



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

DANIELE BARROCA MARRA ALVES

POSICIONAMENTO GPS UTILIZANDO O CONCEITO DE ESTAÇÃO VIRTUAL



**Presidente Prudente
2008**

DANIELE BARROCA MARRA ALVES

POSICIONAMENTO GPS UTILIZANDO O CONCEITO DE ESTAÇÃO VIRTUAL

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

Orientador: João Francisco Galera Monico

Co-orientador: Luiz Paulo Souto Fortes

Presidente Prudente
Junho de 2008

A478p Alves, Daniele Barroca Marra
 Posicionamento GPS utilizando o conceito de Estação Virtual /
Daniele Barroca Marra Alves. - Presidente Prudente : [s.n], 2008
 165 f. :il.

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências e Tecnologia
 Orientador: João Francisco Galera Monico
 Banca: Cláudia Pereira Krueger, Leonardo Castro de Oliveira,
 Luiz Fernando Sapucci, Milton Hirokazu Shimabukuru
 Inclui bibliografia

 1. Posicionamento GPS baseado em redes. 2. Estação Virtual. 3.
Modelos atmosféricos. I. Autor. II. Título. III. Presidente Prudente -
Faculdade de Ciências e Tecnologia.

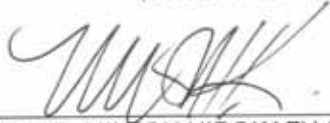
CDD(18.ed.) 621.71

**Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Presidente Prudente.**

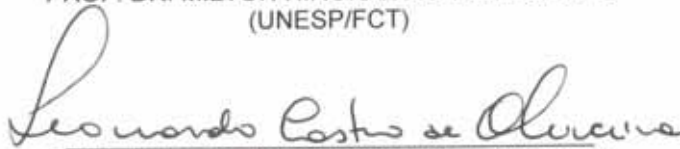
BANCA EXAMINADORA



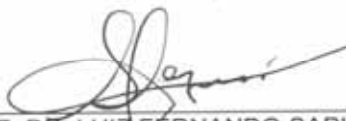
PROF. DR. JOÃO FRANCISCO GALERA MÔNICO
(ORIENTADOR)



PROF. DR. MILTON HIROKAZU SHIMABUKURO
(UNESP/FCT)



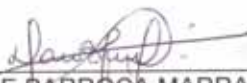
PROF. DR. LEONARDO CASTRO DE OLIVEIRA
(IME/RJ)



PROF. DR. LUIZ FERNANDO SAPUCCI
(INPE)



PROFA. DRA. CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER
(UFPR)



DANIELE BARROCA MARRA ALVES

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 27 DE JUNHO DE 2007.

RESULTADO: APROVADO

DADOS CURRICULARES

Daniele Barroca Marra Alves

NASCIMENTO: 29/12/1980 - Presidente Prudente - SP

FILIAÇÃO: Iderval Rojas Marra
Neuza Barroca Marra

1998-2001: Graduação
Licenciatura em Matemática
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2002-2004: Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2004-2008: Pós-Graduação
Doutorado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

Ao meu amado esposo, Alessandro da Rocha Alves, que representa meu porto seguro, pelo carinho, apoio e força nos momentos difíceis.

Aos meus maravilhosos pais, Iderval Rojas Marra e Neuza Barroca Marra, que são e sempre serão um orgulho para mim, o alicerce da minha vida, me ajudando e incentivando em todas as situações.

Às minhas preciosas irmãs, Soellyn, Aline e Luana, pela imensa amizade, companheirismo e carinho que sempre tiveram por mim.

AGRADECIMENTOS

Desejo externar os meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram com o desenvolvimento desse trabalho, em especial:

A Deus, que sempre me guiou pelos melhores caminhos, pois sem Sua ajuda não conseguiria seguir em frente para alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador Dr. João Francisco Galera Monico, pela confiança e contribuição no desenvolvimento dessa pesquisa. Ao Dr. Luiz Paulo Souto Fortes, meu co-orientador, cujo auxílio foi de grande valia nesse trabalho.

Aos professores do Departamento de Cartografia e aos funcionários da FCT que de forma direta ou indireta contribuíram no desenvolvimento dessa Tese.

A Sônia Costa e sua equipe que me receberam de forma atenciosa no IBGE para realização de um estudo do *software* Bernese.

Ao Sapucci, que foi um parceiro nesse trabalho, sempre disponível para ajudar e colaborar com os modelos de PNT.

Ao professor Paulo Camargo e ao Claudinei, pela ajuda e parceria na utilização do MOD_ION_FK.

A todos os amigos do PPGCC, pelas discussões, conversas e ajuda. Aos egressos e amigos eternos RCris e Gaúcho. Aos que ainda estão no programa fazendo parte da minha vida. As “meninas”, Lauri, Letícia e Eniuce, companheiras e que sempre posso contar. Aos “meninos”, Fazan, Guilherme, João Paulo, GPSR e Wesley que fizeram parte e contribuíram para esse trabalho, com sua ajuda e amizade. E, é claro, ao Dalbello, parceiro no trabalho, esforçado e que considero um amigo.

Aos familiares e demais amigos que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo auxílio financeiro nessa pesquisa, sob forma de bolsa de demanda social.

RESUMO

O uso de múltiplas estações de referência, ao invés do método que utiliza uma única linha de base, tem recebido significativa atenção da comunidade científica e usuária que utiliza o GPS. Utilizando múltiplas estações de referência pode-se obter posicionamento de alta acurácia em uma ampla área de cobertura, além do ganho em confiabilidade, disponibilidade e integridade do serviço. Além disso, usando este conceito é possível modelar os efeitos atmosféricos (refração troposférica e efeito ionosférico). Outra questão importante diz respeito às formas de transmissão das correções geradas pela rede para o usuário. Existem algumas possibilidades para esse fim. Dentre elas, o uso do conceito de *Virtual Reference Station* (VRS) tem se mostrado muito eficiente. No conceito de VRS, uma estação base é gerada nas proximidades do receptor móvel (usuário). Assim, o usuário tem a possibilidade de utilizar um receptor de simples frequência para realizar o posicionamento com uma linha de base curta. Para testar esse método de posicionamento, um sistema foi desenvolvido nessa pesquisa. Nesse sistema existem algumas possibilidades para a geração da VRS: com e sem solução das ambigüidades. No que concerne a VRS gerada sem solução das ambigüidades, o sistema tem algumas opções disponíveis. Em relação à troposfera, é possível utilizar o modelo padrão de Hopfield ou o modelo dinâmico, onde as predições do atraso zenital troposférico (*Zenithal Tropospheric Delay* – ZTD) são obtidas de um modelo de Previsão Numérica do Tempo (PNT). No modelo dinâmico o procedimento utilizado para calcular os valores do ZTD, através do modelo de PNT, foi desenvolvido por pesquisadores da UNESP e CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), e está disponível *online* para todo o território sul americano. Nos dois modelos é utilizada a função de mapeamento de Niell. No que concerne a ionosfera, foi utilizado o modelo denominado Mod_Ion_FK, desenvolvido na UNESP. O Mod_Ion_FK utiliza dados de uma rede de estações para gerar os parâmetros ionosféricos, baseados na série de Fourier. Este modelo apresentou resultados satisfatórios quando aplicado no posicionamento por ponto. Em se tratando das órbitas dos satélites, as efemérides IGU disponibilizadas pelo *International GNSS Service* (IGS) foram utilizadas para reduzir os erros de órbita. Diversos testes foram realizados com a VRS gerada e os resultados obtidos foram promissores. No Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), com uma VRS gerada usando os modelos de PNT e Mod_Ion_FK, foi obtida, em média, um EMQ (Erro Médio Quadrático) resultante (discrepância em relação as coordenadas de referência) de 2,51 cm, utilizando 24 h de dados. Já no DGPS, foi obtido 167,83 cm de EMQ resultante para a VRS e 152,63 cm para o arquivo real. No posicionamento relativo entre o arquivo real e a VRS gerada na mesma posição, utilizando a observável L1, obteve-se, em média, discrepância de 8,8 cm para 24 horas de dados. Outras análises também foram realizadas e seguem na Tese. Em relação a VRS gerada após a solução das ambigüidades, diversas análises foram feitas. O *software* Bernese 5.0 foi utilizado para solução das ambigüidades. Dados de apenas 4 estações de referência estavam disponíveis para a validação da metodologia, o que permitiu evidenciar a necessidade de um número maior de estações para obter discrepâncias de poucos centímetros. Finalizando, em todos os testes realizados, a metodologia aplicada se mostrou muito eficiente e promissora, o que viabiliza sua utilização em diversas aplicações.

Palavras-chave: Posicionamento GPS Baseado em Redes, Estação Virtual, Modelos Atmosféricos.

ABSTRACT

The use of multiple reference stations instead of the standard single baseline approach has been receiving significant attention from the scientific and user GPS community. Using multiple reference stations one can obtain higher positioning accuracy in a larger coverage area, in addition to the gain in reliability, availability and integrity of the service. Besides, using this concept it is possible to model the atmospheric effects (troposphere refraction and ionosphere effect). Another important question concerning this topic is related to the transmission of the network corrections to the users. There are some possibilities for this and an efficient one is the Virtual Reference Station (VRS) concept. In this concept, a base station is generated near the rover receiver (user). This provides a short baseline and the user has the possibility of using a single frequency receiver to accomplish the positioning. In order to test this method of positioning, a system was developed in this research. In this system there are some possibilities to generate the VRS: with and without the ambiguity resolution. Concerning the generated VRS without fixing the ambiguities, the system has some available options. In relation to the troposphere it is possible to use the Hopfield standard model or a dynamic one, where the zenithal tropospheric delay (ZTD) predictions are obtained from a model of Numerical Weather Prediction (NWP). In the last one the procedure used to compute ZTD values from NWP was jointly developed by UNESP and CPTEC-INPE (Center for Weather Forecasting and Climate Studies - National Institute for Space Research), and it is available online for all South America territory. In both cases the Niell mapping function was used. Concerning the ionospheric effects, the Mod_Ion_FK model, developed at UNESP, has been used. Mod_Ion_FK uses the network station data to generate ionospheric parameters based on a Fourier series. It presented good results when applied for point positioning. Regarding the satellite orbit, IGS precise ephemerides provided by International GNSS Service (IGS) were used to reduce orbit errors. Several tests were accomplished with the generated VRS and the results were promising. On Precise Point Positioning (PPP), considering 24 h of data, with the VRS generated using NWP and Mod_Ion_FK models, it was obtained, on average, a resulting RMS (Root Mean Square) (discrepancy in relation to the ground truth coordinates) of about 2.51 cm. In relation to DGPS, it was obtained a resulting RMS of 167.83 for the VRS and 152.63 for the real file. Considering the relative positioning between a real file and a VRS generated in the same position, using the L1 observable, it was obtained, on average, a discrepancy of 8.8 cm for 24 hours of data. Other analyses were also realized and they follow in this thesis. Concerning the VRS generated after ambiguity resolution, several analyses were accomplished. The Bernese 5.0 software was used to obtain the ambiguity resolution. To accomplish the experiments, data from just four reference stations were available. It made clear the necessity of using a larger stations number to obtain discrepancies of few centimeters. Finally, in all realized tests the applied methodology was very efficient and promising, which can be applied in several applications.

Keywords: GPS Network Based Positioning, Virtual Reference Station, Atmospheric Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Quantidade de estações de referência necessárias para a cobertura da região de interesse com a utilização do RTK (a) e do conceito de rede de estações de referência (b)....	28
Figura 02 – Modelo de plano inclinado (3 parâmetros) para erros correlacionados espacialmente	31
Figura 03 – Rede dominante na direção Norte/Sul.....	34
Figura 04 – Conceito de estação de referência virtual.....	39
Figura 05 – Cálculo das observações para a estação de referência virtual	40
Figura 06 – Elementos envolvidos no cálculo do DG	41
Figura 07 – Representação da modelagem da ionosfera considerada em uma camada infinitesimal.....	44
Figura 08 – Modelo tomográfico de 2 camadas	45
Figura 09 – Exemplo de MGI gerado pelo JPL e as respectivas estações utilizadas	49
Figura 10 – Mapa do atraso Troposférico gerado pelo modelo de PNT.....	55
Figura 11 – Análise da qualidade dos valores do ZTD provenientes da modelagem dinâmica em comparação com os gerados pelos modelos de Saastamoinen e Hopfield.....	59
Figura 12 – Atraso troposférico na direção receptor-satélite para o modelo dinâmico e o de Hopfield.....	59
Figura 13 – Diferença do atraso troposférico na direção receptor-satélite para o modelo dinâmico e o de Hopfield (a) e ângulo de elevação dos satélites (b).....	60
Figura 14 – Etapas utilizadas para gerar a VRS sem solucionar as ambigüidades	62
Figura 15 – Etapas utilizadas para gerar a VRS com solução das ambigüidades	64
Figura 16 – Página de documentação gerada pelo Doxygen	74
Figura 17 – Composição da rede GPS ativa no extremo Oeste do Estado de São Paulo	82
Figura 18 – Estação implantada temporariamente e estações em funcionamento da Rede do Estado de São Paulo.....	84
Figura 19 – Disposição das antenas GPS no experimento realizado no município de Parapuã	84
Figura 20 – EMQ obtido no PP modo estático com C1 gerado a partir das DDs ou pela observável original.....	89

Figura 21 - EMQ obtido no PP modo cinemático com C1 gerado a partir das DDs ou pela observável original.....	89
Figura 22 – EMQ para a componente planimétrica obtida no PP estático	90
Figura 23 - EMQ para a componente altimétrica obtida no PP estático.....	90
Figura 24 – EMQ para a componente planimétrica obtida no PP cinemático	91
Figura 25 - EMQ para a componente altimétrica obtida no PP cinemático.....	92
Figura 26 – RP obtida com o DGPS usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT	94
Figura 27 – RA obtida com o DGPS usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT	95
Figura 28 – RP obtida com o DGPS usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT	95
Figura 29 – RA obtida com o DGPS usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT	96
Figura 30 – Índice KP para o dia do processamento dos dados	97
Figura 31 – EMQ para a componente planimétrica obtida no DGPS.....	97
Figura 32 – EMQ para a componente altimétrica obtida no DGPS	98
Figura 33 – ZTD obtido pelo PPP no modo estático	101
Figura 34 – ZTD obtido pelo PPP no modo cinemático	101
Figura 35 – EMQ obtido para a resultante planimétrica com o PPP no modo estático.....	102
Figura 36 – EMQ obtido para a resultante altimétrica com o PPP no modo estático.....	102
Figura 37 – EMQ obtido para a resultante planimétrica com o PPP no modo cinemático....	103
Figura 38 – EMQ obtido para a resultante altimétrica com o PPP no modo cinemático	103
Figura 39 – EMQ para a componente planimétrica obtida no posicionamento relativo estático	105
Figura 40 – EMQ para a componente altimétrica obtida no posicionamento relativo estático	105
Figura 41 – RP obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT	106
Figura 42 – RA obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT	107

Figura 43 – RP obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT.....	107
Figura 44 – RA obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT.....	107
Figura 45 – Distâncias obtidas no posicionamento relativo com diferentes modelos para gerar a VRS	108
Figura 46 – EMQ obtido no posicionamento relativo VRS-PPTE com diferentes modelos para gerar a VRS	109
Figura 47 – Resultantes planimétrica e altimétrica obtidas no processamento relativo cinemático VRS-PPTE para o dia 002.....	109
Figura 48 – Linhas de base adotadas na solução do vetor das ambiguidades.....	114
Figura 49 – EMQ obtido para a resultante planimétrica com o PPP no modo estático e VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente.....	116
Figura 50 – EMQ obtido para a resultante altimétrica com o PPP no modo estático e VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente.....	116
Figura 51 – Distâncias obtidas no posicionamento relativo VRS-PPTE com a VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente.....	117
Figura 52 - EMQ obtido no posicionamento relativo VRS-PPTE com a VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente.....	118
Figura 53 - Resultantes planimétrica e altimétrica obtidas no processamento relativo cinemático VRS-PPTE para o dia 002.....	119
Figura 54 – Erro Resultante obtido época por época com a linha de base VRS-OURI no posicionamento relativo cinemático do dia 364	121
Figura 55 – RDOP normalizado pelo número de satélites obtido época por época com a linha de base VRS-OURI no posicionamento relativo cinemático do dia 364.....	121
Figura 56 – Número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para os PRNs 11 e 17.....	124
Figura 57 – Número médio de estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L1 para os dias 363 (a) e 364 (b)	126
Figura 58 – Correção gerada para a observável L1 da VRS x ângulo de elevação do satélite para os PRNs 11 e 17 e dia 362.....	128
Figura 59 – Número de observações de C1 (a) e P2 (b) geradas época por época para a VRS do dia 362.....	131
Figura 60 - Número de observações de L1 (a) e L2 (b) geradas época por época para a VRS do dia 362.....	132

Figura 61 – Resultante obtida no posicionamento relativo cinemático VRS-OURI em períodos onde correções de 4 estações de referência da rede estão disponíveis para gerar o erro residual na posição da VRS.....	133
Figura 62 – Interface gráfica disponível no <i>software</i> Bernese 5.0	152
Figura 63 - Número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para todos os PRNs da VRS.....	159
Figura 64 - Número médio de estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L1 para os dias 362 (a) e 002 (b)	160
Figura 65 – Ângulo de elevação dos satélites do arquivo gerado para a VRS no dia 362.....	161
Figura 66 - Correção gerada para a observável L1 da VRS $\times$ ângulo de elevação do satélite para todos os PRNs do dia 362.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Coeficientes da função de mapeamento de Niell para as componentes hidrostática e úmida	58
Tabela 02 – Opções disponíveis para gerar a VRS.....	63
Tabela 03 – EMQ Resultante obtido no PP estático (m)	91
Tabela 04 - EMQ Resultante obtido no PP cinemático (m).....	92
Tabela 05 – Valor médio do EMQ obtido no modo estático e cinemático (m)	93
Tabela 06 – EMQ resultante obtido pelo DGPS (cm)	94
Tabela 07 - EMQ Resultante obtido DGPS (m).....	98
Tabela 08 – ZTD médio estimado para 24h de dados (m).....	100
Tabela 09 – EMQ da resultante obtido pelo PPP estático (cm)	103
Tabela 10 – EMQ da resultante obtido pelo PPP cinemático (cm)	104
Tabela 11 – EMQ resultante obtido pelo posicionamento relativo estático (cm)	105
Tabela 12 – EMQ resultante obtido pelo posicionamento relativo cinemático (cm)	106
Tabela 13 - Porcentagem do erro resultante, erro em planimetria e erro em altimetria menores que 10, 20, 30 e 50 cm (%) na linha de base VRS-PPTE	110
Tabela 14 – Taxa de sucesso na solução do vetor de ambigüidades (%).....	115
Tabela 15 - EMQ da resultante obtido pelo PPP estático com a VRS gerada a partir de observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente (cm)	116
Tabela 16 - Porcentagem do erro resultante, erro em planimetria e erro em altimetria menores que 10, 20, 30 e 50 cm (%) na linha de base VRS-PPTE	119
Tabela 17 – Porcentagem do erro resultante, erro em planimetria e erro em altimetria menores que 10, 20, 30 e 50 cm (%) na linha de base VRS-OURI.....	122
Tabela 18 – Número médio de estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L1 e L2 de cada satélite.....	125
Tabela 19 – Porcentagem de perda de dados de fase da onda portadora se comparado com a VRS gerada por VRS+DG (%).....	129
Tabela 20 – Número médio de observações geradas para a VRS em cada época considerando 10 graus de elevação para as estações de referência.....	130

Tabela 21 - Número médio de observações geradas para a VRS em cada época considerando 15 graus de elevação para as estações de referência.....	130
Tabela 22 – Porcentagem de redução do número de observações da VRS quando se utiliza mascara de elevação de 15 graus ao invés de 10 graus (%).....	131
Tabela 23 – Programas utilizados no Bernese para obter as ambigüidades das DDs.....	154

LISTA DE SIGLAS

BPE	<i>Bernese Processing Engine</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CODE	<i>Centre for Orbit Determination in Europe</i>
COSMIC	<i>Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate</i>
DCB	<i>Differential Code Bias</i>
DD	Dupla Diferença
DP	Desvio-Padrão
DG	Deslocamento Geométrico
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DLL	<i>Dynamic Link Library</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
EOF	<i>Empirical Orthogonal Functions</i>
ESOC	<i>European Space Operations Centre</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FKP	<i>Area Correction Parameters</i>
GAS	<i>GPS Analysis Software</i>
GIM	<i>Global Ionospheric Maps</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGU	<i>IGS Ultra Rapid Predicted Orbit</i>
IMF	<i>Isobaric Mapping Function</i>
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	<i>Ionosphere Map Exchange Format</i>
IPP	<i>Ionospheric Pierce Point</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
MGI	Mapas Globais da Ionosfera

MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
NTRIP	<i>Network of RTCM via Internet Protocol</i>
OTF	<i>On-The-Fly</i>
PDA	<i>Partial Derivative Algorithms</i>
PNT	Previsão Numérica do Tempo
ppm	Partes por milhão
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PP	Posicionamento por Ponto
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
QIF	<i>Quase Ionosphere-Free</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RDOP	<i>Relative Dilution of Precision</i>
RIBaC	Rede Incra de Bases Comunitárias
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real-Time Kinematic</i>
SD	Simples Diferença
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SP3	<i>Standard Product 3</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TGO	<i>Trimble Geomatics Office</i>
UCAR	<i>University Corporation for Atmospheric Research</i>
UPC	<i>Polytechnical University of Catalonia</i>
VRC	<i>Virtual reference Cell</i>
VRS	<i>Virtual Reference Station</i>
ZTD	<i>Zenithal Tropospheric Delay</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Caracterização do Assunto	21
1.2. Objetivos	24
1.3. Justificativa.....	24
1.4. Conteúdo da Tese.....	25
2. POSICIONAMENTO GPS BASEADO EM REDES DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA.....	27
2.1. Algoritmos Baseados em Redes de Estações de Referência	30
2.1.1. Algoritmos de Derivadas Parciais	31
2.1.2. Algoritmos de Interpolação	35
2.1.3. Algoritmo Envolvendo Ajustamento Condicional	36
2.1.4. Estação de Referência Virtual	38
2.1.4.1. Geração dos Dados da VRS	40
2.1.4.2. Células de Referência Virtual.....	42
3. MODELAGEM DA ATMOSFERA NO POSICIONAMENTO GPS BASEADO EM REDES	43
3.1. Modelagem da Ionosfera.....	43
3.1.1. Mod_Ion e Mod_Ion_FK	45
3.1.2. Mapas Globais da Ionosfera	49
3.1.3. Função de Mapeamento	50
3.1.3.1. Função de Mapeamento Geométrica Padrão.....	50
3.2. Modelagem da Troposfera.....	50
3.2.1. Modelo de Hopfield	51
3.2.2. Previsão Numérica do Tempo	52
3.2.3. Funções de Mapeamento.....	55
3.2.3.1. Niell	56
3.2.4. Modelagem Dinâmica Versus Modelos Padrão	58
4. METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA GERAR A VRS.....	61
4.1. Calculando os Dados da VRS sem Solucionar as Ambigüidades	61
4.1.1. Opções Disponíveis para Gerar a VRS	62
4.2. Calculando os Dados da VRS com Solução das Ambigüidades	63
4.2.1. Solução do Vetor das Ambigüidades.....	65
4.2.2. Erro Residual das DDs	65
4.2.3. Recuperando o Erro Residual da Observável Original.....	66
4.2.4. Interpolando o Erro Residual	69
4.2.4.1. Equação do Plano	69
4.2.4.2. Interpolação Ponderada pela Distância.....	70
4.3. Erro Residual da Pseudodistância a Partir da Observável Original.....	70
5. IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO EM AMBIENTE COMPUTACIONAL E COLETA DE DADOS.....	72
5.1. Implementação do Método Proposto	73
5.1.1. Ferramenta Utilizada na Documentação do Sistema Desenvolvido.....	73
5.1.2. Funções e Classes Desenvolvidas no Sistema.....	74
5.1.3. Arquivos de Dados GPS.....	75
5.1.3.1. Arquivos de Observação das Estações da Rede	75
5.1.3.2. Coordenadas dos Satélites GPS.....	75
5.1.4. Gerando a VRS sem Solucionar as Ambigüidades.....	76

5.1.4.1. Atraso Troposférico	76
5.1.4.2. Efeito Ionosférico	78
5.1.4.3. VRS.....	79
5.1.5. Gerando a VRS após Solucionar as Ambigüidades.....	79
5.1.5.1. Cálculo das SDs e DDs	79
5.1.5.2. Solução das Ambigüidades	80
5.1.5.3. Determinando o Erro Residual na Posição da VRS.....	80
5.1.5.4. VRS.....	81
5.2. Rede GPS Ativa do Oeste do Estado de São Paulo	81
5.2.1. Obtenção das Coordenadas de Referência	83
5.2.2. Descrição da Campanha Realizada.....	83
5.2.3. Experimentos Realizados	85
6. ANÁLISE DA VRS GERADA A PARTIR DE DADOS DE PSEUDODISTÂNCIA.....	87
6.1. Processamentos dos Dados e Análises dos Resultados.....	87
6.1.1. VRS Gerada a Partir do Erro Residual de DDs × VRS Gerada a Partir da Observável Original.....	88
6.1.2. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS Gerados por Diferentes Estratégias no PP	89
6.1.3. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS Gerados por Diferentes Estratégias no DGPS	93
6.1.3.1. VRS Gerada Apenas por Modelos Atmosféricos.....	93
6.1.3.2. VRS Gerada por Diferentes Metodologias	97
7. RESULTADOS OBTIDOS COM A VRS GERADA UTILIZANDO MODELOS ATMOSFÉRICOS	99
7.1. Processamentos e Análises.....	99
7.1.1. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS no PPP.....	100
7.1.1.1. Avaliando o ZTD Estimado	100
7.1.1.2. Avaliando as Coordenadas Obtidas	101
7.1.2. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS no Posicionamento Relativo com o TGO	104
7.1.2.1. Posicionamento Relativo VRS-OURI e PPTE-OURI	104
7.1.2.2. Posicionamento Relativo VRS-PPTE.....	108
7.1.3. PNT × Hopfield	110
8. RESULTADOS OBTIDOS COM A VRS GERADA A PARTIR DOS ERROS RESIDUAIS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA	112
8.1. Processamentos e Análises.....	113
8.1.1. Solução das Ambigüidades	114
8.1.2. Processamento dos Dados	115
8.1.2.1. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS no PPP.....	115
8.1.2.2. Resultados Obtidos Processando a Linha de Base VRS-PPTE no Posicionamento Relativo	117
8.1.2.3. Resultados Obtidos Processando a Linha de Base VRS-OURI no Posicionamento Relativo	120
8.1.3. Análises Referentes à Qualidade das Correções Geradas para a VRS	123
8.1.3.1. Estações Utilizadas para Gerar o Erro Residual na Posição da VRS	123
8.1.3.2. Correlação entre a Correção Gerada para a VRS e o Ângulo de Elevação do Satélite	127
8.1.3.3. Porcentagem de Perda de Observações da Fase na Geração da VRS.....	128
8.1.3.4. Número de Observações Geradas para a VRS em cada Época.....	130
8.1.4. Análises e Conclusões.....	132

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	134
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICE A – <i>Software</i> Científico Bernese 5.0.....	150
A.1. Breve Histórico	151
A.2. Principais Objetivos e Características Gerais	152
A.3. Solucionando as Ambigüidades com o Bernese 5.0	154
A.4. Obtendo as Coordenadas de Referência.....	155
APÊNDICE B – Gráficos e Tabelas Relacionados a Geração da VRS com Solução do Vetor de Ambigüidades	156
B.1. Estações Utilizadas para Gerar o Erro Residual na Posição da VRS.....	157
B.2. Correlação entre a Correção Gerada para a VRS e o Ângulo de Elevação do Satélite.....	161
ANEXO A – Arquivo do Atraso Zenital Troposférico Disponível do CPTEC	165

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do Assunto

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS), que integra os vários sistemas de posicionamento por satélite existentes, tem como principal objetivo viabilizar a navegação de baixa, média e alta precisão. Dentre os sistemas de posicionamento que integram o GNSS, o *Global Positioning System* (GPS) tem grande destaque.

O GPS é um sistema de abrangência global que permite ao usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a ela, dispor de no mínimo quatro satélites para serem rastreados, sem necessidade de intervisibilidade entre as estações e independente das condições climáticas (MONICO, 2000).

Várias técnicas de posicionamento têm sido desenvolvidas para explorar a capacidade que o GPS possui de prover coordenadas precisas com um pequeno intervalo de tempo de coleta de dados, ou até mesmo quando o receptor está se movendo ao longo de uma trajetória. Esses métodos de posicionamento podem ser denominados: estático, estático rápido, semi-cinemático e cinemático (SEEBER, 2003).

Os dados do posicionamento cinemático podem ser processados após a coleta (modo pós-processado) ou durante a própria coleta (tempo real). Nos demais tipos de posicionamento os dados são processados, em geral, após a coleta (MONICO, 2000; LEICK, 1995).

O posicionamento relativo cinemático em tempo real, que é denominado *Real-Time Kinematic* (RTK), teve um importante desenvolvimento nos últimos anos. Esse tipo de posicionamento pode alcançar acurácia centimétrica, no campo, sem a necessidade de um processamento posterior dos dados (DAI et al., 2003). Além disso, são inúmeras as possibilidades de aplicações nos dias atuais, o RTK pode ser utilizado na Geodésia, em Topografia ou na Navegação, dentre outras possibilidades (SEEBER, 2003).

Em se tratando de posicionamento em tempo real, existe ainda o posicionamento GPS Diferencial (DGPS). Esse tipo de posicionamento pode ser realizado utilizando como observáveis as pseudodistâncias ou as pseudodistâncias filtradas pela portadora. O método que utiliza somente as pseudodistâncias é mais empregado na prática (MATSUOKA et al., 2003; DALBELO, ALVES E MONICO, 2005a, 2005b).

Quando pseudodistâncias são utilizadas, o posicionamento DGPS possui, geralmente, acurácia da ordem de 1 a 3 m, dependendo do receptor, do comprimento da linha de base (PRADO, 2001), das condições da ionosfera etc. Já no caso em que as pseudodistâncias são filtradas pela portadora, o posicionamento DGPS pode alcançar acurácia submétrica. E ainda, devido à decorrelação espacial dos erros (ionosfera, troposfera e órbita), a distância entre a estação de referência e o usuário é limitada, dependendo principalmente das condições da ionosfera (SEEBER, 2003). Além disso, enquanto no DGPS são utilizadas as pseudodistâncias, no RTK a observável utilizada é a fase da onda portadora, visando melhorar consideravelmente a qualidade dos resultados (MONICO, 2000).

Um fator limitante tanto para o DGPS quanto para o RTK era o uso de *links* de rádio para enviar as correções aos usuários. Mas nos dias atuais, com o uso da internet, esse problema está resolvido, pois a internet é uma rede de acesso global que pode ser utilizada em qualquer local com apenas um telefone celular.

Em se tratando do posicionamento RTK os erros causados pela ionosfera e troposfera também diminuem sua eficiência quando existe aumento da distância entre o receptor móvel e a estação de referência (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002).

O uso de uma rede de estações de referência, ao invés de uma única estação de referência, permite modelar os erros sistemáticos na região, fazendo com que esses erros sejam reduzidos e a acurácia do posicionamento melhorada. Assim, utilizando modelos de ionosfera e troposfera, pode-se gerar correções para serem utilizadas pelo usuário na região de abrangência da rede. Uma outra possibilidade é gerar, a partir dos modelos, ao invés de correções, dados GPS numa estação próxima ao usuário. No primeiro caso, o receptor móvel deve ter a capacidade de aceitar correções de rede (ou parâmetros de correção de área – *Area Correction Parameters* - FKP) (LACHAPELLE e ALVES, 2002). Já no segundo, onde se utiliza o conceito de estação de referência virtual (VRS – *Virtual Reference Station*), pode-se utilizar um *software* de processamento convencional (ZHANG e ROBERTS, 2003).

No conceito de VRS, os dados de uma estação virtual são gerados num centro de controle e transmitidos para o usuário em tempo real ou posteriormente utilizando o conceito de pós-processamento (RETSCHER, 2002). Essa VRS é situada a poucos metros do receptor móvel. Assim, é possível utilizar os dados dessa VRS como se ela fosse uma estação de referência real (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002). Dessa forma, o usuário pode até mesmo utilizar receptores de simples frequência para determinar sua posição em tempo real (ZHANG e ROBERTS, 2003).

Cabe ainda acrescentar que, para se realizar o posicionamento baseado em uma rede de estações de referência (RTK em Rede para posicionamento em tempo real), as principais etapas são: solução das ambigüidades entre as estações de referência; cálculo das correções da rede; interpolação dessas correções; e transmissão das correções ou dos dados gerados para a VRS aos usuários.

Para calcular as correções da rede, os efeitos dos erros atmosféricos existentes devem ser modelados. Com esse intuito existem várias possibilidades, e algumas estão descritas nessa Tese. Em relação à ionosfera, Odijk (2000a, 2000b) discute a possibilidade de se utilizar um modelo ponderado da ionosfera. No entanto, investigações conduzidas para analisar o comportamento de alguns algoritmos de correções ionosféricas aplicadas nos Estados Unidos, mostraram a sua não adequação à região da América do Sul (KOMJATHY et al., 2003). Já em relação à troposfera, Seeber (2003) propõe o uso do modelo modificado de Hopfield. Por outro lado, Mendes (1998) propõe o uso do modelo de Saastamoinen. Para as órbitas dos satélites, as *IGS UltraRapid Predicted Orbit* (IGU), fornecidas pelo *International GNSS Service* (IGS) em tempo real, que possuem acurácia de aproximadamente 10 cm, podem ser utilizadas (IGS, 2006a).

No que concerne à interpolação das correções, diversos métodos podem ser utilizados. Hu et al. (2002) adotaram um algoritmo baseado na interpolação Linear Bi-dimensional para gerar as correções na posição do usuário. Landau, Vollath e Chen (2002) utilizaram uma Aproximação Linear Ponderada. Han e Rizos (1996) utilizam um Modelo de Combinação Linear, Gao e Li (1998) usam um Método de Interpolação Linear Baseado na Distância.

Dessa exposição pode-se verificar que, apesar do grande avanço nessa área, há uma série de questões ainda não respondidas, o que evidencia a pertinência da investigação proposta, não só em nível nacional, mas também internacional.

No Brasil, tem-se disponível a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (FORTES, 1997), com receptores de dupla frequência, que se encontra em fase de modernização e densificação (através de uma parceria com o INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária)) (INCRA, 2008); a rede implantada pela FCT/UNESP no oeste do Estado de São Paulo (capítulo 5), também com receptores de dupla frequência; além de várias estações contínuas de empresas revendedoras de receptores GPS, em geral com receptores de simples frequência. Mas elas não estão sendo utilizadas dentro do conceito de posicionamento GPS baseado em redes. Sua utilização, para fins de posicionamento

geodésico, é apenas como estação base no posicionamento relativo. Logo, há espaço no Brasil para investigações nessa direção.

1.2. Objetivos

O tema central desta Tese é o posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência GPS utilizando o conceito de estação de referência virtual. Nesse sentido, o objetivo principal é avaliar a qualidade da VRS gerada por dois métodos distintos:

- Metodologia desenvolvida no decorrer dessa pesquisa - a VRS é gerada utilizando um modelo regional para a ionosfera e de previsão numérica de tempo (PNT) para a troposfera, tanto para dados da fase da onda portadora como da pseudodistância, ou ambos;
- Procedimento convencional presente na literatura – é necessário solucionar o vetor de ambigüidades das estações envolvidas na rede para gerar os dados da VRS.

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, comparecem os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um sistema computacional que permita realizar investigações relacionadas ao posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência, dando ênfase ao conceito de VRS;
- Investigar os métodos de interpolação das correções para verificar o que melhor se adapte a realidade brasileira;
- Realizar uma comparação entre diferentes modelos de ionosfera e troposfera utilizados para gerar os dados da VRS;
- Verificar se o número de estações, número de satélites, ângulo de elevação e geometria das estações influenciam na qualidade da VRS gerada.

1.3. Justificativa

Nos dias atuais é cada vez maior o interesse de se realizar o posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência, pois existe um número significativo de aplicações que pode utilizar e ser beneficiado com esse tipo de posicionamento. No Brasil, existem redes de estações de referência ativas, como é o caso da RBMC, RIBaC e Rede do

Oeste do Estado de São Paulo, que poderiam apoiar esse tipo de posicionamento, haja vista que essas redes estão sendo usadas apenas no modo convencional, isto é, como estação base.

Além disso, os *softwares* que realizam esse tipo de posicionamento são comerciais, que além do custo elevado são do tipo caixa preta. Dessa forma, o usuário/pesquisador não tem a possibilidade de realizar alterações no código fonte, o que constitui uma grande limitação para o desenvolvimento de pesquisas. Cabe acrescentar que esses *softwares* foram implementados com modelos atmosféricos que atendem a realidade da Europa e América do Norte, e não a realidade do Brasil, onde, principalmente, as condições ionosféricas são muito variáveis.

Cabe ressaltar que, nessa pesquisa, foi desenvolvido um sistema que permite realizar o posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência, podendo o mesmo futuramente ser disponibilizado para usuários interessados em utilizá-lo em diversas aplicações, ou até mesmo em realizar pesquisas.

Finalmente, pode-se citar como justificativa o fato de que essa Tese integra vários campos de pesquisa que vem sendo desenvolvidos na FCT/UNESP, tornado-as parte de um sistema que é utilizado na prática.

1.4. Conteúdo da Tese

A organização deste trabalho é descrita a seguir, com o conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 2 são descritas as principais características do posicionamento GPS baseado em redes, bem como os algoritmos que podem ser utilizados nesse tipo de posicionamento. Nesse capítulo é dado ênfase ao conceito de VRS e aos detalhes sobre como gerar uma VRS. O conceito de células de estações de referência virtual também é apresentado.

O capítulo 3 é dedicado à modelagem da ionosfera e da troposfera no posicionamento GPS baseado em redes. Assim, são elencados diversos modelos e funções de mapeamento que podem ser aplicados no posicionamento GPS baseado em redes, sendo descritos os modelos que foram utilizados nessa pesquisa para gerar a VRS.

Já o capítulo 4 apresenta as metodologias utilizadas para gerar os dados da VRS. A primeira gera os dados da VRS utilizando apenas modelos atmosféricos sem necessidade de solucionar as ambigüidades na rede, enquanto o segundo procedimento

descrito gera a VRS após a solução das ambigüidades. Além disso, também comparece uma terceira metodologia para a pseudodistância, onde o erro residual é obtido diretamente das observações originais das estações da rede.

No capítulo 5 são descritos aspectos relacionados com a implementação do sistema desenvolvido nessa pesquisa. Também são apresentados detalhes sobre a rede do Oeste do Estado de São Paulo, bem como a campanha que foi realizada no município de Parapuã. Adicionalmente, também são descritos os experimentos.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e as análises referentes às diferentes metodologias utilizadas para gerar os dados de pseudodistância para a VRS. Já o capítulo 7 descreve e analisa os experimentos realizados para avaliar a qualidade da VRS gerada a partir de modelos atmosféricos.

O capítulo 8 traz diversas análises da qualidade dos dados gerados para a VRS quando é realizada a solução das ambigüidades entre as estações de referência da rede. Finalmente, o capítulo 9 é dedicado às considerações finais e recomendações dessa pesquisa.

2. POSICIONAMENTO GPS BASEADO EM REDES DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA

Nos últimos anos, o posicionamento RTK (tanto realizado em tempo real quanto no modo pós-processado) tem sido uma técnica muito eficiente em aplicações que requerem alta acurácia e produtividade no posicionamento. O RTK é capaz de prover acurácia centimétrica no posicionamento quando as ambigüidades da fase da onda portadora são resolvidas como valores inteiros utilizando um dos métodos *On-The-Fly* (OTF) (CHEN, LANDAU e VOLLATH, 2003; WU, KUBO e YASUDA, 2003).

O posicionamento RTK é baseado no uso de uma única estação de referência localizada nas proximidades do receptor móvel. Mas, devido à decorrelação espacial dos erros, principalmente devido à ionosfera, a distância entre a estação de referência e o usuário é geralmente limitada a 20 km ou até menos. Dessa forma, o uso de uma rede de estações de referência tem sido investigado (WU, KUBO e YASUDA, 2003).

O conceito de rede de estações de referência foi desenvolvido devido à necessidade de uma melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento e navegação. As múltiplas estações de referência são utilizadas para levantamentos que requerem acurácia centimétrica em distâncias de dezenas de quilômetros (ALVES, AHN e LACHAPPELLE, 2003). Além disso, a área de abrangência onde o usuário poderá atuar será muito maior (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002).

A Figura 01(a) traz uma ilustração da quantidade de estações de referência necessárias para uma determinada região quando se utiliza o posicionamento RTK. Já a Figura 01(b) mostra a quantidade de estações necessárias quando se utiliza o conceito de rede. Observando a Figura 01(a) pode-se perceber que quando o RTK é utilizado, comparece a necessidade de se utilizar um grande número de estações de referência, e mesmo assim a região não é totalmente coberta (existem pequenas regiões em que seria necessário instalar mais estações). Já em (b) o número de estações de referência é reduzido, e a área de abrangência da rede é totalmente coberta.

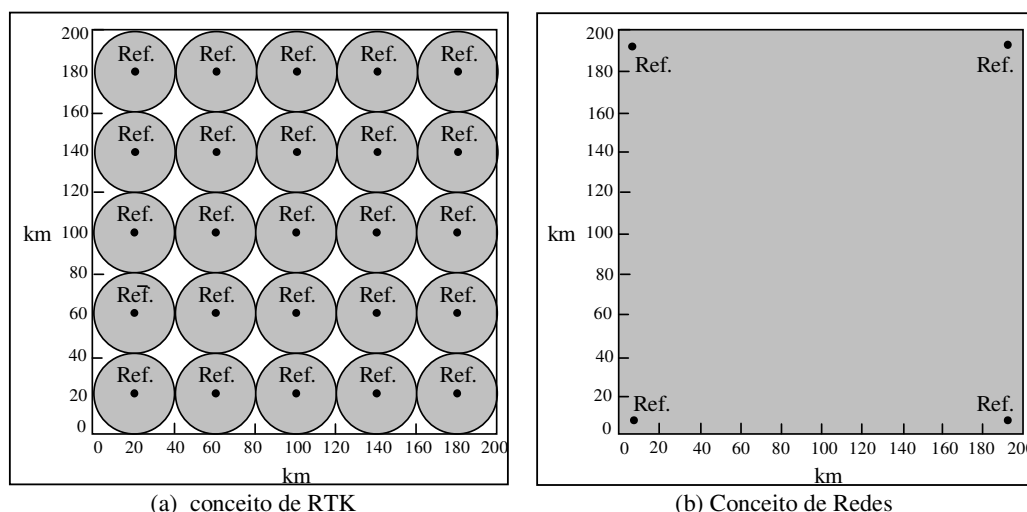


Figura 01 – Quantidade de estações de referência necessárias para a cobertura da região de interesse com a utilização do RTK (a) e do conceito de rede de estações de referência (b)

Fonte: Adaptado de Raquet e Lachapelle (1997).

O número de estações de uma rede pode variar de três estações a dezenas ou centenas de estações. A distância entre as estações pode variar de poucos quilômetros a dezenas de quilômetros ou mais (OMAR e RIZOS, 2003).

A utilização de uma rede de estações de referência para realizar o posicionamento (RTK em rede se for realizado em tempo real) oferece diversas vantagens se comparado com o RTK, que utiliza apenas uma única linha de base.

Uma das principais vantagens dos usuários de redes de estações de referência, quando comparado a usuários de uma simples linha de base, é o aumento na confiabilidade e disponibilidade do serviço. No posicionamento GPS baseado em redes, se uma ou duas estações de referência falham ao mesmo tempo (por qualquer razão), sua contribuição pode ser eliminada da solução e as estações de referência remanescentes ainda seriam capazes de prover aos usuários as correções de fase (COLOMBO, 1998). Embora em alguns casos a acurácia da posição possa deteriorar, ela não será tão prejudicada como no RTK, pois se a única estação falhar, o usuário terá que realizar posicionamento por ponto ou retornar a campo posteriormente. Além disso, o uso da rede permite que a qualidade das correções geradas para cada estação de referência seja checada com as correções remanescentes. Assim, se uma estação particular está gerando correções errôneas, o uso da rede permite uma possível detecção e eliminação desse erro para a solução final (FOTOPOULOS, 2000a).

Outro aspecto importante do posicionamento GPS baseado em redes é que ele permite a modelagem dos erros dependentes da distância ou espacialmente

correlacionados, como o efeito ionosférico e a refração troposférica. Combinando observações de um número de estações de referência permanentes (com coordenadas conhecidas), os efeitos dos erros acima mencionados podem ser tratados por diversas técnicas de modelagem. Portanto, correções representando esses erros podem ser geradas e disseminadas ao usuário para melhorar a acurácia do posicionamento. Um resultado direto da modelagem dos erros espacialmente correlacionados é a maior facilidade na correta solução das ambigüidades da fase de batimento da onda portadora, indispensável para obter resultados de posicionamento em nível centimétrico (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003; EULER, KEENAN e ZEBHAUSER, 2001). Na realidade, a melhoria na solução das ambigüidades, em linhas de base longas, conduz a uma outra importante vantagem no uso das redes que é a possibilidade de se ter uma maior distância entre as estações de referência da rede. Além disso, uma rede de estações de referência tem a possibilidade de oferecer serviços onde se garante a integridade¹ do mesmo.

No entanto, de acordo com Fotopoulos (2000a) existem algumas desvantagens associadas ao uso de uma rede de estações de referência. Mais especificamente, dependendo do método usado (seção 2.1), existe um possível aumento da carga de transmissão dos dados e/ou complexidade na implementação a ser realizada pelo usuário (como no caso da interpolação, seção 2.1.2.), se comparado ao uso de uma única linha de base. Combinar todas as observações da rede em uma estação central de processamento, e então transmitir para o usuário as correções da rede ou observações de uma estação de referência virtual próxima ao usuário (ou ambas) é o método preferido para superar essas limitações.

Para realizar o posicionamento GPS baseado em redes em tempo real, comparece a necessidade de comunicação entre as estações de referência e o usuário. Uma possibilidade é a utilização de rádios comunicadores para a transmissão das correções ou dados, o que limita a distância entre a estação de referência e o usuário (ZHANG e ROBERTS, 2003). No entanto, hoje em dia existe a possibilidade de se utilizar a internet para a transmissão das correções, utilizando, por exemplo, telefones celulares. Como a internet é baseada em uma rede global, não haverá limitação quanto a distância para a transmissão dos dados, além da confiabilidade na transmissão (GAO, LIU e LIU, 2002). Uma grande tendência nos dias atuais é a utilização do protocolo *Network of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP) para transmissão de dados GPS via internet (WEBER et al., 2005).

¹ Integridade é a probabilidade de que o serviço disponível atenda aos padrões de qualidade pré-estabelecidos.

Finalizando, outro fato importante que vem fortalecendo e viabilizando o posicionamento com múltiplas estações é a existência de redes de estações de referência ativas pelo mundo todo. Principalmente em países mais desenvolvidos, como é o caso, por exemplo, da Alemanha, Estados Unidos e Japão, as redes de estações de referência são adequadamente densificadas. No que concerne ao Brasil, a RBMC, com a configuração atual, torna inviável a aplicação do posicionamento GPS baseado em redes tanto em tempo real como no modo pós-processado, pois a distância entre as estações ainda é muito grande (várias dezenas de quilômetros) e os dados não estão disponíveis em tempo real. No entanto, com a modernização que está ocorrendo, principalmente no que diz respeito a densificação da rede, provavelmente esse tipo de posicionamento será viabilizado. Além disso, para usuários do oeste do estado de São Paulo em um futuro próximo existe a possibilidade de se ter implantado esse tipo de serviço.

2.1. Algoritmos Baseados em Redes de Estações de Referência

Diversos métodos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos para formular correções a partir de dados de uma rede de estações de referência. Os principais métodos investigados podem ser categorizados como segue:

- Algoritmos de derivadas parciais;
- Algoritmos de interpolação;
- Algoritmo de ajustamento condicional;
- Algoritmo de estação de referência virtual.

Os três primeiros métodos se concentram na geração de correções da fase da onda portadora (em alguns casos envolve estritamente os efeitos ionosféricos residuais), enquanto que o último método lida com o conceito de uma estação de referência virtual. Cada um desses métodos é apresentado com mais detalhes nessa Tese. Em Alves, Monico e Fortes (2005a) esses algoritmos também são discutidos.

2.1.1. Algoritmos de Derivadas Parciais

Um dos primeiros algoritmos empregados em múltiplas estações de referência foi apresentado por Wübbena et al. (1996). O conceito fundamental desse trabalho, em uma perspectiva de modelagem de erro, envolve o ajustamento de múltiplas estações para derivar parâmetros ou “coeficientes de rede” através de um modelo geométrico apropriado para descrever o comportamento dos erros dependentes da distância. A modelagem dos erros correlacionados espacialmente é baseada em uma função de derivadas parciais de primeira ordem, que pode ser utilizada para obter as correções correspondentes para o receptor de um usuário que se localize dentro da área de cobertura da rede (FOTOPOULOS, 2000a). Este método requer a compilação de dados de no mínimo três estações de referência, que resulta em um plano inclinado (Figura 02).

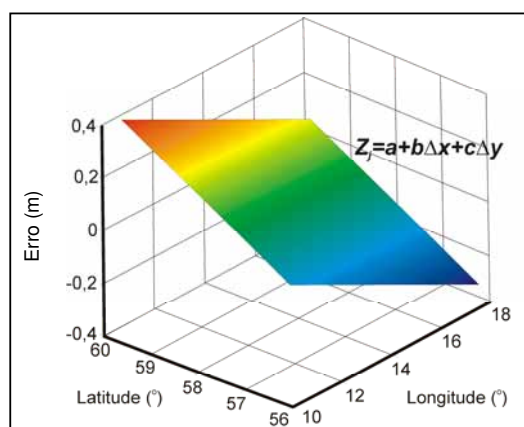


Figura 02 – Modelo de plano inclinado (3 parâmetros) para erros correlacionados espacialmente
Fonte: Adaptado de Fotopoulos (2000a).

Para implementação em tempo real, este método oferece a praticidade de disseminar somente os parâmetros do modelo ou os coeficientes da rede para os usuários, em lugar das medidas originais (ou corrigidas). Isto implica que quando o número de estações de referência aumenta e o modelo torna-se mais complexo (envolvendo mais coeficientes), o aumento na carga de transmissão dos dados não é tão significativo. Além disso, resultados iniciais obtidos por Wübbena (1996) mostraram que a natureza dinâmica relativamente baixa dos coeficientes da rede implica que é possível atualizar periodicamente os coeficientes da rede, talvez somente a cada 30 – 60 segundos.

A origem matemática dos algoritmos de derivadas parciais (*Partial Derivative Algorithms* - PDA) é baseada na expansão espacial da série de Taylor de uma

função de erro de medidas GPS (g) em um ponto de referência específico (P_0). A equação (2.1) ilustra um exemplo de uma PDA obtida de uma série de Taylor de segunda ordem expandida em coordenadas tri-dimensionais (VARNER, 2000).

$$g(P) = g(P_0) + \frac{\partial g}{\partial P_0} \{P - P_0\} + \frac{1}{2} \{P - P_0\} \frac{\partial^2 g}{\partial P_0^2} \{P - P_0\}^T + O(h_3), \quad (2.1)$$

onde:

- $g(P_0)$ = derivada parcial de ordem 0 (mm);
- $\frac{\partial g}{\partial P_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} & \frac{\partial g}{\partial z} \end{bmatrix}$ = vetor de derivada parcial de 1ª ordem (ppm);
- $\frac{\partial^2 g}{\partial P_0^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \end{bmatrix}$ = Matriz de derivadas parciais de 2ª ordem $\left(\frac{\text{ppm}}{\text{km}} \right)$;
- $P = \begin{bmatrix} x_P & y_P & z_P \end{bmatrix}^T$ = Posição (km).

A constante $g(P_0)$ representa uma componente fixa/não-espacial dos erros que estão sendo estimados. O termo de derivada parcial de primeira ordem, $\frac{\partial g}{\partial P_0}$, leva em

consideração a decorrelação espacial. O termo de segunda ordem, $\frac{\partial^2 g}{\partial P_0^2}$, pode ser utilizado

para as componentes não lineares do erro. O ponto de referencia, P_0 , pode ser localizado em algum lugar próximo ao usuário. Porém, como uma rede de estações de referência é utilizada, P_0 é normalmente localizado na posição de uma estação de referência próxima ao centro geométrico da rede. A estação da rede cuja localização corresponde ao ponto de referência do PDA é chamada de estação de referência principal. Todas as outras estações são chamadas de estações de referência secundárias (VARNER, 2000).

Na equação (2.1), as derivadas parciais $g(P_0)$, $\frac{\partial g}{\partial P_0}$ e $\frac{\partial^2 g}{\partial P_0^2}$ são incógnitas

que devem ser estimadas a partir de medidas de dupla diferença (DD) de pseudodistância e da fase da onda portadora das estações de referência e das localizações conhecidas dos receptores das estações de referência.

De acordo com Varner (2000), no PDA (equação (2.1)) assume-se que os erros espaciais são lineares nos eixos horizontais. Dessa forma, somente derivadas parciais de 1ª ordem são estimadas. Assim:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z} = \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial x} = \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial y} = 0. \quad (2.2)$$

Se existe a suspeita de que ocorra um comportamento não linear no eixo vertical em função da sensibilidade ionosférica ou troposférica, a derivada parcial de 2ª ordem $\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$ precisa ser estimada. Uma causa possível de comportamento não linear é a cintilação².

Mas os efeitos causados pela cintilação são imprevisíveis. Consequentemente, assume-se que a cintilação não pode ser perfeitamente modelada com um PDA de 2ª ordem. Se a cintilação existe, ela aumenta o ruído das medidas da rede e degrada a acurácia dos parâmetros estimados pelo PDA (VARNER, 2000).

Dadas as condições expressas pela equação (2.2), a equação (2.1) é simplificada para (VARNER, 2000; FOTOPOULOS, 2000a):

$$g(P) = \alpha + \chi(x_P - x_{P_0}) + \beta(y_P - y_{P_0}) + \delta(z_P - z_{P_0}) + \gamma(z_P - z_{P_0})^2 + O(h_3), \quad (2.3)$$

onde:

- $\alpha = g(P_0)$ é a derivada parcial de ordem 0 (mm);
- $\chi = \frac{\partial g}{\partial x}$ é a derivada parcial de 1ª ordem ao longo do eixo horizontal X (ppm);
- $\beta = \frac{\partial g}{\partial y}$ é a derivada parcial de 1ª ordem ao longo do eixo horizontal Y (ppm);
- $\delta = \frac{\partial g}{\partial z}$ é a derivada parcial de 1ª ordem ao longo do eixo vertical Z (ppm);
- $\gamma = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$ é a derivada parcial de 2ª ordem ao longo do eixo vertical Z (ppm/km).

A constante α representa a componente fixa dos erros específicos (não espaciais) da estação principal. Cada um dos coeficientes χ , β e δ representam os erros correlacionados espacialmente. Já γ leva em consideração os efeitos não lineares existentes na direção vertical devido a ionosfera e troposfera.

² Cintilação refere-se a rápida variação da amplitude e da fase de sinais de rádio observado próximo a superfície terrestre (GROVES, 2000). No GPS, a cintilação pode causar perdas de sinais, ou seja, perdas de ciclos, devido ao enfraquecimento de potência do sinal recebido (SEEBER, 2003).

Em resumo, os PDA estimam os parâmetros da rede para cada par de satélites na estação principal, os quais são disseminados para o receptor do usuário. Em Varner (2000), a escolha apropriada de um PDA é discutida, baseada na magnitude espacial, na geometria da rede e no número de estações de referência que definem o nível de complexidade e acurácia do PDA.

Como exemplo considere uma rede que possui uma grande distância Norte e Sul (y) (Figura 03). Se a rede não cobre uma grande distância Leste e Oeste (x), os parâmetros para o eixo Leste/Oeste são pobremente determinados. Assim, esses parâmetros podem ser removidos do modelo de PDA. Nesse caso, o modelo é dado por (VARNER e CANNON, 1997; VARNER, 2000):

$$g_j = \alpha + \beta \Delta y_j + \varepsilon_g(P_j), \quad (2.4)$$

onde:

- P_j é a posição da estação secundária j ;
- $\varepsilon_g(P_j)$ é o erro de predição do modelo na estação secundária j .

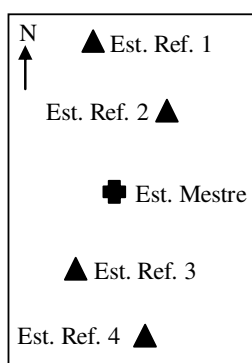


Figura 03 – Rede dominante na direção Norte/Sul
Fonte: Adaptado de Varner (2000).

No caso onde as estações têm uma grande variação em altitude, os parâmetros para o eixo vertical (z) também devem ser incluídos.

É necessário ressaltar que em todos os modelos de PDA assume-se que as ambigüidades das DDs são resolvidas corretamente para as estações da rede. Além disso, apesar do PDA possuir uma reduzida carga de transmissão, enviando apenas os coeficientes do PDA, algo que deve ser considerado é o fato de que cada conjunto de coeficientes é calculado para um par de satélites. Isto significa que a estação principal e a estação do usuário devem utilizar o mesmo satélite base (FOTOPOULOS, 2000a).

2.1.2. Algoritmos de Interpolação

Muitos autores utilizam apenas algoritmos de interpolação para gerar os parâmetros de correção da rede. Muitos deles se concentram apenas na interpolação do efeito ionosférico, visto que se trata de uma das maiores fontes de erro no posicionamento realizado com o GPS. Os principais métodos de interpolação são descritos a seguir. Em Alves, Monico e Fortes (2005b) a modelagem matemática desses métodos é apresentada.

Um algoritmo de interpolação linear para modelagem do efeito ionosférico na estação do usuário, baseado em uma rede de estações de referência, é proposta por Gao, Li e McLellan (1997), e uma versão modificada é apresentada em Gao e Li (1998). Como no PDA, nesse método os dados são coletados em todas as estações de referência da rede e transmitidos para a estação mestre, onde os parâmetros do atraso ionosférico são calculados e transmitidos para a estação do usuário (localizado na área de cobertura da rede) para interpolação.

Esse método deve ser implementado pelo usuário, baseado nos parâmetros do atraso ionosférico calculados pela estação mestre, o qual requer conhecimento das coordenadas horizontais das estações de referência (consideradas conhecidas) e coordenadas estimadas (aproximadas) da estação do usuário. A vantagem deste método para o uso em tempo real em relação ao PDA é que a estação do usuário não precisa utilizar o mesmo satélite base que a estação mestre (FOTOPOULOS, 2000a).

Outro método de interpolação linear para erros ionosféricos, baseado na escolha apropriada da função de covariância, foi proposto por Odijk, Marel e Song (2000). Esse método é linearmente dependente da distância entre as estações. Além disso, o algoritmo de interpolação depende da escolha da estação e do satélite de referência. Outras escolhas fornecerão resultados de interpolação um pouco diferentes. De acordo com os autores esse ainda é um dos problemas que se deve resolver.

Em Wanninger (1995, 1997, 1999) um algoritmo de interpolação linear foi apresentado para descrever os efeitos diferenciais de erros dependentes da distância (predominantemente erros ionosféricos residuais). Mais especificamente, o processo gera uma superfície bi-linear (ou plano) definido por dois parâmetros; um para a inclinação do plano na direção norte-sul e outro na leste-oeste. Nesse método, a interpolação utiliza as coordenadas conhecidas (latitude e longitude) das estações de referência e as coordenadas aproximadas das estações que serão determinadas. Os valores de correção são interpolados para cada satélite

em cada época, isto é, em toda época de observação um conjunto independente de correções é produzido.

Além disso, nesse processo, três estações de referência são requeridas. Nos casos onde mais estações de referência estão disponíveis, existem algumas possibilidades de solução: selecionar o melhor grupo de três estações (por exemplo, as três estações mais próximas ao usuário); calcular valores de correções de diversos conjuntos de três estações e fazer a média; utilizar algoritmos de interpolação mais sofisticados (WANNINGER, 1995). De acordo com Wanninger (1999), no caso onde mais de três estações estão disponíveis, os parâmetros do modelo podem ser calculados via um algoritmo simples de Mínimos Quadrados (MMQ). A principal vantagem desse método de interpolação é o fato de que o usuário não precisa utilizar o mesmo satélite base que a estação mestre. Han e Rizos (1996) propõem um método de interpolação similar para modelar os erros correlacionados espacialmente. Em se tratando da escolha do melhor grupo de três estações de referência também existe a possibilidade de se utilizar triangulação de Delaunay (EL-SHEIMY, 1999).

2.1.3. Algoritmo Envolvendo Ajustamento Condicional

A metodologia de ajustamento condicional, desenvolvido por Raquet (1998a), é outro método utilizado para o cálculo de correções de medidas da fase de batimento da onda portadora baseado no comportamento estimado dos erros dependentes da distância.

Essencialmente, as correções geradas são aplicadas para as medidas originais dos receptores das estações de referência e do usuário e então as medidas de DD são calculadas (FOTOPOULOS, 2000a; RAQUET, 1997). Portanto, o usuário tem que combinar as medidas corrigidas do receptor móvel com as medidas corrigidas de apenas um receptor de referência para formar as DDs e resolver os componentes para a linha de base correspondente. Nessa solução, como o usuário está utilizando observações corrigidas das fontes de erros GPS, é esperado que as ambigüidades possam ser resolvidas para distâncias maiores com relação às estações de referência, se comparado com o posicionamento relativo padrão utilizando a fase da onda portadora (FORTES, 2002).

Esse método pode ser sumarizado por duas equações usadas para gerar as correções, que são aplicadas para a fase da onda portadora (e para a pseudodistância com

algumas pequenas modificações), como segue (RAQUET, 1997, 1998, 1998a; FOTOPOULOS, 2000a, 2000b; FOTOPOULOS e CANNON, 2000; FORTES, 2002):

$$\begin{aligned}\hat{\delta}_{l_n} &= C_{\delta l_n} B_n^T (B_n C_{\delta l_n} B_n^T)^{-1} (B_n l_n - \lambda \Delta \nabla N_n) \\ \hat{\delta}_{l_u} &= C_{\delta l_u, \delta l_n} B_n^T (B_n C_{\delta l_n} B_n^T)^{-1} (B_n l_n - \lambda \Delta \nabla N_n)\end{aligned}\quad (2.5)$$

onde:

- $\hat{\delta}_{l_n}$ são as correções geradas para as observações de fase da onda portadora das estações de referência da rede (m);
- $\hat{\delta}_{l_u}$ são as correções geradas para as observações de fase da onda portadora do receptor do usuário (m);
- l_n são as diferenças entre as observações de fase da onda portadora medidas e a distância geométrica entre o receptor de referência e o satélite ($\Phi - \rho$) (m);
- B_n é a matriz de DDs da rede, $B_n = \partial \Delta \nabla l_n / \partial l_n$;
- $C_{\delta l_n}$ é a matriz de covariância das estações de referência da rede para observações da fase da onda portadora (m^2);
- $C_{\delta l_u, \delta l_n}$ é a matriz de covariância cruzada do receptor do usuário para observações de fase da onda portadora (m^2);
- λ é o comprimento de onda da fase da onda portadora (m);
- $\Delta \nabla N_n$ são as ambigüidades inteiras das DDs das estações de referência da rede (ciclos).

O vetor l_n é calculado diretamente das medidas GPS das estações de referência da rede (e posições das estações da rede). A matriz de DDs B_n é composta de todas as possíveis combinações de DDs linearmente independentes de l_n . Assume-se que as ambigüidades inteiras entre as estações de referência da rede N_n são conhecidas (RAQUET, 1998, 1998a). Mais detalhes do modelo podem ser encontrados em Raquet (1998a).

Um pré-requisito para implementar esse método, como nos outros dois citados anteriormente, é o conhecimento acurado das coordenadas das estações de referência. O responsável deve fornecê-las, ou serem obtidas através de um posicionamento relativo estático, ocupando cada estação por um período de tempo compatível com as linhas de base formadas (FOTOPOULOS, 2000a).

Esse método, embora projetado para aplicações em tempo real, não provê um esquema de parametrização prático para modelar as correções para os diversos usuários dentro da área de cobertura da rede, visto que as correções são calculadas diretamente para a localização de um usuário específico. Para superar essa limitação, alguns trabalhos propõem o uso de uma grade ou de modelos baseados em funções. Essas opções são utilizadas em Fotopoulos (2000b) e Fotopoulos e Cannon (2000).

Quando se utiliza grades são obtidos bons resultados, especialmente com as de alta resolução ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$). No entanto, muitos valores devem ser transmitidos aos usuários. Para utilizar a grade, vários modelos de interpolação podem ser empregados, como, por exemplo, a interpolação para o “vizinho mais próximo”, a interpolação bi-linear ou a cúbica. No modelo baseado em funções, podem ser utilizadas funções polinomiais de duas variáveis. A vantagem desse modelo é que uma menor quantidade de valores deve ser transmitida ao usuário. Mas não é possível modelar erros espacialmente irregulares. Cabe ressaltar que ambos os modelos são capazes de produzir resultados melhores do que aqueles advindos da solução em uma única linha de base (FOTOPOULOS, 2000b; FOTOPOULOS e CANNON, 2000).

Com o algoritmo de ajustamento condicional não existe a necessidade de se utilizar um satélite base específico para calcular as DDs. Além disso, os receptores do usuário e das estações de referência não precisam ter exatamente o mesmo conjunto de satélites disponíveis, desde que existam satélites suficientes para o cálculo da posição. Do ponto de vista da implementação, esse método também é vantajoso, pois as correções são aplicadas aos dados originais das estações de referência e do usuário e então as DDs são calculadas.

2.1.4. Estação de Referência Virtual

Nos três métodos citados anteriormente são geradas correções para serem utilizadas pelo usuário na região de abrangência da rede. No entanto, uma outra possibilidade é gerar, a partir dos modelos, ao invés de correções, dados GPS numa estação próxima ao usuário, denominada VRS (*Virtual Reference Station*) (Figura 04) (LACHAPELLE e ALVES, 2002).

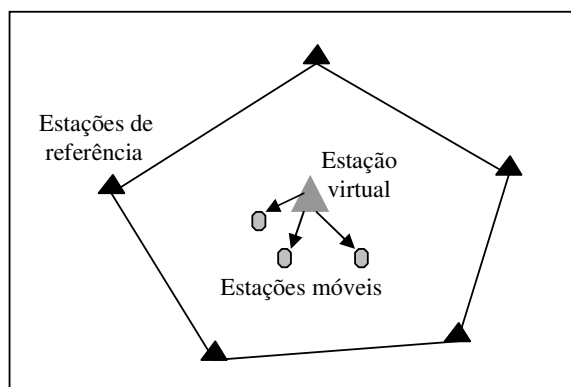


Figura 04 – Conceito de estação de referência virtual
Fonte: Adaptado de Wanninger (1999).

Para utilizar o conceito de VRS, os dados das estações de referência são enviados para um computador de controle central via uma rede de comunicação. Esse computador central, juntamente com *softwares* apropriados, utiliza os dados das estações de referência para modelar os erros sistemáticos (que limitam a acurácia do posicionamento GPS) e gerar correções apropriadas para serem utilizadas na área de abrangência da rede (ZHANG e ROBERTS, 2003).

Quando se deseja gerar uma VRS para um determinado usuário, a localização aproximada deste deve ser transmitida para o computador de controle central. Dessa forma, um link de comunicação bi-direcional entre o usuário e o controle central deve ser estabelecido. Essa comunicação pode ser realizada, por exemplo, via internet através de telefones celulares. O computador central gera as observações dessa estação virtual e as envia para o usuário, que pode realizar o posicionamento relativo utilizando a VRS como se fosse uma estação de referência nas suas proximidades (Figura 05). Dessa forma, a idéia básica do conceito de VRS é gerar uma estação que não existe fisicamente, mas que simule uma estação base próxima ao usuário (ZHANG e ROBERTS, 2003; SEJAS et al., 2003; RETSCHER, 2002; HIGGINS, 2001). Assim, o usuário utiliza os dados dessa VRS como se ela fosse uma estação de referência real (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002).

É claro que também existe a possibilidade de utilizar o conceito de VRS no modo pós-processado. Nesse caso os dados da VRS podem ser gerados diretamente no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX). Além disso, existe um vasto número de aplicações que se beneficiariam com essa metodologia, dentre elas o georreferenciamento de imóveis rurais.

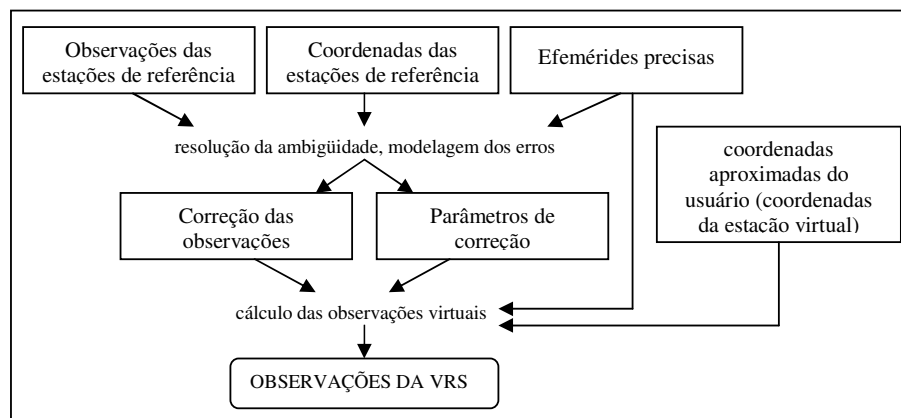


Figura 05 – Cálculo das observações para a estação de referência virtual
Fonte: Adaptado de Wanninger (1999).

Com o conceito de VRS, o receptor do usuário pode ser de simples frequência quando este está dentro da área de abrangência da rede (ZHANG e ROBERTS, 2003; MAREL, 1998). Deste modo, o usuário se beneficia com a confiabilidade, disponibilidade e acurácia da rede de estações permanentes sem ter que investir em um novo *software* de processamento (WANNINGER, 1997). Mas, é necessário gerar diferentes dados de VRS para usuários que se localizem em posições distintas, ou até mesmo que estejam se movimentando rapidamente.

Dessa forma, os dados de estações virtuais não são obtidos de um receptor real, embora sejam calculados de observações GPS de estações de redes ativas. Assim, a idéia básica é que os dados da VRS se assemelhem tanto quanto possível com aqueles de um receptor real colocado no mesmo local. Isso implica que os erros atmosféricos (ionosfera e troposfera) devem ser introduzidos nas observações da VRS (MAREL, 1998). Utilizando esse conceito, posicionamento ao nível centimétrico pode ser obtido com estações de referência distando de 30 a 100 km, ou até mais (WANNINGER, 2002,1999).

2.1.4.1. Geração dos Dados da VRS

Uma forma prática para gerar os dados da VRS é selecionar a estação de referência da rede mais próxima ao usuário como estação base. A partir das observações de fase e pseudodistância da estação base e da magnitude dos erros atmosféricos modelados pelos dados das estações de referência são geradas as observações da estação virtual.

Assim, sendo,

$$\rho_b^s(t) = \|X^s - X_b\|, \quad (2.6)$$

$$\rho_v^s(t) = \|X^s - X_v\|, \quad (2.7)$$

onde:

- $\rho_b^s(t)$ e $\rho_v^s(t)$ são a distância geométrica entre o satélite e a estação de referência base e a VRS, respectivamente (m);
- t é a época em questão (s);
- X^s é a posição do satélite (m);
- X_b e X_v são a posição da estação de referência base e VRS, respectivamente (m).

O deslocamento geométrico (DG) (re-localização),

$$\Delta\rho = \rho_v^s(t) - \rho_b^s(t), \quad (2.8)$$

deve ser aplicado à todas as observações da estação base para deslocar as observações de fase e pseudodistância da estação base para a posição da VRS (HU et al., 2003). A Figura 06 ilustra os elementos envolvidos no cálculo do DG para 1 satélite.

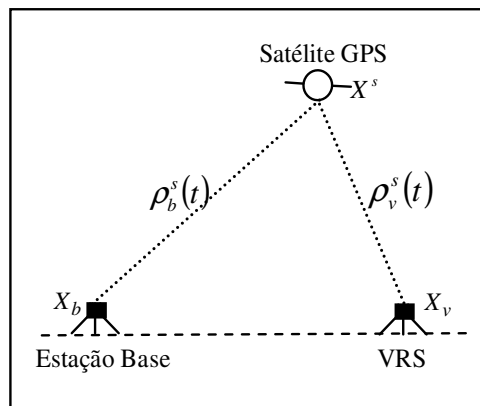


Figura 06 – Elementos envolvidos no cálculo do DG

Depois que as correções geométricas (deslocamento geométrico) são aplicadas aos dados originais da estação base, as correções atmosféricas (efeitos ionosféricos e troposféricos) geradas pelas estações da rede e os respectivos erros residuais devem ser acrescentados aos dados da VRS. Além disso, também pode ser utilizada uma correção para o centro de fase da antena e variações do mesmo, em função do ângulo de elevação e do azimute de cada satélite (MAREL, 1998).

O erro do relógio do receptor e as ambigüidades que serão introduzidos aos dados da VRS podem ser escolhidos livremente. Pode-se escolher o relógio de um receptor ou

a média de todos os receptores (MAREL, 1998). Já a correção do efeito ionosférico e atraso troposférico podem ser obtidos a partir de diferentes modelos. O capítulo 3 traz algumas possibilidades.

Os erros orbitais são reduzidos automaticamente nos dados da VRS, não apenas devido ao uso das efemérides precisas, mas também porque esses erros são absorvidos nos resíduos do ajustamento. Entretanto, os erros provenientes do multicaminho não são modelados. Mas se em cada estação envolvida no ajustamento da rede forem utilizadas técnicas para minimizar o efeito do multicaminho, como por exemplo, antenas especiais, o erro no final do ajustamento será menos significativo (MAREL, 1998).

Os dados da estação virtual podem ser distribuídos em formato RINEX via internet para que o usuário realize posicionamento no modo pós-processado. Outra possibilidade é transmitir os dados da estação virtual em tempo real usando o formato *Radio Technical Commission for Maritime Services* (RTCM) para aplicações RTK (RTCM, 2001, 2004, 2006). Embora tecnicamente possível, essa opção, além de requerer o processamento dos dados de todas as estações de referência em tempo real, necessita de uma boa infraestrutura de comunicação.

2.1.4.2. Células de Referência Virtual

Uma outra possibilidade para se trabalhar com uma rede de estações de referência é utilizar o conceito de VRC (*Virtual Reference Cell*). Nesse caso, os dados da VRS não são gerados para um usuário específico, como no conceito de VRS, mas é gerada uma grade de estações virtuais na área de abrangência da rede. O receptor do usuário é associado a uma célula e não existe necessidade da estação virtual seguir o movimento do usuário. Quando o usuário se distancia de uma determinada célula, ele é associado a uma nova célula (RETSCHER, 2002; ZHANG e ROBERTS, 2003).

A principal vantagem nesse conceito é que não existe limitação em relação ao número de usuários e não é necessário utilizar um *link* bi-direcional entre o usuário e o centro de controle (RETSCHER, 2002; ZHANG e ROBERTS, 2003).

3. MODELAGEM DA ATMOSFERA NO POSICIONAMENTO GPS BASEADO EM REDES

A modelagem da atmosfera é um dos principais temas discutidos quando o posicionamento GPS baseado em redes é realizado. Portanto, nesse capítulo são elencados os principais modelos utilizados para atenuar os efeitos da ionosfera e da refração troposférica no posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência. Também são descritos os modelos que serão utilizados nessa pesquisa.

3.1. Modelagem da Ionosfera

A radiação solar causa a fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões parcialmente ionizadas, conhecidas como ionosfera, que estão compreendidas, aproximadamente, entre 50 a 1000 km de altura (CAMARGO, 1999).

Os efeitos dos erros ionosféricos são muito significativos (em geral de 1-2 ppm ou mais) até mesmo sob condições ionosféricas moderadas em latitudes médias, com mínima presença de manchas solares. Erros maiores ocorrem na presença de distúrbios ionosféricos na região equatorial, nas zonas de anomalia magnética nos pólos e durante o período de máxima atividade solar (WANNINGER, 1995). Nesse sentido, já foram encontrados valores acima de 15 ppm na região auroral e acima de 40 ppm na região equatorial (FORTES, 2002).

Devido ao aumento dos erros residuais ionosféricos em linhas de base longas, a ionosfera tem sido um dos maiores obstáculos quando se deseja prover um posicionamento com acurácia centimétrica, ou mesmo decimétrica. Os erros residuais ionosféricos afetam tanto a taxa de sucesso da solução das ambigüidades da fase da onda portadora como a acurácia do posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência (GAO e LI, 1998). Assim, diversos modelos têm sido desenvolvidos com o objetivo de atenuar os efeitos da ionosfera para uma rede de estações de referência.

Dentre os modelos mais empregados, grande parte utiliza o conceito de pontos ionosféricos (*Ionospheric Pierce Point* - IPP), pontos esses formados pela intersecção do vetor receptor-satélite com uma camada infinitesimal da ionosfera que se localiza, em

geral, entre 350 e 450 km acima da superfície terrestre (assume-se que os elétrons livres na ionosfera estão localizados nesta camada infinitesimal) (Figura 07). Pode-se citar os trabalhos descritos em Gao, Li e McLellan(1997), Gao e Li (1998), Wanninger (1995, 1997, 1999), Han e Rizos (1996), Marel (1998), Odjk (2000a) e Odjk, Marel e Song (2000).

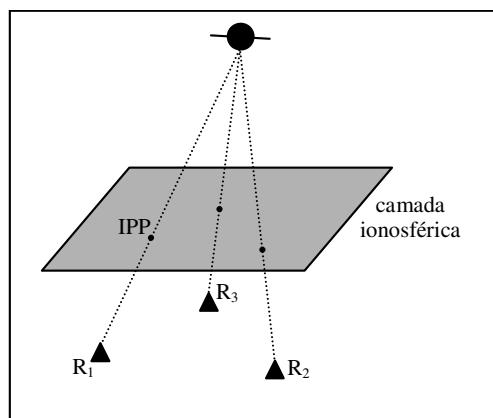


Figura 07 – Representação da modelagem da ionosfera considerada em uma camada infinitesimal

Alguns autores trabalham com a modelagem tomográfica da ionosfera. Esse tipo de modelagem, em geral, se divide em dois grupos: modelo baseado em funções, como descrito em Gao e Liu (2002), Liu e Gao (2001, 2004) e modelos baseados em células 3D, como utilizado por Colombo et al. (1999, 2000, 2002) e Pajares et al. (1999, 2000a, 2000b, 2001).

O modelo tomográfico baseado em funções é construído com um conjunto de funções de harmônicos esféricos e funções ortogonais empíricas (*Empirical Orthogonal Functions* - EOFs). As funções de harmônicos esféricos são usadas para descrever as características ionosféricas horizontais, enquanto as EOFs são utilizadas para caracterizar as propriedades verticais da ionosfera. Mais detalhes desse modelo são apresentados em Gao e Liu (2002).

No que concerne ao modelo tomográfico baseado em células 3D, como ilustrado na Figura 08, a ionosfera é dividida em células 3D cujo tamanho é $5^{\circ} \times 2^{\circ}$ e os limites das alturas são de 60-740-1420 km. Em cada uma dessas células assume-se que a densidade de elétrons é constante. Colombo et al. (1999) descreve tal modelo.

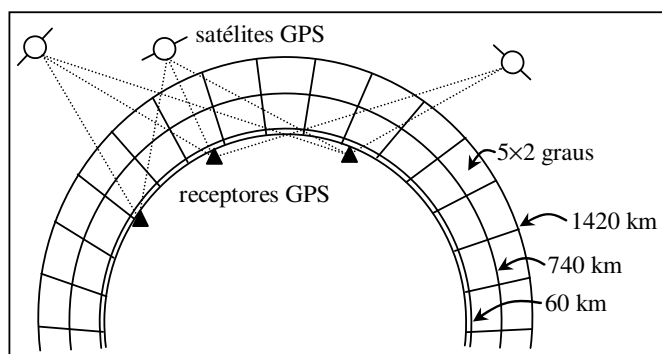


Figura 08 – Modelo tomográfico de 2 camadas
Adaptado de Colombo et al. (1999).

Existem também modelos que empregam a série de Taylor, como o descrito em Chen et. al (2004), ou até mesmo uma modelagem ponderada da ionosfera, como o proposto em Odjk (2000b). Uma descrição dos modelos citados é realizada em Alves, Monico e Fortes (2005b), inclusive com suas respectivas formulações matemáticas.

Além dos modelos mencionados que têm sido utilizado por diversos autores, encontra-se em desenvolvimento no Departamento de Cartografia da FCT/UNESP o modelo denominado Mod_Ion (Mod_Ion_FK para tempo real) (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003; AGUIAR, 2005). Como esse modelo apresentou resultados satisfatórios no posicionamento por ponto, sua aplicação no contexto de redes é investigada nessa pesquisa. A descrição desse modelo é apresentada na seção 3.1.1.

Pode-se citar também os mapas globais da ionosfera disponíveis na internet que trazem os valores do *Total Electron Content* (TEC) numa escala global (seção 3.1.2). A eficácia desses mapas no posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência também é investigada nessa pesquisa.

3.1.1. Mod_Ion e Mod_Ion_FK

O modelo regional da ionosfera denominado Mod_Ion foi desenvolvido por Camargo (1999). Matsuoka (2003) realizou algumas alterações referentes às funções de mapeamento e modelagem. Em se tratando das funções de mapeamento, somente a função geométrica padrão (seção 3.1.3.1) estava implementada. Outras duas funções de mapeamento foram implementadas por Matsuoka (2003): uma apresentada por Sardón et al. (1994 apud MATSUOKA, 2003) e outra por Komjathy (1997). No que se refere à função de modelagem do atraso ionosférico vertical, estava implementada a série de Fourier. Matsuoka (2003)

implementou: harmônico esférico; série de Taylor; e polinômio de quarta ordem. Além disso, Aguiar (2005) introduziu duas melhorias: alterou a função de modelagem da ionosfera (série de Fourier) e implementou o filtro de Kalman. No que concerne a função de modelagem, as alterações foram realizadas com o intuito de modelar a anomalia equatorial e melhorar a estimação do efeito ionosférico. Já no que diz respeito a implementação do filtro de Kalman, esta foi realizada com o objetivo de fornecer parâmetros de correção dos efeitos ionosféricos em tempo real, já que o Mod_Ion, até aquele momento, só poderia ser utilizado no modo pós-processado. Para a versão em tempo real o modelo denomina-se Mod_Ion_FK.

Cabe acrescentar que o processamento no Mod_Ion pode ser realizado com a pseudodistância, pseudodistância suavizada pela fase ou fase da onda portadora. Já para o Mod_Ion_FK o processamento apenas pode ser realizado utilizando a pseudodistância ou a pseudodistância suavizada.

O modelo utilizado tanto no Mod_Ion como no Mod_Ion_FK é baseado na diferença entre as observáveis GPS. Na derivação do modelo, os erros devido ao não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, o erro das efemérides e da refração da troposfera não são considerados. Como haverá diferenciação entre as medidas, os mesmos serão cancelados, não comprometendo o resultado do método. Deste modo, as equações para a pseudodistância (P_r^s) das duas portadoras, originais ou filtradas pela fase da portadora, são dadas por (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003; AGUIAR, 2005):

$$P_{1r}^s = \rho_r^s + I_{1r}^s + S_{p1}^s + R_{p1} + \varepsilon_{p1}, \quad (3.1)$$

$$P_{2r}^s = \rho_r^s + I_{2r}^s + S_{p2}^s + R_{p2} + \varepsilon_{p2}, \quad (3.2)$$

sendo:

- ρ_r^s é a distância geométrica entre o receptor (r) e o satélite (s) no instante de transmissão do satélite e recepção do receptor;
- I_{1r}^s e I_{2r}^s são o atraso ionosférico nas portadoras L1 e L2, respectivamente;
- S_{p1}^s e S_{p2}^s representam o erro sistemático do hardware do satélite (s) nas portadoras L1 e L2, respectivamente;
- R_{p1} e R_{p2} representam o erro sistemático do hardware do receptor (r) nas portadoras L1 e L2, respectivamente;
- ε_{p1} e ε_{p2} representam os demais erros remanescentes nas portadoras L1 e L2, respectivamente.

De acordo com Camargo (1999) e Matsuoka (2003), o atraso ionosférico I_{ir}^s ($i = 1, 2$) é proporcional, numa primeira aproximação, ao TEC, ao longo do caminho do sinal e inversamente proporcional ao quadrado da frequência f_i ,

$$I_{ir}^s = \frac{40,3TEC^s}{f_i^2}. \quad (3.3)$$

Fazendo a diferença entre as equações (3.1) e (3.2), tem-se

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{2r}^s - I_{1r}^s + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \epsilon_{p21}. \quad (3.4)$$

Utilizando a equação (3.3),

$$I_{2r}^s - I_{1r}^s = 40,3TEC^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = I_{1r}^s \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}. \quad (3.5)$$

Assim,

$$P_{2r}^s - P_{1r}^s = I_{1r}^s \frac{1}{F} + (S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1}) + \epsilon_{p21}, \quad (3.6)$$

com,

$$F = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (3.7)$$

ou pode-se escrever

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = I_{1r}^s + F((S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})) + F\epsilon_{p21}. \quad (3.8)$$

A equação (3.8) é a equação de observação do Mod_Ion e Mod_Ion_FK, utilizada para calcular a correção ionosférica (I_{1r}^s) na portadora L1 e na direção satélite/receptor. Este modelo também possui como incógnitas as diferenças ($S_{p2}^s - S_{p1}^s$) e ($R_{p2} - R_{p1}$) que representam, respectivamente, o erro sistemático interfrequência dos satélites e dos receptores na portadora L1 (MATSUOKA, 2003; AGUIAR, 2005).

A equação (3.8) também pode ser escrita para a fase da onda portadora. Porém, é acrescentada uma incógnita referente às ambigüidades.

Considerando $I_{1r}^s = mI_1^v$, a equação de observação do Mod_Ion e Mod_Ion_FK pode ser reescrita como

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = mI_1^v + F((S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})) + F\epsilon_{p21}, \quad (3.9)$$

sendo que m é a função de mapeamento que relaciona o atraso ionosférico na direção receptor/satélite com o mesmo na direção vertical.

Como o Mod_Ion possui implementadas 3 funções de mapeamento e 4 funções de modelagem, o usuário tem 12 opções de processamento. No que concerne as

funções de modelagem do atraso ionosférico vertical (I_1^v) elas apresentam os seguintes parâmetros: série de Fourier (ordem = 6; número de coeficientes = 15); harmônico esférico (ordem = 3; número de coeficientes = 16); série de Taylor (ordem = 3; número de coeficientes = 16) e um polinômio de quarta ordem (ordem = 4; número de coeficientes = 15) (MATSUOKA, 2003). Já em relação ao Mod_Ion_FK existem 9 opções de processamento. Isso ocorre pois o modelo pode ser utilizado com 3 funções de modelagem: série de Fourier (a mesma do Mod_Ion) e outras duas versões da série de Fourier implementadas pelo autor (ordem = 4; número de coeficientes = 20 e ordem = 4; número de coeficientes = 19) e 3 processos aleatórios de predição utilizados para predição no filtro de Kalman: *Gauss-Markov*; *Random Walk* e *Random Constant*. Em relação à função de mapeamento, apenas a geométrica padrão é disponibilizada (AGUIAR, 2005).

Com a descrição acima, pode-se perceber que o número total de parâmetros do Mod_Ion e Mod_Ion_FK, que devem ser determinados no processo de ajustamento, é dado de uma forma genérica por $Coef + r + s$ (MATSUOKA, 2003), onde:

- *Coef* representa o número de coeficientes (parâmetros) da função de modelagem escolhida;
- *r* corresponde aos erros sistemáticos devido a interferência dos receptores, num total igual ao número de receptores utilizados na rede;
- *s* corresponde a interferência dos satélites, num total igual ao número de satélites rastreados para determinar os parâmetros do modelo.

No Mod_Ion os parâmetros são estimados através do ajustamento pelo MMQ, utilizando o método das equações de observação (método paramétrico) com injunção. O controle de qualidade baseado no teste estatístico Qui-quadrado (χ^2) para a análise da qualidade do ajustamento, bem como o teste de significância dos parâmetros do modelo, foram implementados por Camargo (1999). Já no Mod_Ion_FK os parâmetros são estimados através do filtro de Kalman em tempo real. O controle de qualidade também é baseado na estatística Qui-quadrado.

Em relação aos resultados obtidos pelo Mod_Ion, Matsuoka (2003) concluiu que a função de mapeamento geométrica padrão e a de Sardón et al. (1994 apud MATSUOKA, 2003) apresentam os mesmos valores. Já a função de mapeamento de Komjathy (1997) apresentou resultados diferentes, porém, com pouca variação. Em relação a modelagem, a série de Fourier, a série de Taylor e o polinômio apresentaram os melhores resultados, praticamente iguais entre si, e melhores que os advindos da estratégia que utiliza

os harmônicos esféricos. Em se tratando do Mod_Ion_FK, Aguiar (2005) verificou que os melhores resultados foram obtidos utilizando a série de Fourier com 19 coeficientes e o processo aleatório de predição *Gauss-Markov*.

3.1.2. Mapas Globais da Ionosfera

Os mapas globais da ionosfera (MGI) (*Global Ionospheric Maps - GIM*) podem ser utilizados para calcular o efeito ionosférico nas observáveis GPS. Esses mapas são disponibilizados em formato IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*) e podem ser obtidos no IGS via ftp no endereço <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono/>.

O grupo de trabalho da ionosfera do IGS tem a participação de 4 centros de análise associados: CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*), ESOC (*European Space Operations Centre*), JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e UPC (*Polytechnical University of Catalonia*) (IGS, 2006b).

Para produzir os MGI são utilizados dados de estações de referência contínuas dispostas por todo o mundo (<http://iono.jpl.nasa.gov/gim.html>) (Figura 09). Os mapas do TEC são disponibilizados diariamente com uma latência menor que 24 horas, resolução temporal de 2h e resolução espacial de $5^\circ \times 2^\circ$ em longitude e latitude, respectivamente (IGS, 2006a). Através deles, é possível obter o valor do TEC para diferentes latitudes e longitudes em todo o globo terrestre.

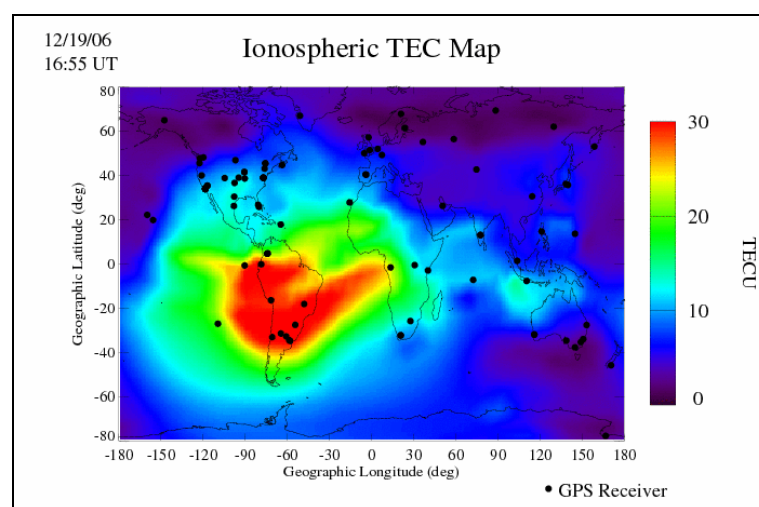


Figura 09 – Exemplo de MGI gerado pelo JPL e as respectivas estações utilizadas
Disponível em: http://iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html.

3.1.3. Função de Mapeamento

A função de mapeamento é utilizada para projetar o efeito ionosférico zenital na direção receptor-satélite. Existem várias funções de mapeamento citadas na literatura. No entanto, a mais utilizada é a geométrica padrão.

Matsuoka (2003) fez uma comparação entre três funções de mapeamento: a geométrica padrão, a de Sardón et al. (1994 apud MATSUOKA, 2003) e de Komjathy (1997); os resultados foram similares. Nessa pesquisa optou-se por utilizar a função geométrica padrão, a qual é descrita na seção 3.1.3.1.

3.1.3.1. Função de Mapeamento Geométrica Padrão

A função de mapeamento geométrica padrão é dada por (LIU, 2001):

$$m(z) = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(z')}} \quad (3.10)$$

com

$$\sin(z') = \frac{R}{R + H} \sin(z),$$

sendo:

- R o raio médio da Terra, $R \cong 6371$ km;
- H a altura da camada ionosférica;
- z o ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ$ - elevação).

3.2. Modelagem da Troposfera

Na Geodésia, a troposfera é considerada a camada mais superficial da atmosfera, na qual a espessura média é considerada aproximadamente de 50 km. Para a frequência dos sinais GPS, o atraso troposférico não depende da frequência, ou seja, a troposfera é um meio não dispersivo (SEEBER, 2003).

Usualmente, as componentes úmida e hidrostática (seca) expressam a influência da troposfera nas medidas GPS (SAPUCCI, 2001). A componente úmida depende da quantidade de vapor d'água na atmosfera e é difícil de ser modelada. Mas essa componente

é responsável por apenas 10% da refração troposférica total. Já a componente seca é precisamente descrita (com acurácia de $\pm 1\%$) por modelos. Os atrasos causados pelas componentes úmida e seca no zênite podem alcançar 0,80 m e 2,3 m, respectivamente (SPILKER Jr., 1996), aumentando aproximadamente 10 vezes próximo ao horizonte (10° de elevação) (SEEBER, 2003).

Diversos modelos têm sido utilizados com o objetivo de atenuar a refração troposférica no RTK em rede. Marel (1998) utiliza um modelo de interpolação. Mendes (1998), Fotopoulos (2000b) e Hu et al. (2002) utilizam o modelo de Saastamoinen. Han e Rizos (1996) e Raquet e Lachapelle (1997) fazem uso do modelo de Hopfield. Já Vollath et al. (2002, 2004), Landau, Vollath e Chen (2003) e Wielgosz, Brzezinska e Kashani (2004) utilizam o modelo de Hopfield modificado.

Os modelos de Saastamoinen (SHRESTHA, 2003; MENDES, 1998), Hopfield (SEEBER, 2003) e Hopfield modificado (SHRESTHA, 2003) são muito utilizados pela comunidade científica. No entanto, tais modelos foram desenvolvidos a partir de observações meteorológicas realizadas, em sua grande maioria, no hemisfério norte. Assim, cabe verificar se tais modelos são apropriados para a realidade brasileira. Dessa forma, nessa pesquisa, os resultados obtidos com o modelo de Hopfield são comparados com os resultados obtidos por modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT), denominados modelagem dinâmica (SAPUCCI et al., 2003). O modelo de Hopfield foi escolhido por ser muito utilizado pela comunidade científica.

A modelagem dinâmica pode proporcionar previsões do atraso zenital troposférico (ZTD), com algumas horas de antecedência, em qualquer local da América do Sul, o que é de grande importância para diversas aplicações, incluindo as realizadas em tempo real. Portanto, nessa seção serão descritos o modelo de PNT (seção 3.2.2) e o modelo de Hopfield (seção 3.2.1).

3.2.1. Modelo de Hopfield

De acordo com Seeber (2003) o modelo de Hopfield é dado por:

$$D_{zh} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{P_s}{T_s} H_h, \quad (3.11)$$

$$D_{zw} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{4810e_s}{T_s^2} H_w, \quad (3.12)$$

onde:

$$H_h = 40136 + 148,72(T_s - 273,16), \quad (3.13)$$

$$H_w = 11000m. \quad (3.14)$$

No entanto, de acordo com Sapucci (2001), o valor dado pela equação (3.14) se refere a locais próximos ao Equador, sendo que para locais próximos aos pólos esse valor pode ser 7000 m. Baseado nessa informação, pode-se fazer uma correção, considerando a taxa de variação de H_w constante em relação às variações de latitude do local. Assim, pode-se escrever,

$$H_w = 11000 - 44,44\varphi. \quad (3.15)$$

3.2.2. Previsão Numérica do Tempo

Devido ao crescente interesse nas previsões de fenômenos meteorológicos, a previsão do tempo por métodos numéricos teve grande desenvolvimento nos últimos anos, apesar de ainda ser um grande desafio científico. O seu princípio é bastante simples: conhecendo as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante t , se é conhecido o seu estado inicial no instante t_0 (SAPUCCI et al., 2003).

Para se obter sucesso na previsão, deve-se ser capaz de modelar com eficiência a atmosfera terrestre e descrever com precisão o estado inicial. Para isso, utilizam-se as leis fundamentais da mecânica e da termodinâmica para o ar e a água presentes na atmosfera. Mas também é necessário considerar as especificidades do sistema climático, a influência dos raios solares, o papel do relevo, dos oceanos e vegetação, dentre outros.

O modelo relaciona várias grandezas meteorológicas, como pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, em diversos níveis de altitude, as quais têm forte correlação entre si, além de dependerem de outras variáveis. As suas derivadas com relação ao tempo ou em relação às coordenadas compõem um sistema tão complexo que impossibilita a obtenção de uma solução exata. Assim, através de processos numéricos, é realizada a busca de uma boa aproximação dos valores da solução desse sistema. Isso permite que a solução possa ser obtida numericamente com o emprego dos supercomputadores (SAPUCCI et al., 2003).

De acordo com Sapucci et al. (2003), o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado

em Cachoeira Paulista-SP, possui o único modelo operacional na América Latina. Este modelo é derivado do modelo global do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) dos Estados Unidos da América. A modelagem dinâmica do ZTD é descrita a seguir.

A variação na refratividade atmosférica (N) causa mudanças na direção e diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas ao se propagarem na troposfera. Isso gera uma leve curvatura na trajetória dos sinais GNSS, se comparada à trajetória geométrica (SAPUCCI et al., 2003). A diferença entre o comprimento da trajetória efetivamente percorrida pelo sinal (S) e o comprimento da trajetória geométrica (S_g) é denominado atraso troposférico (D_{TROP}), que é dado por

$$D_{TROP} = S - S_g = 10^{-6} \int N ds. \quad (3.16)$$

Para facilitar a modelagem do atraso troposférico, são empregadas as funções de mapeamento (seção 3.2.3) (NIELL, 1996). Por intermédio delas, as variações da refratividade (e consequentemente do atraso troposférico) em qualquer direção podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical da atmosfera. Desta forma, a refratividade atmosférica pode ser considerada como uma função da temperatura (T), da densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h). Assim tem-se (SPILKER Jr., 1996):

$$ZTD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} K_1 R_h \rho dh + \int_{h_0}^{\infty} \left(K_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + K_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh, \quad (3.17)$$

onde:

- $R_h = 278,0538 Jkg^{-1}K^{-1}$ é a constante específica para os gases hidrostáticos;
- Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água;
- $K_1 = 77,60 KhPa^{-1}$, $K_2' = 22,10 KhPa^{-1}$ e $K_3 = 373900 K^2 hPa^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica cujos valores foram determinados experimentalmente (BEVIS et al., 1994).

Como citado na introdução do capítulo, o ZTD é dividido em duas componentes: úmida (D_{zw}), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (D_{zh}), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. A primeira parcela da equação (3.17) modela a componente hidrostática enquanto a componente úmida é modelada pela segunda parcela dessa equação. Nota-se que o D_{zh} é dado apenas em função da densidade do ar atmosférico. Por isso, o valor do atraso correspondente pode ser determinado a partir de

medidas de pressão à superfície (P_s), dada em hPa, da latitude local (φ) e da altitude (H_s) em km. A expressão para a determinação do D_{zh} é dada pela equação (DAVIS, 1985):

$$D_{zh} = (2,27683157 \times 10^{-3}) \frac{P_s}{1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028 H_s}. \quad (3.18)$$

Aplicando os valores preditos das variáveis prognósticas gerados pelo modelo de PNT na segunda parcela da equação (3.17) e realizando uma integração numérica, obtém-se o ZTD da componente úmida, no mesmo intervalo que o modelo numérico gera as predições. Do mesmo modo, aplicando os valores de pressão atmosférica a superfície, preditos pelo modelo, a equação (3.18) pode fornecer o ZTD da componente hidrostática.

Os dados meteorológicos, utilizados para descrição do estado inicial, assimilados ao modelo de PNT, são obtidos, por exemplo, com o lançamento de radiossondas munidas de dispositivos capazes de medir pressão, temperatura e umidade ao percorrer um perfil vertical da troposfera utilizando um balão inflado com hidrogênio ou hélio (SAPUCCI et al., 2003). Além das radiossondas, outros sistemas de observação também são utilizados no processo de assimilação. Detalhes podem ser encontrados em <<http://www6.cptec.inpe.br/assimila/notas.html>>.

Os dados fornecidos para previsões do ZTD obtidos pelo modelo de PNT estão disponíveis na página do CPTEC/INPE. Na versão inicial dessa modelagem estava disponível um mapa da América do Sul dividido em uma malha de 500 por 500 km (Figura 10), onde cada elemento da malha possuía um arquivo com dados do atraso de 100 em 100 km (Anexo A) e 66 horas de predição.

A página da internet ilustrada na Figura 10 disponibilizava o ZTD para todos os pontos da malha. Estes valores de atraso eram atualizados duas vezes ao dia. A primeira atualização era realizada entre 7:30 e 8:30 da manhã, a qual se referia às saídas do modelo das 00:00. A segunda atualização era feita entre 19:30 e 20:30 e essa se referia às saídas das 12:00 do modelo numérico do CPTEC (CPTEC, 2006). Para aplicar o atraso na direção receptor-satélite basta utilizar uma função de mapeamento (seção 3.2.3). Assim, para obter os valores do atraso troposférico em uma determinada posição, deve ser realizada uma interpolação bi-linear utilizando os valores da grade.

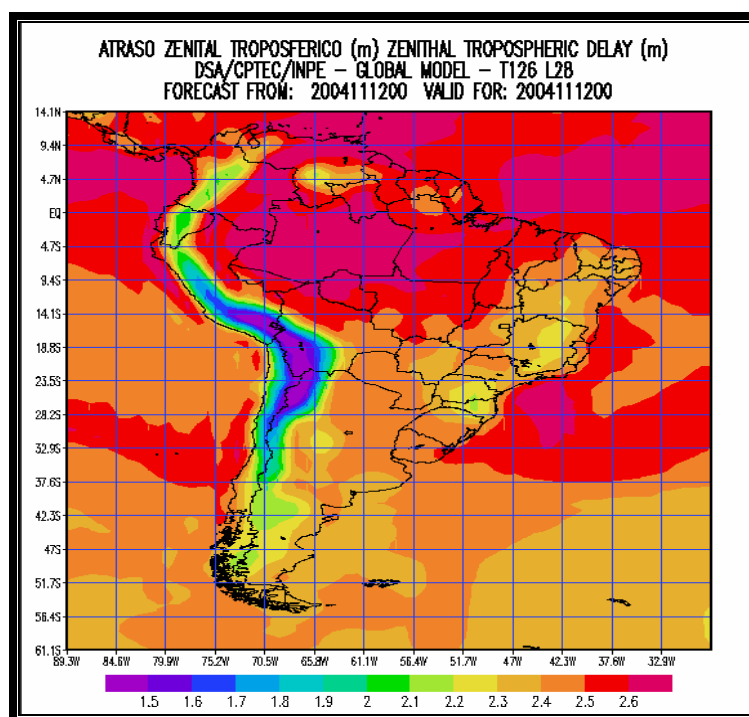


Figura 10 – Mapa do atraso Troposférico gerado pelo modelo de PNT

Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>.

Experimentos realizados com o modelo de PNT mostraram que os valores do ZTD obtidos são compatíveis com os determinados por soluções GPS. Para maiores detalhes sobre o modelo de PNT e a avaliação do mesmo consultar Sapucci et al. (2006), que apresenta os resultados de experimentos realizados.

As análises e experimentos realizados nessa Tese utilizaram o modelo de PNT descrito nos parágrafos anteriores, com resolução de 100 km na horizontal e 18 níveis na vertical. No entanto, atualmente já se encontra disponível uma nova versão do produto, cuja resolução horizontal é de 20 km com 19 níveis verticais. Para obter os dados basta entrar no site <<http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/>>.

3.2.3. Funções de Mapeamento

A função de mapeamento é utilizada para projetar o ZTD com o objetivo de estimar o atraso troposférico inclinado. Diversas funções de mapeamento têm sido desenvolvidas nos últimos 20 anos. A função de mapeamento mais simples é dada por $1/\sin(E)$, a cossecante do ângulo de elevação. No entanto, essa função é acurada apenas para

altos ângulos de elevação. Portanto, funções mais complexas têm sido desenvolvidas (SHRESTHA, 2003).

Dentre as diversas funções de mapeamento existentes pode-se citar a de Marini (MARINI, 1972 apud NIELL, 1996), Chao (CHAO, 1972 apud SHRESTHA, 2003), Davis (DAVIS et al., 1985 apud SHERSTA, 2003) e Herring (HERRING, 1992 apud MENDES, 1998). No entanto, tais funções têm sua acurácia limitada devido à dependência da temperatura da superfície terrestre. Para superar essa limitação foi utilizada nessa pesquisa a função de mapeamento de Niell (NIELL, 1996), descrita na seção 3.2.3.1. Cabe acrescentar que nos últimos anos novas funções de mapeamento foram desenvolvidas, como por exemplo, a Isobárica (NIELL e PETROV, 2003) e a Vienna (Boehm et al., 2006). Embora tais funções não tenham sido implementadas nessa Tese, é interessante utilizá-las em pesquisas futuras.

3.2.3.1. Niell

Niell (1996) propôs uma nova função de mapeamento baseada nas mudanças temporais e localização geográfica, diferentemente das outras funções de mapeamento que utilizam parâmetros meteorológicos. As funções de mapeamento previamente disponíveis tinham sua acurácia limitada devido à dependência da temperatura da superfície, que causa principalmente três problemas. Primeiramente, as mudanças diurnas na temperatura da superfície produzem variações menores do que aquelas calculadas pelas funções de mapeamento. Em segundo lugar, as mudanças sazonais na temperatura da superfície são maiores que as mudanças atmosféricas nas camadas superiores. Finalizando, as funções de mapeamento calculadas para os dias quentes de inverno podem não diferir significativamente dos dias frios de verão.

A função de Niell foi desenvolvida a partir da função de Marini (MARINI, 1972 apud NIELL, 1996) com três coeficientes. No caso da função de mapeamento da componente hidrostática, os coeficientes a , b e c são funções do dia do ano, latitude e altura da estação. Para a função de mapeamento da componente úmida, apenas a latitude da estação é utilizada como informação externa (NIELL, 1996; SHRESTHA, 2003).

A função de mapeamento de Niell é dada por:

$$m_h(E) = \frac{1 + \frac{a_h}{b_h}}{1 + \frac{a_h}{b_h} + \frac{c_h}{\sin(E)}} + \left(\frac{1}{\sin(E)} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{b_{ht}}}{1 + \frac{a_{ht}}{b_{ht}} + \frac{c_{ht}}{\sin(E)}} \right) H \times 10^{-3}, \quad (3.19)$$

$$m_w(E) = \frac{1 + \frac{a_w}{b_w}}{1 + \frac{a_w}{b_w} + \frac{c_w}{\sin(E)}}, \quad (3.20)$$

onde:

- $m_h(E)$ é a função de mapeamento para a componente hidrostática;
- $m_w(E)$ é a função de mapeamento para a componente úmida;
- E é o ângulo de elevação do satélite;
- H é a altura da estação acima do nível do mar;
- $a_{ht} = 2,53 \times 10^{-5}$, $b_{ht} = 5,49 \times 10^{-3}$ e $c_{ht} = 1,14 \times 10^{-3}$ foram determinados através de um ajuste das correções de altura de 9 satélites pelo MMQ;
- $a_h, b_h, c_h, a_w, b_w, c_w$ são calculados utilizando os coeficientes listados na Tabela 01. O procedimento será discutido a seguir.

Para determinar o valor do coeficiente a_h da função de mapeamento da componente hidrostática na latitude φ ($\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) em uma época d , dada em dias do ano, deve-se aplicar a equação dada por

$$a_h(\varphi, d) = a_M(\varphi) + a_A(\varphi) \cos \left[2\pi \frac{d - 28}{365,45} \right], \quad (3.21)$$

sendo que os valores denominados $a_M(\varphi)$ (média) e $a_A(\varphi)$ (amplitude) estão listados na Tabela 01. Os valores de $a_M(\varphi)$ e $a_A(\varphi)$ para as latitudes não tabuladas são obtidos por interpolação linear. Os coeficientes b_h e c_h são determinados de forma análoga (NIELL, 1996).

Para a função de mapeamento da componente úmida, os coeficientes são função apenas da latitude, portanto, a interpolação linear é utilizada para os valores que não estão listados na Tabela 01.

Tabela 01 – Coeficientes da função de mapeamento de Niell para as componentes hidrostática e úmida

Coeficientes	Latitude				
	15°	30°	45°	60°	75°
Componente Hidrostática - Média					
$a_M \times 10^{-3}$	1,2769934	1,2683230	1,2465397	1,2196049	1,2045996
$b_M \times 10^{-3}$	2,9153695	2,9152299	2,9288445	2,9022565	2,9024912
$c_M \times 10^{-3}$	62,610505	62,837393	63,721774	63,824265	64,258455
Componente Hidrostática - Amplitude					
$a_A \times 10^{-5}$	0,0	1,2709626	2,6523662	3,4000452	4,1202191
$b_A \times 10^{-5}$	0,0	2,1414979	3,0160779	7,2562722	11,723375
$c_A \times 10^{-5}$	0,0	9,0128400	4,3497037	84,795348	170,37206
Componente Úmida					
$a_w \times 10^{-4}$	5,8021897	5,6794847	5,8118019	5,9727542	6,1641693
$b_w \times 10^{-3}$	1,4275268	1,5138625	1,4572752	1,5007428	1,7599082
$c_w \times 10^{-2}$	4,3472961	4,6729510	4,3908931	4,4626982	5,4736038

Fonte: Niell (1996).

3.2.4. Modelagem Dinâmica Versus Modelos Padrão

Para avaliar a qualidade das previsões dos valores do ZTD obtidos a partir do modelo de PNT, modelagem dinâmica, Sapucci, Machado e Monico (2006) realizaram experimentos utilizando algumas estações da RBMC nas quatro estações do ano. A Figura 11 apresenta os valores máximos do erro médio quadrático (EMQ) dos valores do ZTD para o modelo dinâmico, de Hopfield e de Saastamoinen, considerando como referência as estimativas obtidas a partir das observações GPS. Observando a Figura 11 pode-se perceber que os modelos padrão apresentam valores do atraso troposférico bastante similares. Nessa figura percebe-se claramente que a modelagem dinâmica apresenta qualidade superior aos demais modelos, apresentando valores do EMQ menores que a metade dos valores apresentados pelos demais modelos na maioria das estações GPS avaliadas. Além disso, percebe-se que no verão a diferença é mais significativa que nas demais estações do ano.

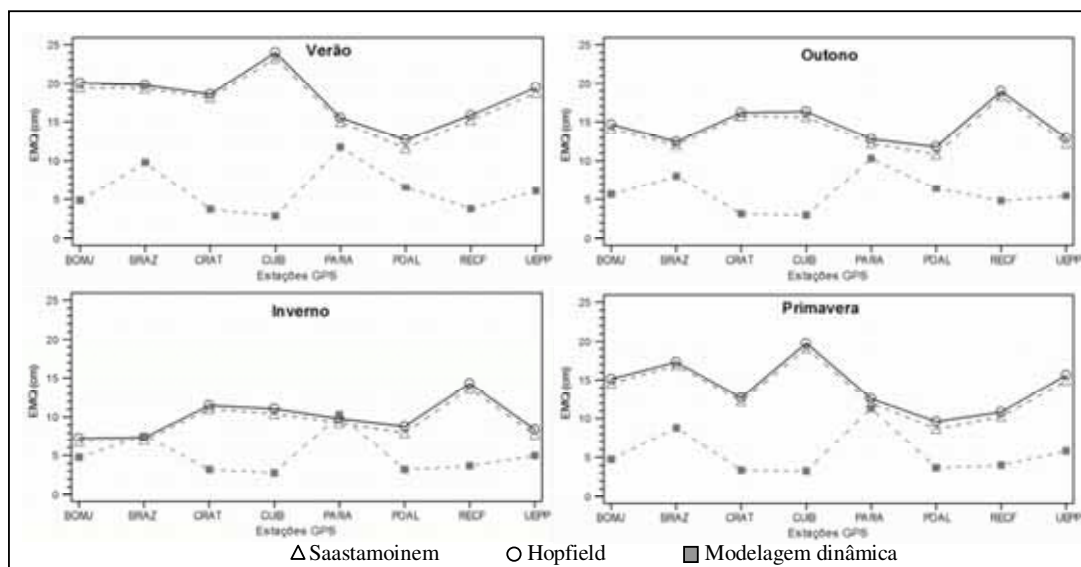


Figura 11 – Análise da qualidade dos valores do ZTD provenientes da modelagem dinâmica em comparação com os gerados pelos modelos de Saastamoinen e Hopfield
Fonte: Sapucci, Machado e Monico (2006).

Para uma análise adicional, a Figura 12 (a) e (b) apresenta os valores da refração troposférica calculada pelo modelo dinâmico (PNT) e o de Hopfield (Hop.) na direção receptor-satélite para o dia 16/05/2005 (outono) das 14 as 15 h (hora local), usando a função de mapeamento de Niell (seção 3.2.3.1) para ambos os modelos.

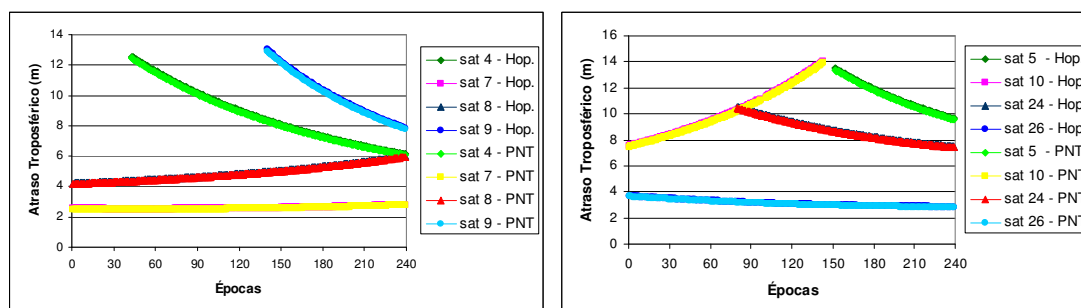


Figura 12 – Atraso troposférico na direção receptor-satélite para o modelo dinâmico e o de Hopfield

Analisando a Figura 12 pode-se perceber que o atraso troposférico tanto para o modelo dinâmico como para o de Hopfield possuem o mesmo comportamento. Além disso, os resultados apresentados pelo modelo dinâmico são ligeiramente menores. Para avaliar a magnitude das diferenças entre os atrasos obtidos pelos 2 modelos, as discrepâncias são ilustradas na Figura 13 (a). Já a Figura 13 (b) apresenta os ângulos de elevação dos satélites.

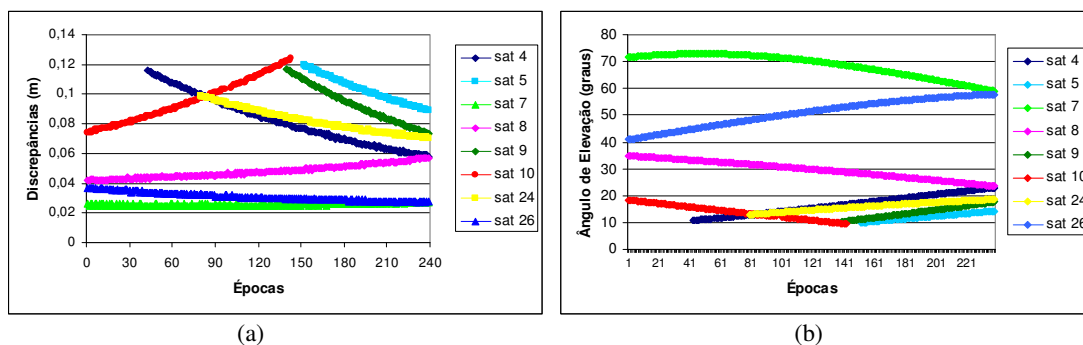


Figura 13 – Diferença do atraso troposférico na direção receptor-satélite para o modelo dinâmico e o de Hopfield (a) e ângulo de elevação dos satélites (b)

Observando a Figura 13 (a) pode-se perceber que as discrepâncias do atraso troposférico na direção receptor-satélite estão entre 2 e 13 cm. Além disso, as maiores discrepâncias ocorrem para os satélites com ângulos de elevação menores.

4. METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA GERAR A VRS

No decorrer dessa pesquisa foi necessário desenvolver um sistema que realiza o posicionamento GPS baseado em redes utilizando o conceito de estação virtual. Portanto, nesse capítulo, são descritos os métodos empregados para gerar a VRS.

Como pode ser observado no decorrer dessa Tese, e principalmente na seção que trata da descrição teórica da VRS (seção 2.1.4), para realizar o posicionamento GPS baseado em redes e consequentemente gerar os dados da VRS, uma das etapas principais é a solução das ambigüidades da rede. Depois disso, o erro residual³ das DDs de cada linha de base da rede é obtido, interpolado para a posição do usuário e os dados da estação virtual são gerados. No entanto, foi verificada nessa pesquisa uma outra possibilidade: gerar a VRS sem solucionar as ambigüidades. Uma vantagem de gerar a VRS sem solucionar as ambigüidades é a maior facilidade, visto que essa solução é uma das tarefas mais complexas no posicionamento GPS baseado em redes. Portanto, nas próximas seções são descritos os métodos utilizados para gerar a VRS: sem e com solução das ambigüidades.

4.1. Calculando os Dados da VRS sem Solucionar as Ambigüidades

Com o sistema desenvolvido nessa pesquisa é possível gerar a VRS utilizando diversos modelos atmosféricos e sem solucionar as ambigüidades. A Figura 14 ilustra as principais etapas necessárias para a geração da VRS. Primeiramente é necessário selecionar a estação base da rede. Para isso, são calculadas as distâncias entre a posição da VRS e as estações de referência da rede. A estação de referência mais próxima é selecionada como base. A partir dos dados dessa estação são gerados os dados da VRS. Para tanto, são inseridos nos dados da estação base os deslocamentos geométricos (DG) (seção 2.1.4.1), a diferença da refração troposférica (refração troposférica da estação base menos a refração troposférica da VRS) e a diferença do efeito ionosférico (efeito ionosférico da estação base menos o efeito ionosférico da VRS). A refração troposférica é calculada pelo modelo de Hopfield (seção 3.2.1) ou pela modelagem dinâmica (seção 3.2.2). Já o efeito ionosférico é calculado através do Mod_Ion_FK (seção 3.1.1) ou pelos MGI (seção 3.1.2). Além disso, o usuário também tem a possibilidade de gerar a VRS sem as correções atmosféricas. Aspectos

³ O erro residual das DD inclui erros referentes ao efeito ionosférico, refração troposférica e órbita dos satélites GPS, além dos erros aleatórios.

relacionados com a implementação dos modelos atmosféricos podem ser encontrados no capítulo 5.

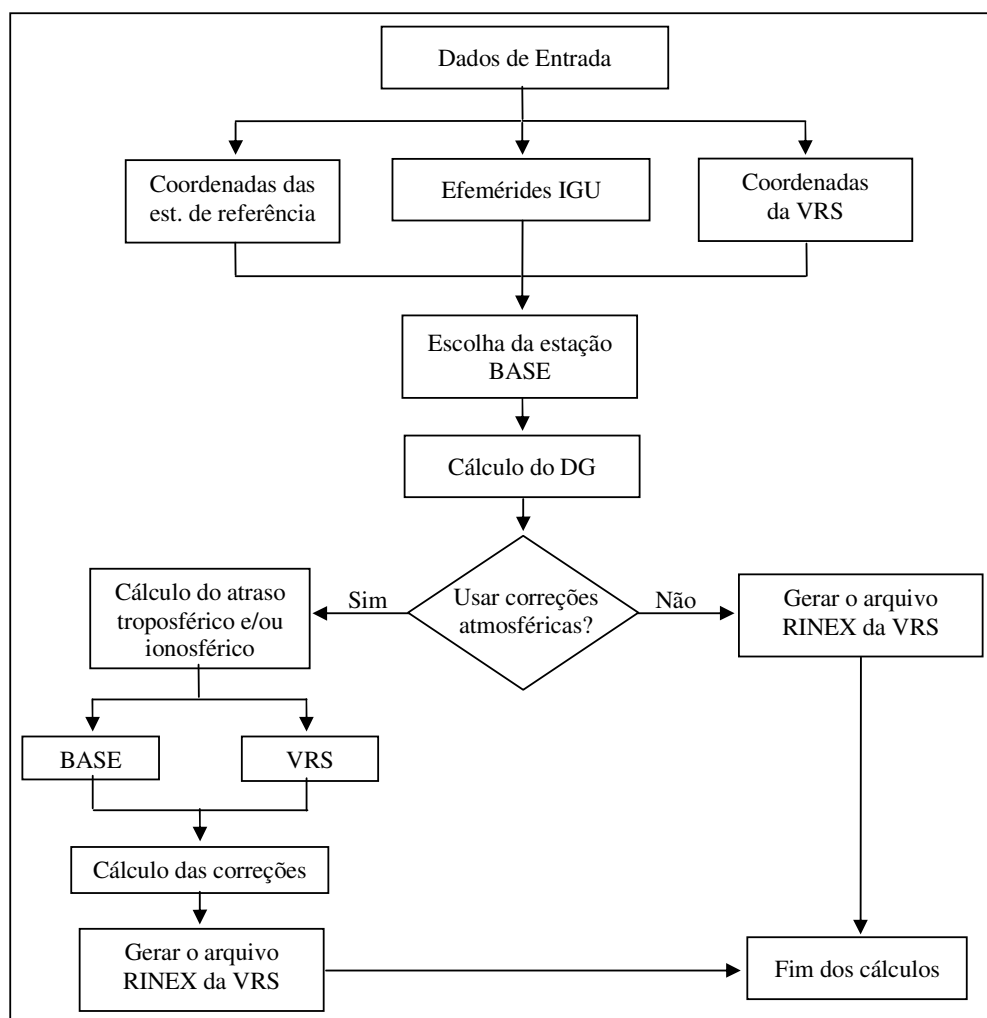


Figura 14 – Etapas utilizadas para gerar a VRS sem solucionar as ambigüidades

Depois de inseridas as correções necessárias nos dados coletados pela estação base, o arquivo da VRS é gerado em formato RINEX e o usuário pode realizar o posicionamento relativo (ou até mesmo diferencial) considerando a VRS como estação base.

4.1.1. Opções Disponíveis para Gerar a VRS

Como descrito na seção anterior, existe a possibilidade de gerar diferentes arquivos da VRS, dependendo do modelo atmosférico utilizado. Assim, a Tabela 02 apresenta

todas as combinações disponíveis para gerar a VRS. O usuário tem a possibilidade de gerar a VRS utilizando apenas o deslocamento geométrico (DG) ou a sua combinação com os modelos de troposfera: modelagem dinâmica (PNT) ou Hopfield (HOP); e/ou ionosfera: Mod_Ion_FK (MOD) ou Mapas Globais da Ionosfera (GIM).

Tabela 02 – Opções disponíveis para gerar a VRS

Geometria	Troposfera	Ionosfera	Siglas
Deslocamento Geométrico (DG)	---	---	DG
		Mod_Ion_FK	DG+MOD
		Mapas Globais	DG+GIM
	PNT	---	DG+PNT
		Mod_Ion_FK	DG+PNT+MOD
		Mapas Globais	DG+PNT+GIM
	Hopfield	---	DG+HOP
		Mod_Ion_FK	DG+HOP+MOD
		Mapas Globais	DG+HOP+GIM

Os resultados obtidos empregando os diversos métodos listados na Tabela 02 são apresentados nos capítulos 6 e 7.

4.2. Calculando os Dados da VRS com Solução das Ambigüidades

Para gerar a VRS de acordo com a bibliografia pesquisada, como descrito na seção 2.1.4, algumas etapas devem ser realizadas. Dentre elas pode-se citar:

- Cálculo das DDs para cada linha de base independente da rede;
- Solução das ambigüidades (N) para as linhas de base selecionadas;
- Cálculo do erro residual das DDs para cada linha de base;
- Obtenção do erro residual para as observáveis originais (fase e pseudodistância);
- Interpolação do erro residual para a posição do usuário, ou seja, da VRS;
- Cálculo dos dados da VRS.

A Figura 15 ilustra as principais etapas para a geração da VRS.

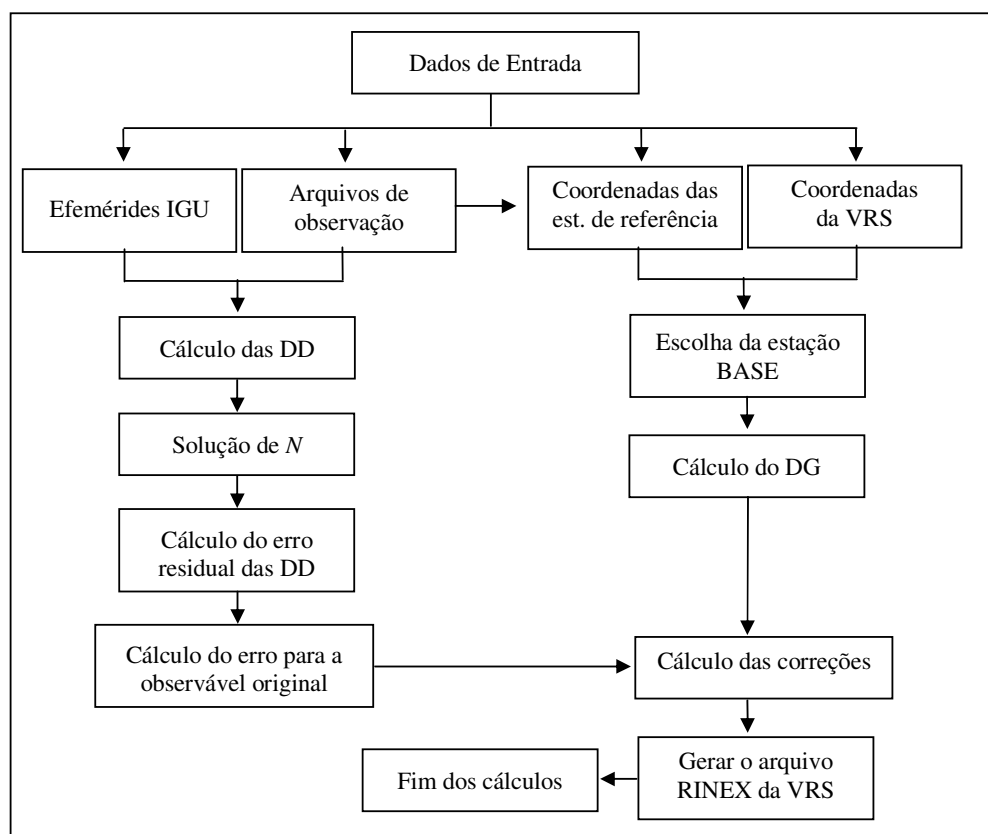


Figura 15 – Etapas utilizadas para gerar a VRS com solução das ambigüidades

Como pode ser observado na Figura 15, da mesma forma que na seção 4.1, é necessário selecionar a estação base da rede, pois a partir de seus dados são gerados os dados da VRS.

Por outro lado, são calculadas as DDs para cada linha de base independente da rede. Assim, o próximo passo diz respeito à solução das ambigüidades para cada linha de base (essa etapa é descrita na seção 4.2.1). Após essa solução deve ser calculado o erro residual das DDs para cada linha de base, como exposto na seção 4.2.2. Mas para gerar os dados da VRS é necessário determinar o erro residual para a observável original de pseudodistância e fase da onda portadora. Para tanto, é necessário recuperar esse erro a partir do erro residual das DDs, como detalhado na seção 4.2.3. Esse erro deve ser determinado para a estação base e para a posição da VRS. O erro para a estação base é calculado diretamente utilizando o método descrito na seção 4.2.3. Mas, para determinar o erro para a posição da VRS deve ser realizada uma interpolação utilizando os erros residuais obtidos pelas estações de referência da rede, como descrito na seção 4.2.4. Em seguida, o erro residual da estação base é subtraído dos dados da estação base e o erro residual da VRS é adicionado aos dados da estação base. Posteriormente, são inseridos nos dados da estação base os deslocamentos

geométricos (DG) e, enfim, o arquivo da VRS é gerado em formato RINEX. O capítulo 5 apresenta aspectos relacionados com a implementação do método descrito nessa seção. Já o capítulo 6 (para dados de pseudodistância) e 8 (para dados de pseudodistância e fase da onda portadora) tratam dos resultados obtidos nos experimentos.

4.2.1. Solução do Vetor das Ambigüidades

A solução das ambigüidades é uma das etapas cruciais quando o posicionamento GPS baseado em redes é aplicado. No entanto, como deve ser realizada a solução das ambigüidades entre estações de referência de uma rede GPS ativa, que tem suas coordenadas conhecidas, pode-se imaginar que se trata de uma tarefa simples. Mas, na verdade, como as estações podem estar muito distantes umas das outras a solução das ambigüidades se torna mais complexa. De acordo com Hu et al. (2005), uma possibilidade é utilizar as observáveis *Ion Free* e *Wide Lane*. Diversos autores optam por esse método (CHEN et al., 2000; HU et al., 2002, 2003; WIELGOSZ, BRZEZINSKA e KASHANI, 2004).

Nessa pesquisa é utilizado o *software* científico Bernese 5.0 (Apêndice A) para calcular as ambigüidades das DDs, visto que tal *software* encontra-se disponível na FCT/UNESP. A seção A.3 do Apêndice A traz os detalhes do script utilizado para solucionar as ambigüidades. Os demais procedimentos utilizados para gerar a VRS foram implementados no decorrer dessa pesquisa.

4.2.2. Erro Residual das DDs

Após a solução das ambigüidades das DDs, o próximo passo diz respeito ao cálculo do erro residual das DDs da rede para cada linha de base. As equações (4.1) e (4.2) representam as DDs para as observáveis da fase da onda portadora (L1 e L2) e pseudodistância (C1 e P2) respectivamente:

$$\lambda \Delta \nabla \Phi = \Delta \nabla \rho + \lambda \Delta \nabla N + \Delta \nabla \varepsilon_{\Phi} \quad (4.1)$$

$$\Delta \nabla PD = \Delta \nabla \rho + \Delta \nabla \varepsilon_{PD}, \quad (4.2)$$

onde:

- λ é o comprimento de onda da fase da onda portadora (m);

- $\Delta\nabla\rho$ é a DD da distância geométrica entre o satélite no instante de transmissão do sinal e o receptor no instante de recepção do sinal (m);
- $\Delta\nabla N$ é a ambigüidade inteira das DDs das estações de referência da rede (ciclos);
- $\Delta\nabla\epsilon_\phi$ é o erro residual das DDs para a fase da onda portadora (m);
- $\Delta\nabla\epsilon_{PD}$ é o erro residual das DDs para a pseudodistância (m);

Como as equações (4.1) e (4.2) representam as DDs, erros do relógio do satélite e receptor são eliminados. Além disso, erros devido à ionosfera e troposfera são reduzidos, sendo que as $\Delta\nabla\epsilon$ contém os erros remanescentes. Além disso, como são calculadas as DDs de dados de estações de referência considera-se que erros devido ao multicaminho são desprezíveis⁴.

As equações (4.3) e (4.4) representam os erros residuais⁵ das DDs para as observáveis de fase e pseudodistância respectivamente:

$$\Delta\nabla\epsilon_\phi = \lambda\Delta\nabla\Phi - \Delta\nabla\rho - \lambda\Delta\nabla N \quad (4.3)$$

$$\Delta\nabla\epsilon_{PD} = \Delta\nabla PD - \Delta\nabla\rho. \quad (4.4)$$

Assim, utilizando as equações (4.3) e (4.4) pode-se obter os erros residuais das DDs para cada linha de base. No entanto, para gerar os dados da VRS é necessário obter o erro residual para as observáveis originais de fase (L1 e L2) e pseudodistância (C1 e P2) que formam as DDs. Portanto, na próxima seção é descrito um método que pode ser utilizado.

4.2.3. Recuperando o Erro Residual da Observável Original

Depois de determinar o erro residual das DDs é necessário recuperar o erro residual para a observável original. Esse processo pode ser realizado em dois passos:

- realizar a inversão do erro residual das DDs para erro residual das simples diferença (SD);
- realizar a inversão do erro residual das SDs para erro residual da observável original.

⁴ Considera-se que as estações de referência estão situadas em locais com efeito mínimo de multicaminho.

Esse procedimento é descrito a seguir. Para uma rede de n receptores e m satélites o erro residual das DDs pode ser escrito em função do erro residual das SDs entre os receptores i e j da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}_{(m-1) \times m} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_{i,j}^1 \\ \Delta \epsilon_{i,j}^2 \\ \vdots \\ \Delta \epsilon_{i,j}^m \end{bmatrix}_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,2} \\ \Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,3} \\ \vdots \\ \Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,m} \end{bmatrix}_{(m-1) \times 1} \quad (4.5)$$

onde:

- $\Delta \epsilon_{i,j}^m$ é o erro residual das SDs entre os receptores i e j e o satélite m ;
- $\Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,m}$ é o erro residual das DDs entre os receptores i e j e os satélites 1 e m ;
- 1 ocupa a coluna correspondente a posição do satélite base e -1 a coluna correspondente aos demais satélites.

Para determinar o erro residual das SDs é necessário resolver o sistema (4.5). No entanto, isso não é possível devido à deficiência de *rank* da matriz dos coeficientes. Para que seja possível resolver esse sistema é necessário introduzir pelo menos uma injeção. Portanto, utiliza-se a hipótese de que o erro residual das SDs não possui tendência, ou seja, assume-se que a soma do erro residual das SDs para todos os satélites observados em uma determinada linha de base, ponderada pelo ângulo de elevação do satélite, é nula. O acréscimo dessa injeção elimina a deficiência de *rank* do sistema (4.5) tornando-o solucionável, assim (ALBER et al., 2000; BRAUN et al., 2000):

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \\ w_{i,j}^1 & w_{i,j}^2 & w_{i,j}^3 & \cdots & w_{i,j}^m \end{bmatrix}_{m \times m} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_{i,j}^1 \\ \Delta \epsilon_{i,j}^2 \\ \Delta \epsilon_{i,j}^3 \\ \vdots \\ \Delta \epsilon_{i,j}^m \end{bmatrix}_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,2} \\ \Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,3} \\ \vdots \\ \Delta \nabla \epsilon_{ij}^{1,m} \\ 0 \end{bmatrix}_{m \times 1}, \quad (4.6)$$

onde:

- $w_{i,j}^m$ é o peso para cada simples diferença que deve considerar o ângulo de elevação de cada satélite.

Ao resolver o sistema (4.6) obtêm-se o erro residual das SDs entre os receptores i e j , ou seja, para uma única linha de base. Esse procedimento deve ser aplicado nas $n-1$ linhas de base independentes da rede.

⁵ As equações (4.3) e (4.4) representam os erros residuais das DD para uma única linha de base. No entanto, essa equação é utilizada para todas as linhas de base independentes da rede de estações de referência.

O próximo passo diz respeito à obtenção do erro residual da observável original a partir do erro residual das SDs. Nessa etapa o procedimento é similar, porém nesse caso o erro residual das SDs deve estar relacionado com o mesmo satélite e as diferentes estações da rede. Assim, o sistema é dado por (ALBER et al., 2000; BRAUN et al., 2000):

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \\ w_1^l & w_2^l & w_3^l & \cdots & w_n^l \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{bmatrix} \epsilon_1^l \\ \epsilon_2^l \\ \epsilon_3^l \\ \vdots \\ \epsilon_n^l \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_{1,2}^l \\ \Delta \epsilon_{1,3}^l \\ \vdots \\ \Delta \epsilon_{1,n}^l \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad (4.7)$$

onde:

- 1 ocupa a coluna correspondente a posição da estação base e -1 a coluna correspondente as demais estações da rede;
- ϵ_n^l é o erro residual da observável original para a estação n e o satélite l .

Resolvendo o sistema (4.7) obtêm-se o erro residual da observável original para o satélite l . Este processo deve ser repetido para todos os satélites.

Com esse procedimento é possível recuperar a componente do erro residual⁶ que é específica para cada estação. A parte comum do erro residual é eliminada no processo de dupla diferenciação e não pode ser recuperada (ALBER et al., 2000; BRAUN et al., 2000). Como nessa pesquisa o intuito é recuperar exatamente a parcela específica do erro residual, o processo empregado é satisfatório.

Algo que deve ser salientado diz respeito à ponderação que deve ser utilizada nas duas etapas descritas para recuperação do erro residual. Essa ponderação deve levar em consideração o ângulo de elevação do satélite, pois as observações dos satélites com ângulos de elevação maiores sofrem menor influência dos erros causados pela atmosfera. Uma das funções que podem ser utilizadas é dada por:

$$w = \sin(E), \quad (4.8)$$

onde E é o ângulo de elevação do satélite.

Utilizando a função (4.8) os pesos obtidos pertencem ao intervalo [0, 1], sendo que para ângulos de elevação maiores os pesos também são maiores.

Para leitores interessados, outro método de recuperação do erro residual é apresentado em Chen et al. (2000) e Hu et al. (2003).

⁶ O erro residual é composto por uma parcela comum a todas as estações e uma parcela específica da estação.

4.2.4. Interpolando o Erro Residual

Para gerar os dados da VRS é necessário obter o erro residual, tanto para a estação base como para a posição da VRS. O erro residual para a estação base é obtido diretamente utilizando o procedimento descrito na seção 4.2.3. Já para determinar o erro residual na posição da VRS é necessário realizar uma interpolação utilizando os erros residuais obtidos para as estações de referência da rede.

Diversos métodos de interpolação têm sido propostos nos últimos anos. Pode-se utilizar o Modelo de Combinação Linear (HAN e RIZOS, 1996), o Método de Interpolação Linear Baseado na Distância (GAO, LI e MCLELLAN, 1997; GAO e LI, 1998), o Método de Interpolação Linear (HU et al. 2003; CHEN et al., 2000; WUBBENA et al., 1996), o Modelo de Superfície de Baixa Ordem (FOTOPOULOS e CANNON, 2001; FOTOPOULOS, 2000a). No entanto, Dai et al. (2001) descreveu e testou todos esses modelos de interpolação enunciados e verificou que os resultados apresentados são similares. Portanto, nessa pesquisa, dois métodos foram implementados e testados: o Modelo de Superfície de Baixa Ordem (seção 4.2.4.1), que se reduz a um plano; e o Método de Interpolação Linear Baseado na Distância (seção 4.2.4.2), ambos muito utilizados pela comunidade científica.

4.2.4.1. Equação do Plano

A equação do plano utilizada para determinar o erro residual (ϵ_{VRS}^l) para a posição da VRS é dada por:

$$\epsilon_n^l = aX + bY + cZ \quad (4.9)$$

Na equação (4.9), X , Y e Z são as coordenadas cartesianas das estações de referência da rede e ϵ_n^l é o erro residual obtido para a estação de referência. Sendo assim, utilizando no mínimo três estações é possível determinar os parâmetros a , b e c . Determinados estes parâmetros, os mesmos são aplicados à equação (4.9) para obter o valor do erro residual para a posição da VRS. Para o caso de se utilizar dados de mais que três estações, deve-se realizar um ajustamento para determinar os parâmetros a , b e c .

4.2.4.2. Interpolação Ponderada pela Distância

O erro residual para a posição da VRS determinado através de interpolação ponderada é dado por:

$$\varepsilon_{VRS}^l = \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{s} \varepsilon_j, \quad (4.10)$$

onde:

- n é o número de estações de referência;
- $s = \sum_{j=1}^n s_j$;
- $s_j = \frac{1}{d_j}$, sendo d_j é a distância entre a j -ésima estação de referência e a VRS.

4.3. Erro Residual da Pseudodistância a Partir da Observável Original

Nas seções 4.1 e 4.2 foram discutidos dois métodos que podem ser aplicados à pseudodistância para obter o erro residual das estações de referência. No entanto, existe uma outra possibilidade quando se trata da pseudodistância. O erro residual das estações de referência pode ser obtido diretamente da observável original. Procedimento similar ao utilizado no DGPS (DALBELO, ALVES E MONICO, 2005a, 2005b), descrito a seguir.

O erro residual calculado para cada pseudodistância, ε_{PD} , diretamente da observável original é dada por:

$$\varepsilon_{PD} = PD - \rho - c(\overline{dt_r} - dt^s), \quad (4.11)$$

onde:

- PD é a pseudodistância entre o satélite no instante de transmissão do sinal e o receptor no instante de recepção (m).
- ρ é a distância geométrica entre o receptor no instante de recepção do sinal e o satélite no instante de transmissão (m);
- c é a velocidade da luz no vácuo (m/s);
- $\overline{dt_r}$ é o erro médio do relógio do receptor (segundos);
- dt^s é o erro do relógio do satélite (segundos);

Utilizando a equação (4.11) é obtido o erro residual para todas as estações de referência da rede. Para obter o erro residual na posição da VRS basta aplicar um algoritmo de interpolação, como discutido na seção 4.2.4. Resultados empregando essa metodologia são apresentados no capítulo 6.

5. IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO EM AMBIENTE COMPUTACIONAL E COLETA DE DADOS

Nesse capítulo são descritos detalhes da implementação do sistema desenvolvido nessa pesquisa utilizando a metodologia apresentada no capítulo 4. O sistema foi desenvolvido em linguagem C++, devido principalmente as facilidades que a programação orientada a objetos (SAVITCH, 2004) proporciona.

Posteriormente são apresentados aspectos relacionados com a rede GNSS do Oeste do Estado de São Paulo, com a obtenção das coordenadas das estações, além da descrição da coleta de dados e experimentos.

5.1. Implementação do Método Proposto

Essa seção apresenta detalhes da implementação do método proposto nessa pesquisa.

5.1.1. Ferramenta Utilizada na Documentação do Sistema Desenvolvido

O código fonte do sistema desenvolvido nessa pesquisa foi documentado com o Doxygen, um sistema de documentação que pode ser utilizado nas linguagens C, C++, Java etc. Utilizando o Doxygen é possível documentar as classes, funções membros das classes, funções independentes e suas respectivas variáveis. Para tanto, basta que o usuário insira alguns comandos adicionais no seu código fonte. Além disso, toda a documentação fica disponível no formato HTML, o que facilita sua manipulação. A documentação também pode ser gerada em RTF, PostScript etc. A Figura 16 ilustra uma das páginas de documentação do Doxygen, a Lista de Ficheiros (uma lista das classes e funções implementadas com uma breve descrição).

O Doxygen e seu manual estão disponíveis *online* na página <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>.

Página principal Classes Ficheiros Lista de ficheiros Ficheiros membro	
Lista de ficheiros Lista de todos os ficheiros documentados com uma breve descrição:	
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\Definicoes.h [código]	Arquivo com <i>Defines</i> e <i>Typedef</i>
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\EscriveRinex.h [código]	Definição e implementação da classe <i>EscrevendoRinex</i> e dos módulos <i>Cabecalho</i> e <i>DadosVRS</i>
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\Funcoes.h [código]	Definições e implementações de funções
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\lonex.h [código]	Definição e implementação da classe <i>LeituraLonex</i> e dos módulos <i>LeituraTEC</i> , <i>InterpolacaoBilinear</i> e <i>FuncaoMapeamento</i>
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\LeituraModlon.h [código]	Definição e implementação da classe <i>LeitModlon</i> e do módulo <i>LeEfeitoIonC1</i>
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\LeituraRinexObs.h [código]	Definição e implementação da classe <i>LeituraRinexOb</i> e do módulo <i>RinexObs</i>
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\LeituraSP3.h [código]	Definição e implementação das classes <i>sp3</i> e <i>InterpolacaoSP3</i> e dos módulos <i>LeCoordSat</i> e <i>Interpolacao</i> , respectivamente
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\Matrix.h [código]	Definição e implementação da classe <i>TMatrix</i> para manipulação de Matrizes
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\Resultados.h [código]	Definição e implementação da classe <i>Resultados</i> e do módulo <i>DiscrepanciasVRSMovel</i>
E:\doutorado\implementacao\Programa Final\Bibliotecas\Troposfera.h [código]	Definição e implementação da classe <i>AtrasoTroposferico</i> e dos módulos <i>LeAtrasoTrop</i> , <i>InterpolacaoBilinear</i> , <i>Niell</i> , <i>Hopfield</i> e <i>AtrasoZenital</i>

Figura 16 – Página de documentação gerada pelo Doxygen

5.1.2. Funções e Classes Desenvolvidas no Sistema

No decorrer do desenvolvimento do sistema, diversas funções foram implementadas:

- Transformação de coordenadas cartesianas em coordenadas geodésicas curvilíneas;
- Transformação de coordenadas geodésicas curvilíneas em coordenadas cartesianas;
- Transformação de coordenadas cartesianas em coordenadas locais;
- Cálculo do dia do ano;
- Cálculo da distância geométrica;
- Cálculo da resultante no espaço 3D;
- Cálculo do ângulo de elevação do satélite;
- Estimativa do erro do relógio do receptor através do posicionamento por ponto convencional utilizando inunção posicional;
- Correção do efeito do movimento de rotação da Terra nas coordenadas do satélite;
- Cálculo do satélite base para uma determinada época e observável;
- Cálculo das SDs para uma determinada época e observável;
- Cálculo das DDs para uma determinada época e observável;
- Recuperação do erro residual das SDs a partir do erro residual das DDs;

- Recuperação do erro residual da observável original a partir do erro residual das SDs;
- Cálculo do ajustamento para obter os coeficientes da equação de um plano;
- Método de interpolação ponderada baseado na distância entre as estações;
- Ordenação de vetores;
- Leitura de arquivo no formato Bernese para obter o valor das ambigüidades das DDs;
- Várias funções de impressão de dados para auxiliar nas análises, principalmente as realizadas no capítulo 8.

Além das funções, foram implementadas as seguintes classes:

- Leitura e interpolação dos arquivos SP3;
- Leitura e manipulação dos dados de arquivos IONEX;
- Leitura e manipulação dos dados advindos dos arquivos do Mod_Ion_FK;
- Leitura e manipulação dos dados provindos dos arquivos da modelagem dinâmica;
- Escrita da VRS no formato RINEX.

5.1.3. Arquivos de Dados GPS

Nessa seção são abordados aspectos relacionados com a implementação da leitura dos arquivos de observação das estações de referência da rede, bem como a leitura e interpolação dos arquivos de efemérides precisas.

5.1.3.1. Arquivos de Observação das Estações da Rede

Para a leitura dos arquivos RINEX de observação das estações da rede foram utilizadas rotinas disponíveis no site <http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/rinex.htm>. No entanto, algumas adaptações foram implementadas para adequar ao sistema desenvolvido nessa pesquisa.

5.1.3.2. Coordenadas dos Satélites GPS

A rotina para leitura dos arquivos de efemérides precisas disponíveis no site <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/> no formato *Standard Product 3* (SP3) foi implementada

nessa pesquisa, tanto para os arquivos SP3-a como SP3-c. No entanto, foi necessário interpolar as coordenadas e os erros dos relógios dos satélites contidos nos arquivos SP3, visto que as efemérides precisas são disponibilizadas num intervalo amostral de 15 min. Para tanto, foi utilizada a interpolação de Chebyshev (SEEBER, 2003).

Para a interpolação de Chebyshev foi utilizada uma rotina do *GPS Analysis Software* (GAS) desenvolvido pela Universidade de Nottingham (UK) em linguagem FORTRAN 77 (Compilador Lahey Fujitsu Fortran 95). Para possibilitar a sua utilização na linguagem C++ foi gerada uma *Dynamic Link Library* (DLL – biblioteca de ligação dinâmica).

Além disso, cabe acrescentar que as coordenadas dos satélites devem ser calculadas no instante de transmissão do sinal para gerar a VRS, corrigindo do movimento de rotação da Terra (MONICO, 2000). Essas correções foram implementadas nessa pesquisa.

5.1.4. Gerando a VRS sem Solucionar as Ambigüidades

Essa seção descreve aspectos relacionados com a implementação dos modelos utilizados para gerar a VRS sem solucionar as ambigüidades entre as estações de referência da rede.

5.1.4.1. Atraso Troposférico

A estimativa do atraso troposférico é uma etapa muito importante no cálculo da VRS. No sistema desenvolvido nessa pesquisa, dois métodos foram implementados: a modelagem dinâmica (modelo de PNT) e o modelo de Hopfield. Além disso, também foi implementada uma função de mapeamento para transformar o erro devido à troposfera para a direção receptor-satélite. Portanto, nessa seção são abordados os principais aspectos inerentes a esses tópicos.

5.1.4.1.1. Modelagem Dinâmica da Troposfera

Como exposto na seção 3.2.2, os dados do ZTD fornecidos pela modelagem dinâmica estão disponíveis na página do CPTEC/INPE no site <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/>. Na página, na época em que os experimentos foram realizados, encontrava-se um mapa da América do Sul dividido em uma malha. Bastava acessar um dos elementos da malha para obter o arquivo do ZTD. O anexo A mostra um exemplo de arquivo gerado para o dia 19/05/05 para a componente hidrostática. Nos arquivos, os atrasos troposféricos eram dispostos em uma grade regular com previsões de até 66 h. Como pode ser observado, os arquivos do atraso troposférico podem ser utilizados em tempo real. No entanto, ainda não existe essa possibilidade devido à parte operacional do sistema desenvolvido nessa pesquisa. Portanto, nesse trabalho são realizadas apenas simulações.

No tocante a implementação, primeiramente foi realizada a leitura do arquivo de atraso troposférico, com o objetivo de armazenar os atrasos dos 4 pontos da grade que circundam a posição desejada. No entanto, como no arquivo são disponibilizados dados de 6 em 6 h, foi realizada uma interpolação linear para determinar os 4 pontos no instante desejado. Posteriormente foi calculado o atraso troposférico na posição desejada através da interpolação bi-linear. Esse procedimento foi realizado para as componentes úmida e hidrostática.

5.1.4.1.2. Modelo de Hopfield

O modelo de Hopfield, descrito na seção 3.2.1, também foi implementado. Por se tratar de um modelo padrão muito utilizado pela comunidade científica, esse método foi utilizado, principalmente, com o objetivo de comparar com a modelagem dinâmica. As comparações podem ser vistas na seção 3.2.4 e no capítulo 7.

5.1.4.1.3. Função de Mapeamento

Depois de obter o ZTD com a modelagem dinâmica ou com o modelo de Hopfield, é necessário utilizar uma função de mapeamento para determinar o atraso troposférico na direção receptor-satélite. A função de mapeamento de Niell, descrita na seção 3.2.3.1, foi utilizada para tal fim.

5.1.4.2. Efeito Ionosférico

A atenuação dos efeitos ionosféricos é um tema muito relevante quando se fala em posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência. Nessa pesquisa, o erro devido à ionosfera é calculado de duas formas: através dos mapas globais da ionosfera e do Mod_Ion_FK.

5.1.4.2.1. Mapas Globais da Ionosfera

Para utilizar os mapas globais da ionosfera no formato IONEX, disponíveis no site <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono/>, primeiramente foi necessário realizar a leitura dos mesmos. Os arquivos IONEX, assim como os RINEX, têm um formato específico. Esse formato é descrito em Shaer, Gurtner e Feltens (1998), disponível em <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/>. Após a leitura, foram armazenados os valores do TEC para os 4 pontos da grade que circundam a posição do usuário, utilizando uma interpolação linear para trazer o TEC para o horário desejado. Posteriormente, foi utilizada a interpolação bi-linear para calcular o TEC na posição desejada. Finalizando, foi empregada a função de mapeamento geométrica padrão (seção 3.1.3.1) para obter o valor do TEC na direção receptor-satélite.

É necessário ressaltar que utilizando os mapas globais da ionosfera é possível gerar a VRS apenas no modo pós-processado, visto que esses mapas não estão disponíveis em tempo real na internet.

Cabe acrescentar que diversos testes foram realizados com os MGI, mas como não foram encontradas melhorias na geração da VRS (a VRS gerada com os MGI não apresentou diferenças importantes se comparada com a VRS gerada apenas por DG), os resultados apresentados na Tese não contemplam esse tema.

5.1.4.2.2. Mod_Ion_FK

Como descrito na seção 3.1.1, existe a possibilidade de se utilizar o Mod_Ion no modo pós processado ou o Mod_Ion em tempo real, denominado Mod_Ion_FK. Nessa pesquisa, foi utilizado o Mod_Ion_FK com a série de Fourier de 19 coeficientes e o

processo aleatório de predição Gauss-Markov, que proporcionou os melhores resultados nos experimentos realizados por Aguiar (2005).

Primeiramente foi necessário processar os dados das estações de referência da rede no Mod_Ion_FK e assim obter um arquivo com os dados do efeito ionosférico. Nesse arquivo, o efeito ionosférico já é obtido na direção receptor-satélite. Portanto, bastou realizar a leitura dos arquivos disponibilizados pelo Mod_Ion_FK para utilizar na geração da VRS.

5.1.4.3. VRS

Como descrito na Tabela 02 existem várias possibilidades que podem ser utilizadas para gerar a VRS. Após o usuário selecionar uma dessas opções, é gerado um arquivo no formato RINEX com as observáveis L1, L2, C1 e P2. Para tanto, foi implementada uma rotina seguindo o padrão do formato RINEX descrito em Gurtner (2002), disponível em <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/>.

Dessa forma, o usuário pode utilizar essa VRS como se fosse de uma estação de referência real. Visando avaliar esse procedimento testes foram realizados com a VRS gerada. Os resultados são apresentados nos capítulos 6 e 7.

5.1.5. Gerando a VRS após Solucionar as Ambigüidades

Essa seção descreve aspectos relacionados com a implementação das etapas necessárias para gerar a VRS com solução das ambigüidades entre as estações de referência da rede.

5.1.5.1. Cálculo das SDs e DDs

Para implementar as SDs entre as estações de referência da rede foi escolhida uma estação base para a rede. Essa escolha deve levar em consideração a distância entre as estações, pois quanto menor o comprimento das linhas de base mais rápida e confiável será a solução das ambigüidades.

Após o cálculo das SDs para todas as observáveis em cada linha de base é necessário realizar o cálculo das DDs. Algo importante na implementação das DDs é a

escolha do satélite base. Nessa pesquisa o satélite base é selecionado levando em consideração o ângulo de elevação do satélite. O satélite com maior ângulo de elevação é selecionado como base. Esse cálculo é realizado a cada época. Além disso, o ângulo de elevação do satélite é calculado para uma “estação média”, ou seja, uma estação que se localize entre a estação base e a outra estação de referência da rede, que juntas formam a linha de base.

5.1.5.2. Solução das Ambigüidades

A implementação da solução das ambigüidades é uma das tarefas mais complicadas no posicionamento GPS baseado em redes. Como as linhas de base entre as estações de referência são relativamente longas, embora as estações tenham suas coordenadas conhecidas, as ambigüidades não são facilmente solucionadas. Assim, foi decidido utilizar o *software* científico Bernese 5.0 para essa função. O Bernese é um *software* muito utilizado pela comunidade científica internacional por ter a capacidade de modelar e/ou reduzir praticamente todos os erros envolvidos no posicionamento GPS. Detalhes do *software* são apresentados no Apêndice A.

Utilizando o *software* Bernese foi possível obter um arquivo com as ambigüidades das DDs. O procedimento utilizado é descrito no Apêndice A, seção A.3. Posteriormente, foi implementada uma rotina de leitura desse arquivo e então as ambigüidades fixas foram utilizadas no sistema desenvolvido.

Algo que deve ser salientado é que mesmo o *software* Bernese não soluciona 100% das ambigüidades. Nos testes realizados a taxa de solução das ambigüidades gira em torno de 82%. Portanto, é necessário descartar observações da fase, pois apenas as observações que obtiveram sucesso na solução das ambigüidades podem ser utilizadas.

5.1.5.3. Determinando o Erro Residual na Posição da VRS

Após a solução das ambigüidades é necessário obter o erro residual das DDs como descrito na seção 4.2.2, para em seguida recuperar o erro residual da observável original e interpolar para a posição da VRS. O erro residual é recuperado utilizando o procedimento descrito na seção 4.2.3 e a interpolação é realizada utilizando a equação do plano apresentada

na seção 4.2.4.1 ou a ponderada apresentada na seção 4.2.4.2. No capítulo 6 são apresentados os resultados comparando os dois tipos de interpolação.

5.1.5.4. VRS

Da mesma forma que na seção 5.1.4.3 os dados da VRS foram gerados no formato RINEX. Os capítulos 6 e 8 apresentam os resultados obtidos.

5.2. Rede GPS Ativa do Oeste do Estado de São Paulo

A Figura 17 apresenta a configuração atual da rede GPS ativa no oeste do estado de São Paulo. Em um futuro próximo também será instalada uma estação em Araçatuba. A rede é composta por:

- 2 estações do projeto “Rede GPS ativa do Estado de São Paulo: suporte ao posicionamento geodésico” financiado pela FAPESP (Ourinhos - OURI e São José do Rio Preto - SJRP);
- 3 estações do projeto “Multiusuário” (Ilha Solteira - ILHA, Lins – LINS, e futuramente Araçatuba), também financiado pela FAPESP;
- 1 estação com receptor doado pelo INCRA (Rosana - ROSA);
- Estação de Presidente Prudente - PPTE, cujo receptor foi doado à UNESP pela *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR). A estação PPTE, além de integrar a rede do Estado de São Paulo também pertence a RBMC e ao projeto *Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate* (COSMIC) (LEE, ROCKEN e KURSINSKI, 2000).

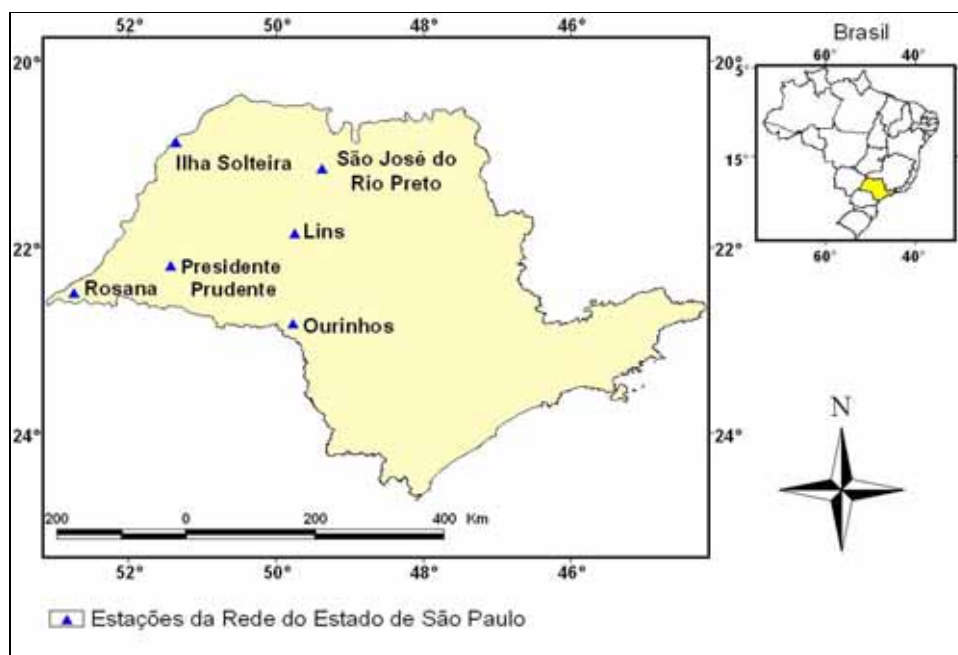


Figura 17 – Composição da rede GPS ativa no extremo Oeste do Estado de São Paulo

As estações da rede do estado de São Paulo apresentadas na Figura 17 foram instaladas em unidades da UNESP e já estão em funcionamento. Em relação aos aspectos técnicos, todas as estações possuem receptores GPS de dupla frequência (L1 e L2) coletando dados continuamente. As estações OURI, PPTE, SJRP, e futuramente a de Araçatuba, possuem receptores TRIMBLE NETRS com antenas Zephyr Geodetic. A estação ROSA é equipada com um receptor TRIMBLE NETR5 e antena Zephyr GNSS Geodetic model 2. Já as estações ILHA e LINS possuem receptores LEICA GRX12000 GG Pro com antenas LEIAX 1202 GG. O *software* GPSNet é responsável por baixar e monitorar os receptores da TRIMBLE e o *software* SPIDER é responsável pelos receptores da LEICA. Mais detalhes podem ser encontrados em Motoki et al. (2006) ou on-line na página <<http://gege.prudente.unesp.br/>>.

No que se refere aos dados coletados pelos receptores da rede, estes também são disponibilizados através da internet na página citada anteriormente. Até o momento, são disponibilizados arquivos RINEX a cada uma hora com intervalo de coleta de 1 segundo e arquivos RINEX a cada dia com intervalo de coleta de 15 segundos. Além disso, os dados podem ainda ser acessados em tempo real na internet através do protocolo *Network of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP) (WEBER et al., 2005). O *software* que pode ser utilizado para acessar os dados em tempo real é encontrado para *download* de forma gratuita no site <<http://igs.bkg.bund.de/>>.

5.2.1. Obtenção das Coordenadas de Referência

Para aplicar a metodologia proposta nesse trabalho, é indispensável conhecer as coordenadas de referência (consideradas verdadeiras) das estações da rede. No entanto, quando os testes foram realizados, as coordenadas das estações da rede do Estado de São Paulo ainda não haviam sido homologadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cabe salientar que a PPTE já está homologada, pois faz parte da RBMC.

Para determinar as coordenadas das estações da rede antes da homologação, os dados da rede foram processados no *software* científico Bernese 5.0, o qual também é utilizado pelo IBGE. Foram processados 5 dias de dados, obtendo uma solução diária e então as soluções foram combinadas para obter uma solução final. Além disso, foram utilizados dados de estações da RBMC com coordenadas conhecidas. Maiores detalhes podem ser vistos no apêndice A, seção A.3.

5.2.2. Descrição da Campanha Realizada

Com o objetivo de utilizar dados da rede do Estado de São Paulo nessa pesquisa, foi realizada uma campanha com dois receptores de dupla frequência em um sítio no município de Parapuã no período de 20/12/2006 a 04/01/2007 (Figura 18). O intervalo de coleta de dados adotado foi de 15 segundos e a máscara de elevação de 10°. Observando a Figura 18 pode-se perceber que a estação LINS não está presente. Isso se deve ao fato de que na data da coleta de dados a estação LINS ainda não havia sido instalada (a instalação ocorreu apenas no mês de Junho de 2007).

Foram utilizados dois receptores Hiper GGD da Topcon, uma antena Ashtech Marine L1/L2 (B) da Ashtech e uma antena Zephyr Geodetic da TRIMBLE.

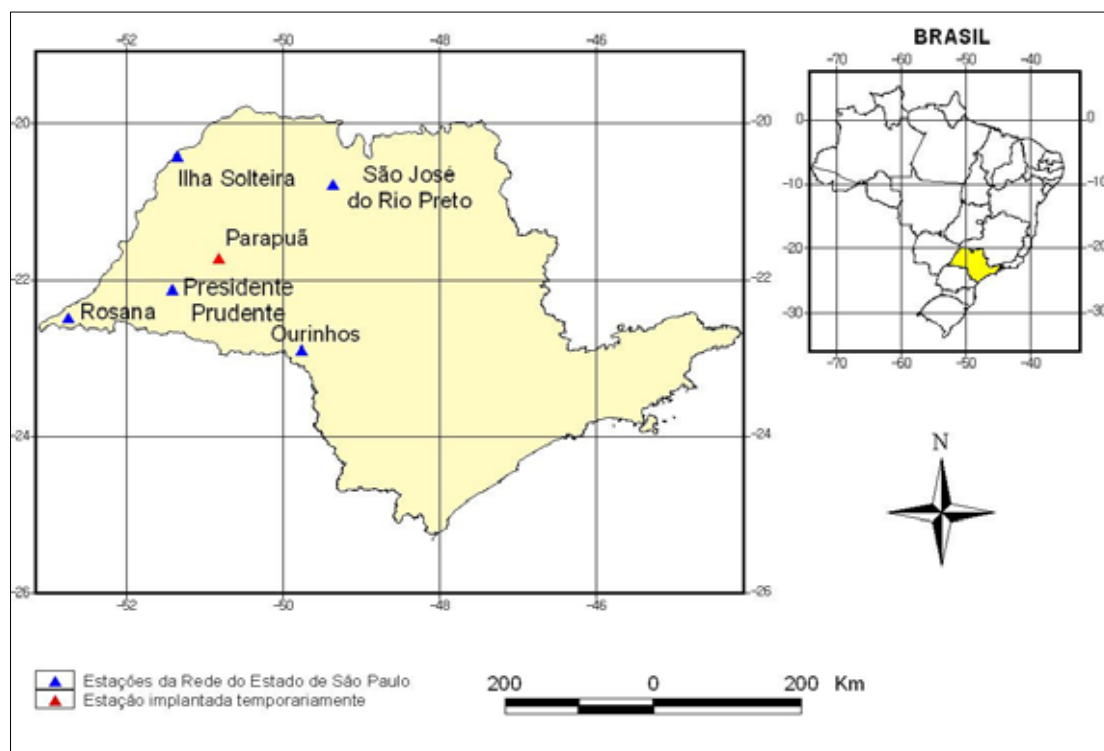


Figura 18 – Estação implantada temporariamente e estações em funcionamento da Rede do Estado de São Paulo

Para minimizar os efeitos do multicaminho as duas antenas foram instaladas sobre uma base de madeira fixada no telhado de uma casa em um sítio localizado no município de Parapuã. Os receptores, cada um ligado a uma antena, permaneceram dentro da casa. A Figura 19 ilustra a disposição das antenas.



Figura 19 – Disposição das antenas GPS no experimento realizado no município de Parapuã

A base de madeira foi fixada a uma altura do chão de aproximadamente 4,9 m. A distância entre os dois pontos onde foram instaladas as antenas é de 40 cm. A altura vertical da antena da Ashtech até a base de madeira é de 10,9 cm. Já para a antena da TRIMBLE essa altura é de 13,0 cm. Cabe ressaltar que foram utilizados dados de apenas um dos receptores. A instalação do segundo receptor visou proporcionar garantia de coleta de dados no experimento.

Embora os dados tenham sido coletados por um período de 16 dias, os experimentos foram realizados apenas para os dias 28, 29 e 30 de dezembro de 2006 (dias 362, 363 e 364) e 02 de janeiro de 2007 (dia 002), 24 horas de dados por dia. Foram selecionados esses dias devido à disponibilidade dos dados da rede do estado de São Paulo bem como dos arquivos de PNT.

5.2.3. Experimentos Realizados

Como descrito no capítulo 4, são analisadas nessa pesquisa duas metodologias distintas para gerar dados de fase da onda portadora da VRS e três para dados de pseudodistância. Nesse sentido, o capítulo 6 trata das diferentes metodologias desenvolvidas para dados de pseudodistância. Já o capítulo 7 é dedicado a metodologia descrita na seção 4.1, onde a VRS é gerada utilizando modelos atmosféricos, sem solucionar as ambigüidades. Para avaliar a qualidade dos dados gerados para a VRS, diversas estratégias de processamentos foram aplicadas. Finalizando os testes, o capítulo 8 descreve os resultados e análises obtidos para a metodologia descrita na seção 4.2, onde as DDs devem ser calculadas e, após solução do vetor de ambigüidades, o erro residual das DDs é utilizado para determinar as correções aplicadas a VRS.

Além disso, alguns detalhes são comuns a todas as metodologias:

- A VRS foi gerada na posição da estação PPTE, sendo que os dados da estação PPTE foram utilizados apenas para comparação;
- Os resultados apresentam comparações entre as coordenadas obtidas pela VRS e as coordenadas de referência;
- A estação de Parapuã (SEM2) foi considerada estação base, pois é a estação que está mais próxima da posição da VRS (aproximadamente 75 km).

6. ANÁLISE DA VRS GERADA A PARTIR DE DADOS DE PSEUDODISTÂNCIA

Nesse capítulo são analisados os dados de pseudodistância, observável C1, da VRS. Foram utilizadas 3 metodologias distintas para gerar os dados de C1:

- Metodologia 1 - dados gerados a partir de modelos atmosféricos (seção 4.1);
- Metodologia 2 - dados gerados a partir do erro residual de DDs das estações de referência da rede (seção 4.2);
- Metodologia 3 - dados gerados a partir do erro residual da observável original (seção 4.3).

Além dessas 3 metodologias descritas para gerar a VRS, outros pontos são analisados nesse capítulo. Dentre eles, o método de interpolação utilizado nas metodologias 2 e 3, isto é, o método de interpolação ponderada pela distância ou método de interpolação através da equação de um plano (seção 4.2.4).

6.1. Processamentos dos Dados e Análises dos Resultados

Para analisar a qualidade da VRS gerada, alguns testes foram realizados utilizando o PP (MONICO, 2000; SEEGER, 2003) e o DGPS (DALBELO et al., 2005a, 2005b; SEEGER, 2003).

No que se refere ao PP, os arquivos de dados da VRS gerados foram processados no *software* disponível no site <http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php> do *Natural Resources Canada* (NRCan). O processamento foi realizado tanto para o modo estático como cinemático no modo pós-processado. Além disso, também foi processado no PP o arquivo real da estação PPTE (posição no qual a VRS foi gerada). Nessa estratégia de processamento apenas a observável C1 foi utilizada.

Em se tratando do DGPS, foi utilizado o sistema desenvolvido por Dalbello et al. (2005a, 2005b). Nesse processamento, a VRS foi considerada estação base e a estação OURI (cujas coordenadas são conhecidas) foi considerada móvel. Além da linha de base VRS-OURI (aproximadamente 180 km) também são apresentados os resultados do processamento da linha de base PPTE-OURI, ambos processamentos realizados como simulação. Novamente a observável C1 foi empregada.

Cabe acrescentar que para gerar a VRS utilizando o erro residual das DDs ou a observável original foram utilizados dois métodos diferentes de interpolação das correções: interpolação utilizando a equação de um plano (seção 4.2.4.1) e interpolação ponderada pela distância (seção 4.2.4.2).

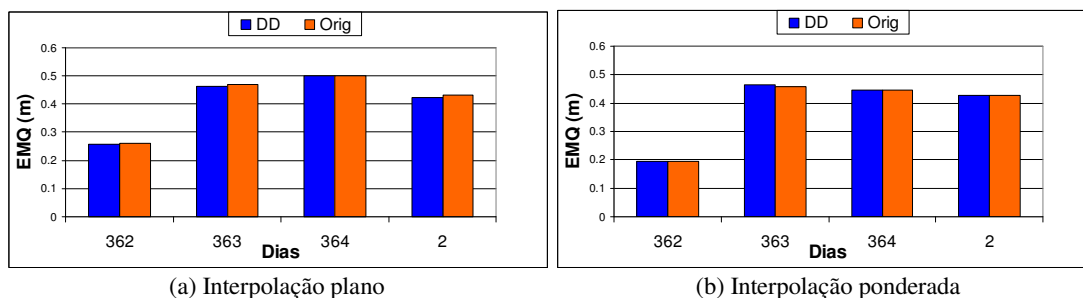
Durante o desenvolvimento da pesquisa, parte dos resultados das seções 6.1.2 e 6.1.3.1 foi divulgada em periódicos e eventos científicos (ALVES, MONICO e DALBELO, 2007b; ALVES, MONICO e DALBELO, 2007c).

6.1.1. VRS Gerada a Partir do Erro Residual de DDs × VRS Gerada a Partir da Observável Original

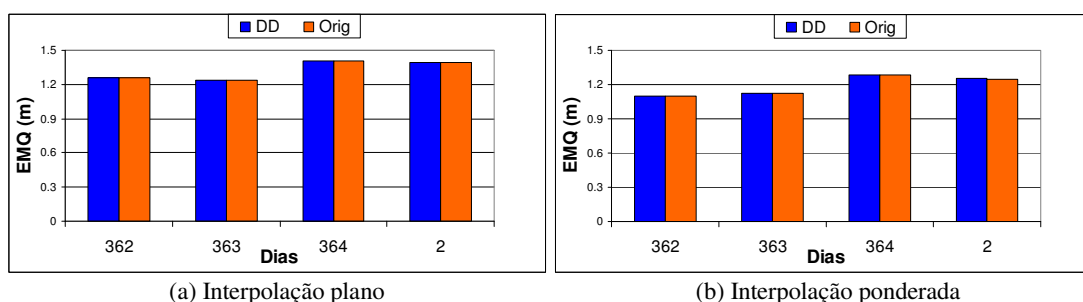
Essa seção visa analisar as diferenças obtidas para os dados da VRS gerados pelas metodologias 2 e 3, isto é, dados da VRS gerados a partir do erro residual das DDs ou a partir da observável original.

Uma dúvida que pode surgir é porque calcular as DDs da pseudodistância e então utilizar todo o procedimento descrito na seção 4.2.3, visto que é possível obter seu erro residual diretamente da observável original (como descrito em 4.3 – metodologia 3). A resposta a essa pergunta é a seguinte: a metodologia 2 foi aplicada para a pseudodistância com o objetivo de verificar a eficiência do procedimento utilizado para recuperar o erro residual da observável original a partir das DDs. Essa análise é muito importante, pois para dados de pseudodistância as metodologias 2 e 3 podem ser aplicadas sem problemas. No entanto, quando são utilizados dados da fase da onda portadora, apenas a metodologia 2 pode ser aplicada, pois nesse caso é indispensável o cálculo das DDs devido à solução do vetor de ambigüidades. Assim sendo, espera-se que os resultados obtidos pelas metodologias 2 e 3 sejam semelhantes, o que irá assegurar o bom funcionamento do método de recuperação do erro da observável original a partir de dados de DDs.

Para analisar as duas metodologias propostas, os dados de C1 da VRS foram processados no PP. As coordenadas obtidas pela VRS foram comparadas com as coordenadas de referência. A Figura 20 apresenta o EMQ obtido no PP modo estático com a VRS gerada pelas metodologias 2 e 3. A metodologia 2 é denominada nos gráficos por *DD*, enquanto a metodologia 3 é chamada de *Orig*. Na Figura 20 (a) é utilizada a interpolação através de um plano. Já a Figura 20 (b) traz os resultados quando a interpolação ponderada pela distância é aplicada. A Figura 21 apresenta as mesmas variáveis, mas para o PP no modo cinemático.



(a) Interpolação plano (b) Interpolação ponderada
 Figura 20 – EMQ obtido no PP modo estático com C1 gerado a partir das DDs ou pela observável original



(a) Interpolação plano (b) Interpolação ponderada
 Figura 21 - EMQ obtido no PP modo cinemático com C1 gerado a partir das DDs ou pela observável original

Observando a Figura 20 pode-se notar que os resultados apresentados pelas metodologias 2 e 3 são praticamente idênticos, diferenças ocorrem apenas na casa dos milímetros. Isso ocorre tanto para a interpolação através do plano como pela interpolação ponderada. No que concerne às diferenças obtidas pelos dois métodos de interpolação (comparando a Figura 20 (a) com a Figura 20 (b)), nas próximas seções análises mais criteriosas referentes a esse tema serão realizadas. Além disso, quando se avalia os resultados apresentados no PP modo cinemático, Figura 21, as mesmas considerações podem ser feitas.

Com isso, pode-se verificar que a metodologia utilizada para recuperar o erro residual da observável original a partir das DDs é eficiente. Assim, nas próximas seções, apenas a metodologia 2 será aplicada.

6.1.2. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS Gerados por Diferentes Estratégias no PP

Nessa seção, são apresentadas comparações entre os resultados obtidos para os dados da VRS gerados por diferentes estratégias. Assim, comparece nos resultados 4 designações distintas: Modelos (VRS gerada por DG+MOD+PNT – metodologia 1); Int. Plano (VRS gerada através do erro residual das estações utilizando um plano para

interpolação – metodologia 2 ou 3); Int. Ponderada (VRS gerada através do erro residual das estações utilizando interpolação ponderada – metodologia 2 ou 3); Arquivo Real (Processamento realizado com a estação real PPTE).

Como na seção anterior, todos os arquivos gerados para a VRS foram processados no *software* de PP, tanto no modo estático como no modo cinemático. As coordenadas obtidas com os dados da VRS gerados foram comparadas com as coordenadas de referência.

A Figura 22 apresenta o EMQ para a componente planimétrica (EMQ RP) obtida no PP estático. Já a Figura 23 traz os valores para a componente altimétrica (EMQ RA).

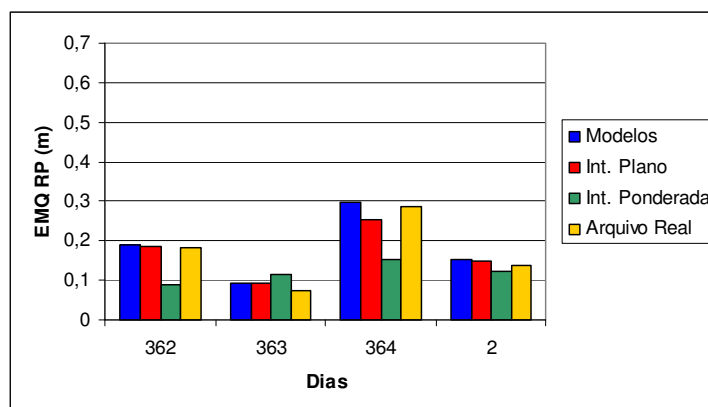


Figura 22 – EMQ para a componente planimétrica obtida no PP estático

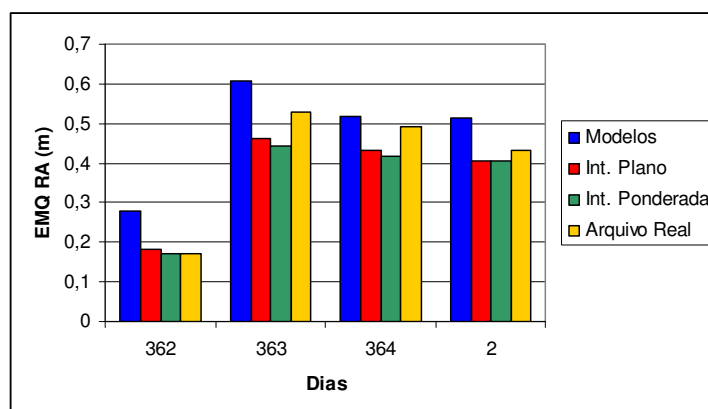


Figura 23 - EMQ para a componente altimétrica obtida no PP estático

Analisando a Figura 22 e a Figura 23 percebe-se que para todos os dias as maiores discrepâncias foram apresentadas pela VRS gerada por modelos atmosféricos

(metodologia da seção 4.1). Já as menores discrepâncias foram obtidas quando os dados da VRS gerados por interpolação ponderada foram utilizados (metodologia da seção 4.2).

Outro ponto a ser destacado é que os valores de EMQ obtidos pela VRS utilizando interpolação ponderada ou interpolação pelo plano são muito próximos daqueles apresentados pelo arquivo real, mostrando a eficiência do método proposto.

A Tabela 03 apresenta o EMQ Resultante obtido no PP estático.

Tabela 03 – EMQ Resultante obtido no PP estático (m)				
Dia	Modelos	Int. Plano	Int. Ponderada	Arquivo Real
362	0,34	0,26	0,19	0,25
363	0,62	0,47	0,46	0,53
364	0,60	0,50	0,45	0,57
2	0,54	0,43	0,43	0,45
Média	0,52	0,42	0,38	0,45

Observando a Tabela 03, os resultados da Figura 22 e Figura 23 se confirmam. Pode-se perceber que em média o EMQ resultante para a VRS gerada com interpolação ponderada é de 38 cm, enquanto para a VRS gerada por modelos tem-se 52 cm, uma diferença de 14 cm (um aumento de 37% em relação a VRS gerada por interpolação ponderada). Já para a VRS gerada com interpolação de um plano o EMQ médio é de 42 cm, apenas 4 cm de diferença (aumento de 10,5%) se comparado à interpolação ponderada.

Os mesmos testes foram realizados para o PP modo cinemático. A Figura 24 apresenta o EMQ para a componente planimétrica. Já a Figura 25 traz os valores obtidos para a componente altimétrica.

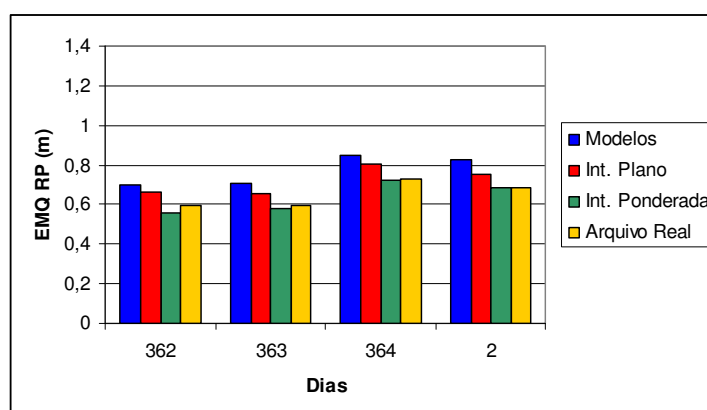


Figura 24 – EMQ para a componente planimétrica obtida no PP cinemático

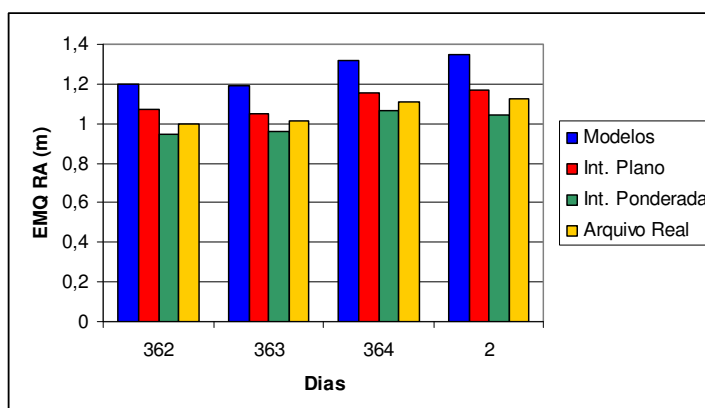


Figura 25 - EMQ para a componente altimétrica obtida no PP cinemático

A Tabela 04 apresenta os valores do EMQ resultante para o PP no modo cinemático.

Tabela 04 - EMQ Resultante obtido no PP cinemático (m)

Dia	Modelos	Int. Plano	Int. Ponderada	Arquivo Real
362	1,39	1,26	1,10	1,16
363	1,39	1,24	1,12	1,18
364	1,57	1,41	1,29	1,33
2	1,58	1,39	1,25	1,31
Média	1,48	1,32	1,19	1,24

Analisando a Tabela 04, a Figura 24 e a Figura 25 nota-se que da mesma forma que no PP estático, as menores discrepâncias foram obtidas para a VRS gerada utilizando interpolação ponderada, em média 1,19 m para o EMQ resultante. Já para a VRS gerada por modelos também foram obtidos os piores resultados, em média 1,48 m. Além disso, os valores obtidos para a VRS são similares àqueles obtidos para o arquivo real, principalmente quando a interpolação ponderada é utilizada.

Além disso, cabe acrescentar que, como esperado, os valores do EMQ obtidos pelo PP no modo cinemático são maiores que os obtidos no modo estático. No que concerne a comparação entre os resultados obtidos para a componente planimétrica e altimétrica, as menores discrepâncias são obtidas para a planimetria.

Finalizando, a Tabela 05 apresenta os valores médios do EMQ obtidos entre os 4 dias de processamento.

Tabela 05 – Valor médio do EMQ obtido no modo estático e cinemático (m)

	PP Estático	PP Cinemático
Modelos	0,522	1,480
Int. Plano	0,416	1,324
Int. Ponderada	0,381	1,189
Arquivo Real	0,452	1,244

Analisando a Tabela 05, no modo estático, percebe-se uma melhoria de 27% nos resultados da VRS gerada utilizando interpolação ponderada se comparado com a VRS gerada por modelos. Em relação ao cinemático essa melhoria foi de 19,6%. Já em relação a VRS gerada aplicando a interpolação através de um plano, ocorre uma melhoria de aproximadamente 8,4% quando se utiliza a VRS gerada utilizando interpolação ponderada no modo estático. No modo cinemático essa melhoria é de 10%.

6.1.3. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS Gerados por Diferentes Estratégias no DGPS

Nessa seção o método de posicionamento DGPS foi aplicado para testar as diferentes VRSs geradas. O DGPS foi realizado para as linhas de base PPTE-OURI e VRS-OURI. Os resultados obtidos foram comparados com as coordenadas da estação OURI.

6.1.3.1. VRS Gerada Apenas por Modelos Atmosféricos

Nessa seção são apresentadas comparações entre a VRS gerada por DG, DG+MOD, DG+PNT, DG+HOP e DG+MOD+PNT. Tais designações são descritas na Tabela 02 e englobam a metodologia 1 citada no início desse capítulo, ou seja, VRS gerada por modelos atmosféricos. Cabe acrescentar que os resultados apresentados pelos MGI não são apresentados pois não trouxeram melhorias na geração da VRS. Isso já era esperado devido a escala global de tais modelos.

A Tabela 06 apresenta o EMQ médio obtido para as 24 h de dados de cada um dos dias processados.

Tabela 06 – EMQ resultante obtido pelo DGPS (cm)

Dia	PPTE	DG	DG+MOD	DG+PNT	DG+HOP	DG+MOD+PNT
362	142,90	156,02	157,89	158,92	158,66	162,08
363	149,69	161,88	162,73	165,46	164,90	167,43
364	156,23	165,25	165,92	167,70	167,39	169,77
002	161,71	166,07	166,82	170,21	169,65	172,03
Média	152,63	162,30	163,34	165,57	165,15	167,83

Observando a Tabela 06 nota-se que a magnitude do erro no DGPS é métrica. Mas isto é esperado, visto que no DGPS é utilizada apenas a observável C1. Além disso, de acordo com Seeber (2003), o DGPS proporciona uma acurácia de 1 a 3 m dependendo da distância da estação base. Portanto, como nesse caso a linha de base é de aproximadamente 180 km, os resultados são satisfatórios.

Analisando a Tabela 06 nota-se que para o arquivo real o RMS é em média 152,63 cm. Já quando se utiliza a VRS o RMS médio está entre 162,30 cm e 167,83 cm, uma piora de apenas 6,3% a 10% respectivamente. Além disso, o EMQ obtido pela VRS gerada por DG+PNT e DG+HOP são praticamente idênticos, portanto para as demais análises será utilizada a VRS gerada com o modelo de PNT. Essa escolha foi realizada, pois o modelo de PNT foi desenvolvido especificamente para a América do Sul, e condiz com a realidade troposférica brasileira.

Para analisar o comportamento época por época das coordenadas, a Figura 26 apresenta a discrepância da Resultante Planimétrica (RP) quando é utilizada como base a estação PPTE e a VRS gerada pelo modo DG+MOD+PNT (dia 362 de 2006). Já a Figura 27 traz os valores da Resultante Altimétrica (RA). Os gráficos dos demais dias não são apresentados porque apresentam resultados similares.

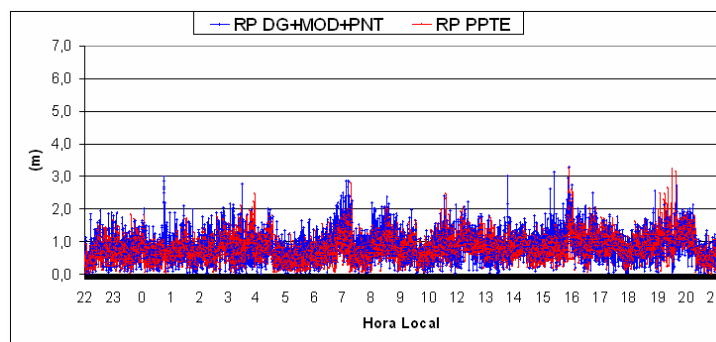


Figura 26 – RP obtida com o DGPS usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT

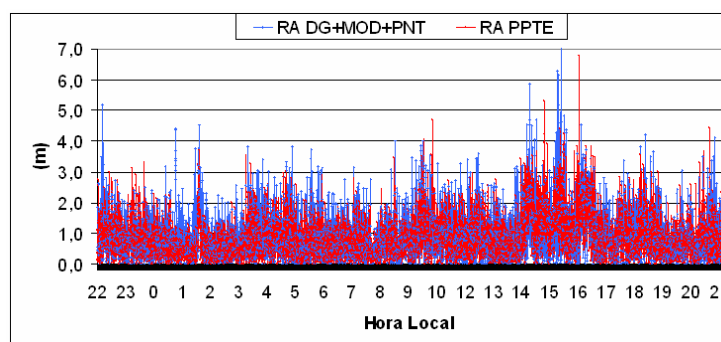


Figura 27 – RA obtida com o DGPS usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT

Observando a Figura 26 e a Figura 27 pode-se perceber que o comportamento época por época tanto em planimetria como em altimetria é similar. No entanto, os valores obtidos com a VRS são ligeiramente maiores. Além disso, pode-se perceber que, como esperado, as discrepâncias obtidas para a componente altimétrica são maiores. Outro ponto que pode ser destacado é o aumento das discrepâncias na RA ente 14 e 17 h local. Isso pode ter ocorrido devido ao efeito da ionosfera que, como se sabe, é mais relevante por volta das 14 h local.

Algo interessante que também pode ser avaliado está relacionado com o comportamento dos diferentes modos da VRS no processamento cinemático. Para verificar a diferença entre a VRS obtida por DG e DG+MOD+PNT, a Figura 28 e a Figura 29 apresentam as RP e RA respectivamente.

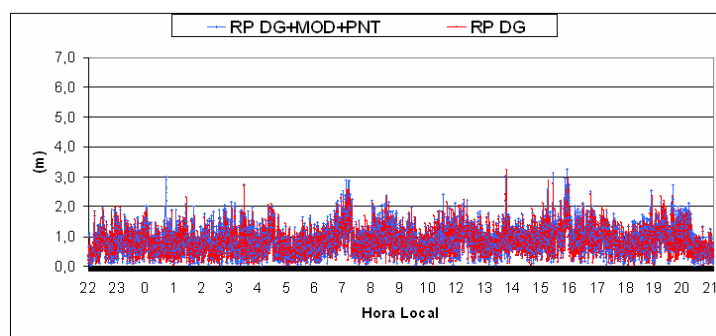


Figura 28 – RP obtida com o DGPS usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT

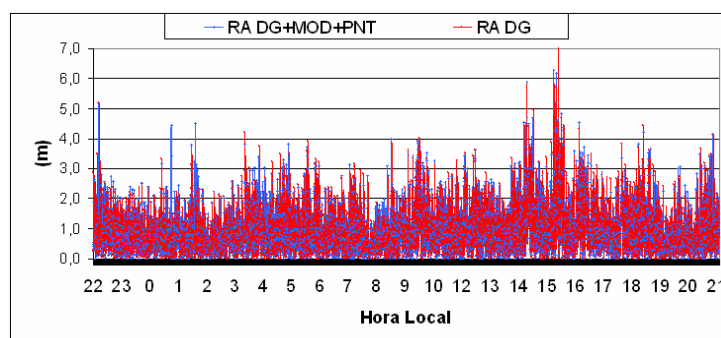


Figura 29 – RA obtida com o DGPS usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT

A Figura 28 e a Figura 29 mostram que as discrepâncias têm o mesmo comportamento e magnitude para os dois modos da VRS gerada. Analisando a Figura 29 também pode-se perceber um aumento da discrepância entre as 14 e 17 h local.

Outro fator importante é que utilizando o DGPS, diferentemente do PPP (seção 7.1.1) e do posicionamento relativo (seção 7.1.2), a VRS gerada com modelos atmosféricos não apresenta melhorias se comparada com a VRS gerada sem tais modelos. Isso deve ter ocorrido pois, como dito anteriormente, no DGPS é utilizada apenas a observável C1 que é mais ruidosa. Portanto, os resultados podem ser afetados pelos resíduos da observável.

Algo que deve ser ressaltado diz respeito a modelagem da ionosfera. Como pôde ser observado nos resultados, a VRS gerada utilizando o Mod_Ion_FK não apresentou melhorias significantes. Isso pode ter ocorrido devido ao fato da coleta de dados ter sido realizada em um período de baixa atividade ionosférica, onde o índice KP (NOAA, 2007) se manteve inferior a 3 para os dias 362, 363 e 364 (28, 29 e 30 de Dezembro de 2007). Uma variação maior só ocorreu para o dia 002 (2 de Janeiro de 2007), onde se manteve igual a 5 para 3h de dados (Figura 30).

O valor máximo que o índice KP pode atingir é 9, no qual a ionosfera é considerada em condições extremas. Para os dias em que o índice é menor que 4, a ionosfera é tida como calma. Dessa forma, mesmo para o dia 002, onde o KP chegou a 5 (Figura 30), a ionosfera é ainda considerada com pequenas alterações.

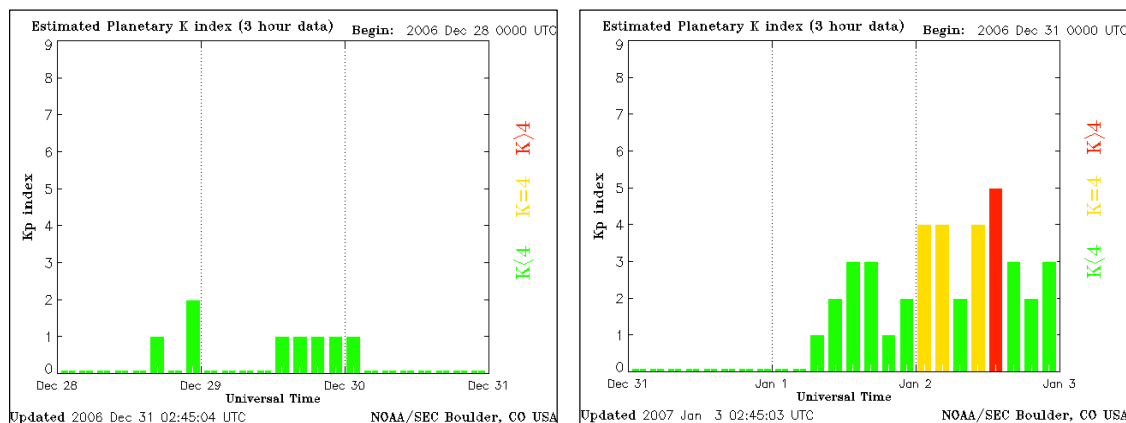


Figura 30 – Índice KP para o dia do processamento dos dados
 Fonte: Disponível em <http://www.sec.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>.

6.1.3.2. VRS Gerada por Diferentes Metodologias

Nessa seção, são apresentados os resultados obtidos pela VRS utilizando diferentes metodologias: Modelos (VRS gerada por DG+MOD+PNT – metodologia 1); Int. Plano (VRS gerada através do erro residual das estações utilizando um plano para interpolação – metodologia 2 ou 3); Int. Ponderada (VRS gerada através do erro residual das estações utilizando interpolação ponderada – metodologia 2 ou 3). Além disso, o arquivo Real (PPTE) também foi utilizado como base.

Na Figura 31 são apresentados os resultados do EMQ para a componente planimétrica obtida no DGPS. Já a Figura 32 traz os valores para a componente altimétrica.

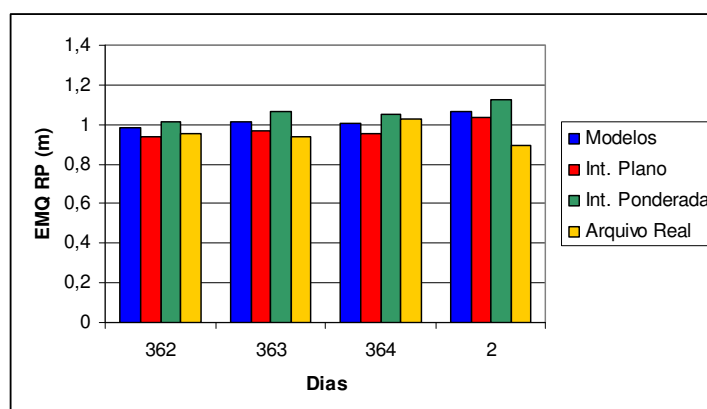


Figura 31 – EMQ para a componente planimétrica obtida no DGPS

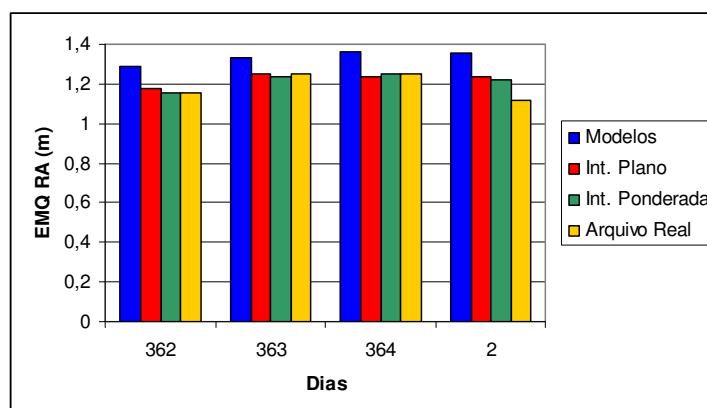


Figura 32 – EMQ para a componente altimétrica obtida no DGPS

Na Figura 31 é possível perceber que no que concerne a VRS, os melhores resultados são apresentados pela VRS gerada utilizando a interpolação de um plano. Já analisando a Figura 32, a VRS gerada por interpolação ponderada é mais eficiente. Além disso, os valores obtidos são muito próximos daqueles apresentados pelo arquivo real da estação PPTE.

Os valores do EMQ Resultante são ilustrados na Tabela 07.

Tabela 07 - EMQ Resultante obtido DGPS (m)

Dia	Modelos	Int. Plano	Int. Ponderada	Arquivo Real
362	1,62	1,51	1,53	1,43
363	1,67	1,58	1,63	1,50
364	1,70	1,56	1,63	1,56
002	1,72	1,61	1,66	1,62
Média	1,68	1,57	1,62	1,53

Analisando a Tabela 07 pode-se perceber que, em média, a VRS gerada utilizando a interpolação através de um plano obteve uma melhoria de 6,5% se comparado a VRS gerada por modelos. Já a VRS gerada com interpolação ponderada, obteve uma melhoria de 3,6%. Portanto, a VRS gerada através do erro residual de DDs apresenta os melhores resultados.

7. RESULTADOS OBTIDOS COM A VRS GERADA UTILIZANDO MODELOS ATMOSFÉRICOS

Esse capítulo trata dos resultados obtidos e análises realizadas com a VRS gerada utilizando modelos atmosféricos, tanto para dados da fase da onda portadora (sem solução das ambigüidades) como de pseudodistância. Os dados da rede do Oeste do Estado de São Paulo foram utilizados em todos os experimentos. Em Alves et al. (2006b) e Monico et al. (2006) são apresentados resultados de outros experimentos realizados previamente com dados de outras estações de referência.

7.1. Processamentos e Análises

Para analisar a qualidade da VRS gerada, alguns testes foram realizados utilizando o PPP (HÉROUX et al., 2004; MONICO, 2000; ZUMBERGE, et al., 1997) e o posicionamento relativo (MONICO, 2000; SEEGER, 2003).

No que concerne ao PPP, os arquivos de dados da VRS gerados pelo sistema desenvolvido na pesquisa foram processados num *software* de PPP pós-processado do NRCan. Além disso, o arquivo real de dados do ponto onde foi gerada a VRS também foi processado no PPP.

No que diz respeito ao posicionamento relativo, o *Trimble Geomatics Office* (TGO) versão 1.63 foi utilizado. As linhas de base VRS-OURI e PPTE-OURI foram utilizadas no posicionamento relativo. Tal processamento foi realizado no modo estático e cinemático utilizando a observável *Ion-Free float*. Além disso, foi realizado o posicionamento relativo entre os dados reais da estação PPTE e os dados gerados para a VRS na mesma posição. A estação VRS foi mantida como estação base. Como estratégia de processamento foi utilizado a solução L1 *float*.

Parte dos resultados obtidos com os experimentos realizados nessa seção foram publicados em periódicos e eventos nacionais e internacionais (ALVES, MONICO e DALBELO, 2007a; ALVES, MONICO e DALBELO, 2007c; ALVES et al., 2007a; ALVES et al., 2007c).

7.1.1. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS no PPP

O *software* do NRCan que realiza o PPP, além das coordenadas estimadas também disponibiliza o ZTD estimado a partir dos dados da estação. Portanto, na seção 7.1.1.1 são apresentados os atrasos troposféricos obtidos pelo arquivo real (PPTE) e pela VRS gerada por DG, DG+PNT e DG+HOP. Espera-se que os resultados apresentados pelos procedimentos DG+PNT e DG+HOP se assemelhem daqueles apresentados pelo arquivo real. Além disso, o procedimento DG deve propiciar resultados piores, pois os dados da VRS não foram corrigidos da refração troposférica.

Para avaliar a qualidade das coordenadas cartesianas da estação obtidas no PPP com a VRS gerada, a seção 7.1.1.2 apresenta uma comparação entre as coordenadas de referência e as obtidas tanto para o arquivo real como para as VRSs geradas. Da mesma forma, espera-se que os piores resultados sejam apresentados pela VRS gerada pelo procedimento DG.

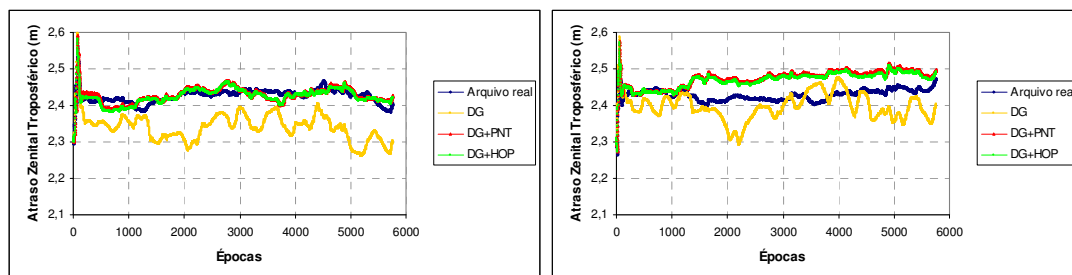
7.1.1.1. Avaliando o ZTD Estimado

A Tabela 08 apresenta o ZTD médio estimado através do PPP no modo estático e cinemático para a estação PPTE e para as VRSs geradas.

Tabela 08 – ZTD médio estimado para 24h de dados (m)					
Modo	Dia	PPTE	DG	DG+PNT	DG+HOP
Estático	362	2,43	2,34	2,43	2,42
	363	2,43	2,40	2,47	2,47
	364	2,48	2,42	2,51	2,51
	002	2,53	2,46	2,55	2,54
Cinemático	362	2,42	2,37	2,43	2,43
	363	2,43	2,40	2,47	2,47
	364	2,47	2,45	2,51	2,51
	002	2,52	2,49	2,55	2,54

Como pode ser observado na Tabela 08 os valores do ZTD obtidos pela VRS são próximos dos valores obtidos pelo arquivo real, principalmente para os modos DG+PNT e DG+HOP. Mas, observando a média do dia pode-se ter uma impressão errônea a respeito da performance da VRS gerada, portanto, se faz necessário observar o comportamento do ZTD época por época. Assim, como os melhores resultados são obtidos

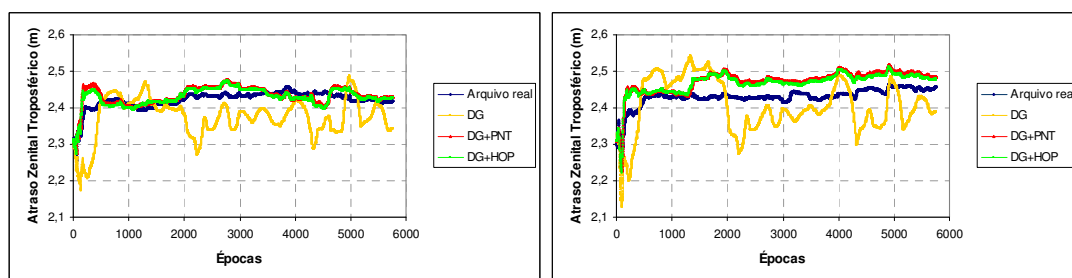
para o dia 362 e os piores para o dia 363, a Figura 33 mostra o comportamento do ZTD época por época do PPP modo estático para esses dois dias. Já a Figura 34 apresenta os resultados para o modo cinemático.



(a) Dia 362

(b) Dia 363

Figura 33 – ZTD obtido pelo PPP no modo estático



(a) Dia 362

(b) Dia 363

Figura 34 – ZTD obtido pelo PPP no modo cinemático

Observando a Figura 33 é possível verificar que, como esperado, os valores de ZTD apresentados pela VRS estimada por DG+PNT e DG+HOP apresentam os melhores resultados, até mesmo para o dia 363. Além disso, os resultados são similares para esses dois modos. Em relação à Figura 34, as mesmas conclusões podem ser adotadas.

Os resultados apresentados nessa seção mostram que os modelos de troposfera utilizados para gerar a VRS são adequados, pois os resultados do ZTD apresentados pela VRS são muito próximos dos apresentados pelo arquivo real.

7.1.1.2. Avaliando as Coordenadas Obtidas

Como pôde ser observado na seção anterior, os resultados apresentados pela VRS gerada por DG+PNT e DG+HOP foram similares. Portanto, nessa seção, apenas os resultados obtidos por DG+PNT serão apresentados.

As coordenadas cartesianas de referência foram comparadas com as coordenadas estimadas pelo PPP no modo estático e cinemático. A Figura 35 apresenta o EMQ da resultante planimétrica obtido com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas. Já a Figura 36 apresenta o EMQ da resultante altimétrica.

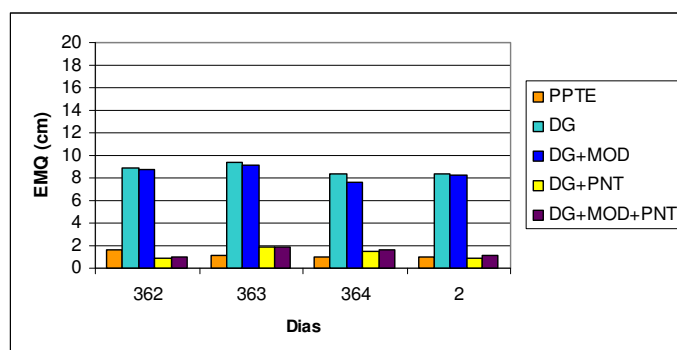


Figura 35 – EMQ obtido para a resultante planimétrica com o PPP no modo estático

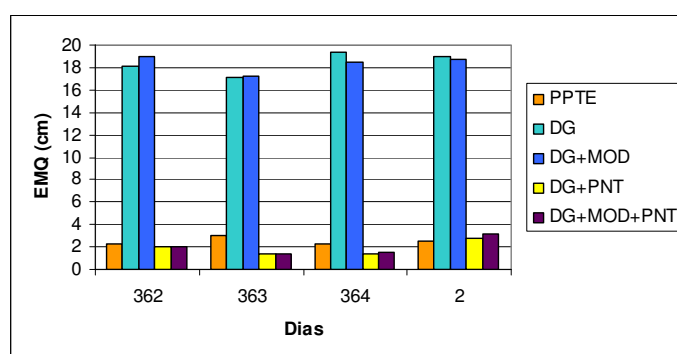


Figura 36 – EMQ obtido para a resultante altimétrica com o PPP no modo estático

Analisando a Figura 35 e a Figura 36 nota-se que em se tratando da VRS, os melhores resultados foram obtidos com os modos DG+PNT e DG+MOD+PNT, resultados esses muito similares aos obtidos para o arquivo real. Além disso, como esperado, o erro na resultante altimétrica é muito maior do que na resultante planimétrica. Enquanto em planimetria o EMQ chega a quase 10 cm para a VRS gerada por DG, em altimetria o valor é de aproximadamente 20 cm.

A Tabela 09 apresenta o EMQ da resultante obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 4 dias.

Tabela 09 – EMQ da resultante obtido pelo PPP estático (cm)

Dia	PPTE	DG	DG+MOD	DG+PNT	DG+MOD+PNT
362	2,77	20,11	20,92	2,18	2,20
363	3,24	19,48	19,46	2,29	2,38
364	2,51	21,09	19,95	2,04	2,20
002	2,69	20,78	20,51	2,85	3,28
Média	2,80	20,37	20,21	2,34	2,51

Analisando a Tabela 09 percebe-se a melhoria significativa alcançada pela VRS quando os modelos atmosféricos são aplicados. O EMQ que era em média 20,37 cm passou para 2,51 cm. Além disso, nota-se que na média o EMQ obtido pelo arquivo real é equivalente ao obtido pela VRS.

O EMQ da resultante planimétrica e altimétrica para o PPP no modo cinemático é apresentado na Figura 37 e Figura 38, respectivamente.

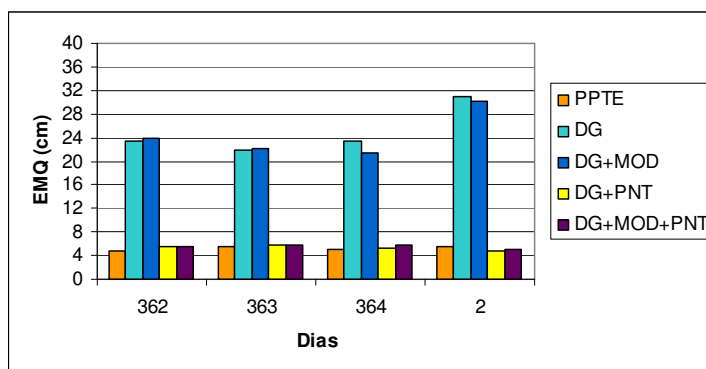


Figura 37 – EMQ obtido para a resultante planimétrica com o PPP no modo cinemático

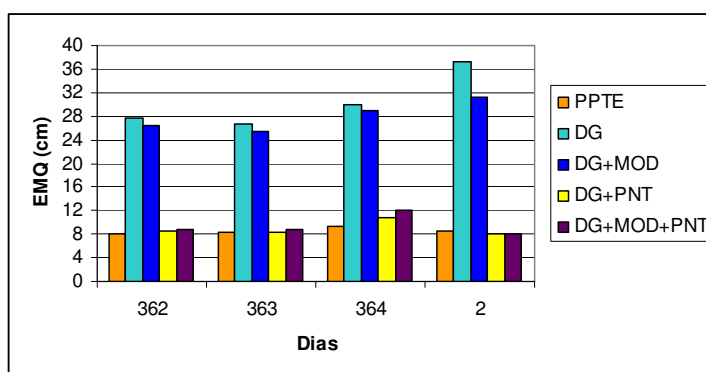


Figura 38 – EMQ obtido para a resultante altimétrica com o PPP no modo cinemático

Observando a Figura 37 e a Figura 38 pode-se notar que da mesma forma que no modo estático, a VRS gerada pelos modos DG+PNT e DG+MOD+PNT apresentam os

melhores resultados. Além disso, esses resultados também se assemelham aqueles apresentados pelo arquivo real. A Tabela 10 apresenta o EMQ da resultante.

Tabela 10 – EMQ da resultante obtido pelo PPP cinemático (cm)

Dia	PPTE	DG	DG+Mod	DG+PNT	DG+MOD+PNT
362	9,40	36,16	35,54	10,14	10,54
363	10,01	34,52	33,56	10,08	10,56
364	10,51	37,92	36,11	12,06	13,27
002	10,19	48,44	43,43	9,44	9,44
Média	10,03	39,26	37,16	10,43	10,95

Observando a Tabela 09 e a Tabela 10 pode-se perceber que o EMQ é maior para o posicionamento cinemático, onde as coordenadas são obtidas época por época. Mas, mesmo nesse tipo de posicionamento a VRS gerada apresentou grande eficiência no posicionamento.

7.1.2. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS no Posicionamento Relativo com o TGO

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos no posicionamento relativo utilizando o *software* TGO. Na seção 7.1.2.1 é analisado o EMQ da coordenada estimada para a estação OURI utilizando as linhas de base VRS-OURI e PPTE-OURI. Já na seção 7.1.2.2 são apresentadas as discrepâncias obtidas entre a estação PPTE (arquivo real) e a VRS. Além disso, é analisado o EMQ obtido.

7.1.2.1. Posicionamento Relativo VRS-OURI e PPTE-OURI

Da mesma forma que no DGPS (seção 6.1.3) foram utilizadas as linhas de base VRS-OURI e PPTE-OURI para avaliar a qualidade da VRS gerada. No entanto, no posicionamento relativo são utilizados dados de dupla frequência, pois a observável *Ion-Free* é empregada.

A Figura 39 apresenta o EMQ da resultante planimétrica (RP) obtido no posicionamento relativo (modo estático) com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas. Já a Figura 40 apresenta o EMQ da resultante altimétrica (RA).

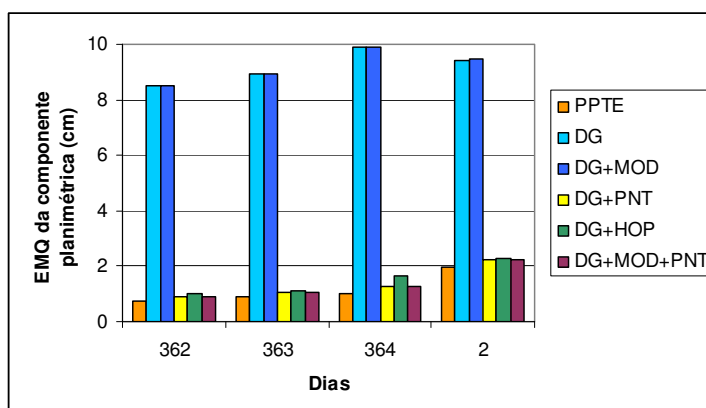


Figura 39 – EMQ para a componente planimétrica obtida no posicionamento relativo estático

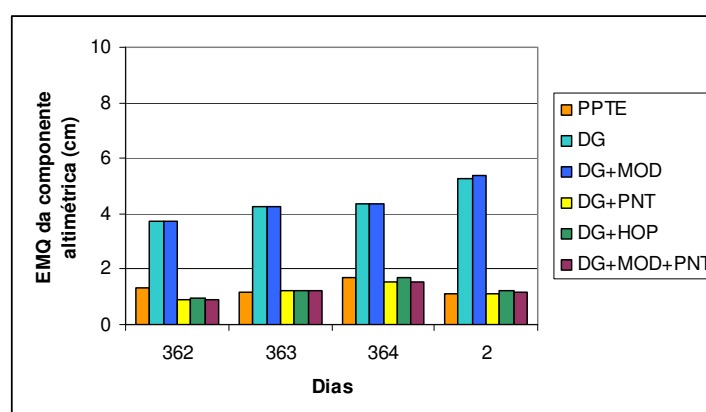


Figura 40 – EMQ para a componente altimétrica obtida no posicionamento relativo estático

Analisando a Figura 39 e a Figura 40 observa-se que, em se tratando da VRS, os valores obtidos pelos modos de processamento DG+PNT, DG+HOP e DG+MOD+PNT apresentam os melhores resultados. Constata-se ainda que, os resultados apresentados pelo arquivo real e os modos de VRS citados são similares.

A Tabela 11 apresenta o EMQ resultante e a média para os 3 dias de processamento.

Tabela 11 – EMQ resultante obtido pelo posicionamento relativo estático (cm)

Dia	PPTe	DG	DG+MOD	DG+PNT	DG+HOP	DG+MOD+PNT
362	1,51	9,28	9,28	1,28	1,38	1,28
363	1,46	9,89	9,89	1,60	1,66	1,60
364	1,96	10,82	10,82	2,01	2,36	2,01
002	2,24	10,79	10,87	2,50	2,60	2,53
Média	1,79	10,19	10,21	1,85	2,00	1,85

Como pode ser observado na Tabela 11 os resultados obtidos para os 4 dias de processamento são similares. Além disso, pode-se notar a eficiência da aplicação dos modelos atmosféricos. O RMS que é em média 10 cm com a VRS gerada apenas com correção geométrica (modo DG) é reduzido para 1,85 cm quando são aplicadas as correções atmosféricas (modo DG+MOD+PNT). Além disso, pode-se perceber que os resultados apresentados pela VRS gerada pelos modos DG+PNT e DG+HOP são similares.

No que concerne ao posicionamento relativo no modo cinemático, espera-se que os valores obtidos para o RMS sejam maiores, visto que esses são obtidos a cada época. A Tabela 12 apresenta os valores para esse modo de processamento. Os resultados da estação PPTE para o dia 002 não comparecem na Tabela 12, pois não foi possível realizar o processamento no *software* TGO.

Tabela 12 – EMQ resultante obtido pelo posicionamento relativo cinemático (cm)

Dia	PPTE	DG	DG+MOD	DG+PNT	DG+HOP	DG+MOD+PNT
362	5,96	21,36	21,34	6,05	6,03	6,05
363	5,64	21,48	21,46	5,93	5,93	5,93
364	6,99	26,70	26,68	6,25	6,48	6,25
002	----	26,51	26,52	8,39	8,39	8,41
Média	6,20	24,01	24,00	6,65	6,71	6,66

Observando a Tabela 12 pode-se perceber que, como esperado, a magnitude do EMQ é maior para o modo cinemático. No entanto, com respeito à qualidade da VRS gerada, as mesmas conclusões tomadas para o modo estático podem ser observadas para o cinemático.

Para verificar a variação época por época das coordenadas, a Figura 41 apresenta a discrepância da RP quando é utilizada como base a estação PPTE e a VRS gerada pelo modo DG+MOD+PNT para o dia 362 de 2006. Já a Figura 42 apresenta a RA.

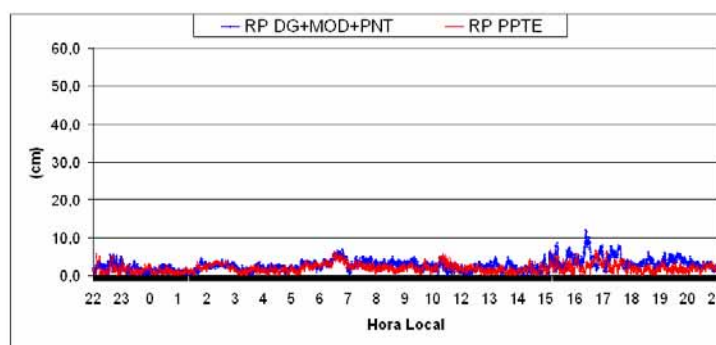


Figura 41 – RP obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT

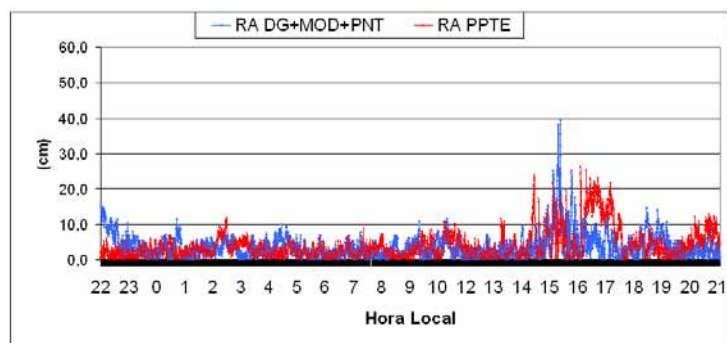


Figura 42 – RA obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT

Observando a Figura 41 e a Figura 42 nota-se que o comportamento época por época apresentado pelo arquivo real e pela VRS é similar, tanto para a componente planimétrica como altimétrica, o que reforça os resultados apresentados na Tabela 12. Além disso, pode-se perceber que, da mesma forma que no DGPS, as discrepâncias sofrem um aumento no período entre 14 e 17 h local.

A Figura 43 e a Figura 44 apresentam os valores das RP e RA para o modo da VRS que utiliza apenas o DG e o DG+MOD+PNT.

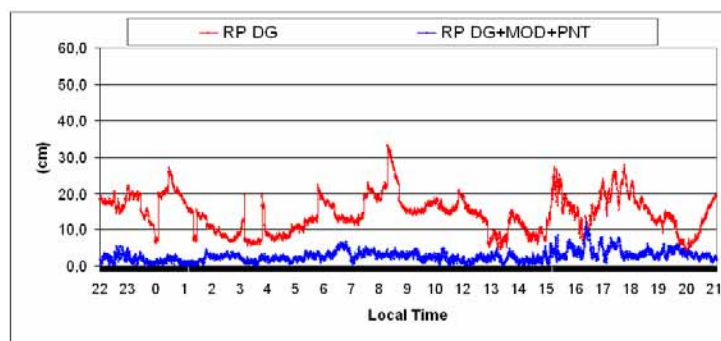


Figura 43 – RP obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT

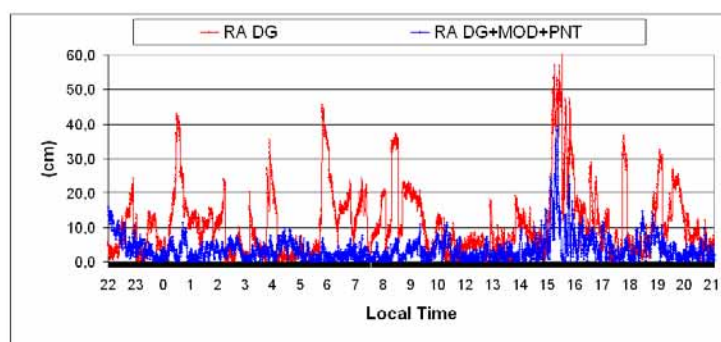


Figura 44 – RA obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT

Observando a Figura 43 e a Figura 44 percebe-se que os resultados possuem uma melhoria significativa quando a VRS é gerada com os modelos atmosféricos. Em relação a RP, enquanto para a VRS gerada por DG a discrepância chega a aproximadamente 30 cm, para a VRS gerada por DG+MOD+PNT esse valor máximo é de 10 cm. Já na altimetria as discrepâncias chegam a 60 e 40 cm, respectivamente.

7.1.2.2. Posicionamento Relativo VRS-PPTE

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos no posicionamento relativo entre a VRS gerada por DG, DG+MOD, DG+PNT, DG+HOP e DG+MOD+PNT e o arquivo real da estação PPTE para 4 dias de dados. A Figura 45 apresenta a distância (resultante 3D – que representa o erro) obtida entre a estação VRS gerada e a estação PPTE.

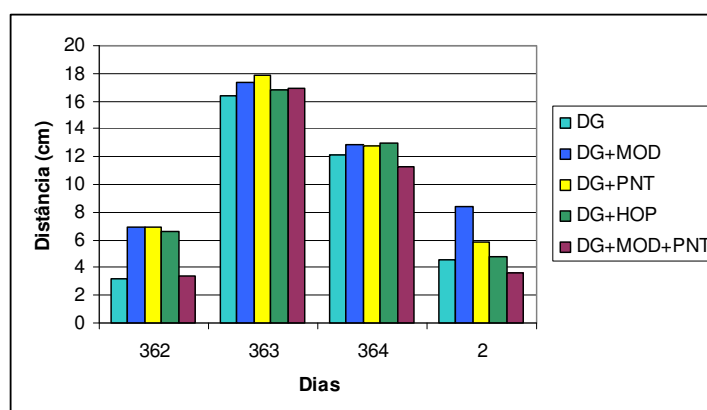


Figura 45 – Distâncias obtidas no posicionamento relativo com diferentes modelos para gerar a VRS

Analisando a Figura 45 observa-se que na maior parte dos casos, a VRS gerada por DG+MOD+PNT apresentou os melhores resultados. Em média, a VRS gerada por DG apresenta uma discrepância de 9,1 cm, enquanto para a VRS gerada por DG+MOD+PNT esse valor é de 8,8 cm. Além disso, os resultados apresentados pela VRS gerada por DG+PNT e DG+HOP foram similares.

A Figura 46 apresenta o EMQ obtido na linha de base VRS-PPTE. Essa análise é interessante, pois além das coordenadas obtidas também leva em consideração a precisão dessas coordenadas.

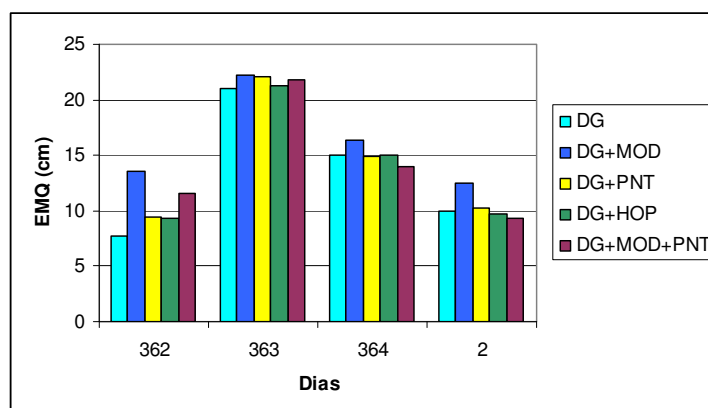
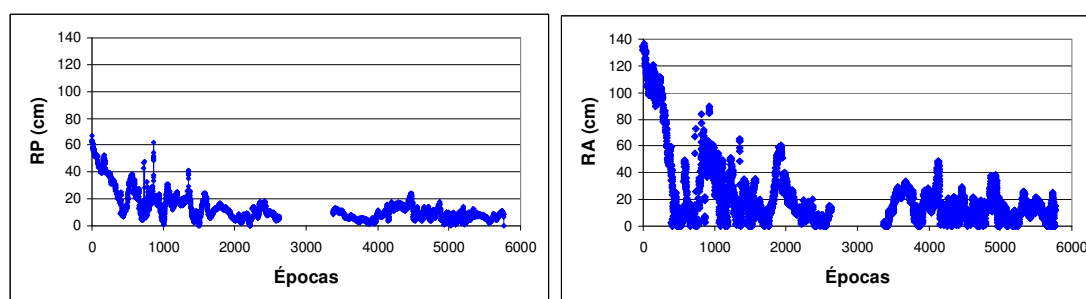


Figura 46 – EMQ obtido no posicionamento relativo VRS-PPTE com diferentes modelos para gerar a VRS

Observando a Figura 46 percebe-se que para os dias 364 e dia 002 a VRS gerada por DG+MOD+PNT apresenta os melhores resultados. Já para os dias 362 e 363 isso não ocorre. Mas, mesmo assim, as diferenças são de poucos centímetros ou até menos.

Além do posicionamento estático, também foi realizado o posicionamento cinemático entre a VRS gerada por DG+MOD+PNT e o arquivo real (PPTE). A Figura 47 (a) apresenta a resultante planimétrica (RP) obtida para o dia 002. Já a Figura 47 (b) ilustra a resultante altimétrica para o mesmo dia.



(a) Resultante Planimétrica (b) Resultante Altimétrica
Figura 47 – Resultantes planimétrica e altimétrica obtidas no processamento relativo cinemático VRS-PPTE para o dia 002

Analisando a Figura 47 (a) pode-se perceber que as discrepâncias não ultrapassam 60 cm, a maior parte se mantém abaixo de 20 cm. Em relação à Figura 47 (b), as discrepâncias são maiores, os valores chegam a 140 cm.

Os resultados obtidos para os dados dos demais dias processados⁷, bem como o erro resultante, são apresentados na Tabela 13

⁷ Os resultados obtidos com os dados do dia 362 não são apresentados na tabela pois não foi possível processá-los no *software* TGO.

Tabela 13 - Porcentagem do erro resultante, erro em planimetria e erro em altimetria menores que 10, 20, 30 e 50 cm (%) na linha de base VRS-PPTE

Planimetria				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
363	43,34	69,51	81,56	89,41
364	43,64	81,46	88,80	93,59
002	59,80	84,96	92,57	98,40
Média	48,93	78,64	87,64	93,80
Altimetria				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
363	16,39	32,61	60,43	82,44
364	14,81	32,37	58,38	79,82
002	43,70	70,38	82,46	90,77
Média	24,97	45,12	67,09	84,35
Erro Resultante				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
363	4,46	22,30	50,22	76,84
364	5,56	23,72	53,55	76,09
002	26,45	59,87	79,30	89,35
Média	12,16	35,30	61,02	80,76

Analisando a Tabela 13 nota-se que para o dia 002 a RP se mantém menor que 20 cm para 84,96% das épocas. Já em relação à RA, tem-se 70,38% das épocas com discrepâncias menores que 20 cm. Além disso, na mesma Tabela 13, pode-se notar que na média dos 3 dias a resultante é menor que 50 cm para 80,76% das épocas. Já em relação à planimetria essa média sobe para 93,8%. Além disso, como esperado, em todos os casos as maiores discrepâncias são obtidas em altimetria.

7.1.3. PNT × Hopfield

Como pôde ser observado no decorrer dessa Tese, os resultados apresentados pelo modelo de PNT foram similares aos obtidos com o modelo empírico de Hopfield, apenas diferenças irrisórias foram encontradas.

No entanto, em experimentos anteriores realizados nessa pesquisa, o modelo de PNT apresentou melhores resultados que o modelo empírico de Hopfield. A melhoria obtida chegou a 19%. Tais resultados podem ser consultados em Alves et al. (2006a, 2006b, 2007b).

Existe uma explicação para os resultados apresentados pelo modelo de PNT e Hopfield serem similares nessa pesquisa. Esse fato provavelmente ocorreu devido a problemas com a modelagem dinâmica (PNT) no período dos experimentos. Alguns dados de

radiossondas lançadas na América do Sul não foram assimilados no período, o que deteriorou as previsões do ZTD. Esse fato deve ser destacado porque mostra que o processo de assimilação é importante para a modelagem do ZTD e revela que a relação entre a assimilação dos dados e a qualidade da previsão do ZTD deve ser investigada. Mas, apesar desse problema, os resultados obtidos com o modelo de PNT foram bons (praticamente idênticos) se comparados com os do modelo empírico, o que viabiliza o uso de tal modelo. Cabe acrescentar que a modelagem dinâmica da troposfera utiliza valores medidos no Brasil com previsão de poucas horas, diferentemente dos modelos empíricos que foram desenvolvidos considerando a realidade de países do hemisfério norte. Portanto, seu uso na América do Sul deve ser incentivado.

8. RESULTADOS OBTIDOS COM A VRS GERADA A PARTIR DOS ERROS RESIDUAIS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA

Esse capítulo trata dos resultados obtidos com a VRS gerada a partir do erro residual das estações de referência da rede. Um dos passos principais da metodologia aplicada é a solução do vetor de ambigüidades para cada linha de base da rede de estações de referência adotada. Como descrito na seção 4.2.1, o *software* Bernese 5.0 foi utilizado para a solução das ambigüidades. Os demais procedimentos utilizados para gerar a VRS foram implementados nessa pesquisa.

8.1. Processamentos e Análises

Diferentemente dos capítulos 6 e 7, esse capítulo não traz apenas simulações da VRS no posicionamento, mas também avalia a qualidade das observações geradas para a VRS, o que é indispensável para uma melhor compreensão dos resultados.

Além dos *softwares* já mencionados no capítulo 7, como o TGO para o posicionamento relativo e como o do NRCan para o posicionamento por ponto preciso, também foi utilizado nesse capítulo o aplicativo denominado *teqc* (disponível em <<http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>>) para análises relativas a quantidade de dados gerados para a VRS.

Outro fato que deve ser acrescentado é que, diferentemente do capítulo 6, o método de interpolação utilizado foi apenas o de interpolação ponderada pela distância. Na seção 8.1.3.2 são apresentadas as justificativas para esse fato. Além disso, algo diferente que foi aplicado diz respeito à máscara de elevação adotada para as estações de referência da rede. Foram aplicadas duas máscaras distintas, 10 e 15 graus de elevação, cujas análises seguem nas próximas seções.

8.1.1. Solução das Ambigüidades

Antes de apresentar os resultados obtidos com a VRS gerada, é necessário detalhar a metodologia utilizada para solucionar o vetor de ambigüidades para cada linha de base independente da rede, sendo os detalhes apresentados nessa seção.

O *software* Bernese 5.0 foi utilizado para determinar o vetor de ambigüidades para cada linha de base da rede adotada. A Figura 48 apresenta um croqui com as linhas de base adotadas na solução do vetor das ambigüidades, bem como as distâncias entre as estações. Da mesma forma que nos capítulos anteriores, a VRS foi gerada na posição da estação PPTE.

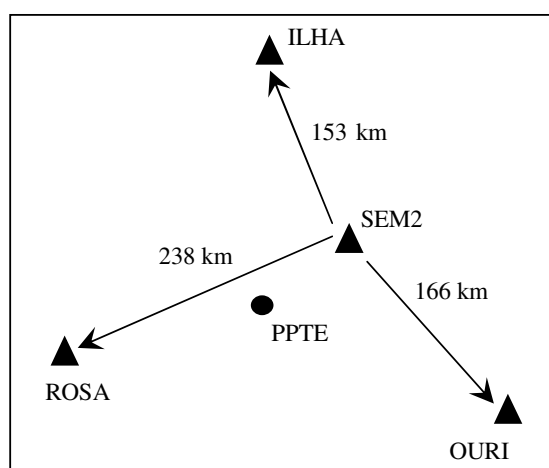


Figura 48 – Linhas de base adotadas na solução do vetor das ambigüidades

Como pode ser observado na Figura 48, o comprimento das linhas de base varia entre aproximadamente 150 e 240 km, comprimentos considerados longos. Além disso, comparando a Figura 48 com a Figura 18, pode-se perceber que a estação de São José do Rio Preto não foi utilizada nos experimentos. Esse procedimento foi adotado pois tal estação se localiza a direita de ILHA, portanto distante da VRS gerada, e dessa forma seu uso não traria nenhum benefício. O ideal é que existissem mais estações próximas a ROSA.

Outro ponto que deve ser destacado é a configuração das linhas de base utilizadas para a solução do vetor de ambigüidades. Note que em todos os casos a estação SEM2 foi utilizada. Essa configuração foi adotada pois, após obter o valor das ambigüidades e então calcular o erro residual das DDs, é necessário determinar o erro residual da observável original. Com a metodologia adotada nessa pesquisa, descrita na seção 4.2.3, é necessário

assumir a mesma estação base para todas as linhas de base. Esse fato fica claro na equação (4.7).

No que diz respeito à taxa de solução do vetor de ambigüidades, a Tabela 14 apresenta a porcentagem de sucesso para cada dia (24 h por dia) e linha de base.

Tabela 14 – Taxa de sucesso na solução do vetor de ambigüidades (%)

Dias	Linhas de Base			Média
	SEM2-ILHA	SEM2-ROSA	SEM2-OURI	
362	81,6	88,6	90,9	87,0
363	87,2	72,1	86,7	82,0
364	82,4	77,3	72,3	77,3
002	79,7	81,8	88,7	83,4
Média	82,7	80,0	84,7	82,4

Observando a Tabela 14 pode-se perceber que na média dos 4 dias, a taxa de sucesso na solução do vetor de ambigüidades é de 82,4 %. Esse valor é coerente, pois, por exemplo, Fortes (2002) aplicou a mesma estratégia para solução das ambigüidades e obteve taxas de sucesso de 60 a 95%, com linhas de base variando de 100 a 450 km.

8.1.2. Processamento dos Dados

Nessa seção são apresentados os processamentos realizados com os dados da VRS gerada após solução das ambigüidades para as linhas de base independentes da rede.

8.1.2.1. Resultados Obtidos Processando os Dados da VRS no PPP

Os dados gerados para a VRS foram processados no PPP modo estático. As coordenadas de referência foram comparadas com as coordenadas estimadas no PPP. A Figura 49 apresenta o EMQ da resultante planimétrica obtida para a VRS gerada utilizando máscara de elevação 10 (VRS-10) e 15 graus (VRS-15) para as estações de referência da rede. Já a Figura 50 traz o EMQ para a resultante altimétrica.

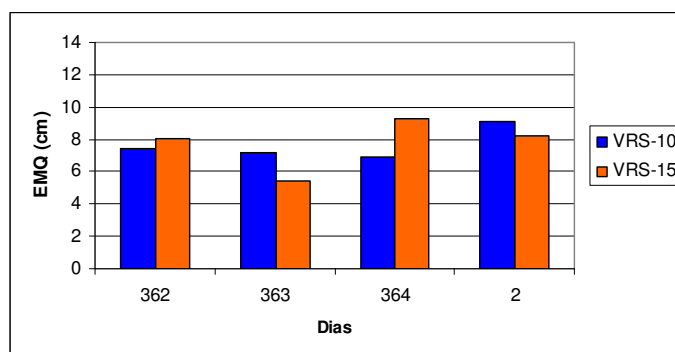


Figura 49 – EMQ obtido para a resultante planimétrica com o PPP no modo estático e VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente

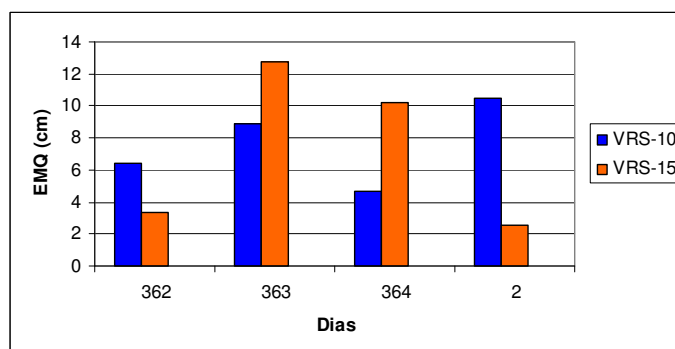


Figura 50 – EMQ obtido para a resultante altimétrica com o PPP no modo estático e VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente

Analisando a Figura 49 e a Figura 50 não é possível afirmar qual o melhor método para gerar a VRS, utilizando observações das estações de referência acima de 10 ou 15 graus de elevação. Para facilitar essa análise, a Tabela 15 apresenta o EMQ da resultante obtido pelo PPP modo estático nos 4 dias de processamento.

Tabela 15 - EMQ da resultante obtido pelo PPP estático com a VRS gerada a partir de observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente (cm)

Dias	VRS-10	VRS-15
362	9,83	8,77
363	11,41	13,86
364	8,33	13,78
002	13,84	8,64
Média	10,85	11,26

Observando a Tabela 15 nota-se que para os dias 363 e 364 a VRS gerada com 10 graus de elevação obteve os melhores resultados. Já para os dias 362 e 002 as menores discrepâncias foram alcançadas para a VRS gerada com observações das estações de

referência acima de 15 graus. No entanto, na média, o modo VRS-10 se mostrou mais eficiente.

Algo que deve ser levado em consideração são os resultados apresentados pelo arquivo verdadeiro, bem como pela VRS gerada por modelos atmosféricos (capítulo 7). Se os resultados da VRS gerada com solução das ambigüidades (resultados da Tabela 15), onde o EMQ médio é de 10 cm, forem comparados com os da VRS gerada pelo modo DG (Tabela 09), cujo EMQ é em média 20 cm, é obtida uma melhoria de cerca de 50% nos resultados da metodologia proposta neste capítulo. No entanto, se essa comparação for realizada com os resultados apresentados pelo arquivo real ou com a VRS gerada por DG+MOD+PNT, onde o EMQ gira em torno de 3 cm, percebe-se significativa deterioração nos resultados da VRS gerada com solução das ambigüidades. Na seção 8.1.3 são discutidas as possíveis causas desses resultados.

8.1.2.2. Resultados Obtidos Processando a Linha de Base VRS-PPTE no Posicionamento Relativo

Primeiramente foi realizado o posicionamento relativo estático entre a VRS gerada considerando máscara de elevação de 10 e 15 graus para as estações de referência (VRS-10, VRS-15) e o arquivo real da estação PPTE, para os 4 dias de dados. A Figura 51 ilustra a distância (resultante 3D – vetor erro) obtida entre a VRS e o arquivo real. Note que essa distância, teoricamente, deveria ser zero.

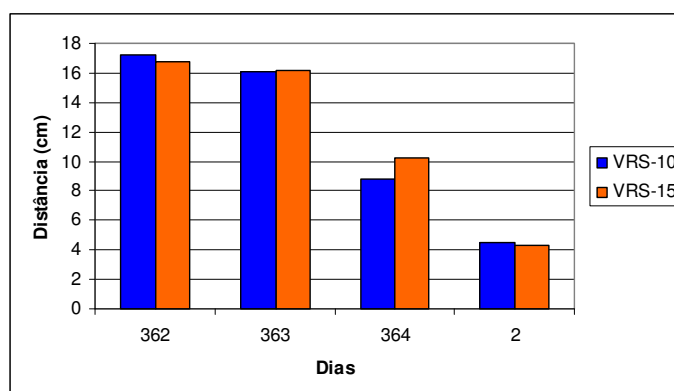


Figura 51 – Distâncias obtidas no posicionamento relativo VRS-PPTE com a VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente

Analisando a Figura 51 percebe-se que os resultados obtidos pelos modos VRS-10 e VRS-15 são similares. Em média, o modo VRS-10 apresenta uma distância de 11,66 cm, enquanto para o VRS-15 o valor médio é 11,86 cm. Resultados esses similares se comparado com os apresentados pela VRS gerada por modelos, seção 7.1.2.2, no qual a média da distância é em média 8,8 cm para a VRS gerada por DG+MOD+PNT.

A Figura 52 apresenta o EMQ obtido no posicionamento relativo com a linha de base VRS-PPTE. Tal análise é interessante, pois além das coordenadas obtidas também é avaliada a sua precisão.

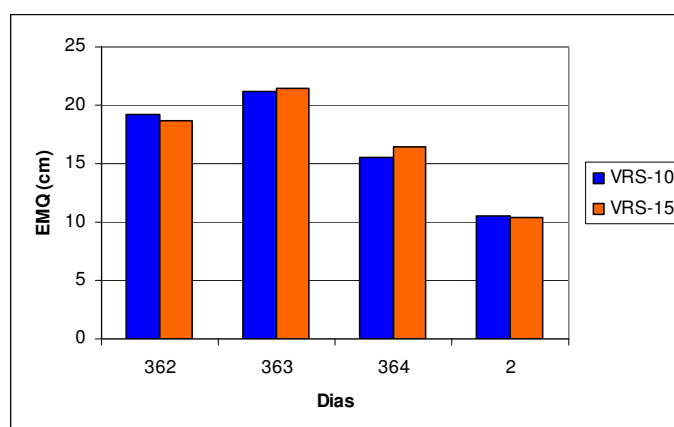
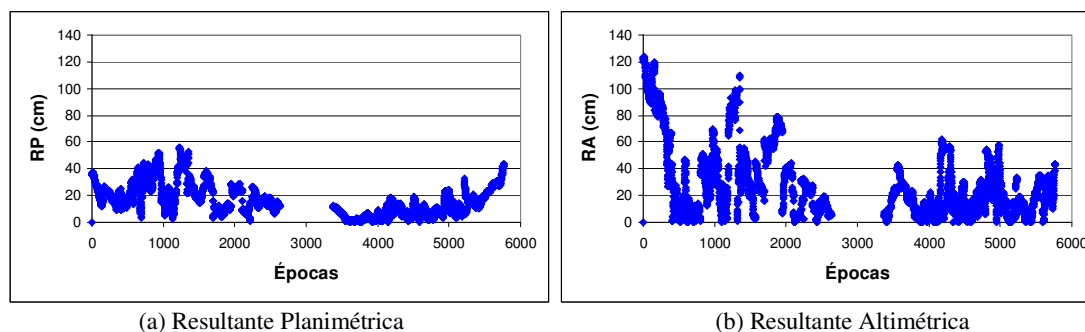


Figura 52 - EMQ obtido no posicionamento relativo VRS-PPTE com a VRS gerada com observações das estações de referência de 10 e 15 graus respectivamente

Na Figura 52 as mesmas considerações podem ser ditas a respeito dos modos VRS-10 e VRS-15. Para o VRS-10 a média é de 16,6 cm, enquanto para o VRS-15 é de 16,75 cm. Da mesma forma que para as distâncias, se a VRS gerada pelo modo VRS-10 ou VRS-15 for comparada com a gerada por DG+MOD+PNT, os resultados são ligeiramente piores, visto que foi obtido em média um EMQ de 14,12 cm para o modo DG+MOD+PNT.

Além do posicionamento estático, também foi realizado o posicionamento cinemático entre a VRS e o arquivo real (PPTE). Nesse caso, foi considerada apenas a VRS gerada com máscara de elevação de 10 graus. A Figura 53 (a) apresenta a resultante planimétrica (RP) obtida para o dia 002. Já a Figura 53 (b) traz a resultante altimétrica (RA).



(a) Resultante Planimétrica (b) Resultante Altimétrica

Figura 53 - Resultantes planimétrica e altimétrica obtidas no processamento relativo cinemático VRS-PPTE para o dia 002

Analisando a Figura 53 (a) pode-se notar que as discrepâncias são menores que 60 cm. Já na Figura 53 (b) os valores são maiores, chegam a 125 cm.

A Tabela 16 apresenta um sumário dos resultados obtidos a partir dos dados processados para os demais dias⁸. Além do erro obtido em planimetria e altimetria, também é apresentado o erro resultante.

Tabela 16 - Porcentagem do erro resultante, erro em planimetria e erro em altimetria menores que 10, 20, 30 e 50 cm (%) na linha de base VRS-PPTE

Planimetria				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
363	38,37	62,06	80,23	95,47
364	24,45	51,60	73,69	92,57
002	42,91	70,96	89,22	99,53
Média	35,24	61,54	81,05	95,86
Altimetria				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
363	23,92	49,57	64,32	83,53
364	17,65	31,88	49,31	79,63
002	40,18	59,42	74,91	88,73
Média	27,25	46,96	62,84	83,96
Erro Resultante				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
363	7,65	29,24	56,35	75,98
364	5,19	20,24	35,44	70,70
002	24,27	44,78	63,42	85,22
Média	12,37	31,42	51,74	77,30

Observando a Tabela 16 nota-se que para o dia 002 em 70,96% das épocas a RP é menor que 20 cm. Já em relação a RA isso ocorre para 59,42% das épocas. Comparando com os resultados apresentados pela VRS gerada por modelos (seção 7.1.2.2, Tabela 13),

⁸ Os resultados obtidos com os dados do dia 362 não são apresentados na tabela pois não foi possível processá-los no *software* TGO.

onde para o dia 002 a RP e RA são menores que 20 cm para 84,96% e 70,38% das épocas, respectivamente, constata-se que os resultados da VRS gerada com solução das ambigüidades são ligeiramente piores.

Analisando ainda a Tabela 16, pode-se constatar que, na média, tem-se discrepâncias menores que 50 cm na resultante para cerca de 77,3% das épocas. Mas, ao se tratar da planimetria, isso ocorre em 95,86% das épocas. Novamente, comparando com a VRS gerada por modelos, percebe-se que os resultados são similares. Na metodologia que utiliza modelos para gerar os dados da VRS, foram obtidas discrepâncias menores que 50 cm na resultante para 80,76% das épocas. Já em relação à planimetria, isso ocorreu em 93,80% das épocas.

Essa análise traz evidências da qualidade das correções geradas para a VRS, uma vez que, teoricamente, era de se esperar discrepâncias nulas. Maiores detalhes e discussões são apresentadas na seção 8.1.3.

8.1.2.3. Resultados Obtidos Processando a Linha de Base VRS-OURI no Posicionamento Relativo

Nessa seção, é avaliado o posicionamento relativo no modo cinemático realizado no *software* TGO com a linha de base VRS-OURI (aproximadamente 180 km), considerando máscara de elevação para as estações de referência de 10 graus.

Algo importante que pode ser analisado quando se realiza o posicionamento é a relação da qualidade do posicionamento com a geometria dos satélites disponíveis, bem como o número de satélites. Uma forma existente para realizar essa avaliação é analisar o RDOP (*Relative Dilution of Precision*)⁹.

A Figura 54 apresenta a resultante da discrepância obtida em relação às coordenadas de referência para o dia 364¹⁰. Em relação ao RDOP, a Figura 55 apresenta o RDOP normalizado pelo ângulo de elevação (figura obtida no *software* TGO).

Como pode ser observado na Figura 54, existem discrepâncias altas na resultante no decorrer do dia, o que não ocorreu nos casos em que a VRS foi gerada por modelos (seção 7.1.2.1). Além disso, o *software* TGO não calculou a posição no intervalo compreendido entre as épocas 655 e 1574, período no qual comparece um espaço em branco.

⁹ O fator RDOP descreve o efeito da geometria dos satélites na qualidade do levantamento. Quanto menor o valor do RDOP, melhor a geometria.

¹⁰ Esse dia foi escolhido para facilitar as análises que serão realizadas posteriormente.

No que concerne a Figura 55, o período compreendido entre os traços vermelhos não deve ser analisado porque corresponde ao período entre as épocas 655 e 1574.

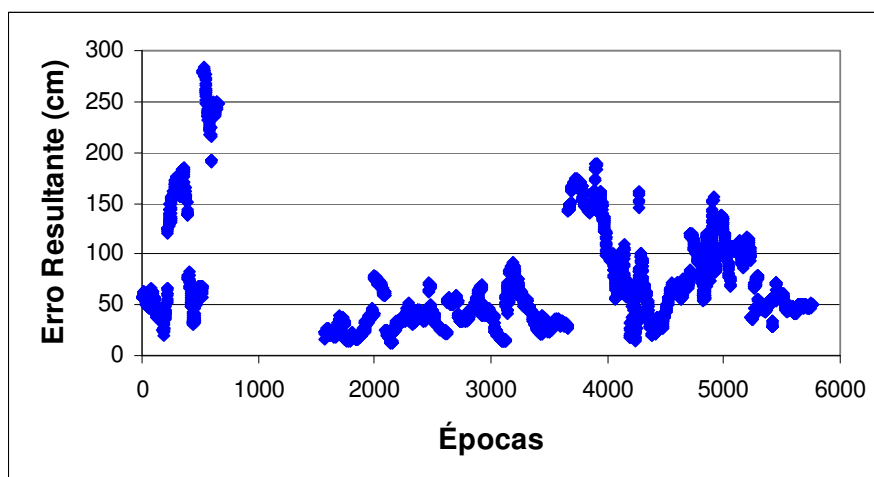


Figura 54 – Erro Resultante obtido época por época com a linha de base VRS-OURI no posicionamento relativo cinemático do dia 364

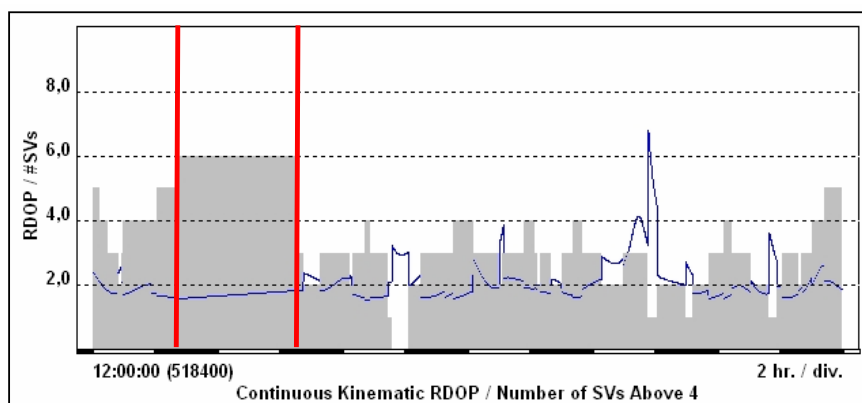


Figura 55 – RDOP normalizado pelo número de satélites obtido época por época com a linha de base VRS-OURI no posicionamento relativo cinemático do dia 364

Analisando a Figura 55 nota-se que o comportamento do RDOP é altamente correlacionado com o comportamento da resultante apresentada na Figura 54. Essa afirmação fica mais clara principalmente a partir da época 3500, onde são encontrados valores altos, tanto para o RDOP, quanto para a resultante. Isso mostra como a geometria dos satélites afeta a qualidade do posicionamento. Além disso, também é possível perceber que quando os valores do RDOP são maiores, a quantidade de satélites é menor se comparado com o restante do dia.

Cabe acrescentar que, em 48,7% dos casos, o erro resultante apresentado na Figura 54 é menor que 50 cm. Já se for analisado erro em planimetria, isso ocorre para 87,1 % das épocas. E, neste caso, em 41,6% das épocas o erro é menor que 20 cm.

É necessário ressaltar que apenas os valores altos do RDOP não justificam a magnitude das discrepâncias apresentadas na Figura 54. Esse tipo de processamento deveria resultar em discrepâncias de poucos centímetros. Mas existem outras variáveis extremamente importantes, como é o caso da geometria¹¹ da rede e da qualidade das correções geradas para a VRS que devem ser levadas em consideração. Esses e outros aspectos serão discutidos na seção 8.1.3.

Para os demais dias de processamento as análises são semelhantes. A Tabela 17 apresenta um sumário dos resultados.

Tabela 17 – Porcentagem do erro resultante, erro em planimetria e erro em altimetria menores que 10, 20, 30 e 50 cm (%) na linha de base VRS-OURI

Planimetria				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
362	15,50	54,83	72,43	94,08
363	2,86	21,19	58,18	84,17
364	8,31	41,61	65,14	87,15
002	16,69	50,59	75,07	98,58
Média	10,84	42,05	67,71	90,99
Altimetria				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
362	11,60	27,64	42,86	60,75
363	18,50	33,47	44,11	59,57
364	9,94	21,45	32,93	54,07
002	7,68	15,67	28,27	49,32
Média	11,93	24,55	37,04	55,93
Erro Resultante				
Dias	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 50 cm
362	0,64	15,03	30,23	56,98
363	0,00	2,67	26,63	51,88
364	0,00	5,29	17,40	48,66
002	1,97	9,68	17,02	42,29
Média	0,65	8,17	22,82	49,95

Analisando a Tabela 17 pode-se perceber que, como esperado, as menores discrepâncias são obtidas para a planimetria. Em aproximadamente 91% das épocas têm-se erros menores que 50 cm, enquanto que para a altimetria isso ocorre em 55,9% dos casos. Já

¹¹ A geometria diz respeito à configuração das estações da rede. Nada adianta ter disponível 3 ou 4 estações de referência com uma configuração inadequada (todas juntas de um mesmo lado por exemplo ou muito distantes).

se for considerado erros menores que 20 cm, em planimetria isso ocorre em média para 42% das épocas e em 24,55% para altimetria.

8.1.3. Análises Referentes à Qualidade das Correções Geradas para a VRS

Como pôde ser visto na seção 8.1.2, os resultados obtidos com a VRS gerada após solução das ambigüidades foram, em geral, similares ou até mesmo piores se comparados aos apresentados pela VRS gerada a partir de modelos atmosféricos, o que teoricamente não é esperado. Esses resultados podem ser explicados por diversos fatores que são descritos nas próximas seções.

8.1.3.1. Estações Utilizadas para Gerar o Erro Residual na Posição da VRS

Essa seção é dedicada a um dos principais tópicos que deve ser levado em consideração para analisar a qualidade da observação gerada para a VRS, isto é, quais estações foram utilizadas para gerar o erro residual na posição da VRS.

A princípio parece irrelevante analisar quais estações foram usadas para gerar o erro residual na posição da VRS, visto que a Figura 48 ilustra as 4 estações utilizadas. Mas o que ocorre na realidade não é bem isso. Como pode ser visto na seção 8.1.1, a taxa de sucesso na solução das ambigüidades é em média 82,4 %. Isso significa que as observações cujas ambigüidades não foram solucionadas não podem ser utilizadas para gerar o erro residual na posição da VRS. E sem o erro residual de pelo menos duas estações de referência não é possível gerar a observação de fase da onda portadora para a VRS. Em uma rede de estações de referência densa, esse fato não representa nenhum problema, pois sempre se tem o erro residual de pelo menos três estações de referência com boa configuração. No caso dessa pesquisa, onde apenas quatro estações de referência estão disponíveis, as observações geradas para a VRS podem ter sua qualidade degradada. É necessário salientar que esse problema não ocorre com os dados de pseudodistância da VRS, que são gerados independentemente da solução das ambigüidades (capítulo 6).

Na maioria das vezes, o erro residual de um determinado satélite que não é calculado para uma estação específica pode ter sido calculado para as demais. O problema é quando o erro residual é calculado com dados de apenas duas estações de referência, ou até

mesmo por 3 estações de referência, mas com uma configuração inadequada. Por exemplo: observando a Figura 48 pode-se perceber que se o erro residual fosse calculado pelas estações SEM2, ROSA e OURI não haveria grandes problemas, pois apesar de não possuir o erro residual da estação ILHA, a configuração ainda continuaria adequada. No entanto, se o erro residual for calculado apenas pelas estações SEM2, ILHA e OURI, a qualidade da observação da VRS poderá ser deteriorada devido a configuração não adequada das estações.

A Figura 56 apresenta o número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para o dia 362. Na Figura 56 (a) tem-se o PRN 11 e na Figura 56 (b) o PRN 17.

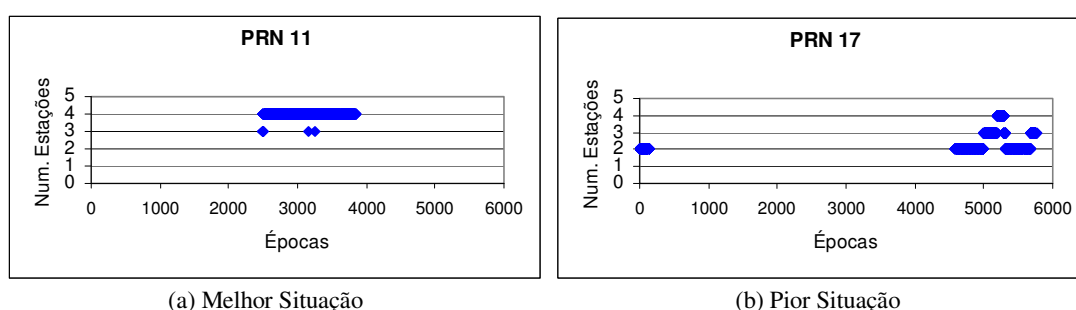


Figura 56 – Número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para os PRNs 11 e 17

Na Figura 56 (a) encontra-se a melhor situação, onde se utiliza as 4 estações em praticamente todo o período em que o satélite foi empregado. Já na Figura 56 (b) tem-se o pior caso, que ocorreu no dia 362. Nesse último caso, poucos são os momentos em que o erro residual foi obtido a partir das 4 estações de referência. Na maior parte do tempo o erro residual foi obtido com apenas 2 ou 3 estações da rede.

No Apêndice B, seção B.1, na Figura 63, é apresentado o número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para o dia 362 e todos os PRNs. As estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L2 não serão apresentadas, pois existem poucas diferenças em relação à observável L1. Além disso, tanto para a observável L2, bem como para os outros dias de processamento, a quantidade de estações utilizadas é sumarizada em forma de tabela. Dessa forma, a Tabela 18 apresenta um sumário com o número médio¹² de estações utilizadas para cada satélite em relação à observável L1 e L2.

¹² É claro que o número médio de estações não representa a realidade concreta (não existe, por exemplo, 3,3 estações). Mas trazem um indicativo do número de estações utilizadas.

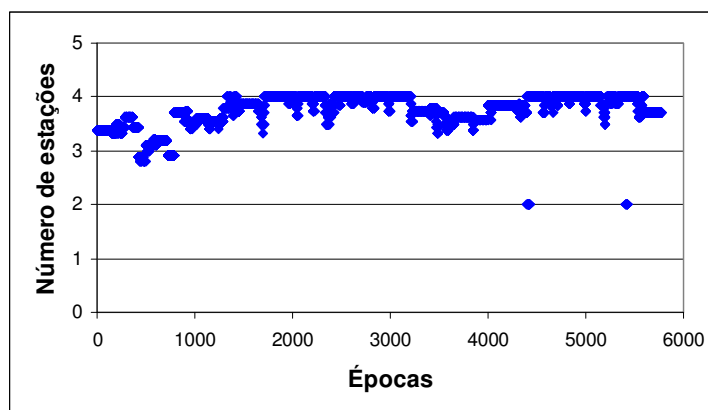
Tabela 18 – Número médio de estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L1 e L2 de cada satélite

Satélites	Dia 362		Dia 363		Dia 364		Dia 002	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
PRN 1	3,96	3,96	3,96	3,96	3,88	3,88	3,96	3,96
PRN 2	3,29	3,29	3,59	3,60	3,48	3,48	3,78	3,77
PRN 4	2,73	2,73	3,25	3,26	3,23	3,22	3,57	3,57
PRN 5	3,32	3,32	3,88	3,88	2,74	2,74	3,68	3,74
PRN 6	3,53	3,55	3,66	3,69	2,49	2,50	3,36	3,42
PRN 7	3,69	3,70	3,74	3,75	2,79	2,80	3,32	3,34
PRN 8	3,51	3,53	3,98	3,98	3,84	3,85	3,58	3,59
PRN 9	3,53	3,53	3,73	3,73	3,62	3,53	3,77	3,77
PRN 10	2,51	2,51	3,03	3,03	3,04	3,04	3,23	3,24
PRN 11	3,99	3,99	3,98	3,99	3,99	3,99	3,98	3,99
PRN 12	3,20	3,21	3,88	3,88	2,95	2,92	2,75	2,86
PRN 13	3,57	3,59	3,99	3,99	3,99	3,99	3,92	3,92
PRN 14	3,98	3,98	3,96	3,98	3,55	3,59	3,75	3,79
PRN 16	2,99	2,99	3,15	3,15	3,03	3,03	2,62	2,62
PRN 17	2,38	2,38	3,98	3,98	3,61	3,61	2,81	2,81
PRN 18	3,93	3,93	3,93	3,93	2,99	2,99	3,51	3,51
PRN 19	3,97	3,97	3,97	3,97	3,81	3,81	3,67	3,67
PRN 20	3,73	3,73	3,98	3,98	3,96	3,96	3,70	3,70
PRN 21	3,83	3,84	3,86	3,88	2,00	2,00	2,73	3,03
PRN 22	3,96	3,96	3,96	3,96	3,13	3,13	3,42	3,47
PRN 23	3,60	3,60	3,97	3,97	3,98	3,98	3,91	3,92
PRN 24	2,83	2,83	3,60	3,60	2,98	2,98	3,92	3,92
PRN 25	3,44	3,46	3,44	3,48	3,97	3,97	3,64	3,72
PRN 26	3,17	3,17	3,38	3,38	3,17	3,06	2,65	2,61
PRN 27	3,49	3,49	3,97	3,98	3,98	3,98	3,81	3,81
PRN 28	3,55	3,55	3,96	3,96	3,86	3,76	3,68	3,68
PRN 29	3,26	3,26	3,69	3,69	3,41	2,85	3,49	3,29
PRN 30	3,40	3,40	3,57	3,56	2,67	2,67	3,61	3,61
PRN 31	3,94	3,94	3,95	3,94	3,94	3,94	3,34	3,34
MÉDIA	3,46	3,46	3,76	3,76	3,38	3,35	3,49	3,51
DP	0,46	0,46	0,27	0,26	0,58	0,60	0,45	0,44

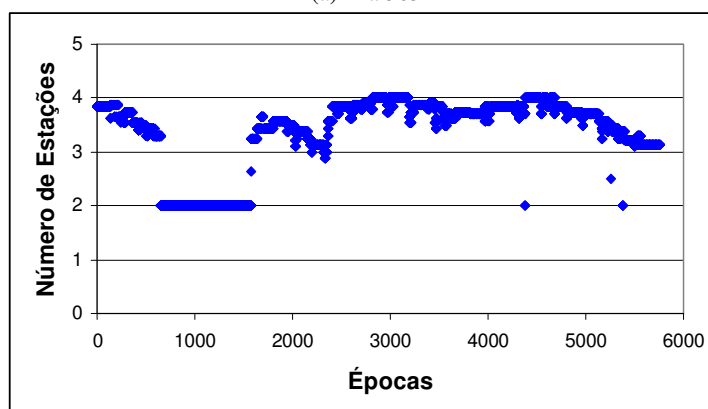
Avaliando a Tabela 18 observa-se que, como mencionado, a quantidade de estações utilizadas para calcular o erro residual das observáveis L1 e L2 é praticamente o mesmo. As médias apresentadas no fim da tabela para as duas observáveis são similares. Além disso, nota-se que em média o número de estações utilizadas varia de 3,35 para o dia 364 a 3,76 para o dia 363.

Analisando apenas as médias pode-se interpretar que o número é razoável no decorrer do dia. No entanto, existem épocas em que o número de estações utilizadas não passa de 2, o que degrada muito os resultados. Para verificar o comportamento época por época, a Figura 57 apresenta o número médio de estações utilizadas em cada época por todos

os satélites e observável L1. A Figura 57 (a) apresenta o número médio de estações para o dia 363 (dia em que na média foi calculado o erro residual com o maior número de estações). Já a Figura 57 (b) traz os valores para o dia 364 (dia com menor média da Tabela 18). Os gráficos para os demais dias podem ser vistos no apêndice B seção B.1, Figura 64. Em relação à observável L2 os gráficos não serão apresentados, pois são similares aos da observável L1.



(a) Dia 363



(b) Dia 364

Figura 57 – Número médio de estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L1 para os dias 363 (a) e 364 (b)

Analisando a Figura 57 (a) pode-se perceber que, mesmo para o dia com melhor média de número de estações utilizadas (dia 363), existem épocas com apenas 2 ou 3 estações disponíveis para calcular o erro residual (não esquecendo que os valores apresentados no gráfico são uma média para todos os satélites). Além disso, o caso ideal, que seria o de manter quatro estações, ocorre em menos de 40% das épocas.

No que concerne a Figura 57 (b), dia no qual a menor média do número de estações foi obtida, é fácil notar um grande número de épocas com apenas duas estações. Também é possível observar que são poucas as épocas com quatro estações de referência

disponíveis para calcular o erro residual. Detalhes adicionais sobre esse tópico serão descritos posteriormente.

8.1.3.2. Correlação entre a Correção Gerada para a VRS e o Ângulo de Elevação do Satélite

Após determinar o erro residual das estações de referência da rede, quando possível (vide seção anterior), o passo seguinte é gerar a correção (erro residual) na posição da VRS. Como descrito na seção 4.2.4, nessa pesquisa foram implementados o método de interpolação ponderada pela distância e o método de interpolação que utiliza a equação de um plano.

A partir de testes realizados, optou-se em utilizar apenas a interpolação ponderada para a fase da onda portadora. Há casos em que quando se utiliza a equação do plano para a interpolação e o erro residual para a estação ROSA não é possível de ser calculado, o valor interpolado fica totalmente alterado. Esse fato se deve a configuração das estações (veja Figura 48). Isso não ocorre quando é aplicada a interpolação ponderada. Mas mesmo assim, a correção gerada pode não possuir a qualidade necessária para o nível de acurácia requerido para a observável fase da onda portadora.

O valor das correções geradas para a VRS (erro residual na posição da VRS) deve ser inversamente proporcional ao ângulo de elevação dos satélites, isto é, quanto maior o ângulo de elevação, menor deverá ser a correção gerada para a VRS e vice-versa. A Figura 58 (a) e (b) ilustra a correção da observável L1 para o dia 362 versus o ângulo de elevação para os PRNs 11 e 17, respectivamente. Informações adicionais são apresentadas no Apêndice B, seção B.2, onde são plotados os ângulos de elevação dos satélites do arquivo gerado para a VRS para o dia 362, bem como a correção gerada versus o ângulo de elevação para os demais satélites. Para os demais dias essas informações não são apresentadas, pois as análises seriam semelhantes.

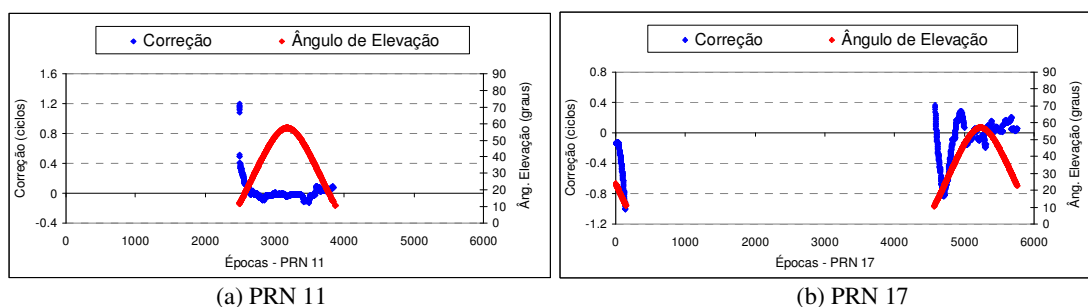


Figura 58 – Correção gerada para a observável L1 da VRS $\times$ ângulo de elevação do satélite para os PRNs 11 e 17 e dia 362

Analisando a Figura 58 (a) nota-se que à medida que o ângulo de elevação aumenta o valor da correção diminui. Mas também é necessário levar em consideração uma outra variável, isto é, o número de estações da rede que foram utilizadas para gerar a correção da VRS. Observando a Figura 56 (a) pode-se notar que nas primeiras épocas apenas 3 estações de referência estavam sendo usadas para calcular a correção e, provavelmente por isso, na Figura 58 (a), as correções são maiores nas primeiras épocas.

Em relação à Figura 58 (b), se for observada a primeira parte do gráfico nota-se uma alta correlação entre a diminuição do ângulo de elevação e o aumento da magnitude da correção. Já a análise da segunda parte do gráfico é mais complexa. Se for comparado o aumento do ângulo de elevação com a correção, verifica-se que, em geral, ela diminui, mas ainda existem variações na magnitude das correções. Mas essas variações estão altamente correlacionadas com o número de estações que foram utilizadas para gerar a correção. Analisando a Figura 56 (b), o comportamento das correções fica claro. Basta observar que a magnitude das correções é maior quando se utiliza apenas 2 estações da rede em seu cálculo.

8.1.3.3. Porcentagem de Perda de Observações da Fase na Geração da VRS

As seções 8.1.3.1 e 8.1.3.2 tratam da qualidade das correções geradas para a VRS utilizando 2, 3 ou 4 estações de referência da rede. Mas é necessário salientar que existem épocas em que não é possível calcular os erros residuais da fase da onda portadora para nenhuma linha de base. Esse fato ocorre quando em uma mesma época a ambigüidade de um determinado satélite x não foi solucionada para nenhuma linha de base. Assim, ao determinar os dados da VRS, a observação do satélite x não será gerada.

Nesta seção verifica-se a quantidade de dados que não são gerados para a fase da onda portadora devido à porcentagem de solução das ambigüidades nas linhas de base não ser de 100%. Com a finalidade de realizar esse cálculo foi utilizado o aplicativo *teqc*. Além disso, os dados da VRS gerada com a metodologia apresentada no capítulo 7 (denominada aqui por VRS+DG) foram utilizados para comparação. Esse arquivo pode ser empregado como base de comparação, pois na metodologia VRS+DG o vetor de ambigüidades não é solucionado e, dessa forma, não existe perda de dados.

Cabe acrescentar que duas situações foram consideradas para gerar os dados da VRS. Na primeira situação foram utilizados dados das estações de referência com máscara de elevação acima de 10 graus para gerar a correção da VRS. Já na segunda situação, a VRS foi gerada considerando máscara de elevação de 15 graus. É esperado que a perda de dados seja maior quando se utiliza 15 graus de elevação. Em relação ao arquivo tomado como base (VRS+DG), este foi gerado para todos os satélites disponíveis.

A Tabela 19 apresenta a porcentagem de perda de observações para as observáveis L1 e L2 (em relação a todos os satélites) considerando 10 e 15 graus de elevação para as estações de referência. Lembrando que a comparação foi feita com relação aos dados da VRS gerada pela metodologia VRS+DG.

Tabela 19 – Porcentagem de perda de dados de fase da onda portadora se comparado com a VRS gerada por VRS+DG (%)

Dias	10 graus		15 graus	
	L1	L2	L1	L2
362	4,72	4,53	13,55	13,13
363	3,96	3,88	13,20	12,66
364	4,96	4,74	13,39	12,90
002	1,93	2,70	11,64	11,30
Média	3,89	3,96	12,94	12,50

Observando a Tabela 19 nota-se que a maior perda de dados, considerando 10 graus de elevação, ocorre no dia 364 (4,96% para L1 e 4,74% para L2), mesmo dia que apresenta o menor número de estações utilizadas para gerar a correção da VRS (vide Figura 57 (b)). Mas, na verdade, a quantidade de perda de dados representa o número de épocas que para um determinado satélite a ambigüidade não foi fixada para nenhuma linha de base. Isso significa que para um dia com maior taxa de solução das ambigüidades pode ocorrer mais perda de observações da VRS que em um dia com menor taxa de solução das ambigüidades.

Além disso, pode-se notar na Tabela 19 que a perda de observações quando se utiliza máscara de elevação de 15 graus é muito maior do que se for considerado 10 graus.

A perda que era em média 3,89% para L1 quando a máscara de elevação utilizada é 10 graus, passa para 12,94% com 15 graus.

8.1.3.4. Número de Observações Geradas para a VRS em cada Época

Considerando a porcentagem de perda de observações discutida na seção anterior, algo importante para analisar é o número de observações geradas para a VRS em cada época. Para realizar as análises, a Tabela 20 apresenta o número médio (com seu respectivo desvio padrão - DP) de observações geradas em cada época para as observáveis C1, P2, L1 e L2. Além disso, a VRS foi gerada considerando máscara de elevação de 10 graus para as observações das estações de referência da rede. Já a Tabela 21 apresenta as mesmas variáveis considerando máscara de elevação de 15 graus. É necessário salientar que o ideal seria que o número de observações de fase da onda portadora fosse semelhante ao número de observações de pseudodistância.

Tabela 20 – Número médio de observações geradas para a VRS em cada época considerando 10 graus de elevação para as estações de referência

Dia	C1		P2		L1		L2	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
362	8,21	1,27	8,17	1,26	7,83	1,20	7,80	1,20
363	8,21	1,26	8,16	1,26	7,89	1,07	7,84	1,06
364	8,18	1,24	8,13	1,23	7,80	0,97	7,77	0,96
002	8,21	1,29	8,16	1,29	8,05	1,22	7,94	1,22
Média	8,20	1,30	8,15	1,30	7,89	1,10	7,84	1,10

Tabela 21 - Número médio de observações geradas para a VRS em cada época considerando 15 graus de elevação para as estações de referência

Dia	C1		P2		L1		L2	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
362	7,35	1,28	7,34	1,28	7,10	1,17	7,10	1,17
363	7,35	1,28	7,34	1,28	7,13	1,12	7,13	1,12
364	7,34	1,26	7,33	1,26	7,11	1,08	7,11	1,09
002	7,35	1,30	7,34	1,30	7,25	1,27	7,24	1,28
Média	7,35	1,30	7,34	1,30	7,15	1,20	7,14	1,20

Analisando a Tabela 20 e a Tabela 21 nota-se que em todos os dias o número médio de observações de pseudodistância é maior do que da fase da onda portadora, o que já era esperado devido aos problemas apresentados nas seções anteriores. Além disso, a quantidade de dados de C1 e P2 é similar, o mesmo que ocorre com L1 e L2. Outro fato

importante é a diminuição da quantidade de observações tanto para a pseudodistância como para a fase quando uma máscara de elevação de 15 graus é utilizada. A Tabela 22 apresenta a porcentagem da redução do número de observações.

Tabela 22 – Porcentagem de redução do número de observações da VRS quando se utiliza máscara de elevação de 15 graus ao invés de 10 graus (%)

Dia	C1	P2	L1	L2
362	10,5	10,1	9,3	9,0
363	10,5	10,0	9,6	9,1
364	10,3	9,8	8,9	8,6
002	10,4	10,0	9,9	8,8
Média	10,4	10,0	9,4	8,9

Como pode ser visto na Tabela 22 a redução de observações quando se utiliza máscara de elevação de 15 graus é em média de 10,2 % para a pseudodistância e 9,1% para dados da fase da onda portadora, o que pode ser considerado significativo.

Os dados apresentados nas tabelas anteriores dão uma idéia do que ocorre com a quantidade de observações de uma forma geral. Mas algo também interessante para se verificar é a quantidade de observações no decorrer do dia. A Figura 59 apresenta a quantidade de observações de pseudodistância época por época. Já a Figura 60 trata da observável fase da onda portadora. Em ambos os casos são plotados os dados do dia 362, onde se tem a menor média do número de observações para a fase da onda portadora (vide Tabela 21).

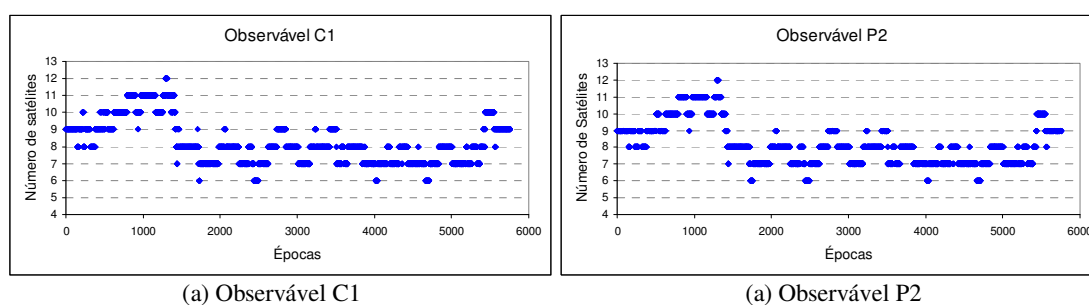


Figura 59 – Número de observações de C1 (a) e P2 (b) geradas época por época para a VRS do dia 362

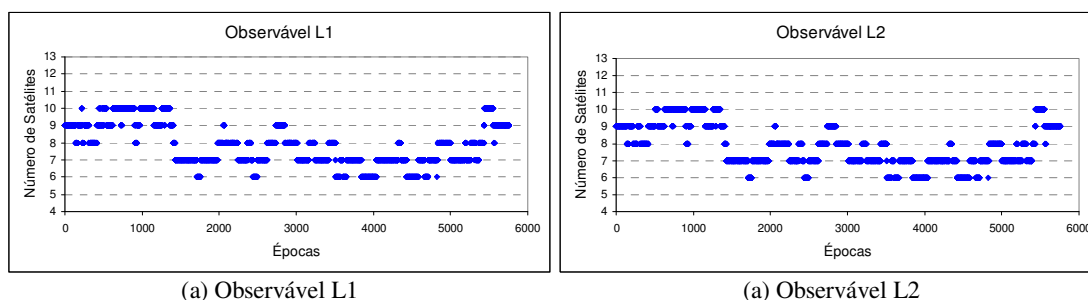


Figura 60 - Número de observações de L1 (a) e L2 (b) geradas época por época para a VRS do dia 362

Analisando a Figura 59 (a) e (b) pode-se perceber que o comportamento dos gráficos é similar. O mesmo ocorre se for analisada a Figura 60 (a) e (b). No entanto, quando se compara a Figura 59 com a Figura 60 é fácil perceber que a quantidade de dados de fase da onda portadora é realmente menor se comparado com a pseudodistância. Enquanto para a pseudodistância tem-se até 12 satélites por época e em poucos casos 6 satélites, para a fase o máximo é de 10 satélites e comparecem 6 satélites em um número significativo de épocas.

8.1.4. Análises e Conclusões

Esse capítulo tratou da metodologia convencional para a geração da VRS que vem sendo adotada pela comunidade científica. Na seção 8.1.2 foram apresentados os resultados obtidos com a VRS em diferentes processamentos. Como mencionado, os resultados se mostraram piores que o esperado. No entanto, como descrito na seção 8.1.3, diversos fatores têm influência na qualidade dos dados gerados para a VRS, tais como:

- A porcentagem de sucesso na solução das ambigüidades;
- O número de estações usadas para determinar o erro residual na posição da VRS;
- A geometria das estações utilizadas;
- O número de satélites disponíveis e consequentemente gerados para a VRS;
- A geometria dos satélites.

Além disso, algo indispensável que também deve ser levado em consideração, mas muitas vezes é ignorado, é o que representa o número médio de estações. Por exemplo, numa época o número médio de estações usadas pode ser 3, o que parece ser bastante razoável. No entanto, nessa mesma época pode-se ter 1 ou 2 satélites cujas correções foram calculadas utilizando apenas 2 estações de referência. Esse fato degrada o

posicionamento da VRS calculado nessa época. Quando isso ocorre, é difícil observar tal fato analisando os gráficos e resultados finais.

Existem épocas em que fica muito clara a correlação entre um número não adequado de estações utilizadas para gerar o erro residual na posição da VRS e a qualidade do dado gerado. Um exemplo disso pode ser visto nos resultados apresentados na seção 8.1.2.3. Para facilitar a análise basta observar a Figura 57 (b), que traz o número de estações utilizadas em cada época para o dia 364. Correlacionando a Figura 54 com a Figura 57 (b) pode-se perceber que os primeiros valores altos apresentados na resultante ocorrem quando os dados da VRS são gerados apenas com um número de estações de referência que se aproxima de 3 e em seguida de 2.

Adicionalmente, para o mesmo dia (dia 002) também existem épocas em que 4 estações de referência foram utilizadas para gerar o erro residual na posição da VRS. A Figura 61 apresenta o valor do erro resultante obtido para dois trechos (*zooms* da Figura 54) onde estavam sendo utilizadas quatro estações para gerar o erro residual na posição da VRS.

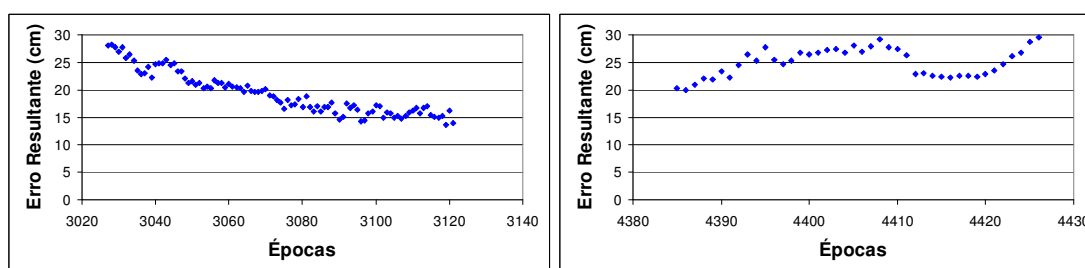


Figura 61 – Resultante obtida no posicionamento relativo cinemático VRS-OURI em períodos onde correções de 4 estações de referência da rede estão disponíveis para gerar o erro residual na posição da VRS

Observando a Figura 61 pode-se perceber que o valor da resultante se mantém menor que 30 cm para essas épocas onde correções de 4 estações de referência estão disponíveis para gerar o erro residual na posição da VRS. Finalizando, cabe acrescentar que diversos outros trechos de resultados poderiam ser apresentados, mas as análises seriam similares.

Concluindo, com os resultados e análises discutidos nessa seção fica clara a necessidade de uma densidade maior de estações de referência e que apresente boa geometria para gerar a VRS. Conseqüentemente, poder-se-ia obter posicionamento com melhor acurácia no modo cinemático. Em um futuro próximo, com a expansão da Rede do Estado de São Paulo e modernização da RBMC, essa configuração será uma realidade para o Brasil e poderá ser testada.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O posicionamento realizado utilizando dados de redes de estações de referência tem se tornado mais efetivo nos últimos anos devido, principalmente, a alta acurácia proporcionada. No entanto, para que o usuário utilize as correções geradas pela rede, se faz necessária a aquisição de *softwares* especiais que gerenciem os dados e produzam tais correções. Para resolver esse problema surgiu o conceito de VRS. Com a utilização deste conceito, o receptor móvel pode ser de simples frequência quando o usuário está dentro da área de abrangência da rede.

Assim, nessa pesquisa desenvolveu-se um sistema que realiza o posicionamento GPS baseado em redes de estações de referência utilizando o conceito de estação virtual. O sistema trata tanto da metodologia convencional utilizada pela comunidade científica, como da desenvolvida nessa Tese, onde a VRS é gerada utilizando modelos atmosféricos. Para tanto, uma extensa revisão bibliográfica foi realizada sobre o assunto, contemplando os algoritmos utilizados no posicionamento GPS baseado em redes (com ênfase no conceito de VRS), a modelagem da atmosfera, ionosfera e troposfera, investigação dos métodos de interpolação das correções, dentre outros.

Foram desenvolvidas três metodologias para gerar os dados de pseudodistância da VRS e duas metodologias para fase da onda portadora. Diversos testes e análises foram realizados empregando dados da Rede do Oeste do Estado de São Paulo coletados em 4 dias (dias 362, 363 e 364 de 2006 e dia 002 de 2007). Nos capítulos 6, 7 e 8 foram apresentadas análises cuidadosas da qualidade da VRS gerada para os diferentes modos.

O capítulo 6 tratou especificamente dos dados de pseudodistância gerados para a VRS. Com os experimentos realizados foi possível perceber que os dados gerados a partir do erro residual das estações de referência da rede (metodologia das seções 4.2 e 4.3) foram melhores se comparados com aqueles gerados por modelos atmosféricos (seção 4.1).

Utilizando o PP, modo estático, com a VRS gerada por modelos (no caso DG+MOD+PNT) obteve-se EMQ médio de 52 cm para os 4 dias de processamento, enquanto para a VRS gerada através do erro residual das estações de referência o EMQ foi de 42 cm e 38 cm para interpolação utilizando o plano e interpolação ponderada respectivamente. No que concerne ao PP no modo cinemático, o EMQ foi de 1,48 m, 1,32 m e 1,19 m para as VRSs

geradas por modelos e pelo erro residual utilizando a interpolação por plano e ponderada, respectivamente.

Além do PP também foi realizado o posicionamento DGPS entre a VRS gerada e a estação OURI, utilizando a VRS como base. O EMQ para a VRS gerada por modelos foi em média 1,68 m. Já quando se utilizou o erro residual da rede o EMQ foi de 1,57 m com a equação do plano para interpolação e 1,62 m para a interpolação ponderada. Utilizando o arquivo real como base foi obtido um EMQ de 1,53 m.

No que concerne ao capítulo 7, foi avaliada a qualidade da VRS gerada por diferentes combinações entre os modelos atmosféricos (metodologia 4.1). Mas, nesse caso, para dados de pseudodistância e fase da onda portadora. Assim, para realizar as análises referentes à qualidade dos dados gerados, os arquivos da VRS foram processados no PPP e posicionamento relativo.

Utilizando o PPP no modo estático, obteve-se, em média, um EMQ resultante em relação às coordenadas de referência de 2,51 cm com o modo DG+MOD+PNT para 24 horas de dados. Já para o modo cinemático obtêve-se aproximadamente 10,95 cm. Resultados estes muito próximos aos obtidos pelo arquivo real.

Em relação ao posicionamento relativo, dois cenários foram utilizados. Primeiramente, a VRS, assim como o arquivo real, foram considerados base para realizar o posicionamento relativo na linha de base VRS/PPTE-OURI. Utilizando a VRS gerada por DG+MOD+PNT, o EMQ obtido para o posicionamento estático foi de 1,85 cm e para o arquivo real 1,79 cm. Já no modo cinemático, o EMQ foi 6,66 cm para a VRS e 6,20 cm para o arquivo real. No segundo cenário, foi realizado o posicionamento relativo entre a VRS e o arquivo real. Com a VRS gerada por DG+MOD+PNT foi obtida uma distância de 8,8 cm entre as duas estações.

No que concerne a comparação da modelagem dinâmica, PNT, com o modelo empírico de Hopfield, os resultados foram similares. Era de se esperar melhores resultados para a modelagem dinâmica, visto que em experimentos anteriores foram obtidas melhorias de até 19% para a modelagem dinâmica em relação ao modelo de Hopfield. Mas, isso não ocorreu devido a alguns problemas na assimilação dos dados no modelo de PNT no período dos experimentos.

No que se refere ao capítulo 8, foram realizadas análises relativas à VRS gerada a partir do erro residual das estações de referência da rede após solucionar as ambigüidades. Para a solução das ambigüidades foi utilizado o *software* Bernese 5.0, obtendo,

em média, 82,4% de sucesso. As demais etapas foram implementadas durante o desenvolvimento da Tese.

Algo que foi amplamente investigado no capítulo 8 diz respeito à qualidade das observações geradas para a VRS. Como os experimentos foram realizados com dados de apenas quatro estações de referência (o que havia disponível no momento), em muitos casos tinham-se dados de apenas duas ou três estações para calcular o erro residual, ou correção, na posição da VRS. Em média, para o dia 364 (dia com menor número de estações disponíveis) o número de estações utilizadas para gerar a correção foi de 3,35. Já para o dia 363 (dia com maior número de estações disponíveis), obteve-se, em média, uma correção gerada a partir dos dados de 3,76 estações. Esse valor médio que parece ser adequado pode não refletir muito a realidade, pois uma época com média de 3,5 estações pode ter dados de, por exemplo, dois satélites gerados com apenas 2 estações de referência, o que degradaria a qualidade do dado gerado para a VRS.

Outras análises relativas à quantidade de observações não geradas para a fase da onda portadora devido à solução das ambigüidades, bem como o número de observações por época também foram analisadas no capítulo 8. Além disso, também foi realizado o PPP e o posicionamento relativo com a VRS gerada.

Em relação ao PPP, foi obtido EMQ de 10,85 cm para a VRS gerada considerando dados das estações de referência com máscara de 10 graus e 11,26 cm para 15 graus. Já no posicionamento relativo entre a VRS e o arquivo real, foi obtida uma distância de 11,66 cm para a VRS gerada a partir de dados de 10 graus de elevação.

Como pode ser visto, os resultados obtidos com a VRS gerada a partir do erro residual das estações de referência são ligeiramente piores se comparado com a VRS gerada por modelos. Isso já esperado devido aos problemas apontados. Também foi realizado o posicionamento cinemático utilizando a VRS como estação base. Várias análises foram realizadas, levando em consideração o RDOP, a qualidade e a quantidade das observações, o que justifica a magnitude do EMQ obtido nos experimentos.

Dos resultados apresentados nessa pesquisa, pode-se concluir que a metodologia aplicada para gerar a VRS apenas por modelos atmosféricos se mostrou eficiente. Em todas as estratégias de processamento utilizadas os resultados apresentados pela VRS são próximos daqueles apresentados pelo arquivo real. Além disso, pode-se acrescentar o fato da maior facilidade de implementação, pois não é necessário solucionar o vetor de ambigüidades das estações de referência da rede.

Os resultados deixaram claro que para se obter alta acurácia com a VRS gerada após solução das ambigüidades de cada linha de base da rede, é necessário ter a disposição um número maior de estações de referência com geometria adequada. Isso garantiria uma boa configuração para geração da correção da VRS. Assim, com a expansão prevista para a Rede do Estado de São Paulo e a modernização da RBMC, trabalhos futuros poderão ser viabilizados.

Cabe acrescentar algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros, visando melhorar os resultados obtidos nessa pesquisa e investigar novos modelos. Dentre elas, pode-se citar:

- Implementação da solução do vetor de ambigüidades no sistema desenvolvido;
- Adaptar o sistema desenvolvido para aplicações em tempo real – todos os testes realizados nessa Tese foram simulações, é necessário adaptar o sistema para utilizá-lo em tempo real;
- Utilizar um número maior de estações de referência com boa geometria – com a implantação da estação de referência prevista para Araçatuba e com a estação LINS já será possível realizar novos testes;
- Realizar experimentos em outras datas para verificar a eficácia da modelagem dinâmica da troposfera – os testes foram realizados em um período onde ocorreram alguns problemas com a modelagem dinâmica (seção 7.1.3). Portanto, seria interessante realizar testes em outras datas.
- Testar a modelagem dinâmica com resolução horizontal de 20×20 km – já se tem disponível esse novo modelo, mas nos experimentos dessa pesquisa o ZTD estava disponível apenas para uma resolução horizontal de 100×100 km;
- Implementar e testar outras funções de mapeamento da troposfera – hoje em dia tem-se evidências de que as funções de mapeamento de Vienna e Isobárica proporcionam melhores resultados;
- Testar outros modelos de ionosfera – uma possibilidade é utilizar o modelo regional da ionosfera que pode ser gerado com o *software* Bernese.

Finalizando, vale salientar que agora a FCT/UNESP dispõe de uma infraestrutura própria para continuar o desenvolvimento de pesquisas na área de posicionamento GPS, ou mesmo GNSS, em redes. Embora algumas investigações já foram realizadas a partir do sistema desenvolvido, as sugestões apontadas nesta Tese poderão ser investigadas futuramente, utilizando e aprimorando o sistema aqui desenvolvido.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): Implementação em Tempo Real**. 2005. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ALBER, C.; WARE, R.; ROCKEN, C.; BRAUN, J. Obtaining Single Path Phase Delays from GPS Double Differences. **Geophysical Research Letters**. v.27. n.7. p.2661-2664. 2000. Disponível em: <<http://www.cosmic.ucar.edu/~braunj/papers/ddfinal.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2006.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; FORTES, L. P. S. Descrição dos Principais Algoritmos de Correção para RTK em Rede. In: IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná. **Anais...**, 2005a.

_____; Modelagem da Ionosfera no RTK em Rede. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, Macaé, Rio de Janeiro. **Anais...**, 2005b.

ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Modelagem Dinâmica do ZTD Versus Modelo de Hopfield: Resultados Obtidos Utilizando o Conceito de Estação Virtual. In: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA, São José dos Campos. **Anais...**, 2006a.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A.; SAPUCCI, L. F.; CAMARGO, P. O. VRS Concept Using NWP and Mod_Ion_FK: Preliminary Results in Brazil. In: International FIG Congress, Munique, Alemanha. **Proceedings...**, 2006b.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. Análise da Qualidade de uma Estação de Referência Virtual Através do Posicionamento por Ponto Preciso. In: Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Presidente Prudente, São Paulo. **Anais...**, 2007a.

_____; Aplicando Diferentes Técnicas para Gerar Dados de Pseudodistância de uma Estação Virtual. In: XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, 2007b.

_____; Geração de VRS a partir de Modelos Atmosféricos: Conceito, Implementação e Resultados. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 13. n.2. p. 316-336. 2007c.

ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O.; AGUIAR, C. R. Evaluating the Performance of a Brazilian Ionosphere Model in VRS concept. In: International Beacon Satellite Symposium, Boston, MA. **Proceedings...**, 2007a.

ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Evaluating the Performance of the CPTEC-INPE/FCT-UNESP Troposphere Dynamic Model Using the VRS Concept. In: 2007 Joint Assembly, Acapulco, México. **Proceedings...**, 2007b.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A.; SAPUCCI, L. F. Generating VRS Data Using Atmospheric Models: How Far Can We Go? In: ION GNSS 2007, Fort Worth, Texas. **Proceedings...**, 2007c.

ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. **Proceedings...**, 2003.

BERNESE GPS SOFTWARE – Version 5.0. **Tutorial**. 2004. Disponível em: <<http://www.bernese.unibe.ch/download.html>>. Acesso em: mar. 2006.

BERNESE GPS SOFTWARE – Version 5.0. **Draft**. 2006. Disponível em: <<http://www.bernese.unibe.ch/download.html>>. Acesso em: mar. 2006.

BEVIS, M.; BUSINGER, S.; CHISWELL, S.; HERRING, T. A.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays Onto Precipitable Water. **Journal of Applied Meteorology**. v.33, p.379-386, 1994.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data. **Geophysical Research Letters**. v.33. 2006.

BRAUN, J.; ROCKEN C.; WARE, R.; ALBER, C. **A Technique for Determining Single Satellite, Single Station Information From Double Difference GPS Residuals**. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)/GPS Research Group. 2000. Disponível em: <http://www.cosmic.ucar.edu/~braunj/papers/fall98_agu.pdf>. Acesso em: 28 out. 2006.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CHEN, W.; HU, C.; GAO, S.; CHEN, Y.; DING, X.; KOWK, C. Precise Estimation of Absolute Ionospheric Delay Base on GPS Active Network. In: ION GNSS 2004, Long Beach, California. **Proceedings...** 2004.

CHEN, X.; HAN, S.; RIZOS, C.; GOH, P. C. Improving Real Time Positioning Efficiency Using the Singapore Integrated Multiple Reference Station Network (SIMRSN). In: 13th Int. Tech. Meeting Satellite Division US Inst. Navigation, Salt Lake City, UT. **Proceedings...** 2000.

CHEN, X.; LANDAU, H.; VOLLATH, U. New Tools for Network RTK Integrity Monitoring. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. **Proceedings...**, 2003.

COLOMBO, O. L. Long-Distance Kinematic GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2ed. Berlin: Springer Verlage, 1998, p.537-568.

_____; PAJARES, M. H.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; TALAYA, J. Resolving Carrier-Phase Ambiguities On The Fly, At More Than 100 km From Nearest Reference Site, With The Help Of Ionospheric Tomography. In: ION GNSS 1999, Nashville, TN. **Proceedings...** 1999.

_____; PAJARES, M. H.; JUAN, J. M.; SANZ, J. Ionospheric Tomography Helps Resolve GPS Ambiguities On The Fly at Distances of Hundreds of Kilometers During Increased Geomatic Activity. In: IEEE PLANS 2000 Meeting, San Diego. **Proceedings...** 2000.

_____; PAJARES, M. H.; JUAN, J. M.; SANZ, J. Wide-Area, Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using a Tomographic Model of the Ionosphere. **Navigation**. v. 49, n.1, p.61-69, 2002.

CPTEC – Centro de Previsão de tempo e Estudos Climáticos. **Atraso Zenital Troposférico**. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/prev.htm>>. Acesso em: 09 jan. 2006.

DAI, L.; HAN, S.; WANG, J.; RIZOS, C. A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, Utah. **Proceedings...**, 2001.

DAI, L.; WANG, J.; RIZOS, C.; HAN, S. Predicting Atmospheric Biases for Real-Time Ambiguity Resolution in GPS/GLONASS Reference Station Networks. **Journal of Geodesy**, p.617-628, 2003.

DALBELO, L. F. A.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. DGPS Utilizando Órbitas Precisas do IGS. In: IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná. **Anais...**, 2005a.

_____; DGPS Utilizando Órbitas Precisas do IGS e Correções Ionosféricas. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, Macaé, Rio de Janeiro. **Anais...**, 2005b.

DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO I., ROGERS, A .E., ELGENED, G. Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. **Radio Sci.**, vol. 20, 1593-1607, 1985.

EL-SHEIMY, N. **Digital Terrain Modelling**. Geomatics Engineering Department - The University of Calgary, Calgary, 1999.

EULER, H. J.; KEENAN, R.; ZEBHAUSER, B. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, Utah. **Proceedings...**, 2001.

FORTES, L. P. S. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**. 1997. 152f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Sistemas e Computação) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro.

_____. **Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning**. 2002. 355f. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.

FOTOPOULOS, G. **Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations**. 2000a. 202f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

_____; Parameterization of Carrier Phase Corrections Based on a Regional Network of Reference Stations. In: ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah. **Proceedings...** 2000b.

_____; CANNON, M. E. Spatial and Temporal Characteristics of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network. In: INTERNATIONAL ASSOCIATIONS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (IAIN), 2000, San Diego, CA. **Proceedings...** 2000.

_____; An Overview of Multi-Reference Station Methods for cm-level Positioning. **GPS Solutions**, v.4, n.3, p.1-10, 2001.

GAO, Y.; LI, Z. Ionosphere Effect and Modeling for Regional Area Differential GPS Network. In: ION GPS 1998, Nashville, Tennessee. **Proceedings...** 1998.

_____; MCLELLAN, J. F. Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-Level Positioning and Navigation. In: ION GPS 1997, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** 1997.

GAO, Y.; LIU, Z. e LIU, Z. Z. Internet-Based Real-Time kinematic positioning. **GPS Solutions**, v.5, n.3, p.61-69, 2002.

GAO, Y.; LIU, Z. Z. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. **Journal of Global Positioning Systems**, v.1, n.1, p.18-24, 2002.

GROVES, K. M. A Comparison of GPS Performance in a Scintillation Environment at Ascension Island. In: ION GPS 2000, Salt Lake City, UT. **Proceedings...** 2000.

GURTNER, W. RINEX: **The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10**, 2002. Disponível em: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/>. Acesso em: fev. 2006.

HAN, S.; RIZOS, C. GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring Systems. In: ION GPS 1996, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** 1996.

HÉROUX, P.; GAO, Y.; KOUBA, J.; LAHAYE, F.; MIREAULT, Y.; COLLINS, P.; MACLEOD, K.; TÉTREAU, P.; CHEN, K. Products and Applications for Precise Point Positioning - Moving Towards Real-Time. In: ION GNSS 2004, Long Beach, CA. **Proceedings...** 2004.

HIGGINS, M. B. An Australian Pilot Project for a Real Time Kinematic GPS Network Using the Virtual Reference Station Concept. In: Annual Working Meeting of the International Federation of Surveyors, Seoul Korea. **Proceedings...**, 2001.

HU, G.; ABBEY, D. A.; CASTLEDEN, N.; FEATHERSTONE, W. E.; EARLS, C.; OVSTEDAL, O.; WEIHING, D. An Approach for Instantaneous Ambiguity Resolution for Medium - to Long - Range Multiple Reference Station Networks. **GPS Solutions**. v.9, p.1-11, 2005.

HU, G. R.; KHOO, V. H. S.; GOH, P. C.; LAW, C. L. Internet-based GPS VRS RTK Positioning with a Multiple Reference Station Network. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.113-120, 2002.

_____; Development and Assessment of GPS Virtual Reference Stations for RTK Positioning. **Journal of Geodesy**. v.77, p. 292-302. 2003.

IGS - International GNSS Service . **IGS PRODUCTS**. Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: fev. 2006a.

IGS - International GNSS Service. **Ionosphere Working Group**. Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/projects/iono/index.html>>. Acesso em: fev. 2006b.

INCRA - **Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária**. Disponível em: <<http://ribac.incra.gov.br/>>. Acesso em: jun/2008.

KOMJATHY, A. **Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System**. 1997. 266f. Tese (PhD) – University of New Brunswick, Canada.

_____; SPARKS, L.; MANNUCCI, A. J.; PI, X. An Assessment of the Current WAAS Ionospheric Correction Algorithm in the South American Region. **Journal of the Institute of Navigation**. v.50, n.3, p.193-204, 2003.

LACHAPELLE, G. e ALVES, P. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.133-136, 2002.

LANDAU, H.; VOLLATH, U.; CHEN, X. Virtual Reference Station Systems. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.137-143, 2002.

_____; Virtual Reference Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations. **The European GNSS 2003**. Graz, Austria. Disponível em: <http://www.trimble.com/vrs_tp.html>. Acesso em: mar. 2004.

LEE, L.; ROCKEN, C.; KURSINSKI, R. **Application of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Springer-Verlag, 2000. 384p.

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

LIU, G. C. **Ionosphere Weighted Global Positioning System Carrier Phase Ambiguity Resolution**. 2001. 173f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

LIU, Z.; GAO, Y. Development and Evaluation of a New 3-D Ionospheric Modeling Method. **Navigation**. v. 51, n.4, p.311-329, 2004.

_____; Optmization of Parameterization in Ionospheric Tomography. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, UT. **Proceedings...** 2001.

MAREL, H. van der. Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. In: ION GPS 1998, Nashville, Tennessee. **Proceedings...** 1998.

MATSUOKA, A. T.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. GPS Diferencial: Conceitos Básicos, Implementação e Análise dos resultados. In: III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2003, Curitiba. **Anais...**, 2003.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de Funções para a Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS**. 2003. 164f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MENDES, V. de B. **Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques**. 1998. Tese (PhD) – Department of Geodesy and Geomatics, University of New Brunswick.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 1.ed. São Paulo: Unesp, 2000. 287p.

_____; ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; CAMARGO, P. O.; SAPUCCI, L. F.; FORTES, L. P. S. Atmospheric Models applied to DGPS and RTK Network in Brazil: Preliminary Results. In: ION GNSS 2006, Fort Worth, Texas. **Proceedings...** 2006.

MOTOKI, G. M.; DALBELO, L. F. A.; PADOVAN, R. P.; RAMOS, V. M. A.; POLEZEL, W. G. C. **Implantação da Rede GPS Ativa do Oeste do Estado de São Paulo**. 2006. 195 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

NIELL, A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. **Journal of Geophysical Research**. v.101, n.B2, p.3227-3246, 1996.

_____; PETROV, L. Using a Numerical Weather model to improve Geodesy. In: The State of GPS Vertical Positioning Precision, Luxembourg. **Proceedings...** 2003.

NOAA. **Current Space Weather Conditions**. Disponível em: <<http://www.sec.noaa.gov/>>. Acesso: 10 fevereiro 2007.

ODIJK, D. Improving Ambiguity Resolution by Applying Ionosphere Corrections from a Permanent GPS Array. **Earth Planets Space**, v.52, p.675-680, 2000a.

_____; Weighting Ionospheric Corrections to Improve Fast GPS Positioning Over Medium Distances. In: ION GPS 2000, Salt Lake City, UT. **Proceedings...** 2000b.

_____; MAREL, H. van der; SONG, I. Precise GPS Positioning by applying Ionospheric Corrections from an Active Control Network. **GPS Solutions**, v.3, n.3, p.49-57, 2000.

OMAR, S.; RIZOS, C. Design of Reliable Communication System for Continuous GPS Reference Station Networks. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. **Proceedings...**, 2003.

PAJARES, M. H.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; COLOMBO, O.L. Precise Ionospheric Determination and its Application to Real-Time GPS Ambiguity Resolution. In: ION GNSS 1999, Nashville, TN. **Proceedings...** 1999.

_____; Application of Ionospheric Tomography to Real-Time GPS Carrier-Phase Ambiguities Resolution, at Scales of 400-1000 km and with High Geomagnetic Activity. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 13, p.2009-2012, 2000a.

_____; MAREL, H. van der. Real-Time Integrated Water Vapor Determination Using OTF Carrier-Phase Ambiguity Resolution in WADGPS networks. In: ION GPS 2000, Salt Lake City, UT. **Proceedings...** 2000b.

PAJARES, M. H.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; COLOMBO, O.L. Tomographic Modeling of GNSS Ionospheric Corrections: Assessment and real-time applications. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, UT. **Proceedings...** 2001.

PRADO, A. **Análise da Acurácia e da Correlação Espacial nas Técnicas DGPS e RTK**. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RAQUET, J. A new approach to GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using a Reference Receiver Network. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING, 1997, Santa Mônica, Califórnia. **Proceedings...**1997.

_____; **Development of a a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers**. 1998. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.

_____; Test of a 400 km x 600 km Network of Reference Receivers for Precise Kinematic Carrier-Phase Positioning in Norway. In: ION GPS 1998, Nashville, TN. **Proceedings...** 1998a.

_____; LACHAPELLE, G. Long Distance Kinematic Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using a Simulated Reference Receiver Network. In: ION GPS 1997, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** 1997.

RETSCHER, G. Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.1, p.40-47, 2002.

RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Services) – Version 2.3. Comitê Especial RTCM N° 104, 2001.

RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Services) – Version 3.0. Comitê Especial RTCM N° 104, 2004.

RTCM STANDARD 10403.1 for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Services) – Version 3.0. Comitê Especial RTCM N° 104, 2006.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do Vapor D'água Atmosférico e a Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS.** 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

_____; MACHADO, L. A.T.; MONICO, J. F. G. Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade. **Revista Brasileira de Cartografia**. N.58/3. 2006.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. Predição do Atraso Zenital Troposférico na América do Sul para Posicionamento GNSS em Tempo Real. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Paraná, Curitiba, 2003. **Anais...**, 2003.

SAVITCH, WALTER. **C++ Absoluto.** São Paulo: Addison Wesley, 2004. 612p.

SCHAER, S.; GURTNER, W.; FELTENS, J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1. In: IGS AC WorkShop, 1998, Darmstadt, Alemanha. **Proceedings...** 1998.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications.** Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003.

SEJAS, M. I.; KRUEGER, C. P.; HECK, B.; SEITZ, K. Análise da Qualidade de um Posicionamento Empregando Estações de Referência Virtuais. In: *Série em Ciências Geodésicas*. 2003. v.3. p.40-53.

SHRESTHA, S. M. **Investigations into the Estimation of Tropospheric Delay and Wet Refractivity Using GPS Measurements**. 2003. 156f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

SPIPKER Jr., J. J. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER Jr., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.517-546.

VARNER, C. C. **DGPS Carrier Phase Networks and Partial Derivative Algorithms**. 2000. 175f. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.

_____; CANNON, M. E. The Application of Multiple Reference Stations to the Determination of Multipath and Spatially Decorrelating Errors. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING, 1997, Santa Mônica, Califórnia. **Proceedings...** 1997.

VOLLATH, U.; PATRA, R.; CHEN, X.; LANDAU, H.; ALLISON, T. GALILEO/Modernized GPS: A New Challenge to Network RTK. In: ION GPS 2004, Long Beach, CA. **Proceedings...** 2004.

VOLLATH, U.; LANDAU, H.; CHEN, X.; DOUCET, K.; PAGELS, C. Network RTK Versus Single Base RTK – Understanding the Error Characteristics. In: ION GNSS 2002, Portland, OR. **Proceedings...** 2002.

WANNINGER, L. Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere. In: ION GPS 1995, Palm Springs. **Proceedings...** 1995.

_____; Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks. In: IAG SCIENTIFIC ASSEMBLY, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** 1997.

_____; The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-networks under Solar Maximum Conditions. In: ION GPS 99, Nashville TN. **Proceedings...**, 1999. p.1419-1427.

_____. Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning. In: ION GPS 2002, Portland, Oregon. **Proceedings...**, 2002. p.1400-1407.

WIELGOSZ, P.; BRZEZINSKA, D. G.; KASHANI, I. Network Approach to Precise GPS Navigation. **Journal of the Institute of Navigation**, v.51, n.3, 2004.

WEBER, G.; DETTMERING, D; GEBHARD, H.; KALAFUS, R. Network of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) – IP – Streaming for Real Time GNSS Applications. In: ION GNSS 2005, Long Beach, CA. **Proceedings...**, 2005. p.2243-2247.

WU, F.; KUBO, N.; YASUDA, A. Estimation of Atmospheric Delays Using Multiple Reference Stations for RTK-GPS Positioning. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. **Proceedings...**, 2003.

WÜBBENA, G.; BAGGE, A.; SEEGER, G.; BODER, V.; HANKEMEIER, P. Reducing Distance Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. In: ION GPS 1996, Kansas City, Missouri. **Proceedings...** 1996.

ZHANG, K.; ROBERTS C. Network-Based Real-Time Kinematic Positioning System: Current Development in Australia. In: Geoinformatics and Surveying Conference, 2003, The Institute of Surveyor, Malasia. **Proceedings...**, 2003.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. **Journal of Geophysical Research**, v.102, m.B3, p.5005-17, 1997.

APÊNDICE A – *Software* Científico Bernese 5.0

O *software* científico Bernese versão 5.0 foi adquirido pela FCT/UNESP campus de Presidente Prudente em 2006. Esse *software* é uma ferramenta muito importante para a pesquisa desenvolvida, visto que o mesmo foi utilizado em duas etapas da pesquisa.

Toda documentação do Bernese pode ser obtida no site <<http://www.bernese.unibe.ch/download.html>>. Além de diversas informações referentes ao *software*, também estão disponíveis nessa página dois documentos importantes: o DRAFT, (BERNESE, 2006) que trata da parte teórica do *software*; e o Tutorial (BERNESE, 2004), que explica como utilizar o *software*.

Nas próximas seções são apresentados os aspectos principais do *software* Bernese que fazem parte dos dois documentos citados acima.

A.1. Breve Histórico

Em março de 1988 o *software* Bernese (Bernese GPS *Software*) versão 3.0 foi concluído. Essa versão do *software* era baseada no antecessor *Bernese Second Generation GPS software*. Entre os anos de 1988 e 1995 foram disponibilizadas 5 novas versões do *software* (versões 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5) visando acompanhar o rápido desenvolvimento das aplicações de alta acurácia do GPS.

Em setembro de 1996 foi disponibilizada a versão 4.0 do *software*, a qual apresentava a primeira versão do programa ADDNEQ para combinar equações normais e calcular soluções entre diversos dias ou campanhas. Essa versão incluía também o primeiro *Bernese Processing Engine* (BPE), utilizado para realizar o processamento completamente automático de um modo eficiente através de um *script*.

Em novembro de 1999 foi disponibilizada a versão 4.2 do Bernese. Com essa versão já era possível processar observações GLONASS (em conjunto ou não com observações GPS) e medidas obtidas com laser (SLR - *Satellite Laser Ranging*) para satélites GNSS. Além disso, o programa ADDNEQ foi atualizado para ADDNEQ2.

Desde 2004 uma nova versão do *software* Bernese está disponível, a versão 5.0. Os principais recursos adicionais dessa nova versão são:

- Interface gráfica idêntica para as plataformas UNIX/Linux e Windows (Figura 62);
- Processamento automático (BPE) simplificado;

- Utilização da linguagem *perl* para o *script* do BPE;
- Exemplos de BPEs elaborados para aplicações básicas;
- Determinação de órbita não apenas para GNSS, mas também para satélites de baixa órbita (LEO – *Low Earth Orbit Satellites*);
- Módulo sofisticado para combinação e manipulação de resultados no âmbito das equações normais (ADDNEQ2);
- Melhoria da modelagem da troposfera;
- Adoção das convenções IERS 2000;
- Outros refinamentos relativos ao processamento não diferenciado, manejo dos erros nas pseudodistâncias, etc.

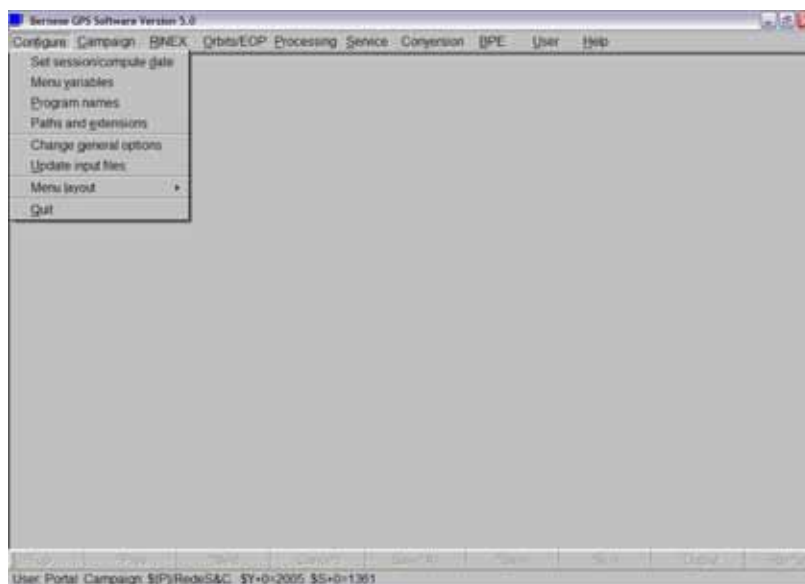


Figura 62 – Interface gráfica disponível no *software* Bernese 5.0

A.2. Principais Objetivos e Características Gerais

As principais características do *software* Bernese 5.0 são: alta performance, alta acurácia, flexibilidade no processamento, rotinas robustas para automação, padrões adotados internacionalmente, etc. Devido a todas essas características ele tem sido utilizado por diferentes tipos de usuários, tais como:

- Cientistas para pesquisa e educação;
- Agências responsáveis pela alta acurácia proporcionada pelo GNSS;

- Agências responsáveis por manter redes de estações de referência permanentes;
- Empresas privadas com aplicações complexas que demandam alta acurácia, confiabilidade e produtividade.

Dentre as principais características do Bernese pode-se citar:

- Todas as observáveis principais relacionadas à alta precisão dos receptores geodésicos podem ser processadas, isto é, pseudodistância e fase da onda portadora. Assim como medidas de SLR ou DCB (*Differential Code Bias*);
- Dados de simples e dupla frequência podem ser processados juntos. O uso de modelos ionosféricos minimizam o impacto dos erros;
- É possível realizar o processamento de dados GPS, GLONASS ou GPS/GLONASS;
- Os dados podem ser processados utilizando as DDs ou as próprias observações originais;
- Podem ser utilizadas diferentes combinações lineares para L1 e L2, como *ionosphere-free*, *geometry-free*, *wide-lane* e Melbourne-Wubben;
- É possível combinar dados de receptores e antenas diferentes;
- São disponibilizadas diferentes estratégias de solução das ambigüidades, permitindo fixar as ambigüidades para linhas de base longas (2000 km e até maiores);
- É possível estimar vários parâmetros diferentes simultaneamente;
- O *software* permite processar dados de todas as aplicações GNSS estáticas e muitas aplicações cinemáticas, incluindo a determinação da órbita para satélites LEO;
- Os movimentos das estações são modelados de acordo com os movimentos das placas litosféricas, marés, carga dos oceanos, de acordo com o modelo do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*);
- Diferentes funções de mapeamento para a troposfera estão disponíveis. A estimativa dos parâmetros da troposfera também está implementada;
- Está disponível uma sofisticada rotina para simulação de dados;

Levando em consideração todos os recursos existentes no *software* Bernese, suas principais aplicações são:

- Processamento de redes de estações de referência;
- Cálculo de velocidades das estações;
- Cálculo das correções de relógio de satélite e receptor;
- Cálculo das variações do centro de fase da antena do satélite e receptor;
- Cálculo do *offset* do centro de fase da antena do satélite e do receptor;

- Determinação de órbitas e parâmetros de orientação da Terra;
- Determinação dos elementos das órbitas;
- Estimativa do centro de massa da Terra;
- Cálculo dos mapas ionosféricos em escala global (MGI) ou regional;
- Cálculo dos parâmetros ionosféricos estocásticos;
- Cálculo dos parâmetros da troposfera;
- Cálculo dos DCBs para satélites e receptores.

De acordo com o exposto, pode-se concluir que o *software* Bernese é muito interessante para se trabalhar com aplicações GPS que requerem alta acurácia. Além disso, é necessário salientar que após a aquisição do *software* é possível realizar alterações no código fonte e recompilar os programas, visto que todas as rotinas são disponibilizadas.

A.3. Solucionando as Ambigüidades com o Bernese 5.0

Para obter as ambigüidades das DDs com o *software* Bernese foi montado um *script* para realizar o processamento automático utilizando a opção BPE. A Tabela 23 apresenta os módulos utilizados e suas respectivas finalidades.

Tabela 23 – Programas utilizados no Bernese para obter as ambigüidades das DDs

MÓDULOS	FINALIDADE
COOVEL	Propagar as coordenadas das estações de referência para a época do rastreo, são utilizadas as velocidades das estações de referência.
POLUPD	Transformar os arquivos de orientação da Terra do formato externo (ex: IERS, IGS) para o formato Bernese.
PRETAB	Criar órbitas tabulares utilizando efemérides precisas (ex: efemérides IGS no formato sp3).
ORBGGEN	Cria arquivos de órbita padrão usando as órbitas tabulares.
RXOBV3	Transforma os arquivos de observação do formato RINEX para o formato Bernese.
CODSPP	Sincroniza o relógio do receptor com o tempo GPS e calcula as coordenadas aproximadas das estações que se quer determinar utilizando observações de pseudodistância. Também detecta erros grosseiros.
SNGDIF	Cria as observações de SDs.
MAUPRP	Realiza o pré-processamento das observações da fase no nível de SDs. Procura por perdas de ciclo, se uma perda de ciclo é encontrada o programa tenta corrigi-la. Se não é possível corrigi-la os dados são removidos ou um novo parâmetro de ambigüidade é introduzido.
GPSEST	Cria as DDs e gera os arquivos de resíduo.
RESRMS	Detecta erros grosseiros e calcula as estatísticas utilizando o arquivo de resíduos. Gera um arquivo (.edt) que será utilizado no próximo programa.
SATMRK	Usa o arquivo (.edt) para editar os arquivos de observações do Bernese.
GPSEST	Gera a solução <i>Float</i> .
BASLST	Seleciona uma linha de base por vez para solucionar as ambigüidades.
GPSEST	Soluciona as ambigüidades utilizando a estratégia QIF.
GPSEST	Introduz as ambigüidades solucionadas disponibilizando na solução final.
OBSFMT	Escreve um arquivo com as ambigüidades recuperadas.

Como pode ser observado na Tabela 23 foi utilizada a estratégia QIF (*Quase Ionosphere-Free*) para a solução do vetor de ambigüidades. O método QIF permite resolver as ambigüidades de L1 e L2 até mesmo para linhas de base longas (com comprimentos de até 1000/2000 km). Além disso, as observações de L1 e L2 são processadas em paralelo.

A.4. Obtendo as Coordenadas de Referência

Para obter as coordenadas de referência para as estações da rede do estado de São Paulo e das duas estações dos experimentos, 5 dias de dados (dias 362, 363, 364, 365 de 2005 e dia 002 de 2006) foram processados no *software* Bernese. Nesse processamento foram utilizados dados da RBMC das estações: NEIA, PARA, PPTE, RIOD e VICO.

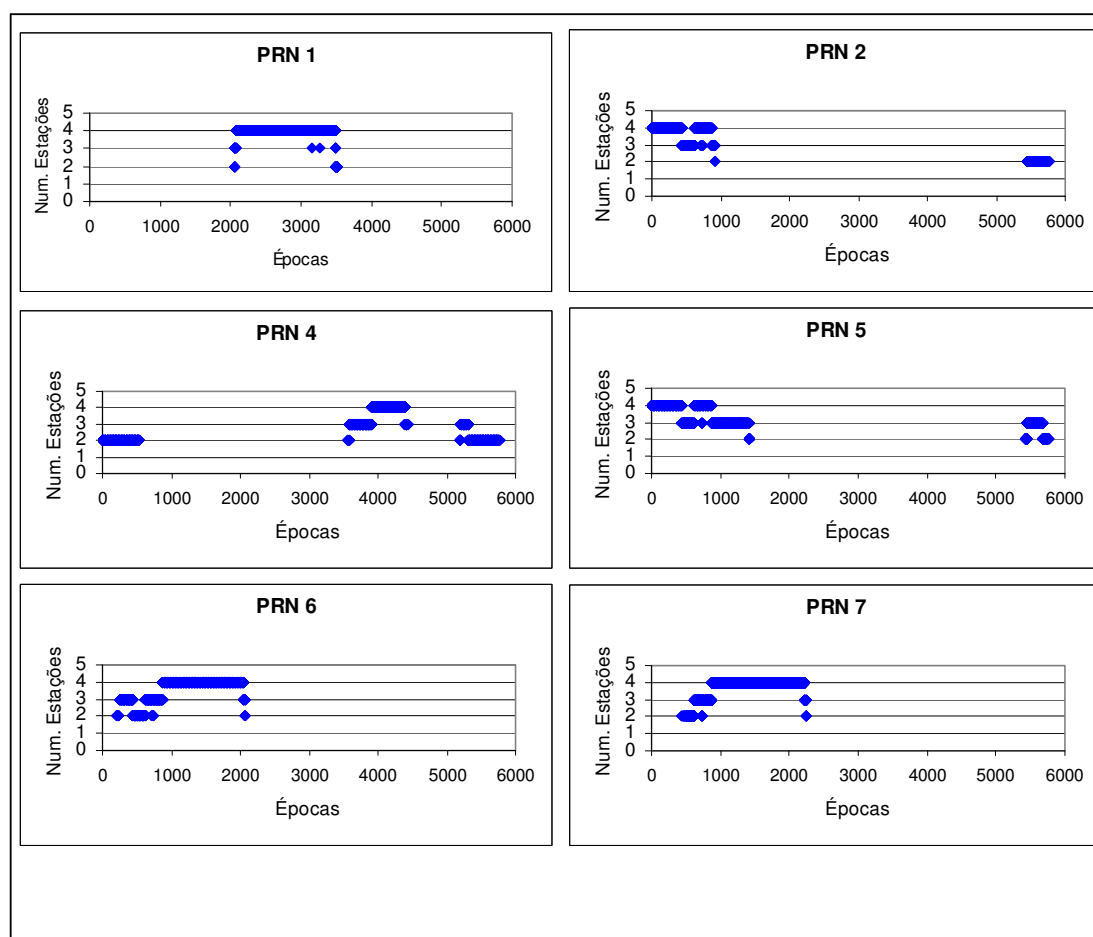
Para obter a solução diária foram utilizados praticamente os mesmos módulos descritos na Tabela 23, a única diferença é que não foi necessário utilizar o módulo OBSFMT. As soluções dos 5 dias foram combinadas utilizando o módulo ADDNEQ2 do *software* Bernese. Com isso, foi possível obter as coordenadas de referência com alta qualidade.

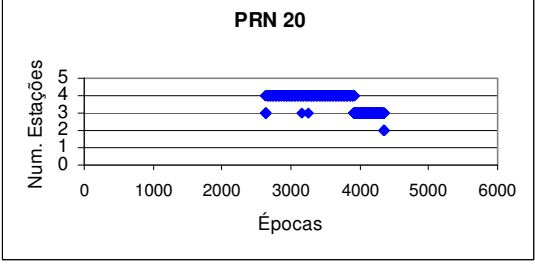
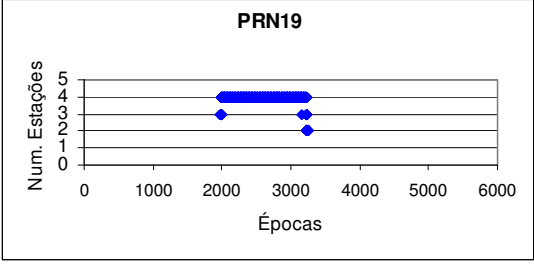
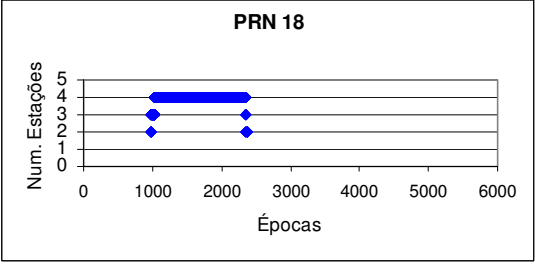
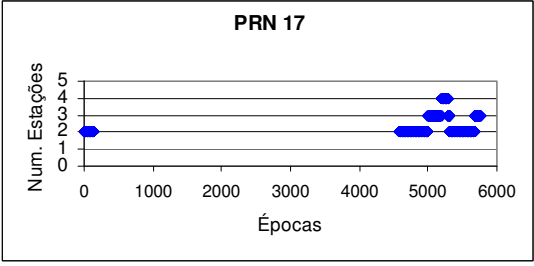
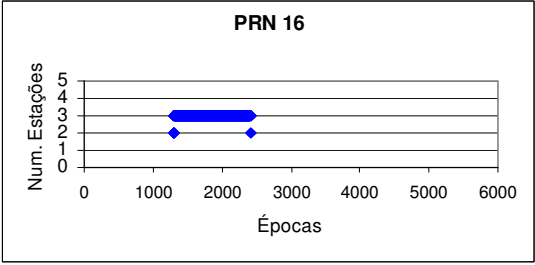
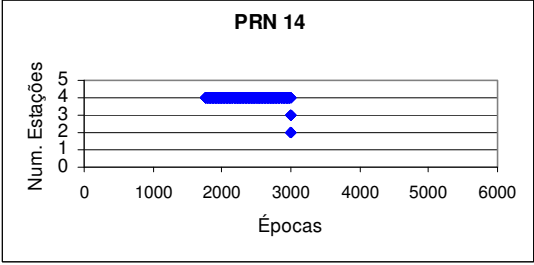
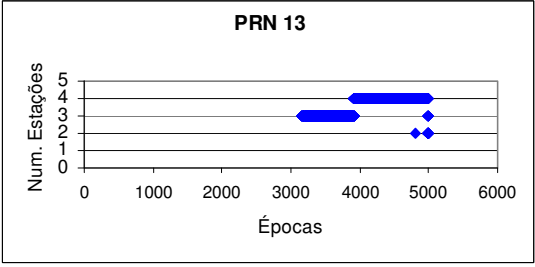
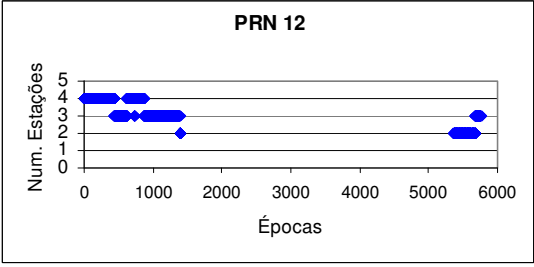
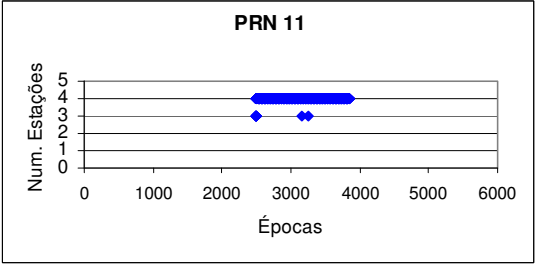
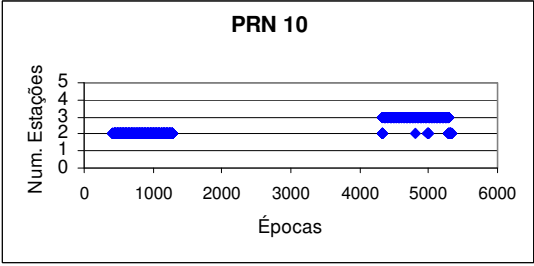
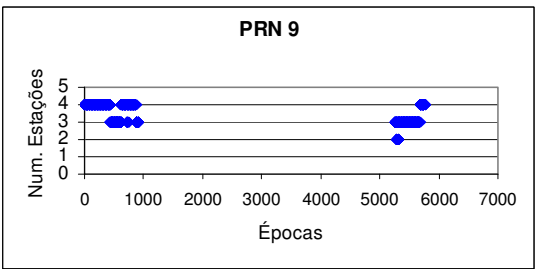
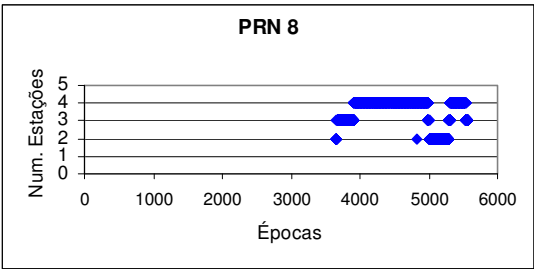
APÊNDICE B – Gráficos e Tabelas Relacionados a Geração da VRS com Solução do Vetor de Ambigüidades

Nesse apêndice são apresentados os gráficos e tabelas que tratam dos detalhes analisados para geração da VRS com solução de vetor de ambigüidades.

B.1. Estações Utilizadas para Gerar o Erro Residual na Posição da VRS

A Figura 63 apresenta o número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para o dia 362.





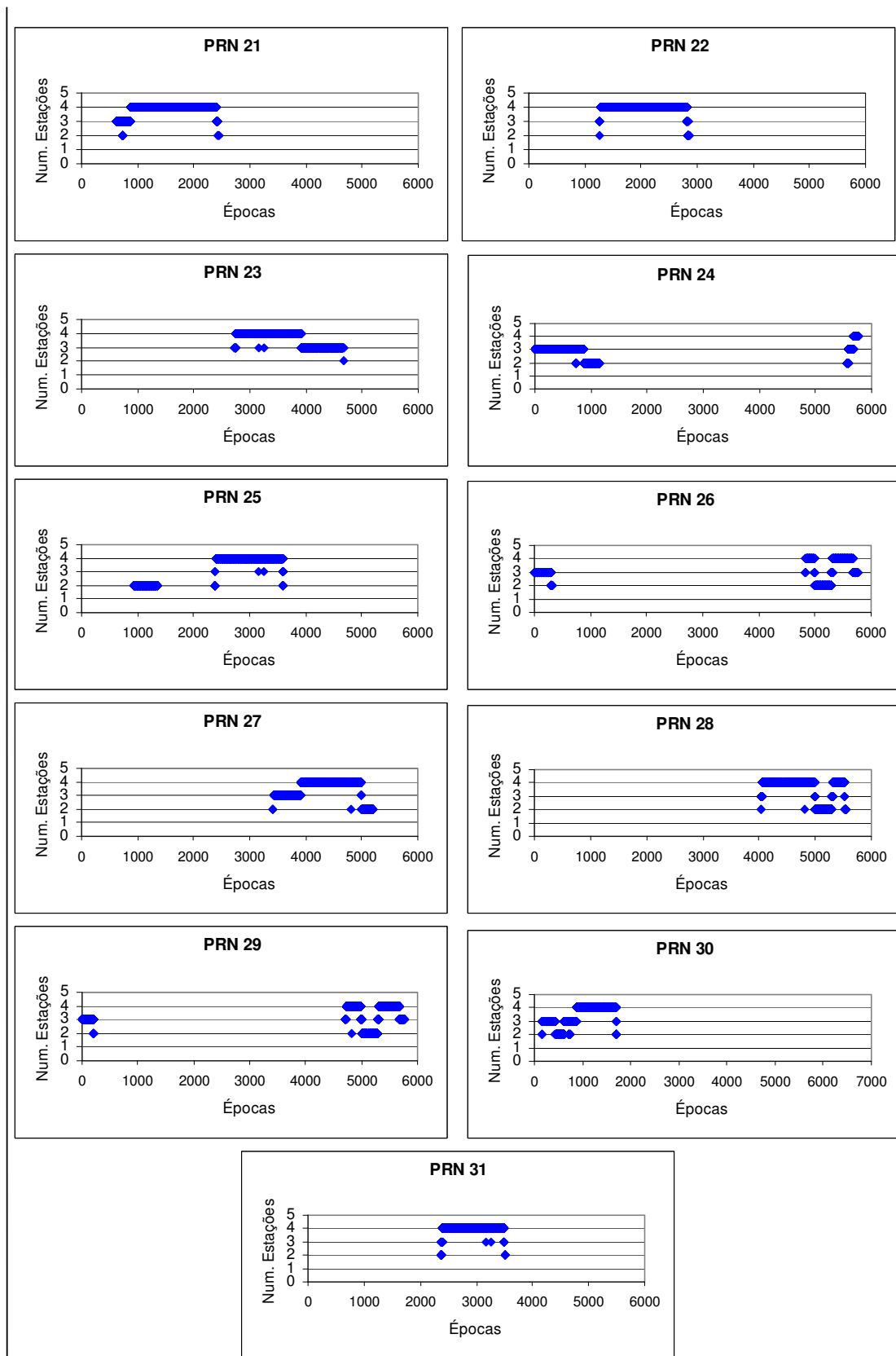
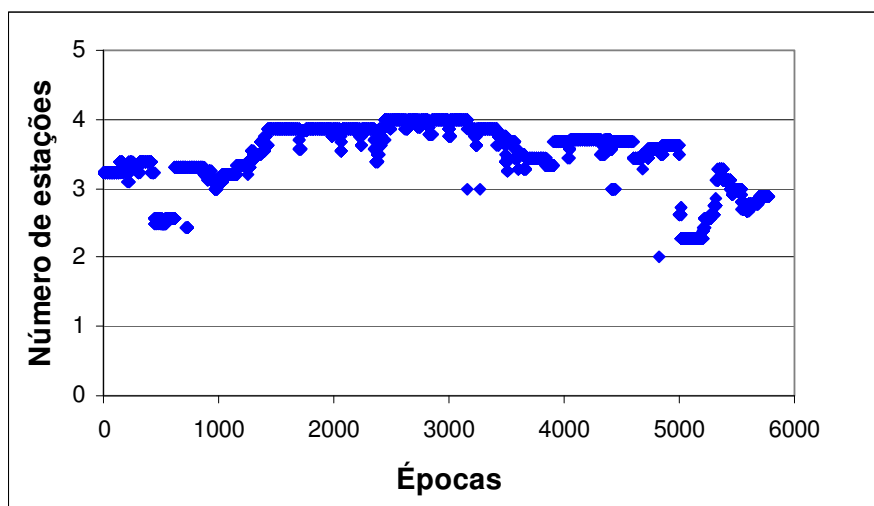
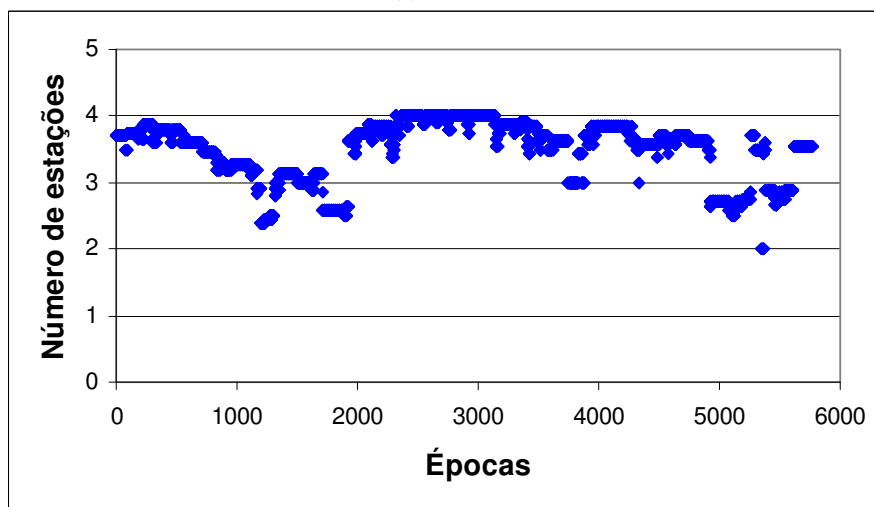


Figura 63 - Número de estações usadas para gerar o erro residual da observável L1 para todos os PRNs da VRS

A Figura 64 apresenta o número médio de estações utilizado em cada época por todos os satélites e observável L1. Na Figura 64 (a) são ilustrados os resultados para o dia 362. Já na Figura 64 (b) comparece o número médio de estações para o dia 002.



(a) Dia 362

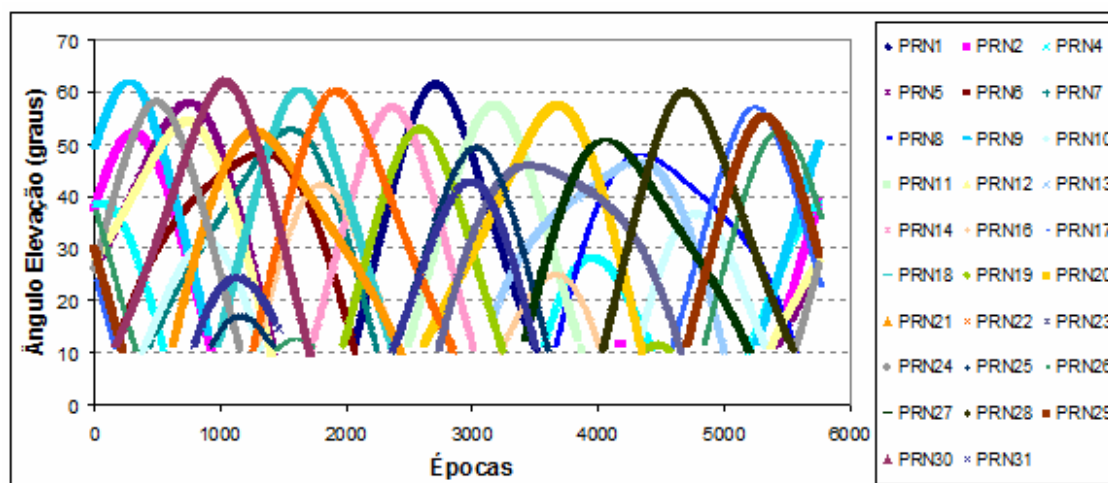


(b) Dia 002

Figura 64 - Número médio de estações utilizadas para gerar o erro residual da observável L1 para os dias 362 (a) e 002 (b)

B.2. Correlação entre a Correção Gerada para a VRS e o Ângulo de Elevação do Satélite

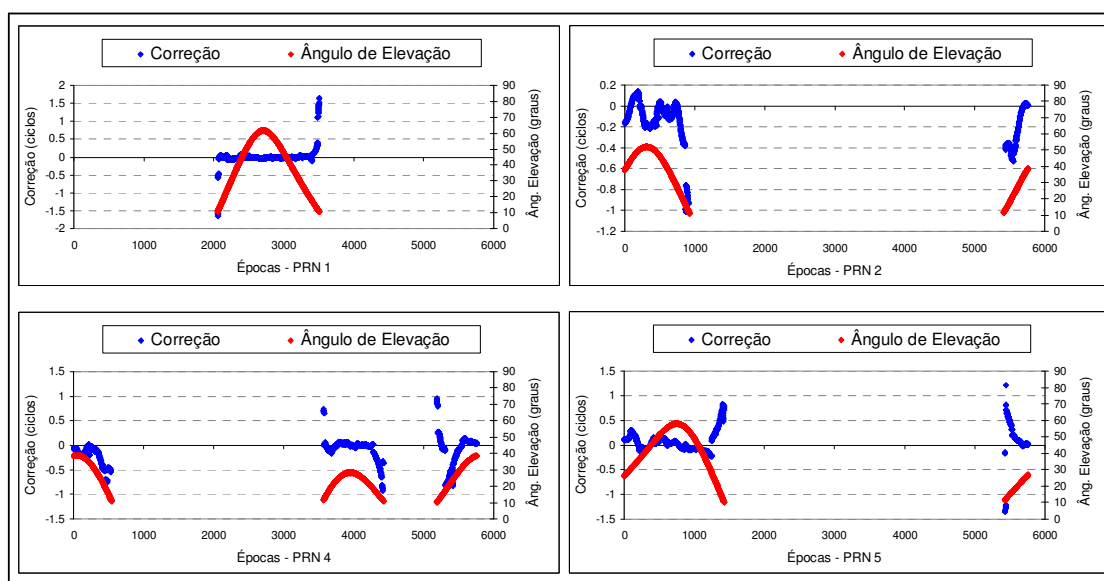
A Figura 65 apresenta o ângulo de elevação dos satélites do arquivo gerado para a VRS do dia 364.

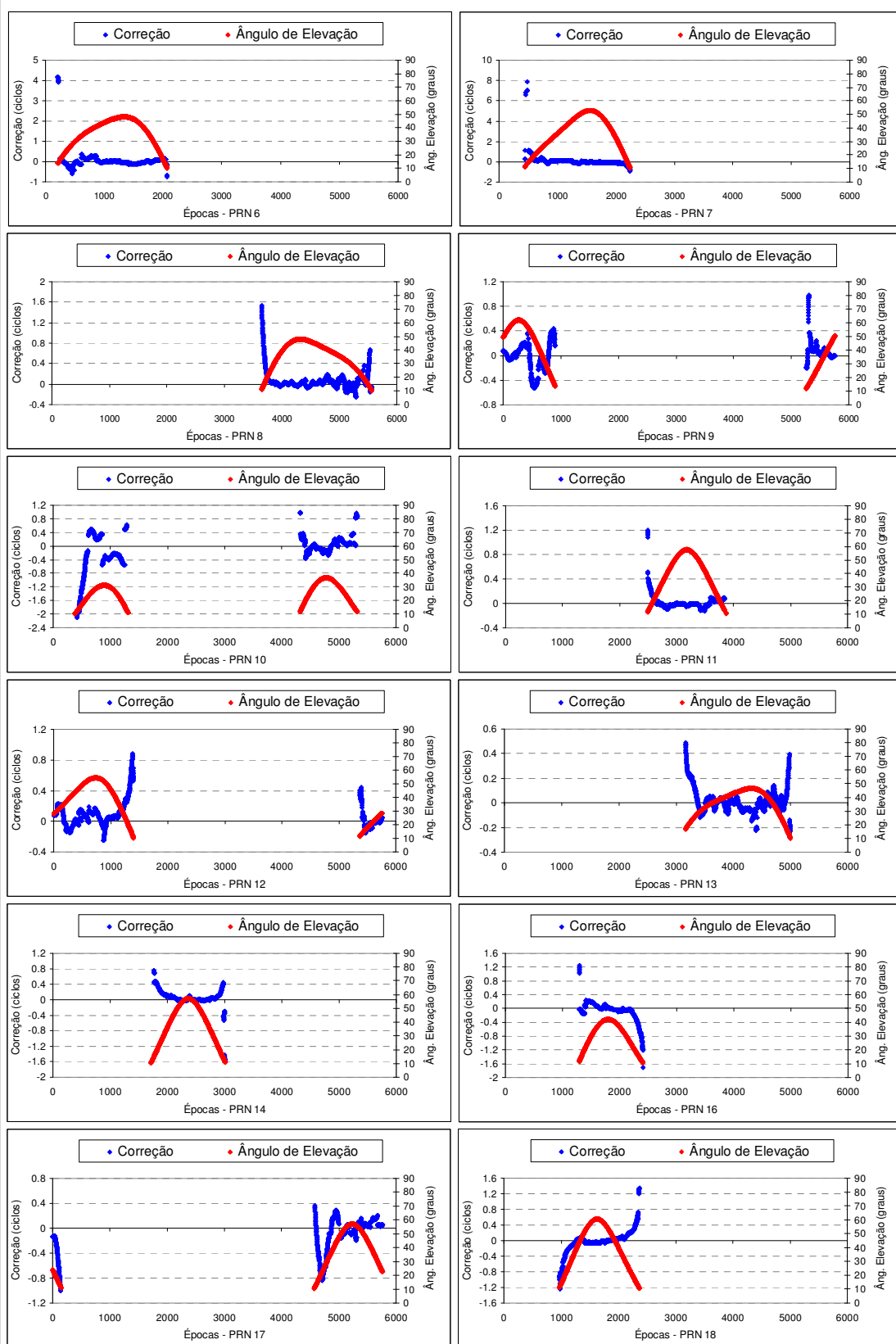


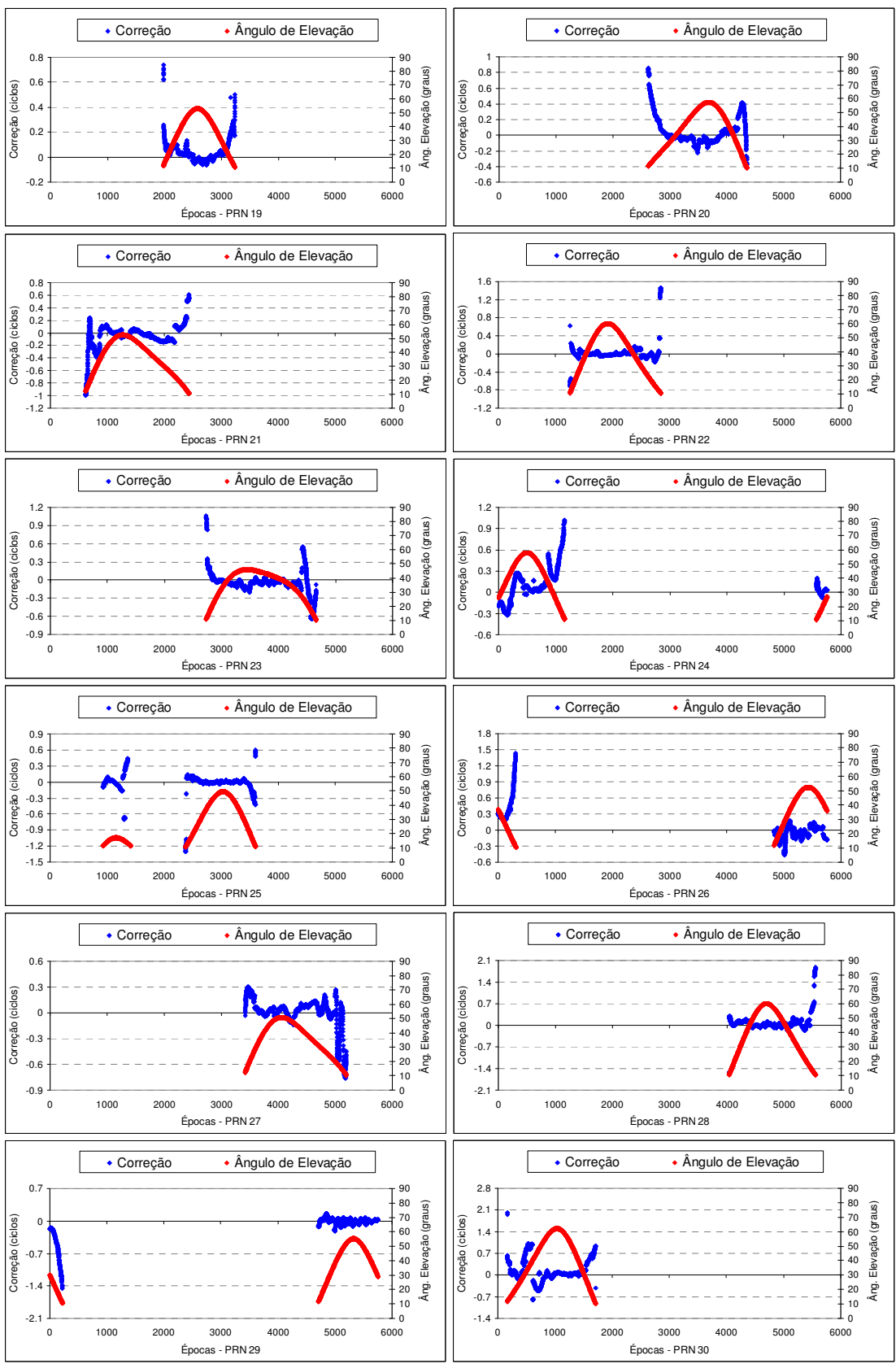
(a) Dia 362

Figura 65 – Ângulo de elevação dos satélites do arquivo gerado para a VRS no dia 362

A Figura 66 apresenta a correção da observável L1 do dia 362 versus o ângulo de elevação para todos os PRNs.







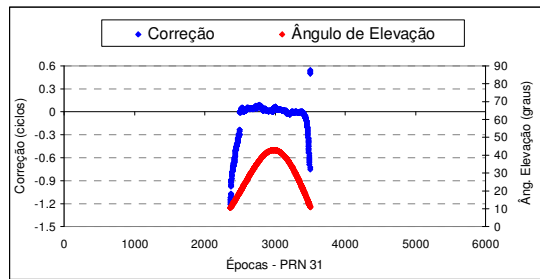


Figura 66 - Correção gerada para a observável L1 da VRS $\times$ ângulo de elevação do satélite para todos os PRNs do dia 362

ANEXO A – Arquivo do Atraso Zenital Troposférico Disponível do CPTEC

LATI	LONG	05051900	+6H	+12H	+18H	+24H	+30H	+36H	+42H	+48H	+54H	+60H	+66H
-18.1210	-52.5000	2.1262	2.1263	2.1285	2.1235	2.1263	2.1281	2.1346	2.1270	2.1287	2.1310	2.1354	2.1291
-18.1210	-51.5625	2.1301	2.1302	2.1328	2.1278	2.1305	2.1326	2.1390	2.1311	2.1333	2.1352	2.1396	2.1328
-18.1210	-50.6250	2.1485	2.1488	2.1519	2.1468	2.1493	2.1517	2.1583	2.1498	2.1526	2.1541	2.1585	2.1513
-18.1210	-49.6875	2.1554	2.1556	2.1592	2.1541	2.1563	2.1590	2.1657	2.1570	2.1600	2.1612	2.1656	2.1581
-18.1210	-48.7500	2.1343	2.1341	2.1379	2.1326	2.1349	2.1376	2.1441	2.1356	2.1387	2.1393	2.1437	2.1363
-18.1210	-47.8125	2.1048	2.1041	2.1080	2.1023	2.1048	2.1074	2.1138	2.1053	2.1085	2.1087	2.1131	2.1057
-19.0585	-52.5000	2.1546	2.1550	2.1568	2.1519	2.1547	2.1566	2.1630	2.1550	2.1570	2.1594	2.1637	2.1577
-19.0585	-51.5625	2.1663	2.1667	2.1689	2.1641	2.1667	2.1690	2.1754	2.1669	2.1695	2.1716	2.1758	2.1692
-19.0585	-50.6250	2.1801	2.1803	2.1831	2.1784	2.1808	2.1834	2.1899	2.1810	2.1840	2.1858	2.1900	2.1828
-19.0585	-49.6875	2.1754	2.1755	2.1786	2.1740	2.1762	2.1790	2.1856	2.1765	2.1799	2.1812	2.1854	2.1779
-19.0585	-48.7500	2.1418	2.1416	2.1448	2.1401	2.1424	2.1452	2.1515	2.1428	2.1462	2.1470	2.1511	2.1437
-19.0585	-47.8125	2.0997	2.0989	2.1021	2.0972	2.0997	2.1023	2.1084	2.0999	2.1036	2.1037	2.1078	2.1004
-19.9960	-52.5000	2.1952	2.1960	2.1977	2.1929	2.1955	2.1976	2.2039	2.1954	2.1976	2.2000	2.2044	2.1989
-19.9960	-51.5625	2.2037	2.2044	2.2065	2.2019	2.2042	2.2067	2.2130	2.2041	2.2068	2.2090	2.2132	2.2070
-19.9960	-50.6250	2.2016	2.2021	2.2046	2.2002	2.2024	2.2051	2.2115	2.2023	2.2054	2.2072	2.2114	2.2047
-19.9960	-49.6875	2.1852	2.1854	2.1882	2.1839	2.1861	2.1888	2.1952	2.1860	2.1895	2.1908	2.1948	2.1878
-19.9960	-48.7500	2.1540	2.1539	2.1567	2.1524	2.1549	2.1576	2.1636	2.1546	2.1585	2.1593	2.1631	2.1559
-19.9960	-47.8125	2.1177	2.1173	2.1201	2.1156	2.1184	2.1209	2.1266	2.1179	2.1221	2.1223	2.1260	2.1188
-20.9335	-52.5000	2.2192	2.2200	2.2217	2.2169	2.2192	2.2215	2.2275	2.2188	2.2210	2.2232	2.2276	2.2231
-20.9335	-51.5625	2.2153	2.2159	2.2178	2.2133	2.2156	2.2180	2.2241	2.2151	2.2178	2.2197	2.2239	2.2187
-20.9335	-50.6250	2.2019	2.2022	2.2044	2.2001	2.2024	2.2049	2.2109	2.2019	2.2050	2.2064	2.2105	2.2048
-20.9335	-49.6875	2.1891	2.1893	2.1917	2.1875	2.1899	2.1925	2.1984	2.1894	2.1930	2.1940	2.1977	2.1917
-20.9335	-48.7500	2.1751	2.1752	2.1778	2.1735	2.1763	2.1789	2.1846	2.1755	2.1797	2.1802	2.1837	2.1774
-20.9335	-47.8125	2.1477	2.1477	2.1501	2.1458	2.1489	2.1514	2.1568	2.1480	2.1525	2.1526	2.1559	2.1494
-21.8710	-52.5000	2.2289	2.2298	2.2313	2.2264	2.2287	2.2310	2.2366	2.2282	2.2301	2.2320	2.2362	2.2331
-21.8710	-51.5625	2.2145	2.2149	2.2164	2.2119	2.2142	2.2165	2.2221	2.2136	2.2160	2.2174	2.2214	2.2176
-21.8710	-50.6250	2.1946	2.1948	2.1965	2.1922	2.1947	2.1970	2.2024	2.1939	2.1968	2.1977	2.2015	2.1972
-21.8710	-49.6875	2.1844	2.1844	2.1863	2.1821	2.1848	2.1871	2.1925	2.1839	2.1873	2.1878	2.1913	2.1866
-21.8710	-48.7500	2.1780	2.1780	2.1801	2.1758	2.1788	2.1812	2.1865	2.1778	2.1818	2.1819	2.1851	2.1800
-21.8710	-47.8125	2.1511	2.1510	2.1530	2.1489	2.1522	2.1544	2.1595	2.1509	2.1554	2.1552	2.1582	2.1529
-22.8085	-52.5000	2.2252	2.2265	2.2276	2.2229	2.2252	2.2273	2.2322	2.2247	2.2263	2.2275	2.2317	2.2296
-22.8085	-51.5625	2.2034	2.2042	2.2051	2.2006	2.2031	2.2052	2.2101	2.2025	2.2044	2.2053	2.2091	2.2064
-22.8085	-50.6250	2.1766	2.1771	2.1779	2.1736	2.1763	2.1784	2.1831	2.1755	2.1779	2.1782	2.1819	2.1787
-22.8085	-49.6875	2.1592	2.1593	2.1602	2.1562	2.1590	2.1611	2.1657	2.1580	2.1609	2.1607	2.1641	2.1606
-22.8085	-48.7500	2.1521	2.1521	2.1531	2.1492	2.1523	2.1544	2.1589	2.1511	2.1546	2.1540	2.1572	2.1532
-22.8085	-47.8125	2.1373	2.1371	2.1381	2.1344	2.1377	2.1398	2.1441	2.1360	2.1402	2.1394	2.1424	2.1382