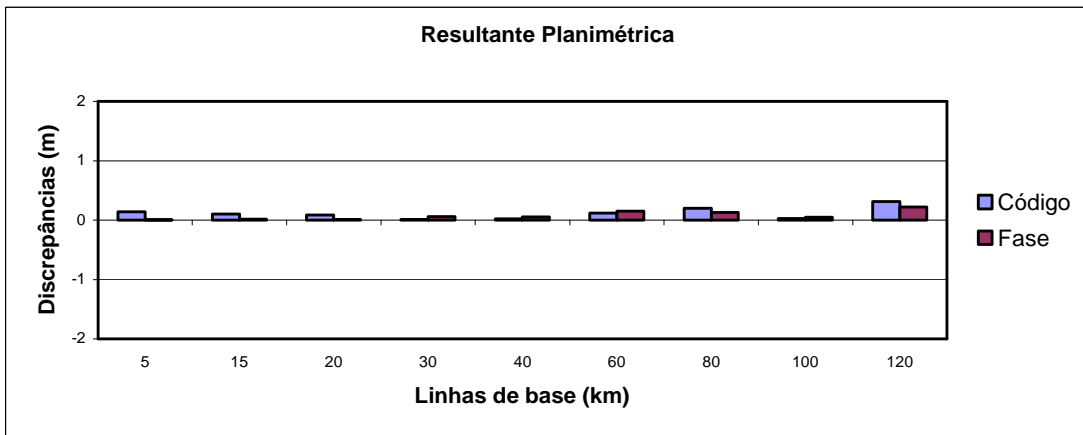


Figura 29 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Jan - Fev (2004)

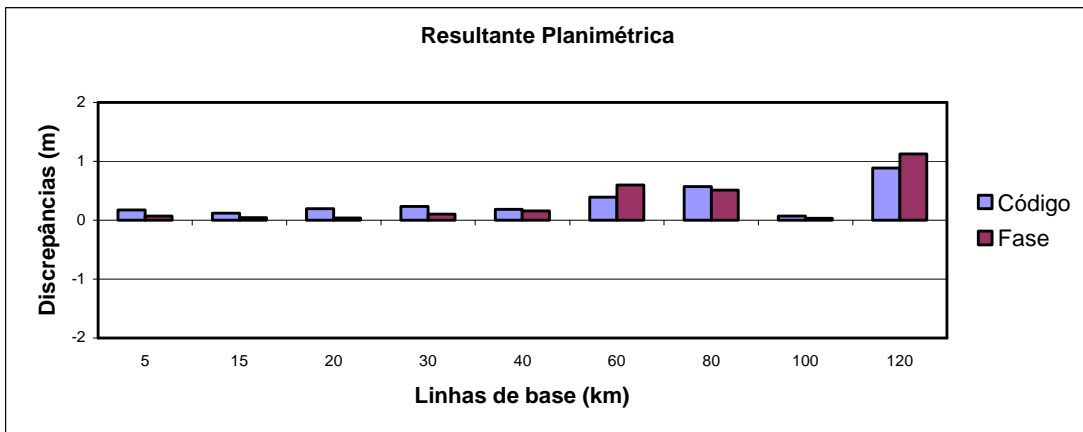


Figura 30 – Discrepâncias entre as coordenadas resultantes planimétricas - Abril (2004)

De acordo com as figuras 28, 29 e 30 pode-se notar a variação sazonal da ionosfera. Próximo aos equinócios, ou seja, nos meses de abril e outubro verifica-se que os valores das discrepâncias, de uma forma geral, são maiores. Com relação ao período de janeiro-fevereiro, foram obtidos os menores valores para as discrepâncias. Esses resultados já eram esperados, pois nos equinócios os efeitos sistemáticos da ionosfera são mais intensos, enquanto que no solstício de (verão) são menos intensos. Isto ocorre devido a posição relativa entre o Sol e a Terra. Nos equinócios a configuração geométrica entre os dois astros é favorável para uma

maior concentração de elétrons na região brasileira, enquanto que no verão, esta configuração é menos favorável.

Uma configuração menos favorável ainda para uma alta concentração de elétrons na região brasileira ocorre no inverno (solstício de inverno), bem como do seu gradiente espacial. O valor do TEC nesse período pode cair pela metade, se comparado com o período próximo aos equinócios. Isto foi verificado em Oliveira (2003), onde foi calculado o TEC para o Brasil em vários períodos do ano. Em seus experimentos os maiores valores obtidos do TEC para o Brasil compreenderam o período de março/abril e setembro/outubro, ou seja, próximo aos equinócios. Nesse período o valor do TEC chegou a atingir 160 unidades de TEC, ao passo que no período de junho/julho o valor do TEC não ultrapassou 80 unidades. Próximo ao solstício de verão, ou seja, em janeiro e fevereiro, os valores do TEC são, aproximadamente, 120 unidades. Vale ainda salientar que esses valores do TEC foram calculados no ano de 2002. Assim, em 2003 espera-se que esse valor seja menor ainda, pois em 2002 teve início o período de declínio da atividade solar do ciclo 23.

Diante do exposto, esperava-se que no inverno ocorressem os menores valores para as discrepâncias. Porém, os resultados obtidos não mostraram isso, de acordo com a figura 27, onde os valores das discrepâncias, obtidos a partir da DDC, de uma forma geral, foram maiores do que no verão (figura 29). Provavelmente isto ocorreu devido à coleta de dados em junho ter sido realizada com receptores de diferentes fabricantes. Pois, cada fabricante de receptores GPS tem a flexibilidade de projetar seus próprios *hardwares* e aplicar suas próprias técnicas de correlação do código (JAKAB, 2001). Assim, o ruído residual da dupla diferença do código será maior quando se utiliza receptores de diferentes fabricantes. Na verdade o ruído não depende apenas da técnica de processamento do sinal, mas dos vários componentes de um receptor. Com isso, os ruídos residuais da dupla diferença formados a partir do código



provavelmente impossibilitaram uma análise sazonal no mês de junho, devido ao fato de que, no processamento a partir da DDC, as linhas de base absorveram parte dos erros residuais ionosféricos. Com relação às discrepâncias obtidas a partir da DDF verifica-se que seus valores de uma forma geral foram similares aos obtidos em janeiro-fevereiro, pois o ruído da fase é milimétrico. Com isso, as ambigüidades e as linhas de base absorveram um valor menor do ruído residual, fazendo com que os valores obtidos com a DDF sejam compatíveis no período de junho e janeiro-fevereiro. Desta forma as discrepâncias obtidas, principalmente a partir da DDC, não refletiram a condição ionosférica no mês de junho.

No caso das outras estações do ano foram utilizados receptores da Trimble, sendo um 4600 LS (móvel) e um 4000 SSI (base), que utilizam as mesmas técnicas de correlação de código, elaborado pela Trimble. Assim, os resultados evidenciaram a variação sazonal, pois os ruídos residuais da DDC e da DDF foram minimizados consideravelmente, tornando os erros residuais ionosféricos dominantes.

Um fato que deve ser salientado diz respeito à dependência da linha de base com relação à variação diária da ionosfera. Por exemplo, no caso da figura 30, referente ao mês de abril, com relação à linha de base de 100 km, nota-se um caso que merece ser destacado. Esperava-se que esta linha de base apresentaria valores de discrepâncias maiores do que a linha de base de 80 ou 60 km, pois, à medida que o receptor móvel se distancia da estação base espera-se que as condições ionosféricas estejam menos correlacionadas nas duas estações. Assim, um maior valor da discrepância era esperado. Entre todas as linhas de base processadas a de 100 km foi a que proporcionou a menor discrepância, até mesmo melhor do que a linha de base de 05 km. De acordo com a tabela 10, o período de coleta de dados foi entre às 12:00 – 15:00 UT (09:00 – 12:00 HL). A partir das 15:40 UT (12:40 HL) se deu início a coleta de dados da estação móvel localizada à 120 km da estação base, com término às 19:40 UT (16:40 HL). Nesse período, de

acordo com a variação diária da ionosfera, é um período em que a mesma se encontra no pico da atividade diária. Da mesma forma, nas linhas de base de 60 e 80 km, respectivamente, o tempo de rastreamento foi das 17:00 – 20:00 UT (14:00 – 17:00 HL) e 18:25 – 21:25 UT (15:25 – 18:25 HL), períodos de alta atividade ionosférica.

A figura 31 mostra a baixa variação do TEC no momento de rastreamento dos dados na linha de base de 100 km (12:00 – 15:00 UT), bem como a alta variação do TEC no momento de rastreamento da linha de base de 120 km (15:40 – 19:40 UT). Os dados nessas duas linhas de base foram coletados no mesmo dia (28/04/2004). Os mapas do TEC para o Brasil foram elaborados a partir de dados fornecidos pelo CODE no formato IONEX. Vale salientar que três estações do CODE estão localizadas no Brasil.

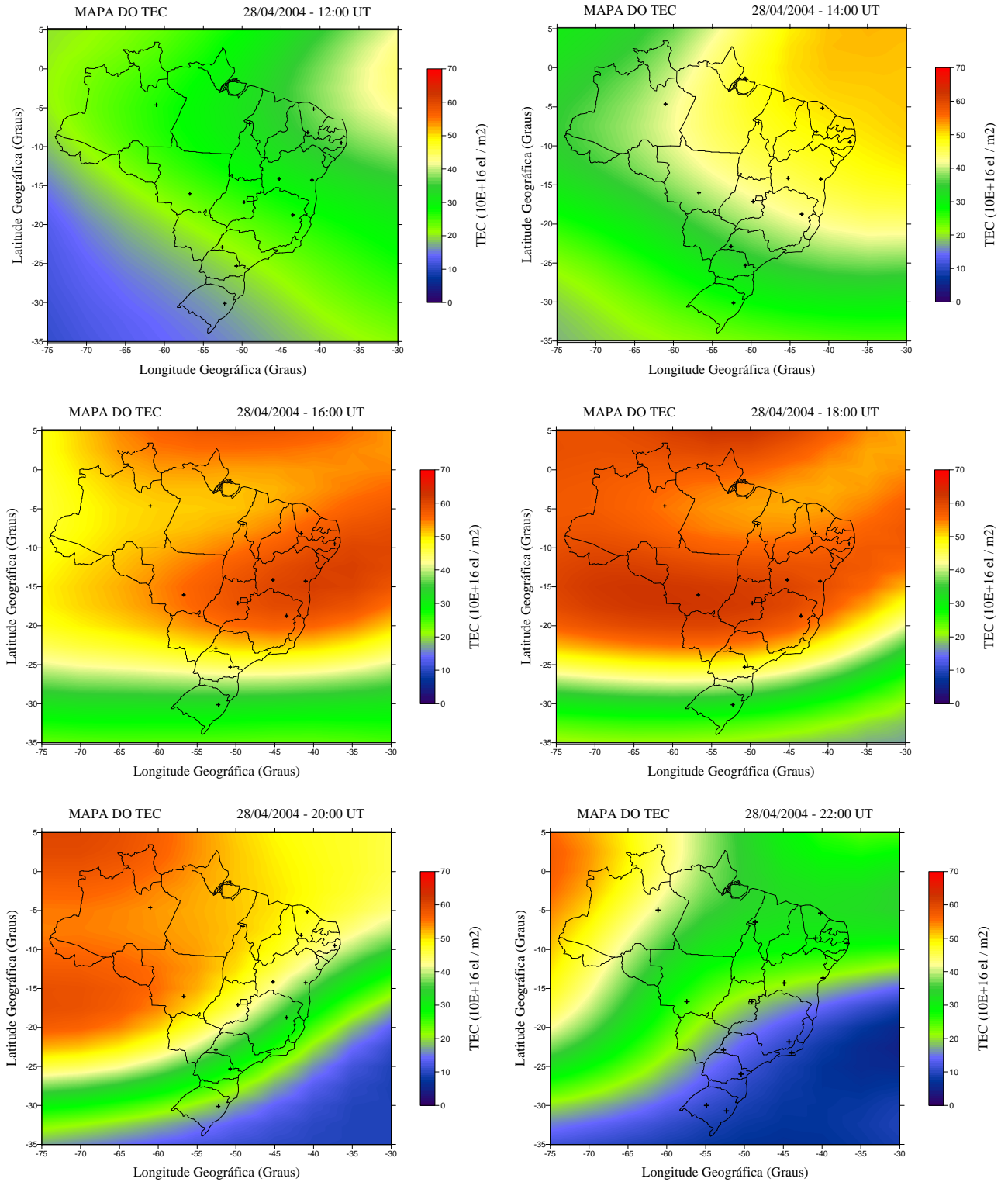


Figura 31 – Mapas do TEC para o Brasil

De acordo com a figura 31 pode-se notar a alta variação do TEC no momento de rastreamento dos dados da linha de base de 120 km (15:40 – 19:40 UT). Nesse momento verifica-se que parte da anomalia equatorial passa sobre a área de Presidente Prudente, proporcionando alta variação do TEC. Com isso, as discrepâncias obtidas nesse caso são as maiores, ambas para a DDF e DDC. Os valores das discrepâncias nesse caso atingiram aproximadamente 1 metro. No caso da linha de base de 100 km nota-se a baixa variação do TEC (12:00 – 15:00 UT). Consequentemente foram obtidos os menores valores das discrepâncias, até mesmo se comparado com as linhas de bases mais curtas. Os valores foram, respectivamente, para a DDF e DDC, de 0,027 e 0,072 m. Diante do exposto, verifica-se a complexidade de se definir qual o comprimento de uma linha de base como curta ou média. Era de se esperar que a discrepância da linha de base de 100 km fosse consideravelmente maior do que, por exemplo, a linha de base de 05 km, que, tradicionalmente é considerada como curta. Isso mostra a alta dependência da definição de uma linha de base do gradiente espacial do TEC. Vale salientar que isso é válido para receptores de simples frequência, pois com receptores de dupla frequência os efeitos de primeira ordem da ionosfera podem ser eliminados.

Outro fato importante que deve ser salientado é quando a ionosfera está mais ativa, ou seja, próximo aos equinócios (abril e outubro) e em períodos de máxima atividade diária da ionosfera, bem como de seu gradiente espacial, que ocorre entre as 15:00 UT até 19:00 UT (12:00 HL até 16:00 HL). Nesse período os resultados obtidos a partir da DDC são melhores dos obtidos a partir da DDF. Isto pode ser verificado na figura (28 - outubro), onde nas linhas de base de 60 e 120 km as discrepâncias obtidas a partir da DDC são melhores do que a partir da DDF. Nas linhas de base de 60 e 120 km os períodos de rastreamento foram respectivamente das 17:10 às 20:10 UT (14:10 às 17:10 HL) e 15:22 às 19:22 UT (13:22 às 17:22 HL - horário de verão). Esses horários compreendem a um período de alta atividade ionosférica. Situação semelhante ocorreu

em abril, de acordo com a figura 30, com relação às mesmas linhas de base. Nesse caso os resultados obtidos a partir da DDC também foram melhores do que os obtidos a partir da DDF. Nessas linhas de base o período de rastreamento também compreendeu o período de máxima atividade diária da ionosfera. Na linha de base de 60 km o período foi das 17:00 até 20:00 UT (14:00 até 17:00 HL), enquanto que na linha de base de 120 km o período foi das 15:40 até 19:40 UT (12:40 até 16:40 HL). Diante do exposto, verifica-se que, em períodos de pico da atividade ionosférica é preferível processar os dados a partir da DDC.

Em contrapartida, quando o vetor ambigüidade é solucionado como números inteiros, os resultados obtidos a partir da DDF são significativamente melhores do que os obtidos a partir da DDC, devido ao alto nível de precisão da distância obtida entre o satélite e receptor quando o vetor ambigüidade é solucionado. A tabela 13 mostra os casos em que o vetor ambigüidade foi solucionado como números inteiros (*fixed*), bem como a solução do vetor ambigüidade como números reais (*float*). Foi adotado o valor “3” para o *Ratio Test*, com o objetivo de aumentar a confiança do teste.

Tabela 13 – Solução do vetor ambigüidade para as quatro campanhas de coleta de dados GPS.

<b>Solução da Ambigüidade</b>				
<b>Linhas de base</b>	<b>Junho</b>	<b>Outubro</b>	<b>Jan - Fev</b>	<b>Abril</b>
UEPP – RT05	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
UEPP – RT15	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
UEPP – RT20	Float	Fixed	Fixed	Fixed
UEPP – RT30	Float	Fixed	Float	Float
UEPP – RT40	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT60	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT80	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT100	Float	Float	Float	Float
UEPP – RT120	Float	Float	Float	Float

De acordo com a tabela 13 e as discrepâncias apresentadas nas figuras 27, 28, 29 e 30 verifica-se que quando o vetor ambigüidade é solucionado, os valores das discrepâncias obtidas a partir da DDF são os menores, devido à alta precisão dos resultados quando se soluciona o vetor ambigüidade como números inteiros. No caso do mês de janeiro (solstício), onde normalmente o gradiente espacial do TEC é menor do que as outras estações do ano (com exceção do solstício de inverno), as discrepâncias obtidas a partir da DDC também são as menores, para linhas de base de até 20 km. Isso ocorreu, provavelmente, devido ao fato do resíduo ionosférico da dupla diferença ser de pequena magnitude, devido a alta correlação do efeito sistemático da ionosfera nas duas estações. Com isso, as componentes das linhas de base absorveram um baixo valor do resíduo ionosférico, proporcionando valores compatíveis com os obtidos a partir da fase da onda portadora. Outro fator importante foi o período de coleta dos dados nesse período, que correspondeu o período de manhã, período de menor atividade da ionosfera.

No caso do mês de junho o vetor ambigüidade foi solucionado para linhas de base de até 15 km. Esperava-se que no caso dos resultados referentes a este período o vetor ambigüidade da dupla diferença fosse solucionado para mais linhas de base. No entanto, como já mencionado, nesse caso foram utilizados dois receptores de diferentes fabricantes, fazendo com que a ambigüidade da dupla diferença absorvesse parte do ruído residual da DDF, juntamente com o resíduo ionosférico. Nas linhas de base de 05 e 15 km a coleta de dados foi realizada num período da ionosfera em que se encontrava num baixo gradiente (13:20 até 15:10 UT – 10:20 até 12:10 HL). Em contrapartida, na linha de base 20 km a coleta de dados foi realizada no período das (15:50 até 16:30 UT - 12:50 até 13:30 HL), período em que a ionosfera começa a ficar mais ativa. Provavelmente o ruído residual da DDF e o gradiente espacial do TEC nesse período foram

suficientes para não permitir que o vetor ambigüidade da DDF fosse solucionado como números inteiros.

No caso do mês de outubro, vetores ambigüidades foram solucionados em linhas de base de até 30 km. O período de coleta desses dados foi realizado entre 11:12 – 15:42 UT (08:12 – 12:42 HL), período de baixa variação do TEC. No entanto, o período de coleta de dados referente à linha de base de 40 km foi das 14:32 até 16:32 UT (11:32 até 13:32 HL), período em que a ionosfera começa a ficar mais ativa.

Vetores das ambigüidades foram solucionados em linhas de base de até 20 km no caso de mês de janeiro. O período de coleta de dados referente à linha de base de 30 km foi entre 14:00 e 16:00 UT (12:00 e 14:00 HL – horário de verão), período da ionosfera mais ativa. Com relação ao mês de abril, vetores das ambigüidades também foram solucionados até linha de base de 20 km.

As figuras 32, 33, 34 e 35 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das coordenadas altimétricas (h) com relação às coordenadas consideradas verdadeiras, para as campanhas dos meses de junho (2003), outubro (2003), janeiro e fevereiro (2004) e abril (2004), ambos calculados a partir do processamento da DDC e da DDF.

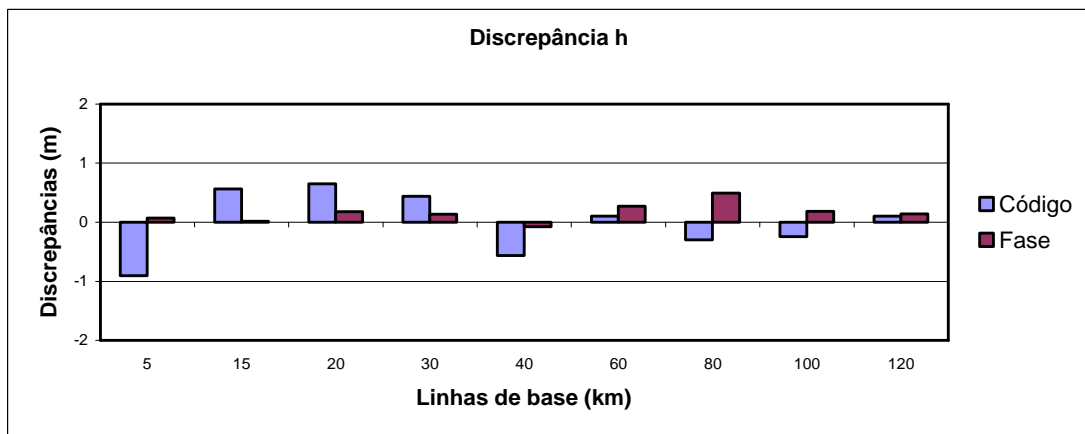


Figura 32 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Junho (2003)

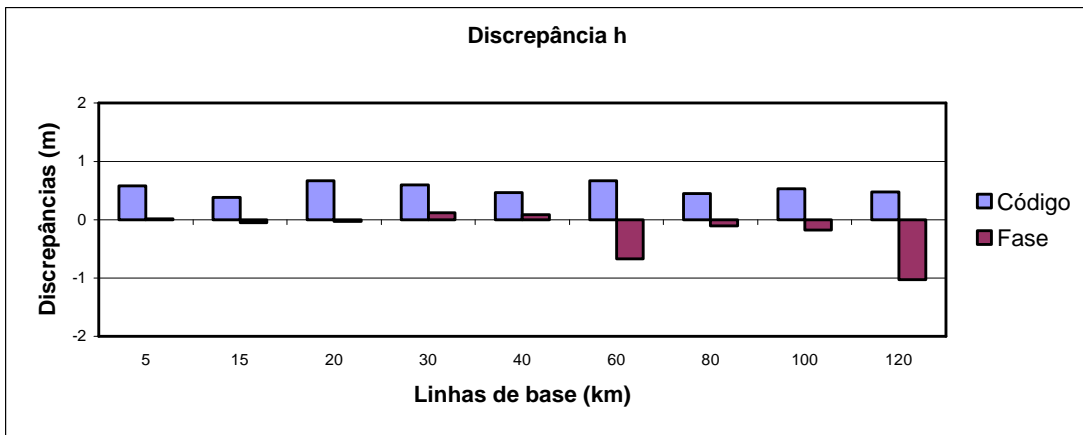


Figura 33 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Outubro (2003)

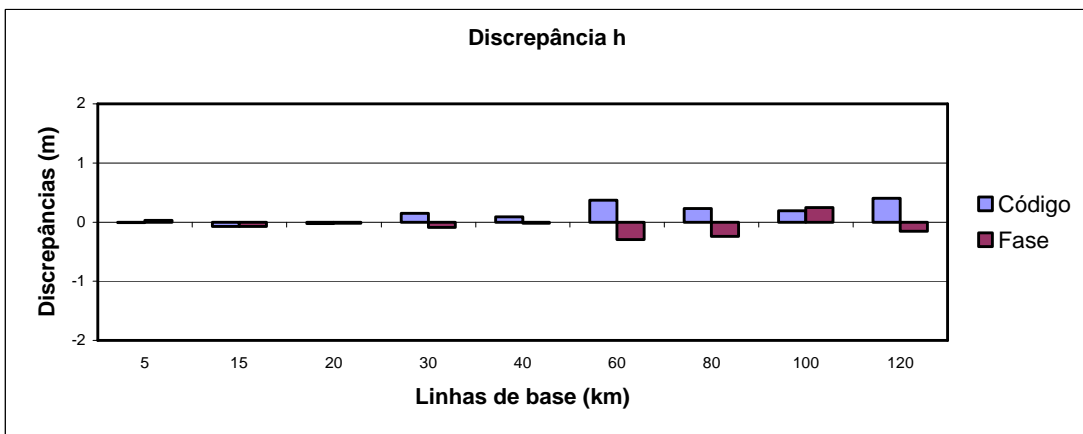


Figura 34 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Jan-Fev (2004)

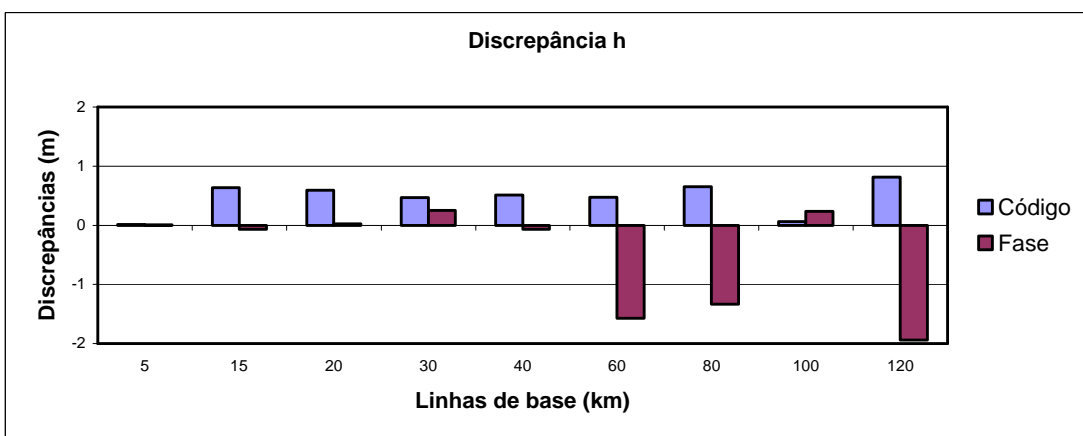


Figura 35 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas - Abril (2004)



De acordo com as figuras 32, 33, 34 e 35, além da variação diária da ionosfera, pode-se notar também a variação sazonal da ionosfera de forma mais acentuada do que os resultados obtidos na resultante planimétrica (com exceção do mês de junho). Nota-se também que o efeito sistemático da ionosfera é mais intenso na altitude geométrica, fazendo com que os valores das discrepâncias atinjam aproximadamente, em alguns casos, 2,0 metro (figura 35). Esta conclusão já foi verificada em DAL POZ (2002), num trabalho de iniciação científica. Neste trabalho se verificou que o efeito sistemático da ionosfera na planimetria é menor do que na altimetria, ou seja, uma influência mais significativa do efeito da ionosfera ocorre na altimetria do que na planimetria.

Novamente verifica-se a forte influência do ruído residual da DDC nos resultados obtidos, de acordo com a figura 32, devido a utilização de receptores de diferentes fabricantes na coleta de dados referente ao mês de junho. Próximo aos solstícios de inverno (junho) ocorre a menor densidade do TEC, bem como de seu gradiente espacial. No entanto, em junho, nas linhas de base de 05, 15 e 20 km, verifica-se altos valores das discrepâncias nos resultados obtidos a partir da DDC. Em janeiro, cuja densidade do TEC é maior do que junho verifica-se que, mesmo assim, os valores das discrepâncias para linhas de base de 05, 15 e 20 km foi baixo, compatível com os resultados obtidos a partir da DDF. No mês de junho os resultados eram para serem similares ou melhores, pois o gradiente espacial do TEC nesse período, normalmente, é o mais baixo do ano. No entanto não foi verificado este fato, devido ao ruído residual da DDC, que foi dominante para essas linhas de base.

## 7.2 Segundo Experimento

### 7.2.1 Estratégia de processamento

Nesse experimento foram utilizados dados de duas estações da RBMC, de Curitiba (PARA) e de Presidente Prudente (UEPP). No processamento, a estação UEPP foi fixada com as coordenadas consideradas verdadeiras, referenciadas ao SIRGAS 2000, que adota o elipsóide de referencia GRS80.

Da mesma forma que no primeiro experimento, o processamento dos dados foi realizado com a dupla diferença do código e da fase (portadora  $L_1$ ) e foram utilizadas as efemérides transmitidas. Como nesse caso as coordenadas estimadas são da estação PARA, pertencente à RBMC, os resultados considerados verdadeiros foram as coordenadas referenciadas ao SIRGAS 2000. O processamento com a observável  $L_0$  também foi realizado. Com o objetivo de realizar uma análise sazonal do efeito da ionosfera no período de máxima atividade solar foram utilizados dados das quatro estações do ano no ciclo 23 (2000-2001). Uma análise diária da ionosfera também foi realizada, pois os dados foram processados de duas em duas horas, de forma a abranger o período de 24 horas. Vale salientar que os receptores utilizados nas duas estações da RBMC são os mesmos, neste caso dois Trimble 4000 SSI, sendo assim, os erros residuais de caráter local são minimizados, tornando-se desta forma, o erro residual ionosférico da dupla diferença dominante. Com isso, é possível realizar uma análise sazonal mais realística do efeito da ionosfera. Fato esse que não ocorreu no primeiro experimento, no caso do mês de junho.

### 7.2.1.1 Resultados e análise

As figuras 36, 37, 38 e 39 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das resultantes planimétricas (N, E) com relação as coordenadas consideradas verdadeiras, para um dia dos meses de janeiro, abril, junho e outubro, ambos com o processamento da DDC e DDF.

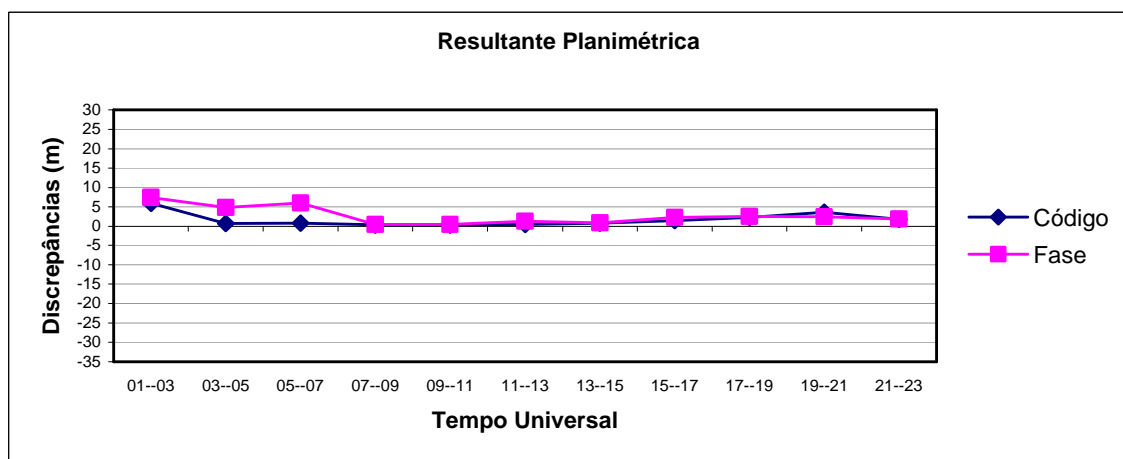


Figura 36 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Janeiro (2001)

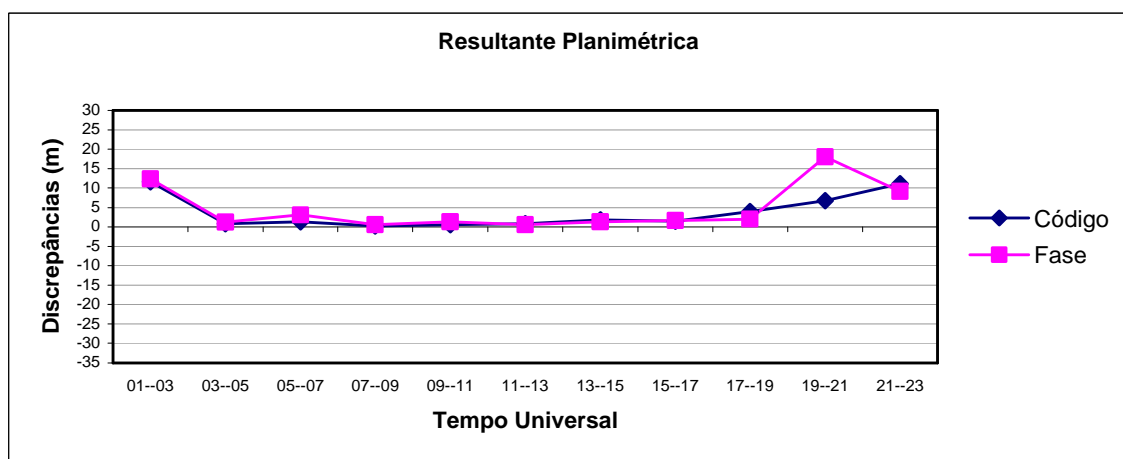


Figura 37 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Abril (2001)

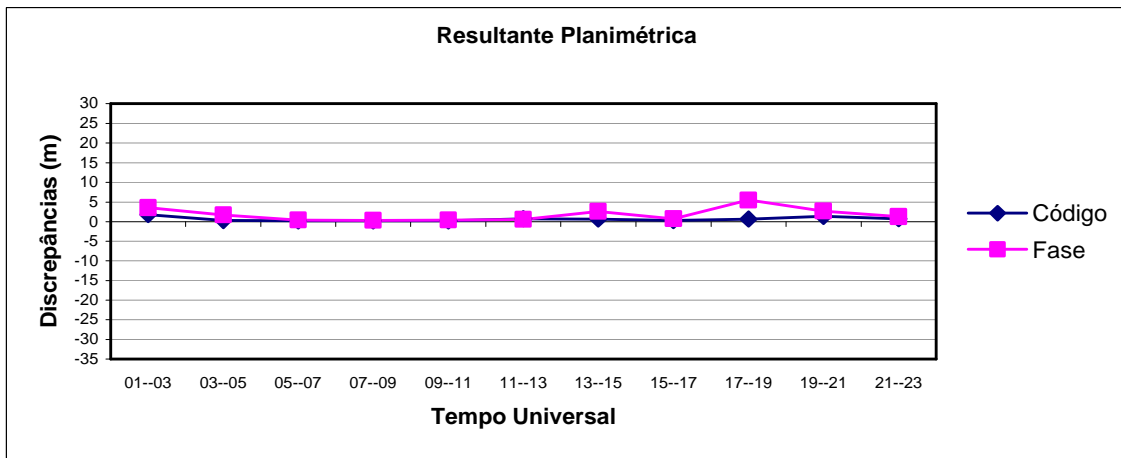


Figura 38 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Junho (2001)

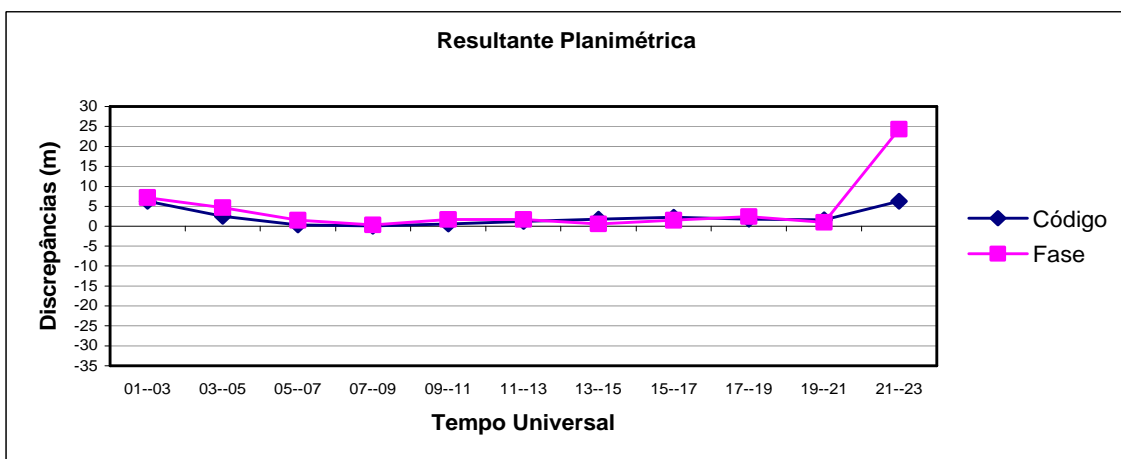


Figura 39 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Outubro (2001)

De acordo com os resultados obtidos apresentados nas figuras 36, 37, 38 e 39, nota-se altos valores das discrepâncias no período da 01:00 TU às 03:00 TU. Provavelmente, nesse período as observações foram afetadas pelos efeitos da cintilação ionosférica. Normalmente, esse efeito ocorre após o por do Sol até a meia noite. No entanto, os efeitos da cintilação também podem aparecer durante a madrugada. Um fato que fortalece esse provável efeito da cintilação é devido aos baixos valores de discrepâncias obtidos no mês de junho, no

início da madrugada, pois nesse mês a ocorrência de cintilação é a menor de todos os meses do ano (figura 26).

No período das 21:00 às 23:00 TU, nota-se também altos valores das discrepâncias nos meses de outubro e abril (próximos aos equinócios). A anomalia equatorial passa por um segundo pico, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem à meia noite. Assim, provavelmente os resultados foram influenciados pelo segundo pico da anomalia equatorial, que é intensificado próximo aos equinócios, bem como o gradiente espacial do TEC. Vale salientar que esse segundo pico da anomalia geralmente não ocorre durante períodos de baixa atividade solar. O primeiro pico da anomalia equatorial, que ocorre aproximadamente às 17:00 TU (14:00 HL), não é notado de forma acentuada. Nesse momento, a densidade de elétrons já é elevada, assim, durante a ocorrência do primeiro pico ocorrem, provavelmente, baixos valores do gradiente espacial do TEC. No entanto, no momento de ocorrência do segundo pico da anomalia, que ocorre nas horas que precedem a meia noite, a densidade de elétrons é baixa, consequentemente, o gradiente espacial do TEC é maior nesse momento.

De uma forma geral, notam-se melhores resultados quando se utiliza observações da dupla diferença do código, principalmente em períodos de irregularidades ou anomalia. Observa-se também a variação sazonal da ionosfera, sendo que em junho os valores das discrepâncias não ultrapassam 5 metros. Em outubro, por exemplo, no processamento dos dados entre o período das 21:00 às 23:00 TU, a discrepância atingiu aproximadamente 25 metros. Os melhores resultados obtidos ocorreram no mês de junho, quando foi utilizada a DDC no processamento. Por exemplo, no período das 09:00 às 11:00 TU o valor da discrepância atingiu 20 cm. Vale salientar que a linha de base é de 430 km e os dados foram coletados no período de máxima atividade solar (ciclo 23).

As figuras 40, 41, 42 e 43 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das altitudes geométricas em relação às coordenadas consideradas verdadeiras, para os meses de janeiro, abril, junho e outubro, ambos com os processamentos realizados a partir da DDC e DDF.

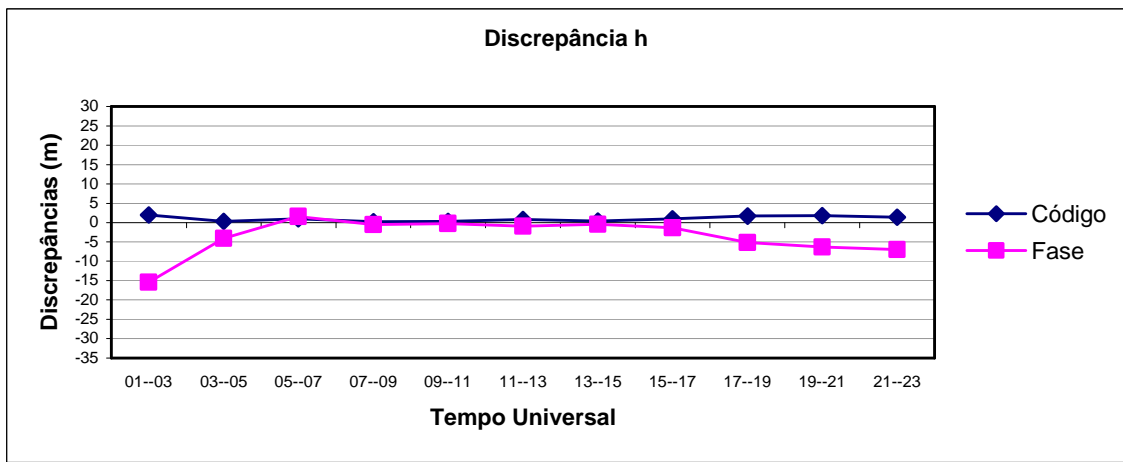


Figura 40 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Janeiro (2001)

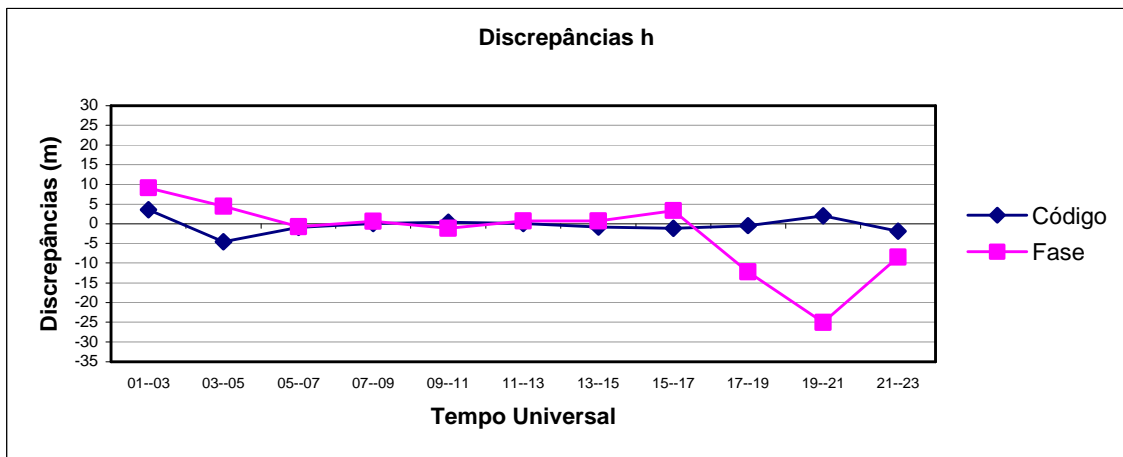


Figura 41 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Abril (2001)

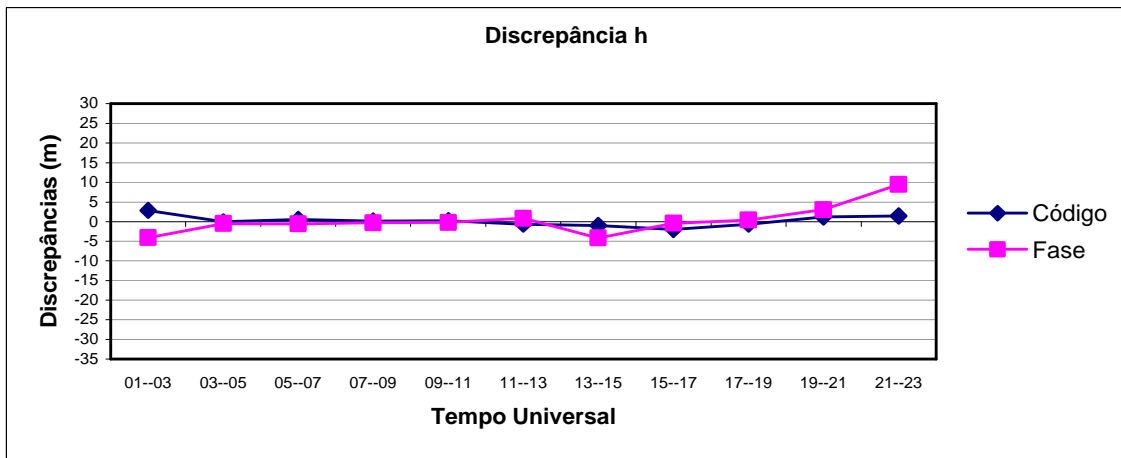


Figura 42 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Junho (2001)

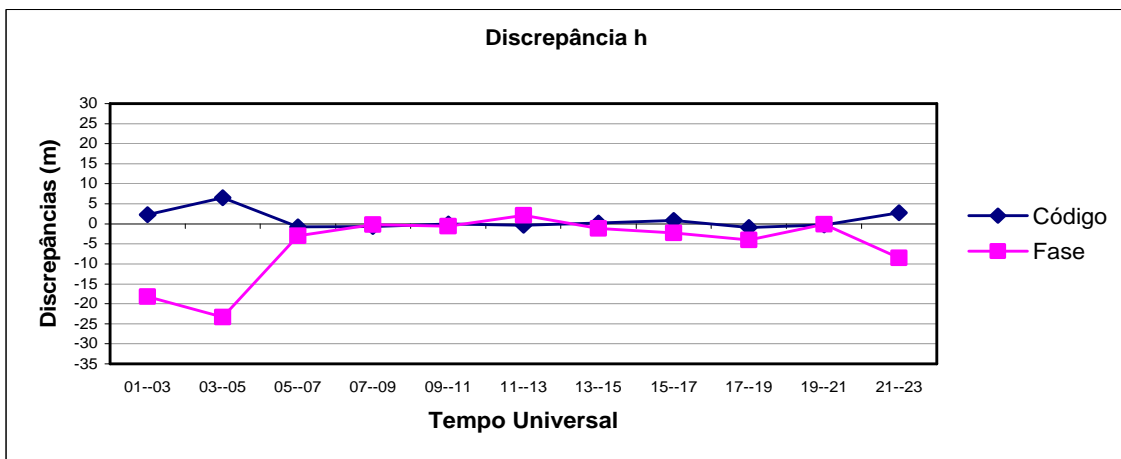


Figura 43 – Discrepâncias entre as altitudes geométricas – Outubro (2001)

Da mesma forma que o primeiro experimento verifica-se que os efeitos da ionosfera são mais intensificados na altitude geométrica. Novamente, os resultados obtidos a partir da DDC são consideravelmente melhores do que os obtidos a partir da DDF, principalmente em períodos de irregularidades da ionosfera. Por exemplo, no período das 19:00 às 21:00 TU, com relação ao mês de abril, a discrepância obtida para a DDF foi -25 m, ao passo que para a DDC, a discrepância obtida foi 2,0 m. Verifica-se de forma acentuada a variação sazonal da ionosfera, principalmente com relação ao processamento realizado a partir da DDF,

visto que esta observável é mais sensível aos efeitos da ionosfera. Como nesse experimento os receptores utilizados são os mesmos (4000 SSI), os ruídos residuais das duplas diferenças foram minimizados, possibilitando uma análise sazonal envolvendo todas as estações do ano. Verifica-se que nos meses de janeiro e junho (próximo aos solstícios) foram obtidos, de uma forma geral, os menores valores para as discrepâncias, enquanto que nos meses de abril e outubro (próximo aos equinócios) os maiores.

As figuras 44 e 45 mostram, respectivamente, as discrepâncias entre as resultantes planimétricas e a componente altimétrica para os casos do processamento com a combinação linear livre da ionosfera (com a fase) com os resultados considerados verdadeiros.

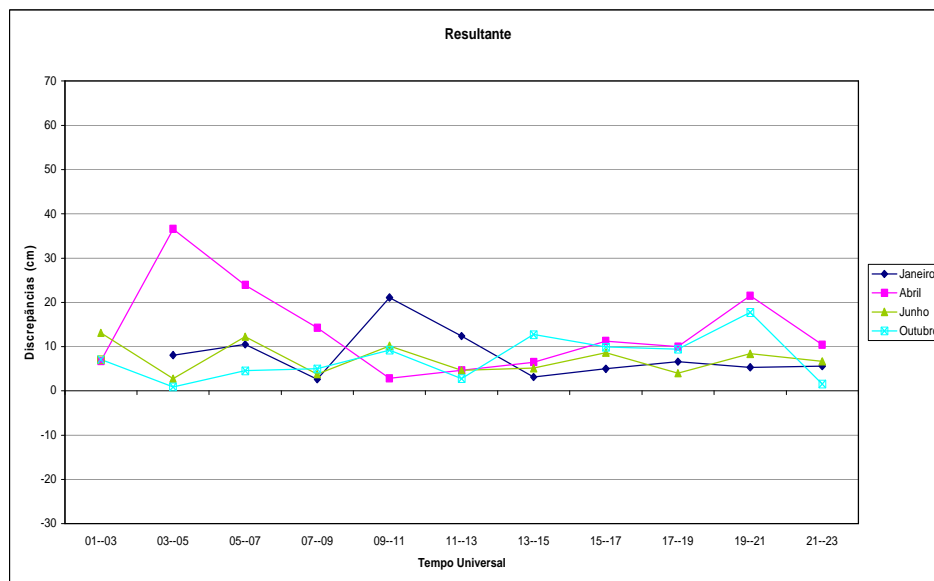


Figura 44 – Discrepâncias das resultantes planimétricas – Ciclo 23



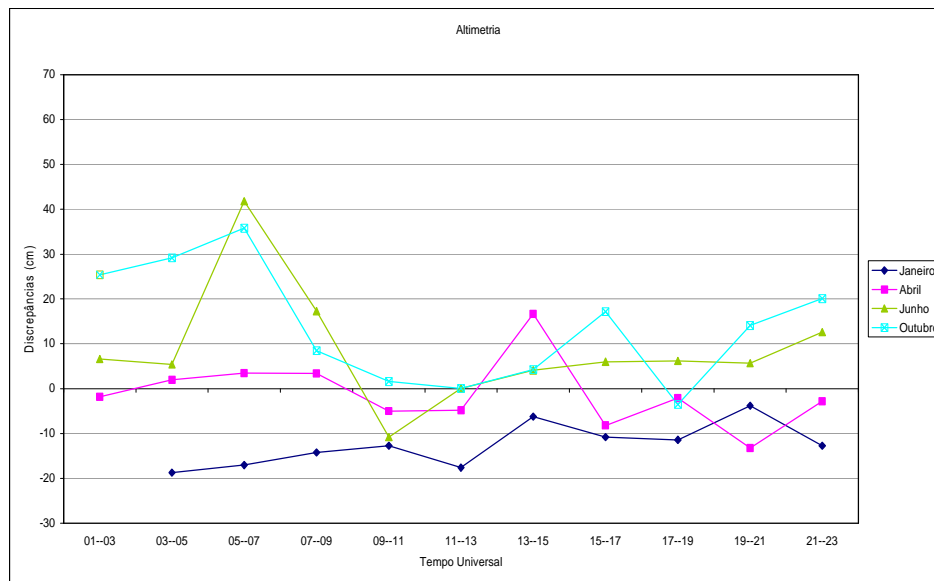


Figura 45 – Discrepâncias das componentes altimétricas – Ciclo 23

A combinação linear livre da ionosfera elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Assim, as discrepâncias obtidas representam, a princípio, os efeitos superiores aos de primeira ordem, acrescidos de todos os erros residuais da dupla diferença. Como os receptores são do mesmo modelo então os erros residuais referentes ao ruído do receptor são minimizados. Provavelmente erros referentes ao multicaminho também estão presentes nas discrepâncias. Contudo, como as estações da RBMC são instaladas em locais não propícios à ocorrência de multicaminho, pode-se considerar que os erros residuais devido ao multicaminho também são minimizados consideravelmente. Como a linha de base é de 430 km pode-se considerar que o ruído da observável Ion Free é desprezível. Assim, os erros superiores aos de primeira ordem se tornam dominantes nas discrepâncias obtidas. De acordo com os resultados obtidos verifica-se que mesmo com a eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera o valor da discrepância chega a atingir, aproximadamente, 0,40 m (figura 45).

Deve ser salientado que no resultado obtido no período das 01:00 até 03:00 TU (figuras 44 e 45), considerando o mês de janeiro, discrepâncias foram extremamente altas, devido

à excessiva perda de sinal na portadora  $L_2$ . Com isso, no processamento com a combinação Ion-Free, nesse período, os resultados obtidos foram “absurdos”. Por exemplo, o valor da precisão da componente N foi de aproximadamente 200000 m. Assim, o resultado nesse período não está ilustrado nas figuras 44 e 45, pois o valor é excessivamente alto.

No caso do processamento com a dupla da fase foi utilizado somente observações da portadora  $L_1$ . Como a perda de sinais da portadora  $L_1$  é significativamente menor do que a  $L_2$ , então o processamento foi realizado com sucesso. No entanto, o valor das discrepâncias no período das 01:00 até 03:00 TU na altitude geométrica em janeiro (figura 40) foi um dos maiores valores, aproximadamente -15 m. Em outubro o valor foi de aproximadamente de 19 m. Assim, mesmo no período de janeiro sendo um período em que os valores do TEC, bem como de seu gradiente espacial são menores do que no caso de abril e outubro, devido aos efeitos da cintilação, verifica-se um alto valor da discrepância. Novamente o processamento a partir da DDC proporcionou melhores resultados do que a partir da DDF, mesmo em períodos de cintilação (figuras 40 e 43), referentes, respectivamente, aos meses de janeiro e outubro, períodos em que é alta a ocorrência de cintilação.

Vale ser salientado que, mesmo quando não ocorrem perdas de sinal, provavelmente a medida da fase é afetada pelos efeitos da cintilação, visto que seus efeitos provocam rápidas flutuações da amplitude e da fase. Assim, no posicionamento com GPS, o efeito da cintilação não consiste apenas na perda do sinal, ou seja, mesmo quando não ocorra perda de sinal a medida da fase da onda portadora é sensível aos seus efeitos. Por exemplo, no período das 03:00 as 05:00 TU no mês de outubro se verificou um alto valor da discrepância na altitude geométrica, aproximadamente -25 m (figura 43). Nesse período ocorreram várias perdas de sinais na portadora  $L_2$ , fato que evidencia os efeitos da cintilação. Nas observações da estação UEPP ocorreram o maior número de perdas do sinal na portadora  $L_2$ , no entanto, no mesmo

período, na portadora  $L_1$ , ocorreram apenas 4 perdas, enquanto na estação PARA ocorreu apenas uma. Nota-se que as medidas realizadas na portadora  $L_1$  estavam sobre a influência da cintilação, no entanto o número de perdas foi baixo (apenas 5). Como o processamento com a dupla diferença da fase foi realizado apenas com dados da portadora  $L_1$  e o resultado da discrepância foi alto (-25 m – figura 43) no período das 03:00 até 05:00 TU, então se verifica que mesmo o sinal sendo rastreado os resultados são afetados pelos efeitos da cintilação.

### 7.3 Terceiro Experimento

#### 7.3.1 Considerações iniciais

Nesse experimento o objetivo principal foi analisar a influência de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo estático, numa linha de base de 430 km. Os dados utilizados abrangem o período de 30/03/2001 até 02/04/2001. No dia 30/03/2001 ocorreu uma explosão solar próxima a maior mancha solar registrada na superfície do Sol no ciclo 23. A figura (46) mostra essa mancha solar denominada de 9393 (SPACEWEATHER, 2005).

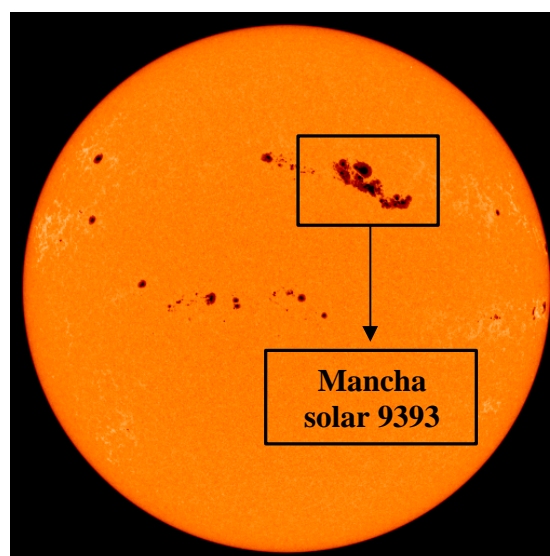


Figura 46 – Imagem da superfície do Sol mostrando a mancha solar 9393  
Fonte: [www.spaceweather.com/index.cgi](http://www.spaceweather.com/index.cgi) (acesso em julho 2005)

Para se ter idéia da dimensão da mancha solar, ela correspondeu a uma área equivalente a 14 vezes a área da Terra. A explosão solar foi classificada como “X – class”. Essa categoria de explosão é a mais intensa, e pode causar longas tempestades geomagnéticas, que afetam consideravelmente as condições ionosféricas (SPACEWEATHER, 2005). Esta explosão solar foi responsável por duas ejeções de massa coronal, que por sua vez lançaram um fluxo de gás magnético eletrificado que atingiu a magnetosfera terrestre em 31 de março, ocasionando uma intensa compressão do campo magnético do lado diurno da Terra às 00:53 TU (FEDRIZZI, 2003).

Como já mencionado, uma forma de monitorar os distúrbios geomagnéticos é a partir dos índices geomagnéticos. O índice  $K_p$  é utilizado para determinar a condição da atividade geomagnética planetária. No caso desse índice atingir o valor 9 (valor máximo), é considerada que a atividade geomagnética está muito perturbada. A figura 47 mostra o índice  $K_p$  para os dias 30 e 31 de março e 01 de abril de 2001.

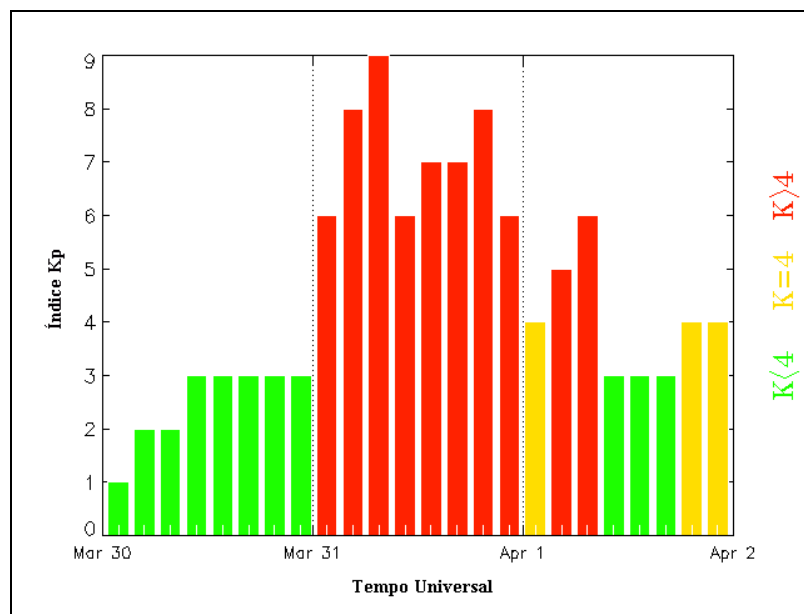


Figura 47 – Índice  $K_p$  para os dias 30 e 31 de março e 01 de abril de 2001

Fonte: <http://www.sec.noaa.gov/ftpmenu/plots/kp.html> (acesso em julho de 2005)

De acordo com a figura 47 verifica-se que um dia após a explosão solar (31/03) a atividade geomagnética estava muito perturbada, de acordo com a classificação do índice  $K_p$ . Nesse experimento a estratégia de processamento adotada foi a mesma do segundo experimento. A única diferença consistiu na utilização de dados coletados em dias distintos, de tal forma a abranger o dia da explosão, bem como três dias depois da mesma.

### 7.3.1.1 Resultados e análise

As figuras 48, 49, 50 e 51 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das coordenadas resultantes planimétricas (N, E) com as coordenadas consideradas verdadeiras, para os dias 30 e 31 de março e 01 e 02 de abril de 2001, ambos com os processamentos realizados a partir das DDC e DDF.

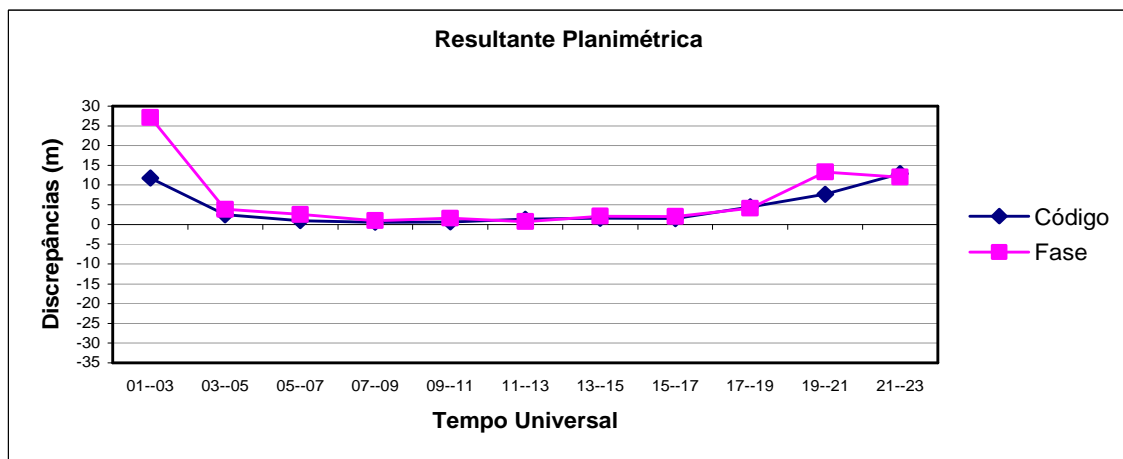


Figura 48 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Dia da explosão

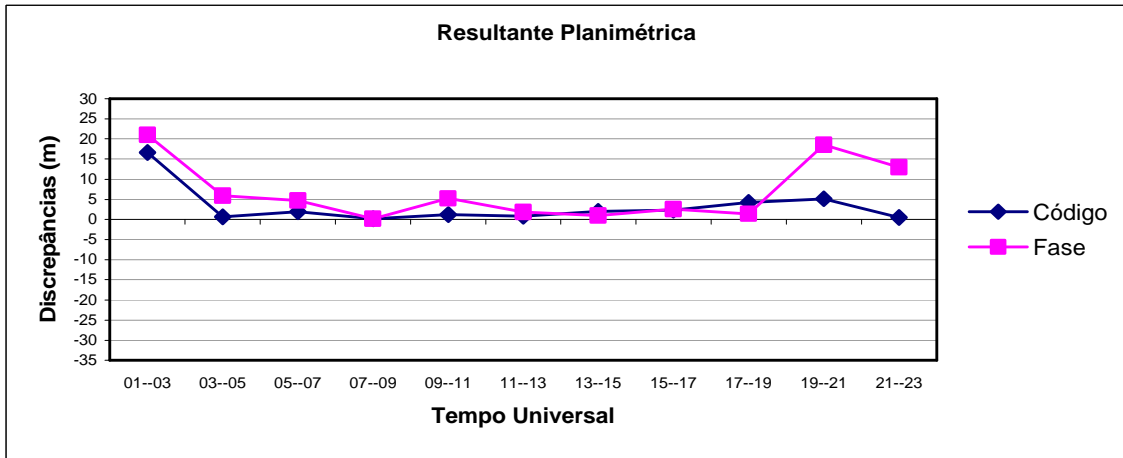


Figura 49 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Dia da tempestade

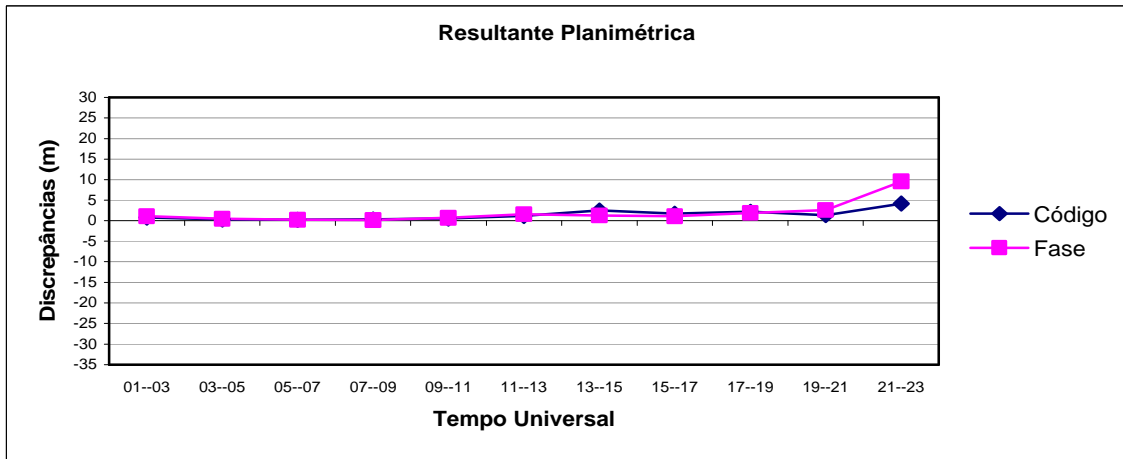


Figura 50 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Um dia após a tempestade

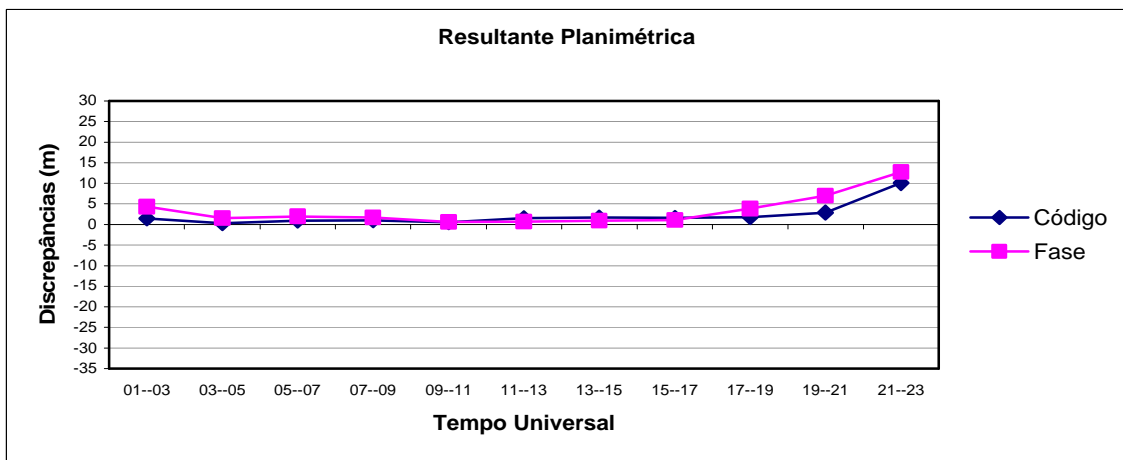


Figura 51 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas UTM – Dois dias após a tempestade

De acordo com os resultados obtidos e apresentados nas figuras 48, 49, 50 e 51 verifica-se o efeito da tempestade geomagnética na componente planimétrica, mas não de forma acentuada. Vale salientar que um dia antes da tempestade a ionosfera estava muito ativa (figura 48), pois os dados utilizados foram coletados no mês de abril, próximo aos equinócios, no período de máxima atividade solar do ciclo 23. Verifica-se também que os efeitos da tempestade, de uma forma geral, são mais intensificados nos resultados obtidos a partir da fase da onda portadora. Um dia antes da tempestade, no período das 05:00 às 17:00 TU os valores das discrepâncias se mantiveram aproximadamente linear, ao passo que, no dia da tempestade, nesse mesmo período, os resultados das discrepâncias se tornaram irregulares. Como a componente altimétrica é mais sensível aos efeitos da ionosfera, uma análise mais detalhada da influência da tempestade geomagnética será realizada nesta componente. As figuras 52, 53, 54 e 55 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das componentes altimétricas estimadas a partir da DDC e DDF com as coordenadas consideradas verdadeiras, para os dias 30 e 31 de março e 01 e 02 de abril de 2001.

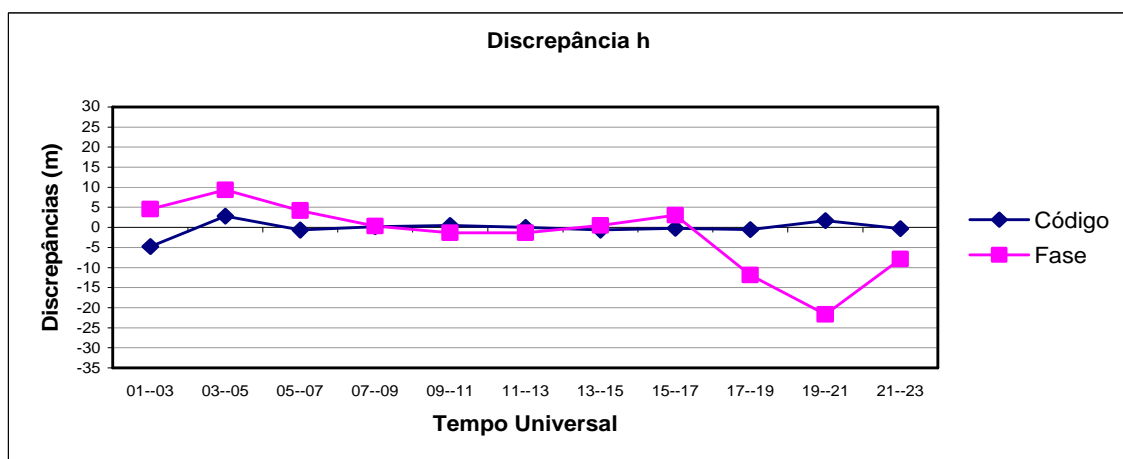


Figura 52 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Dia da explosão.

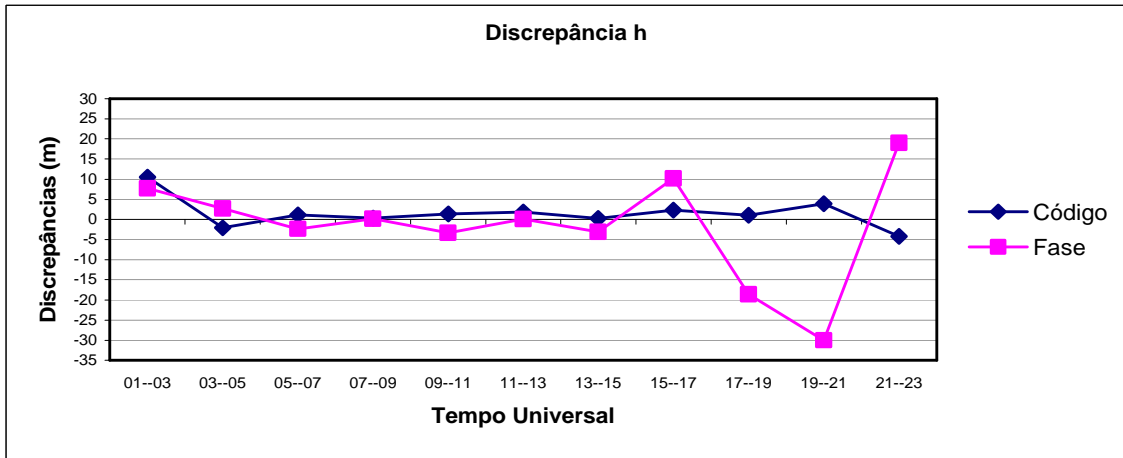


Figura 53 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Dia da tempestade.

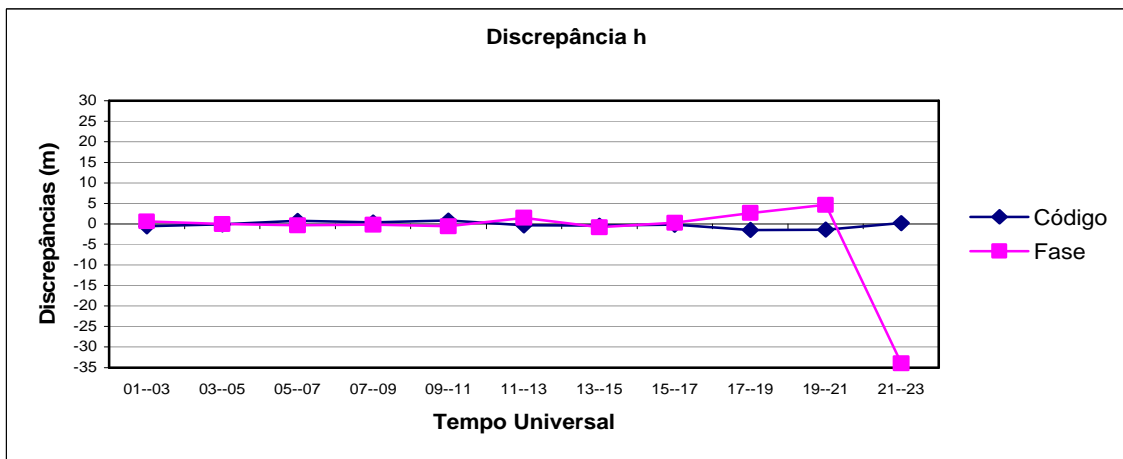


Figura 54 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Um dia após a tempestade.

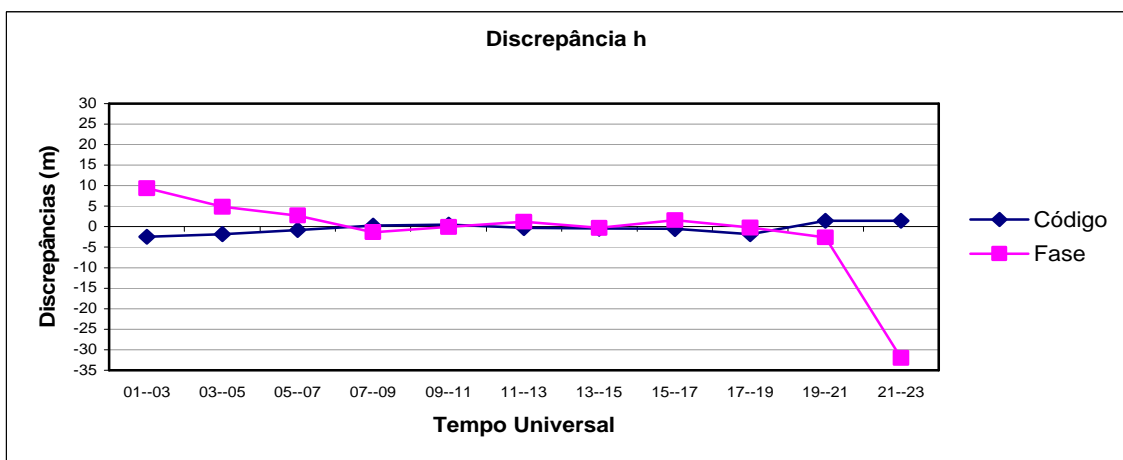


Figura 55 – Discrepâncias entre as coordenadas altimétricas – Dois dias após a tempestade.



Como a componente altimétrica é mais sensível aos efeitos da ionosfera, pode-se notar que o comportamento da discrepância está bem correlacionado com as fases características de uma tempestade geomagnética, principalmente a partir dos resultados obtidos com a fase da onda portadora. De acordo com o índice Dst, que define uma tempestade geomagnética, normalmente um dia após a tempestade geomagnética, ocorre a fase principal da tempestade, também conhecida como fase negativa da tempestade. Nesse período a densidade do TEC fica menor do que o período anterior à tempestade (FEDRIZZI, 2003). Com isso também diminui o gradiente espacial do TEC da ionosfera. Isto pode ser verificado nos resultados obtidos. Um dia após a tempestade geomagnética se verifica os menores valores das discrepâncias. Com exceção do período das 17:00 até 23:00 TU, até mesmo os resultados obtidos a partir da fase, que normalmente apresentam as maiores discrepâncias, um dia após a tempestade apresentaram os menores valores, compatíveis com os resultados obtidos a partir do código, caracterizando a fase negativa da tempestade. No período entre às 17:00 até 23:00 TU provavelmente os resultados foram afetados pelo aumento de irregularidades que ocorreram devido à tempestade. Dois dias após a tempestade verifica-se que os valores das discrepâncias começam a ter aproximadamente o mesmo comportamento do dia anterior à tempestade.

Vale salientar que nesse período (próximo aos equinócios) normalmente a ionosfera apresenta altos valores do TEC, bem como do seu gradiente. Mesmo assim, principalmente na componente altimétrica, se verifica os efeitos da tempestade geomagnética, mesmo no posicionamento relativo, onde o principal problema é o gradiente espacial do TEC. Vale salientar que na planimetria também é verificada as fases características da tempestade geomagnética, porém não de forma acentuada.

As figuras 56 e 57 mostram, respectivamente, as discrepâncias entre as resultantes planimétricas e a componente altimétrica, para os casos do processamento com a

combinação linear livre da ionosfera (com a fase) com os resultados considerados verdadeiros, para os dias 30 e 31 de março e os dias 01 e 02 de abril.

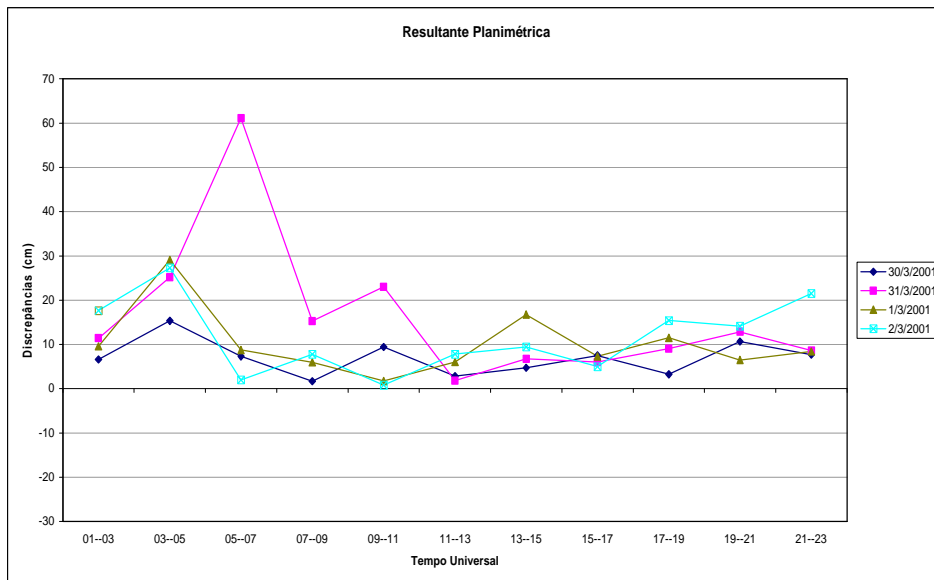


Figura 56 – Discrepâncias entre as resultantes planimétricas.

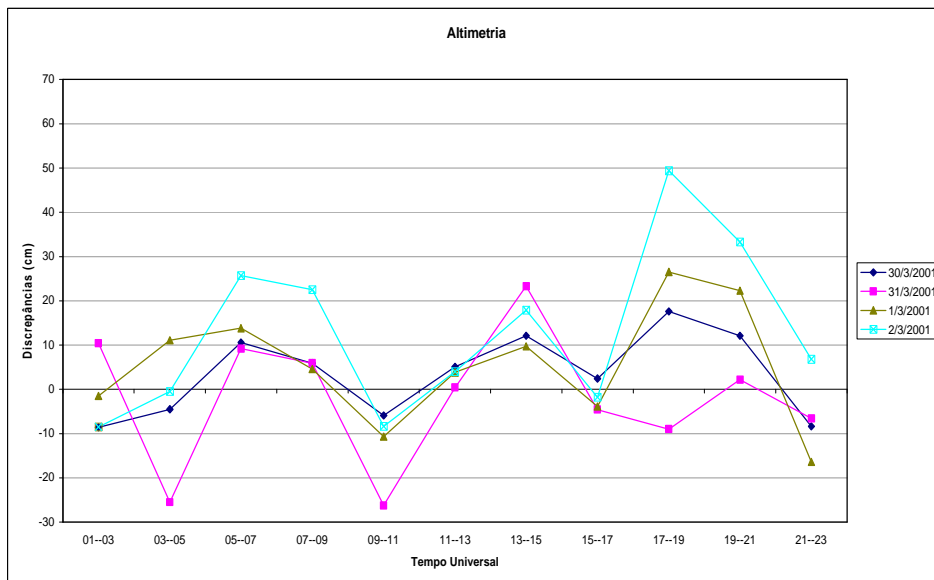


Figura 57 – Discrepâncias entre as componentes altimétricas.

De acordo com os resultados obtidos na resultante planimétrica verifica-se que mesmo após a eliminação dos efeitos da primeira ordem da ionosfera, no dia da tempestade, a discrepância chegou a atingir aproximadamente 60 cm, enquanto que na componente altimétrica em certos períodos chegou a atingir aproximadamente -25 cm.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No primeiro experimento, de acordo com os resultados obtidos, foi possível realizar uma análise parcial da variação sazonal da ionosfera. Isto ocorreu devido à utilização de dois receptores de diferentes fabricantes na coleta de dados em junho. Um dos receptores utilizados foi um Trimble 4000 SSI, fabricado pela Trimble, enquanto o outro foi um Ashtech ZXII, fabricado pela Ashtech. Com isso uma análise da variação sazonal envolvendo as quatro estações do ano não foi possível de ser realizada, devido ao ruído residual da DDC ter afetado os resultados no mês de junho. Nesse experimento foi possível verificar na prática que numa linha de base mais curta os erros devido à ionosfera podem estar menos correlacionados do que numa linha de base mais longa, devido à variação diária da ionosfera. Com isso, a partir dos resultados obtidos no primeiro experimento, conclui-se na prática, que se deve evitar atribuir valores numéricos com o objetivo de definir o comprimento de uma linha de base, sem antes conhecer de forma aprofundada as condições ionosféricas na região de interesse. Contudo, esta tarefa não é fácil, principalmente no Brasil, onde várias irregularidades e anomalias ocorrem, sendo que estas variam de acordo com a época do ano e da hora local, bem como a localização geográfica. Verificou-se também que os efeitos da ionosfera no posicionamento relativo são mais intensos na altimetria. Próximo aos equinócios (abril e outubro) e em períodos de máxima atividade diária da ionosfera (15:00 – 19:00 TU), ou seja, em períodos em que a ionosfera está mais ativa, os valores das discrepâncias obtidas a partir da DDC foram melhores do que os obtidos a partir da DDF.

No segundo experimento, como foram utilizados dados de dois receptores Trimble 4000 SSI, que são produzidos pelo mesmo fabricante, ambos da RBMC, foi possível notar a variação sazonal da ionosfera. Assim, o ruído residual da dupla diferença é minimizado, bem como os efeitos do multicaminho, visto que os receptores da RBMC são instalados em locais

não propícios à ocorrência de multicaminho. Como nesse experimento o comprimento da linha de base é de 430 km, o ruído da combinação linear livre da ionosfera torna-se insignificante. Diante do exposto, foi possível notar a variação sazonal nas quatro estações do ano. Da mesma forma que o primeiro experimento os maiores efeitos da ionosfera foram verificados na altimetria. Verificou-se também que no pico de atividade solar (2000-2001) os valores das discrepâncias chegam a atingir aproximadamente 25 metros na altimetria. Destaca-se a influência da cintilação nesses experimentos nos meses de janeiro e outubro, períodos de alta ocorrência da cintilação. Nos resultados obtidos também foi possível notar que mesmo não ocorrendo a perda de sinal, o sinal rastreado sofre a influência da cintilação. Isto foi verificado no caso do mês de outubro, período de alta ocorrência de cintilação, no período das 03:00 as 05:00 TU. Nesse caso as observações estavam sobre a influência dos efeitos da cintilação, pois ocorreram várias perdas do sinal na portadora  $L_2$ . A discrepância altimétrica nesse período foi de aproximadamente -25 m, com o processamento a partir da DDF. Assim, verifica-se que mesmo sem perder o sinal, o mesmo quando rastreado sofre a influência da cintilação. Os resultados obtidos a partir da DDF se mostraram mais sensíveis às irregularidades da ionosfera do que os resultados obtidos a partir da DDC. Com os resultados obtidos a partir da DDC, mesmo no período de ocorrência da cintilação foram obtidos bons resultados, se comparados com os obtidos a partir da DDF. Mesmo após a eliminação dos efeitos de primeira ordem no período de máxima atividade solar as discrepâncias chegaram a atingir aproximadamente 0,40 m na componente altimétrica.

O terceiro experimento foi realizado com o objetivo de analisar a influência de uma tempestade geomagnética. Verificou-se mais uma vez que os resultados obtidos a partir da DDF são mais sensíveis aos efeitos da ionosfera, principalmente em períodos de irregularidades, provocados pela tempestade. Foi possível notar as fases característica de uma tempestade geomagnética, principalmente a fase negativa da tempestade, que ocorre normalmente um dia

após a tempestade. Nesse dia, foram obtidos os menores valores para as discrepâncias planimétricas, caracterizando a fase negativa da tempestade, onde a densidade do TEC, bem como de seu gradiente espacial, normalmente torna-se menor do que um dia antes da tempestade geomagnética. Na altimetria também foram obtidos os menores valores para as discrepâncias. Com exceção do período das 17:00 até 23:00 TU, no período negativo da tempestade até mesmo os resultados obtidos a partir da DDF, que normalmente apresentam as maiores discrepâncias foram compatíveis com os resultados obtidos a partir da DDC, caracterizando a fase negativa da tempestade. Dois dias após a tempestade se verifica que os valores das discrepâncias começam a ter aproximadamente o mesmo padrão dos valores obtidos um dia antes da tempestade. As discrepâncias obtidas a partir da combinação linear livre da ionosfera com os resultados considerados verdadeiros atingiram, no dia da tempestade, aproximadamente 0,60 m na resultante planimétrica.

Em suma, a partir dos experimentos realizados verifica-se a forte influência que a ionosfera exerce no posicionamento relativo, visto que na dupla diferença parte dos erros devido à ionosfera se cancelam. Verifica-se também a alta dependência na definição do comprimento de uma linha de base em função da variação dos efeitos da ionosfera. Foi verificada também a influência que exerce o gradiente espacial do TEC no posicionamento relativo. Isto é comprovado pelas menores discrepâncias, que, de forma geral, foram obtidas no período do primeiro pico da anomalia equatorial (próximo às 17:00 TU). Nesse momento, o gradiente espacial do TEC não é considerado alto, visto que nesse pico o valor do TEC de uma forma geral já é alto, proporcionando baixos valores de seu gradiente espacial. Em contrapartida, na ocorrência do segundo pico (nas horas que precedem a meia noite), de uma forma geral, foram obtidos altos valores de discrepâncias. Como nesse período os valores do TEC são baixos, devido à ausência da radiação solar, no momento da passagem do segundo pico da anomalia equatorial,

um alto gradiente espacial do TEC ocorre, proporcionando, neste período, altos valores de discrepâncias. Verifica-se uma forte influência da tempestade geomagnética na componente altimétrica. Contudo, na fase negativa da tempestade bons resultados são obtidos, devido à diminuição do TEC nessa fase, bem como de seu gradiente espacial, mesmo numa linha de base de 430 km.

Por fim, com base nos experimentos realizados, recomenda-se aos usuários do GPS que antes de realizar a coleta de dados no posicionamento relativo estejam atentos com o período da realização da coleta de dados, de acordo com a variação diária da ionosfera, com a época do ano, com os horários de ocorrências de cintilação, com os períodos de ocorrência do segundo pico da anomalia equatorial, etc. Outra recomendação importante é estar atento com o tipo de observável utilizada no processamento, pois, caso o vetor ambigüidade não seja solucionado, os resultados obtidos a partir da DDC podem proporcionar melhores resultados, principalmente em períodos de irregularidades. Em suma, a partir do conhecimento adequado de todas essas variáveis, bem como de um planejamento sistemático de coleta de dados, o usuário do GPS pode ter condições de obter bons resultados mesmo com a utilização de receptores GPS de uma frequência, visto que, na maioria das vezes o usuário não tem disponível um receptor GPS de dupla frequência, devido ao elevado preço do equipamento, bem como de seu aluguel. A análise dos resultados também deve ser associada com mapas do TEC.

Recomenda-se também, em trabalhos futuros, aprofundar os estudos sobre a influência da ionosfera no posicionamento relativo, visto que este trabalho, apenas deu início a estudos desta natureza. Nesse projeto foi utilizado um *software* comercial para processamento dos dados, assim, recomenda-se utilizar *softwares* científicos, como por exemplo, o *Bearnese*. Várias são as possibilidades de estudos da influência da ionosfera no posicionamento relativo, tais como: realizar uma análise sazonal do efeito da ionosfera envolvendo todas as estações do

ano; análise do efeito da ionosfera em função da mudança da direção da linha de base; utilização de dados coletados em estações GPS espalhadas pelo território nacional; analisar os efeitos da ionosfera em função do comprimento da linha de base; análise diária do efeito da ionosfera; analisar os efeitos de outras tempestades geomagnéticas que ocorreram nos últimos anos; análise dos efeitos da ionosfera em função do ciclo solar; dentre outras possibilidades. A partir de uma análise sistemática de todos esses fatores, seria possível contribuir de forma significativa para elaboração de normas de levantamento para o Brasil, no que concerne aos efeitos sistemáticos da ionosfera, visto que as normas existentes não prevêm os vários efeitos causados pela ionosfera. Além disso, estudos deste tipo são de extrema importância, visto que no Brasil várias irregularidades e anomalias ocorrem na ionosfera.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALECHETCHKINE, A.; KAVTARASHVILY, S.; KAZANTSEV, M.; KOKORIN, V.; FATEEV, Y.. GLONASS/GPS single frequency test validation using IGS and DORIS data. *International DORIS Service Workshop*, Biarritz, France, 13-14 Jun 2002. < [http://ids.cls.fr/html/report/ids\\_workshop\\_2002](http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002)> acesso em 10/2002.
- ALVES, P.R.S.. *Development of two novel carrier phase-based methods for multiple reference station positioning*. 2004. 203p. Msc thesis - Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20203, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; SOUZA, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F-3 layer over Fortaleza, Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n. 12-14, 1409-1412, Aug.-Sep. 2002.
- 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.
- BOCK, Y.. Medium Distance GPS Measurements. In: Teunissen, P.J.; Kleusberg, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1998. p.483-536.
- 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.
- CAMPOS, M.A.; WANNINGER, L.; SEEBER, G.. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: *3o. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica – Resumos Expandidos*, Rio de Janeiro/RJ, p.601-604, 7 a 11 de novembro, 1993.
- COCO, D.S., COKER, C., DAHLKE,S.R., CLYNCH,J.R.. Variability of GPS satellite differential group delay biases. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v.27, n.6, p.931-938, Nov. 1991.

COHEN, C. E., PERVAN, B, PARKINSON, B.W.. “*Estimation of Absolute Ionospheric Delay Exclusively through Single Frequency GPS Measurements*” Proceedings of ION GPS-92, the 5th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Albuquerque, NM, 16-18 September, 1992. The Institute of Navigation, Alexandria, VA, pp. 325-330.

COSTA, S.M.A., FORTES, L.P.S.. Nova hierarquia da rede planimétrica do sistema geodésico brasileiro. Trabalho apresentado no seminário sobre referenciais geocêntricos, Rio de Janeiro, Outubro, 2000.

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

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

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 n° 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

EL-RABBANY, A.. *Introduction to GPS: The Global Positioning System*. Mobile Communications series. Editora: Artech House, 2002. 176p.

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. *Estudo e Avaliação Metodológica da Rede GPS do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1996, 134 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

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. *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*. Rio de Janeiro, 1997, Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia - IME.

FORTES, L.P.S.. *Optimising the use of GPS Multi-reference station for kinematic positioning*. 2002. 323p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20158, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

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.

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

GEORGIADIOU, Y.. Modeling the ionosphere for an active control network of GPS stations, *LGR-Series - Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, Delft University of Technology, n.7, 1994.

GFZ (GeoForschungsZentrum) – 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 março de 2004.

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

GOAD, C. C.. Short Distance GPS Models. In: Teunissen, P.J.; Kleusberg, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1998. p.457-481.

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

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

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

INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) – Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais. 1º.ed. 2003.

INPE, *INPE-NOTÍCIAS* - Publicação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ano 3, n.11, jul./ago. 1997.

ISGI (International Service of Geomagnetic Indices) – online – endereço eletrônico: <<http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/indicgeo.htm>>. Acesso em: 13 mar. 2004.

JAKAB, A.J.. *Quality Monitoring of GPS Signals*. 2001. 145p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20149, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

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

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

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

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

KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric Effects on GPS (Chapter 12). In: *Parkinson, B. W.; Spilker 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 n° 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.

LANGLEY, R.B. Propagation of the GPS signals. In: ed. Teunissen, P.J.G.; Kleusberg A. *GPS for geodesy*. Delft: Springer -Verlarg Berlin-Heidelberg New York, 1998. p.111-149.

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

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

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

MARINI, M. C.. *Integração da Rede GPS ITESP ao Sistema Geodésico Brasileiro*. 2002. Dissertação (Mestrado 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.

MENEZES DE SOUZA, E.. *Efeito de multicaminho de alta frequência no posicionamento relativo GPS estático: detecção e atenuação utilizando wavelets*. 2003. 140p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

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

NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.. Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model? In: *Proceeding of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Columbus, OH, USA, v.1, p.240-244, Mar. 16-20, 1992.

NRCAN (Natural Resources Canada) – on line – Endereço eletrônico: [http://www.geolab.nrcan.gc.ca/geomag/northpole\\_e.shtml](http://www.geolab.nrcan.gc.ca/geomag/northpole_e.shtml)>. Acesso em: 26 mar. 2004.

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).

PEREIRA, K.D.; FAZAN, J.A.; FORTES, L.P.S. RBMC: Sete anos fornecendo referência a posicionamentos GPS no Brasil e exterior. In: *XXI Congresso Brasileiro de Cartografia – CD-ROM*, Belo Horizonte/MG, Brasil, 2003.

QIU, W.; LACHAPELLE, G.; CANNON, M.E.. Ionospheric effect modelling for single frequency GPS users. *Manuscripta Geodaetica*, v. 20, n. 2, p. 96-109, 1995.

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 nº 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.

SAASTAMOINEN, I.I.. Contribution to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, v.107, p.13-34, 1973.

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

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.

SARDÓN, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N.. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observation. *Radio Science*, v.29, p.577-586, May/Jun., 1994.

SARDÓN, E.; ZARRAOA, N.. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases. *Radio Science*, v.32, p.1899-1910, Sept./Oct., 1997.

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

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

SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Rede Geodésica de Alta Precisão do Estado do Paraná – GPS*. Curitiba, 1996. 18P.

SHAW, M.; SANDHOO, K.; TURNER, D.. Modernization of the Global Positioning System, *GPS World*, vol.11, n.9, September 2000, p.36-44.

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. GPS Receiver Tracking Performance Under Ionospheric Scintillation Conditions. In: *IGS Network Workshop*, Soria Moria, Oslo, Norway, 12-14 July, 2000. Disponível em: <<http://www.gdiv.statkart.no/igsworkshop/book/>>. Acesso em julho de 2002.

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 – endereço eletrônico: <[www.spaceweather.com/index.cgi](http://www.spaceweather.com/index.cgi)>. Acesso em: 12 set. 2005.

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.. The GPS phase-adjusted pseudorange. In: *Proceedings of the Second International Workshop on High Precision Navigation*, Stuttgart, Freudenstadt, Nov., 1991, p115-125.

TEUNISSEN, P.J.; KLEUSBERG, A.. *GPS for Geodesy*. 2ª Ed. Berlin: editora Verlag, 1998. 650p.

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.. 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.

WARNANT, R.. Influence of the ionospheric refraction on the repeatability of distances computed by GPS. In: *10<sup>TH</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-1997*, Kansas City, 16-19 September, 1997.

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

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

WILSON, B.D.; MANUCCI, A.J.. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data. In: *International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-1993* – Salt Lake City, Utha, 22-24 September, 1993.

WILSON, B. D.; YINGER, C. H.; FEESS, W. A.; SHANK, C.. New and improved - The broadcast interfrequency biases. *GPS World*, v.10, n.9, p.56-66, Sept. 1999.

WÜBBENA, G.. The GPS adjustment software package GEONAP, concepts and models. In: *Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Las Cruces, New Mexico, Mar. 13-17, 1989, v.2, p.452-461.

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.

XIA, R (1992). “*Determination of Absolute Ionospheric Error Using a Single Frequency GPS Receiver*” *Proceedings of ION GPS-92, the 5th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Albuquerque, NM, 16-18 September, The Institute of Navigation, Alexandria, VA, pp. 483-490.