

**MAURICIO IHLENFELDT SEJAS**

**SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA PELA FASE DA ONDA PORTADORA  
ANÁLISE DA TÉCNICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Pereira Krueger

**CURITIBA**

**2005**

**“SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA PELA FASE DA ONDA  
PORTADORA ANÁLISE DA TÉCNICA”**

**POR**

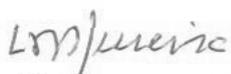
**MAURÍCIO IHLENFELDT SEJAS**

Dissertação nº 177 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 23 de março de 2005.

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Claudia Pereira Krueger (UFPR)  
Orientadora e Presidente

  
Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés - Membro (UNIDERP)

  
Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira – Membro (UFPR)

*Dedico esta dissertação à minha mãe  
Deise, minhas irmãs Flávia e Idce e à  
minha sobrinha Hadra.*

## **AGRADECIMENTOS**

Os agradecimentos iniciais são para a minha mãe Deise, que me deu a vida, amor, educação e sempre acreditou em mim. Compartilho com ela o mérito desta dissertação, pois o esforço foi em conjunto. Agradeço também as minha irmãs Flávia e Idce, minha sobrinha Hadra e aos meus cunhados Lucas e Dal, pela constante motivação e apoio.

À Professora Cláudia Krueger, não somente por orientar este trabalho, mas também pela orientação de outros trabalhos. Agradeço sinceramente pelas sugestões, idéias, incentivo, motivação, oportunidades, confiança e pela amizade.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciência Geodésicas (CPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), por disponibilizar todos os recursos necessários ao desenvolvimento desta dissertação. Agradeço também a todos os professores que colaboraram, direta, ou indiretamente ao meu aprendizado, não somente nestes dois últimos anos, como em toda a graduação.

Meus agradecimentos aos professores Silvio Jacks e Danilo, pela críticas e sugestões apresentadas no Seminário de Qualificação, e por se colocarem à disposição.

Ao amigo Márcio Urakawa, pelas discussões e sugestões a respeito do trabalho e à empresa MANFRA, pela doação de um programa e por se colocar à disposição para empréstimo de equipamentos.

Ao amigo Alexandre do Prado, por sempre estar disposto a sanar as dúvidas referentes ao GPS e também à amiga Samantha, pelo incentivo.

Aos amigos do LAIG, do LAGE e da Graduação de Engenharia Cartográfica e da Pós-Graduação, pelo apoio e motivação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	x
<b>RESUMO</b> .....	xi
<b>ASBTRACT</b> .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 INTRODUÇÃO AO NAVSTAR-GPS .....	3
2.2 SISTEMAS DE COORDENADAS .....	3
2.3 SINAIS DOS SATÉLITES E MODERNIZAÇÕES DO SISTEMA .....	5
2.4 OBSERVÁVEIS GPS .....	7
2.4.1 Pseudodistância .....	7
2.4.2 Fase da Onda Portadora .....	10
2.4.3 Multicaminho nas Observáveis GPS .....	12
2.5 COMBINAÇÕES LINEARES .....	13
2.6 SALTOS DE CICLO .....	16
2.6.1 Detecção de Saltos de Ciclo .....	17
2.7 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO .....	22
2.8 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES .....	24
2.9 MÉTODOS DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA .....	28
2.9.1 Filtro de HATCH-82 .....	29
2.9.2 Filtro de LACHAPELLE-86 .....	32
<b>3 ARQUIVOS DE OBSERVAÇÕES E PROGRAMAS UTILIZADOS</b> .....	<b>34</b>
3.1 ARQUIVOS DE OBSERVAÇÕES .....	34
3.2 PROGRAMAS .....	36
<b>4 RESULTADOS OBTIDOS PELO PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>41</b>
4.1 CORREÇÃO DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA .....	41
4.2 FATOR DE PESO PARA O FILTRO DE LACHAPELLE .....	41
4.3 SUAVIZAÇÃO EM RECEPTORES GPS .....	43

4.4 SUAVIZAÇÃO PARA A PORTADORA $L_1$ .....	47
4.5 SUAVIZAÇÃO PARA AS DUAS PORTADORAS .....	52
4.6 EFEITO DA SUAVIZAÇÃO EM UM POSICIONAMENTO ABSOLUTO .....	55
4.7 EFEITO DA SUAVIZAÇÃO EM UM POSICIONAMENTO RELATIVO .....	65
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICES E ANEXOS .....</b>	<b>78</b>
APÊNDICE 1 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA SuavizaPD .....	79
APÊNDICE 2 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO RINEX DE OBSERVAÇÃO GERADO PELO PROGRAMA SuavizaPD .....	80
APÊNDICE 3 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA PAC .....	81
APÊNDICE 4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO PROGRAMA PAC E O GISDataPRO .....	82
APÊNDICE 5 – PROCESSAMENTO DAS LINHAS DE BASE .....	83
APÊNDICE 6 – RESULTADOS PARA A ESTAÇÃO FERG .....	84
APÊNDICE 7 – GRÁFICOS POLARES .....	89
ANEXO 1 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO ASCII GERADO PELO PRISM .....	92

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – COMBINAÇÕES LINEARES DE FASE .....	15
TABELA 2.2 – COMBINAÇÕES DE CÓDIGO E FASE PARA HATCH-82 .....	30
TABELA 3.1 – ARQUIVOS DE OBSERVAÇÕES UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS.....	35
TABELA 3.2 – COORDENADAS GEODÉSICAS PRECISAS (WGS-84) DAS ESTAÇÕES .....	36
TABELA 4.1 – FATOR DE REDUÇÃO E TOTAL DE ÉPOCAS PARA TEMPOS DE SUAVIZAÇÃO DE 250 SEGUNDOS .....	42
TABELA 4.2 – OBSERVAÇÕES ORIGINAIS E CORREÇÃO DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADA PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 .....	43
TABELA 4.3 – ESTATÍSTICA DAS CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ).....	51
TABELA 4.4 – ESTATÍSTICA DAS CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ E $L_2$ ).....	55
TABELA 4.5 – ESTATÍSTICA DOS ERROS TRIDIMENSIONAIS DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EM 1999 E 2004 .....	58
TABELA 4.6 – COORDENADAS GEODÉSICAS (WGS-84) DETERMINADAS PELO PROGRAMA GISDataPRO, COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO.....	59
TABELA 4.7 – ACURÁCIA DAS COORDENADAS DETERMINADAS PELO PROGRAMA GISDataPRO .....	59
TABELA 4.8 – LINHAS DE BASE PARA O PROCESSAMENTO RELATIVO .....	65
TABELA 4.9 – ACURÁCIA DAS COORDENADAS DETERMINADAS PELO PROGRAMA GISDataPRO .....	66

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DEFINIÇÃO DO SISTEMA WGS-84.....	5
FIGURA 2.2 – FUTUROS SINAIS GPS .....	6
FIGURA 2.3 – PRINCÍPIO DA MEDIDA DE PSEUDODISTÂNCIA .....	7
FIGURA 2.4 – MEDIDA DA FASE DA ONDA PORTADORA .....	11
FIGURA 2.5 – SALTO DE CICLO.....	16
FIGURA 2.6 – DETECÇÃO DE SALTO DE CICLO .....	20
FIGURA 2.7 – ERRO DO RELÓGIO DE RECEPTORES GPS .....	21
FIGURA 2.8 – VARIAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA DO CÓDIGO (ACIMA) DEVIDO AO ERRO DO RELÓGIO DO RECEPTOR GPS (ABAIXO) UTILIZADAS NOS PROCESSAMENTOS .....	22
FIGURA 3.1 – JANELA PRINCIPAL DO PROGRAMA SuavizaPD .....	39
FIGURA 3.2 – JANELA PRINCIPAL DO PROGRAMA PAC.....	40
FIGURA 4.1 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 EM 2000 .....	44
FIGURA 4.2 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 EM 2004 .....	45
FIGURA 4.3 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 EM 2004 .....	45
FIGURA 4.4 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 E PELOS FILTROS DE LACHAPELLE-86 E HATCH-82.....	46
FIGURA 4.5 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SATÉLITE PRN 5 .....	47
FIGURA 4.6 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SATÉLITE PRN 9 .....	48
FIGURA 4.7 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06 E 10 .....	49
FIGURA 4.8 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) PARA OS SATÉLITES PRN 17, 21 E 30 .....	50
FIGURA 4.9 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO CANG .....	50
FIGURA 4.10 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ E $L_2$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SETÉLITE PRN 05 .....	52
FIGURA 4.11 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ E $L_2$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SETÉLITE PRN 09 .....	53

FIGURA 4.12 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ E $L_2$ ) PARA OS SATÉLITES 05, 06 E 10 .....	54
FIGURA 4.13 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ E $L_2$ ) PARA OS SATÉLITES 17, 21 E 30 .....	54
FIGURA 4.14 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO PARA A ESTAÇÃO CEM1 .....	56
FIGURA 4.15 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO PARA A ESTAÇÃO CANG .....	57
FIGURA 4.16 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS ( $L_1$ E $L_2$ ), EFEMÉRIDES PRECISAS E MODELO PARA A TROPOSFERA PARA A ESTAÇÃO CANG .....	60
FIGURA 4.17 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS ( $L_1$ E $L_2$ ), EFEMÉRIDES PRECISAS E MODELO PARA A TROPOSFERA PARA A ESTAÇÃO AGUD .....	60
FIGURA 4.18 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS PARA 700 ÉPOCAS DE SUAVIZAÇÃO SEM REINICIALIZAÇÃO DO FILTRO .....	61
FIGURA 4.19 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS PARA 700 ÉPOCAS DE SUAVIZAÇÃO REINICIANDO O FILTRO A CADA 50 ÉPOCAS .....	62
FIGURA 4.20 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS ( $L_1$ E $L_2$ ) COM DIFERENTES TAXAS DE GRAVAÇÃO .....	63
FIGURA 4.21 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS ( $L_1$ E $L_2$ ) E UMA COMBINAÇÃO LINEAR PARA A PSEUDODISTÂNCIA PARA A ESTAÇÃO RM03 .....	64
FIGURA 4.22 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS ( $L_1$ E $L_2$ ) E UMA COMBINAÇÃO LINEAR PARA A PSEUDODISTÂNCIA PARA A ESTAÇÃO AGUD .....	64
FIGURA 4.23 – ERRO PLANIMÉTRICO DO POSICIONAMENTO RELATIVO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIA ORIGINAIS E SUAVIZADAS E UMA COMBINAÇÃO LINEAR PARA A PSEUDODISTÂNCIA .....	67

FIGURA 4.24 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO RELATIVO  
EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS E UMA  
COMBINAÇÃO LINEAR PARA A PSEUDODISTÂNCIA .....67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOC	– Auxiliary Output Chips
AS	– Anti-Spoofing
ASCII	– American Standard Code for Information Interchange
BIH	– Bureau International de l'Heure
C/A	– Coarse Acquisition-code
CNPq	– Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPGCG	– Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
CIO	– Conventional International Origin
CTRS	– Conventional Terrestrial Reference System
GPS	– Global Positioning System
GRS	– Geodetic Reference System
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	– International Earth Rotation Service
IGS	– International GPS Service
ITRF	– International Terrestrial Reference Frame
LAGE	– Laboratório de Geodésia Espacial
M	– Código M
MMQ	– Método dos Mínimos Quadrados
MVC	– Matriz Variância-covariância
NAVSTAR	– Navigation System with Time And Ranging
P	– Precise-code
PD	– Pseudodistância
PRN	– Pseudorandom Noise
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	– Receiver Independent Exchange Format
SA	– Selective Availability
SIRGAS	– Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SP3	– Standard Product 3
SPP	– Single Point Positioning
TRF	– Terrestrial Reference Frame
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
UTC	– Coordinated Universal Time
UTM	– Universal Transverse Mercator
WGS-84	– World Geodetic System 1984
Y	– Y-code

## RESUMO

Os resultados mais precisos no posicionamento GPS são alcançados no método de posicionamento relativo quando se utilizam observações da fase de batimento da onda portadora, com a determinação correta dos inteiros das ambiguidades. Por outro lado, no posicionamento da pseudodistância do código não existe o termo ambíguo da observável para ser resolvido, contudo a precisão alcançada muitas vezes não é satisfatória, sendo da ordem de alguns metros. No entanto, pode-se recorrer a um processo intermediário que consiste na utilização da fase da onda portadora para suavizar as medidas das pseudodistância do código. A idéia com isso é aproveitar o baixo ruído das medidas de fase, de poucos milímetros, para reduzir os ruídos das medidas do código, que são de alguns metros, alcançando assim distâncias mais precisas sem a necessidade de resolver as ambigüidades. Em princípio, quanto mais épocas forem empregadas no processo de suavização, mais precisas deverão ser as pseudodistâncias suavizadas. O propósito desta pesquisa está em explorar a técnica de suavização da pseudodistância, apresentando seu princípio fundamental e a acurácia obtida em posicionamentos que empregam as observáveis resultantes deste processo. As pseudodistâncias mensuradas em levantamentos absolutos foram suavizadas pela portadora  $L_1$  e também pelas duas portadoras, e os resultados provenientes dos processamentos mostraram que o posicionamento que empregou pseudodistâncias suavizadas são mais precisos quando comparados aos posicionamentos que utilizaram as observações originais do código. Constatou-se que a acurácia procedente do processamento de linhas de base empregando as pseudodistâncias suavizadas podem ser menor que o metro. De forma geral, nos experimentos realizados as pseudodistâncias suavizadas forneceram resultados melhores quando confrontados com os obtidos com as pseudodistâncias não suavizadas.

## ABSTRACT

Baseline positioning with carrier phase observations provide the best GPS results, however these observations require ambiguities fixing. On the other hand, code pseudorange positioning are not ambiguous, but the accuracy is not enough for the most part of the applications because it gives some meters of the accuracy. The pseudorange smoothing is a process that provides intermediary accuracy, in other words, the accuracy is not so good as the carrier phase observations and is better than pseudorange observations alone. The idea of smooth pseudorange by carrier phase is to combine phase (mm level) and code (m level) observations. In principle the more data are used in smoothing more accurate is the positioning, and no resolution ambiguity is necessary. The objective of this work is to explore the pseudorange smoothing technique showing its fundamental principle and its positioning accuracy. Observations from absolute positioning were smoothed with  $L_1$  alone and with both carriers phase ( $L_1$  and  $L_2$ ). The processed results showed more precision in positioning with pseudorange smoothed than original pseudorange from code. In baseline mode results showed accuracy better than 1 meter using pseudorange smoothed. The most part of the experiments showed that positioning using smoothed pseudorange is more precise than original code positioning.

## 1 INTRODUÇÃO

Diversos métodos e técnicas foram desenvolvidos ao longo dos anos com o objetivo de melhorar a precisão do posicionamento GPS. O receptor GPS utilizado no levantamento tem papel decisivo no resultado final do posicionamento, pois é ele quem realiza as observações que podem ser: pseudodistância do código, fase da onda portadora ou combinações entre eles. Os receptores de menor custo têm a capacidade de realizar o posicionamento apenas com observações de código, e portanto a precisão que pode ser obtida é da ordem de alguns metros. Receptores de dupla frequência, por outro lado, coletam observações de código e da fase, e têm como vantagem proporcionar um posicionamento preciso e como desvantagem um custo mais elevado. Conta-se ainda com receptores que coletam observações do código C/A e da fase da portadora  $L_1$ . A suavização da pseudodistância é uma técnica que não pode ser aplicada aos primeiros receptores devido à falta de observações de fase, mas por outro lado, receptores de dupla frequência não seriam empregados para o posicionamento com o código pois o posicionamento com a fase é mais preciso, e portanto, teria preferência no processamento.

WELLS et al. (1986, p. 9.14) afirma que a precisão na medida das pseudodistâncias é próxima a 1% de comprimento de onda. Sendo o comprimento de onda do código C/A em torno de 300 metros e do código P de 30 metros, tem-se, assim, uma precisão nas medidas de 3 e 0,3 metros, respectivamente. A precisão na medida das fases é da ordem do milímetro. Como o posicionamento somente com o código não fornece a precisão almejada por muitas aplicações (Geodésia, Geofísica, engenharia, etc.), a técnica da suavização da pseudodistância pela portadora poderia ser uma alternativa para preencher esta necessidade, pois segundo MONICO (2000, p. 171), à medida que o número de épocas aumenta, a precisão da observável suavizada melhora.

A suavização da pseudodistância do código é um processo que combina as não ambíguas, porém imprecisas medidas dos códigos com as ambíguas mas no entanto precisas medidas de fase das portadoras. Segundo HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 96), as primeiras investigações sobre a suavização da pseudodistância (*pseudorange smoothing*) foram conduzidas por Ron Hatch em

1982. Aplicações e melhoramentos foram propostos mais tarde por Hatch e outras pequenas variações foram dadas por Gerard Lachapelle, em 1986, e outros autores.

O objetivo deste trabalho é analisar a técnica de suavização da pseudodistância mediante as correções de suavização das pseudodistâncias e de resultados da acurácia obtidos nos processamentos absoluto e relativo das pseudodistâncias suavizadas pela fase da onda portadora.

Para atingir o propósito deste trabalho, foram desenvolvidos dois programas de processamento de dados, além de diversos aplicativos. O primeiro programa, denominado PAC (Posicionamento Absoluto com Código), tem a capacidade de ler arquivos RINEX de observação e navegação e gerar uma solução para cada época empregando o código como observável no processamento. O segundo programa, chamado SuavizaPD, lê um arquivo RINEX de observação e realiza a suavização das pseudodistâncias pela fase da onda portadora, empregando uma ou as duas frequências, quando disponíveis. Ao final do processamento ele gera um arquivo RINEX de observação com as pseudodistâncias suavizadas, que pode ser empregado no processamento com qualquer outro programa de processamento.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o segundo a revisão da literatura, que aborda alguns dos princípios fundamentais do GPS, como: sistemas de coordenadas; sinais dos satélites e suas características; observáveis GPS; combinações lineares; saltos de ciclo; métodos de posicionamento; ajustamento de observações e a suavização da pseudodistância. Com respeito à esta última seção, o enfoque principal está na apresentação do princípio fundamental da técnica, por meio de equações e discussão de algumas de suas características.

No terceiro capítulo são comentados os motivos que levaram à escolha de determinados arquivos de observações para a realização dos processamentos, sendo o principal deles a capacidade do receptor GPS de medir observações de fase e do código nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ .

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos no processamento dos dados, como: comparações entre os filtros, a análise da influência da SA no processo de suavização, e resultados provenientes do processamento absoluto e relativo empregando as pseudodistâncias suavizadas pela portadora.

E o quinto capítulo destina-se as conclusões finais e algumas recomendações convenientes sobre esta técnica.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO AO NAVSTAR–GPS

O GPS é descrito por três segmentos: o espacial, o de controle e o de usuário.

O segmento espacial consiste na constelação de satélites que transmitem os sinais. Segundo HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 12), os satélites GPS têm uma órbita quase circular a uma altitude de aproximadamente 20200 km, com período orbital de 12 horas siderais. A constelação básica consiste em 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com uma inclinação de 55°, com quatro satélites em cada plano. Devido a esse fato o segmento espacial é capaz de fornecer cobertura global de pelo menos quatro satélites a qualquer hora do dia aos usuário do sistema.

De acordo com o mesmo autor, o segmento de controle consiste na estação de controle principal e em estações de monitoramento. As principais tarefas do segmento de controle são: rastrear os satélites para a determinação e predição da órbita e do relógio, e atualização das mensagens de navegação que serão transmitidas pelos satélites.

O segmento de usuários, por sua vez, é composto pelos usuários, tanto civis quanto militares, e pelos receptores GPS.

Maiores detalhes sobre os segmentos GPS podem ser encontrados em: HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 12-24), KRUEGER (1996, p. 5-8), MONICO (2000, p. 21-35), SEEBER (1993, p. 209-215).

### 2.2 SISTEMAS DE COORDENADAS

As coordenadas determinadas por meio de um posicionamento por satélites GPS estão em um sistema de referência geocêntrico. O CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System* – Sistema de Referência Terrestre Convencional) é um sistema geocêntrico, cartesiano e tridimensional. Segundo HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 28) o eixo Z, por convenção, coincide com o eixo de rotação médio da Terra definido pelo CIO (*Conventional International Origin*) e o eixo X coincide com a

direção do meridiano médio de Greenwich. O eixo Y torna o sistema dextrógiro. A realização do sistema é chamada de TRF (*Terrestrial Reference Frame* – Rede de Referência Terrestre) e é composto por um grupo de estações terrestres de controle. Um exemplo de uma rede de referência terrestre é o realizado pelo IERS chamado ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), sendo que o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) compõe parte dessa rede.

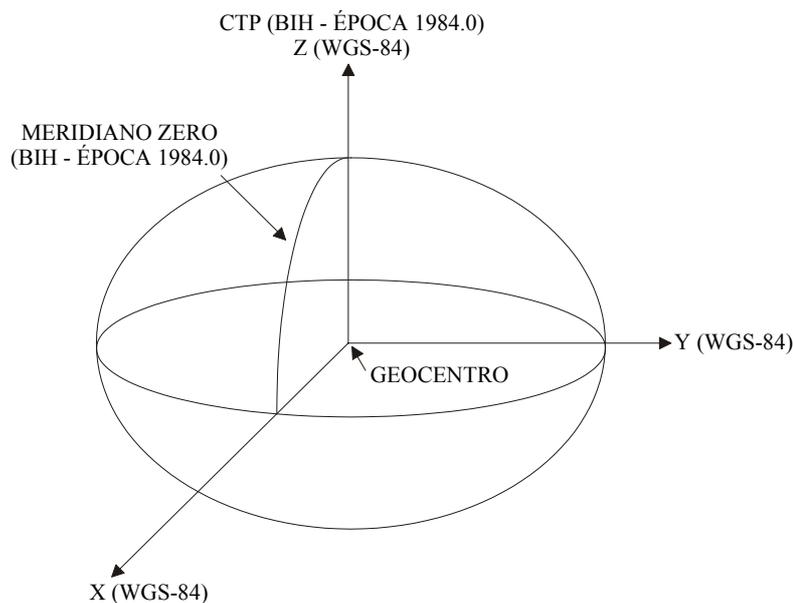
A primeira realização SIRGAS utilizou estações distribuídas pelo continente sul americano e observadas por GPS entre maio e junho de 1995. As coordenadas finais desta realização estão referidas ao ITRF94, época 1995.4. Recomendou-se a re-observação da rede de referência a cada 5 anos, visando a manutenção do SIRGAS, e assim a campanha SIRGAS2000 foi realizada em maio de 2000, empregando-se estações da América do Sul, América Central, América do Norte e Caribe. As coordenadas finais SIRGAS2000 estão referidas ao ITRF2000, época de referência 2000.4 (PROJETO SIRGAS).

Um outro sistema de referência terrestre é o WGS-84 (*World Geodetic System* 1984). Segundo MONICO (2000, p. 77), o sistema de referência do GPS, quando se utilizam efemérides transmitidas, é o WGS-84. Desta forma, quando um levantamento é efetuado usando esse tipo de efemérides, as coordenadas dos pontos envolvidos serão obtidas nesse sistema de referência.

A figura 2.1 ilustra a definição do WGS-84, onde os eixos X e Z foram definidos pelo BIH (*Bureau International de l'Heure* – Agência Internacional da Hora) para a época 1984.0 (HOOIJBERG, 1997, p. 46). A origem está no centro de massa da Terra e o elipsóide de referência é o GRS 80, um elipsóide de revolução geocêntrico.

Para maiores detalhes sobre sistemas de coordenadas consultar HOFMANN-WELLENHOF et al. (2001, p. 25-30), HOOIJBERG (1997, p. 44-46), MONICO (2000, p. 61-63).

FIGURA 2.1 – DEFINIÇÃO DO SISTEMA WGS-84



FONTE: adaptada de HOOIJBERG (1997, p. 46).

### 2.3 SINAIS DOS SATÉLITES E MODERNIZAÇÕES DO SISTEMA

A principal tarefa dos satélites GPS consiste em enviar sinais com informações de navegação e identificação, os quais serão decodificados pelos receptores GPS (KRUEGER, 1996, p. 9).

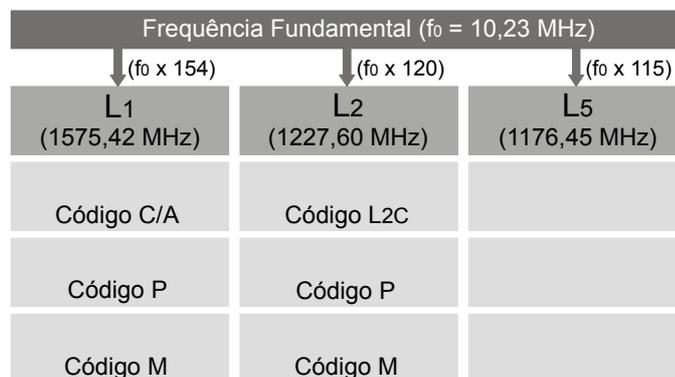
Os satélites GPS transmitem sinais em duas frequências, também chamadas portadoras, pertencentes à banda L, sendo:  $L_1$  (1.575,42 MHz) e  $L_2$  (1.227,60 MHz). Sobre estas portadoras são modulados em fase os códigos C/A (*Coarse Acquisition* – Fácil Aquisição), disponível para todos os usuários, e o código P (*Precise* – Preciso), sobre o qual é criptografado o código secreto Y, além das mensagens de navegação, moduladas sobre ambas as portadoras. O código P original é disponível apenas a militares e usuários autorizados.

O código C/A é modulado apenas sobre a portadora  $L_1$ , enquanto que o código P sobre as duas portadoras. O código C/A tem um comprimento em torno de 300 m e é transmitido com uma frequência de 1,023 MHz, enquanto que o código P, com um comprimento de onda de 30 m, é transmitido a 10,23 MHz. De acordo com MONICO (2000, p. 27), o fato do código P ser modulado numa razão mais alta faz com que o mesmo seja mais preciso.

Segundo KRUEGER (1996, p. 7), o AS (*Anti-Spoofing*) codifica o código P sobre a fase das portadoras em  $L_1$  e  $L_2$  no código secreto denominado código Y. As pseudodistâncias do código P sobre as portadoras ( $PD_{L1}$  e  $PD_{L2}$ ) só podem ser determinadas para usuários autorizados que dispõe de um receptor que tenha implementado o AOC (*Auxiliary Output Chips*). Ele permite aos usuários autorizados a ter acesso direto ao código P. Os usuários não autorizados podem efetuar as medidas das pseudodistâncias e da fase da onda portadora por meio de técnicas denominadas *Codeless* e *Quasi-codeless*, que são descritas por: GARNÉS (2001, p. 18-21), KRUEGER (1996, p. 39-40), MONICO (2000, p. 44).

De acordo com SEEBER (2003, p. 231), com a modernização do GPS, além do novo código militar M em  $L_1$  e  $L_2$ , dois novos sinais civis estarão disponíveis, designados  $L_{2C}$ , na  $L_2$ , e  $L_5$  uma terceira frequência de 1.176,45 MHz (figura 2.2). O código do sinal  $L_{2C}$  terá muito mais qualidade do que simplesmente a introdução de um código C/A, como foi previsto inicialmente. O mesmo autor ainda comenta que a disponibilidade das três frequências irá ajudar no que se refere à ionosfera e facilitar a resolução das ambigüidades.

FIGURA 2.2 – FUTUROS SINAIS GPS



Os novos sinais vão afetar tanto o segmento espacial quanto o do usuário. O segmento de controle também deverá sofrer uma modernização, pois novos programas de computador deverão ser instalados para melhorar a qualidade da órbita dos satélites GPS e os parâmetros dos relógios, os quais são transmitidos pela mensagem de navegação. Isto também será realizado aumentando o número de estações de rastreamento (JONG, 2002, p. 6).

## 2.4 OBSERVÁVEIS GPS

MONICO (2000, p. 115) afirma que as observáveis básicas do GPS que permitem determinar a posição, velocidade e tempo podem ser identificadas como:

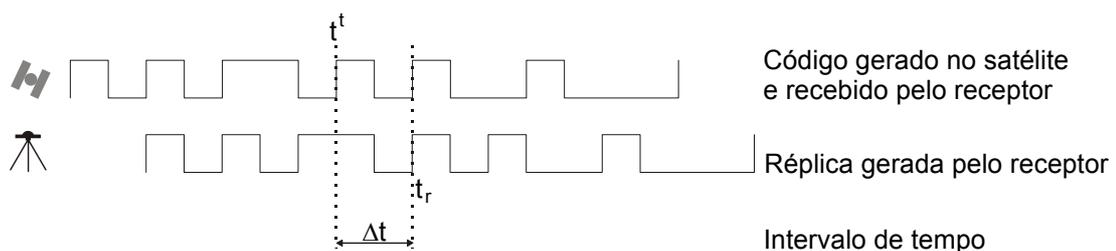
- pseudodistância a partir do código;
- fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

### 2.4.1 Pseudodistância

Segundo GARNÉS (2001, p. 45):

Nos receptores são geradas réplicas idênticas aos códigos transmitidos pelos satélites. Um detector de correlação identifica quando o código gerado pelo receptor se alinha (máxima correlação) com o código que chega transmitido pelo satélite (figura 2.3). O intervalo de tempo necessário para a máxima correlação é então registrado na escala de tempo do receptor. O código transmitido pelo satélite é gerado com base no relógio do satélite, o código gerado pelo receptor é produzido com base no relógio do receptor, e ambos os relógios, em geral, não são sincronizados. Se o sincronismo entre os relógios do satélite e receptor acontecesse, o tempo de deslocamento do código para obtenção da máxima correlação, corresponderia ao tempo em que a onda levou para percorrer a distância entre as antenas do satélite e do receptor (a menos de atrasos de *hardware*).

FIGURA 2.3 – PRINCÍPIO DA MEDIDA DE PSEUDODISTÂNCIA



FONTE: adaptada de TEUNISSEN e KLEUSBERG (1998, p. 163).

O produto da velocidade da luz no vácuo pelo intervalo de tempo, resultante do processo de correlação, é denominado de pseudodistância. Para MONICO (2000, p. 116) essa observável é denominada pseudodistância, em vez de distância, em razão principalmente do não-sincronismo entre os relógios (osciladores) responsáveis pela geração do código no satélite e a sua réplica no receptor.

Então a pseudodistância (PD) é o produto do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) pela velocidade da luz ( $c = 299.792.458 \text{ m/s}$ ), segundo a equação (2.1):

$$PD = c \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

e como o intervalo de tempo medido ( $\Delta t$ ) é a diferença de tempo entre o instante de transmissão do sinal  $t^t$  (no tempo do satélite) e o tempo de recepção do sinal  $t_r$  (no tempo do receptor), tem-se:

$$PD = c \cdot (t_r - t^t) \quad (2.2)$$

mas o tempo de transmissão e de recepção do sinal podem ser relacionados ao tempo GPS pelas equações:

$$\begin{aligned} t_{\text{GPS}}^t &= t^t - dt^s \\ t_{\text{GPS}r} &= t_r - dt_r \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde:

$t_{\text{GPS}}^t$  tempo de transmissão do sinal na escala de tempo GPS;

$dt^s$  erro do relógio do satélite;

$t_{\text{GPS}r}$  tempo de recepção do sinal na escala de tempo GPS; e

$dt_r$  erro do relógio do receptor,

portanto:

$$\begin{aligned} t^t &= t_{\text{GPS}}^t + dt^s \\ t_r &= t_{\text{GPS}r} + dt_r \end{aligned} \quad (2.4)$$

substituindo as equações acima (2.4) na equação (2.2), tem-se:

$$\begin{aligned} PD &= c \cdot (t_{\text{GPS}r} + dt_r) - c \cdot (t_{\text{GPS}}^t - dt^s) \\ PD &= c \cdot (t_{\text{GPS}r} - t_{\text{GPS}}^t) + c \cdot (dt_r - dt^s) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sendo  $\tau$  o tempo de propagação do sinal, na mesma escala de tempo, é dado por:

$$\tau = t_{\text{GPS}_r} - t_{\text{GPS}}^t \quad (2.6)$$

e  $\rho$  a distância geométrica entre as antenas do satélite e do receptor:

$$\rho = \tau \cdot c \quad (2.7)$$

a qual pode ser expressa em função das coordenadas da antena do satélite e do receptor:

$$\rho = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} \quad (2.8)$$

com:

$X^s, Y^s, Z^s$  : coordenadas geocêntricas da antena do satélite;

$X_r, Y_r, Z_r$  : coordenadas geocêntricas da antena do receptor,

tem-se, portanto:

$$PD = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) \quad (2.9)$$

que é a equação da pseudodistância numa forma simplificada. Se além do erro de não sincronismo entre os relógios de satélite e do receptor, forem levados em consideração erros de órbita, refração troposférica e ionosférica, multicaminho, e outros erros, a equação completa para a pseudodistância pode ser dada pela equação 2.10:

$$PD = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{\text{ORB}} + d_{\text{TROP}} + d_{\text{ION}} + m_c + \varepsilon_c \quad (2.10)$$

onde:

PD pseudodistância mensurada com o código;

- $\rho$  distância geométrica entre o satélite e a antena do receptor;
- $c$  velocidade da luz;
- $dt_r$  erro de não sincronismo do relógio do satélite com o tempo GPS;
- $dt^t$  erro de não sincronismo do relógio do satélite com o tempo GPS;
- $d_{ORB}$  erro orbital;
- $d_{TROP}$  refração troposférica;
- $d_{ION}$  refração ionosférica;
- $m_C$  erro provocado pelo multicaminho do código;
- $\varepsilon_C$  resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados (por exemplo: variação do centro de fase da antena).

#### 2.4.2 Fase da Onda Portadora

Segundo HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 204), quando um receptor é ligado, numa época  $t_0$ , a parte fracionária da fase é observada ( $\varphi(t_0)$ ) e um contador inteiro ( $n$ ) é inicializado. Durante o rastreamento, o contador é incrementado por um ciclo inteiro sempre que a fase muda de  $2\pi$  para 0.

Então, para uma certa época  $t_i$ , a fase observada acumulada ( $\Delta\varphi_R^S$ ), é a soma da parte fracionária da fase ( $\varphi(t_i)$ ), medida pelo comparador, com o contador inteiro ( $n_{t_0}^{t_i}$ ):

$$\Delta\varphi_R^S \Big|_{t_0}^{t_i} = \varphi(t_i) + n_{t_0}^{t_i} \quad (2.11)$$

onde  $\varphi(t_i)$  é a parte fracionária da fase, em até um ciclo, definida como a diferença entre a fase da portadora recebida com a fase da portadora do sinal gerado pelo oscilador interno do receptor:

$$\varphi(t_i) = (\varphi^S(t_i) - \varphi_R(t_i)) \quad (2.12)$$

onde:

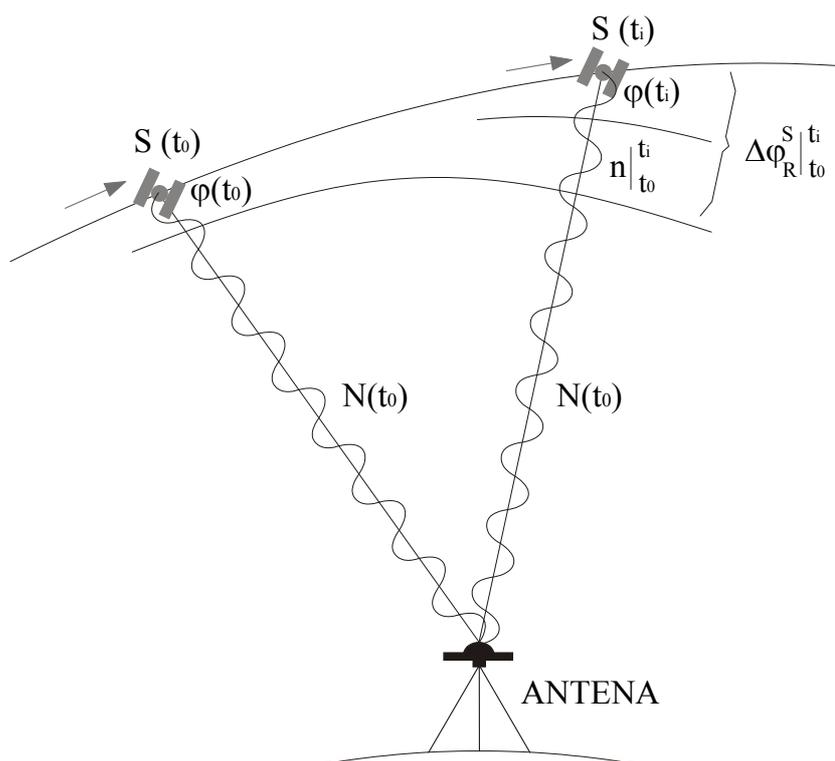
$\varphi^S(t_i)$  fase da portadora recebida do satélite;

$\varphi_R(t_i)$  fase da portadora gerada pelo receptor.

O número inteiro de ciclos iniciais  $N$  entre o satélite e o receptor é desconhecido, e é chamado de ambigüidade. Enquanto não houver perda de sinal o termo  $N$  permanece o mesmo (figura 2.4), devendo ser bem determinado, e então a fase ( $\Phi_R^S(t_i)$ ) para uma época  $t_i$  é dada por:

$$\Phi_R^S(t_i) = \Delta\varphi_R^S \Big|_{t_0}^{t_i} + N(t_0) \quad (2.13)$$

FIGURA 2.4 – MEDIDA DA FASE DA ONDA PORTADORA



FONTE: adaptada de GARNÉS (2001, p. 2).

De forma similar à equação 2.10, quando se consideram erros de órbita, refração troposférica e ionosférica, multicaminho e outros erros, obtém-se a equação de observação da fase da portadora, dada por:

$$\lambda \cdot \Phi = \rho + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{\text{ORB}} + d_{\text{TROP}} - d_{\text{ION}} + m_{\Phi} + \varepsilon_{\Phi} - \lambda \cdot N \quad (2.14)$$

onde:

- $\Phi$  fase da onda portadora (ciclos);
- $\lambda$  comprimento de onda da portadora (m);
- $\rho$  distância geométrica entre o satélite e a antena do receptor;
- $c$  velocidade da luz;
- $dt_r$  erro de não sincronismo do relógio do satélite com o tempo GPS;
- $dt^t$  erro de não sincronismo do relógio do satélite com o tempo GPS;
- $d_{\text{ORB}}$  erro orbital;
- $d_{\text{TROP}}$  refração troposférica;
- $d_{\text{ION}}$  refração ionosférica;
- $m_{\Phi}$  erro provocado pelo multicaminho da fase da portadora;
- $\varepsilon_{\Phi}$  resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados; e
- $N$  ambigüidade inteira.

Para maiores detalhes sobre a fase da onda portadora, consultar: GARNÉS (2001, p. 2), HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 90-92), MONICO (2000, p. 118-120), SEEBER (1993, p. 247-254), TEUNISSEN e KLEUSBERG (1998, p. 192-194).

#### 2.4.3 Multicaminho nas Observáveis GPS

SEEBER (1993, p. 308) afirma que o multicaminho ocorre quando além dos sinais diretos, sinais refletidos atingem a antena e acontece principalmente devido a superfícies refletoras próximas a antena, como construções, superfície da água, e outros.

O multicaminho afeta tanto observações de fase quanto as do código, mas numa quantidade diferente. Segundo SEEBER (1993, p. 308), as observações do código P são afetadas duas vezes mais do que as de fase.

HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 124) menciona que a influência do multicaminho pode ser estimada empregando combinação das observações do código em  $L_1$  e  $L_2$  e observações de fase. Porém a melhor maneira de evitar o multicaminho é rastrear em locais livres de obstruções.

## 2.5 COMBINAÇÕES LINEARES

Como visto na seção 2.4, as observáveis GPS são geradas pelos códigos ou pela fase da portadora. Empregando um receptor de dupla frequência, é possível obter pelo menos cinco observáveis diretas: as fases da portadora para as duas frequências ( $\Phi_{L1}$  e  $\Phi_{L2}$ ), e as pseudodistâncias pelo código C/A ( $PD_{C1}$ ), e duas pelo código preciso (P) denominadas  $PD_{L1}$  e  $PD_{L2}$ . Mas ainda é possível combinar essas observáveis entre si e gerar uma série de outras observáveis, cada uma com suas características próprias.

SEEBER (1993, p. 254) apresenta cinco diferentes tipos de combinações lineares que podem ser efetuadas:

- i. entre diferentes estações;
- ii. entre observações de diferentes satélites;
- iii. entre observações de diferentes épocas;
- iv. entre observações do mesmo tipo;
- v. entre observações de diferentes tipos.

Na seqüência serão tratados o primeiro (i) e os dois últimos tópicos (iv e v). O primeiro será tratado na seção Métodos de Posicionamento (seção 2.7). As combinações entre observáveis do mesmo tipo (fase) serão abordadas nesta seção e as combinações entre observações de diferentes tipos (fase e pseudodistância), na seção 2.9. Os demais tópicos não serão abordados haja vista que são extensos e não estão relacionados diretamente com este trabalho. Maiores detalhes sobre os demais tópicos consultar: KRUEGER (1996, p. 21-23), MONICO (2000, p. 171-175), SEEBER (1993, p. 254-257).

O principal objetivo das combinações lineares de fase da portadora é eliminar o efeito da ionosfera ou resolver as ambigüidades inteiras. Segundo WELLS et al.

(1986, p. 8.4) dependendo do tipo de aplicação e o nível de acurácia que se procura, existem vantagens e desvantagens em certas combinações, tanto as de código quanto as de fase.

A combinação linear de medidas de fase das duas portadoras ( $\Phi_{L1}$  e  $\Phi_{L2}$ ) pode ser definida pela relação (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994, p. 95):

$$\Phi_{CL} = n_1\Phi_1 + n_2\Phi_2 \quad (2.15)$$

onde:

$\Phi_{CL}$  é a observável resultante da combinação linear;

$n_1$  e  $n_2$  são números reais;

$\Phi_{L1}$  e  $\Phi_{L2}$  são as medidas da fase das ondas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ , respectivamente.

e a frequência resultante da combinação linear ( $f_{CL}$ ) é expressa em função dos mesmos números ( $n_1$  e  $n_2$ ) e das frequências das observáveis originais em  $L_1$  e  $L_2$ :

$$f_{CL} = n_1f_{L1} + n_2f_{L2} \quad (2.16)$$

o comprimento de onda obtido da combinação linear ( $\lambda_{CL}$ ) também pode ser calculado pela divisão da velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) pela frequência da combinação linear ( $f_{CL}$ ), escrito como:

$$\lambda_{CL} = \frac{c}{f_{CL}} \quad (2.17)$$

O ruído gerado pela combinação linear pode ser expresso pela equação dada por GARNÉS (2001, p. 53):

$$\text{ruído}_{CL} = \sigma_{\phi} \cdot \lambda_{CL} \cdot \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \quad (2.18)$$

onde:

$\sigma_{\phi}$  é o ruído da fase em  $L_1$ , em ciclos, e vale  $1,592 \cdot 10^{-2}$ .

A tabela 2.1 apresenta características de algumas das combinações lineares de fase formadas com as portadoras  $L_1$  e  $L_2$ .  $L_W$  representa a combinação *wide lane*,  $L_N$  a *narrow lane*,  $L_0$  a livre de ionosfera e  $L_I$  a combinação que contém o efeito completo da ionosfera.

TABELA 2.1 – COMBINAÇÕES LINEARES DE FASE

Observável	$n_1$	$n_2$	$\lambda_{CL}$ (cm)	ruído <sub>CL</sub> (mm)
$L_1$	1	0	$\cong 19,0$	3,0
$L_2$	0	1	$\cong 24,4$	3,9
$L_W$	1	-1	$\cong 86,2$	19,4
$L_N$	1	1	$\cong 10,7$	2,10
$L_0$	-	-	$\cong 5,4$	10,0
$L_I$	-	-	$\cong 10,7$	20,0

FONTE: adaptada de SEEBER (1993, p. 259).

Segundo SEEBER (1993, p. 259), a magnitude do efeito ionosférico sobre a *wide lane* e a *narrow lane* é igual, mas de sinal contrário. Então a média dessas duas combinações fornece o sinal livre da ionosfera (*ionospheric free signal*):

$$L_0 = \frac{L_W + L_N}{2} \quad (2.19)$$

KRUEGER (1996, p. 26) cita que a combinação livre da ionosfera ( $L_0$ ) não fornece as ambigüidades inteiras e não é um sinal adequado para soluções muito precisas. A combinação que contém o efeito ionosférico completo é a  $L_I$ , a qual é obtida a partir da diferença da *narrow lane* e da *wide lane*. Ela permite uma análise detalhada do comportamento da ionosfera.

Combinações lineares para observações do código também são possíveis. A equação 2.20 mostra a combinação linear livre da ionosfera para o código:

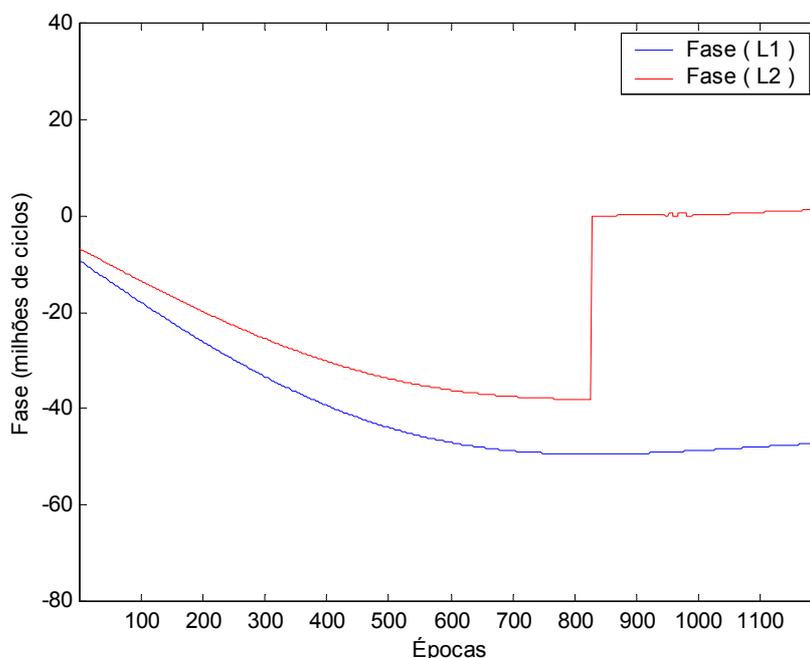
$$PD_0 = PD_{L_1} - \frac{f_{L_1}^2}{f_{L_2}^2} PD_{L_2} \quad (2.20)$$

## 2.6 SALTOS DE CICLO

Conforme foi visto anteriormente, na seção 2.4.2, no início de um levantamento, o receptor mede a parte fracionária da fase ( $\varphi(t_0)$ ) e começa a contagem do número de ciclos inteiros ( $n|_{t_0}^i$ ). Para uma determinada época, a fase acumulada ( $\Delta\varphi_R^S$ ) é a soma da parte fracionária com o número de ciclos, contado desde a época inicial. Porém o número de ciclos inteiros ( $N$ ) entre o satélite e o receptor (ambigüidade) é desconhecido, mas ele permanece constante desde que não ocorra perda de sinal. Se isto ocorrer, a contagem do número de ciclos é reinicializada, causando um salto na fase acumulada, e este salto é conhecido como *cycle slip* (salto de ciclo).

A figura 2.5 é um gráfico que mostra as medidas de fase observadas pelas duas portadoras em função do número de épocas de observação. Verifica-se que um salto de ciclo ocorre na portadora  $L_2$  entre as épocas 800 e 900, quando a curva sofre um deslocamento do número de ciclos.

FIGURA 2.5 – SALTO DE CICLO



NOTA: Estação GUAR, dia 268–2004, PRN 18.

SEEBER (1993, p. 270) apresenta duas razões principais para a ocorrência dos saltos de ciclo, sendo:

- i. dependente de observações: causada por obstruções, ruído do sinal e baixa elevação do satélite;
- ii. dependente do receptor: causada por sinais fracos, inclinação da antena e processamento do sinal.

GARNÉS (2001, p. 45) afirma que perdas de ciclo podem ter como causa o multicaminho, a partir do momento em que este atinge valores maiores que 4,8 e 6,1cm, valores estes que representam a quarta parte do comprimento de onda das portadoras  $L_1$  e  $L_2$  respectivamente.

Quando ocorre salto de ciclo, a fase apresenta um salto repentino no número inteiro de ciclos, porém a parte fracionária não sofre mudança. O salto de ciclo pode ser tão pequeno quanto alguns poucos ciclos, ou conter milhões de ciclos (SEEBER, 1993, p. 271).

Para a detecção e correção de saltos de ciclo é necessário determinar onde ocorreu o salto e qual é o seu tamanho. A detecção pode ser realizada por meio de testes de quantidade (*testing quantity*). A correção de salto de ciclos é realizada para todas as épocas posteriores ao salto, por uma quantidade constante. A determinação do tamanho e a correção dos saltos de ciclos em medidas de fase é freqüentemente chamada de *cycle slip fixing* (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1997, p. 205).

### 2.6.1 Detecção de Saltos de Ciclo

Partindo da idéia apresentada em DAH-JING et al. (2004, p. 277), as equações de observação da fase (equação 2.14) e do código (equação 2.10) serão escritas numa forma conveniente:

$$\Phi(t_i) = C - d_{ION} + N + \varepsilon_\Phi \quad (2.21)$$

$$PD(i) = C + d_{ION} + m_C + \varepsilon_C \quad (2.22)$$

$$\text{sendo: } C = \rho + c.(dt_r - dt^s) + d_{\text{ORB}} + d_{\text{TROP}} \quad (2.23)$$

onde:

C representa os termos comuns nas equações 2.21 e 2.22: distância geométrica, erro do relógio do receptor e do satélite, erro de órbita e refração troposférica;

$d_{\text{ION}}$  refração ionosférica

N ambigüidade;

$\varepsilon_{\Phi}$  resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados (fase);

$m_C$  multicaminho do código; e

$\varepsilon_C$  resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados (código).

Subtraindo a equação de fase (equação 2.21) numa época  $t_i$  em relação a época anterior  $t_{i-1}$ , fazendo o mesmo com as equações de pseudodistância do código (equação 2.22) e negligenciando alguns erros, contidos em  $\varepsilon_F$  e  $\varepsilon_C$  e desconsiderando-se o efeito ionosférico e do multicaminho do código, o resultado pode ser escrito conforme a equação 2.24. Nela verifica-se que a variação das observações de fase, referente a uma época atual em relação à uma anterior, é igual à variação das observações do código (em ciclos) no mesmo intervalo de tempo:

$$\Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1}) = PD^c(t_i) - PD^c(t_{i-1}) \quad (2.24)$$

O efeito da refração ionosférica tem sinal contrário para as observações do código e da fase, isto é, ele atrasa o sinal do código e adianta o da fase. Esse é um dos motivos que faz com que não exista a igualdade na equação 2.24. Um outro motivo, tão importante quanto o anterior, é o multicaminho (seção 2.4.3) que afeta as observações do código numa razão maior do que as de medidas de fase.

Partindo-se do princípio que a divergência resultante dos sinais opostos do efeito ionosférico sobre o código e a fase pode ser reduzido quando se emprega um tempo de suavização da pseudodistância curto (de alguns poucos minutos), que o efeito do multicaminho pode ser desconsiderado se as observações foram realizadas em um local livre de obstruções e negligenciando os termos  $\varepsilon_{\Phi}$  e  $\varepsilon_C$ , a igualdade na

equação 2.24 é mantida (dentro de um limite de tolerância) enquanto não ocorrerem saltos de ciclo. Mas por outro lado, se ocorrerem saltos de ciclo, o termo  $N$  (ambigüidade) tem seu valor alterado de uma época para outra, e assim a igualdade na equação não é mantida, portanto saltos de ciclo podem ser detectados dessa forma.

A equação 2.24 pode ser então escrita em uma forma adequada para a detecção de saltos de ciclo, conforme a equação 2.25:

$$\text{div}(t_i) = [PD^c(t_i) - PD^c(t_{i-1})] - [\Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})] \quad (2.25)$$

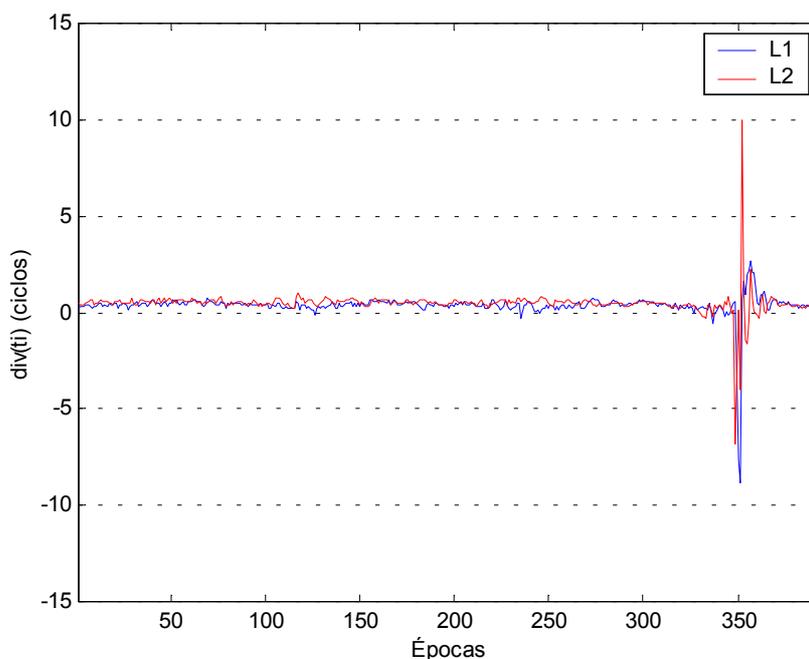
onde:

$\text{div}(t_i)$	variável cujo módulo é comparado a um valor limite pré-determinado, e se for maior que esse valor, pode indicar que houve salto de ciclo;
$PD^c(t_i) - PD^c(t_{i-1})$	diferença entre a pseudodistância do código (em ciclos) medida na época ( $t_i$ ) com a medida da época anterior ( $t_{i-1}$ );
$\Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})$	diferença entre a medida de fase na época ( $t_i$ ) com a medida de fase da época anterior ( $t_{i-1}$ ).

Uma das vantagens de empregar a equação 2.25 na detecção de saltos de ciclo é a possibilidade de aplicá-la independentemente para a portadora  $L_1$  e para a  $L_2$  e assim poder verificar em qual delas ocorreu um possível salto de ciclo. Uma outra vantagem está na possibilidade da escolha do valor que representará o salto de ciclo. A variável depende apenas das observações de fase e do código, e se não houverem problemas nas observações, ela apresenta valores que podem ser menores que 1 ciclo. A figura 2.6 mostra a variável  $\text{div}(t_i)$  em função do tempo de observação para o satélite PRN 16 na estação IPIR. Observa-se que o valor da variável é menor que 1 ciclo até aproximadamente o tempo 350, quando sofre um aumento que alcança 10 ciclos. Considerando-se, por exemplo, que saltos de ciclo ocorrem quando a variável  $\text{div}(t_i)$  atinge valores maiores que 5 ciclos, houve um salto de ciclo próximo à época 350, mas se for considerado um limite igual a 15 ciclos, não houve perda de ciclo. Conforme foi citado na seção anterior (2.6), SEEBER

(1993, p. 271) menciona que o salto de ciclo pode ser tão pequeno quanto alguns poucos ciclos, ou conter milhões de ciclos. Na prática, valores entre 5 a 15 ciclos pareceram ser adequados para a detecção de saltos de ciclo.

FIGURA 2.6 –DETECÇÃO DE SALTO DE CICLO

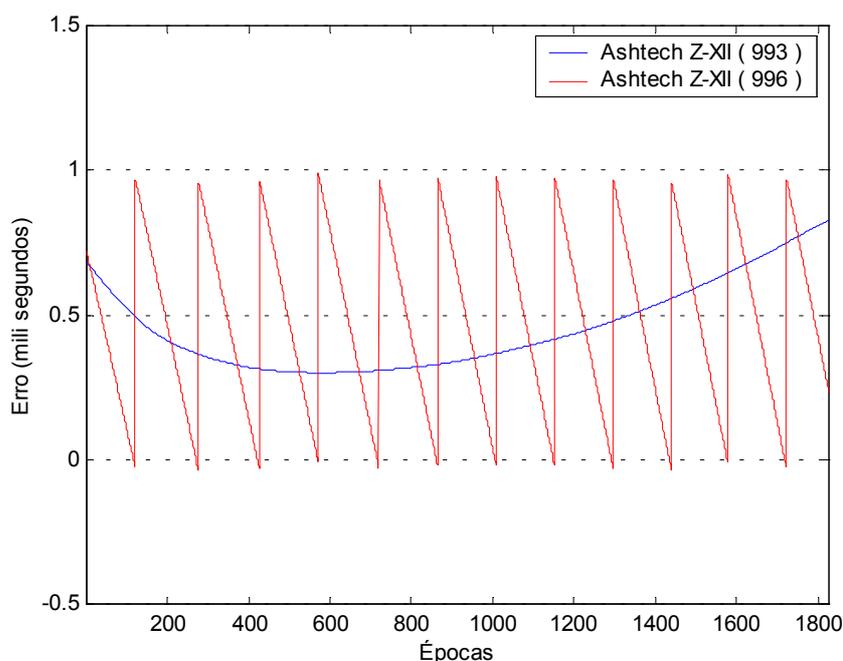


NOTA: Estação IPIR, dia 121–2000, PRN 16.

A equação 2.25 também permite identificar o instante em que ocorreram variações do valor da pseudodistância do código que têm como motivo a variação brusca do erro do relógio de receptores GPS. A figura 2.7 apresenta os erros dos relógios de dois receptores Ashtech Z-12 semelhantes, identificados por seus números de série: 993 e 996. Realizou-se o processamento dos dados oriundos de levantamentos com estes dois receptores, onde os erros dos relógios foram estimados pelo método dos mínimos quadrados das equações de observação da pseudodistância do código C/A. Nesta figura verifica-se que o erro do relógio do receptor 993 apresenta uma variação lenta durante todo o levantamento, diferentes do receptor 996, que a partir do maior valor (1 ms) sofre uma variação quase linear até o menor valor (1  $\mu$ s), quando o erro atinge o valor máximo novamente, repetindo este comportamento aproximadamente a cada 12 minutos durante todo o rastreo e desta forma causando diferenças significativas no valor da pseudodistância do

código de uma época para a outra. Verifica-se, porém, que o comportamento geométrico da curva não é padrão no receptor 993, podendo variar de outras formas também.

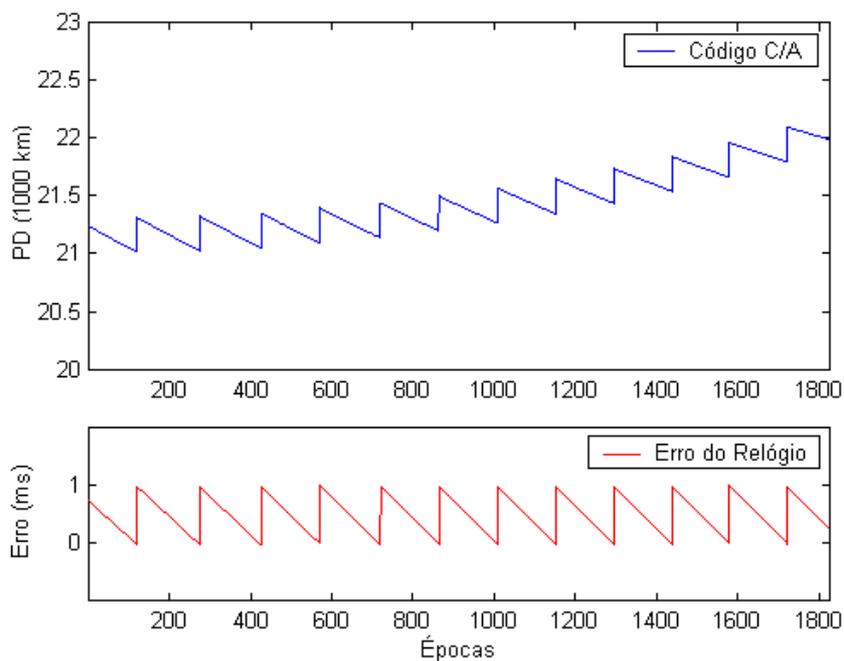
FIGURA 2.7 – ERRO DO RELÓGIO DE RECEPTORES GPS



Na figura 2.8 observam-se dois gráficos, onde o superior representa o valor das medidas de pseudodistâncias do código C/A (unidades 1000 km) e o inferior o erro do relógio do receptor (em milissegundos), ambos em função do número de épocas. Quando ocorre uma variação acentuada do erro do relógio do receptor, o valor da pseudodistância nessa época sofre uma variação muito grande em relação ao da época anterior, chegando a quase 300 km. Este valor representa o produto da diferença do erro do relógio pela velocidade da luz no vácuo ( $(1\mu\text{s} - 1\text{ms}) \cdot c$ ). Para outras épocas, a diferenças entre as pseudodistâncias de uma época em relação à anterior é em torno de 1,8 km.

A importância em se detectar saltos de ciclos ou variações dos valores das pseudodistâncias devido ao relógio do receptor são importantes quando se trata de suavização da pseudodistância, pois erros nas medidas das observáveis causam erros na suavização, portanto devem ser identificados para que os algoritmos de suavização possam ser reinicializados.

FIGURA 2.8 –VARIAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA DO CÓDIGO (ACIMA) DEVIDO AO ERRO DO RELÓGIO DO RECEPTOR GPS (ABAIXO)



## 2.7 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

KRUEGER (1996, p. 10) descreve que as estratégias de observação com o GPS podem ser classificadas inicialmente em função do número de receptores envolvidos no levantamento. Em um posicionamento absoluto apenas um receptor é empregado, enquanto que em um posicionamento relativo são utilizados pelo menos dois receptores.

O método de posicionamento absoluto pode ser realizado na forma estática ou cinemática. O princípio fundamental desse método é baseado na medida de pelo menos quatro pseudodistâncias entre o satélite e o receptor de tal modo a formarem um sistema de equações, onde o modelo matemático é a equação de pseudodistância do código (equação 2.10) e os parâmetros são as coordenadas da antena e o erro do relógio do receptor. Alguns autores também denominam o posicionamento absoluto por posicionamento por ponto (PP), onde cada época de observação gera uma solução.

KRUEGER (1996, p. 16) afirma que o posicionamento relativo caracteriza-se pela observação simultânea dos sinais dos satélites em pelo menos duas estações

distintas, o que contribui para uma significativa redução de erros, especialmente dos erros do relógio dos satélites, das efemérides e da propagação do sinal na atmosfera. Ele pode ser efetuado utilizando-se diferentes tipos de observação, como o da fase do código, da fase do código suavizada pela portadora e da fase da portadora. Neste tipo de posicionamento, diferentes técnicas são empregadas para a modelagem da medida da fase da portadora: observações puras, simples diferença de fase, dupla diferença de fase e a tripla diferença de fase.

A combinação envolvendo dois receptores (em estações distintas A e B) e um mesmo satélite (S) é chamada simples diferença entre receptores, e a equação de observação da pseudodistância pode ser escrita como:

$$\Delta PD_{AB}^S = \Delta \rho_{AB}^S + c\Delta dt_{AB} + \Delta d_{TROP_{AB}}^S + \Delta d_{ION_{AB}}^S + \Delta \varepsilon_{AB}^S \quad (2.26)$$

onde:

$\Delta PD_{AB}^S = PD_A^S - PD_B^S$  é a diferença das pseudodistâncias medidas;

$\Delta \rho_{AB}^S = \rho_A^S - \rho_B^S$  diferença entre as distâncias dos receptores A e B e o satélite S;

$c\Delta dt_{AB} = dt_A - dt_B$  diferença entre os relógios dos receptores nas estações A e B.

Sendo a estação A uma estação de coordenadas conhecidas, estima-se por meio de um sistema de equações as coordenadas tridimensionais da estação B, bem como o erro do relógio dos receptores. Erros relativos à refração troposférica e ionosférica e o erro de órbita podem ser negligenciados se as linhas de base forem curtas, usualmente menores que 10 km. Para linhas de base maiores, pode-se aplicar um modelo para a troposfera, e se as pseudodistâncias em ambas as portadoras forem observadas o erro devido à refração ionosférica pode ser reduzido por meio de uma combinação linear da pseudodistância do código. Efemérides precisas podem ser empregadas para reduzir ainda mais os erros que atuam no sistema, visando um posicionamento mais preciso.

Para maiores detalhes sobre estas técnicas, consultar: KRUEGER (1996, p. 17-23), MONICO (2000, p. 172-175), SEEBER (1993, p. 254-257).

## 2.8 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

Segundo GARNÉS e FERREIRA (1999) o posicionamento pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS), pode ser obtido por meio de um ajustamento por mínimos quadrados das equações de pseudodistância do código ou da fase.

A equação 2.10 é a equação de observação para um posicionamento absoluto empregando as pseudodistâncias. Negligenciando, porém, os erros de órbita, refração ionosférica e troposférica, multicaminho, resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados, e escrevendo a distância geométrica ( $\rho$ ) em função das coordenadas dos satélites e do receptor, o modelo matemático para o ajustamento é dado por:

$$PD_r^s = [(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2]^{1/2} + c \cdot (dt_r - dt^s) \quad (2.27)$$

Quando os valores observados ajustados ( $L_a$ ) podem ser colocados explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados ( $X_a$ ), trata-se do modelo funcional paramétrico:

$$L_b = F(X_a) \quad (2.28)$$

onde:

$X_a$  é o vetor dos parâmetros ajustados;

$L_a$  vetor das observações ajustadas.

Para um levantamento que apresenta  $i$  observações, as equações de observação podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} PD_r^1 &= [(X^1 - X_r)^2 + (Y^1 - Y_r)^2 + (Z^1 - Z_r)^2]^{1/2} + c \cdot (dt_r - dt^1) \\ PD_r^2 &= [(X^2 - X_r)^2 + (Y^2 - Y_r)^2 + (Z^2 - Z_r)^2]^{1/2} + c \cdot (dt_r - dt^2) \\ PD_r^3 &= [(X^3 - X_r)^2 + (Y^3 - Y_r)^2 + (Z^3 - Z_r)^2]^{1/2} + c \cdot (dt_r - dt^3) \\ &\vdots \\ PD_r^i &= [(X^i - X_r)^2 + (Y^i - Y_r)^2 + (Z^i - Z_r)^2]^{1/2} + c \cdot (dt_r - dt^i) \end{aligned} \quad (2.29)$$

O vetor dos parâmetros aproximados ( $X_0$ ) contém os valores aproximados para as coordenadas da estação, bem como para o erro do relógio do receptor ( $dt_{r0}$ ):

$$X_0 = \begin{bmatrix} X_{r0} \\ Y_{r0} \\ Z_{r0} \\ dt_{r0} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

O vetor das observações para uma época com  $i$  observações de pseudodistâncias será:

$$L_b = \begin{bmatrix} PD^1 \\ PD^2 \\ PD^3 \\ \vdots \\ PD^i \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

O vetor  $L$  é dado por:

$$L = L_0 - L_b \quad (2.32)$$

onde  $L_0 = F(X_0)$

Então:

$$L_0 = \begin{bmatrix} [(X^1 - X_{r0})^2 + (Y^1 - Y_{r0})^2 + (Z^1 - Z_{r0})^2]^{1/2} + c \cdot (dt_{r0} - dt^1) \\ [(X^2 - X_{r0})^2 + (Y^2 - Y_{r0})^2 + (Z^2 - Z_{r0})^2]^{1/2} + c \cdot (dt_{r0} - dt^2) \\ [(X^3 - X_{r0})^2 + (Y^3 - Y_{r0})^2 + (Z^3 - Z_{r0})^2]^{1/2} + c \cdot (dt_{r0} - dt^3) \\ \vdots \\ [(X^i - X_{r0})^2 + (Y^i - Y_{r0})^2 + (Z^i - Z_{r0})^2]^{1/2} + c \cdot (dt_{r0} - dt^i) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Segundo MONICO (2000, p. 202) em um processamento absoluto a matriz dos pesos ( $P$ ) pode ser a matriz identidade. Neste caso se considera que a precisão

esperada é a mesma para cada uma das observações, e que elas não são correlacionadas. No entanto, para trabalhos de alta precisão, pode-se diferenciar o peso entre as observações em razão de alguns fatores, como por exemplo, o ângulo de inclinação do satélite observado.

A matriz de coeficientes  $A$  é definida como sendo a matriz das derivadas parciais das funções em relação aos parâmetros ajustados no ponto  $X_0$ .

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a = X_0} \quad (2.34)$$

Para se ter os valores das derivadas parciais toma-se os valores iniciais aproximados ( $X_{r0}$ ,  $Y_{r0}$ ,  $Z_{r0}$  e  $dt_{r0}$ ). Chega-se aos seguintes resultados:

$$\begin{aligned} a_s &= -\frac{(X^s - X_{r0})}{\rho_r^s} \\ b_s &= -\frac{(Y^s - Y_{r0})}{\rho_r^s} \\ c_s &= -\frac{(Z^s - Z_{r0})}{\rho_r^s} \end{aligned} \quad (2.35)$$

e  $\rho_r^s$  é a distância geométrica entre o satélite  $s$  e o receptor  $r$ , dada pela equação:

$$\rho_r^s = [(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2]^{1/2} \quad (2.36)$$

onde:  $s$  varia de 1 até  $i$ .

Portanto a matriz  $A$  é representada por:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & c \\ a_2 & b_2 & c_2 & c \\ \vdots & & & \\ a_i & b_i & c_i & c \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Observando a equação 2.27, verifica-se que a derivada parcial dessa equação em relação ao erro do relógio do receptor é a velocidade da luz ( $c$ ).

As equações normais são:

$$\begin{aligned} N &= A^T P A \\ U &= A^T P L \end{aligned} \quad (2.38)$$

sendo:

- N matriz das equações normais, simétrica e definida positiva;
- U vetor das equações normais.

e o vetor das correções então será:

$$X = -N^{-1}U \quad (2.39)$$

Finalmente, o vetor dos parâmetros ajustados ( $X_a$ ) será a soma do vetor dos parâmetros iniciais ( $X_0$ ) com o vetor das correções ( $X$ ):

$$X_a = X_0 + X \quad (2.40)$$

Como o modelo é não-linear com respeito as coordenadas da estação, deve-se realizar um processo iterativo até atingir um critério de parada estipulado. Como critério de parada pode-se estipular como sendo de 0,1 mm a diferença do vetor de correção calculado numa época anterior  $t_{i-1}$  com o da época atual  $t_i$ , para os parâmetros referentes as coordenadas da estação. Segundo experimentos realizados, normalmente 3 iterações são necessárias no ajustamento.

O vetor dos resíduos pode ser calculado pela equação:

$$V = AX + L \quad (2.41)$$

A variância da unidade de peso a posteriori é calculada da seguinte forma:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u} \quad (2.42)$$

sendo:

n número de equações de observação;

u número de parâmetros.

E a matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados é dada por:

$$\Sigma X_a = \hat{\sigma}_0^2 \cdot N^{-1} \quad (2.43)$$

A precisão dos parâmetros  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$  e  $\sigma_{dtr}$  podem ser calculadas como sendo a raiz quadrada dos respectivos elementos da diagonal principal da matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados  $\Sigma X_a$ .

## 2.9 SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA

A suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora é uma técnica que combina observações de diferentes tipos.

O termo suavização da pseudodistância, adotado do inglês *pseudorange smoothing*, é o mais difundido na literatura, apesar de também poder aparecer como filtragem da pseudodistância. Porém, neste trabalho o termo *suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora* é o que será adotado, sendo que os algoritmos serão denominados de filtros de suavização.

### 2.9.1 Filtro de HATCH-82

Assumindo que se tenham observações nas duas portadoras, sendo elas as medidas de pseudodistância a partir dos códigos P ( $PD_{L1}$  e  $PD_{L2}$ ) e as medidas da fase da onda portadora ( $\Phi_{L1}$  e  $\Phi_{L2}$ ). As medidas de pseudodistâncias dos códigos são transformadas em ciclos, dividindo-as pelos correspondentes comprimentos de onda das portadoras, gerando  $PD_{L1}^c$  e  $PD_{L2}^c$ , onde o índice  $c$  indica que as medidas estão em ciclos. Então, para uma época  $t_1$  tem-se as observáveis:

$$PD_{L1}^c(t_1) = \frac{PD_{L1}(t_1)}{\lambda_{L1}} \quad (2.44)$$

$$PD_{L2}^c(t_1) = \frac{PD_{L2}(t_1)}{\lambda_{L2}} \quad (2.45)$$

onde:

$\lambda_{L1}$  comprimento de onda da portadora  $L_1$ ;

$\lambda_{L2}$  comprimento de onda da portadora  $L_2$ .

Empregando as duas frequências ( $f_{L1}$  e  $f_{L2}$ ), pode-se escrever a seguinte combinação linear para as pseudodistâncias a partir dos códigos:

$$PD^c(t_1) = \frac{f_{L1}PD_{L1}^c(t_1) - f_{L2}PD_{L2}^c(t_1)}{f_{L1} + f_{L2}} \quad (2.46)$$

e também uma segunda combinação para a fase da onda portadora, que corresponde à combinação linear *wide lane* ( $\Phi_W$ ):

$$\Phi_W(t_1) = \Phi_{L1}(t_1) - \Phi_{L2}(t_1) \quad (2.47)$$

Por meio das equações 2.16, 2.17 e 2.18, é possível calcular a frequência, o comprimento de onda e o ruído das observações em  $L_1$  e  $L_2$  e das combinações do

código ( $PD^c$ ) e da fase ( $\Phi_W$ ). Observa-se na tabela 2.2 que a frequência para as combinações  $PD^c$  e  $\Phi_W$  são as mesmas, e portanto o comprimento de onda também.

A última coluna desta tabela representa o fator ruído ( $\sqrt{n_1^2 + n_2^2}$ ) que é calculado pela equação 2.18 quando se aplica a lei de propagação de variâncias sobre as equações 2.46 e 2.47. Nota-se que na combinação do código o ruído resultante sofre uma redução de 0,71 quando comparado ao ruído das observações originais do código ( $\sigma_{PD}$ ). O aumento do ruído na combinação da fase da onda portadora de  $\sqrt{2}$  não tem grande efeito negativo pelo fato das observações de fase possuírem um ruído ( $\sigma_\Phi$ ) muito baixo (de poucos milímetros) se comparado ao do código (da ordem do metro).

TABELA 2.2 – COMBINAÇÕES DE CÓDIGO E FASE (HATCH-82)

Observável	$n_1$	$n_2$	f (MHz)	$\lambda$ (cm)	Ruído (mm)	$\sqrt{n_1^2 + n_2^2}$
$\Phi_{L1}$	1	0	1575,42	$\cong 19,03$	3,0	1
$\Phi_{L2}$	0	1	1227,60	$\cong 24,42$	3,9	1
$\Phi_W$	1	-1	347,82	$\cong 86,19$	$1,22 \cdot \sigma_\Phi$	$\sqrt{2}$
$PD^c$	$\frac{f_{L1}}{f_{L1} + f_{L2}}$	$-\frac{f_{L2}}{f_{L1} + f_{L2}}$	347,82	$\cong 86,19$	$0,61 \cdot \sigma_{PD}$	0,71

FONTE: adaptada de SEEBER (1993, p. 259).

Combinações na forma das equações 2.46 e 2.47 são formadas para cada época. Para uma época  $t_2$ , por exemplo, um valor calculado ( $PD_C^c(t_2)$ ) é obtido pela soma da pseudodistância do código suavizados na época anterior ( $PD_S^c(t_1)$ ) com a diferença das medidas de fase da época atual com a anterior ( $[\Phi(t_2) - \Phi(t_1)]$ ), segundo a equação (2.48):

$$PD_C^c(t_2) = PD_S^c(t_1) + [\Phi(t_2) - \Phi(t_1)] \quad (2.48)$$

O valor suavizado para a época atual ( $t_2$ ) é finalmente obtido pela média aritmética do valor da pseudodistância observada na época ( $PD^c(t_2)$ ) com o valor da pseudodistância calculada para a mesma época ( $PD_C^c(t_2)$ ):

$$PD_S^c(t_2) = \frac{1}{2} [PD^c(t_2) + PD_C^c(t_2)] \quad (2.49)$$

Generalizando as fórmulas anteriores para uma época arbitrária  $t_i$ , as combinações lineares podem ser escritas conforme as seguintes equações:

$$PD^c(t_i) = \frac{f_1 PD_{L1}^c(t_i) - f_2 PD_{L2}^c(t_i)}{f_1 + f_2} \quad (2.50)$$

$$\Phi_W(t_i) = \Phi_{L1}(t_i) - \Phi_{L2}(t_i) \quad (2.51)$$

e as equações do código calculado e do código suavizado pela portadora podem ser obtidos conforme as equações 2.52 e 2.53 (HATCH, 1986, p. 1294):

$$PD_C^c(t_i) = PD_S^c(t_{i-1}) + [\Phi_W(t_i) - \Phi_W(t_{i-1})] \quad (2.52)$$

$$PD_S^c(t_i) = \frac{1}{i} \cdot PD^c(t_i) + \left( \frac{i-1}{i} \right) \cdot PD_C^c(t_i) \quad (2.53)$$

as quais devem obedecer a seguinte condição inicial:  $PD^c(t_1) = PD_C^c(t_1) = PD_S^c(t_1)$ , para todas as épocas  $i$  maiores que 1. E finalmente, a pseudodistância na unidade do metro ( $PD_S(t_i)$ ) é dada pelo produto da pseudodistância em ciclos pelo comprimento de onda da combinação linear:

$$PD_S(t_i) = PD_S^c(t_i) \cdot \lambda_{CL} \quad (2.54)$$

Observando a equação de suavização (2.53) percebe-se que o filtro de Hatch não deixa de ser um filtro que exprime a média aritmética das pseudodistâncias da época  $t_i$  com a pseudodistância suavizada da época  $t_{i-1}$  acrescida da diferença das medidas de fase entre as épocas.

HATCH (1986, p. 1293) propôs uma pequena modificação no filtro original de 1982, sendo ela a substituição do sinal de adição pelo de subtração na combinação

linear da pseudodistância (equação 2.46 e 2.50). As demais equações, tanto a combinação linear das medidas de fase, quanto a pseudodistância calculada e a suavizada são determinadas pelas mesmas equações (2.51 a 2.54).

Para casos em que se têm disponíveis as observáveis da pseudodistância e da fase apenas na portadora  $L_1$ , as equações para uma época arbitrária  $t_i$  são dadas por:

$$PD_{L_1}^c(t_i) = \frac{PD_{L_1}(t_i)}{\lambda_{L_1}} \quad (2.55)$$

onde:

$\lambda_{L_1}$  comprimento de onda da portadora  $L_1$ ;

$$PD_C^c(t_i) = PD_S^c(t_{i-1}) + [\Phi_{L_1}(t_i) - \Phi_{L_1}(t_{i-1})] \quad (2.56)$$

$$PD_S^c(t_i) = \frac{1}{i} \cdot PD_{L_1}^c + \left( \frac{i-1}{i} \right) \cdot PD_C^c(t_i) \quad (2.57)$$

sendo a condição inicial  $PD_{L_1}^c(t_1) = PD_C^c(t_1) = PD_S^c(t_1)$  para todos os  $i$  maiores que 1. A pseudodistância suavizada em metros é dada pelo produto da pseudodistância em ciclos pelo comprimento de onda da portadora  $L_1$ :

$$PD_S(t_i) = PD_S^c(t_i) \cdot \lambda_{L_1} \quad (2.58)$$

### 2.9.2 Filtro de LACHAPELLE-86

Como as fases da portadora são sensíveis a saltos de ciclo, LACHAPELLE et al. (1986) propôs um algoritmo para contornar este problema. Neste algoritmo é incluído um fator de peso dependente do tempo (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994, p. 97). Usando as mesmas notações para uma época  $t_i$ , o código suavizado pela portadora é dado por:

$$PD_S^c(t_i) = \omega \cdot PD^c(t_i) + (1 - \omega) \cdot [PD_S^c(t_{i-1}) + \Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})] \quad (2.59)$$

onde  $\omega$  é um fator de peso. Para a primeira época ( $t_i = 1$ ), o peso é fixado como sendo igual a 1, desta forma colocando todo o peso nas medidas de pseudodistância do código. Progressivamente, o peso  $\omega$  é decrescido e mais peso é dado para o termo que contém as medidas de fase, assim, à medida que o número de épocas aumenta, observa-se que a pseudodistância filtrada pela fase da portadora torna-se mais precisa.

Para obter um fator de redução, LACHAPELLE et al. (1986, p. 1334), propôs um fator de redução do peso igual a 0,01 para uma taxa de coleta dos dados de 1 s. Então, após 100 segundos somente o valor suavizado para a época anterior é levado em consideração. Porém quando ocorrer saltos de ciclo, o algoritmo falha e deve ser reinicializado, quando é introduzindo ao peso  $\omega$  o valor inicial igual a 1. Na seção 4.2 serão discutidos algumas singularidades referentes ao fator de peso.

O filtro de LACHAPELLE-86 é uma pequena variação do filtro de original de Hatch. Observa-se que a equação de suavização de LACHAPELLE-86 (equação 2.62) será semelhante à de HATCH-82 se o fator de peso  $\omega$  for igual ao inverso do número de épocas ( $1/i$ ).

Segundo LACHAPELLE et al. (1986, p. 1334), a correção dos efeitos da ionosfera é aplicada se o código P em ambas frequências é empregado. Se somente a portadora  $L_1$  for usada, pode-se aplicar o modelo de ionosfera transmitido. Esta correção é importante devido ao fato de que a correção ionosférica para medidas de código e de fase possuem sinais contrários.

Para casos de observáveis somente da portadora  $L_1$ , o filtro para uma época  $t_i$  pode ser escrito como:

$$PD_S^c(t_i) = \omega \cdot PD_{L_1}^c(t_i) + (1 - \omega) \cdot [PD_S^c(t_{i-1}) + (\Phi_{L_1}(t_i) - \Phi_{L_1}(t_{i-1}))] \quad (2.60)$$

### 3 ARQUIVOS DE OBSERVAÇÕES E PROGRAMAS UTILIZADOS

#### 3.1 ARQUIVOS DE OBSERVAÇÕES

Arquivos no formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange Format*) são formatados independente do receptor empregado na coleta das observações e são arquivos tipo ASCII. Por esses motivos optou-se em trabalhar com arquivos RINEX ao invés de arquivos binários próprios de cada fabricante. A dificuldade em trabalhar com arquivos binários está na necessidade do conhecimento de como as variáveis são declaradas nestes arquivos além de que cada fabricante possui seu próprio formato.

Os arquivos RINEX de observações utilizados no processamento dos dados foram escolhidos em função de algumas características referentes à coleta dos dados, sendo elas:

- tipo do receptor utilizado;
- ano de coleta das observações;
- taxa de gravação dos dados; e
- distância em relação à estação PARA.

Como a suavização da pseudodistância pela fase pode ser realizada tanto com uma quanto com as duas portadoras, a escolha dos arquivos foi em função do tipo de receptor GPS empregado. Desta forma, foram escolhidos arquivos de levantamentos realizados com dois receptores. O primeiro deles é um receptor geodésico Ashtech Z-12 que aplica a técnica *P-W Tracking* que o torna capaz de realizar medidas da fase completas em  $L_1$  e  $L_2$ , do código  $P_{L1}$  e  $P_{L2}$ , além do código C/A. O segundo é um receptor geodésico Trimble 4000SSi que aplica uma técnica própria denominada *Super-track*. Segundo (TRIMBLE, 1995, p. 124) os receptores da série 4000SSE operam com a técnica *cross-correlation*, enquanto que os da série 4000SSi empregam a técnica *Super-track*.

Quanto ao ano de observação dos dados, foram escolhidos arquivos com observações medidas antes e após o desligamento da SA. A partir das 4 horas (UTC) do dia 2 de maio de 2000 a técnica denominada *Selective Availability* (SA) foi desativada. Segundo HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 19), o objetivo da SA

é degradar a acurácia do posicionamento via introdução de informações ruidosas nos dados provenientes do relógio do satélite e manipulação das efemérides transmitidas. DIVIS (2000, p. 16) afirma que com o desligamento da SA, a precisão horizontal do posicionamento que era melhor que 100 metros e a vertical melhor que 150 metros (95% dos casos), teve uma melhora significativa, podendo ser melhor que 10 metros quando se emprega receptores de dupla frequência e 25 metros para receptores que operam somente com o código C/A. Portanto, empregar arquivos com observações coletadas antes e após o desligamento da SA torna possível verificar qual a melhoria que a suavização da pseudodistância pode trazer quando as observações estão sob seu efeito.

Foram também escolhidos arquivos com observações coletadas de 1, 3, 5 e 15 segundos, com o objetivo de analisar a influência da taxa de coleta dos dados no posicionamento. Como será visto na seção 4.2, por exemplo, o fator de redução do peso no filtro de LACHAPELLE-86 depende da taxa de coleta dos dados.

E, por último, foram escolhidos arquivos de estações distantes a partir de 12 até 430 km da estação PARA. Esta estação da RBMC servirá de base para o processamento de linhas de base em relação a outras estações.

A tabela 3.1 mostra algumas das características dos arquivos de observação utilizados nos processamentos.

TABELA 3.1 – ARQUIVOS DE OBSERVAÇÕES UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS

Estação	Nome	Dia GPS	Ano do Levantamento	Taxa de Gravação (s)	Receptor
AGUD	Agudos do Sul	288	2004	15	Trimble 4000 SSi
CANG	Fazenda Cangüiri	224	2004	05	Trimble 4000 SSi
CEM1	Centro de Estudos do Mar	331	1999	05	Trimble 4000 SSi
CEM1	Centro de Estudos do Mar	291	2004	15	Trimble 4000 SSi
FERG	Fazenda Exp. Rio Negro	274	2004	05	Trimble 4000 SSi
GUAR	Guarapuava	268	2004	15	Ashtech Z-12
IPIR	Ipiranga	121	2000	05	Ashtech Z-12
PARA	Estação da RBMC	365	1999	15	Trimble 4000 SSi
PARA	Estação da RBMC	224	2004	15	Trimble 4000 SSi
PARA	Estação da RBMC	275	2004	15	Trimble 4000 SSi
PARA	Estação da RBMC	288	2004	15	Trimble 4000 SSi
PARA	Estação da RBMC	356	2004	15	Trimble 4000 SSi
RM03	Excêntrico RM03	162	1999	05	Trimble 4000 SSi
RM03	Excêntrico RM03	120	2004	05	Ashtech Z-12
RM03	Excentrico RM03	121	2004	05	Ashtech Z-12
RM03	Excentrico RM03	023	2005	01	Ashtech Z-12
RM03	Excentrico RM03	023	2005	03	Ashtech Z-12
RM03	Excentrico RM03	023	2005	05	Ashtech Z-12
TEXA	Texaco	120	2000	05	Ashtech Z-12
UEPP	Estação da RBMC	356	2004	15	Trimble 4000 SSi

As estações da RBMC denominadas PARA e UEPP e a estação RM03 possuem suas coordenadas precisas (tabela 3.2) no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), referidas à época 1995.4. Para o propósito deste trabalho, no entanto, pode-se assumir que as coordenadas SIRGAS são iguais as coordenadas em WGS-84. As estações IPIR e TEXA foram rastreadas durante o trabalho de dissertação de BRICEÑO (2000), que também realizou o processamento dos dados da segunda campanha, e obteve as coordenadas finais com o processamento no programa PRISM. As demais estações foram rastreadas e processadas em função de diversas campanhas realizadas, e as coordenadas finais foram obtidas de relatórios gerados.

TABELA 3.2 – COORDENADAS GEODÉSICAS PRECISAS DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NOS PROCESSAMENTOS (WGS-84)

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
AGUD	-26° 02' 36,53959"	-49° 15' 26,16494"	836,111
CANG	-25° 23' 26,53464"	-49° 07' 30,08182"	904,635
CEM1	-25° 34' 22,95160"	-48° 21' 00,13040"	1,284
FERG	-26° 04' 07,57159"	-49° 45' 31,44969"	790,931
IPIR	-25° 24' 28,54769"	-49° 46' 53,34381"	1071,439
PARA	-25° 26' 54,12910"	-49° 13' 51,43680"	925,759
RM03	-25° 26' 54,56850"	-49° 13' 52,21080"	923,785
TEXA	-25° 17' 09,49136"	-49° 54' 22,94259"	983,984
UEPP	-22° 07' 11,65940"	-51° 24' 30,72160"	430,945

### 3.2 PROGRAMAS UTILIZADOS

Os principais programas utilizados nos processamentos de dados e análises são brevemente descritos a seguir.

#### PRISM (v2.1)

O programa PRISM, da Ashtech, é um programa de pós-processamento de dados. Ele é dividido em vários módulos, sendo que o módulo *TOOLS* é o que foi aplicado. Dentro desse módulo, existe um sub-módulo (*EDIT FILE TOOL*) que possui uma opção de visualizar as informações contidas em arquivos binários próprios, chamada *Full Precision Look*. Essa opção também permite gerar um arquivo em formato ASCII das informações contidas nesses arquivos. Para facilitar o

manuseio dos dados, um aplicativo foi desenvolvido, em linguagem Delphi, que tem a capacidade de ler o arquivo ASCII gerado pelo PRISM e gerar um arquivo de saída, formatado convenientemente, com informações de observações de código originais, correções de suavização da pseudodistância, entre outras. Um exemplo de um arquivo ASCII gerado pelo módulo *TOOLS* pode ser visualizado no anexo 1.

#### ASHTECH SOLUTIONS (v2.60)

O programa Ashtech Solutions também é um programa de pós-processamento de linhas de base. Um dos módulos desse programa, denominado *RinexConverter* foi utilizado para transformar os arquivos binários próprios da Ashtech em formato RINEX.

#### GIS DataPRO (v2.1.0.274)

O programa GISDataPRO, da Leica Geosystems Inc., foi gentilmente doado pela empresa MANFRA ao Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE) da UFPR. Este programa possui um módulo de pós-processamento dos dados, que nesta versão opera somente com observações do código, e não da fase. O módulo de pós-processamento pode tanto processar linhas de base quanto realizar um posicionamento absoluto (SPP – *Single Point Positioning*). Em ambos os processamentos existe a possibilidade de aplicar um dentre os vários modelos de troposfera, escolher o ângulo de elevação do satélite e empregar efemérides precisas ou transmitidas. Esse programa foi utilizado na comparação das coordenadas obtidas pelo programa desenvolvido PAC (apêndice 3) e também para processar as linhas de base (seção 4.7).

#### DAT2 RIN Verison 2.5 (Maio de 2000)

Os arquivos da estação PARA podem ser obtidos diretamente pelo *site* do IBGE na *internet*, em formato RINEX. Porém quando se tem apenas os arquivos binários próprios, a conversão para o formato RINEX pode ser realizada pelo programa DAT2RIN. É um programa que trabalha em ambiente MS-DOS e alguns parâmetros de entrada são necessários.

### MATLAB (v4.0)

O ambiente de programação MATLAB foi utilizado na geração dos algoritmos de suavização das pseudodistâncias que posteriormente foram implementados no programa SuavizaPD. O MATLAB também foi empregado na geração dos gráficos apresentados neste trabalho.

### XRapS (v5.2)

O programa XRapS pode ser obtido livremente na *internet* para o pós-processamento das pseudodistâncias do código. Neste trabalho ele foi utilizado para gerar os gráficos polares (*skyplots*). O programa está disponível em: <[www.geoima.de](http://www.geoima.de)>. Acesso em 23 jan. 2004.

### DELPHI (v4.0)

O compilador Delphi4, da empresa Borland, foi utilizado na criação de programas que são executados em ambiente Windows. Esta versão do programa, apesar de não ser a mais recente, é de propriedade livre e atendeu completamente as necessidades exigidas no trabalho. Com ele foram desenvolvidos os programas PAC, SuavizaPD e uma série de outros aplicativos.

### SuavizaPD

O programa SuavizaPD, desenvolvido em linguagem Delphi, tem a função de suavizar as pseudodistâncias empregando o filtro de HATCH-82 ou o de LACHAPELLE-86, para uma ou para as duas frequências. A seqüência de processamento consiste na leitura de um arquivo RINEX de observação, quando as medidas de fase e código são armazenadas em matrizes. O próximo passo exige a escolha do filtro de suavização que será empregado. Para o filtro de HATCH-82 escolhe-se o número de épocas necessárias para reinicializar o filtro, e para o de LACHAPELLE-86 o fator de redução. Pode-se ainda escolher os satélites que terão as suas observações suavizadas, mas normalmente todos os satélites rastreados têm as observações suavizadas. No apêndice 1 é possível visualizar o exemplo de um arquivo de saída do programa. Finalmente, o último passo consiste na geração de um arquivo RINEX de observação, onde as observações do código C/A são substituídas pelas observações do código suavizadas pela(s) portadora(s). O

exemplo de um arquivo RINEX gerado pelo programa é mostrado no apêndice 2 e a janela principal do programa pode ser visualizado na figura 3.1.

FIGURA 3.1 – JANELA PRINCIPAL DO PROGRAMA SuavizaPD

Idx	Rcv Time	PRN	fiWL	PDc	PDcsm	PDsm	PDcorr
000	495155.000	4	106879.2155	26164529.1815	26164529.1815	22551689.1373	0.0000
001	495160.000	4	107759.8785	26165409.8661	26165409.8553	22552448.2063	0.0093
002	495165.000	4	108643.9315	26166293.9786	26166293.9317	22553210.2080	0.0404
003	495170.000	4	109531.5455	26167181.5819	26167181.5548	22553975.2666	0.0234
004	495175.000	4	110422.8435	26168073.0272	26168072.8877	22554743.5229	0.1203
005	495180.000	4	111317.7125	26168968.0053	26168967.7991	22555514.8626	0.1786
006	495185.000	4	112216.2125	26169866.5627	26169866.3359	22556289.3289	0.1954
007	495190.000	4	113118.2095	26170768.6014	26170768.3665	22557066.8056	0.2025
008	495195.000	4	114023.7015	26171674.0024	26171673.8745	22557847.2796	0.1102
009	495200.000	4	114932.5565	26172582.7756	26172582.7341	22558630.6425	0.0358
010	495205.000	4	115844.7895	26173494.9305	26173494.9637	22559416.9100	-0.0287
011	495210.000	4	116760.5525	26174410.6757	26174410.7225	22560206.2193	-0.0404
012	495215.000	4	117680.0365	26175330.1210	26175330.1999	22560998.7338	-0.0681
013	495220.000	4	118603.0105	26176253.1068	26176253.1691	22561794.2580	-0.0537
014	495225.000	4	119529.7325	26177179.8847	26177179.8907	22562593.0163	-0.0052
015	495230.000	4	120459.5465	26178109.7897	26178109.7100	22563394.4447	0.0687
016	495235.000	4	121391.6385	26179041.9650	26179041.8116	22564197.8402	0.1322
017	495240.000	4	122327.6395	26179978.1177	26179977.8295	22565004.6113	0.2484
018	495245.000	4	123267.3515	26180917.8165	26180917.5560	22565814.5788	0.2245
019	495250.000	4	124210.6645	26181861.1573	26181860.8834	22566627.6501	0.2361
020	495255.000	4	125157.5125	26182807.9316	26182807.7410	22567443.7640	0.1643
021	495260.000	4	126107.8975	26183758.2313	26183758.1307	22568262.9225	0.0867
022	495265.000	4	127061.9075	26184712.3176	26184712.1484	22569085.2079	0.1458
023	495270.000	4	128019.5645	26185669.9836	26185669.8129	22569910.6365	0.1471
024	495275.000	4	128980.8005	26186631.2387	26186631.0565	22570739.1500	0.1571
025	495280.000	4	129945.4475	26187595.8858	26187595.7105	22571570.6030	0.1511
026	495285.000	4	130913.3695	26188563.8031	26188563.6388	22572404.8783	0.1416
027	495290.000	4	131884.8255	26189535.2572	26189535.1006	22573242.1991	0.1350
028	495295.000	4	132859.5465	26190509.9592	26190509.8263	22574082.3331	0.1146

## PAC

O programa PAC (Posicionamento Absoluto com Código) foi desenvolvido em linguagem Delphi e tem a função de processar dados de um posicionamento absoluto. Ele tem a capacidade de ler arquivos RINEX de observação e navegação e determinar as coordenadas da estação e o erro do relógio do receptor por meio de um ajustamento de observações das equações de observação do código. A refração troposférica pode ser reduzida empregando-se o modelo de Hopfield e a ionosférica empregando-se uma combinação das pseudodistâncias do código (equação 2.46). Erros referentes à órbita podem ser atenuados com o uso das efemérides precisas, ao invés das transmitidas, no formato SP3 do IGS. A confiabilidade do programa é dada pela comparação da acurácia obtida por ele em relação ao programa GISDataPRO. O exemplo de um arquivo de saída do programa PAC pode ser visualizado no apêndice 3, e resultados dos processamentos de algumas estações

são apresentados no apêndice 4. Pode-se visualizar a janela principal do programa PAC na figura 3.2.

FIGURA 3.2 – JANELA PRINCIPAL DO PROGRAMA PAC

The screenshot shows the main window of the PAC software, titled "PAC - Posicionamento Absoluto com Código". The window has a menu bar with "Arquivo", "Processamento", and "Sobre". The "Processamento" tab is active. The interface is divided into several sections:

- Coordenadas Precisas:** Station: CANG, Latitude: -25.232653464, Longitude: -49.073008182, Altitude: 904.6350.
- Solução Atual:** X (m): 3773603.322, Y (m): -4360220.737, Z (m): -2718633.599, dtr (s): 0.0000892542. Standard deviations:  $\sigma X$  (m): 6.918,  $\sigma Y$  (m): 8.892,  $\sigma Z$  (m): 3.798,  $\sigma$  dtr (ns): 22.937. Corrections:  $\Delta X$  (m): -8.229,  $\Delta Y$  (m): 1.947,  $\Delta Z$  (m): 0.999,  $\Delta 3D$  (m): 8.515. DOP values: GDOP: 2.6, PDOP: 2.2, TDOP: 1.3, # Sat: 8.
- Altura da Antena:** Altura Vertical (m): 0.000.
- Época:** # de Épocas: 300, with navigation buttons << 1 >>.
- Solução Média:** Fields for X, Y, Z (m) and  $\sigma X$ ,  $\sigma Y$ ,  $\sigma Z$  (m),  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  (m),  $\Delta 3D$  (m), and # Epocas.

The bottom section displays the following text:

```

GDOP = 2.6
PDOP = 2.2
TDOP = 1.3

Processamento concluído após 3 iterações.

Coordenadas Geodésicas Finais (WGS-84):
Latitude = -25° 23' 26.60086"
Longitude = -49° 07' 30.25883"
Altitude Elipsoidal = 898.0117 m

```

## 4 RESULTADOS OBTIDOS PELO PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES

### 4.1 CORREÇÃO DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA

Uma parte da análise da suavização da pseudodistância será realizada baseada na correção de suavização da pseudodistância ( $\Delta S$ ). Essa correção indica o quanto a pseudodistância suavizada variou em função da pseudodistância não suavizada.

A correção de suavização da pseudodistância é calculada subtraindo-se a pseudodistância original do código usada para a suavização com a pseudodistância suavizada, ambas em ciclos, e multiplicando o resultado pelo correspondente comprimento de onda da combinação linear, segundo a equação:

$$\Delta S = (PD^c - PD_S^c) \cdot \lambda_{CL} \quad (4.1)$$

onde:

$PD^c = \frac{f_{L1} PD_{L1}^c - f_{L2} PD_{L2}^c}{f_{L1} + f_{L2}}$  é a combinação da pseudodistância em ciclos (equação

2.48). Para o caso da suavização pela portadora  $L_1$ ,  $PD^c$  será substituída pela pseudodistância do código C/A, ou do código P, se disponível;

$PD_S^c$  pseudodistância suavizada em ciclos.

$\lambda_{CL}$  é o comprimento de onda da combinação linear, calculada pela equação 2.17. Para a suavização pela fase da portadora  $L_1$ ,  $\lambda_{CL}$  é o próprio comprimento de onda dessa portadora (19,03 cm).

### 4.2 FATOR DE PESO PARA O FILTRO DE LACHAPELLE

No início de um processamento com o filtro de LACHAPELLE-86 as observações de código recebem todo o peso ( $\omega = 1$ ), e gradualmente este peso é reduzido por um valor, quando então as observações de fase recebem maior peso.

Sendo  $t$  o tempo total para o qual se quer suavizar as pseudodistâncias do código, o fator de redução pode ser calculado pela equação (4.2), onde se leva em consideração a taxa de coleta dos dados ( $x$ ):

$$fr = \frac{1}{t} \cdot x \quad (4.2)$$

Assim, no início do rastreo o peso  $\omega$  que vale 1 é decrescido pelo fator  $fr$  até 0, no tempo  $t$  de suavização, quando então o filtro deve ser reiniciado ( $\omega = 1$ ).

Para taxas de gravação de dados mais comuns e um tempos de suavização de 250 segundos são mostrados na tabela 4.1 o fator de redução e o total de épocas necessárias para reinicializar o filtro.

TABELA 4.1 – FATOR DE REDUÇÃO E TOTAL DE ÉPOCAS PARA TEMPOS DE SUAUIZAÇÃO DE 250 SEGUNDOS

Taxa de Gravação $x$ (s)	Tempo de Suavização $t$ (s)	Fator de Redução $fr$	Total de Observações
01	250	0,004	250
03	250	0,012	83
05	250	0,020	50
10	250	0,040	25
15	250	0,060	16

Em relação à tabela 4.1 tem-se algumas considerações a fazer. A primeira em relação ao tempo de suavização. Segundo KIM e LANGLEY (2000) se a suavização é realizada além de um certo período, ocorre a divergência devido aos sinais opostos das medidas de fase e código para a refração ionosférica. Assim, essa divergência é um dos limitadores do tempo de suavização da pseudodistância. HATCH (1986, p. 1295) afirma que aproximadamente 3 minutos é um tempo suficiente para se realizar a suavização empregando uma taxa de coleta dos dados de 3 segundos. LACHAPELLE (1986, p. 34), por sua vez, menciona 2 minutos como um tempo de suavização que pode ser empregado. Um tempo de suavização de poucos minutos também é adequado quando se pensa em saltos de ciclo. Supondo um tempo de suavização de vários minutos e uma perda de ciclos bastante freqüente para um determinado satélite, o filtro vai ser reinicializado várias vezes sem mesmo ter concluído o processo de suavização, isto é, sem o peso ter variado

de 1 até 0. Em levantamentos cinemáticos os saltos de ciclos são mais freqüentes, então deve-se empregar tempos de suavização menores.

Um outro fator que está diretamente ligado ao tempo de suavização é a taxa de gravação dos dados. Os autores citados anteriormente empregaram taxas pequenas de coleta de dados, de 1 a 3 segundos em seus experimentos. HATCH (1986, p. 1295) menciona que 40 a 60 observações são suficientes, quando o tempo de suavização é de 2 a 3 minutos a uma taxa de 3 segundos. Observando a tabela 4.1 verifica-se que para um tempo de suavização de 250 segundos, taxas de 1 a 5 segundos geram um número suficiente de observações para serem suavizadas. Taxas de 10 ou 15 segundos geram poucas épocas de observação, e portanto devem ser evitadas.

#### 4.3 SUAUIZAÇÃO EM RECEPTORES GPS

Alguns receptores GPS realizam durante a coleta dos dados a suavização do código pela portadora, como é o caso de alguns receptores da Ashtech e da Leica. Arquivos de observações provenientes dos receptores Ashtech Z-12 (arquivos binários), têm armazenados tanto as pseudodistâncias originais (*raw range*) como as correções de suavização da pseudodistância (*range smoothing correction*). Segundo o manual do fabricante (ASHTECH, 1994, p. 145), a pseudodistância suavizada é obtida subtraindo-se o valor da pseudodistância original com a correção de suavização. A tabela 4.2 mostra as pseudodistâncias dos códigos C/A, P<sub>L1</sub> e P<sub>L2</sub> e as correções de suavização para cada uma destas observáveis. Nota-se que a subtração das primeiras pelas segundas geram as pseudodistância suavizadas que são as mesmas que se obtêm no arquivo RINEX, como era esperado.

TABELA 4.2 – OBSERVAÇÕES ORIGINAIS E CORREÇÃO DE SUAUIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADA PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12

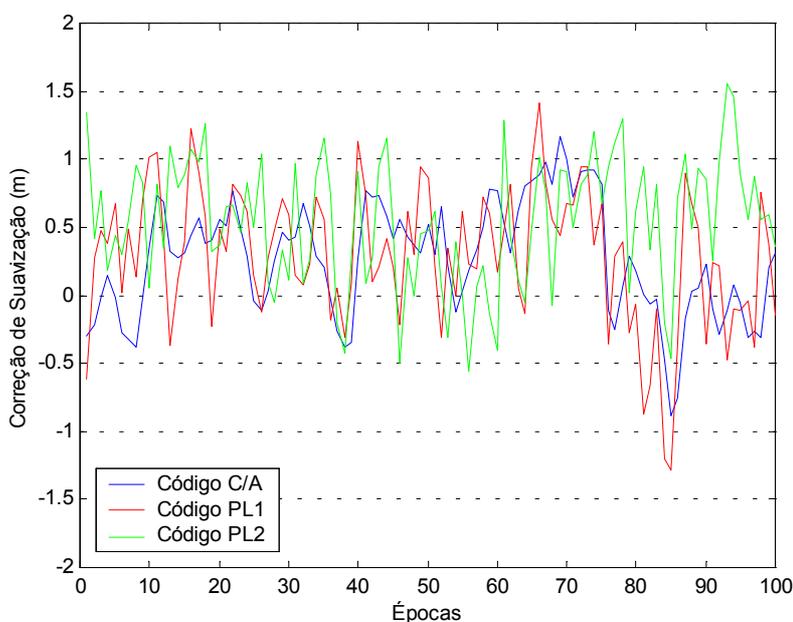
	C/A	P <sub>L1</sub>	P <sub>L2</sub>
Observações originais	22976775,270	22976775,077	22976788,883
Correção de suavização	0,330	-0,220	-0,280
Observações suavizadas	22976774,940	22976775,297	22976789,163
Observações do RINEX	22976774,940	22976775,297	22976789,163

NOTA: Estação IPIR, dia 121-2000, PRN 26.

As figuras 4.1 e 4.2 são gráficos que mostram as correções de suavização da pseudodistância para os códigos C/A, P<sub>L1</sub> e P<sub>L2</sub> calculadas pelo receptor, em função do número de épocas de observação. A figura 4.1 foi construída com observações oriundas de um levantamento realizado no ano de 2000, ainda sob o efeito da SA. A figura 4.2, por sua vez, foi elaborada com as pseudodistâncias medidas em um levantamento realizado no ano de 2004, quando a SA já estava desabilitada. Verifica-se que a correção de suavização geradas para o ano de 1999 apresentou valores inferiores a  $\pm 1,55$  m (código P<sub>L2</sub>), enquanto que para os dados mais recentes foram inferiores a  $\pm 1,00$  m (C/A).

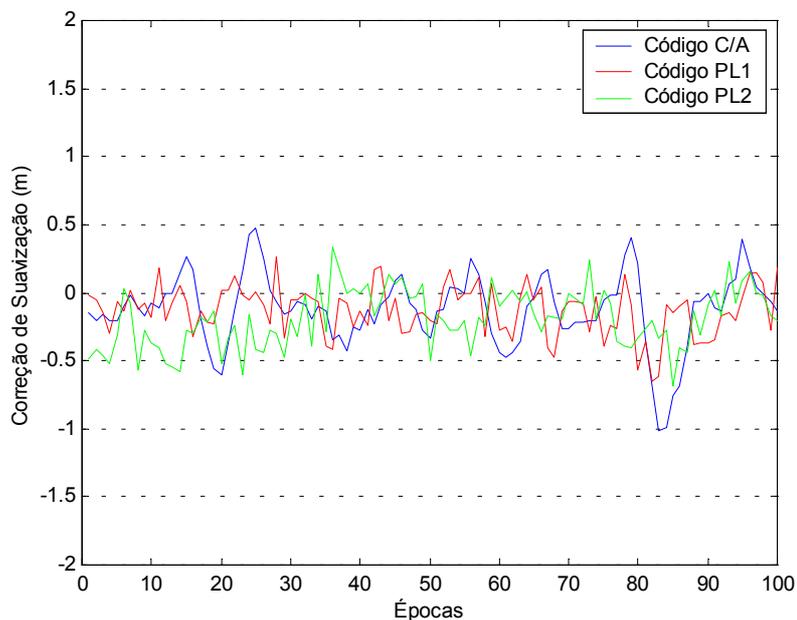
A figura 4.3 mostra as correções de pseudodistância calculadas com observações da estação RM03 no dia 149-2004, onde observa-se que as correções calculadas apresentaram valores inferiores a  $\pm 3,20$  metros (C/A). Porém, correções maiores não representam degradação no posicionamento, pois a análise da acurácia somente será efetuada por meio da determinação das coordenadas das estações empregando as observações suavizadas, itens estes que serão abordados nas seções 4.6 e 4.7.

FIGURA 4.1 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 EM 2000



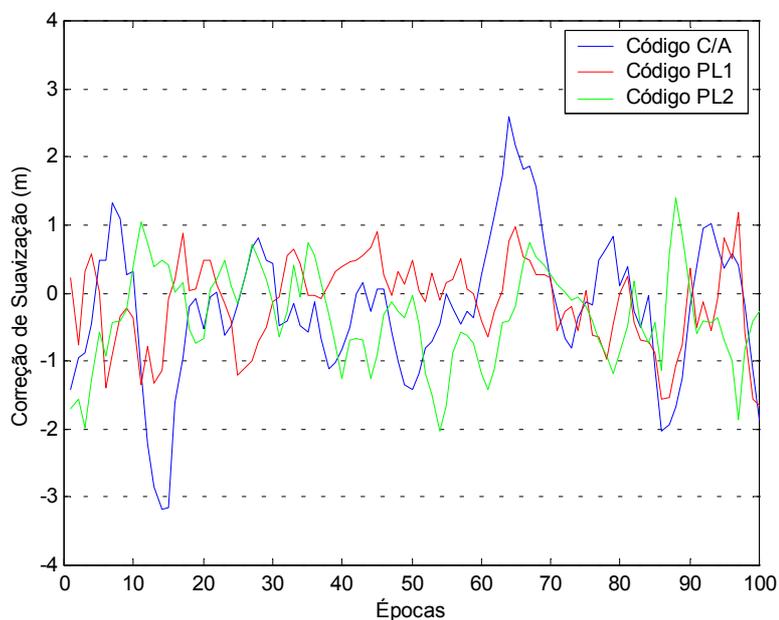
NOTA: Estação TEXA, dia 120–2000, PRN 01, gráfico polar no apêndice 7 figura 1.

FIGURA 4.2 – CORREÇÕES DE SUAUIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 EM 2004



NOTA: Estação RM03, dia 296–2004, PRN 01, gráfico polar no apêndice 7 figura 2.

FIGURA 4.3 – CORREÇÕES DE SUAUIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 EM 2004

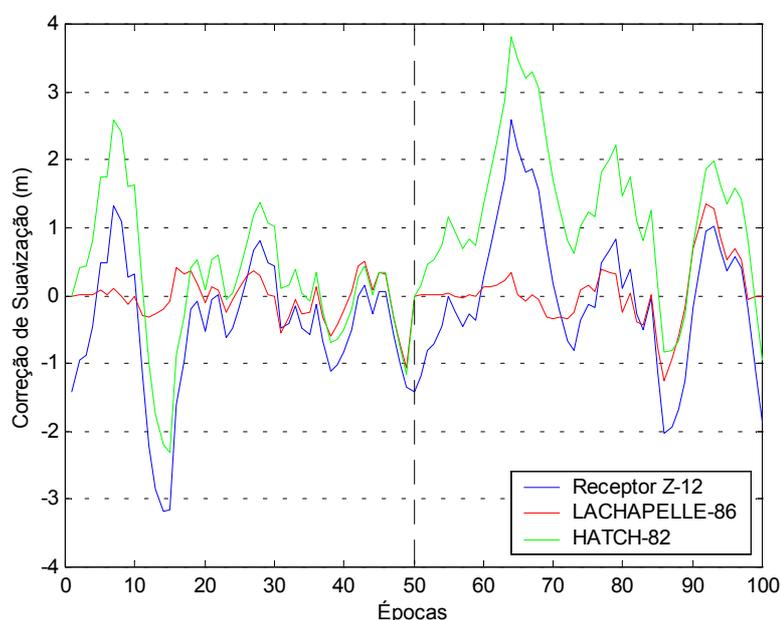


NOTA: Estação RM03, dia 149–2004, PRN 06, gráfico polar no apêndice 7 figura 3.

As pseudodistâncias do código C/A entre o satélite PRN 06 e a estação IPIR foram suavizadas empregando-se os filtros de LACHAPPELLE-86 e HATCH-82 com o

objetivo de calcular correções de pseudodistância. Estas correções estão representadas na figura 4.4, juntamente com as correções de pseudodistância calculadas pelo próprio receptor. Visando a reinicialização dos filtros a cada 50 épocas, de um total de 100 épocas, o filtro de HATCH-82 apresentou um tempo de suavização de 4 minutos e 10 segundos (50 épocas), e o de LACHAPELLE-86 foi configurado com um tempo de suavização 250 s sendo a taxa de gravação dos dados de 5 s, portanto o fator de redução foi igual a 0,02.

FIGURA 4.4 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA (C/A) CALCULADAS PELO RECEPTOR ASHTECH Z-12 E PELOS FILTROS DE LACHAPELLE-86 E HATCH-82



NOTA: Estação RM03, dia 149–2004, PRN 06, gráfico polar no apêndice 7 figura 3.

Na figura 4.4 observa-se que as correções de suavização da pseudodistância calculadas pelo filtro de HATCH-82 se aproximam mais das correções de suavização do receptor do que as do filtro de LACHAPELLE-86. Tal motivo ocorre devido à própria característica do filtro de LACHAPELLE-86, que no início da suavização fornece maior peso as observações de código e menos para as de fase. Assim, após a primeira e a 50<sup>a</sup> época, os filtros foram reinicializados, quando o valor da correção de suavização da pseudodistância foi nula. As diferenças observadas entre as correções na figura 4.4 são também esperadas devido a diversos fatores como o tempo de suavização e taxa de coleta dos dados, pois o receptor calcula as

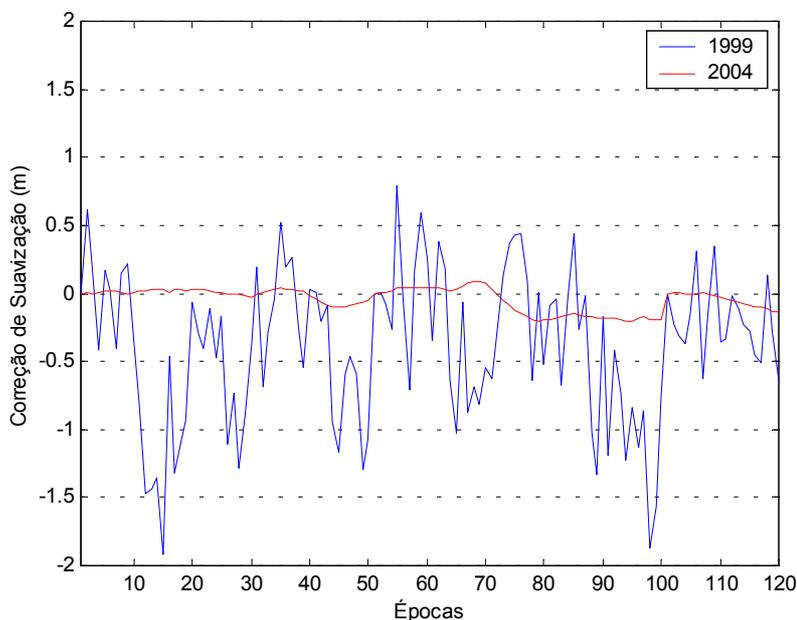
correções de suavização com uma taxa menor que a da coleta de dados, a qual foi empregada nos outros filtros.

#### 4.4 SUAVIZAÇÃO PARA A PORTADORA $L_1$

Nesta seção serão apresentados alguns resultados provenientes de processamentos de dados empregando o programa SuavizaPD para a portadora  $L_1$ . O código empregado foi o código C/A, mesmo quando era disponível o código preciso P.

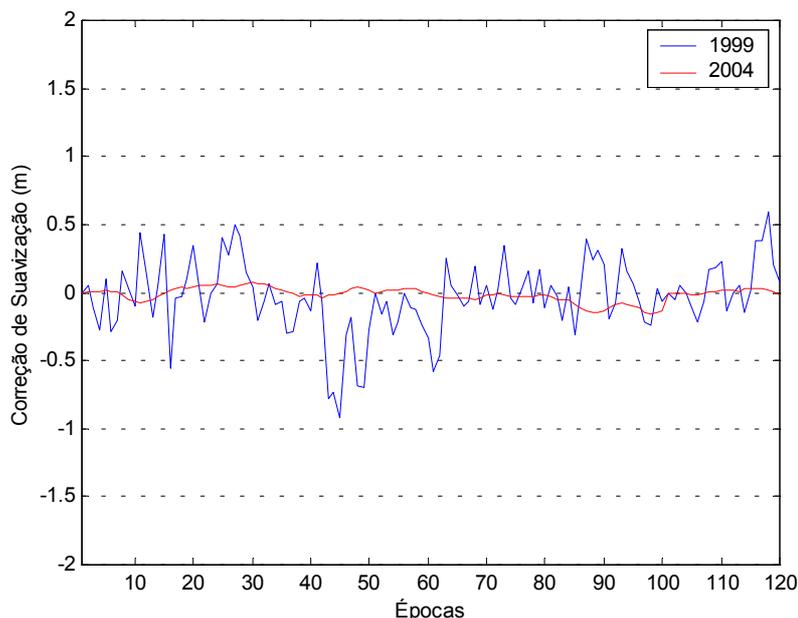
As figuras 4.5 e 4.6 mostram as correções de suavização da pseudodistância para os satélites PRN 05 e 09, respectivamente, calculadas pelo filtro de HATCH-82 relativas as observações da estação RM03 dos dias 162-1999 e 149-2004. Os arquivos de dados eram de 10 minutos de duração com observações coletadas a cada 5 segundos. O filtro foi reinicializado a cada 50 épocas.

FIGURA 4.5 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SATÉLITE PRN 05



NOTA: Estação RM03, dias 162–1999 e 149–2004, gráfico polar no apêndice 7 fig. 4 e 5.

FIGURA 4.6 – CORREÇÕES DE SUAUIZÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SATÉLITE PRN 09



NOTA: Estação RM03, dias 162–1999 e 149–2004, gráfico polar no apêndice 7 fig. 4 e 5.

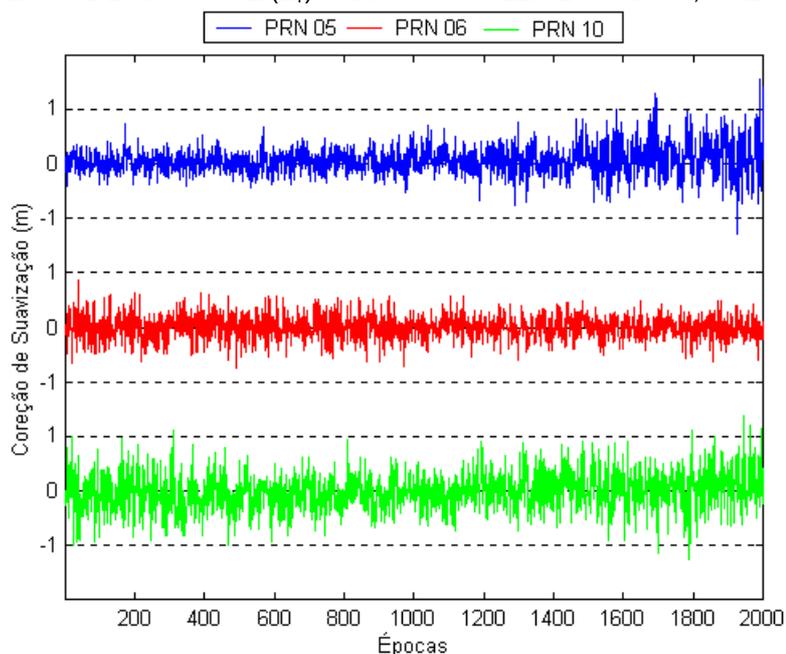
Observa-se nas figuras 4.5 e 4.6 que as correções de suavização para o ano de 1999 variam de forma significativa quando comparadas com as correções calculadas para o ano de 2004. Para o satélite PRN 05, verifica-se que as correções para o ano de 1999 variaram de +0,80 a -1,90 m, enquanto que as correções de 2004 variaram de +0,10 a -0,20m. Da mesma forma para o satélite PRN 09, verifica-se que no ano de 1999 as correções estiveram com valores entre +0,60 e -0,90m, e para 2004 as correções estiveram no intervalo compreendido entre +0,10 e -0,15m. MONICO (2000, p. 50) menciona que a implementação da técnica SA causava alterações muito rápidas nas medidas de pseudodistâncias. Como as pseudodistâncias (que são empregadas no processo de suavização) alteravam rapidamente, explica-se as variações das correções de pseudodistância apresentadas nas figuras 4.5 e 4.6, para o ano de 1999, como sendo devido a fato dessas observações estarem ainda sob o efeito da SA. E como as observações de 2004 já não estavam mais sob esse efeito, observa-se que os intervalos de variação são muito menores se comparados aos de 1999.

Nota-se, também que as correções podem variar em função do ângulo de elevação do satélite para o qual foi realizada a medida da pseudodistância. A figura 4.7 mostra as correções de suavização da pseudodistância da estação CANG para

os satélites PRN 05, 06 e 10, e a figura 4.8 para os satélites PRN 17, 21 e 30. As correções foram calculadas empregando-se o filtro de HATCH-82, com a portadora  $L_1$ , e foram suavizadas neste processo 2000 épocas, com o filtro sendo reinicializado a cada 50 épocas. O número de observações para o satélite PRN 17 era menor que para os demais satélites, sendo igual a 1295 épocas.

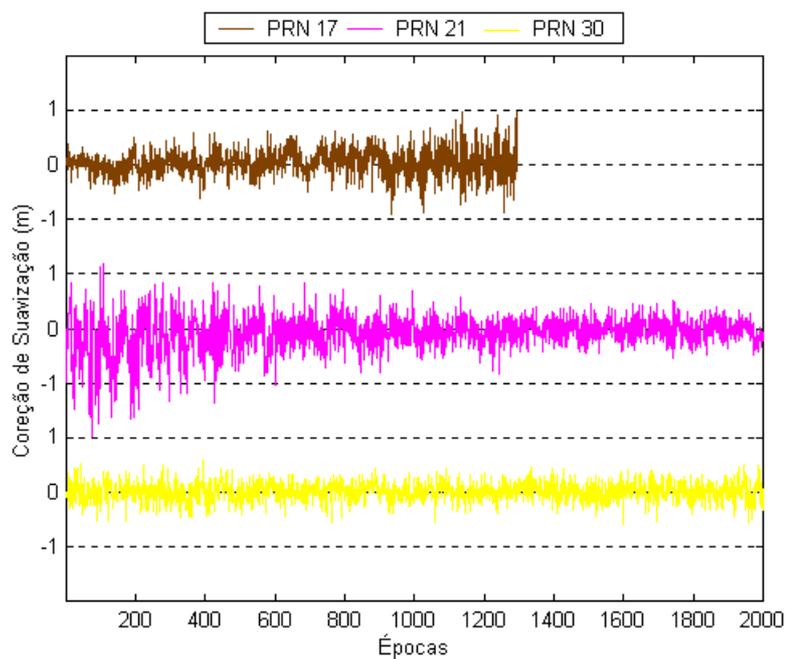
O gráfico polar da estação CANG é mostrado na figura 4.9, onde verifica-se que o número que representa o PRN do satélite também representa a posição do satélite no início do rastreo. Para o satélite PRN 05 verifica-se que nas épocas iniciais, quando a elevação do satélite era próxima a  $75^\circ$ , as correções apresentam valores menores quando comparadas com as correções nas últimas épocas, quando o satélite estava a  $15^\circ$ . O satélite PRN 21, por sua vez, apresentou valores na correção da pseudodistância maiores que o metro nas primeiras 600 épocas, quando o satélite estava a  $10^\circ$  de elevação. Para as demais épocas, as correções apresentaram valores menores, quando também se verifica a ascendência do satélite, chegando próximo a  $60^\circ$ . Para efeito de comparação, o satélite PRN 30 apresentou correções que variavam entre de  $\pm 0,60$  m durante todo o levantamento, observando agora o gráfico polar verifica-se que este satélite não esteve abaixo de 45 graus de elevação, chegando a culminar no zênite.

FIGURA 4.7 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06 E 10



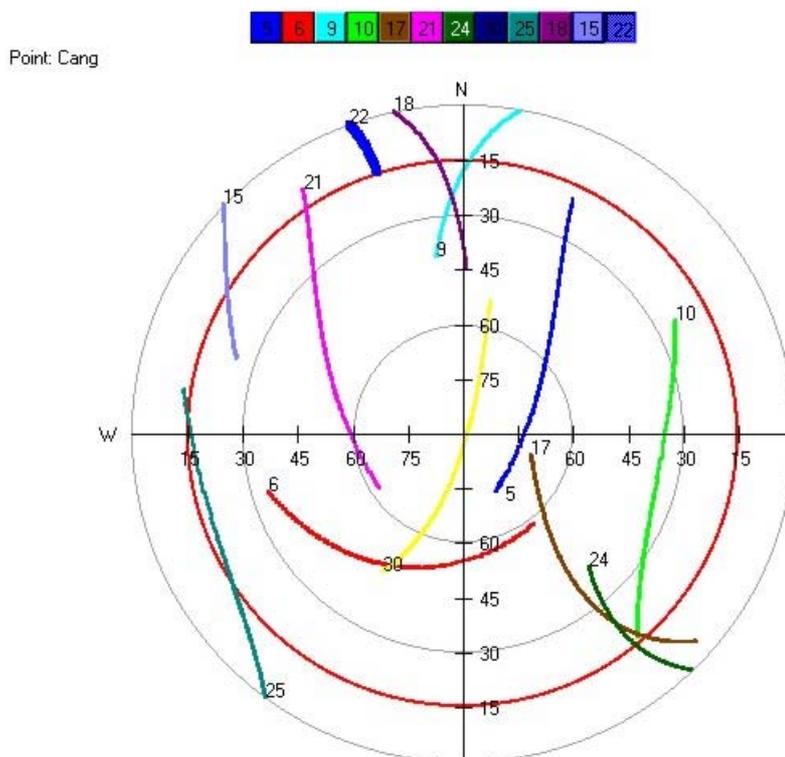
NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

FIGURA 4.8 – CORREÇÕES DE SUAUIZÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ ) PARA OS SATÉLITES PRN 17, 21 E 30



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

FIGURA 4.9 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO CANG



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

Com base nas correções de pseudodistância calculadas para a estação CANG construiu-se a tabela 4.3 que mostra valores mínimos, máximos, médios, desvios padrão e percentagem de épocas com correções menores que 0,50 e 1 m. O satélite PRN 21 foi o que apresentou as maiores correções, chegando a quase 1 m, enquanto que o satélite PRN 06 não ultrapassou 0,50 m. Porém, as menores correções foram calculadas para o satélite PRN 30, que teve 99,35% das correções menores que 0,50 m.

TABELA 4.3 – ESTATÍSTICA DAS CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$ )

PRN	Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio-padrão (m)	< 0,5 m (%)	< 1 m (%)
05	1,570	-1,293	0,062	0,258	93,85	99,60
06	0,860	-0,751	-0,003	0,214	97,70	100,00
10	1,383	-1,254	-0,021	0,342	85,50	99,55
17	0,973	-0,905	0,039	0,247	94,59	100,00
21	1,192	-1,979	-0,085	0,334	89,00	97,95
30	0,580	-0,598	0,008	0,171	99,35	100,00

NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

Baseado na tabela 4.3 e nos gráficos 4.7 e 4.8 verificou-se que a suavização empregando somente uma frequência apresenta, de forma geral, valores de correções menores que o metro, apesar de que em alguns casos o valor da correção pode ser até mesmo maior que 3,0 metros (figura 4.4).

Outros experimentos foram realizados com a suavização usando a portadora  $L_1$ , empregando a estação FERG, e os resultados são apresentados no apêndice 6. As figuras de número 1 a 6 mostram as correções de suavização da pseudodistância para os satélites PRN 06, 15, 18, 21, 22 e 30. Empregou-se 600 épocas para a suavização pelo filtro de HATCH-82 ( $L_1$ ), o qual era reinicializado a cada 50 épocas. A figura 13 é o gráfico polar para essa estação.

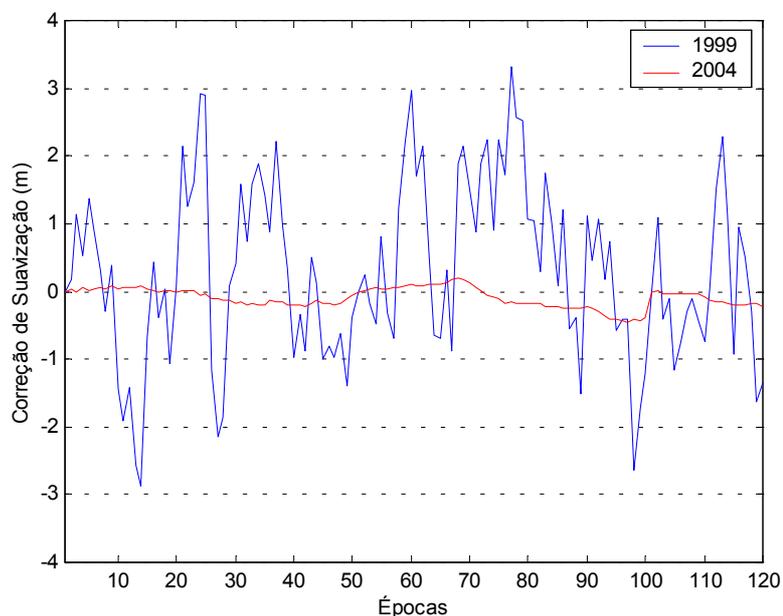
Observando as figuras apresentadas nesta seção (seção 4.4) e as figuras 1-6 do apêndice 6, constata-se que as correções de pseudodistância podem variar em função da SA e do ângulo de elevação do satélite.

#### 4.5 SUAVIZAÇÃO PARA AS DUAS PORTADORAS

A maior vantagem da suavização empregando as duas ondas portadoras está na possibilidade de atenuar os efeitos causados pela refração ionosférica. Novamente serão empregadas as correções de suavização da pseudodistância na análise da suavização, porém, neste caso, essas correções serão calculadas como sendo a diferença das observáveis resultantes das combinações lineares com as resultantes do processo de suavização (seção 4.1).

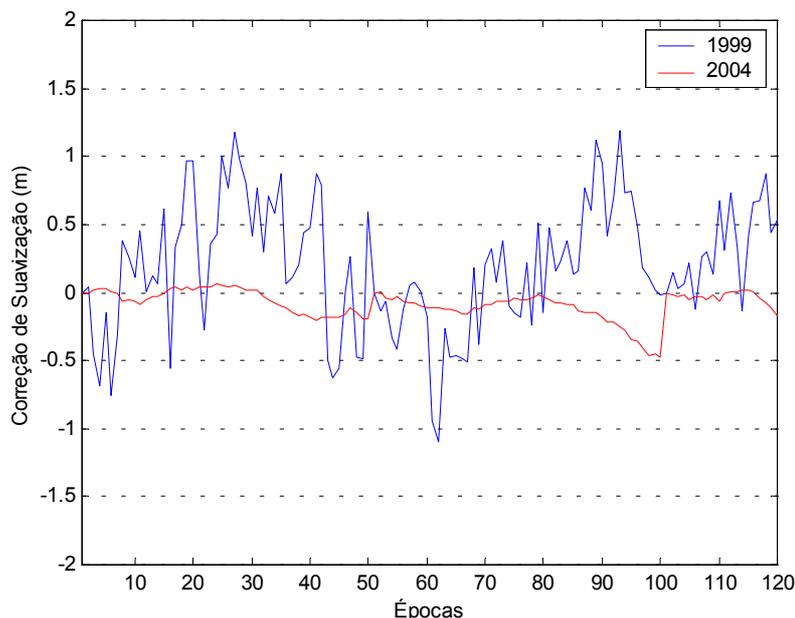
Foram empregados nos experimentos os mesmos arquivos de dados utilizados para analisar o efeito da suavização com a portadora  $L_1$  (seção 4.4). As figuras 4.10 e 4.11 mostram as correções de pseudodistância em função do número de épocas, calculadas com o filtro de HATCH-82, para observações coletadas nos anos de 1999 e 2004. Novamente o filtro era reinicializado a cada 4 minutos e 10 segundos (50 épocas).

FIGURA 4.10 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$  E  $L_2$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SATÉLITE PRN 05



NOTA: Estação RM03, dias 162–1999 e 149–2004, gráfico polar no apêndice 7 fig. 4 e 5.

FIGURA 4.11 – CORREÇÕES DE SUAUIZÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$  E  $L_2$ ) EM 1999 E 2004 PARA O SATÉLITE PRN 09



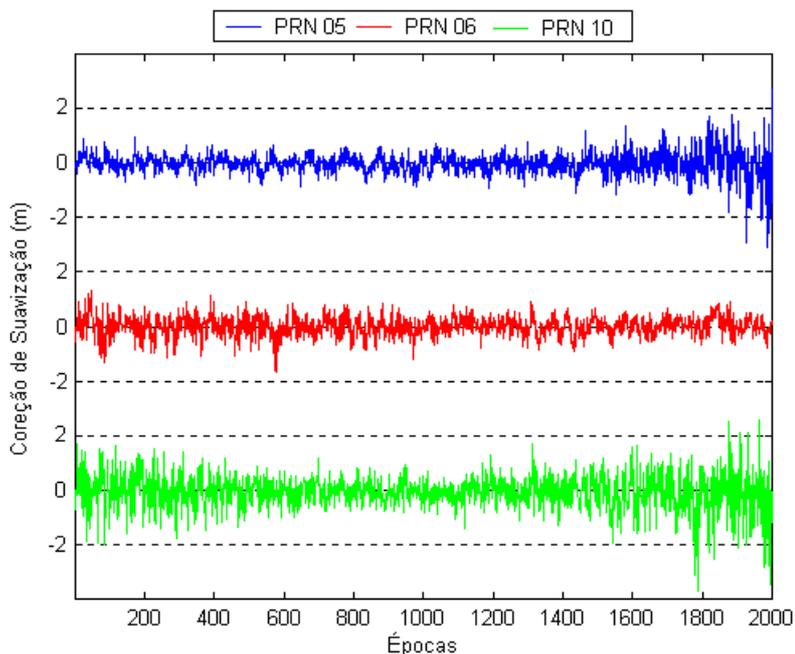
NOTA: Estação RM03, dias 162–1999 e 149–2004, gráfico polar no apêndice 7 fig. 4 e 5.

Novamente verifica-se uma variação maior nas correções de suavização da pseudodistância para os dados de 1999, se comparados aos de 2004. Para o ano de 1999, as correções para o satélite PRN 05 (figura 4.10) estiveram entre +3,30 e -2,90 m, enquanto que para o satélite PRN 09 estiveram entre +1,20 e -1,10 m. E para o ano de 2004, em ambos os casos as correções foram, em módulo, inferiores a 0,50 m.

Conforme foi visto na seção 4.4, as correções variam em função do ângulo de elevação do satélite para o qual foi realizada a medida da pseudodistância. A figura 4.12 apresenta as correções de suavização da pseudodistância para os satélites PRN 05, 06, 10 e 21 e a figura 4.13 para os satélites PRN 17, 21 e 30. As configurações do filtro de HATCH-82 empregado nesta seção foram as mesmas das empregadas na seção 4.4, porém utilizando as duas frequências no processo de suavização.

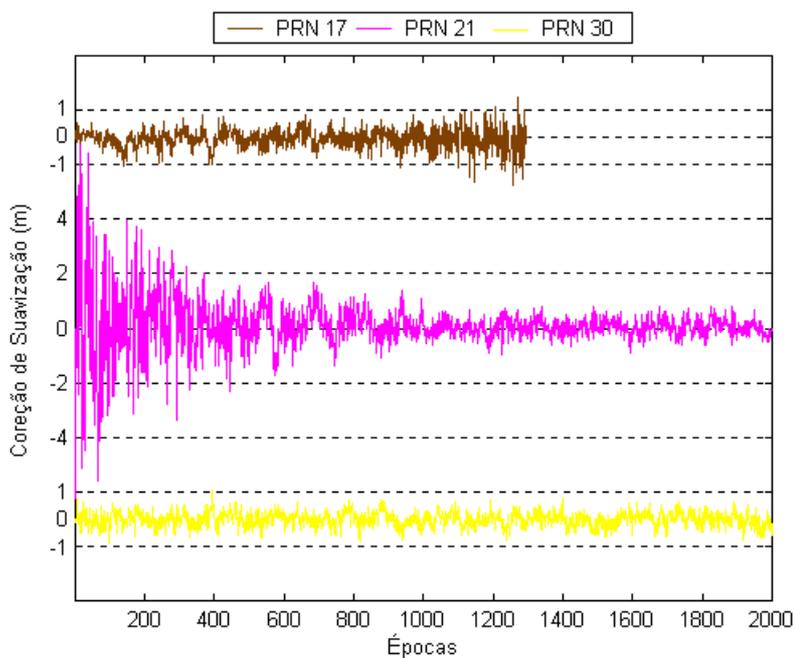
Como foram empregados os mesmos dados originais para gerar as correções de suavização da pseudodistância para a portadora  $L_1$  e para  $L_1$  e  $L_2$ , o gráfico polar para este experimento é o mesmo apresentado na figura 4.9.

FIGURA 4.12 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$  E  $L_2$ ) PARA OS SATÉLITES PRN 05, 06 E 10



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

FIGURA 4.13 – CORREÇÕES DE SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 ( $L_1$  E  $L_2$ ) PARA OS SATÉLITES PRN 17, 21 E 30



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

Percebe-se nas figuras 4.12 e 4.13 como o ângulo de elevação do satélite tem influencia no cálculo das correções de suavização das pseudodistâncias. O satélite PRN 21 apresentou as maiores correções nas épocas iniciais, que alcançaram 6 metros, quando o satélite estava abaixo de 15°. À medida que o satélite elevava-se (chegando a 60°), verifica-se a diminuição das correções de suavização. O satélite PRN 30, que não esteve abaixo dos 45° de elevação, não apresentou correções de suavização da pseudodistância superiores a 1,05 m.

Com os resultados obtidos no processamento, foi gerada a tabela 4.4, que mostra os valores máximos, mínimos, a média, desvio-padrão e a percentagem de observações que tiveram correções menores que 50 cm e menores que o metro.

Verifica-se que as correções de suavização das pseudodistâncias são, de forma geral, menores que o metro, conforme pode ser verificado na tabela 4.4, onde as maiores correções foram para o satélite PRN 21, que alcançaram 6,7 m. Porém, para este mesmo satélite, 86,45% das épocas tiveram correções menores que o metro e 71,4% menores que 50 cm. Nota-se que as correções para esse satélite foram, de forma geral, maiores que 2 metros para as primeiras 500 observações, quando este satélite apresentava um ângulo de elevação próximo a 15°.

TABELA 4.4 – ESTATÍSTICA DAS CORREÇÕES DE SUAUIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA CALCULADAS PELO FILTRO DE HATCH-82 (L<sub>1</sub> E L<sub>2</sub>)

PRN	Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio-padrão (m)	< 0,5 m (%)	< 1 m (%)
05	2,720	-3,103	-0,023	0,411	85,25	97,45
06	1,310	-1,668	-0,003	0,355	84,90	99,00
10	2,591	-3,721	-0,075	0,616	65,25	90,40
17	1,470	-1,764	-0,056	0,358	85,25	98,61
21	6,727	-6,234	0,077	0,901	71,40	86,45
30	1,022	-0,873	-0,013	0,264	93,40	99,95

NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 2000 épocas.

#### 4.6 EFEITO DA SUAUIZAÇÃO EM UM POSICIONAMENTO ABSOLUTO

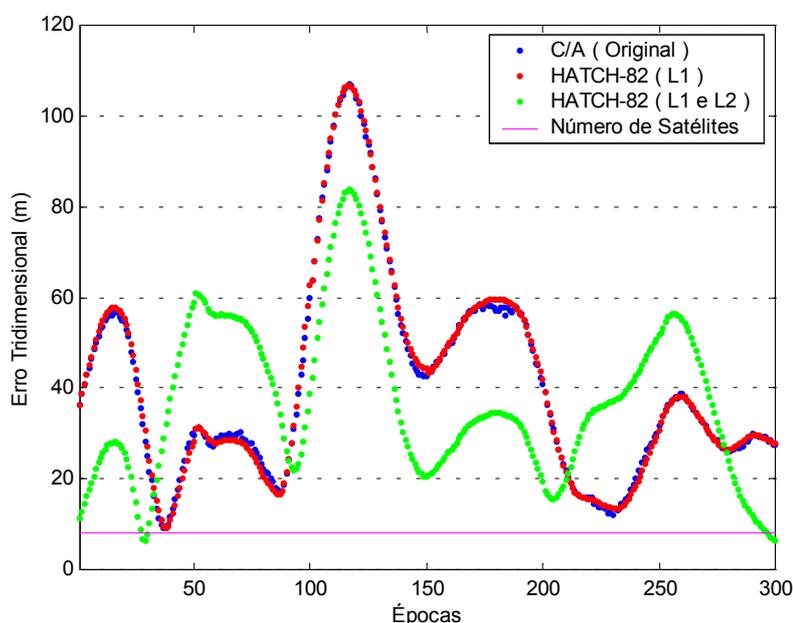
A análise do efeito que a suavização pode exercer em um posicionamento por ponto será verificado por meio do processamento das observáveis, tanto as originais quanto as suavizadas, pelo programa PAC (seção 3.2).

Na primeira análise foram empregadas no processamento três arquivos de observações. O primeiro com as observações originais (não suavizadas) do código

C/A, o segundo com as observações suavizadas pela portadora  $L_1$ , e por último o arquivo com as observações suavizadas pelas duas portadoras. A suavização das pseudodistância foi calculada pelo programa SuavizaPD com o filtro de HATCH-82 sendo reinicializado a cada 50 épocas. Para uma análise mais completa empregou-se dados de 1999, da estação CEM1, e dados de 2004, da estação CANG, ambas as estações foram observadas com o receptor Trimble4000 SSi com uma taxa de gravação dos dados igual a 5 segundos.

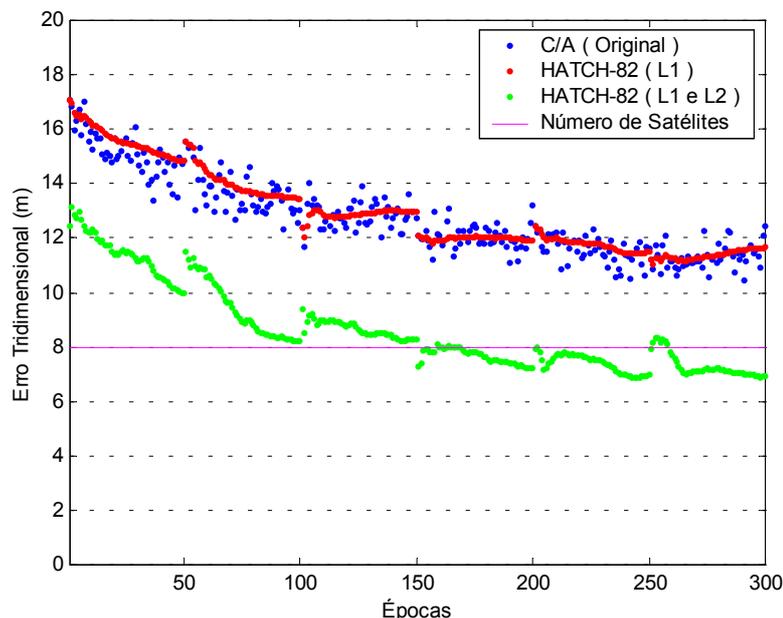
O processamento foi realizado empregando-se um total de 300 épocas, as quais possuíam observações de 8 satélites. A solução foi obtida empregando-se as efemérides transmitidas. O programa PAC determinou uma solução para cada época, gerando um arquivo final com as coordenadas cartesianas determinadas e o erro do relógio do receptor, as diferenças nas coordenadas cartesianas em relação as coordenadas precisas da estação, além dos erros planimétricos e tridimensionais. Com base nesse arquivo de saída foram construídas as figuras 4.14 e 4.15 com os erros tridimensionais e o número de satélites presentes nos processamentos.

FIGURA 4.14 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS PARA A ESTAÇÃO CEM1



NOTA: Estação CEM1, dia 331–1999, 8 satélites.

FIGURA 4.15 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS PARA A ESTAÇÃO CANG



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 8 satélites.

A tabela 4.5 mostra os valores máximos, mínimos, a média e o desvio-padrão para o erro tridimensional calculado pelo programa PAC, para as estações CEM1 e CANG, empregando diferentes observáveis. Verifica-se que tanto os valores máximo, mínimo, média, quanto os desvios-padrão são maiores para as observações do ano de 1999 do que para o ano de 2004, resultante da degradação do posicionamento devido a SA (figuras 4.16 e 4.17). Observa-se também nessa tabela que os erros tridimensionais calculados com as pseudodistâncias originais são próximas daqueles calculados com as pseudodistâncias suavizadas pela portadora  $L_1$ . Pelo fato das correções de suavização serem de poucos centímetros, elas acabam exercendo pouca influência no resultado final do processamento. Empregando-se as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras no posicionamento verifica-se uma melhora nas soluções para cada época, onde o erro tridimensional máximo foi próximo a 13 m e o mínimo de 7 m.

TABELA 4.5 – ESTATÍSTICA DOS ERROS TRIDIMENSIONAIS DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EM 1999 E 2004

Estação	Observável	Ano	Máximo (m)	Mínimo (m)	Média (m)	Desvio-Padrão (m)
CEM1	C/A (original)	1999	106,984	9,226	41,034	22,748
	HATCH L1	1999	106,791	9,197	41,226	23,063
	HATCH L1 E L2	1999	83,788	6,291	37,092	17,826
CANG	C/A (original)	2004	17,077	10,429	12,757	1,463
	HATCH L1	2004	17,077	11,020	12,928	1,519
	HATCH L1 E L2	2004	13,128	6,877	8,621	1,571

NOTA: Estação CEM1 do dia 331–1999 e estação CANG do dia 224–2004.

É de se esperar que os resultados sejam melhores quando se leva em consideração os erros atmosféricos e de órbita, e quando se trabalha com as duas portadoras, pois as combinações lineares podem reduzir sobremaneira os efeitos da ionosfera. Assim, foram processados dados de duas estações, CANG e AGUD, pelo programa PAC com os arquivos das observações originais do código C/A, bem como as suavizadas pelo filtro de HATCH-82 pelas duas portadoras. Verifica-se que a estação CANG foi rastreada com uma taxa de gravação de 5 segundos, e a estação AGUD com uma taxa de 15 segundos. Nos processamentos foram empregadas as efemérides precisas e o modelo de Hopfield para a troposfera. O erro tridimensional calculado pode ser visualizado nas figuras 4.16 e 4.17.

Constata-se na figura 4.16 que o erro tridimensional no posicionamento absoluto empregando as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras é significativamente menor do que o erro tridimensional dos códigos originais e também melhor que as pseudodistâncias suavizadas pela portadora  $L_1$ . Para as pseudodistâncias originais o erro tridimensional variou entre aproximadamente 5 e 9 metros, apresentando um comportamento dispersivo se comparada as pseudodistâncias suavizadas. O erro para o posicionamento empregando pseudodistâncias suavizadas pela portadora  $L_1$  foi próximo àquele que empregou as pseudodistâncias originais, porém não tão dispersivo quanto aquele. E os erros calculados para o posicionamento que empregou as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras estiveram entre 2 e 6 metros, aproximadamente. Observa-se também, que “picos” são encontrados a cada 50 épocas, que correspondiam as épocas de reinicialização do filtro.

No posicionamento da estação AGUD (figura 4.17) observa-se o mesmo comportamento para o erro tridimensional, isto é, o erro tridimensional foi dispersivo

para o posicionamento com o código C/A, mais preciso para o posicionamento que empregou as pseudodistâncias suavizadas pela portadora  $L_1$  e mais preciso e acurado para aquele que empregou as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras.

Esses mesmo arquivos foram processados pelo programa GISDataPRO com o intuito de gerar uma solução apenas, diferente do programa PAC que não aplica um ajustamento capaz de atualizar a solução com a introdução de novas observações. No processamento não foram aplicados modelos para ionosfera e nem para a troposfera e foram utilizadas as efemérides transmitidas. As coordenadas finais são mostradas na tabela 4.6, junto com os desvios-padrão das coordenadas. A tabela 4.7 mostra as diferenças, no sistema cartesiano, das coordenadas obtidas pelo programa com as precisas. Na tabela 4.7 verifica-se que houve uma melhora significativa no posicionamento obtido com as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras, enquanto que na prática não houve melhora no processamento das pseudodistâncias suavizadas somente pela portadora  $L_1$ . Observa-se ainda que resultados melhores poderiam ser obtidos se fossem empregados as efemérides precisas e um modelo para a troposfera.

TABELA 4.6 – COORDENADAS GEODÉSICAS (WGS-84) DETERMINADAS PELO PROGRAMA GISDataPRO, COM SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO

PD	Latitude	Longitude	Altitude (m)	$\sigma_\phi$ (m)	$\sigma_\lambda$ (m)	$\sigma_h$ (m)
C/A	-25° 23' 26,55921"	-49° 07' 30,25753"	915,218	0,189	0,169	0,486
HATCH - L1	-25° 23' 26,55784"	-49° 07' 30,25671"	915,334	0,190	0,171	0,489
HATCH - L12	-25° 23' 26,54043"	-49° 07' 30,19238"	911,568	0,176	0,157	0,452

NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 300 épocas.

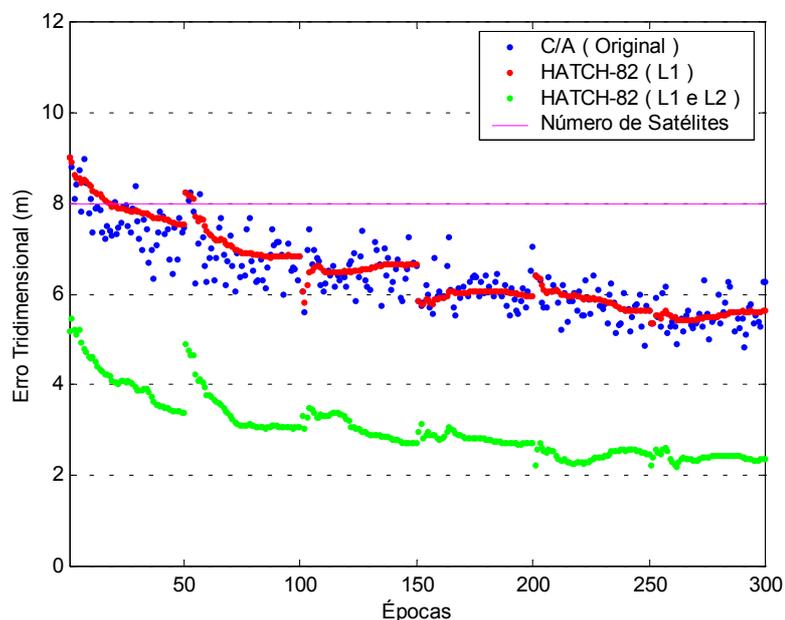
TABELA 4.7 – ACURÁCIA DAS COORDENADAS DETERMINADAS PELO PROGRAMA GISDataPRO

	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	Erro Planimétrico (m)	Erro Tridimensional (m)
C/A	-2,330	10,199	5,221	10,462	11,692
HATCH-L1	-2,428	10,277	5,233	10,560	11,785
HATCH-L12	-1,712	6,701	3,134	6,916	7,593

NOTA: Estação CANG, dia 224–2004.

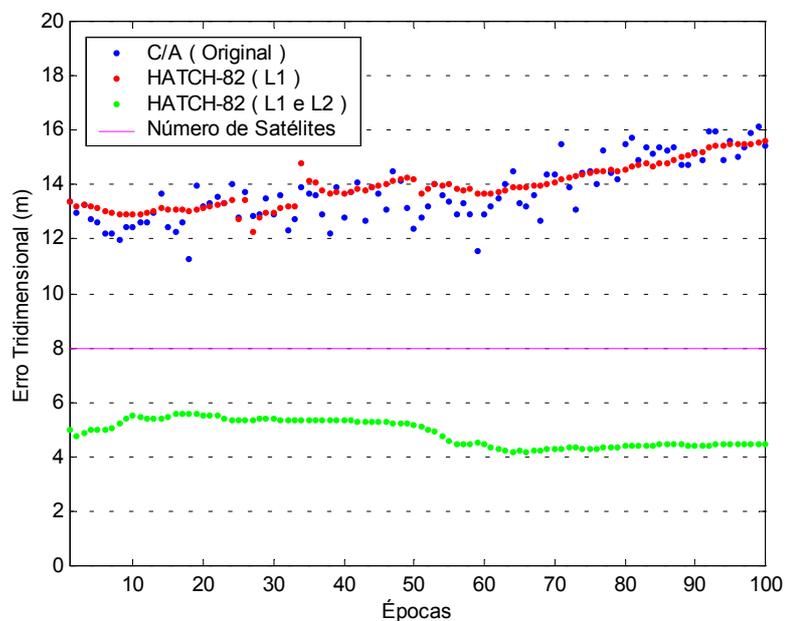
As últimas três colunas da tabela 4.6 mostram os desvios padrão das coordenadas geodésicas da estação, provenientes do ajustamento. Observa-se que em nenhum dos casos os desvios padrão foram superiores a 50 cm. A acurácia, por sua vez, mostrada na tabela 4.7, indica valores acima de 7 metros, chegando a alcançar 11 metros.

FIGURA 4.16 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS ( $L_1$  E  $L_2$ ), EFEMÉRIDES PRECISAS E MODELO PARA A TROPOSFERA PARA A ESTAÇÃO CANG



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 8 satélites, taxa de gravação 5s.

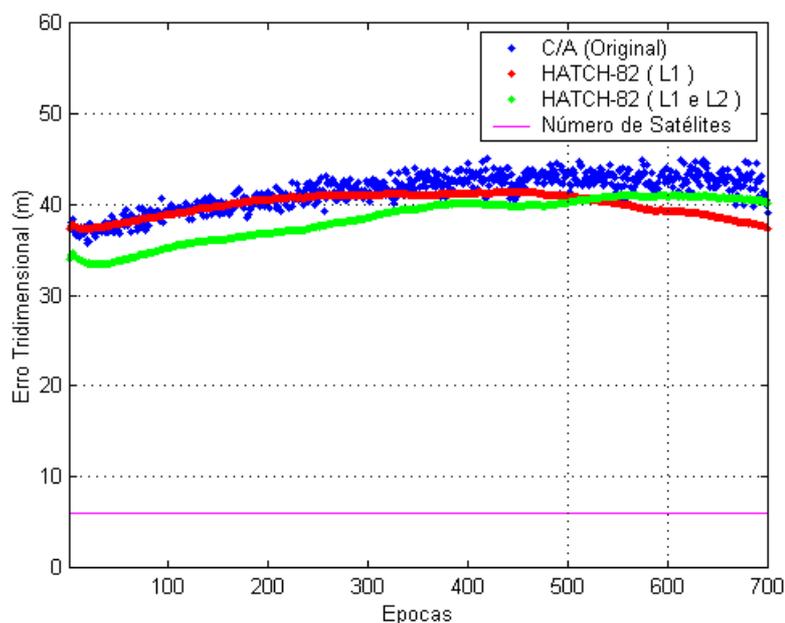
FIGURA 4.17 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS ( $L_1$  E  $L_2$ ), EFEMÉRIDES PRECISAS E MODELO PARA A TROPOSFERA PARA A ESTAÇÃO AGUD



NOTA: Estação AGUD, dia 288–2004, 8 satélites, taxa de gravação 15s.

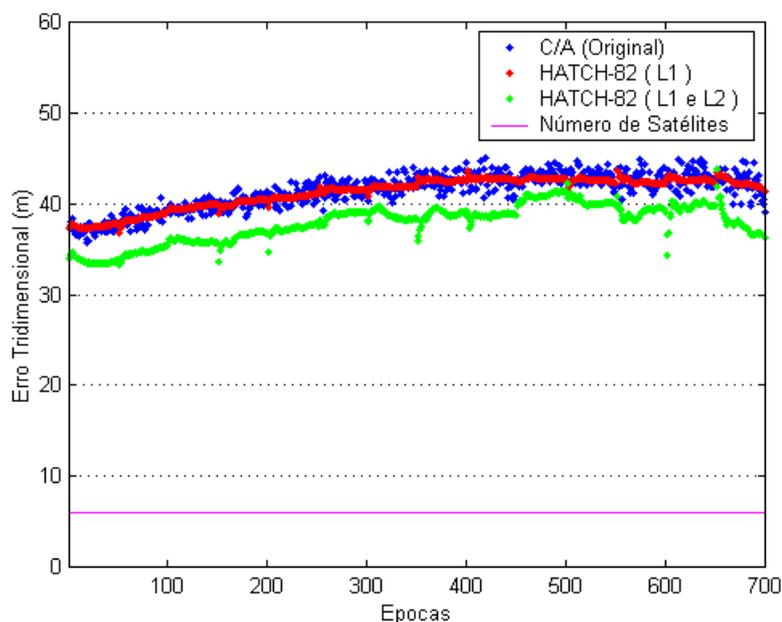
Um outro experimento realizado foi em relação ao tempo de suavização. A estação CANG foi empregada nessa análise, onde 700 observações de pseudodistância do código foram suavizadas sem que o filtro de HATCH-82 fosse reinicializado. Os arquivos gerados pelo programa SuavizaPD com as pseudodistâncias suavizadas foram processados pelo programa PAC, e o erro tridimensional é mostrado na figura 4.18, onde percebe-se que entre as épocas 500 e 600 o erro tridimensional começou a ser maior para as observações suavizadas com as duas portadoras. Então, realizou-se uma segunda suavização das pseudodistâncias, a partir das observações originais, porém reinicializando o filtro a cada 50 épocas. Os arquivos foram processados pelo PAC e o erro tridimensional pode ser visualizado na figura 4.19. Nessa figura observa-se que o erro tridimensional é menor quando se emprega a suavização com as duas portadoras, como era de se esperar. Esse experimento, apesar de exagerar no tempo de suavização (58 min e 20 s), mostra claramente que se não forem tomados cuidados com o tempo de suavização o filtro pode gerar pseudodistâncias “falsas”.

FIGURA 4.18 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS PARA 700 ÉPOCAS DE SUAVIZAÇÃO SEM REINICIALIZAÇÃO DO FILTRO



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 6 satélites (PRN 05, 06, 10, 17, 21 e 30) .

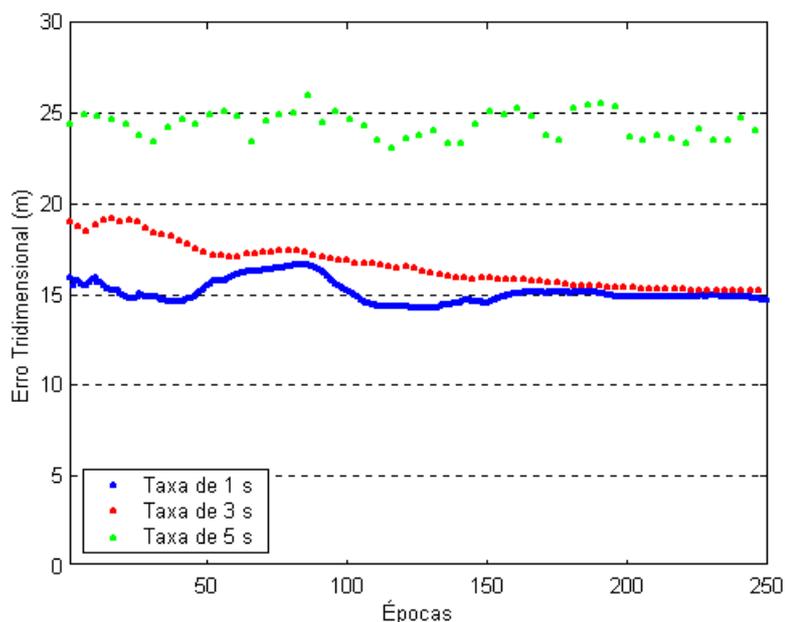
FIGURA 4.19 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS PARA 700 ÉPOCAS DE SUAVIZAÇÃO REINICIANDO O FILTRO A CADA 50 ÉPOCAS



NOTA: Estação CANG, dia 224–2004, 6 satélites (PRN 05, 06, 10, 17, 21 e 30) .

A próxima análise foi baseada na taxa de gravação dos dados. Foram empregados arquivos RINEX, da estação RM03, com observações coletadas com uma taxa de 1, 3 e 5 segundos. Essas observações foram suavizadas pelo filtro de HATCH-82 com as duas portadoras, e o filtro não foi reiniciado nenhuma vez, pois todos os arquivos continham exatos 4 minutos de 10 segundos de duração. Assim, o arquivo de observações a cada 1 segundo continha um total de 250 épocas de observações, o de 3 segundos 83 e o de 5 segundos continha 50 épocas de observações. A idéia neste experimento é verificar a acurácia no posicionamento absoluto quando se tem arquivos de mesma duração porém com um número diferente de observações coletadas. O processamento foi executado pelo programa PAC, nos três casos com 8 satélites, e os erros tridimensionais obtidos podem ser visualizados na figura 4.20. Esta figura mostra que os erros foram menores para o arquivo que continha as pseudodistância suavizadas com uma taxa de 1s, quando comparada com a de 5 s e quando comparada com a de 3 segundos também. Verifica-se com este experimento que a taxa com que os dados são coletados pode interferir na acurácia do posicionamento, sendo que taxas de 1 a 3 segundos forneceram os melhores resultados.

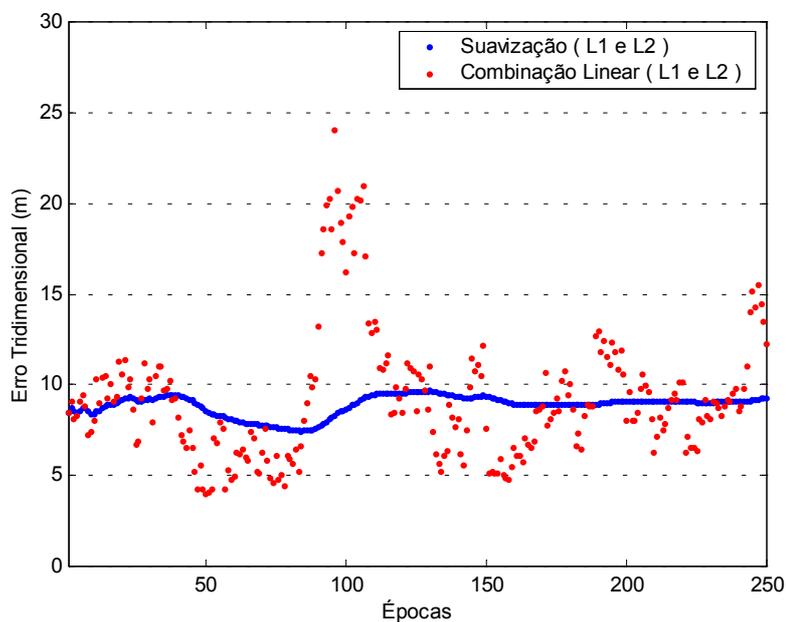
FIGURA 4.20 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS ( $L_1$  E  $L_2$ ) COM DIFERENTES TAXAS DE GRAVAÇÃO



NOTA: Estação RM03, dia 023–2005, 7 satélites, tempo de suavização de 4min e 10s.

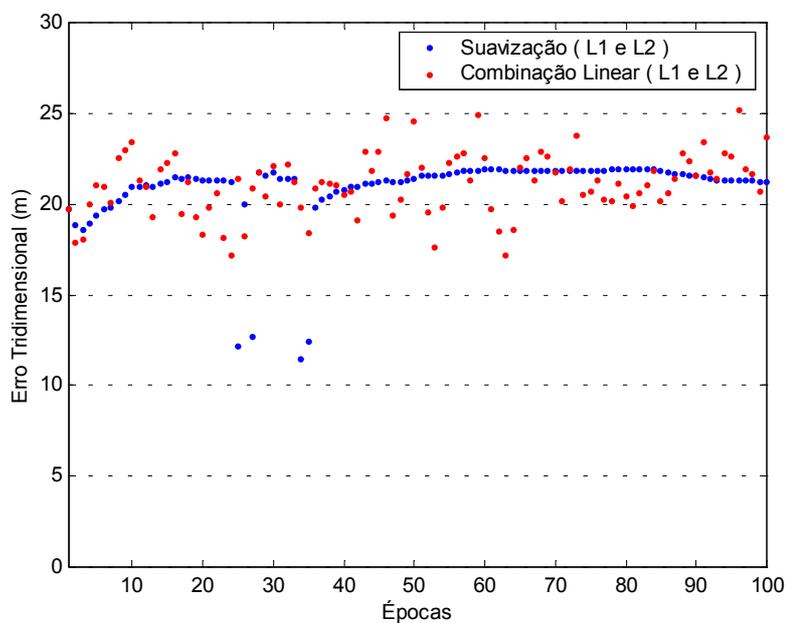
Com as observações da estação RM03 do dia 023–2005 realizou-se outro experimento com o posicionamento absoluto. O primeiro consistiu em suavizar as pseudodistância pelas duas portadoras, empregando um tempo de suavização de 250 segundos para uma taxa de coleta de 1s, ou seja, os mesmos dados utilizados para gerar a figura 4.20. O segundo experimento consistiu em processar uma observável resultante de uma combinação linear livre da ionosfera para o código (equação 2.20). Os arquivos RINEX de saída foram processados pelo programa PAC utilizando as efemérides transmitidas e sem correção troposférica. Os erros tridimensionais relativos as coordenadas precisas da estação são mostrados na figura 4.21. Observa-se que o erro obtido com as pseudodistâncias suavizadas estiveram entre 8 e 10 metros para o posicionamento com as pseudodistâncias suavizadas. Para o posicionamento com as pseudodistâncias resultantes da combinação linear o erro tridimensional variou entre 4 e 25 metros. A mesma metodologia foi aplicada para a estação AGUD, onde os erros tridimensionais obtidos são apresentados na figura 4.22. Para essa estação observa-se que estes erros tiveram uma amplitude menor se comparados aos erros da estação RM03.

FIGURA 4.21 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS ( $L_1$  E  $L_2$ ) E UMA COMBINAÇÃO LINEAR DA PSEUDODISTÂNCIA PARA A ESTAÇÃO RM03



NOTA: Estação RM03, dia 023–2005, 7 satélites, taxa de gravação 1s.

FIGURA 4.22 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS ( $L_1$  E  $L_2$ ) E UMA COMBINAÇÃO LINEAR DA PSEUDODISTÂNCIA PARA A ESTAÇÃO AGUD



NOTA: Estação AGUD, dia 288–2004, 8 satélites, taxa de gravação 15s.

Baseados nas figuras 4.21 e 4.22 pode-se afirmar que o posicionamento para a estação RM03 foi mais acurado se comparado a estação CANG. Pelo fato desta última estação ter sido rastreada com uma taxa de coleta de dados de 15 segundos e a estação RM03 de 1 segundo, explica-se o posicionamento mais acurado para aquela que empregou uma taxa de gravação menor, apesar que no processamento da estação RM03 foram utilizados 7 satélites, enquanto que para a estação AGUD foram 8 satélites.

#### 4.7 EFEITO DA SUAUIZAÇÃO EM UM POSICIONAMENTO RELATIVO

A análise da acurácia que pode ser obtida em um posicionamento relativo foi conduzida por meio de resultados obtidos pelo programa GISDataPRO. Foram escolhidas 4 estações distantes de 12 a 430 km da estação PARA, sendo que esta última foi a estação base empregada em todos os processamentos. A tabela 4.8 mostra algumas informações adicionais sobre estas estações.

TABELA 4.8 – LINHAS DE BASE PARA O PROCESSAMENTO RELATIVO

Estação Móvel	Estação Base	Data do Levantamento	Número de Satélites	Linha de Base (km)
CANG	PARA	224/2004	8	12,4
AGUD	PARA	288/2004	8	66,0
CEM1	PARA	291/2004	7	89,6
UEPP	PARA	356/2004	7	430,2

Os arquivos RINEX de observações de cada uma dessas estações foram processados pelo programa SuavizaPD, que geram arquivos com as pseudodistância suavizadas por uma e pelas duas portadoras. As pseudodistância foram suavizadas com um número de épocas igual a 50, para arquivos com taxa de gravação de 5 segundos (estação CANG), e 32 épocas para arquivos com taxa de 15 s (demais estações).

A tabela 4.9 mostra as diferenças das coordenadas obtidas nos processamentos e os erros planimétrico e tridimensional (no sistema de projeção UTM). As denominações utilizadas na coluna *Observável* serão descritas a seguir. C/A representa arquivos RINEX com as observações originais do código C/A, tanto para a estação base quanto para a móvel. HATCH-L1 representa arquivos RINEX,

da base e móvel, com pseudodistâncias suavizadas pela portadora  $L_1$  e da mesma forma HATCH-L12 para as duas portadoras. As coordenadas determinadas e a precisão com que elas foram determinadas podem ser visualizadas no apêndice 5.

Existem algumas considerações a respeito da tabela 4.9 que podem ser feitas. Observa-se que os erros planimétricos obtidos são inferiores ao metro para as observações de todas as estações, com exceção da estação UEPP, quando processada com as pseudodistâncias originais e suavizadas somente pela portadora  $L_1$ . Quando se empregou pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras o erro planimétrico para a estação UEPP foi inferior a 0,10 m. Para as estações CANG, AGUD e UEPP, as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras forneceram os menores erros planimétricos, enquanto que para a estação CEM1 apresentou os maiores erros.

Em relação aos erros tridimensionais, observa-se que a estação CANG apresentou para o processamento das pseudodistância suavizadas pelas duas portadoras os maiores erros tridimensionais. Como a linha de base nesse caso é curta, aproximadamente 12 km, a combinação linear realizada antes de suavizar as pseudodistâncias pode ser a causa desses erros terem sido maiores que os demais. Era de se esperar que para as estações AGUD e CEM1 os resultados fossem melhores quando se emprega a suavização das duas portadoras, pois os efeitos relativos à ionosfera deveriam ter sido reduzidos e por conseqüência melhorar a acurácia no posicionamento, assim como aconteceu com a estação UEPP, distante 430 km da estação base.

TABELA 4.9 – ACURÁCIA DAS COORDENADAS DETERMINADAS PELO PROGRAMA GISDataPRO

Estação	Observável	$\Delta N$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta h$ (m)	Erro	
					Planimétrico (m)	Tridimensional (m)
CANG	C/A	0,093	-0,056	0,923	0,109	0,929
	HATCH-L1	0,066	-0,103	0,111	0,123	0,165
	HATCH-L12	0,010	-0,092	-1,671	0,093	1,674
AGUD	C/A	0,657	0,251	0,253	0,703	0,747
	HATCH-L1	0,421	0,225	-0,147	0,478	0,500
	HATCH-L12	-0,007	0,185	-0,830	0,185	0,850
CEM1	C/A	-0,108	-0,005	0,721	0,108	0,729
	HATCH-L1	-0,067	-0,327	0,180	0,334	0,379
	HATCH-L12	-0,061	-0,533	0,547	0,537	0,766
UEPP	C/A	-1,291	0,859	0,715	1,551	1,708
	HATCH-L1	-0,880	0,593	0,318	1,061	1,108
	HATCH-L12	-0,053	0,058	-0,601	0,079	0,606

Os resultados contidos da tabela 4.9 podem ser visualizados na forma de gráficos a partir das figuras 4.23 e 4.24, que mostram os erros planimétricos e tridimensionais, respectivamente.

FIGURA 4.23 – ERRO PLANIMÉTRICO DO POSICIONAMENTO RELATIVO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS E UMA COMBINAÇÃO LINEAR PARA A PSEUDODISTÂNCIA

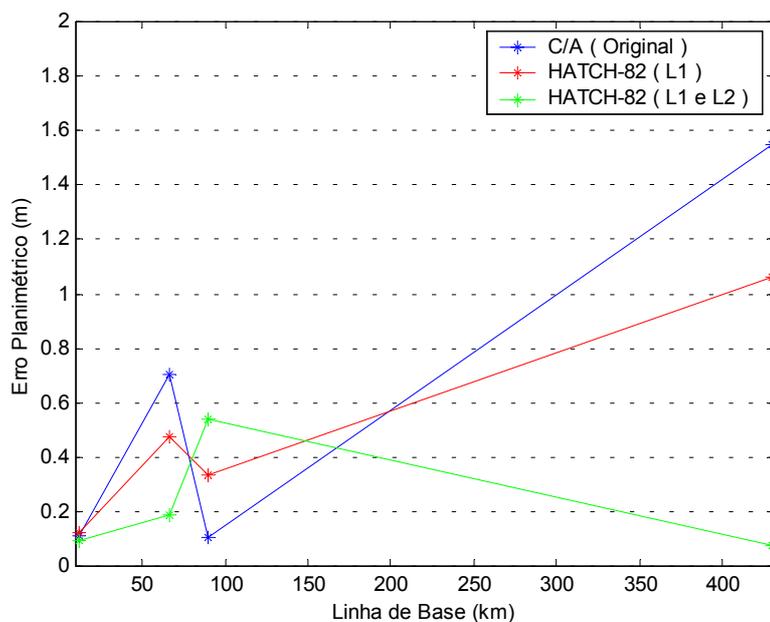
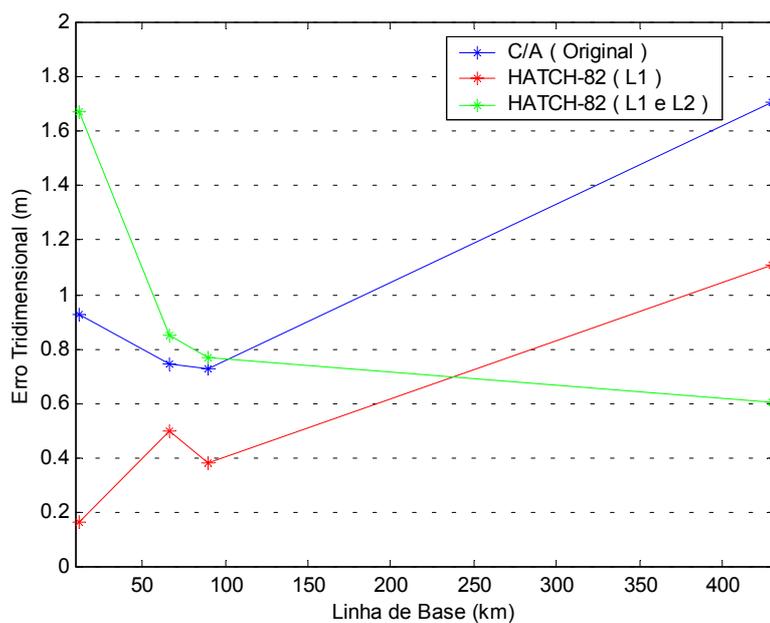


FIGURA 4.24 – ERRO TRIDIMENSIONAL DO POSICIONAMENTO RELATIVO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIAS ORIGINAIS E SUAVIZADAS E UMA COMBINAÇÃO LINEAR PARA A PSEUDODISTÂNCIA



Os gráficos das figuras 4.23 e 4.24 de forma alguma são conclusivos, devido a diversos fatores, como: o número de linhas de base processadas foi muito pequeno, somente 4, e para uma análise confiável várias ocupações seriam necessárias; a taxa de gravação dos dados é um dos fatores mais importantes no processo de suavização, e como as observações da estação PARA foram coletadas a cada 15 segundos, a suavização foi realizada sobre apenas 32 observações.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### CONCLUSÕES

Alguns receptores GPS são capazes de suavizar a pseudodistância do código pela fase da onda portadora durante a própria coleta dos dados. Verificou-se na seção 4.3 que os receptores Ashtech Z-12 realizam essa tarefa. Constatou-se nos experimentos realizados que as correções de suavização geradas para observações coletadas no período em que a técnica SA estava ativa apresentaram valores inferiores a  $\pm 1,55$  metro (figura 4.1), enquanto que para os dados coletados sem o efeito da SA forneceram correções inferiores a  $\pm 1,00$  m (figura 4.2). Uma terceira figura foi gerada (figura 4.3) com observações sem o efeito da SA e as correções de suavização estiveram no intervalo de  $\pm 3,20$  metros. Esperava-se que as correções de suavização fossem menores quando a SA estivesse desligada, porém constatou-se através da análise da figura 4.3 que apesar da SA influenciar na pseudodistância suavizada, não significa que as correções serão maiores com a SA ativa. Nesta seção também foram feitas comparações entre as correções de suavização calculadas pelo receptor e pelo programa SuavizaPD. Demonstra-se, por meio da figura 4.4, que as correções de suavização calculadas pelo filtro de HATCH-82 estiveram mais próximas das correções de suavização calculadas pelo receptor do que as correções geradas pelo filtro de LACHAPELLE-86.

Na seção 4.4 foram realizados experimentos com a suavização da pseudodistância empregando somente a portadora  $L_1$  e o código C/A. As correções de suavização para dois satélites (PRN 05 e PRN 09) calculadas com observações obtidas na estação RM03 foram mostradas nas figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. As correções de suavização calculadas para o ano de 1999 variaram de +0,80 a -1,90 m para o satélite PRN 05 e de +0,60 a -0,90 m para o satélite PRN 09. As correções calculadas para o ano de 2004, por sua vez, estiveram no intervalo de +0,10 e -0,20 m (PRN 05) e para o satélite PRN 09 entre +0,10 e -0,15 metro. Nota-se que as correções de 1999 apresentam uma amplitude maior se comparadas com as de 2004. Analisando os dados deste experimento, conclui-se que a SA efetivamente influencia o processo de suavização, haja vista que as pseudodistâncias são influenciadas. Porém notou-se também que existe uma

relação entre a elevação dos satélites e as correções de suavização. Observando as correções dos satélites PRN 05 (figuras 4.7) e PRN 21 (figura 4.8), constatou-se que as correções são maiores quando a elevação do satélite é baixa, e menores quando a elevação é alta. A explicação está nos efeitos aos quais os sinais oriundos de satélites mais baixos estão sujeitos (troposfera, multicaminho) que afetam as pseudodistâncias medidas.

Os mesmos experimentos realizados na seção 4.4 foram realizados na seção 4.5, porém empregando as duas frequências no processo de suavização. De forma geral verificou-se o mesmo comportamento para as correções de suavização calculadas somente para  $L_1$ , todavia, a magnitude das correções são relativamente maiores. Em média, 80,9% das correções calculadas com as duas frequências foram inferiores a 0,50 m e 95,3% foram menores a 1 m, segundo os experimentos realizados (tabela 4.4). As correções obtidas somente com uma portadora foram em média 93,3% inferiores a 0,50 m e 99,5% das correções foram inferiores a 1 metro (tabela 4.3).

Na seção 4.6 foram realizados experimentos por meio de posicionamento absoluto. Para efeito de comparação, empregou-se as observações de código originais, isto é, as não suavizadas; e as suavizadas pela portadora  $L_1$  e pelas duas portadoras. Observando as figuras 4.14 e 4.15 juntamente com a tabela 4.5 verifica-se que o posicionamento absoluto para observações sob o efeito da SA estão de acordo com o citado pela literatura, onde o erro pode ser superior aos 100 metros. Sem a SA constata-se que os erros tridimensionais alcançaram valores inferiores a 7 metros para o posicionamento empregando as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras (tabela 4.5). Para o posicionamento com o código C/A e com o código suavizado pela portadora  $L_1$  o erro tridimensional foi de aproximadamente 12 metros (tabela 4.5). A suavização da pseudodistância pode melhorar a acurácia em vários metros quando se emprega as duas frequências, porém quando se emprega apenas a  $L_1$  a acurácia é praticamente a mesma da observável original. Aplicando-se efemérides precisas e um modelo para a troposfera (por exemplo: Hopfield) verificou-se uma melhora na acurácia do posicionamento que pode ser examinado observando-se as figuras 4.16 e 4.17. A estação AGUD (figura 4.17) foi a que apresentou os melhores resultados, onde o erro tridimensional esteve entre 4 e 6 metros, quando empregado o código suavizado pelas duas portadoras. Da mesma

forma para a estação CANG, a observável resultante desse processo apresentou os menores erros, variando entre 2 e 6 metros. Novamente observa-se uma dispersão dos erros empregando o código C/A quando comparado com os erros, os quais foram obtidos pelas pseudodistâncias suavizadas por somente uma portadora. Examinando as tabelas 4.5 e 4.7, comprova-se que os erros tridimensionais para a estação CANG foram inferiores quando se aplica um ajustamento capaz de gerar apenas uma solução levando em consideração todas as épocas (ajustamento recursivo).

Foram realizados mais três experimentos na seção 4.6. O primeiro foi em relação ao tempo de suavização. Apesar do tempo de suavização (58 min e 20 s) ser significativamente maior que o recomendado (poucos minutos), observa-se que problemas podem ocorrer na suavização se não forem empregados tempos curtos, de alguns poucos minutos, devido principalmente ao efeito oposto da ionosférica sobre o código e a fase (figura 4.18). Outro experimento realizado foi em relação à taxa de gravação dos dados. Nele, verifica-se que a suavização empregando maior número de observações (devido a taxa de gravação dos dados maior) pode apresentar um posicionamento mais acurado (figura 4.20), porém outros fatores também devem ser levados em consideração, como o número de satélites, saltos de ciclo, entre outros, que podem degradar o posicionamento. O último experimento da seção 4.6 foi a comparação do posicionamento que empregada as pseudodistâncias resultantes de uma combinação linear livre da ionosfera para o código (equação 2.20) com o da suavização pelas duas ondas portadoras. Na figura 4.21 verifica-se que os erros resultantes da combinação livre da ionosfera para o código apresentaram uma variação de aproximadamente 20 metros, enquanto que os erros resultantes da suavização variaram 2 metros. O mesmo experimento, agora considerando a estação CANG, mostrou novamente uma dispersão maior para os erros obtidos da combinação livre da ionosfera se comparados aos erros calculados com as observações suavizadas.

Apesar da maior parte do estudo ter sido efetuado sobre o posicionamento absoluto, na prática o posicionamento relativo é mais importante (seção 4.7). Como visto nas figuras 23 e 24, é possível obter, mesmo sem a suavização da pseudodistância uma acurácia planimétrica melhor que o metro, como aconteceu para as estações CANG, AGUD e CEM1. A estação UEPP, distante cerca de 430

km da estação PARA apresentou erros planimétricos inferiores a 10 cm quando foram empregadas as pseudodistâncias suavizadas pelas duas portadoras. Os resultados dos experimentos realizados com o posicionamento relativo não expressam a situação de forma geral, mas pelo contrário, apresentam somente uma situação pontual. As diferenças nos resultados de um caso para o outro podem ser significativas pois dependem de diversos parâmetros, como taxa de gravação dos dados e tempo de ocupação, comprimento da linha de base, modelamento de erros provenientes da atmosfera, entre outros. Os resultados apresentados no posicionamento absoluto ou relativo de maneira geral não são os melhores resultados que podem ser obtidos, pois muitos erros podem ser modelados ou corrigidos.

## **RECOMENDAÇÕES**

As seguintes recomendações são apresentadas:

- 1) Em qualquer levantamento GPS deve-se tomar os devidos cuidados tanto no levantamento de campo, quanto no processamento dos dados. Para a suavização da pseudodistância não poderia ser diferente, e dessa forma apresenta-se na seqüência as principais precauções que devem ser tomadas:
  - a) o tempo de suavização é um fator importante devido aos efeitos contrários que sofrem as observações de fase e do código. Portanto o tempo de suavização não deve exceder alguns poucos minutos, não sendo superior a 5 minutos;
  - b) a taxa de gravação dos dados deve ser coerente com o tempo de suavização, de tal forma que se tenham observações suficientes para o processo de suavização. De acordo com os experimentos, 50 observações parecem ser suficientes;
  - c) procurar realizar observações em locais livres de obstruções devido principalmente ao efeito do multicaminho que atua de forma mais intensa nas observações do código do que na de fase da portadora. Como foi comentado anteriormente, o efeito multicaminho também pode causar perdas de ciclo, as quais degradam o posicionamento; e

- d) no processamento dos dados, ou mesmo na coleta, recomenda-se rastrear satélites com elevação acima de 15 graus. Agindo assim, não só o efeito troposférico é atenuado, como provavelmente os sinais transmitidos pelos satélites estarão menos sujeitos a obstruções.
- 2) No posicionamento relativo realizar a ocupação de outras estações teste, com o objetivo de obter-se mais confiabilidade nos resultados.
  - 3) Utilizar no processamento das linhas de base uma estação base que apresente uma taxa de gravação de dados menor (por exemplo: de 1 a 5 segundos).
  - 4) Empregar efemérides precisas e utilizar modelos para a troposfera e ionosfera, visando obter melhores resultados.
  - 5) Realizar maiores estudos empregando menores taxas de gravação (por exemplo: 1 a 5 segundos), de tal forma a gerarem arquivos com um número de observações variável.
  - 6) Investigar as influências da ionosfera e do multicaminho no posicionamento que emprega pseudodistâncias suavizadas.
  - 7) Aplicar testes estatísticos com o objetivo de verificar o efeito que a suavização causa no posicionamento.
  - 8) Como recomendação final, não empregar a suavização visando posicionamento preciso, pois esse posicionamento exige processamento empregando a fase da onda portadora. JONG (2002, p. 6) afirma que observações do código são usadas em aplicações que requerem precisão da ordem do metro, e naquelas que exigem precisão ao nível do centímetro, as observações de fase devem ser usadas. Pode-se afirmar ainda que para aplicações que requerem um nível de precisão intermediário, a suavização da pseudodistância pode ser empregada com resultados satisfatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. de. **NAVSTAR-GPS**. Curitiba, 1988. Apostila - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), Universidade Federal do Paraná (UFPR).

ASHTECH **Z-12 GPS receiver operating manual**. Document Number 600224, revision B. Publication date 1994.

BRICEÑO, J. E. G. **Avaliação do posicionamento estático rápido para distâncias médias**. Curitiba, 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

DAH-JING, J.; TAI-SHEN, L; YING-WEI, T. **ARMA neural networks for predicting DGPS pseudorange correction**. The Journal of Navigation (2004),57 ,275 –286.f The Royal Institute of Navigation, DOI:10.1017/S0373463304002656 Printed in the United Kingdom.

DIVIS, D. A. **SA: Going the way of the dinosaur**. GPS World. Washington, v.11, n.6, p.16-19, jun.2000.

FERREIRA, L. D. D. **Dinâmica orbital**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 1998.

GARNÉS, S. J. dos A.; FERREIRA, L. D. D. **Cálculo da posição dos satélites GPS com dados no formato RINEX**. VII CONEA – Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura. Criciúma, 18 a 21 de abril de 1999.

GARNÉS, S. J. dos A. **Resolução das ambigüidades GPS para linhas de base curta: análise dos algoritmos de otimização**. Curitiba, 2001. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

GURTNER, W. **RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.1**. Astronomical Institute, University of Berne. June 8, 2001.

HATCH, R. **Synergism of GPS code and carrier measurements**. Proceedings of The Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, New Mexico State university, Las Cruces, New Mexico, Feb., 1982, pp.1213-1232.

HATCH R.; LARSON, K. **MAGNET-4100 GPS survey program processing techniques and test results**. In: Proceedings of the First International Symposium on Precise positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, April 15-19, vol 1: 285-297, 1985.

HATCH R. **Dynamic differential GPS at the centimeter level**. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol 2: 1287-1298, 1986.

HILLA, S. **The extended standard product 3 orbit format (SP3-c)**. National Geodetic Survey, National Ocean Service, NOAA, 5 September 2002. Disponível em: <<http://www.iapg.bv.tum.de/cstg/sp3c.txt>> Acesso em 22 de março de 2004.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global positioning system: theory and practice**. Springer-Verlag/Wien, Fourth revised edition, 1994.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global positioning system: theory and practice**. Springer-Verlag/Wien, Fifth revised edition, 2001.

HOOIJBERG, M. **Practical geodesy using computers**. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1997.

HUGENTOBLER, U.; SCHAER, S.; FRIDEZ, P. **Bernese GPS software version 4.2**. Astronomical Institute University of Berne, February, 2001.

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 1ª Edição. Aplicada à Lei 10.267, de 28 de agosto de 2001 e do Decreto 4.449, de 30 de outubro de 2002. Gabinete da Presidência do INCRA. Divisão de Ordenamento Territorial – SDTT. Gerência de Cartografia, Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Novembro 2003

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso 21 dez 2005.

IGS Product. Disponível em: <[http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html)>. Acesso em 20 jan 2005.

JONG, K. de. **Future GPS and Galileo signals – Unprecedented accuracy and availability**. Geoinformatics, September, 2002.

KIM, D.; LANGLEY, R. B. **The multipath divergence problem in GPS carrier-smoothed code pseudorange**. Proceedings of 47th Annual Conference of the Canadian Aeronautics and Space Institute, Ottawa, Ont., 30 April to 3 May, Canadian Aeronautics and Space Institute, Ottawa, Ont., pp. 161-163, 2000.

KRUEGER, C. P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas UFPR, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutora, Curitiba, 1996.

LACHAPPELLE G.; HAGGLUND J.; FALKENBERG, W.; BELLEMARE P.; CASEY, M.; EATON, M. **GPS land kinematic positioning experiments**. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol 2: 1327-1344, 1986.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

MEYERHOFF, S. L.; EVANS, A.G. **Demonstration of the combined use of GPS pseudorange and Doppler measurements for improved dynamic positioning**. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol 2: 1397-1409, 1986

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

NADAL, C. A.; HATSCHBACH, F. **Introdução aos sistemas de medição do Tempo**. Curitiba, 1997. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

PRADO, A. do. **Análise da acurácia e da correlação espacial nas técnicas DGPS e RTK**. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

PROJETO SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). Disponível em :  
<<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/principal.htm>> Acesso 7 jan 2005.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 1993.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SPOFFORD, P. R.; REMONDI, B. W. **The national geodetic survey standard GPS format SP3**. 22-Dec-1999. Disponível em:  
<[http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/sp3\\_docu.txt](http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/sp3_docu.txt)> Acesso 22 mar. 2004.

TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for geodesy**. Deft, 2<sup>a</sup> ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.

TRIMBLE **Series 4000 Receiver reference** revision A, February 1995.

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

**APÊNDICES E ANEXOS**

APÊNDICE 1 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA SuavizaPD.....	79
APÊNDICE 2 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO RINEX DE OBSERVAÇÃO GERADO PELO PROGRAMA SuavizaPD.....	80
APÊNDICE 3 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA PAC.....	81
APÊNDICE 4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO PROGRAMA PAC E O GISDataPRO.....	82
APÊNDICE 5 – PROCESSAMENTO DAS LINHAS DE BASE.....	83
APÊNDICE 6 – RESULTADOS PARA A ESTAÇÃO FERG.....	84
APÊNDICE 7 – GRÁFICOS POLARES.....	89
ANEXO 1 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO ASCII GERADO PELO PRISM.....	92

## APÊNDICE 1 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA SuavizaPD

Idx	Rcv Time	PRN	fiWL	PDc	PDcSM	PDSM	corrSM
000	392400.000	6	78950.0300	24189102.2604	24189102.2604	20849032.3255	0.0000
001	392405.000	6	80294.9180	24190446.9487	24190447.0486	20850191.4232	-0.0861
002	392410.000	6	81634.0840	24191786.0222	24191786.1504	20851345.6197	-0.1105
003	392415.000	6	82967.7540	24193119.7975	24193119.8147	20852495.1295	-0.0148
004	392420.000	6	84296.0570	24194448.0133	24194448.0968	20853640.0003	-0.0720
005	392425.000	6	85619.2430	24195771.5362	24195771.3251	20854780.5150	0.1820
006	392430.000	6	86937.3390	24197088.8209	24197089.3353	20855916.5323	-0.4434
007	392435.000	6	88250.7420	24198401.8926	24198402.6326	20857048.4874	-0.6378
008	392440.000	6	89559.6890	24199710.9407	24199711.5086	20858176.6318	-0.4895
009	392445.000	6	90864.2800	24201016.4299	24201016.1326	20859301.1112	0.2562
010	392450.000	6	92164.8490	24202316.7113	24202316.7025	20860422.0963	0.0076
011	392455.000	6	93461.6300	24203614.9153	24203613.6028	20861539.9186	1.1312
012	392460.000	6	94754.7650	24204907.7409	24204906.8150	20862654.5619	0.7981
013	392465.000	6	96044.7540	24206197.0934	24206196.8247	20863766.4450	0.2316
014	392470.000	6	97331.4810	24207483.9269	24207483.5767	20864875.5202	0.3018
015	392475.000	6	98615.5230	24208768.7071	24208767.6867	20865982.3183	0.8795
016	392480.000	6	99896.9660	24210050.3309	24210049.2004	20867086.8785	0.9745
017	392485.000	6	101176.2470	24211329.2095	24211328.5218	20868189.5492	0.5928
018	392490.000	6	102453.5010	24212606.7367	24212605.8264	20869290.4815	0.7846
019	392495.000	6	103728.9180	24213882.1109	24213881.2868	20870389.8243	0.7104
020	392500.000	6	105002.5800	24215155.6895	24215154.9840	20871487.6474	0.6081
021	392505.000	6	106274.6810	24216428.0027	24216427.1268	20872584.1306	0.7550
022	392510.000	6	107545.3680	24217698.2582	24217697.8331	20873679.3758	0.3664
023	392515.000	6	108814.6990	24218968.0668	24218967.2017	20874773.4679	0.7457
024	392520.000	6	110082.9810	24220235.4783	24220235.4835	20875866.6233	-0.0044
025	392525.000	6	111350.1900	24221502.2604	24221502.6759	20876958.8398	-0.3581
026	392530.000	6	112616.0810	24222768.9054	24222768.5794	20878049.9453	0.2810
027	392535.000	6	113880.9330	24224033.7112	24224033.4414	20879140.1532	0.2326
028	392540.000	6	115144.9820	24225298.2879	24225297.5179	20880229.6839	0.6637
029	392545.000	6	116408.1410	24226561.6887	24226560.7106	20881318.4530	0.8430
030	392550.000	6	117670.1260	24227824.2411	24227822.7455	20882406.2241	1.2891
031	392555.000	6	118930.9500	24229085.1778	24229083.6197	20883492.9948	1.3430
032	392560.000	6	120190.3540	24230343.6244	24230343.0419	20884578.5140	0.5020
033	392565.000	6	121448.2380	24231601.6699	24231600.9478	20885662.7262	0.6224
034	392570.000	6	122704.6590	24232857.4945	24232857.3724	20886745.6617	0.1052
035	392575.000	6	123959.4830	24234112.3895	24234112.2018	20887827.2222	0.1618
036	392580.000	6	125212.7210	24235365.6594	24235365.4457	20888907.4162	0.1842
037	392585.000	6	126464.2660	24236617.0089	24236616.9912	20889986.1463	0.0152
038	392590.000	6	127713.7800	24237866.0873	24237866.4945	20891063.1161	-0.3509
039	392595.000	6	128961.3300	24239113.8833	24239114.0404	20892138.3990	-0.1354
040	392600.000	6	130206.6790	24240358.8629	24240359.3766	20893211.7771	-0.4428
041	392605.000	6	131449.8910	24241601.9134	24241602.5725	20894283.3106	-0.5681
042	392610.000	6	132690.7580	24242842.9094	24242843.4272	20895352.8260	-0.4463
043	392615.000	6	133929.1100	24244082.2711	24244081.7904	20896420.1940	0.4144
044	392620.000	6	135164.9200	24245317.8293	24245317.6055	20897485.3658	0.1929
045	392625.000	6	136398.1250	24246551.0897	24246550.8165	20898548.2931	0.2354
046	392630.000	6	137628.5070	24247781.6501	24247781.2081	20899608.7903	0.3809
047	392635.000	6	138856.0630	24249009.2176	24249008.7736	20900666.8515	0.3827
048	392640.000	6	140080.5390	24250233.4115	24250233.2529	20901722.2528	0.1367
049	392645.000	6	141301.8710	24251455.0204	24251454.5936	20902774.9488	0.3679

FILTRO REINICIALIZADO - TEMPO DE SUAVIZAÇÃO

NOTA: estação FERG, dia 274-2004, PRN 06, suavização para as duas portadoras.

Onde: idx índice usado pelo programa;  
Rcv Time tempo GPS de observação;  
PRN PRN do satélite;  
fiWL combinação linear das observações de fase;  
PDc combinação linear das pseudodistâncias do código;  
PDcSM pseudodistância suavizada em ciclos;  
PDSM pseudodistância suavizada em metros;  
corrSM correção de suavização da pseudodistância.

## APÊNDICE 2 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO RINEX DE OBSERVAÇÃO GERADO PELO PROGRAMA SuavizaPD

2.10	OBSERVATION DATA	G (GPS)	RINEX VERSION / TYPE
SuavizaPD	UFPR	25/01/05	PGM / RUN BY / DATE
C1 - Suavizado			COMMENT
FERG			MARKER NAME
Fazenda Experimental			MARKER NAME
MAU	UFPR		OBSERVER / AGENCY
0	UNKNOWN	Nav 7.19 Sig 3.04	REC # / TYPE / VERS
0	UNKNOWN		ANT # / TYPE
3704008.4589	-4376703.8725	-2786257.4389	APPROX POSITION XYZ
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 0			WAVELENGTH FACT L1/2
3 L1 C1 D1			# / TYPES OF OBSERV
5.0000			INTERVAL
0			LEAP SECONDS
2004 9 30 12 59	10.0000000		TIME OF FIRST OBS
2004 9 30 18 27	35.0000000		TIME OF LAST OBS
			END OF HEADER
04 9 30 13 0	0.0000000 0	9G05G06G10G15G17G18G21G25G30	0.000000000
1011544.799 0	22817259.961	-4735.250	
282815.294 0	20849032.326	-1220.859	
773186.435 0	23367488.930	-3609.578	
-181083.705 0	23657851.389	1037.719	
1072025.343 0	24609315.464	-4988.391	
-368190.219 0	22735644.118	1907.484	
226843.282 0	20705302.531	-979.781	
448928.784 0	24063909.562	-2504.609	
551301.404 0	20660925.774	-3106.891	
04 9 30 13 0	5.0000000 0	9G05G06G10G15G17G18G21G25G30	0.000000000
1035209.578 0	22821763.270	-4730.547	
288906.834 0	20850191.423	-1215.688	
791225.278 0	23370921.582	-3605.859	
-186283.694 0	23656859.744	1042.328	
1096951.368 0	24614059.643	-4981.875	
-377740.065 0	22733826.762	1912.563	
231732.770 0	20706232.626	-975.922	
461442.052 0	24066290.668	-2500.547	
566827.666 0	20663880.186	-3103.516	

NOTA: estação FERG, dia 274-2004.

Obs.: no arquivo RINEX de observação gerado pelo programa SuavizaPD, aparecem em vez das pseudodistâncias originais as pseudodistâncias suavizadas pela fase da onda portadora.

### APÊNDICE 3 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA PAC

Rcv	Time	SV	X (m)	Y (m)	Z (m)	dtr (s)	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	2D (m)	3D (m)
495160.0000	7	3763745.9193	-4365138.4034	-2724426.8144	0.0004896524	14.733	-15.238	-10.053	21.196	23.459	
495165.0000	7	3763745.8964	-4365138.3943	-2724426.8129	0.0004875981	14.710	-15.229	-10.051	21.173	23.438	
495170.0000	7	3763745.8960	-4365138.4151	-2724426.8487	0.0004855453	14.710	-15.249	-10.087	21.188	23.466	
495175.0000	7	3763745.8792	-4365138.4487	-2724426.8938	0.0004834943	14.693	-15.283	-10.132	21.200	23.497	
495180.0000	7	3763745.8566	-4365138.4811	-2724426.9444	0.0004814449	14.671	-15.315	-10.183	21.208	23.526	
495185.0000	7	3763745.8360	-4365138.5054	-2724426.9930	0.0004793971	14.650	-15.340	-10.231	21.212	23.550	
495190.0000	7	3763745.8226	-4365138.4978	-2724427.0251	0.0004773505	14.637	-15.332	-10.263	21.197	23.551	
495195.0000	7	3763745.8298	-4365138.5061	-2724427.0552	0.0004753053	14.644	-15.340	-10.294	21.208	23.574	
495200.0000	7	3763745.8279	-4365138.4607	-2724427.0743	0.0004732608	14.642	-15.295	-10.313	21.174	23.552	
495205.0000	7	3763745.8211	-4365138.3979	-2724427.0738	0.0004712172	14.635	-15.232	-10.312	21.124	23.506	
495210.0000	7	3763745.8020	-4365138.3223	-2724427.0585	0.0004691749	14.616	-15.157	-10.297	21.056	23.439	
495215.0000	7	3763745.7715	-4365138.2620	-2724427.0265	0.0004671346	14.585	-15.096	-10.265	20.991	23.367	
495220.0000	7	3763745.7323	-4365138.2077	-2724426.9993	0.0004650955	14.546	-15.042	-10.238	20.925	23.295	
495225.0000	7	3763745.7173	-4365138.1946	-2724426.9896	0.0004630586	14.531	-15.029	-10.228	20.905	23.273	
495230.0000	7	3763745.6935	-4365138.1828	-2724426.9822	0.0004610219	14.508	-15.017	-10.221	20.880	23.247	
495235.0000	7	3763745.6879	-4365138.2002	-2724426.9993	0.0004589830	14.502	-15.034	-10.238	20.889	23.263	
495240.0000	7	3763745.6934	-4365138.2590	-2724427.0239	0.0004569468	14.507	-15.093	-10.262	20.935	23.315	
495245.0000	7	3763745.7032	-4365138.3052	-2724427.0569	0.0004549126	14.517	-15.139	-10.295	20.975	23.365	
495250.0000	7	3763745.6895	-4365138.3020	-2724427.0398	0.0004528797	14.504	-15.136	-10.278	20.963	23.347	
495255.0000	7	3763745.6901	-4365138.2888	-2724427.0306	0.0004508483	14.504	-15.123	-10.269	20.954	23.335	
495260.0000	7	3763745.6736	-4365138.2486	-2724426.9900	0.0004488182	14.488	-15.083	-10.228	20.914	23.281	
495265.0000	7	3763745.6737	-4365138.2224	-2724426.9697	0.0004467898	14.488	-15.057	-10.208	20.895	23.255	
495270.0000	7	3763745.6876	-4365138.2222	-2724426.9694	0.0004447633	14.502	-15.056	-10.208	20.904	23.264	

NOTA: estação RM03, dia 149-2004.

Onde: Rcv Time      tempo GPS de observação;  
 SV                    número de satélites presentes no processamento;  
 X, Y, Z              coordenadas cartesianas X, Y e Z determinadas no ajustamento, em metros;  
 dtr                    erro do relógio do receptor determinado no ajustamento, em segundos;  
 DX, DY, DZ        diferença entre as coordenadas determinadas no ajustamento e as precisas, em metros;  
 2D                    erro planimétrico, em metros;  
 3D                    erro tridimensional, em metros;

APÊNDICE 4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO PROGRAMA PAC E O GISDataPRO

Estação		X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma X$ (m)	$\sigma Y$ (m)	$\sigma Z$ (m)	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	E. Plan.	E. Trid.
CANG (8 sat)	Precisas	3773597.889	-4360206.898	-2718625.198								
	PAC	3773602.918	-4360220.099	-2718633.325	6.586	8.570	3.644	-5.029	13.201	8.127	14.127	16.297
	GIS	3773603.149	-4360220.331	-2718633.513	5.091	6.625	2.817	-5.260	13.433	8.315	14.426	16.651
	PAC-GIS						0.827	0.231	-0.232	-0.188	-0.300	-0.354
FERG (9 sat)	Precisas	3704006.642	-4376702.391	-2786255.349								
	PAC	3704027.896	-4376722.549	-2786264.008	5.437	6.032	5.200	-21.255	20.158	8.658	29.293	30.546
	GIS	3704027.888	-4376721.981	-2786264.022	4.263	4.729	4.077	-21.246	19.591	8.673	28.900	30.173
	PAC-GIS							-0.008	0.567	-0.015	0.393	0.373
RM03 (9 sat)	Precisas	3763730.302	-4365122.140	-2724416.117								
	PAC	3763745.935	-4365138.428	-2724426.876	1.402	2.668	1.715	-15.633	16.288	10.759	22.576	25.009
	GIS	3763745.497	-4365137.75	-2724426.723	0.961	1.829	1.176	-15.196	15.610	10.606	21.785	24.229
	PAC-GIS							-0.438	0.678	0.153	0.791	0.779

NOTA: processamento de apenas uma época com o código C/A e efemérides transmitidas.

Estação		X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma X$ (m)	$\sigma Y$ (m)	$\sigma Z$ (m)	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	E. Plan.	E. Trid.
CANG	Precisas	3773597.889	-4360206.898	-2718625.198								
	PAC	3773596.397	-4360213.831	-2718627.682	5.644	7.344	3.122	1.492	6.933	2.484	7.091	7.514
	GIS	3773597.798	-4360215.169	-2718628.903	4.402	5.728	2.435	0.090	8.271	3.704	8.271	9.063
	PAC-GIS							1.401	-1.338	-1.220	-1.180	-1.549
FERG	Precisas	3704006.642	-4376702.391	-2786255.349								
	PAC	3704021.379	-4376715.332	-2786260.576	4.753	5.274	4.546	-14.738	12.941	5.227	19.613	20.298
	GIS	3704022.365	-4376715.839	-2786261.136	3.804	4.221	3.639	-15.723	13.448	5.786	20.690	21.484
	PAC-GIS							0.985	-0.508	-0.559	-1.077	-1.186
RM03	Precisas	3763730.302	-4365122.140	-2724416.117								
	PAC	3763739.378	-4365133.046	-2724422.673	1.481	2.819	1.812	-9.076	10.906	6.556	14.189	15.630
	GIS	3763740.057	-4365133.272	-2724423.268	1.307	2.488	1.600	-9.756	11.133	7.151	14.802	16.439
	PAC-GIS							0.679	-0.227	-0.595	-0.614	-0.809

NOTA: processamento de apenas uma época com o código C/A, efemérides transmitidas e modelo de troposfera Hopfield.

## APÊNDICE 5 – PROCESSAMENTO DAS LINHAS DE BASE

As tabelas do apêndice 5 mostram as coordenadas precisas e as processadas com o programa GISDataPRO no modo relativo, bem como os desvios-padrão das coordenadas e os erros nas componentes X, Y e Z e os erros planimétricos e tridimensionais. As coordenadas estão no sistema cartesiano (WGS-84).

CANG	X	Y	Z	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	Erro Plan	Erro Trid
Precisas	3773597.889	-4360206.898	-2718625.198								
C/A-C/A	3773597.361	-4360206.200	-2718624.886	0.055	0.069	0.037	0.528	-0.698	-0.312	0.875	0.929
L1-L1	3773597.884	-4360206.733	-2718625.209	0.027	0.033	0.018	0.005	-0.166	0.011	0.166	0.166
L12-L12	3773598.944	-4360207.976	-2718625.923	0.078	0.072	0.186	-1.055	1.077	0.725	1.508	1.673

NOTA: linha de base aproximada 12,4 km.

AGUD	X	Y	Z	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	Erro Plan	Erro Trid
Precisas	3743000.087	-4345079.914	-2783758.122								
C/A-C/A	3742999.566	-4345079.680	-2783758.604	0.0693	0.0718	0.0492	0.521	-0.234	0.482	0.571	0.748
L1-L1	3742999.885	-4345080.016	-2783758.568	0.0331	0.0344	0.0235	0.202	0.102	0.446	0.226	0.500
L12-L12	3743000.435	-4345080.601	-2783758.483	0.1018	0.1056	0.0724	-0.348	0.686	0.361	0.769	0.850

NOTA: linha de base aproximada 66,0 km.

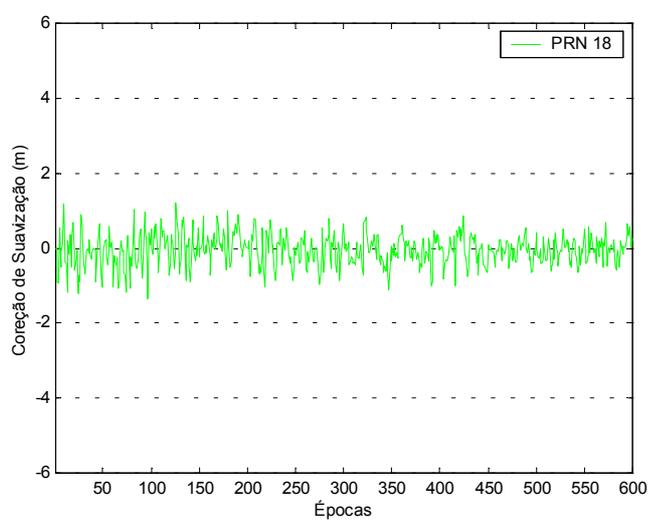
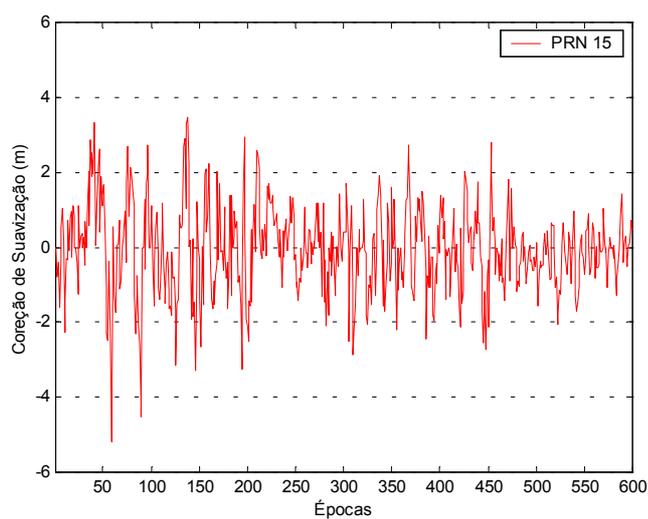
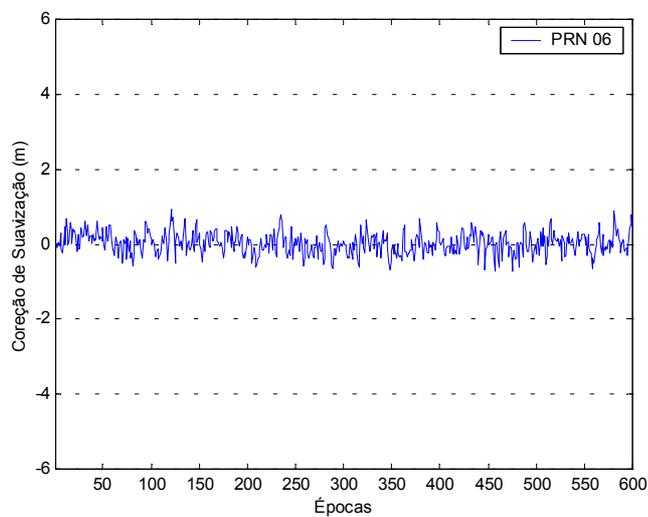
CEM1	X	Y	Z	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	Erro Plan	Erro Trid
Precisas	3825909.600	-4301664.305	-2736472.305								
C/A-C/A	3825909.201	-4301663.852	-2736471.897	0.137	0.112	0.093	0.399	-0.453	-0.408	0.604	0.729
L1-L1	3825909.756	-4301663.991	-2736472.161	0.071	0.058	0.048	-0.156	-0.314	-0.145	0.351	0.380
L12-L12	3825909.690	-4301663.606	-2736472.004	0.224	0.183	0.152	-0.090	-0.699	-0.301	0.705	0.767

NOTA: linha de base aproximada 89,6 km.

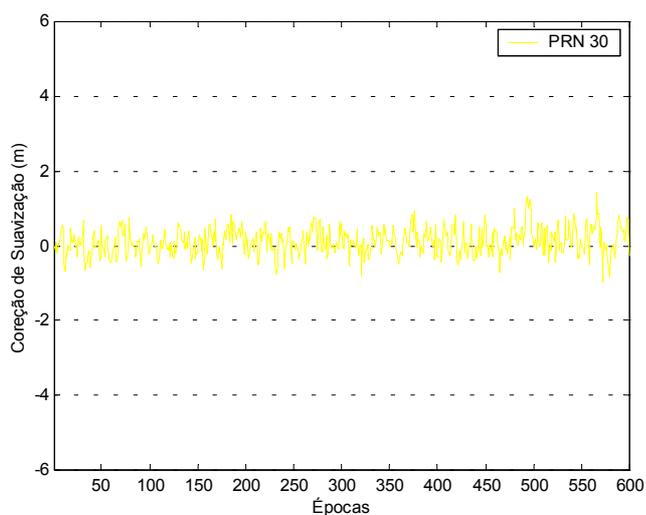
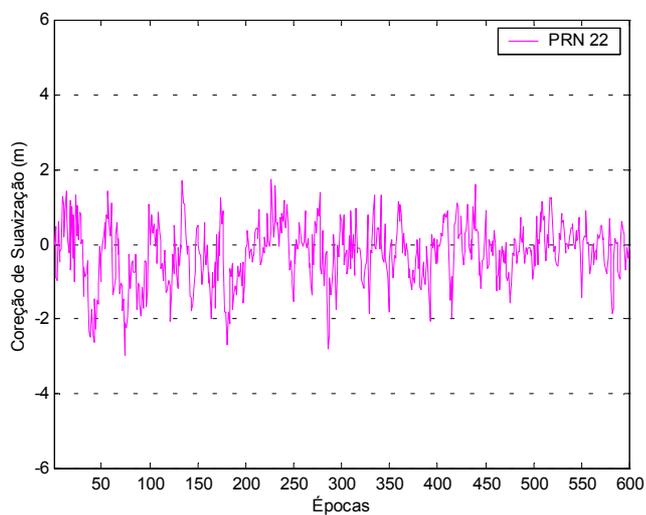
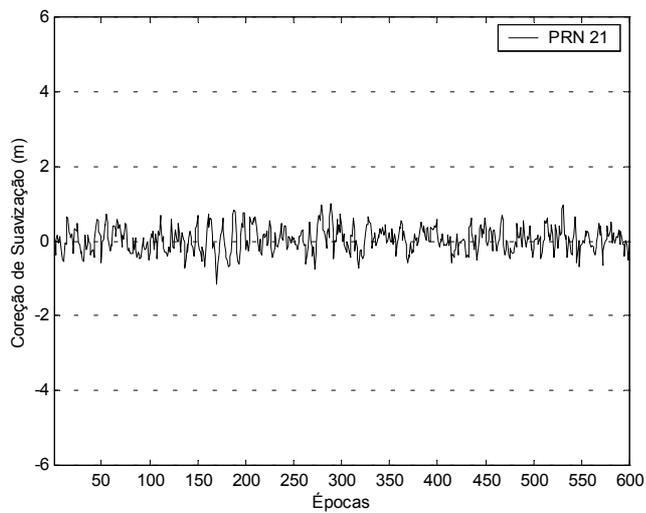
UEPP	X	Y	Z	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	Erro Plan	Erro Trid
Precisas	3687624.314	-4620818.607	-2386880.344								
C/A-C/A	3687623.536	-4620819.004	-2386878.876	0.080	0.100	0.057	0.778	0.397	-1.469	0.874	1.709
L1-L1	3687623.876	-4620819.005	-2386879.407	0.045	0.056	0.032	0.438	0.398	-0.937	0.592	1.108
L12-L12	3687624.628	-4620819.094	-2386880.521	0.1062	0.1325	0.0762	-0.314	0.487	0.177	0.579	0.606

NOTA: linha de base aproximada 430,2 km.

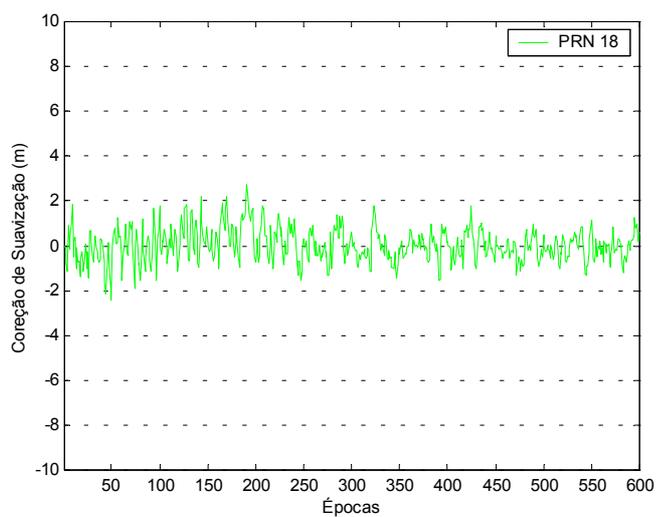
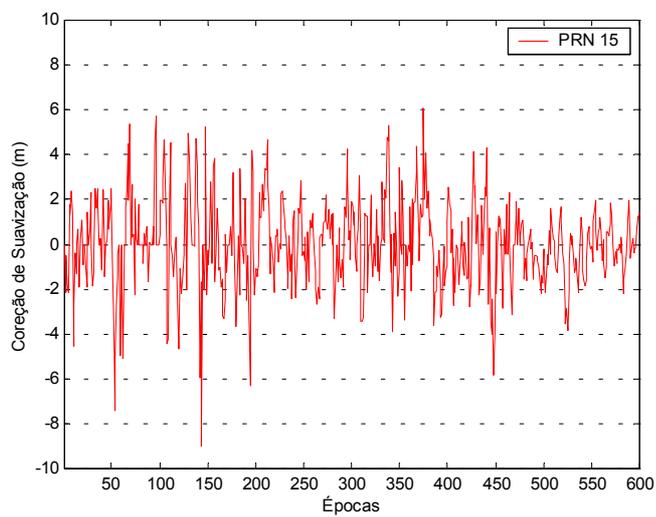
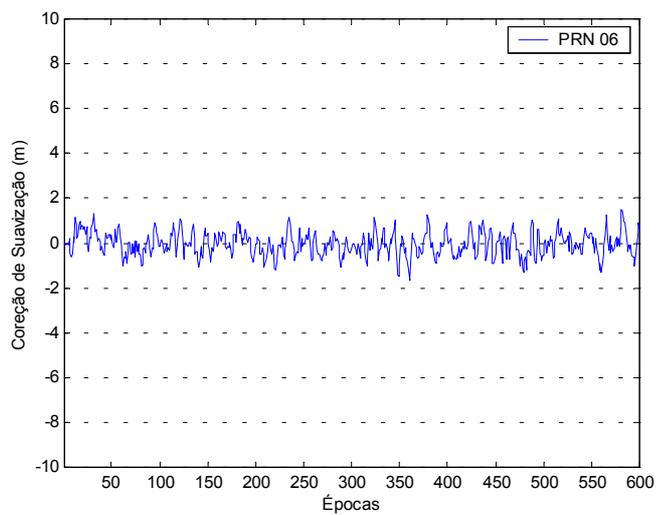
## APÊNDICE 6 – RESULTADOS PARA A ESTAÇÃO FERG

FIGURAS 1, 2 E 3 – CORREÇÃO DE SUAUIZAZÃO PELA PORTADORA L<sub>1</sub> (HATCH-82)

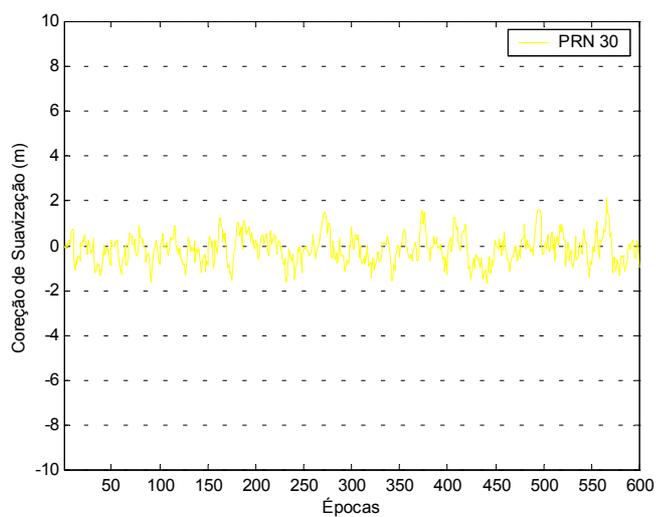
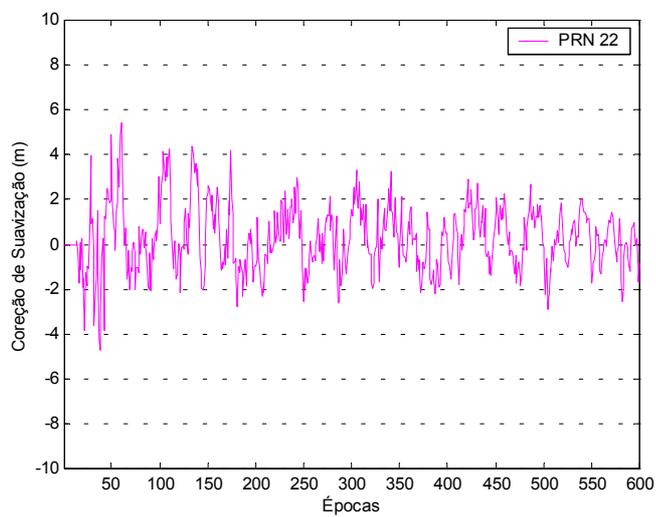
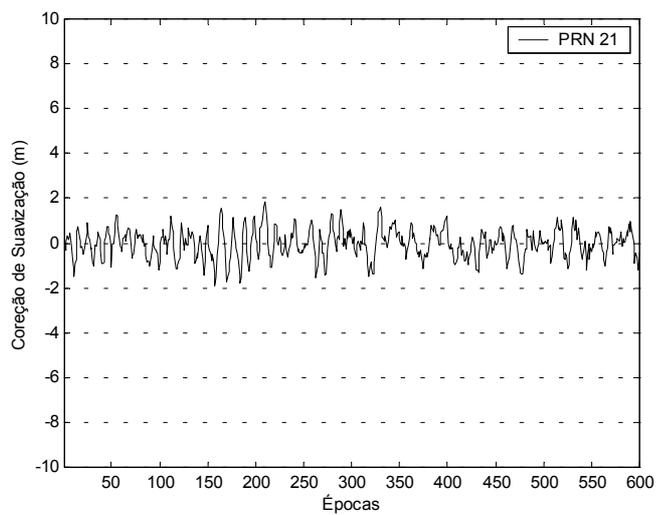
NOTA: estação FERG, dia 274-2004, PRN 06, 15 e 18, 600 épocas.

FIGURAS 4, 5 E 6 – CORREÇÃO DE SUAVIZAÇÃO PELA PORTADORA L<sub>1</sub> (HATCH-82)

NOTA: estação FERG, dia 274-2004, PRN 21, 22 e 30, 600 épocas.

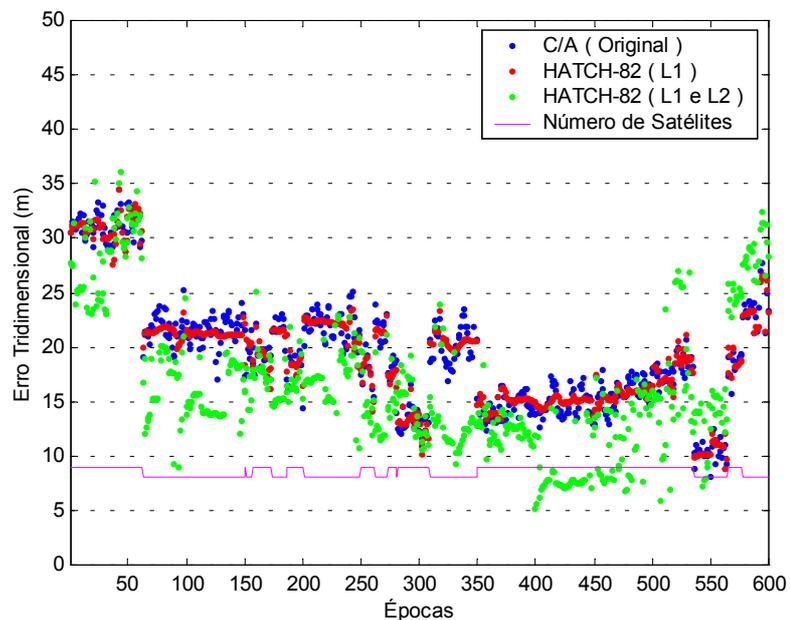
FIGURAS 7, 8 E 9 – CORREÇÃO DE SUAVIZAÇÃO PELAS PORTADORAS L<sub>1</sub> E L<sub>2</sub> (HATCH-82)

NOTA: estação FERG, dia 274-2004, PRN 06, 15 e 18, 600 épocas.

FIGURAS 10, 11 E 12 – CORREÇÃO DE SUAVIZAÇÃO PELAS PORTADORAS L<sub>1</sub> E L<sub>2</sub> (HATCH-82)

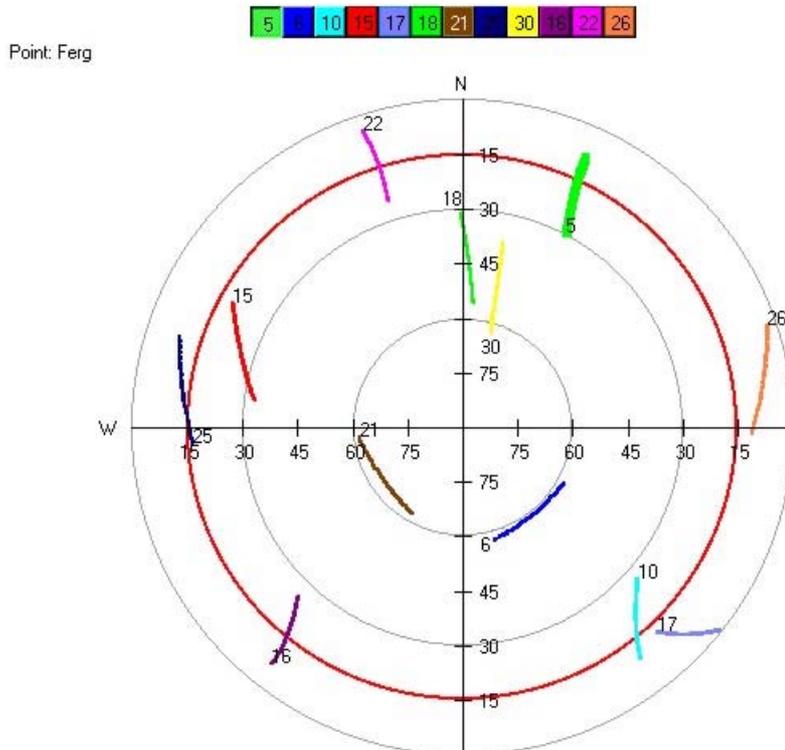
NOTA: estação FERG, dia 274-2004, PRN 21, 22 e 30, 600 épocas.

FIGURA 13 – ERRO TRIDIMENSIONAL RESULTANTE DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO EMPREGANDO PSEUDODISTÂNCIA ORIGINALIS E SUAVIZADAS



NOTA: estação FERG, dia 274-2004, 8-9 satélites processados.

FIGURA 14 – GRÁFICO POLAR



NOTA: estação FERG, dia 274-2004.

## APÊNDICE 7 – GRÁFICOS POLARES

FIGURA 1 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO TEXA (120-2000, PRN 01)

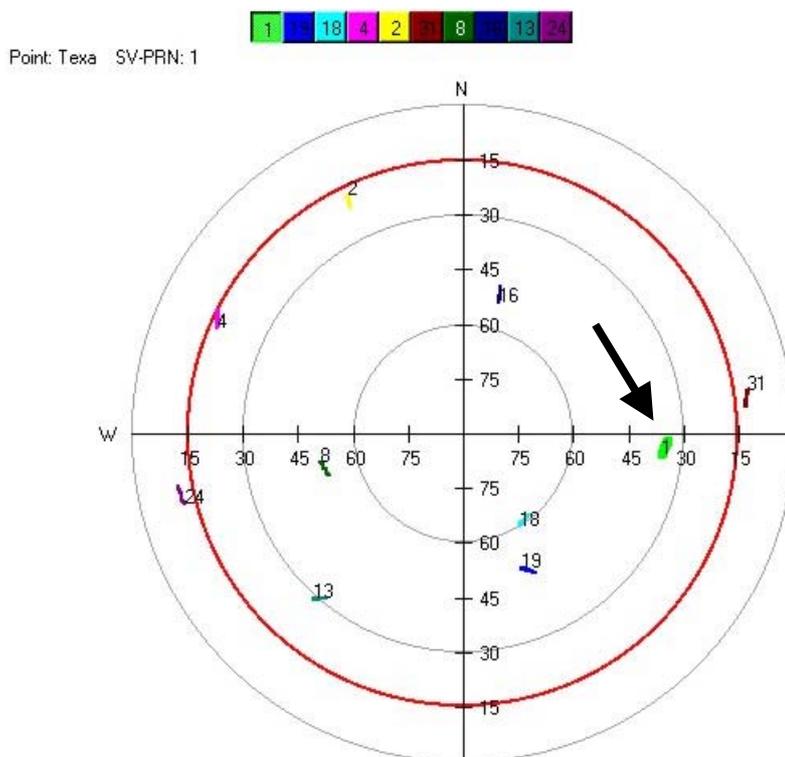


FIGURA 2 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO RM03 (296-2004, PRN 01)

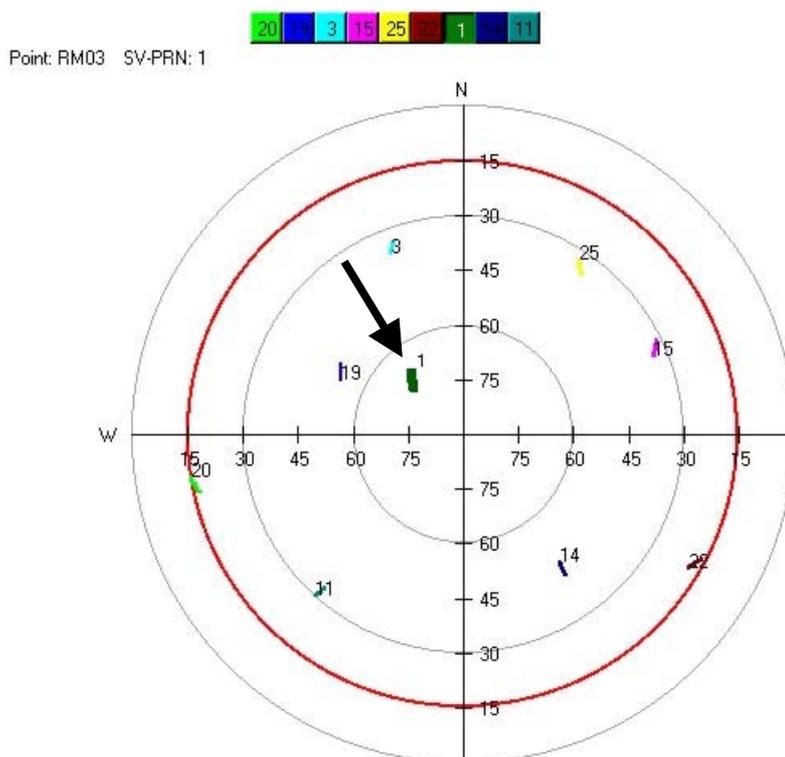


FIGURA 3 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO RM03 (149-2004, PRN 06)

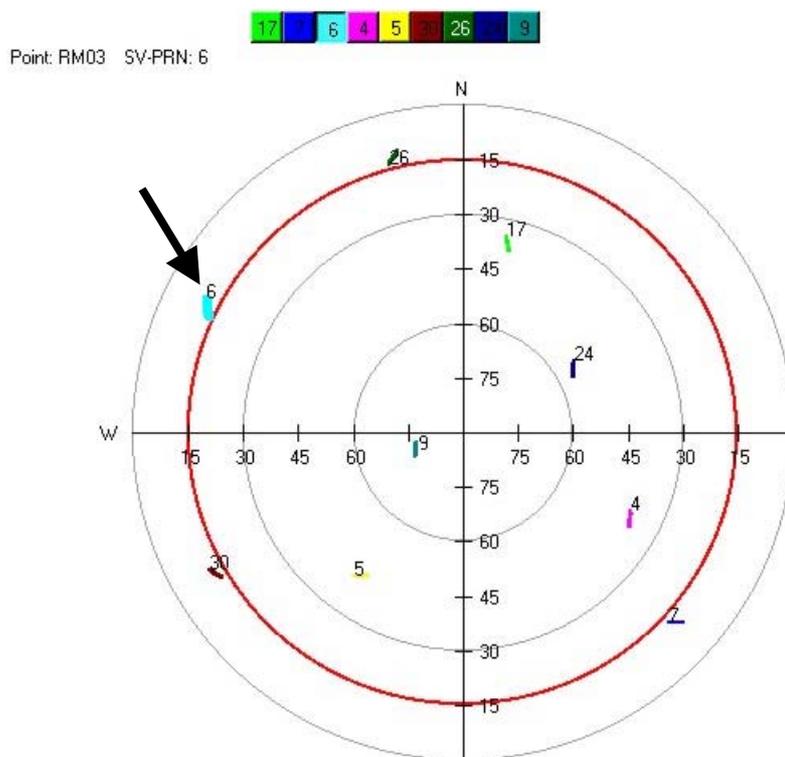


FIGURA 4 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO RM03 (162-1999, PRN 05 E 09)

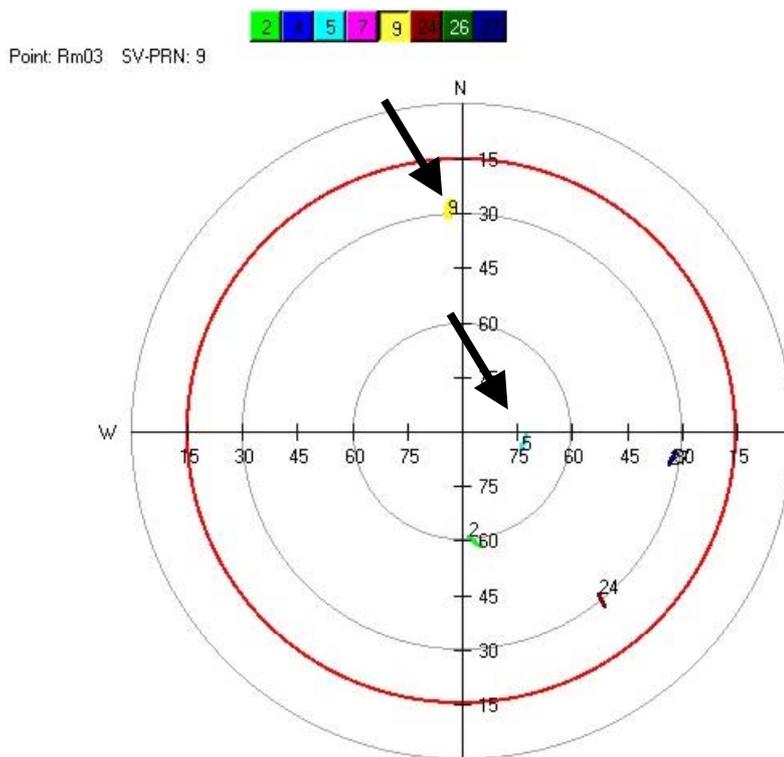
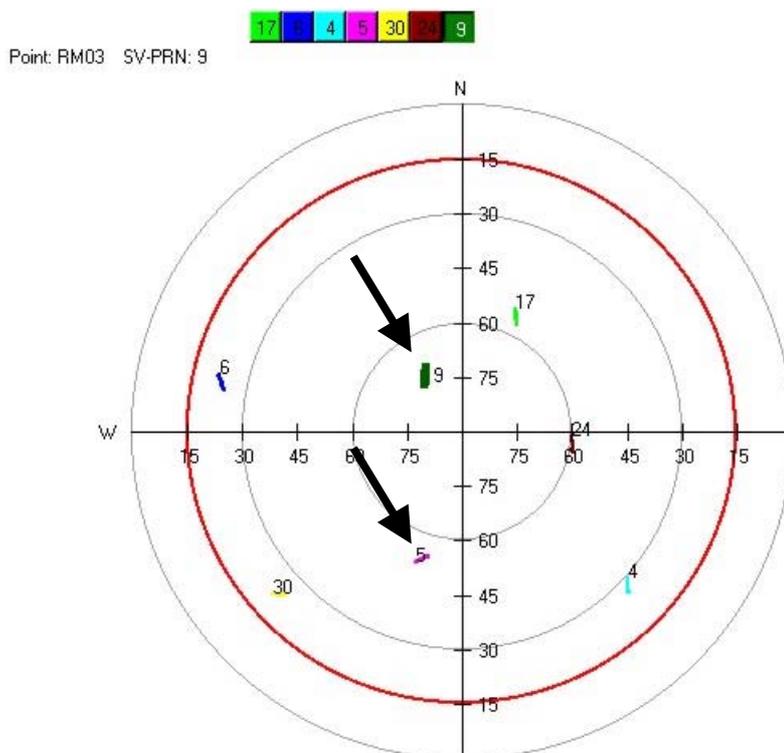


FIGURA 5 – GRÁFICO POLAR PARA A ESTAÇÃO RM03 (149-2004, PRN 05 E 09)



## ANEXO 1 – EXEMPLO DE UM ARQUIVO ASCII GERADO PELO PRISM

---

```

RECORD = 1 RECEIVE TIME = 69560.000000
SV  WN  G   TXMTTIME      CDPHSE      CARRIER_PH  SMOOTH  SM_CNT  DTYPE
26  2  24  0.923357727  22976775.270  -8219787.438  0.330   200    L1
    32  22  0.923357728  22976775.077  -8219787.436  -0.220   200    L1P
    32  22  0.923357682  22976788.883  -6389530.240  -0.280   200    L2P
 7   2  24  0.928891298  21317852.704  -18876978.924  -0.230   200    L1
    32  22  0.928891298  21317852.437  -18876978.922  -0.020   200    L1P
    32  22  0.928891252  21317866.403  -14697521.146  -0.960   200    L2P
 2   2  24  0.931293133  20597800.527  -7583582.357  0.270   200    L1
    32  22  0.931293134  20597800.098  -7583582.354  0.210   200    L1P
    32  22  0.931293096  20597811.539  -5891923.107  0.100   200    L2P
 8   2  24  0.926237972  22113299.582  5505993.323  0.100   200    L1
    32  22  0.926237974  22113299.191  5505993.325  0.000   200    L1P
    32  22  0.926237934  22113311.120  4291294.273  -0.190   200    L2P
10  2  24  0.921978140  23390365.244  290853.878  1.200   200    L1
    32  22  0.921978143  23390364.300  290853.882  0.940   200    L1P
    32  22  0.921978064  23390387.876  239685.255  1.730   200    L2P
27  2  24  0.923040489  23071881.046  11919341.787  0.190   200    L1
    32  22  0.923040490  23071880.751  11919341.788  -0.010  200    L1P
    32  22  0.923040445  23071894.127  9285442.246  0.000   200    L2P
13  2  24  0.929305639  21193636.232  -3582576.090  0.440   200    L1
    32  22  0.929305638  21193636.612  -3582576.088  0.390   200    L1P
    32  22  0.929305600  21193647.971  -2781836.662  0.110   200    L2P
SITE      NAVX      NAVY      NAVZ      NAVT
P60K      3722965.714022  -4402640.424092  -2720423.120607  272296.906250
PDOP      NAVXDOT      NAVYDOT      NAVZDOT      NAVTDOT
 2         -0.332      0.400      0.555      29.693941

```

---

NOTA: estação RM03, dia 149-2004.

Obs.: 1) Segundo o manual do fabricante (ASHTECH, 1994, p. 145), SMOOTH representa a correção de suavização da pseudodistância, em metros, resultando da subtração da pseudodistância medida (original) pela pseudodistância suavizada.

2) SM\_CNT é o número de passos executados na suavização. No processo completo as épocas são iniciadas em 0 e terminadas em 200, sendo que 2 passos são realizados a cada meio segundo. Portanto o processo completo tem um tempo de duração de 50 s.