Campus de São Carlos

*ANÁLISE DE PRECISÃO DOS POSICIONAMENTOS RELATIVO E POR
PONTO SIMPLES PARA BASES CURTAS, COM O SISTEMA NAVSTAR/GPS:
ESTUDO DE CASO EM BELÉM-PA*

CARLOS AUGUSTO UCHÔA DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO CESAR LIMA SEGANTINE

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Transportes

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 24/05/00

Ass.:

ANÁLISE DE PRECISÃO DOS
POSICIONAMENTOS RELATIVO E POR
PONTO SIMPLES PARA BASES CURTAS, COM
O SISTEMA NAVSTAR/GPS: ESTUDO DE
CASO EM BELÉM-PA

Carlos Augusto Uchôa da Silva

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Lima Segantine

São Carlos

2000

Class.	TESE-EESC
Cutt.	5373
Tombo	0079100

5/5 1084456

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S586a Silva, Carlos Augusto Uchôa da
Análise de precisão dos posicionamentos relativo e
por ponto simples para bases curtas, com o sistema
Navstar/GPS : estudo de caso em Belém-PA / Carlos
Augusto Uchôa da Silva. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Lima Segantine.

1. GPS. 2. Base curta. 3. Análise de precisão.
4. Ponto simples. I. Título.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Kátia e
a meus filhos
Rayra, Rahym e Raimi.

AGRADECIMENTOS

Agradecer e perdoar são duas tarefas das mais difíceis de cumprir, exigem humildade, reconhecimento e respeito a si e aos outros.

A Deus por tudo.

A minha esposa Kátia pelo amor, compreensão e cumplicidade. Sendo assim, sempre persistirá uma errata na capa, onde deve-se acrescentar: Kátia Cynara Costa da Silva como co-autora deste trabalho.

A meus Pais Aristides e Helena que me ensinaram aquilo que de melhor se pode ensinar a um filho: caráter e honestidade.

A meu orientador e amigo Prof. Dr. Paulo César Lima Segantine, por suas orações, apoio, orientação e sugestões para este trabalho.

A meus irmãos, Rita, Conceição, Beth e Humberto, que fazem de meu crescimento acadêmico o sucesso pessoal de cada um.

A Maina e Antônio Lima pelo apoio incondicional e irrestrito.

Aos amigos de Belém que mesmo à distância, estão sempre comigo e aos novos amigos que fiz no decorrer deste trabalho no STT.

Ao diretor do CEFET-Pa, Prof. Sérgio Cabeça Braz, pelo apoio e incentivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE FOTOS	ii
LISTA DE GRÁFICOS	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	2
2 NAVSTAR/GPS: UMA VISÃO GERAL E ATUALIZADA	4
2.1 Origens	4
2.2 Movimento orbital dos satélites GPS	5
2.3 Serviços de posicionamento SPS e PPS	6
2.3.1 Erros impostos ao sistema	7
2.3.1.1 AS - "anti-spoofing"	7
2.3.1.2 SA - "Selective Availability"	7
2.3.1.3 Multicaminhamento - "MULTIPATH"	8
2.4 Características do sinal GPS	8
2.5 Tempo GPS	9
3 A ATMOSFERA TERRESTRE E O SINAL GPS	11

3.1 Efeitos das explosões solares	11
3.2 Efeitos provocados pela atmosfera no sinal GPS	12
3.3 A troposfera	14
3.3.1 Frentes meteorológicas	16
3.3.2 Efeitos troposféricos	18
3.3.2.1 Atenuação troposférica	18
3.3.2.2 Atenuação torrencial	19
3.3.2.3 Cintilação troposférica	19
3.3.2.4 Atraso troposférico	19
3.3.3 Modelos de índice de refração, temperatura e pressão	22
3.3.3.1 Modelos de gases ideais - processo adiabático.	22
3.3.3.2 Modelo de estratosfera isotérmica de pressão versus altitude.	23
3.3.4 Modelos troposféricos	24
3.3.4.1 Modelo de HOPFIELD	25
3.3.4.2 Modelo de SAASTAMOINEN	27
3.3.4.3 Modelo de MARINI e MURRAY	31
3.4 A ionosfera	32
3.4.1 Características da ionosfera	34
3.4.1.1 Índice de refração da ionosfera	36
3.4.2 Cintilações equatoriais	39
3.4.3 Efeitos ionosféricos de cintilação de fase.	40
3.4.4 TEC-Total Electron Content	40
3.4.5 Modelos Ionosféricos	42
3.4.5.1 Modelo de BENT	43
3.4.5.2 Modelo de KLOBUCHAR	45
3.4.5.3 Modelo de CHAPMAN	46
3.4.5.4 Modelo ionosférico de tempo real (RIM)	47
3.4.5.5 Modelo da placa ionosférica	47
3.4.5.6 Modelo cosseno diário	48
3.4.5.7 Modelo ionosférico pontual	48
3.4.5.8 Modelo de atraso ionosférico local.	49
4 REDES GEODÉSICAS, A RBMC E O SIRGAS	50
4.1 Redes geodésicas verticais	51
4.2 Redes Geodésicas Horizontais	51

4.3 Redes Geodésicas tridimensionais com GPS	52
4.3.1 Estratégias de observações de redes	53
4.4 O SGB, a RBMC e o SIRGAS	56
5 O PRECISE POINT POSITIONING - PPP	58
5.1 POSICIONAMENTO PONTUAL PRECISO - PPP	58
5.2 Serviço automatizado para análise de dados GPS	61
5.3 Submissão de dados GPS no AG	62
5.3.1 O GIPSY	62
5.3.1.1 Modelo troposférico do GIPSY	63
5.3.2 Características dos dados candidatos a submissão no AG	64
5.4 Resultados	66
5.5 Parâmetros transmitidos e utilizados	67
5.5.1 Características das Soluções Precisas do Relógio GPS	67
5.5.2 O método	68
5.6 Limitações	70
5.7 Testes com o PPP, AG	70
6 OS POSICIONAMENTOS RELATIVO E PONTO SIMPLES	71
6.1 O posicionamento por ponto simples	71
6.2 Acurácia da solução do posicionamento por ponto simples	73
6.3 Posicionamento relativo	75
7 PONTOS GEODÉSICOS COM SISTEMA NAVSTAR/GPS NA RMB	77
7.1 Definição dos pontos geodésicos	78
7.2 Distribuição e características dos pontos observados	79
7.2.1 Os marcos	81
7.3 Sessões de observação	81
7.3.1 Receptores utilizados no levantamento	82
7.3.2 Períodos e taxas de observação	82

7.4 Coleta de dados	82
7.4.1 Dados GPS	82
7.5 Dados Meteorológicos	84
7.5.1 Dados coletados pelo INMET	84
7.5.2 Coleta de dados	85
7.5.3 Coleta "in loco" nas estações de observação	86
7.5.3.1 Abrigos meteorológicos	87
7.5.3.2 O psicrômetro – Temperatura e Umidade relativa do ar	88
7.5.4 A pressão atmosférica	90
7.5.5 Metodologia utilizada no cálculo de temperatura e umidade relativa do ar	92
8 OS SOFTWARES UTILIZADOS	94
8.1 OMNI	94
8.1.1 Fluxograma simplificado do OMNI	95
8.1.2 Obtenção de efemérides precisas	97
8.1.3 Inserção de efemérides precisas no OMNI	98
8.2 GPSurvey v 2.2	99
8.2.1 GIPSY – O software do PPP	100
9 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO OMNI	103
9.1 Referência Inicial	103
9.2 Processamento OMNI	105
9.2.1 Conduta 1 de processamento OMNI	108
9.2.2 Conduta 2 de processamento OMNI	110
10 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO GPSURVEY	112
10.1 Inicialização	113
10.2 A solução do ponto simples	113
10.3 O resultado final do posicionamento por ponto simples	115
10.4 Variabilidade da posição da estação TAPAN – 5L	116
11 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
11.1 Sobre o PPP	121

11.2 A solução mais precisa: L1 ou L3 (ion free)?	122
11.3 A solução mais precisa: Resolver (float) ou Fixar (fix) a ambigüidade?	124
11.4 A solução mais precisa: Inserir ou não variáveis meteorológicas reais no processamento (Conduta 1 x Conduta 2)?	126
11.5 O RMS de todas as soluções geradas no OMNI	128
11.6 O Posicionamento por ponto simples versus Posicionamento relativo	130
11.7 A variação do posicionamento por ponto simples	133
11.8 A influência da variação da pressão atmosférica na precisão final de uma observação GPS.	134
ANEXO A	137
ANEXO B	159
ANEXO C	160
ANEXO D	170
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	172
APÊNDICE I	180
APÊNDICE II	188

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Explosões solares com liberação de radiação eletromagnética e plasma	11
Figura 2 - As camadas da atmosfera.	14
Figura 3 – Representação das diferentes trajetórias, a real e a geométrica através da troposfera.	21
Figura 4 – Processo simplificado de produção de elétrons livres para formação da ionosfera.	32
Figura 5 – Representação pictórica do pior caso de enfraquecimento da banda L (cintilação ionosférica).	39
Figura 6 - Geometria do ponto ionosférico.	48
Figura 7 - Representação das superfícies topográfica, geoidal e elipsoidal.	52
Figura 8 - Rede da cidade de São Carlos.	55
Figura 9 - Rede parcial da cidade de Belém.	56
Figura 10 – Estações globais GPS – International GPS Service.	59
Figura 11 – Pontos geodésicos com GPS na região metropolitana de Belém.	79
Figura 12 – fluxograma simplificado para o processamento OMNI v4.0	95
Figura 13 – Início do arquivo RINEX do ponto base1930.99o	101
Figura 14 – Configuração vetorial adotada nos processamentos OMNI	105
Figura 15 – Descrição passo-a-passo dos procedimentos adotados no processamento OMNI para este trabalho.	107
Figura 16 – Coordenadas UTM (SAD-69) posicionamento por pontos	115

LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Marco de concreto com chapa metálica cravada no topo. _____	81
Foto 2 - Abrigo meteorológico móvel (utilizado na coleta de dados em Belém-Pa). _____	88
Foto 3 - Psicrômetros de ventilação forçada e natural respectivamente	89
Foto 4 - Psicrômetro utilizado na coleta de dados meteorológicos em Belém. _____	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perfis das refratividades NA e NW versus altitude. .	15
Gráfico 2 – Temperatura e Densidade de elétrons para diferentes regiões da ionosfera versus altitude .	34
Gráfico 3 – Variação da pressão atmosférica em 15/julho	86
Gráfico 4 – Pressão atmosférica, Estação SBBE- Aeronáutica	91
Gráfico 5 – temperatura do ar / estação de observação	92
Gráfico 6 – Umidade relativa do ar / estação de observação	93
Gráfico 7 - MGE/Solução/Conduta 1	109
Gráfico 8 – RMS/ Solução/ Conduta 1	109
Gráfico 9 – MGE/ Estação/ Conduta 2	111
Gráfico 10 – RMS/Solução/ Conduta 2	111
Gráfico 11 – Coordenadas geodésicas do ponto 5L – posicionamento por ponto simples	117
Gráfico 12 – Solução float – conduta 2	122
Gráfico 13 – Solução L3 float – Conduta 2	122
Gráfico 14 – Solução L1 float – Conduta 2	124
Gráfico 15 – Solução L1 fix – Conduta 2	124
Gráfico 16 – Comparação entre as condutas 1 e 2 para L1 float	127
Gráfico 17 – Comparação entre as condutas 1 e 2 para L3 float	127
Gráfico 18 – Variação do RMS para todas as soluções processadas no OMNI	129
Gráfico 19 – MGE para as soluções de cada dia em função do número de horas observadas na estação 5L.	134

Gráfico 20 – Variação da MGE em 15/07/99	135
Gráfico 21 – Variação do RMS em 15/07/99	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efemérides fornecidas pelo IGS/disponibilidade/precisão. ____	6
Tabela 2 - Características das regiões ionosféricas _____	36
Tabela 3– Características da variabilidade do relógio GPS _____	68
Tabela 4 - Cancelamentos no posicionamento relativo. _____	76
Tabela 5 - Nomenclatura e numeração dos vértices da malha GPS99. _	80
Tabela 6 – As semanas GPS _____	83
Tabela 7 – Produtos disponibilizados pelo IGS . _____	98
Tabela 8 - Coordenadas do vértice 5L - IBGE _____	104
Tabela 9 – MGE para a conduta 1 de processamento OMNI _____	108
Tabela 10 – MGE para a conduta de processamento 2 _____	110
Tabela 11 – Resultados finais do processamento por ponto simples _	116
Tabela 12 – Coordenadas do ponto 5L fornecidas pelo IBGE. _____	116
Tabela 13 – Resultado final do processamento por ponto simples do ponto 5L/dia de observação _____	118
Tabela 14 – Resultado final do posicionamento por ponto simples do ponto 5L durante 62 hs de observação _____	118
Tabela 15 - Comparação das coordenadas em WGS-84 para os diversos processamentos analisados. _____	120
Tabela 16 – Coordenadas Geodésicas em WGS-84 do processamento por ponto simples _____	131
Tabela 17 - Coordenadas Geodésicas em WGS-84 do processamento relativo-OMNI _____	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Adaptive converters
ASC II	American Standard Code for information Interchange
AG	Auto Gipsy
AS	Anti-Spoofing
C/A	Coarse/Acquisition code
CIS	Conventional Inertial System
CME	Coronal Mass Ejections
CODEM	Companhia de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belém
CTS	Conventional Terrestrial System
DOY	Day Of Year (0-365)
ECEF	Earth-Centred, Earth-Fixed
ETA	Estação de Tratamento de Água
FLINN	Fiducial Laboratories for na International National science Network
ftp	File Transfer Protocol
GIPSY	GPS Inferred Positioning System
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	International Earth Rotation Services (localizado em Paris)
IGS	International GPS Service for Geodynamics
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITSS	Information Technology and Scientific Services

ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JPL	Jet Propulsion Laboratory
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGS	National Geodetic Survey, USA
NAVSTAR	Navigation System using Time And Ranging
OASIS	Orbit Analysis and Simulatio Software
P	Precise code (Código preciso)
ppm	Parte por milhão
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Precise Position Service
RINEX	Receiver Independent Exchange format
RMB	Região Metropolitana de Belém
RMS	Root Mean Square
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
SA	Selective Availability
SAD 69	South American Datum 1969
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SID	Sudden Ionospheric Disturbance
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SPS	Standard Position Service
SP1	Um formato de órbita precisa, fornecido pelo NGS
SP3	Um formato de órbita precisa, fornecido pelo NGS
SVN	Space Vehicle Number
TEC	Total Electrons Content
Topex	Abreviação de Topex-Posseidon
UFPA	Universidade Federal do Pará
URL	Uniform Resource Locator
UTC	Universal Time Coordinate
WGS 84	World Geodetic System 1964
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VLBI	Very Long Baseline Interferometry

RESUMO

SILVA, C. A. U. Análise de Precisão dos Posicionamentos Relativo e por Ponto Simples para Bases Curtas, com o Sistema NAVSTAR/GPS: Estudo de Caso em Belém-Pa. São Carlos, 2000, 190p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho constitui-se num método para estudo, implantação e análise de precisão dos posicionamentos relativo e por ponto simples para vetores de linhas bases curtas com o GPS. Para isso, o autor elegeu, nomeou e observou com receptores GPS 21 pontos geodésicos na região metropolitana de Belém-Pa, denominada de malha GPS99. Simultaneamente mediu dados meteorológicos “in loco” através de medições psicrométricas. As condutas organizadas para processamento dos dados diferem entre si em: tipos de correções inseridas e resultados analisados. Estes resultados são comparados entre si para a apresentação de análises, conclusões e recomendações acerca de diferentes fatores: PPP, L1 versus L3, Resolver ou fixar ambigüidade, inserir ou não variáveis meteorológicas reais para bases curtas, posicionamento relativo versus ponto simples, variação do ponto simples e influência da pressão atmosférica na precisão final de uma observação GPS. Adicionalmente é apresentada e discutida a metodologia PPP, desenvolvida pelo JPL.

Palavras-chave: GPS; ponto simples, base curta; análise de precisão.

ABSTRACT

SILVA, C. A. U. Analysis of precision of the relative positionings and for single point for short bases, with the system NAVSTAR/GPS: study of case in Belém-Pa. São Carlos, 2000 190p. Dissertation (Master's degree) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

The constitution of this work is a method for the study, introduction and analysis of precision of the relative positionings and for simple point to vectors of short base with the GPS. For this, the author elected, designated and observed with GPS receivers 21 geodesic points in the metropolitan region of Belém-Pa, denominated of GPS99 net. Simultaneously meteorological data were measured "in loco" through the psychometric measurements. The procedures to the data processing are different among them: types of inserted correction and analysed results. These results are compared among them to the presentation of analyse, conclusions and recommendations considering different factors: PPP L1 versus L3; solve of fix ambiguity insert or no real meteorological variables to short base, relative positioning versus simple point, variation of the simple point and influence of atmospheric pressure into the final pressure of one GPS observation. Additionally the PPP methodology developed by JPL.

Keywords: GPS; single point; short base; analysis of precision.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Antes do surgimento do posicionamento por satélites, os sistemas geodésicos eram baseados em modelos matemáticos que melhor se adaptavam a uma área específica da superfície terrestre, onde eram feitos os levantamentos com a finalidade do mapeamento. Desde a adoção das técnicas espaciais de posicionamento por toda comunidade científica, os sistemas assumiram um caráter global.

Neste trabalho são estudadas as precisões alcançadas no estabelecimento de vetores de linha base curta, entre 5km e 35km, assim como, as precisões do processamento por ponto simples com o sistema NAVSTAR/GPS.

Estas análises e comparações foram fundamentadas no atual estado da arte, e utilizou-se como área teste, a região metropolitana da cidade de Belém-Pa (RMB), na qual incluem-se Belém, Ananindeua, Icoaraci e as ilhas de Caratateua (Outeiro), Mosqueiro e Cotijuba.

O autor realizou seções de observação com receptores GPS de dupla frequência, e medições de variáveis meteorológicas "In loco", através de um par de psicrômetros de ventilação natural.

A observação e processamento de pontos geodésicos na área metropolitana da cidade de Belém-Pa, executados com o sistema NAVSTAR/GPS, disponibilizou pontos de precisão para apoio à diversas utilizações da Geodésia, Topografia, SIG, Sensoriamento Remoto, Cartografia

e Engenharia de um modo geral.

Serão discutidos assuntos como análise de precisão de vetores de linha base curta, com e sem adição de variáveis meteorológicas coletadas "In loco" no processamento.

O posicionamento por ponto simples utilizado por grande parcela dos usuários do sistema de posicionamento NAVSTAR/GPS é comparado com o processamento de vetores pelo posicionamento relativo.

O processamento das fases da portadora é realizado de tal forma que possam ser comparadas as soluções obtidas pelo processamento de cada uma ou da combinação das duas fases da portadora.

Além disso é apresentado um serviço automatizado de processamento GPS, disponibilizado pela internet pelo Jet Propulsion Laboratory da NASA, o PPP (Precise Point Positioning), com suas possibilidades e limitações.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar a precisão de pontos geodésicos implantados com sistema de posicionamento global, com ênfase nos vetores de linha base curta. Somam-se a este os seguintes objetivos secundários:

- ↳ Apresentar uma visão atualizada sobre o sistema de posicionamento global;
- ↳ Coletar, inserir e analisar a influência de variáveis meteorológica coletadas "In loco" nas seções de observação no processamento GPS;
- ↳ Discutir os diversos processos de coleta de dados meteorológicos e suas respectivas representatividades das condições meteorológicas dominantes durante a medição GPS;

- ➡ Processar os dados observados através do Software OMNI 4.0, onde é possível inserir as variáveis meteorológicas e efemérides precisas fornecidas pelo IGS¹;
- ➡ Processar os dados observados através do software GPSurvey v2.2, desenvolvido pela TRIMBLE com a opção de processamento de ponto simples (processor estimate)²;
- ➡ Fazer análise comparativa entre os resultados obtidos pelas condutas de processamento executadas através do OMNI e também confrontar as soluções do OMNI com as do GPSurvey;
- ➡ Comparar os resultados do processamento dos vetores para a portadora L1 com o processamento dos vetores a partir de L3 “ion free³” para bases curtas.
- ➡ Comparar os resultados obtidos entre o processamento em um software comercial que possibilite o processamento por ponto simples e a metodologia do PPP.
- ➡ Comparar o processamento relativo e o PPP vetores de linhas bases curtas.
- ➡ Obter e apresentar informações sobre a atividade solar durante o período de duração das seções de observação;
- ➡ Levantar discussões acerca da representatividade para as condições amazônicas da modelagem atmosférica atualmente utilizada para correções dos diversos efeitos no sinal GPS.

¹ International GPS Service

² Processo de estimativas pelo método dos mínimos quadrados

³ “Ionfree” - combinação linear das portadoras L1 e L2, com o objetivo de cancelar os efeitos que a ionosfera provoca no sinal GPS.

2 NAVSTAR/GPS: UMA VISÃO GERAL E ATUALIZADA

Este capítulo discorre sobre o sistema NAVSTAR GPS, suas origens, dados observados, erros, técnicas de observação e os avanços mais recentes.

2.1 Origens

Desde o início da civilização alguns homens tornaram-se peritos em decifrar os mistérios das estrelas e desenvolveram regras administrativas para vida fundamentadas em suas posições, HOFMANN-WELLENHOF et. al. (1997).

Após o lançamento do Sputnik em 1957 desenvolveu-se um método de posicionamento por satélites, no qual eles emitiam uma onda de rádio com frequência constante, utilizando-se o efeito Doppler para estimar a distância entre as antenas do satélite e do receptor, RICHARDUS (1984).

Guier e Weiffenback da Universidade de Johns Hopkins apresentaram uma técnica para encontrar os parâmetros orbitais do satélite medindo as trocas de frequência em relação a pontos fixos na superfície da terra.

A aplicação inversa, ou seja, determinar as coordenadas de uma estação fixa na terra em função de parâmetros orbitais conhecidos através de efeito Doppler foi desenvolvida por McClure and Kershner em 1958. Eles projetaram o "Navy Navigation Satellite System (NNSS)" também chamado de sistema "TRANSIT", que foi liberado para uso de civil em 1967.

O sistema "TRANSIT" originalmente consistia em 5 satélites e depois ampliado para 7 satélites com órbitas circulares polares a uma altitude média

de 1100Km, com velocidade média de 7Km/s. Cada satélite completava sua órbita em aproximadamente 107 minutos.

O "Global Positioning System" (GPS) foi desenvolvido para substituir o sistema "TRANSIT" que era experimental, sendo assim, cobria o território norte americano mas sua constelação deixava ainda grandes vazios na cobertura terrestre e fornecia baixas precisões relativas.

Contrapondo-se ao "TRANSIT", o GPS respondeu de maneira rápida, precisa e econômica as seguintes perguntas: que tempo, que posição e que velocidade?, REMONDI(1988) apud HOFMANN-WELLENHOF et. al. (1997).

NAVSTAR/GPS é um sistema de posicionamento global, pertencente aos EUA, baseado em 24 satélites artificiais. Em março de 2000, a constelação consistia de 28 satélites operacionais dos blocos II, IIA e IIR. Maiores detalhes sobre os satélites GPS, podem ser obtidos em <http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>.

A força aérea norte-americana declarou formalmente a constelação de satélites GPS como tendo satisfeito as exigências para plena capacidade operacional (FOC) a partir de 27 de abril de 1995.

2.2 Movimento orbital dos satélites GPS

O movimento orbital está sujeito às forças de atração gravitacional terrestre e de inúmeras outras forças que agem nos satélites, tais como as forças de atração do Sol e da Lua e a pressão causada pelo impacto das partículas de radiação solar, LEICK (1995).

Três conjuntos de dados estão disponíveis para determinar os vetores velocidade e posição dos satélites numa estrutura de referência terrestre em um determinado instante, HOFMANN-WELLENHOF et. al. (1997).

São eles: dados de almanaque, efemérides transmitidas e efemérides precisas. Estes dados diferem em suas precisões. Os dados de almanaque e de efemérides transmitidas, estão disponíveis em tempo real, pois estas informações são recebidas através do sinal GPS e armazenadas no receptor de um dado usuário.

As efemérides precisas são adquiridas “a posteriori”, geralmente através da internet, de institutos como o NGS ou o IGS, que estimam e disponibilizam estas efemérides após um tempo que varia entre o tempo da observação até no máximo 12 dias.

A precisão dessas efemérides geradas pelos institutos mencionados, está diretamente relacionada com o período tempo decorrido do término das observações de campo. Quanto maior for esse tempo, melhor será a precisão devido ao volume de processamento das informações gerado pelo sistema de controle, que fornece as posições finais corrigidas para cada satélite no tempo das observações de campo.

As estimativas do IGS, baseiam-se em 140 estações de monitoramento contínuo GPS, distribuídas globalmente, três centros de dados globais, cinco centros regionais ou operacionais, sete centros de análise, um centro coordenador de análises e uma agência central. Para as efemérides, o IGS disponibiliza três tipos:

Efemérides	Disponibilidade (dias)	Precisão (cm)
Preditas	Tempo real	50
Rápidas	1 a 2	10
Finais(precisas)	10 a 12	5

Tabela 1 – Efemérides fornecidas pelo IGS/disponibilidade/precisão. ADAPTADA DE ZUNBERGE et. al.(1997).

2.3 Serviços de posicionamento SPS e PPS

O SPS é o serviço de posicionamento padrão. Está disponível continuamente a todos os usuários GPS através da frequência L1 que contém o código C/A⁴ e uma mensagem de dados de navegação.

O PPS está disponível apenas a usuários militares americanos ou a quem por eles for autorizado. Neste serviço não estão presentes as

⁴ Coarse Acquisition code

degradações impostas ao sistema por seus controladores, o que possibilita o aumento da precisão. É baseado no código P⁵, PARKINSON (1994).

2.3.1 Erros impostos ao sistema

2.3.1.1 AS - "anti-spoofing"

É um dispositivo que age nas transmissões de dados dos satélites, modificando o código P para formar o código Y. O propósito do AS é tornar o código P disponível apenas para usuários autorizados (militares).

2.3.1.2 SA - "Selective Availability"

Esta medida é chamada disponibilidade seletiva (SA). É uma degradação intencional da precisão do sistema, na qual é inserida uma falsificação nas informações do relógio do satélite (SA-dither) e/ou na transmissão das efemérides dos satélites (SA-epsilon) que são parte da mensagem de navegação.

Atualmente há uma forte pressão da sociedade civil sobre o governo americano, numa tentativa de desligar o SA e melhorar a precisão do sistema para o posicionamento através código C/A.

⁵ Precise code

2.3.1.3 Multicaminhamento - "MULTIPATH"

É o efeito causado pela multiplicidade de sinais GPS que chegam a antena de um receptor. normalmente resultado da reflexão do sinal transmitido pelo satélite em edificações e/ou superfícies espelhadas, que provoca uma composição vetorial do sinal de entrada ,PARKINSON (1994).

Baixos ângulos de elevação dos satélites com relação a posição da antena do receptor, potencialmente favorecem a refração e o multicaminhamento do sinal GPS.

2.4 Características do sinal GPS

Os satélites GPS transmitem em duas frequências, designadas por $L1=1575,42\text{MHz}$ e a $L2=1227,6\text{MHz}$. Estas portadoras são moduladas com dois tipos de códigos e com uma mensagem de navegação. Os dois códigos são o código C/A e o código P.

As observáveis do GPS incluem três grandezas fundamentais, o tempo, a fase e a distância. O período de observação é o tempo contado no relógio do receptor durante o qual os sinais foram recebidos. É idêntico para as medidas de fase da portadora e também para pseudodistância de todos os satélites observados àquela época e expresso pelo relógio do receptor GPS.

Pseudodistância é a distância entre as antenas do receptor e do satélite, acrescida de correções de relógios dos satélites e atrasos atmosféricos. Ela reflete o comportamento instantâneo dos relógios do receptor e satélites.

A observável fase é a diferença em ciclos entre a fase transmitida pelo satélite, recebida na antena de um dado receptor GPS e a fase gerada internamente pelo VCO⁶, que é um dispositivo eletrônico que faz a comparação das fases.

⁶ Voltage Controlled Oscillator

Quando comparado com o comprimento de onda do sinal, a fase da portadora representa uma diferença de medida entre as antenas do satélite e do receptor, com uma grande porção da medida relacionada com certos números de ciclos de sinais previamente conhecidos. Este número inteiro de ciclos, usualmente é chamado de ambigüidade da portadora, SEGANTINE (1995).

Determinadas a posição espacial, quatro satélites são suficientes para calcular a posição do receptor e o erro do relógio.

As observáveis GPS não são corrigidas dos efeitos externos, tais como: refração atmosférica e compensação dos relógios dos satélites. Pseudodistância é a medida do tempo de viagem dos códigos (C/A, P, ou Y).

2.5 Tempo GPS

Os sinais transmitidos pelos satélites GPS são referenciados ao tempo GPS. Até junho/90, este tempo era mantido por um único relógio de partículas atômicas em uma das estações de monitoração do sistema. A prática atual é obter o tempo GPS derivado de uma combinação entre relógios de estações que monitoram todo o sistema e os relógios dos satélites, LANGLEY (1999).

O tempo GPS, UTC⁷ é baseado em uma contagem seqüencial de dias que perfazem a semana GPS, 1023 semanas GPS totalizam um ciclo GPS.

O "rollover" é o "bug" do final do primeiro ciclo GPS. Alguns segundos após a meia-noite, do tempo universal (UTC), no dia 22 de agosto de 1999, a semana GPS voltou de 1023 para zero. Com isso, há possibilidade de dificuldades para alguns usuários de GPS, caso os receptores não tenham sido programados com a correção deste detalhe.

O primeiro ciclo GPS compreendeu o período de 6 de janeiro/80 a 21 de agosto/99, com o final da semana GPS 1023. Atualmente o tempo GPS está no ciclo dois que iniciou em 22 de agosto/99 e irá até 6 de abril 2019. Ciclo

⁷ Universal Time Coordinate

três irá de 7 de abril de 2019 até 20 de novembro de 2038, e assim por diante, LANGLEY (1999).

3 A ATMOSFERA TERRESTRE E O SINAL GPS

Este capítulo discorre sobre a atmosfera terrestre. Apresenta uma descrição dos efeitos provocados pelas camadas da atmosfera no sinal emitido pelos satélites GPS ao percorrê-las: o atraso, a refração, a cintilação e a atenuação. Inclui-se ainda alguns modelos utilizados para representar esses efeitos numa tentativa de minimizar os erros por eles provocados.

3.1 Efeitos das explosões solares

Segundo COHEM, N.; DAVIES, K. (1994). as explosões solares são repentinas liberações de energia na atmosfera solar de radiação eletromagnética e algumas vezes de partículas energéticas e massa de plasma como pode ser visto na figura 1.

Figura 1 – Explosões solares com liberação de radiação eletromagnética e plasma (copiada de NASA Goddard Space Center, imagem obtida pelo telescópio de imagem ultra-violeta SOHO, no dia 19/03/2000, 07:19:08 h.)

Um súbito acréscimo nas emissões de raios-X resultante de explosões solares, causa um grande aumento na ionização nas camadas baixas da ionosfera do lado da terra iluminado pelo sol.

Esta ionização na ionosfera pode resultar em repentinos distúrbios nos sinais (SID⁸) de rádio com efeitos em muitas frequências. É possível que um SID apareça como uma onda curta enfraquecida por um período de poucos minutos até horas, dependendo da magnitude e duração das explosões solares.

Em algumas ocasiões, uma explosão solar é acompanhada pelo espalhamento de partículas de energia (principalmente prótons e elétrons). Uma outra possibilidade é a de que as explosões solares ocorram acompanhadas pela ejeção de gigantescas nuvens de plasma (CME⁹). As CME viajam pelo vento solar através do espaço interplanetário e algumas vezes alcançam a terra, provocando perturbações globais e anomalias no campo magnético terrestre.

3.2 Efeitos provocados pela atmosfera no sinal GPS

As partículas carregadas na atmosfera terrestre desempenham um papel fundamental em uma ampla gama de fenômenos geofísicos, incluindo auroras, reflexão de ondas, flutuações no campo geomagnético e a manutenção do campo elétrico temporal entre a superfície terrestre e a atmosfera superior.

Os sinais emitidos pelas antenas dos satélites GPS iniciam sua trajetória no espaço, que é essencialmente vácuo na cobertura atmosférica terrestre. A ionosfera é a primeira camada relevante encontrada pelos sinais GPS em sua propagação, BRUNNER;WELSCH (1993).

A ionosfera é um meio dispersivo para as ondas de rádio, onde a velocidade de propagação depende da frequência da onda. Assim, pode-se

⁸ Sudden Ionospheric Disturbance

⁹ Coronal Mass Ejections

eliminar quase que totalmente os efeitos que ela provoca na propagação dos sinais GPS através do uso simultâneo de duas ondas com frequências diferentes.

Tendo passado pela ionosfera, o sinal GPS sofre um segundo tipo de atraso na atmosfera neutra. Este atraso neutro é causado por ambas, a tropopausa e a troposfera.

Devido as dimensões dos atrasos que ocorrem na troposfera, a comunidade geodésica tem atribuído o mesmo nome ao atraso neutro como atraso troposférico.

Se a superfície de pressão é conhecida com rigor, pode-se modelar adequadamente o atraso troposférico da camada seca. Incluindo-se a parte relativa ao equilíbrio hidrostático, onde o atraso é estimado pela lei dos gases.

O atraso que ocorre na parte úmida, causado pelo vapor d'água nas camadas baixas da troposfera, similar ao atraso ionosférico, é imprevisível e pode sofrer rápidas oscilações, especialmente na presença de frentes meteorológicas.

Na troposfera, que é a parte baixa da atmosfera terrestre, a temperatura diminui com o crescimento da altitude e quase todas as atividades descritas coletivamente como "temporais", ocorrem nesta camada.

A espessura da troposfera não é constante, varia entre 9 e 16 km dos pólos à região equatorial respectivamente. A camada superior a troposfera chama-se tropopausa até cerca de 50 km. Devido as duas camadas, troposfera e tropopausa, fazerem parte da atmosfera neutra, freqüentemente referem-se as duas pelo mesmo nome, Troposfera, BRUNNER;WELSCH (1993).

Depois de passar pela ionosfera, os sinais GPS, viajam através da atmosfera neutra de acordo com figura 2.

Figura 2 - As camadas da atmosfera.

3.3 A troposfera

É uma camada não dispersiva para ondas de rádio, na qual atrasos na chegada da fase e da modulação das portadoras do sistema GPS, tem praticamente o mesmo valor.

O atraso troposférico ocorre nas medições GPS. Devido a impossibilidade de medi-lo diretamente, utiliza-se então o recurso da modelagem matemática.

Numa trajetória curta através da troposfera, na direção zenital, o atraso troposférico resulta em um acréscimo na medida aparente de cerca de 2,4 metros. O atraso é diretamente proporcional ao ângulo zenital, BRUNNER;WELSCH (1993).

Os efeitos da propagação troposférica não são significativos na navegação GPS para posicionamento de baixa precisão, apenas para posicionamento geodésico, no qual os efeitos troposféricos podem ser uma severa limitação, principalmente para a componente vertical da posição.

A atmosfera neutra muda a velocidade e direção de ondas de rádio. Ambos os efeitos, podem ser descritos pela variação do índice de refração do meio. O índice de refração é definido como sendo a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz num determinado meio.

A direção de propagação é descrita pelas leis da geometria ótica: Leis de Snell da refração. O índice de refração do ar, n , é ligeiramente maior que 1, sendo assim, utiliza-se por conveniência a refratividade N , onde: $N = 10^6(n - 1)$.

A refratividade de uma parcela do ar em particular, é a soma de dois termos: $N = N_A + N_W$. Onde N_A é a parcela da refratividade proporcional ao total de densidade do ar, e N_W é determinada principalmente pela densidade de vapor d'água contida no ar.

As densidades são funções das pressões dos gases secos, do vapor d'água e de suas temperaturas. O gráfico 1 apresenta perfis N_A e N_W em um gráfico de altitudes versus refratividade.

Gráfico 1 - Perfis das refratividades N_A e N_W versus altitude. Adaptada de BRUNNER;WELSCH(1993).

N_A é desprezível para altitudes iguais ou superiores a 40 quilômetros. Portanto, somente a troposfera e a estratosfera são importantes na propagação eletricamente neutra de sinais de satélites, BRUNNER;WELSCH (1993).

A troposfera produz efeitos de atenuação que geralmente estão abaixo de 0,5dB e efeitos de atraso da ordem de 2 a 25m. Esses efeitos variam em função do ângulo de elevação.

Baixos ângulos de elevação produzem um comprimento de trajetória mais longo pela troposfera e também variam com o perfil detalhado de densidade dos gases na atmosfera versus altitude.

3.3.1 Frentes meteorológicas

São importantes fenômenos meteorológicos que ocasionam mudanças no tempo, também são relevantes sob o ponto de vista da geodésia. As frentes meteorológicas ocorrem na troposfera, sendo assim, podem provocar significativos distúrbios nas observações GPS, mais especificamente no atraso troposférico do sinal.

Uma frente meteorológica é limitada por duas massas de ar com características diferentes, especialmente temperatura, direção do vento e umidade. Dependendo da região, de sua direção e movimento, ela pode ser denotada como frio ou calor.

BRUNNER;WELSCH (1993), discutiram sobre os efeitos troposféricos nas medições GPS. Mencionaram que em casos extremos, a parcela úmida do atraso pode variar de mais de 3cm/h, durante a passagem de uma frente.

A maioria dos softwares de processamento GPS, consideram o atraso troposférico, estimando o parâmetro de atraso zenital, que é função do ângulo de elevação dos satélites com relação ao ponto de medição.

Tradicionalmente, variações troposféricas no tempo, tem sido realizadas por técnicas de estimativas estocásticas, alcançando a sofisticação do filtro de Kalman, para simplesmente prever, um novo desvio do atraso a intervalos regulares.

Para o posicionamento diferencial, BRUNNER;WELSCH (1993) sugerem a seguinte regra para a propagação do erro troposférico em estimativas de altura GPS (para um ângulo de elevação de até 15°: erros da diferença de altura é igual a três vezes o erro do atraso troposférico.

Um modelo troposférico bem elaborado deveria teoricamente contemplar as rápidas variações no atraso, portanto, removendo-se do processamento, os dados referentes aos dias muito afetados por frentes meteorológicas, melhora-se a repetibilidade da componente vertical da estação.

Repetibilidade é uma medida da precisão interna que é freqüentemente utilizada para descrever a repetibilidade das medidas gravadas por um dado receptor GPS numa mesma estação. É essencialmente o desvio padrão diário, considerando os erros diários e é calculada como:

$$repetibilidade = \left(\frac{n \sum_i r_i^2 / e_i^2}{n-1 \sum_i 1 / e_i^2} \right)^{1/2}$$

Equação 1 - Repetibilidade

Onde:

n = número de dados de pontos (dias);

r_i = é o resíduo diário (derivado da regressão linear de uma série temporal de pontos);

e_i = erro formal diário (desvio padrão).

Estima-se que dependendo da intensidade da frente meteorológica e da estratégia de estimativas utilizada, a frente pode degradar a precisão de uma rede regional em vários milímetros. Este efeito é ainda pior, se o software de processamento for incapaz de resolver o atraso troposférico, com uma variação temporal. Este é o caso de muitos softwares comerciais.

Pode ocorrer também da frente não afetar as soluções de uma pequena rede GPS, devido a muitos dos erros serem eliminados no modo diferencial.

Entretanto, frentes meteorológicas são prováveis degradadoras da precisão da componente vertical das estações se os vetores são maiores ou iguais a 10Km. Sendo assim, deve-se conferir a previsão de frentes

meteorológicas, antes de iniciar uma campanha GPS. Se a precisão da altura é importante, talvez deva-se esperar a passagem da frente.

Deve-se processar os dados em softwares que sejam capazes de utilizar estas informações a fim de otimizar o resultado final.

No futuro, sistemas de satélites mais econômicos, devem substituir as radiosondas. Uma constelação de microsátélites com órbitas baixas e utilizando receptores GPS deve resolver estes problemas.

Há um sistema protótipo chamado GPS/Met System no qual combina-se medidas GPS com dados meteorológicos com a finalidade de fornecer uma cobertura global detalhada de perfis de temperatura e umidade da atmosfera.

Se o usuário não confia nas informações meteorológicas diárias, uma outra solução que pode ser utilizada, é a de remover os dados afetados pelas frentes da série temporal a ser processada.

3.3.2 Efeitos troposféricos

O sinal emitido por um satélite GPS é refratado pela atmosfera durante sua trajetória até a antena do receptor. A refração atmosférica próximo à superfície terrestre causa um atraso que é função da trajetória real (ligeiramente curva), do raio de curvatura e do índice de refração dos gases ao longo dessa linha.

3.3.2.1 Atenuação troposférica

É chamada de atenuação do oxigênio. É da ordem de 0.035dB para um satélite no zênite. Porém, pode ser 10 vezes maior (em dB) para baixos ângulos de elevação.

Na prática pode-se evitar este efeito, usando-se apenas satélites GPS com elevação acima de 5° do horizonte do observador, não somente devido aos níveis baixos de sinal associado a atenuação troposférica, mas também

devido a grandes incertezas da troposfera, atraso ionosférico e aos grandes efeitos de cintilação causados por ambas as camadas troposfera e ionosfera.

3.3.2.2 Atenuação torrencial

É um efeito provocado pela chuva no sinal GPS, contudo, representa uma parcela muito pequena do efeito nas frequências de interesse das bandas GPS. Como exemplo, pode-se citar que para uma frequência de 2GHz, até mesmo para uma densidade de chuva de aproximadamente 100mm/h, representam menos que 0,01dB/Km, SPILKER (1994).

3.3.2.3 Cintilação troposférica

Causada principalmente por irregularidades e turbulências no índice de refração da troposfera a poucos quilômetros da superfície terrestre. Varia com o tempo e depende da frequência, do ângulo de elevação e condições meteorológicas, especialmente da densidade das nuvens.

Com ângulos de elevação acima de 10°, o efeito predominante é o espalhamento posterior causado pela turbulência atmosférica. Nas frequências GPS esses efeitos são relativamente pequenos exceto por uma pequena fração de tempo e com baixos ângulos de elevação.

3.3.2.4 Atraso troposférico

Para uma atmosfera simétrica, o atraso depende somente do perfil vertical superior da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite.

Um usuário desatento que utilize satélites GPS com ângulos de elevação menores que 5° está sujeito a dois efeitos, o multi-caminhamento do sinal e os efeitos do atraso troposférico, que aumentam muito para baixos ângulos de elevação, KLOBUCHAR (1994).

Há dois principais atrasos que ocorrem na troposfera. O primeiro e grande efeito é o atraso excessivo na atmosfera seca, causado principalmente pelo N_2 e O_2 .

O atraso zenital na atmosfera seca corresponde a aproximadamente 2,3m e varia com a temperatura local e a pressão atmosférica de forma razoavelmente previsível¹⁰. O efeito da atmosfera seca varia de menos que 1% em poucas horas.

O segundo efeito ocorre na atmosfera úmida, também chamado de efeito do vapor d'água. É geralmente pequeno, varia entre 1cm e 80cm para o zênite, isto é, talvez 1/10 do atraso verificado na atmosfera seca.

O efeito do vapor d' água varia notavelmente, 10% a 20%, em poucas horas, sendo menos previsível com medidas de umidade superficial. Medidas com radiômetro de dupla frequência de 22,31GHz, podem ser feitas para tornar as previsões mais precisas, mas essas medidas são bastante complexas e impossíveis para muitas aplicações de navegação.

O atraso troposférico é causado em geral pela variação no índice de refração n dos gases atmosféricos, onde $n > 1$. No espaço livre $n=1$, isto possibilita que o sinal viaje abaixo da velocidade da luz (velocidade de grupo) no meio e viaje a uma velocidade " c " no espaço livre. Assim um raio com um comprimento infinitesimal ds que viaja através de um meio com índice de refração n , tem um atraso $d\tau = n \cdot ds/c$ e tem uma distância equivalente a: $c \cdot d\tau = n \cdot ds$.

O atraso é medido em muitos metros, onde c é omitido. A diferença entre o comprimento real do atraso $S = c\tau = \int n(s)10^{-6}ds$ e a distância geométrica S_g , é o atraso troposférico Δ .

¹⁰ Em frequências oscilando abaixo de 15 GHz, ambos os componentes seco e úmido tem efeito. Nas frequências óticas, o efeito total é atribuído ao componente seco.

A diferença entre o índice de refração real e a unidade é da magnitude de $n-1 \cong 2,7 \cdot 10^{-4}$ ao nível do mar e varia com a altitude, latitude e várias condições meteorológicas.

Nas frequências da banda L dos sinais GPS, o índice de refração é constante com a frequência, e consequentemente, não dispersivo, isto é, $dn/ds=0$, e assim, a velocidade de grupo e a velocidade da fase são as mesmas. Esta equivalência não se verifica na ionosfera.

As causas da variação do índice de refração variam espacialmente. A trajetória descrita pelo sinal GPS é ligeiramente curva quando comparada ao comprimento geométrico retilíneo, como mostra a figura 3, na qual a curvatura foi bastante exagerada para melhor evidenciá-la. O comprimento total de P_1 até P_2 em metros é dado pela equação 2.

$$S_g = \int_{geo} ds \quad \text{e} \quad \tau_{geo} = \int_{geo} n(s) ds$$

Equação 2 - trajetória geométrica real

Figura 3 – Representação das diferentes trajetórias, a real e a geométrica através da troposfera. Adaptada de SPILKER JR.(1994).

A trajetória real (curva) de P_1 ocorre inicialmente próximo ao zênite, de modo que passa através da região de alta constante dielétrica mais

rapidamente. Assim, o comprimento da trajetória real S é maior que o comprimento geométrico linear da trajetória (corda retilínea) S_g em metros:

Embora seja um atraso pequeno, utiliza-se a notação τ_{geo} , para representar o atraso que poderá ser acumulado ao longo da trajetória geométrica linear (corda).

A notação integral para a trajetória geo, define o comprimento reto. O atraso τ é menor que τ_{geo} do comprimento reto.

O interesse principal é o excesso de demora $\Delta = \tau - s$ causado pela atmosfera. A diferença entre os dois comprimentos, real e reto é muito pequena $S - S_g < 0,1m$, exceto para baixos ângulos de elevação.

3.3.3 Modelos de índice de refração, temperatura e pressão

A variação da refratividade da atmosfera versus altitude é extremamente complexa. Os modelos para índice de refração são baseados em coeficientes ajustados para conjuntos de dados medidos e extensos cálculos matemáticos.

3.3.3.1 Modelos de gases ideais - processo adiabático.

A atmosfera é composta de um gás ideal simples para pressão versus altitude $P(h)$. A baixas altitudes como é o caso da troposfera, há um movimento ininterrupto ascendente e descendente das massas de ar.

Considera-se como uma aproximação que o processo é reversível e adiabático, isto é, os gases não aquecem entrando ou saindo do processo.

Também considera-se que os gases são ideais¹¹ $PV=RT$. Para um gás ideal com pressão constante capacidade térmica C_p e volume à capacidade térmica constante C_v , onde $C_p = C_v + R$, processo adiabático reversível com transferência de calor é dado pelo seguinte:

$$C_v dT + PdV$$

Equação 3 – Processo adiabático de transferência de calor

3.3.3.2 Modelo de estratosfera isotérmica de pressão versus altitude.

No topo da troposfera (término da tropopausa), em altitude h_T ($h_T \approx 12 \text{ Km}$) e ao longo da estratosfera até a estratopausa, pode-se utilizar como aproximação, a condição de temperatura constante (isotérmica), exceto na tropopausa onde a temperatura não é verdadeiramente constante mas varia mais lentamente que na troposfera.

Para uma região com gás ideal e temperatura constante, a equação $dP/P = (Mg/RT)dh$ pode integrar facilmente, porque T é constante. Esta condição isotérmica conduz à equação da altura barométrica exponencial, para pressões e altitudes h acima de h_T :

$$P = P_0 \exp \left[\frac{-Mg(h - h_T)}{RT_T} \right]$$

Equação 4 – Pressão na tropopausa

Onde R é a constante universal dos gases, $8,31434 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K})$; g é a aceleração de queda livre na estratosfera; P_T é a pressão na tropopausa; P_0 é

¹¹ Os gases não obedecem estritamente as leis dos gases ideais e as equações de Van der Waals, onde $[P + (a/V^2)](V - b) = RT$ é a representação mais precisa.

a pressão ao nível do mar; T_T é a temperatura da tropopausa; e M é a massa molar do ar ($M \approx Md$) na estratosfera. Assim, para o modelo isotérmico, a pressão diminui exponencialmente com a altitude.

3.3.4 Modelos troposféricos

Dentre estes incluem-se os modelos de: Hopfield, Saastamoinen, Black & Eisner onde são descritas as funções empíricas preconizadas por Marini, JANES, H.W.; LANGLEY, R.B.; WEWBY, S.P. (1989).

São fatores considerados na formulação das equações de refração, na estrutura atmosférica:

- ↳ Estimativas do atraso zenital para o ângulo de elevação de satélite;
- ↳ A capacidade para variar os parâmetros dos modelos sob condições locais.

A rádio-refração dentro da atmosfera produz um atraso não dispersivo no tempo de recepção de um sinal eletromagnético relativo no espaço livre de propagação, resultando em medidas de distâncias muito maiores que se fossem medidas geometricamente.

As principais fontes de erros na aproximação analítica da modelagem do atraso troposférico, podem ser resumidas como:

- ↳ Incertezas no atraso zenital;
- ↳ Aproximações no perfil de refratividade radial;
- ↳ Traçado das funções de aproximação.

Para a modelagem do atraso troposférico pode-se somar os erros na determinação de parâmetros meteorológicos de superfície e negligenciar os efeitos de temperatura lateral e gradientes de umidade.

3.3.4.1 Modelo de HOPFIELD

O modelo de Hopfield é um dos mais utilizados e emprega as definições dos componentes seco e úmido da refratividade. A atmosfera seca é aproximada de uma camada politrópica simples que estende-se da superfície terrestre até uma altitude aproximada de 40Km. O perfil de refratividade seca é escrito na forma empírica:

$$N_d(h) = N_{d0} \left[\frac{H_d - h}{H_d} \right]^4 \quad \text{para } h \leq H_d = 43\text{Km e}$$

Equação 5 – Perfil de refratividade seca

$$H_d = 40136m + 148,72m/^{\circ}C.T_c$$

Por analogia, o modelo de Hopfield assume uma função de perfil idêntico a equação 5 para a atmosfera úmida, mas com uma média do componente de escala de altitude H_w de aproximadamente 11Km.

$$N_w(h) = N_{w0} \left[\frac{H_w - h}{H_w} \right]^4$$

Equação 6

Onde:

T_c é a temperatura da superfície em graus Celsius;

N_{d0} e N_{w0} são os índices de refração para as superfícies seca e úmida respectivamente;

h é a altitude;

H_d e H_w são referentes às alturas acima das superfícies de nível onde são medidos os índices de refração N_{d0} e N_{w0} respectivamente.

A integração radial do perfil das funções dos componentes então resultam na equação 7 do atraso zenital total.

$$D_t^z = \frac{10^{-6}}{5} [N_{d0} H_d + N_{w0} H_w] = \Delta_d + \Delta_w$$

Equação 7

Onde:

Δ_d e Δ_w são os atrasos zenitais dos componentes seco e úmido respectivamente.

YIONOULIS(1970); GOAD;GOODMAN(1974), BLACK(1978) e BLACK;EISNER(1984) traçaram funções para o modelo de Hopfield, todos tiveram em comum um ponto de derivação, fixando $i=1$ para o componente seco e $i=2$ para o componente úmido, o modelo de Hopfield é rescrito da seguinte forma:

$$N_i(r) = N_{0i} \left[\frac{r_i - r}{r_i - r_0} \right]^4$$

Equação 8

Onde r_i é o raio geométrico da escala de altitude do componente H_i . O traçado do atraso zenital então ocorre baseado na seguinte aproximação:

$$\sec \Psi(r) \approx \sec z(r) = \frac{1}{\sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 z_0}}$$

Equação 9

Onde:

Ψ é o ângulo zenital aparente do raio refratado;

z é o ângulo zenital da trajetória reta (corda);

r_0 e z_0 denotam valores superficiais.

Tal que:

$$D_{ii} \approx 10^{-6} \int_s N_i(r) \sec \Psi(r) dr \approx \frac{10^{-6} N_{0i}}{(r_i - r_0)^4} \int_{r_0}^{r_i} \frac{(r_i - r)^4}{\sqrt{r^2 - r_0^2 \sec^2 \Psi_0}} dr$$

Equação 10

YIONOULIS (1970) e GOAD;GOODMAN (1974), aproximaram uma resolução de uma expansão em série da integral. BLACK(1978) e BLACK; EISNER(1984) empregaram uma forma de aproximação fechada baseada em considerações geométricas.

As diferenças na precisão numérica destas aproximações são relativas a ligeiras aproximações do traçado comum a cada uma. Estas fontes de erros posteriores são mais proeminentes para grandes ângulos zenitais.

HOPFIELD (1976) afirma que estimativas negligenciando a curvatura da trajetória, necessitam de uma correção da ordem de 3mm, 3cm e 19 cm para 70°, 80° e 85° de ângulos zenitais respectivamente.

Preliminarmente, nossa análise para o traçado do raio num perfil atmosférico padrão, indica que uma simples aproximação de camada politrópica pode produzir correções da mesma ordem de magnitude.

Para traçar estes erros de aproximação, devem ser somados os efeitos das incertezas do atraso zenital notados acima e o aumento das influências nas proporções das aproximações para a secante dos ângulos zenitais.

3.3.4.2 Modelo de SAASTAMOINEN

O modelo de Saastamoinen emprega definições dos componentes da refratividade hidrostática. A atmosfera seca é aproximada por duas camadas: A troposfera politrópica que estende-se da superfície até uma altitude aproximada entre 11-12Km, e a estratosfera isotérmica, vai desde o topo da tropopausa até aproximadamente 50Km.

O vapor d'água atmosférico é forçado pela troposfera e assume a seguir uma forma funcional semelhante ao perfil de pressão politrópico, tal que:

$$e(h) = e_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\gamma \frac{gM}{R\alpha}}$$

Equação 11

Onde:

$\gamma = 4$ é um parâmetro determinado empiricamente;

g é a aceleração gravitacional;

$T = 273$ graus Kelvin;

R é a constante universal dos gases;

T_0 é a temperatura do ar na superfície;

e_0 é a pressão do vapor d'água na superfície;

M é a massa molar do ar úmido na altitude h ;

$\alpha = -dT/dh$ é o diferencial de temperatura linear de uma camada politrópica;

O componente hidrostático do atraso zenital é dado pela equação 12 e independe do conteúdo de vapor d'água.

$$D_1^Z = 10^{-6} K_1 \frac{R}{M_a g} P_0$$

Equação 12

Onde P_0 é a integração da densidade do ar seco na direção zenital a .

O componente não hidrostático (vapor d'água) do atraso zenital é obtido pela integração da equação da refratividade e pode ser escrito como na equação 13.

$$D_{tw}^z = \frac{10^{-6}}{C\alpha} \left\{ \left[K_2 - K_1 \frac{M_w}{M_d} \right] e_0 + \left[\frac{K_3}{1 + \frac{1}{T_0}} \right] \frac{e_0}{T_0} \right\}$$

Equação 13

Onde:

$$C = \gamma \frac{gM}{R\alpha};$$

K_1, K_2 e K_3 são coeficientes determinados empiricamente, diversos valores tem sido determinados nos últimos 40 anos através de experimentos com ressonância em defractômetros de cavidade. Por conveniência são apresentados os valores de SMITH; WEINTRAUB (1953) apud KLOBUCHAR(1994).

$$K_1 = 77,61 \text{ K/mb};$$

$$K_2 = 71,6 \text{ K/mb};$$

$$K_3 = 3,747 \cdot (10)^5 \text{ K}^2/\text{mb};$$

M_d e M_w representam a massa molar do ar seco e vapor d'água respectivamente;

Aplicando valores médios para altitude, Saastamoinen derivou uma forma aproximada para o atraso zenital, referente à fórmula padrão que é dada por:

$$D_t^z = \frac{0,002277}{g} \left\{ P_0 + \left[\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right] e_0 \right\}$$

Equação 14 – Atraso zenital do Modelo de Saastamoinen

Onde :

P_0 é a pressão atmosférica superficial em milibars;

e_0 é a pressão do vapor d'água na troposfera em milibars;

T_0 é temperatura superficial em Kelvins;

D_t^z é o atraso zenital em metros e

$g'=1+0.0026\cos^2\phi+0.00028h_0$ é a correção para a gravidade padrão em m/s^2 , determinado em função da latitude da estação e da altitude ortométrica em quilômetros.

SAASTAMOINEN (1973) estimou a precisão do componente hidrostático entre 2-3 mm rms. As incertezas do componente úmido são estimadas entre 3-5 cm de rms. O traçado de Saastamoinen para o atraso zenital é baseado nas leis de Snell da refração para uma atmosfera esfericamente simétrica tal que:

$$\sec \Psi(r) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{n_0^2 r_0^2}{n^2(r) r^2} \sin^2 \Psi_0}}$$

Equação 15

Onde:

Ψ_0 é o ângulo zenital inicial refratado;

n_0 é o índice de refração na superfície;

r_0 é o raio geométrico entre as antenas do satélite e receptor;

r é o raio curvo entre as antenas do satélite e receptor.

A solução formal desta equação é estimada entre 1-2cm de rms no nível dos componentes secos e entre 10-20cm de rms para o nível dos componentes úmidos sujeitos a ângulos zenitais menores que 80°.

Parte deste atraso surge dos efeitos das incertezas do atraso zenital no nível dos componentes úmidos, variações locais e sazonais na temperatura radial, nos perfis de umidade, temperatura horizontal e gradientes de umidade.

Nestas considerações, a forma precisa da solução de Saastamoinen mostra a possibilidade de incorporar variações locais e sazonais na estrutura dos perfis nos processos de predição, adicionando assim precisão para baixos ângulos de elevação.

3.3.4.3 Modelo de MARINI e MURRAY

O modelo de Marini e Murray para estimar o atraso troposférico causado pela refração dos sinais GPS na atmosfera não ionizada (atmosfera neutra) é representado pela seguinte equação:

$$\tilde{T}_k^P = \frac{1}{(1 - 0,0026 \cos 2\phi - 0,00031h)} \left[\frac{(A + B)}{\sin \varepsilon + \frac{B/(A+B)}{\sin \varepsilon + 0,001}} \right]$$

Equação 16 - Atraso troposférico de Marini e Murray

Onde:

$$A = 0,002357P_0 + 0,000141e_0$$

$$B = (1,084 \cdot 10^{-8})P_0T_0K + (9,568 \cdot 10^{-8}) \frac{P_0^2}{T_0 \left(3 - \frac{1}{K}\right)}$$

$$K = 1,163 - 0,00968 \cos 2\phi - 0,00104T_0 + 0,00001435 P_0$$

$$e_0 = 6,11 \cdot 10^{\left[\frac{7,5(T_0 - 273,15)}{237,3 + (T_0 - 273,15)} \right]} \frac{R_h}{100}$$

Onde:

ϕ é a latitude da estação (grau);

h é a altura da estação em relação ao nível do mar (m);

ε é o ângulo de elevação do satélite (grau);

P_0 é a pressão atmosférica no local observado (mb);

e_0 é a pressão do vapor d'água no local observado (mb);

T_0 é a temperatura no local observado (Kevin);

R_h é a umidade relativa do ar no local observado (%).

3.4 A ionosfera

A Radiação solar golpeia a atmosfera com uma densidade de potência de 1370 Watts/m^2 ou $0,137 \text{ Watts/cm}^2$. Este intenso nível de radiação é espalhado por um largo espectro que varia de frequências de rádio, passa pelo infravermelho (IR), pela luz visível até a radiação solar ultravioleta (UV).

Estes fótons de energia agindo nestas frequências são capazes de desalojar um elétron de um átomo de gás neutro ou molécula durante uma colisão. A figura 4 é uma explicação simplificada deste processo de formação da ionosfera.

Figura 4 – Processo simplificado de produção de elétrons livres para formação da ionosfera. Adaptado de <http://w3.nrl.navy.mil/projects/haarp/ion1.html>.

A radiação solar incide em um átomo de gás (ou molécula). Neste processo, parte desta radiação é absorvida pelo átomo, onde são produzidos um elétron livre e um íon positivamente carregado.

Raios cósmicos e partículas de vento solares também desempenham um papel neste processo, contudo, seus efeitos são secundários comparados com os provocados pela radiação eletromagnética do sol.

Nos níveis mais altos da atmosfera exterior da Terra, a radiação solar é muito forte mas há poucos átomos para interagir, assim a ionização é pequena. Com a diminuição de altitude, mais átomos de gás estão presentes possibilitando o aumento do processo de ionização.

Porém, ao mesmo tempo ocorre um processo inverso chamado recombinação, no qual, um elétron livre é capturado por um íon positivo. O ponto de equilíbrio entre estes dois processos determina o grau de "ionização atual" num dado momento.

Devido a composição da atmosfera variar com altura, a taxa de produção de íons também muda e isto conduz à formação de vários cumes de ionização distintos, o "D," "E," "F1, e "F2".

KLOBUCHAR (1991) afirma que a ionosfera é uma importante fonte de erros das distâncias e de taxa de oscilação desses erros para os usuários do sistema de posicionamento global (GPS), que necessitem de medidas de alta precisão. Eventualmente, a extensão dos erros da troposfera e da ionosfera podem ser comparáveis. Mas a variabilidade da ionosfera terrestre é muito maior que da troposfera, motivo pelo qual é mais difícil para modelar.

A extensão dos erros ionosféricos, pode variar de apenas poucos metros até muitas dezenas de metros no zênite, considerando que a dimensão dos erros troposféricos no zênite é geralmente de 2 a 3 metros.

Felizmente, a ionosfera é um meio dispersivo no qual o índice de refração é função da frequência de operacional. Usuários GPS de dupla frequência podem obter vantagens destas propriedades da ionosfera para medir e corrigir diretamente distâncias ionosféricas de primeira ordem e a sua taxa de oscilação.

A ionosfera pode mudar rapidamente em valores absolutos, chegando a mudar de pelo menos uma ordem de magnitude, durante o decorrer de cada dia.

Os principais efeitos que a ionosfera pode provocar no sinal GPS são os seguintes:

- ↳ Atraso de grupo na modulação do sinal;
- ↳ Avanço na fase da portadora ou erro na distância relativa;
- ↳ Efeito Doppler, erros na taxa da distância;
- ↳ Rotação Faraday dos sinais polarizados linearmente;
- ↳ Refração ou curvatura da onda de rádio;
- ↳ Distorção de pulso nas formas da onda;
- ↳ Enfraquecimento da amplitude do sinal ou amplitude de cintilação;
- ↳ Cintilações de fase.

3.4.1 Características da ionosfera

Inicialmente, pode-se dizer que a ionosfera é formada por radiação ultravioleta ionizada do sol. Diferentes regiões da ionosfera são compostas por diferentes espécies químicas.

A ionosfera é um plasma fracamente ionizado, ou gás. Ela pode afetar a propagação de ondas de várias formas. Nela, elétrons e densidade de íons são considerados como sendo iguais. A densidade de íons é muito menor que 1% da densidade neutra para todas as altitudes, CHAPMAN (1931) apud KLOBUCHAR (1994).

Atualmente, sabe-se que ionosfera é composta das regiões D, E, F1 e F2, nomeadas na ordem de crescimento da altitude. O gráfico 2 ilustra as diferentes regiões e suas densidades de elétrons na ionosfera.

Gráfico 2– Temperatura e Densidade de elétrons para diferentes regiões da ionosfera versus altitude . Adaptado de www.icsl.ucla.edu/~cbiswas/nov97isl/index.htm.

As várias regiões da ionosfera são produzidas por diferentes comprimentos de onda de radiação solar.

Devido a atmosfera neutra estar aproximadamente em equilíbrio difuso, a escala de altitude de cada átomo neutro e espécie molecular cai exponencialmente com o crescimento da altitude acima da superfície terrestre.

Assim, a densidade neutra total é composta principalmente por espécies moleculares mais pesadas, espécies moleculares mais leves a baixas altitudes e espécies atômicas a grandes altitudes.

Elétrons gerados pela emissão de raios UV do sol, são livres para deslocar-se para grandes altitudes, seguindo as linhas de força magnéticas da terra.

Mudanças adicionais na densidade de elétrons acima de aproximadamente 180Km, são produzidas por campos elétricos, que fornecem elétrons para movimentar-se na direção perpendicular as linhas de força magnéticas, enquanto os ventos neutros podem causar o fluxo de elétrons para ambos, acima ou abaixo das linhas do campo magnético terrestre.

A composição química da região F2 é predominantemente atribuível a ionização do oxigênio atômico, considerando que a grandes altitudes é atribuída ao gás hidrogênio. A escala de altitude de cada espécie é: $H=kt/mg$, onde k é a constante de Boltzman, t é a temperatura absoluta, m é a massa de cada tipo e g é a aceleração da gravidade.

O parâmetro da ionosfera que produz os principais efeitos nos sinais GPS é o número total de elétrons. Este parâmetro é normalmente chamado de "TEC¹²" sendo expresso como o número de elétrons que atravessam uma coluna vertical de 1m² de seção transversal, que estende-se por toda a trajetória do sinal GPS, entre as antenas do satélite e receptor.

É na região F2 que ocorre a maior variação da densidade de elétrons, nela também ocorrem os grandes efeitos potenciais para os sistemas de ondas de rádio.

As principais características e importância de cada região da ionosfera para efeitos nos sinais GPS, são resumidos na tabela 2:

¹² Total Electrons Content

Região	Características
Região D	50-90 km. Não tem efeitos quantificáveis na frequência GPS;
Região E	90-140 km. Muito esbelta e tem efeitos desprezíveis nas frequências GPS;
Região F1	140-210 km, combinada com a região E, pode contribuir com mais de 10% do atraso ionosférico encontrado pelo GPS;
Região F2	210-1.000 km, é a mais densa e também a de maior variação, causando muitos dos potenciais efeitos nos sistemas de recepção GPS. A altura do cume da densidade de elétrons da região F ₂ , geralmente varia de 250 a 400 km.
Região H ⁺	>1.000km, é a protonosfera ¹³ . É de baixa densidade, mas estende-se além da altitude orbital dos satélites GPS. Densidade de elétrons desconhecida, pode ser uma significativa fonte de variabilidade do atraso para o usuário GPS.

Tabela 2 - Características das regiões ionosféricas

3.4.1.1 Índice de refração da ionosfera

O índice de refração da ionosfera é a base para os efeitos nos sinais GPS, descritos posteriormente sendo primordial para muitos propósitos.

Para quantificar os efeitos da propagação de ondas de rádio que atravessam a ionosfera, pode-se especificar o índice de refração do meio, n , expresso como:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y^2 r}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y^4 r}{4(1 - X - iZ)} + Y^2 l \right]}$$

Equação 17 – Índice de refração da ionosfera

¹³ Região de densidade de elétrons com altitude vertical acima de aproximadamente 1000 quilômetros

Onde:

$$\Downarrow X = Ne^2 / \epsilon_0 m \omega^2 = f_n^2 / f^2$$

$$\Downarrow Y_L = e.B_L / m.\omega, = f_H.\cos \theta / f$$

$$\Downarrow Y_T = e.B_T / m.\omega = f_H.\sin \theta / f$$

$$\Downarrow Z = v / \omega, \omega = 2\pi f,$$

Tal que:

f é a frequência de operação do sistema em Hz;

e = carga elétrica, $-1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb;

ϵ = é a permissividade no espaço livre, $= 8,854 \cdot 10^{-12}$ farad/m;

m = massa em repouso do elétron $= 9,107 \cdot 10^{-31}$ Kg;

θ = o ângulo do raio em relação ao campo magnético da terra;

v = frequência de colisão de elétrons-neutrons;

f_H = frequência de giro do elétron.

A frequência de giro do elétron f_H é 1,5MHz; a frequência do plasma f_N raramente excede 2MHz; e a frequência de colisão, f_v , é aproximadamente 104Hz, Assim, para uma precisão superior a 1%, o índice de refração n da ionosfera é dado por:

$$n = 1 - \left(X/2 \right)$$

Equação 18 – Índice de refração da ionosfera

Aplicando uma correção ionosférica de dupla frequência, removem-se os efeitos ionosféricos de primeira ordem, os quais podem chegar aproximadamente entre 30 a 50 metros. Mesmo para TEC extremamente elevado das camadas de maior altitude da ionosfera, restam ainda efeitos abaixo de 3,6 e 7,6 para as portadoras L1 e L2 respectivamente, HARTMANN;LEITINGER (1984) apud WANNINGER; SEEBER; CAMPOS (1991).

Em aplicações geodésicas de observações GPS sob posicionamento diferencial, os efeitos ionosféricos para bases curtas¹⁴ podem ser desprezados, se os valores de TEC são pequenos e a ionosfera é tranqüila, sendo esta a condição ionosférica que normalmente ocorre em regiões de latitude média, WANNINGER; SEEGER; CAMPOS (1991).

No caso de bases longas e de elevados valores de TEC, usuários GPS com receptores de simples frequência, encontram um erro na escala horizontal superior a muitos ppm. Adicionalmente, a distribuição de satélites com azimutes não uniformes, causam rotação da linha base, SANTERRE (1989) Apud WANNINGER; SEEGER; CAMPOS (1991). Os resultados obtidos com receptores de dupla frequência estão livres desse efeitos.

O índice de refração da ionosfera terrestre é responsável pela curvatura das ondas de rádio diretas, trajetórias geométricas lineares entre o satélites e a terra.

Normalmente, para o usuário GPS, a pequena curvatura das ondas de rádio não é problema, a refração angular, ou curvatura, produz um ângulo de elevação aparente mais alto que a elevação geométrica. MILLMAN; REINSMITH (1974) apud Klobuchar (1991), tem expressões relacionando a refração com a curvatura angular resultante.

Além disso, podem ocorrer erros no azimute de sinais de rádio ao atravessarem a ionosfera. Dependendo do gradiente azimutal superior do TEC que geralmente são menores que o gradiente vertical do TEC, podem ser desprezados em muitos casos práticos.

A ionosfera pode produzir dispersão do espectro do sinal GPS, mas esses efeitos são muito pequenos.

As irregularidades da ionosfera terrestre, produzem efeitos de difração e refração, causando enfraquecimento do sinal, podendo acentuar severamente a capacidade de localização das antenas dos receptores GPS.

Há possibilidade de ocorrer também o aumento no sinal GPS, mas o usuário não pode fazer uso do receptor por breves períodos de sinal muito forte. O enfraquecimento pode ser mais severo, pois o nível do sinal ficaria

¹⁴ menor ou igual a 10 Km

totalmente abaixo da capacidade do receptor, passado este efeito ele pode ser imediatamente readquirido.

3.4.2 Cintilações equatoriais

A região de cintilação equatorial abrange cerca de 30° para os dois lados do equador magnético terrestre. Os efeitos mais intensos são encontrados até aproximadamente 10° .

Fortes efeitos de cintilação que eventualmente foram observados em regiões próximas da equatorial, são limitados a aproximadamente 1 hora depois do pôr do sol até a meia noite local. A figura 5, feita por GOODMAN;AARONS (1990) apud KLOBUCHAR (1994) ilustra os períodos das fortes cintilações na região equatorial para a banda L.

Figura 5 – Representação pictórica do pior caso de enfraquecimento da banda L (cintilação ionosférica, adaptada de KLOBUCHAR 1991).

De acordo com WANNINGER (1993) as cintilações ionosféricas são causadas por irregularidades em pequena escala, no conteúdo de elétrons da ionosfera, com comprimentos de ondas que variam de alguns metros até quilômetros.

Há estações e efeitos do ciclo solar que também reduzem as oportunidades da cintilação ionosférica nas regiões equatoriais. Nos meses de abril até agosto, há pequenas chances de significantes efeitos de cintilação nas regiões americana, africana e indiana GOODMAN;AARONS (1990) apud KLOBUCHAR (1994).

3.4.3 Efeitos ionosféricos de cintilação de fase.

Rápidas alterações na fase recebida, são chamadas de cintilações de fase. É possível que grande parte desse efeito ocorra mais em função da rapidez da variação que em função da própria variação do conteúdo de elétrons na ionosfera.

Normalmente as regiões da terra onde são intensas a cintilação de fase, não estão limitadas a região equatorial, pois, durante as principais tempestades magnéticas ocorridas em março de 1989, esses efeitos foram observados acima de latitudes médias, KLOBUCHAR (1994).

3.4.4 TEC-Total Electron Content

O parâmetro da ionosfera que mais produz efeitos nos sinais GPS, é o TEC. Um valor de TEC igual a 10^{16}el/m^2 é chamado de TEC unitário. Valores de TEC de 10^{16} a 10^{19}el/m^2 ao longo da trajetória da onda de rádio representam os extremos de valores observados na ionosfera da terra.

Não há valores de TEC observados na ionosfera terrestre superiores a 10^{19}el/m^2 . O TEC normalmente é expresso em TEC equivalente vertical, obtido pela divisão entre o TEC inclinado e a secante do ângulo de elevação numa determinada altura ionosférica média, usualmente entre 350 e 400Km.

Estudos diurnos, sazonais e do comportamento do ciclo solar, tem sido conduzidos por muitos pesquisadores, usando diversas medições técnicas por mais de 30 anos. As medidas de TEC são geralmente feitas através de sinais de rádio dos satélites, oportunamente observados com ângulos de elevação arbitrários.

O pior caso de erro da distância inclinada, causado pela ionosfera terrestre, incluindo o fator de conversão 3 do TEC vertical para baixos ângulos de elevação dos satélites GPS, durante condições solares máximas, pode ser de 300ns, ou 100 metros, KLOBUCHAR (1994).

O fluxo ultravioleta do sol, produz a ionização de várias regiões da ionosfera. O sol varia a intensidade de energia externa UV num ciclo aproximado de 11 anos.

Medições diretas do fluxo de radiação UV podem ser feitas acima da ionosfera. Apenas um número limitado de medições diretas tem sido realizadas, mas a utilidade de outras medidas do fluxo da atividade solar UV é o número de manchas solares observadas no disco solar. Manchas solares tem sido observadas desde 1700.

O conteúdo total de elétrons (TEC) da ionosfera terrestre, sofre as influências diretas das explosões solares e das falhas na coroa solar, ou seja, o lado da ionosfera terrestre que se encontra iluminado pelo sol, sofre uma variação brusca no parâmetro TEC.

Uma das consequências destas perturbações solares são as modificações no campo magnético terrestre, resultando em tempestades geomagnéticas.

A camada ionosférica tende a manter o equilíbrio do TEC como um todo, sendo assim, jatos de elétrons livres migram do lado iluminado para o lado que acabou de escurecer da ionosfera. Estes jatos de elétrons são mais intensos e comuns na região equatorial e provocam severas perturbações no sinal GPS.

Estas variações de TEC podem iniciar tão rápido e imprevisível, de tal forma que eventuais atrasos na atmosfera superior não podem ser eliminados nem mesmo pela combinação linear de L1 e L2 (ion free), o que pode causar um erro significativo na estimativa da posição de um dado receptor GPS, localizado em um ponto sujeito a estes rápidos e intensos efeitos.

3.4.5 Modelos Ionosféricos

As representações matemáticas da densidade de elétrons da ionosfera da terra, recaem em dois tipos:

- ↳ Modelos empíricos ou derivados de dados existentes;
- ↳ Modelos físicos, ou derivados de princípios físicos, geralmente tendo necessidade de contribuição empírica, para descrever o comportamento de várias funções.

O precursor dos empíricos foi construído para o parâmetro foF2, que é proporcional a densidade de elétrons do topo da região ionosférica F2.

Há várias representações do parâmetro foF2. Nelas estão fundamentados todos os modelos empíricos da ionosfera; por exemplo, A referência ionosférica internacional (IRI) e o modelo de Bent. RUSH (1986); TASCIONI et. al. (1988) discutiram muitas versões para os modelos empíricos de foF2.

A ionosfera sofre uma grande variabilidade. A variabilidade diária do TEC de um valor médio mensal, em um dado horário de um mesmo local é entre 20 e 25%. Nenhum dos modelos ionosféricos atualmente disponíveis, foi bem sucedido na predição da variabilidade diária da ionosfera. Um modelo ionosférico atual é considerado excelente, se o desvio entre o valor predito e o valor observado de média mensal de TEC, estiver entre $\pm 10\%$.

Há certamente muitos modelos disponíveis, tanto físicos quanto empíricos para correções dos efeitos ionosféricos no sinal GPS. Utiliza-se bastante o algoritmo das correções ionosféricas de Klobuchar para receptores de simples frequência.

Os modelos atuais variam desde um simples algoritmo com aproximadamente 50-60% de acerto na predição, até complexos modelos ionosféricos que não ultrapassam a barreira de cerca de 75% de acerto quando se comparam os valores preditos com os observados. Além disso alguns processos físicos atualmente são desconhecidos e não modeláveis, KLOBUCHAR (1994).

3.4.5.1 Modelo de BENT

O modelo de Bent é um algoritmo capaz de prever o perfil da densidade de elétrons na ionosfera mundial e o atraso associado a este perfil, além das mudanças na onda devido a refração. O modelo calcula a densidade versus perfil de altitude para uma dada distância, taxa de variação e correções da refração angular para a onda. Adicionalmente também são obtidos o TEC vertical e angular, YUAN; JACOB (1991).

Os dados de inicialização para o modelo de Bent são posições dos satélites e estações, período e valor de dados solares.

A frequência crítica da camada F2, foF2, pode ser incorporada durante a observação da estação e o tempo de informação fornece a predição ionosférica. Esta opção atualizada usa a técnica da altitude média que pode aceitar várias medições de diferentes estações separadas espacial e temporalmente.

O modelo foi construído com influências combinadas de efeitos geográficos e geomagnéticos, atividade solar, tempo local e variações sazonais. O modelo tem precisão aproximada entre 75-90%, YUAN; JACOB (1991).

ERROS DE DISTÂNCIA:

$$dR = \frac{40.3}{f^2} I \quad [\text{m}]$$

Equação 19 – Erro de distância (Bent model)

ERROS DE FASE:

$$dPh = \frac{1.34(10^{-7})}{f^2} I \quad [\text{rad}]$$

Equação 20 – Erro de fase (Bent model)

Onde $f = 1545,42(10^6)$ [Hz] é a frequência do sinal da portadora L1.

QUANTIDADE DE ELÉTRONS:

$$I = \int_{s_0}^{s_1} Ne(s) ds \quad [1/m^2]$$

Equação 21 – Quantidade de elétrons (Bent Model)

A integral da propagação ao longo da trajetória da onda eletromagnética de S_0 (antena do receptor) até S_1 (antena do satélite) e N_e é a densidade de elétrons.

DENSIDADE DE ELÉTRONS

$$Ne = \begin{cases} Nem \left[1 - \left(\frac{\Delta h}{Y_{mf2}} \right)^2 \right]^2 & \text{para } Y_{mf2} \leq h < hm \\ Nem \left[1 - \left(\frac{\Delta h}{Y_t} \right)^2 \right] & \text{para } hm \leq h < h_s \\ Ne0 e^{-k_1 \Delta h} & \text{para } h_s \leq h < h_1 \\ Ne1 e^{-k_2 \Delta h} & \text{para } h_1 \leq h < h_2 \\ Ne2 e^{-k_3 \Delta h} & \text{para } h_2 \leq h \leq 2000 km \end{cases}$$

Equação 22 – Densidade de elétrons (Bent Model)

Onde:

$$H_0 = h_m + d$$

$$H_1 = h_0 + (1012 Km - h_0)/3$$

$$H_2 = h_1 + (1012 Km - h_0)/3$$

$$N_{eo} = N_{em} \left[1 - \left(\frac{d}{Y_t} \right)^2 \right]$$

$$N_{e1} = N_{eo} e^{-k_1(h_1 - h_0)}$$

$$N_{e2} = N_{e1} e^{-k_2(h_2 - h_1)}$$

$$Y_t = \begin{cases} Y_{mf2} & \text{para } f_{OF2} \leq 10.5 \text{ MHz} \\ Y_{mf2} [1 + 0.1333(f_{OF2} - 10.5)] & \text{para } f_{OF2} > 10.5 \text{ MHz} \end{cases}$$

$$d = \frac{1}{K_1} (\sqrt{1 + K_1^2 Y_t^2} - 1) \text{ [m]}$$

$$N_{em} = 1.24(10^{16})(f_{OF2})^2 \text{ [m]}$$

Onde: K_1 , e h_m são parâmetros obtidos do CCIR (banco de dados) e de modelos de previsão. Maiores detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/bent.html>.

3.4.5.2 Modelo de KLOBUCHAR

A forma do algoritmo de correções ionosféricas para receptores de simples frequência, requer aproximações geodésicas da latitude ϕ_u , longitude λ_u , ângulo de elevação E e azimute A de cada satélite GPS, KLOBUCHAR (1994).

A unidade utilizada para medições angulares é o radiano, e o tempo expresso em segundos. Os coeficientes α_n e β_n são transmitidos como parte da mensagem GPS. O procedimento de cálculo é o seguinte:

1) Cálculo do ângulo central da terra, Ψ

$$\Psi = 0,0137(E + 0,11) - 0,022 \quad (\text{radianos}) \quad (\text{A1})$$

2) Cálculo da latitude subionosférica, Φ_1

$$\Phi_1 = \Phi_u + \Psi \cos A \quad (\text{radianos}) \quad (\text{A2})$$

Se $\Phi_1 > 0,416$, então $\Phi_1 = +0,416$. Se $\Phi_1 < -0,416$, então $\Phi_1 = -0,416$

3) Cálculo da longitude sub-ionosférica λ_1

$$\lambda_1 = \lambda_u + (\Psi \sin A / \cos \Phi_1) \quad (\text{radianos}) \quad (\text{A3})$$

4) Encontrar Latitude geomagnética, Φ_m , da localização subionosférica de observação de cada satélite GPS, é encontrada por:

$$\Phi_m = \Phi_1 + 0,064 \cos(\lambda_1 - 1,617) \quad (\text{radianos}) \quad (\text{A4})$$

5) Encontrar a hora local, t , no ponto subionosférico

$$t = 4,32(10)^4 \lambda_1 + \text{tempoGPS} \quad (\text{segundos}) \quad (\text{A5})$$

Se $t > 86,400$, usar $t = t - 86,400$. Se $t < 0$, adicionar 86,400

6) Para converter para atraso obliquo, calcular o fator de obliquidade, F

$$F = 1,0 + 16(0,53 - E)^3 \quad (\text{A6})$$

7) Cálculo do atraso ionosférico T_{iono} , calculando inicialmente x

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \Phi_m^n} \quad (\text{A7})$$

$$\text{Se } |x| > 1,57 \quad T_{\text{iono}} = F(5(10^{-9})) \quad (\text{A8})$$

Caso contrário:

$$T_{\text{iono}} = F \left[5(10^{-9}) + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \Phi_m^n \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right] \quad (\text{A9})$$

3.4.5.3 Modelo de CHAPMAN

O modelo de CHAPMAN representa a absorção de um feixe paralelo, de radiação monocromática que se encontra em uma atmosfera de composição uniforme onde a densidade da camada varia exponencialmente com a altitude, ANSELMO (1994).

3.4.5.4 Modelo ionosférico de tempo real (RIM)

Este modelo considera a distância geométrica incluída em atrasos da modulação iguais para o avanço da fase da portadora e é proporcional ao TEC ao longo da trajetória do sinal GPS entre as antenas do satélite e do receptor, NICOLAIDES;UPADHYAY (1996).

3.4.5.5 Modelo da placa ionosférica

Segundo LEICK (1995) este é um modelo simples, que considera a ionosfera para um receptor isolado, como uma placa plana de espessura constante que possui distribuição homogênea de elétrons livres. Neste modelo é desconsiderada a curvatura da terra, onde o atraso de grupo vertical, $I_{k,l,p}$ e o atraso de grupo ao longo da trajetória são descritos como:

$$I_{k,l,p}^p = \frac{I_{k,l,p}}{\sin \alpha_k^p}$$

Equação 23

Onde o símbolo α_k^p denota o ângulo de elevação do satélite a partir do receptor como pode ser visto na figura 6. O atraso de grupo vertical não inclui a subscrição de p. O atraso de grupo vertical é tratado como uma constante, independente do azimute do satélite.

Figura 6 - Geometria do ponto ionosférico. Adaptada de KLOBUCHAR (1994).

3.4.5.6 Modelo cosseno diário

É um modelo ionosférico ligeiramente mais avançado, faz considerações da rotação da terra e do movimento diário do Sol com relação a localização do receptor, LEICK (1995).

3.4.5.7 Modelo ionosférico pontual

Neste modelo da ionosfera uma melhoria adicional é alcançada ao reconhecer que a ionosfera inicia a uma altura de cerca de 50Km em lugar de à superfície da terra. Normalmente a altura média da ionosfera é assumida como sendo de 350Km, LEICK (1995).

$$I_{k,l,P(t)}^p = \frac{I_{k,l,p}}{\sin \theta_k^p}$$

Equação 24

Onde θ_k^p é o ângulo de elevação do satélite para o ponto ionosférico, como pode ser visto na figura 6. O ponto ionosférico está localizado ao longo da trajetória do sinal, estando a uma altura de 350Km. A projeção do ponto ionosférico na terra é chamado de ponto subionosférico.

3.4.5.8 Modelo de atraso ionosférico local.

Considera que o atraso ionosférico é função da hora local e da latitude geomagnética do ponto de penetração ionosférica e pode assumir duas formas:

- ↳ A ionosfera nominal – Ajusta-se as 24 horas do dia, com alguns desvios diários;
- ↳ Modelo da ionosfera perturbada - Ajusta-se a um local com comportamento específico por várias horas, KEE;YUN (1997).

4 REDES GEODÉSICAS, A RBMC E O SIRGAS

Este capítulo expõe um moderno conceito de redes geodésicas executadas com GPS. Adicionalmente discorre acerca dos Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo e o Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul.

A superfície irregular real da terra sólida, continentes e fundo dos oceanos, é impossível de ser representada por uma simples relação matemática. Consequentemente, é descrita por pontos, dos quais são utilizadas coordenadas para o controlá-los.

Supõe-se representar a terra por uma superfície de nível com potencial gravitacional constante, equipotencial, do campo gravitacional terrestre, HELMERT (1880/1884) apud TORGE (1991), denominada de geóide, LISTING (1873) apud TORGE (1991).

Para se descrever matematicamente a terra, pode-se representá-la por um número finito de pontos, monumentá-los e fornecer suas posições num determinado sistema de coordenadas.

Estas redes podem ser pensadas como uma representação possível da superfície física da terra ou de parte dela. Tradicionalmente essas redes geodésicas dividem-se em três categorias, dependendo de como é estabelecida a posição individual dos pontos. Aquelas definidas apenas por uma coordenada, a altitude acima do nível do mar H , são conhecidas como redes geodésicas verticais.

As redes onde são conhecidas suas posições horizontais ditas latitude ϕ e longitude λ , são chamadas de geodésicas horizontais. Finalmente, redes cujos pontos são referidos a três coordenadas, são chamadas geodésicas tridimensionais.

4.1 Redes geodésicas verticais

Nas redes geodésicas verticais as posições verticais (altitudes) H são tomadas usualmente em relação ao nível do mar, mais precisamente, com relação ao chamado geóide, neste contexto, o datum geodésico vertical.

Altitudes são referidas ao geóide, mais popularmente, altitudes acima do nível do mar, ou ainda altitudes ortométricas, NASA (1973) apud VANÍCEK; KRAKIWSKY (1986).

São divididas em diferentes ordens. Esta classificação se dá de forma ascendente de precisão, ou seja, a de mais alta ordem tem geralmente a maior precisão. O afastamento entre linhas adjacentes dos pontos de referência de nível varia de país a país.

Há no Brasil uma rede de triangulação de RN¹⁵, de nivelamento geométrico, implantada pelo IBGE, onde a origem está em Imbituba, Santa Catarina.

4.2 Redes Geodésicas Horizontais

As redes geodésicas horizontais consistem em pontos monumentados com coordenadas geodésicas elipsoidais ϕ e λ conhecidas, que estão vinculadas a um elipsóide de referência ajustado no datum geodésico horizontal. Essas posições horizontais podem ser fornecidas em qualquer outro sistema de coordenadas bidimensionais, tal como um sistema de coordenadas cartográfico, do qual as relações ao elipsóide são conhecidas.

Usualmente essas redes são classificadas em quatro ordens: SEGANTINE (1995).

- a) Rede de primeira ordem, é formada por pontos de controle localizados nos vértices dos polígonos com lados de comprimento variável entre 20-50Km;

¹⁵ Referência de nível

- b) Rede de segunda ordem (lados de comprimento de 10 a 20Km);
- c) Rede de terceira ordem (lados de comprimento de 3 a 10Km);
- d) Rede de quarta ordem (lados de comprimento de 1 a 3Km).

4.3 Redes Geodésicas tridimensionais com GPS

Sob a ótica geodésica, é natural trabalhar com uma rede de pontos cujas coordenadas tridimensionais sejam conhecidas. Tal que redes possam ser estabelecidas, usando qualquer uma das seguintes aproximações:

↳ Combinação de coordenadas horizontais conhecidas (ϕ e λ) e vertical (H) de pontos correspondentes para obter-se coordenadas triplas (ϕ , λ e h) ou equivalentemente, o trio (x , y , e z)^G.

É obvio que torna-se indispensável o conhecimento da ondulação geoidal N , para a determinação da altitude h acima do elipsóide onde $h = H \pm N$, VANÍCEK; KRAKIWSKY (1986) figura 7.

Figura 7 - Representação das superfícies topográfica, geoidal e elipsoidal.

Adaptada de VANÍCEK; KRAKIWSKY (1986).

O advento da tecnologia GPS mudou o conceito de rede geodésica. Os primeiros levantamentos realizados em 1983 obtiveram uma precisão interna da ordem de 1 ppm. Valores muito inferiores aos obtidos nas redes existentes até então, que apresentavam precisões da ordem de 10-20 ppm.

A consequência direta foi o estabelecimento de "super-redes" de alta precisão implantadas com as tecnologias VLBI¹⁰ e GPS. A idéia é construir uma rede global, HOFFMAN-WELLENHOF et. al. (1997).

As observações GPS produzem vetores tridimensionais, logo, o modelo geodésico tridimensional, é o mais natural a ser utilizado. Além disso o GPS produz diferenças de alturas elipsoidais, onde para se obter as altitudes ortométricas é necessário utilizar as diferenças da ondulação geoidal, LEICK (1995).

Para uma perfeita amarração entre uma rede GPS e um determinado datum nacional, faz-se necessário a ocupação mínima de três pontos de controle. Hoje muitas regiões tem "super-redes", as quais fornecem convenientes estações de referência para levantamentos GPS.

Uma amarração horizontal, consiste nas medições em pontos de controle nacionais e para datum vertical, normalmente requerem um maior planejamento, onde três RN's monumentados situados nos vértices da região de projeto, devem fornecer uma referência vertical mínima aceitável, HOFFMAN-WELLENHOF et. al. (1997).

4.3.1 Estratégias de observações de redes

Conforme SEEBER (1993), há três estratégias básicas de observações aplicadas a projetos de redes: Posicionamento por ponto, linha-base e multi-estação.

No posicionamento por ponto (receptor simples) determina-se continuamente uma posição absoluta (modo de navegação), precisão de 10 a 15m, sem o efeito SA ou sob o PPS, e com precisão de 30 a 50m, sob o efeito

¹⁰ very Long Baseline Interferometry

do SA ou SPS. Ainda que observando-se consecutivamente por vários dias, a precisão de 3 a 5m, equivalente a precisão do sistema TRANSIT, foi a melhor precisão atingida.

No conceito de linha-base (observação relativas com duas estações) tanto em antenas estáticas quanto cinemáticas, as técnicas relativas são efetivas quando as distâncias entre as estações são pequenas, se comparadas a distância receptor-satélite. A correlação é inversamente proporcional ao aumento da distância entre as estações.

No conceito de multi-estação (três ou mais receptores operando simultaneamente), pontos adjacentes são ocupados, formando quadriláteros ou triângulos e permite uma alta precisão relativa, particularmente quando os quadriláteros são subdivididos em triângulos.

Quando dois ou mais receptores observam ao mesmo tempo, diz-se que a rede tem estações co-observadas e apresentam uma correlação entre os pontos considerados.

O projeto organizacional também depende do tipo de rede, isto é, da distribuição dos pontos, conforme SNAY (1986) e UNGUENDOLI (1990) apud HOFFMAN-WELLENHOF et. al. (1997). Há dois tipos básicos de redes GPS: radial e figuras geométricas fechadas.

↳ Observações radiais: São executadas por um receptor situado em uma estação fixa. Mede-se linhas desta estação fixa até outros receptores em outras estações. Não há considerações geométricas para o planejamento deste tipo de observação, exceto que pontos adjacentes devem ser conectados por observação direta. Uma configuração típica de observações radiais, pode ser vista na figura 8;

Figura 8 - Rede da cidade de São Carlos. Adaptada de SOUZA (2000).

↳ Observações em rede: este tipo de medição requer que as observações sejam executadas de modo sistemático e em figuras geométricas fechadas, para que haja ciclos fechados. figura 9.

Figura 9 - Rede parcial da cidade de Belém – Adaptada da CODEM; CONSÓRCIO AEROCARTA/BASE (1999).

4.4 O SGB, a RBMC e o SIRGAS

No Brasil cabe ao IBGE, desde 1946, o estabelecimento e manutenção das estruturas planimétrica e altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Os métodos denominados clássicos (triangulação e poligonização geodésica), utilizados pelo IBGE até 1990, foram responsáveis pela

determinação de coordenadas em um conjunto de vértices, cuja a ocupação era imprescindível na materialização do Sistema Geodésico de Referência.

O advento do Sistema NAVSTAR/GPS, cuja capacidade em permitir a determinação de posições estáticas ou cinemáticas, aliando rapidez e precisão muito superiores aos métodos clássicos de levantamentos, provocou a revisão das características do SGB.

Em 1991, o IBGE passou a empregar, exclusivamente, o Sistema GPS para a densificação da componente planimétrica do SGB, gerando a Rede Nacional GPS.

A operacionalização da RBMC¹⁷ em 1996 implantou o conceito de redes "ativas" através do monitoramento contínuo de satélites do Sistema GPS.

Diariamente todos os dados coletados nas estações da RBMC são transferidos automaticamente e disponibilizados aos usuários em formato RINEX.

O Projeto Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul (SIRGAS), foi desenvolvido sob coordenação do IBGE, com a participação de diversos países sul-americanos, tais como: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai, Venezuela e ilhas coloniais.

Em 1997 foi determinada uma rede geodésica continental de precisão científica, nela foram apoiadas as redes nacionais sul-americanas. A integração entre a rede de referência SIRGAS e as redes existentes em outras regiões do planeta está garantida pela existência no continente de estações de operação contínua pertencentes à Rede Global do International GPS Service for Geodynamics (IGS).

¹⁷ Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

5 O PRECISE POINT POSITIONING - PPP

Este capítulo apresenta o Precise Point Positioning (PPP). É um novo serviço de análise automatizada de dados GPS, disponibilizado pelo Jet Propulsion Laboratory's (JPL's), através da internet, como uma opção de processamento de pontos simples estáticos.

5.1 POSICIONAMENTO PONTUAL PRECISO - PPP

O Precise Point Positioning é uma estratégia poderosa para estimativa de um ponto simples que utiliza órbitas precisas e correções dos relógios de satélites.

Com posicionamento de ponto preciso pode-se calcular apenas uma estação de cada vez, toda estação é processada individualmente pelo sistema GIPSY do Jet Propulsion Laboratory (JPL). Isto é, o tempo de processamento aumenta linearmente com o número de estações, não geometricamente (exponencialmente como em modo de rede).

O posicionamento de ponto preciso é uma ferramenta versátil que pode ser usada para processar uma única estação como também uma rede que inclui centenas de pontos.

A precisão à qual podem ser calculadas coordenadas da estação é comparável a soluções de rede globais, ou seja, variam de poucos milímetros a 1,5cm.

A idéia que permeia esta estratégia é relativamente nova. Calcular as órbitas e relógios de todos os satélites através de uma rede global de alta precisão e usar todas estas informações para resolver os parâmetros de uma estação de qualquer local no mundo (posição, relógio e troposfera úmida).

Em um local denso de dados de alta qualidade, estes parâmetros fixos podem ser calculados com alta confiança. A desvantagem principal é que o posicionamento de ponto preciso é incapaz de identificar correlações entre estações, GREGORIUS (1996).

Figura 10 – Estações globais GPS – International GPS Service. Adaptada de ZUMBERGE, J.F. et. al.(1997).

Na figura 10 observa-se que no hemisfério norte há uma maior densidade de estações e conseqüentemente de dados de alta qualidade, sendo assim, este conjunto de parâmetros de correção dos relógios dos satélites pode ser calculado com alta confiança.

Supondo que dados de uma rede de R receptores distribuídos globalmente que são utilizados para estimar e transmitir parâmetros e P denota a estimativa de parâmetros transmitidos.

Considerando um receptor adicional e a análise de dados de $R+1$ receptores para então fornecer parâmetros transmitidos Q . Numa aproximação onde $P = Q$, isto é, os efeitos dos dados do receptor adicional foram desprezados para estimativa dos valores dos parâmetros transmitidos.

Um caminho mais eficiente para estimar parâmetros específicos do receptor adicional, é analisar dados por exclusão e fixar os parâmetros transmitidos na análise de P, quando órbitas precisas e correções de relógios GPS não são estimadas, ao invés disso, os valores são fixos ou mesmo predeterminados e o modelo não tem outros parâmetros espacialmente correlacionados, como por exemplo o atraso troposférico. Então não há necessidade da análise de dados de todos os receptores simultaneamente.

O termo "point positioning" em análises GPS, refere-se historicamente a estimativas de parâmetros de receptores específicos, pela análise de dados de pseudodistância dos receptores, fixando parâmetros para valores na transmissão da mensagens de navegação.

A qualidade dos resultados é limitada neste caso por parâmetros na mensagem de navegação que possuem precisão de poucos metros para órbitas GPS ou cerca de poucas dezenas de metros para os relógios GPS, ZUMBERGE;BERTIGER (1996) apud ZUMBERGE et. al. (1997).

O uso de PPP difere do uso clássico sob dois aspectos, primeiro, ambos fase da portadora e pseudodistância são usados como dados. Segundo, a qualidade dos parâmetros transmitidos é de poucos centímetros ou melhor.

Quando aplicado a dados de um receptor simples, a precisão dos resultados é comparável a obtida quando são usados dados de todos os receptores simultaneamente.

Os produtos fornecidos atualmente pelo IGS simplificam muito o posicionamento geodésico e a navegação com GPS, os quais estão disponíveis com precisão centimétrica para posicionamento absoluto e relativo com um software relativamente simples e análise de dados, MUELLER (1998b) apud KOUBA et al (1998).

5.2 Serviço automatizado para análise de dados GPS

A análise automática da qualidade de dados GPS está disponível a um usuário qualquer através do uso de e-mail e ftp.

No computador do Jet Propulsion Laboratory (JPL) há um transmissor de parâmetros precisos, que calcula regularmente efemérides precisas e correção dos erros dos relógios .

A conexão é tal que um usuário de e-mail de origem externa ao JPL, pode transferir dados para o computador do JPL. O computador analisa os dados e coloca os resultados em uma área acessível ao usuário.

Um e-mail fornece ao usuário as informações sobre a localização dos resultados da análise, que ele pode acessar posteriormente. As operações do JPL são inteiramente automáticas , BOON; SEGANTINE (1999).

É um método confiável para a análise da precisão de dados do Sistema de posicionamento global. Utiliza estimativas precisas de parâmetros GPS, posições de satélites e correções de relógio, os quais são produzidos pelo JPL e outras organizações que participam do serviço internacional de GPS, ZUNBERGE et. al. (1997) apud ZUMBERGE (1999).

Este serviço funciona regularmente e possibilita a análise da precisão de dados GPS medidos de receptor numa localização arbitrária com a utilização dos softwares Gipsy/Oasis-II (GOA-II) do JPL.

Um número expressivo de pesquisadores têm instalado em seus computadores pessoais estes softwares. De tal forma que podem descarregar os parâmetros precisos transmitidos, que estão disponíveis no JPL através de ftp anônimo e executar a análise de desempenho em seu computador pessoal. A tarefa do usuário concerne no aprendizado do software GOA-II PPP.

A principal vantagem para o usuário quando se utiliza do serviço automatizado é que não perde tempo aprendendo, instalando e mantendo um complexo software de análise GPS.

5.3 Submissão de dados GPS no AG¹⁸

Um usuário que tenha adquirido dados GPS com receptores de dupla frequência. Deve fazer com que eles sejam convertidos no formato RINEX¹⁹.

O nome do arquivo deve estar de acordo com o padrão RINEX, que encontra-se detalhado e exemplificado em <http://www.bts.gov/NTL/DOCS/rinex.html>.

Opcionalmente, o arquivo pode ser comprimido através de Unix compress ou gnuzip, o qual deve ser colocado em uma área acessível pelo ftp anônimo. O procedimento seguinte é enviar um e-mail para ag@cobra.jpl.nasa.gov. No local destinado ao assunto deve-se escrever "Static". No corpo do e-mail deve conter a URL²⁰ de seus arquivos RINEX.

5.3.1 O GIPSY

O pacote de programas GIPSY foi desenvolvido no Jet propulsion Laboratory – JPL, para processamento preciso de dados de posicionamento relativo GPS desde bases curtas até longas bases intercontinentais. Durante os últimos dez anos foi melhorado constantemente. As precisões das distâncias de linhas bases passaram de 10^{-7} em 1985 para 10^{-10} em 1996.

Atualmente também podem processar dados GPS em todos os modos de posicionamento, desde o método estático até totalmente cinemático.

Foi desenvolvido inicialmente para trabalhar no sistema operacional de VMS, entretanto, posteriormente foi modificado para o sistema de UNIX e atualmente é chamado GIPSY-OASIS II ou simplesmente GOA-II.

O GIPSY-OASIS II, são dois pacotes de software separados, porém, usam módulos comuns. O GIPSY foi projetado para aplicações de padrão

¹⁸ Auto GIPSY: software de processamento automático utilizado pelo PPP

¹⁹ Receiver Independent Exchange format

²⁰ Uniform Resource Locator

geodésico considerando que o OÁSIS é um pacote de análise de covariâncias da órbita da terra e missões espaciais aprofundadas.

A diferença principal entre o GIPSY e outros programas precisos de processamento GPS, é o fato do GIPSY não utilizar a dupla diferença de fase, ao invés disso, ele utiliza parâmetros de correções de erros de relógios, e processa simultaneamente dados de pseudodistância e fases da portadora.

5.3.1.1 Modelo troposférico do GIPSY

O modelo utilizado pelo GIPSY frequentemente é denotado ρ_{trop} . Considera o modelo troposférico da casca esférica, o termo atraso, ρ_{trop} que pode ser expresso como:

$$\rho_{trop} = \rho_{z_{dry}} R_{dry}(E) + \rho_{z_{wet}} R_{wet}(E)$$

Equação 25

Onde E é o ângulo de elevação geodésico aparente do satélite, ρ_z é o atraso zenital para os componentes úmido e seco e R é uma função dos componentes úmido e seco. Os atrasos zenitais seco e úmido são definidos como funções lineares do tempo e são dados por:

$$\rho_{z_{dry}} = \rho_{z_{dry}}^0 + \rho_{z_{dry}}(t - t_0)$$

Equação 26

$$\rho_{z_{wet}} = \rho_{z_{wet}}^0 + \rho_{z_{wet}}(t - t_0)$$

Equação 27

Onde t_0 é o tempo de referência.

O Gipsy utiliza o conhecido modelo de Lanyi para mapear o atraso troposférico, cuja formulação principal é a seguinte:

$$\rho_{trop} = F(E)/\sin E$$

Equação 28

Onde:

$$F(E) = \rho_{dry} \cdot F_{dry}(E) + \rho_{wet} \cdot F_{wet}(E) + P(E, \rho_{dry}, \rho_{wet})$$

Equação 29

$P(E, \rho_{dry}, \rho_{wet})$ é uma função polinomial bastante complexa que inclui entre outras, a constante de Boltzman, a temperatura superficial média, a massa molecular média do ar seco, aceleração gravitacional no centro de gravidade da coluna de ar, uma escala de altitude, bem como a contribuição da curvatura nas camadas seca e úmida para o atraso (expresso no momento da refratividade atmosférica).

5.3.2 Características dos dados candidatos a submissão no AG

a) Tempo de observação

Os dados devem conter pelo menos uma hora de observação;

b) Nome do arquivo

O nome do arquivo (4 caracteres) + a indicação do dia do ano GPS (3 caracteres numéricos) + a indicação da seção de rastreo (1 caractere

numérico), seguido de ponto (.) + a indicação do ano no qual a observação foi executada (2 caracteres numéricos) + a indicação do tipo de arquivo ("o" se arquivo de observações ou "n" se arquivo de navegação).

Um exemplo do nome do arquivo: wxyz1900.98o para o arquivo de observação e wxyz1900.98n para o arquivo de navegação de um mesmo ponto "wxyz", observado no dia "190", na seção de observação "0", seguido de ponto (.) no ano de 1998.

c) Janela de observação

O transmissor de parâmetros do AG, utiliza janelas, na qual o dia estende-se por exemplo, de 8 de julho as 21:00 hs até 10 de julho as 03:00 hs. Se todos os seus dados não caíram dentro desta janela, deve-se fazer arquivos separados para cada dia.

d) Frequência da coleta de dados

A frequência de coleta de dados GPS de 30 segundos é recomendada para uma eficiente edição e inserção das parâmetros dos relógios dos satélites. No AG, estimativas de parâmetros de fase, podem ser usados com frequência de até 5 minutos.

e) Método de de posicionamento

O sistema foi melhorado desde sua implementação em 1998, entretanto, atualmente para processar dados GPS pelo PPP, ainda é necessário que se tenha realizado um posicionamento estático. Se dados de um receptor que utilizou um posicionamento cinemático, forem enviados ao PPP, o sistema assume que os receptores estão estáticos (fixos).

f) Formato do arquivo

O arquivo deve estar expresso no formato RINEX (o AG ignora as informações do cabeçalho do arquivo RINEX). Com uma única exceção: a entrada de um conjunto de coordenadas nominais.

g) Precisão nominal dos dados observados

Para obter estimativas com 1mm de precisão final pelo AG, a precisão nominal dos dados observados deve ser de cerca de 100m.

h) Posição da estimativa

As estimativas do AG referem-se ao centro de fase da antena, ou seja, desconsidera as informações que possam, ou não estar no cabeçalho do arquivo RINEX. Se um usuário desejar-se as coordenadas de um monumento próximo, deve-se executar vetores aritméticos associados por conta própria.

5.4 Resultados

O sistema detecta automaticamente a maioria das condições de anormalidade, por exemplo, se o assunto não é "Static" ou se há problemas com o ftp para ir buscar seus dados, o usuário receberá um e-mail como resposta avisando deste defeito.

O tempo de resposta, geralmente, é cerca de 10 minutos, onde apresenta-se a URL²¹ para recuperação dos resultados.

O usuário receberá um arquivo de leitura com explicações detalhadas de todos os resultados, incluindo as coordenadas do receptor, estimativas do relógio do receptor, desvios de parâmetros de fase, atraso zenital na troposfera, ajustes posteriores de fase e resíduos de pseudodistância.

²¹ Uniform Resource Locator

Com a finalidade de minimizar os efeitos dos atrasos nas camadas da atmosfera e do multicaminhamento do sinal GPS entre as antenas do satélite e do receptor respectivamente, apenas dados com elevação acima de 15° de elevação serão considerados.

5.5 Parâmetros transmitidos e utilizados

São fornecidas, órbitas precisas e correções precisas dos relógios dos satélites GPS, em formatos requeridos pelo atual software PPP GOA-II e utilizado pelo AG, que existe desde julho de 1995.

Estes são os produtos do "JPL's Flinn analysis". Com o uso dessas órbitas e correções dos relógios, pode-se esperar repetibilidade diária de uns poucos milímetros na componente horizontal e cerca de um centímetro na vertical para dados diários de um dado local com um receptor estacionário geodésico de qualidade.

5.5.1 Características das Soluções Precisas do Relógio GPS

Utilizando dados da fase da portadora e a pseudodistância de uma rede de receptores GPS distribuídos globalmente com referências de tempo precisas, o JPL é capaz de estimar computacionalmente, de modo eficiente, parâmetros do relógio GPS com frequência de 30 segundos e precisão sub-decimétrica.

A precisão obtida está num fator de 100 para 1000 vezes melhor que os relógios de uma mensagem de navegação, permitindo pós-processamento a altas taxas de dados de um receptor GPS simples com nível de precisão de poucos centímetros quando usado em conjunto com órbitas GPS precisas.

A amplitude da variabilidade diária do relógio GPS é tipicamente de 24 metros para satélites afetados pela efeito "AS". Um exemplo desses valores é apresentado na tabela 3 para transmissões afetadas pelo efeito SA.

	Média	Variabilidade
RMS da amplitude (m)	24,2	0,9
τ (s)	105,9	3,9
RMS do erro de interpolação (cm)	5,7	0,2
Variação instantânea	22,5	0,7

Tabela 3– Características da variabilidade do relógio GPS

Devido ao ruído intencional dos relógios dos receptores como parte do efeito "Selective Availability"²², as estimativas de relógio geralmente não podem ser interpoladas a tempo sem uma degradação severa da precisão.

Particularmente, estimativas a intervalos de 5 minutos, produzidas pelo centro de análise do serviço internacional GPS (IGS) que estão com precisão de poucos centímetros, são aplicáveis apenas a dados que ocorrem dentro de poucos milissegundos dos intervalos de 5 min.

A aplicação do PPP é limitada a dados que coincidem com as épocas para as quais os relógios precisos do transmissor foram programados.

5.5.2 O método

Uma análise diária do Jet Propulsion Laboratory (JPL) de dados de relógios com frequência de 5 minutos de uma rede global de receptores geodésicos de qualidade, chamada de "Flinn solution", resulta em estimativas de posição de satélites em função do tempo e das soluções do relógio dos transmissores. Os seguintes parâmetros de receptores específicos, também são estimados:

²² AS disponibilidade seletiva

- 1) Locação de receptores de coordenadas espaciais;
- 2) Correção de relógio de receptor;
- 3) Atraso zenital troposférico, e
- 4) Parâmetros de erros (ruídos) de fase. Exceto para (2), Estas outras são constantes fundamentais ou variam suavemente com o tempo . O conhecimento de seus valores a cada 5 minutos é suficiente para determinar seus valores no tempo intermediário por interpolação.

A estratégia para estimar inicia com um procedimento de seleção do local. A estação que será utilizada como relógio de referência na solução Flinn para o dia é primeiramente selecionada.

O erro para o relógio de referência é assumido com sendo zero. Assim todos os outros relógios são estimados com relação a este .

Soluções de relógios de outros locais usadas na solução Flinn são cuidadosamente examinadas, analisando-se medidas de consistência entre valores a cada 5 minutos e uma estimativa de que valor baseado na interpolação cúbica dos quatro vizinhos mais próximos na época.

Locais com soluções uniformes para o relógio de rms²³ 2,5cm são considerados candidatos a inclusão. O procedimento de seleção do local Flinn pretende assegurar vários candidatos. Sete dos candidatos, juntos ao relógio de referência local, são escolhidos para dar uma boa distribuição global. Assim, são usados dados dos oito locais à taxa de 30 segundos para calcular erros de relógios de GPS a cada 30 segundos.

Todos os outros parâmetros incluindo parâmetros de desvios de fase são fixados para seus valores como estimativas da solução Flinn de rede livre (novamente, os relógios das estações e estimativas da troposfera que são interpoladas de seus valores de 5 minutos para cada 30 segundos), e apenas soluções dos relógios GPS são estimadas.

São usados dados de todos os receptores que observam um satélite particular em um determinado momento para calcular o único erro desconhecido para aquele satélite, naquele instante: o relógio do satélite. Leva de 3 a 4 hs numa estação de trabalho 40 Mflop risc para analisar 24 hs

²³ "Root Mean Square"

de dados de oito receptores e 25 Satélites com taxa de coleta de 30 segundos.

A cobertura global varia, dependendo da disponibilidade de dados e locais equipados com bons relógios de referência.

Algumas áreas oceânicas no hemisfério sul e Antártica não são bem cobertas por satélites suficientes com ângulos de elevação acima de 15°, que possibilitem uma boa solução para os relógios.

5.6 Limitações

O sistema AG foi desenvolvido pelo serviço de pesquisadores científicos no programa de riscos naturais da terra sólida da NASA. Não há ninguém atualmente neste serviço, o que não garante que este serviço seja mantido por tempo indeterminado para livre utilização.

O tipo de receptor exigido para observações GPS dos dados a serem processados pelo PPP é um sério limitante no uso deste serviço. Este assunto é retomado com detalhes no item 8.3.

5.7 Testes com o PPP, AG

BOON; SEGANTINE (1999), realizaram um experimento que demonstrou o potencial do serviço automatizado de análise de dados GPS do JPL, disponibilizado pela internet.

Investigaram a repetibilidade das soluções PPP em bases curtas. Para isso foram utilizadas 3 estações localizadas na Universidade do Maine, Orono-EUA. O PPP demonstrou uma boa repetibilidade, variando de 10 a 20cm para uma hora de observação e de menos de 2 cm para 12 horas de observação.

As estações foram localizadas na cobertura do prédio Boardman Hall e foram usados diferentes tipos de antenas. A diferença na posição vertical do centro de fase da antena foi prontamente identificada pelo PPP.

6 OS POSICIONAMENTOS RELATIVO E PONTO SIMPLES

São destacados neste capítulo dois tipos de posicionamento de pontos com a tecnologia GPS, os posicionamentos relativo e ponto simples. São particularmente importantes para este trabalho pois, todas as análises e comparações que virão a posteriori, os terão como fundamento.

6.1 O posicionamento por ponto simples

Neste tipo de posicionamento, a estimativa de navegação é feita pelo método dos mínimos quadrados das equações de distância produzidas a cada época.

Para cada satélite localizado pelo receptor é predita a pseudodistância e todas as medidas são combinadas então em um conjunto de equações normais:

$$\Delta\rho = G\Delta x + \Delta\varepsilon_\rho$$

Equação 30

Onde:

$$\Delta\rho \equiv \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_n \end{bmatrix} \quad G \equiv \begin{bmatrix} -I_1^T & 1 \\ -I_2^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -I_n^T & 1 \end{bmatrix} \quad \Delta x \equiv \begin{bmatrix} \Delta r_u \\ c\Delta b_u \end{bmatrix} \quad \Delta\varepsilon_\rho \equiv \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{\rho 1} \\ \Delta\varepsilon_{\rho 2} \\ \vdots \\ \Delta\varepsilon_{\rho n} \end{bmatrix}$$

Equação 31

A equação 32 será resolvida para uma correção Δx , com uma estimativa de posição a priori. Para melhorar a estimativa de posição, subtrai-se Δx dos valores a priori.

Em GPS “G” é freqüentemente chamado a matriz de geometria e corresponde à matriz de conexão de medidas, comumente nomeado de “H” na literatura mais geral.

O $\Delta \varepsilon_p$ é assumido como sendo média zero, de forma que o método dos mínimos quadrados para o conjunto de equações normais é determinado pelo seguinte:

$$\Delta \hat{x} \equiv (G^T G)^{-1} G^T \Delta \rho$$

Equação 32

Ou, se o peso R_i^{-1} é atribuído a cada observação, o mínimo quadrado ponderado é o seguinte:

$$\Delta \hat{x} \equiv (G^T R^{-1} G)^{-1} G^T R^{-1} \Delta \rho$$

Equação 33

Se a estimativa a priori usada na construção de G, é muito distante (>1Km), a solução dos mínimos quadrados talvez tenha que ser reiterada até a mudança para uma estimativa seja suficientemente pequena.

A matriz de geometria G depende apenas do vetor unitário de linha de visada, e não é muito sensível aos erros na posição do observador. Atualmente são conhecidos diversos métodos numéricos eficientes para resolver as equações 31,32 e 33.

6.2 Acurácia da solução do posicionamento por ponto simples

A acurácia é definida por dois fatores, a qualidade da medida e a geometria dos satélites com relação ao receptor.

A qualidade da medida é descrita pela variância de seus erros, os quais para a pseudodistância variam entre 0,3 e 30m, dependendo das condições de erro.

A geometria é representada pela matriz "G", que é composta de vetores de trajetória e "1s" para os relógios locais.

A solução para os erros da covariância pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} E[\Delta\hat{x} \quad \Delta\hat{x}^T] &= E[(G^T G)^{-1} G^T \Delta\rho \quad \Delta\rho^T G (G^T G)^{-1}] \\ &= (G^T G)^{-1} G^T R G (G^T G)^{-1} \end{aligned}$$

Equação 34

Onde R é a covariância da medida de pseudodistância. Ao assumir-se que as medidas dos erros não são correlacionadas e têm variância igual σ^2 , então $R = \sigma^2 I$, a covariância do erro da solução pontual, reduz-se ao seguinte:

$$E[\Delta\hat{x} \quad \Delta\hat{x}^T] = \sigma^2 (G^T G)^{-1}$$

Equação 35

Se a condição é parametrizada, tal que $\Delta x = [\Delta E \quad \Delta N \quad \Delta U \quad c \cdot \Delta b]^T$, onde ΔE , ΔN e ΔU são os erros nas posições leste, norte e altitude respectivamente; e $c \cdot \Delta b$ é desvio devido o erro do relógio, então a variância estimada é dada pelo seguinte:

$$E[\Delta \hat{x} \quad \Delta \hat{x}^T] = \begin{bmatrix} E[\Delta E^2] & E[\Delta E \Delta N] & E[\Delta E \Delta U] & E[\Delta E c \Delta b] \\ E[\Delta N \Delta E] & E[\Delta N^2] & E[\Delta N \Delta U] & E[\Delta N c \Delta b] \\ E[\Delta U \Delta E] & E[\Delta U \Delta N] & E[\Delta U^2] & E[\Delta U c \Delta b] \\ E[c \Delta b \Delta E] & E[c \Delta b \Delta N] & E[c \Delta b \Delta U] & E[c \Delta b^2] \end{bmatrix}$$

Equação 36

Quase sempre interessam apenas os elementos da diagonal principal. Os DOPs a seguir, resumem a contribuição da geometria:

$$A \equiv (G^T G)^{-1}$$

$$GDOP \equiv \sqrt{\text{traçado}(A)} \quad \text{DOP geométrico}$$

$$PDOP \equiv \sqrt{A_{11} + A_{22} + A_{33}} \quad \text{DOP posição}$$

$$HDOP \equiv \sqrt{A_{11} + A_{22}} \quad \text{DOP horizontal}$$

$$VDOP \equiv \sqrt{A_{33}} \quad \text{DOP vertical}$$

$$TDOP \equiv \sqrt{A_{44}} \quad \text{DOP tempo}$$

Assim, a magnitude do erro total de posição pode ser estimada pelo σ_x PDOP, e o erro da posição vertical, por σ_x VDOP, etc. Entretanto, deve-se notar que é apenas uma aproximação, devido a suposição de que todos os erros das medidas de pseudodistância dos satélites são independentes e têm a mesma estatística.

A determinação matemática da posição é relativamente trabalhosa, função de um sistema geralmente superdeterminado, isto é, há com frequência mais satélites sendo observados que o número mínimo necessário para a solução. Além da contínua detecção de mais dados que os estritamente necessários para a resolução das equações de localização.

Receptores modernos captam os sinais de 5 a 12 satélites simultaneamente. Geralmente um maior número de satélites possibilita uma boa geometria, levando a uma melhor solução para a acurácia do posicionamento por ponto simples, solução de navegação.

Uma exceção pode ocorrer, se o erro encontrado para a posição dos satélites adicionais for excepcionalmente grande. Neste caso, nem mesmo o suavizador AD²⁴ pode eliminar os efeitos do SA ou os efeitos atmosféricos e ruídos nas medidas observadas pelo receptor.

Para fornecer uma estimativa de navegação mais avançada, deve-se executar medidas incluindo o conhecimento da dinâmica dos satélites numa solução filtrada (filtro de Kalman), AXELRAD;BROWN (1994).

6.3 Posicionamento relativo

No posicionamento relativo a porção comum a ambas estações é automaticamente eliminada durante a execução da dupla diferença de fases. Por exemplo, a correção troposférica pode ser decomposta em duas partes, a parte comum e a parte dependente do satélite:

$$\begin{aligned}\Delta T_{km}^{pq} &= [(T_{km} + \Delta T_k^p) - (T_{km} + \Delta T_m^p)] - [(T_{km} + \Delta T_k^q) - (T_{km} + \Delta T_m^q)] \\ &= (\Delta T_k^p + \Delta T_m^p) - (\Delta T_k^q + \Delta T_m^q)\end{aligned}$$

Equação 37

A tabela 4 resume as mais importantes características da simples, dupla e tripla diferenças de observações, bem como suas aplicações para fase da portadora e pseudodistância. Maiores detalhes podem ser encontrados em SEGANTINE(1995).

²⁴ Adaptive converters (dispositivo eletrônico capaz de melhorar o desempenho do receptor a partir da detecção de interferências e filtragem dos dados observados)

Observação	Efeitos eliminados	Efeitos Reduzidos	Opção
Simple diferença	Primeira ordem Relógio do satélite	Erros orbitais	Ambigüidade fixa
Dupla diferença	Primeira ordem Relógios do satélite e estações	Geometricos Erro de posição Ionosfera	Ambigüidade fixa
Tripla diferença	Primeira ordem Relógios do satélite e estações	troposfera	Ambigüidade eliminada

Tabela 4 - Cancelamentos no posicionamento relativo. Adaptada de LEICK (1995).

A constelação atual possibilitou que o posicionamento relativo tenha se tornado tão popular e útil em mensuração, devido a modelagem da maioria dos efeitos da propagação do sinal e os erros dos relógios.

A existência de parâmetros da ambigüidade na dupla diferença foi percebida inicialmente como um obstáculo, contudo eles são um caminho para que ela seja limitada a um valor inteiro de ciclos (ambigüidade fixa), LEICK (1995).

7 PONTOS GEODÉSICOS COM SISTEMA NAVSTAR/GPS NA RMB²⁵

Este capítulo descreve as observações de pontos geodésicos executadas com o sistema de posicionamento NAVSTAR/GPS, na região metropolitana de Belém-Pa. Apresenta os equipamentos utilizados e exibi as medições de valores reais para variáveis meteorológicas locais, coletadas simultaneamente aos dados GPS.

Localizada às margens da Baía do Guajará e do rio Guamá, no estuário do rio Pará, Belém ocupa uma área de 51.569,30 ha, sendo mais que 50% desta área representada por ilhas. O clima é quente e úmido, com um elevado índice pluviométrico, característicos da região equatorial.

Belém hoje é principal cidade da região norte do Brasil. A última contagem demográfica realizada pelo IBGE em 1996, indicou mais de 1.600.000 habitantes na RMB. A cidade apresenta uma arborização única no Brasil, o que lhe valeu o título de “Cidade das Mangueiras”.

A RMB ressenete-se à falta de planejamento urbano, que aliado ao crescimento desordenado trazem como consequência direta um baixo nível de qualidade de vida de grande parte da população, quadro que só poderá ser revertido com educação, vontade política e investimento tecnológico.

²⁵ Região Metropolitana de Belém

7.1 Definição dos pontos geodésicos

Os pontos que representam o estudo de caso deste trabalho, são parte de uma rede de 51 vértices, implantados na RMB pelo Consórcio AEROCARTA-BASE, como apoio terrestre a um levantamento aerofotogramétrico no município de Belém, contratado pela CODEM²⁶.

A idéia inicial desta pesquisa era processar os dados GPS que já haviam sido coletados no levantamento realizado em 1998, onde foram implantados centenas de marcos, dentre os quais, 51 são marcos GPS.

Houve uma certa dificuldade na obtenção de informações acerca desse levantamento e principalmente na obtenção dos dados GPS gerados por ele.

Quando algumas dessas informações foram fornecidas pela CODEM, observou-se que a metodologia e equipamentos utilizados não se adequavam aos objetivos desta pesquisa. Tomou-se então a decisão de coletar os dados GPS e variáveis meteorológicas.

A decisão de reocupar os vértices, implicou numa drástica redução do número de pontos a serem observados, função da indisponibilidade de receptores GPS, para serem utilizados neste novo levantamento e também do limitado intervalo de tempo no qual ele deveria ser realizado.

Para que as coordenadas fossem referenciadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, foi feita uma coleta de dados bibliográficos acerca dos vértices existentes na RMB, junto ao IBGE, responsável pelo SGB.

Dentre os 51 pontos, 18 foram eleitos pelo autor, além de 3 pontos do IBGE. Configurando os 21 pontos, que foram reocupados em julho/99. Os dados obtidos neste novo levantamento serviram de subsídio para este trabalho.

²⁶ Companhia de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belém

7.2 Distribuição e características dos pontos observados

A malha de marcos geodésicos representada na figura 11, e apresenta as seguintes características:

Figura 11 – Pontos geodésicos com GPS na região metropolitana de Belém.

- a) Vetores entre 4 e 35Km de comprimento;
- b) São 21 marcos geodésicos distribuídos na região metropolitana de Belém, que abrange também o distrito de Icoaraci, e as ilhas de Caratateua, Cotijuba e Mosqueiro, afastados entre si de 4 a 20Km.
- c) Foi utilizado o posicionamento relativo estático;
- d) A estratégia de observação utilizou o conceito de linha-base. Nela o vértice de referência para adotado para toda a malha GPS99 foi o ponto SA-22-5L, do IBGE, localizado no interior da base da PETROBRAS no Tapanã, em Belém;
- e) Foram observados código e fases das portadoras L1 e L2;
- f) Foram coletadas variáveis meteorológicas “in loco” durante todo o período de observação GPS;
- g) As 21 estações GPS tem os nomes e números de acordo com a tabela 5:
- h) Devido a característica urbana da rede, muitos vértices estão localizados em topos de reservatórios elevados de água, prédios e mirantes.

Estação	Nº	Estação	Nº
TAPAN	5L	BENGU	120
VCAN2	119	TENON	127
VCAN1	113	OUTE2	132
VPESO	104	OUTE3	133
CENTR	4L	MOSQ2	142
GUAMA	103	MOSQ3	148
CEFET	151	MOSQ1	135
UTING	110	OUTE1	131
IAURA	112	COTIJ	150
JSEFF	118	ICOAR	128
MARAM	PA-02		

Tabela 5 - Nomenclatura e numeração dos vértices da malha GPS99.

7.2.1 Os marcos

Os marcos estão materializados por chapas metálicas com as seguintes inscrições gravadas "PMB/CODEM-1998 PROTEGIDO POR LEI AEROCARTA-BASE VGxxx, fixadas em suas posições através de pinos metálicos de 8 cm de comprimento quando em topos de edificações ou fixas a marcos estáveis.

Os marcos tronco piramidais são de concreto armado com as dimensões de 50x25x15 cm. Um exemplo dos marcos pode ser visto na foto 1.

Foto 1 - Marco de concreto com chapa metálica cravada no topo.

7.3 Sessões de observação

Um dos objetivos deste trabalho era comparar os resultados obtidos entre o processamento em um software comercial que possibilite o processamento por ponto simples e a metodologia do PPP.

Para isso, era necessário seguir as especificações estabelecidas pela metodologia PPP. Maiores detalhes podem ser obtidos no capítulo 5. Uma das especificações, exige que o receptor utilizado na coleta de dados a serem enviados e analisados pela metodologia PPP, seja um receptor de dupla frequência de fase e de código.

7.3.1 Receptores utilizados no levantamento

Foram utilizados nas sessões de observação receptores Trimble da série 4000SS e 4000SST, cujas características principais são:

- ↳ Receptores geodésicos de que observa o código C/A e fase da portadora L1 e L2;
- ↳ Possuem 12 canais independentes para recepção dos sinais.

7.3.2 Períodos e taxas de observação

Todos os pontos foram ocupados por um período mínimo de 2:00 hs, com uma contagem de épocas para gravação de dados a cada 15 segundos. O anexo I apresenta um resumo das monografias de todos os marcos geodésicos utilizados nas seções de observação GPS.

7.4 Coleta de dados

7.4.1 Dados GPS

As observações de dados GPS, foram executadas com receptores de dupla frequência, necessários à metodologia PPP .

Além disso faz parte dos objetivos deste trabalho, comparar os resultados do processamento dos vetores para a portadora L1 com o processamento dos vetores a partir de L3 “ion free²⁷” para bases curtas, o que só pode ser feito com receptores de dupla frequência.

²⁷ “Ionfree” - combinação linear das portadoras L1 e L2, com o objetivo de cancelar os efeitos que a ionosfera provoca no sinal GPS.

Vale ressaltar que os pontos formam vetores com linha base curta²⁸. Sendo assim, provavelmente os efeitos provocados pela atmosfera são os mesmos nos dois extremos dos vetores.

Belém está localizada em plena faixa equatorial. Este fato acrescenta um cuidado adicional quanto aos meses e horários nos quais são feitas as observações GPS. Segundo GOODMAN;AARONS (1990) durante os meses de abril a agosto há poucas oportunidades de ocorrer cintilação equatorial, exceto para o período compreendido entre 19:00 e 24:00 hs.

O planejamento de todas as observações GPS, foi realizado acatando as recomendações de GOODMAN;AARONS (1990). As seções de observação, foram executadas durante julho/99, no período diurno compreendido entre 8:00 e 18:00h.

Estes procedimentos certamente reduziram os efeitos das anomalias magnéticas e cintilações ionosféricas, características da região equatorial do planeta nas observações GPS e por conseguinte na precisão final dos pontos.

As seções de observação, semana GPS e datas são apresentados na tabela 6.

Data	Semana GPS	DOY
12/07/99	1018	193
13/07/99		194
14/07/99		195
15/07/99		196
19/07/99	1019	200
20/07/99		201
21/07/99		202
22/07/99		203
27/07/99	1020	208
28/07/99		209

Tabela 6 – As semanas GPS

²⁸ Linha-base curta – vetores com comprimentos inferiores a 20 km

7.5 Dados Meteorológicos

Normalmente não são coletados dados meteorológicos em levantamentos GPS por usuários do sistema. Ocorre que há erros provocados pelos efeitos da troposfera na trajetória do sinal GPS, respectivamente entre as antenas do satélite e do receptor.

Estes efeitos podem ser bem representados através de diversos modelos empíricos e teóricos, como visto no capítulo 3. É freqüente a utilização nestes modelos de variáveis meteorológicas tais como temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica das estações observadas durante o período de observação.

Faz parte dos objetivos deste trabalho, avaliar a influência da inserção de variáveis meteorológicas no processamento dos vetores, em comparação ao processamento de vetores que utilizam valores médios padrões para estas variáveis.

7.5.1 Dados coletados pelo INMET

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia, a coleta de variáveis começa nas estações meteorológicas. Elas colhem dados de pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura do ar, quantidade de chuva etc.. São mais de 400 estações, colhendo dados de norte a sul do País.

As estações são administradas por 10 Distritos Regionais que recebem, processam e enviam essas informações, para a sede do INMET, em Brasília. Maiores informações o leitor pode encontrar em <http://www.inmet.gov.br/index.html/>.

Normalmente é fornecido a quem necessitar, valores médios diários dessas variáveis para um determinado dia e numa determinada região, ou cidade se nela houver uma estação meteorológica.

7.5.2 Coleta de dados

Há duas formas básicas de coletar os dados meteorológicos, classificados pelo autor como coleta direta e indireta:

- ↳ Coleta direta – Os dados são coletados “In loco” durante todo o período de rastreio;
- ↳ Coleta indireta – Os dados são coletados através de consulta a órgãos ligados a meteorologia, que fazem medições regulares destas variáveis e as disponibilize através de um banco de dados.

Com relação a coleta indireta, há algumas características quanto a obtenção dos dados, que deixam dúvidas acerca de sua representatividade das condições meteorológicas reais na estação de observação GPS.

Não há garantias que esses valores possam representar as condições meteorológicas predominantes num determinado local, durante o intervalo de tempo que foram coletados os dados GPS.

Talvez a inserção desses valores em modelos de correção, possa provocar um acréscimo ainda maior de erros às medidas observadas.

Segundo OCCHIPINTI (1989) apud LAROCCA (2000), numa atmosfera padrão, cujo ar está seco e de mesma composição química em todas as altitudes, pressão e temperatura ao nível do mar iguais a 1013mb e 15°, respectivamente, obtêm-se da equação hidrostática e da lei dos gases:

$$p = 1013,2 \left(1 - \frac{0,0065 \cdot z}{288} \right)^{5,256}$$

Equação 38– Pressão atmosférica

Onde p é a pressão atmosférica em mb e z é a altitude em m, RIGETTO, 1998 apud LAROCCA, 2000.

Belém certamente não corresponde as características de temperatura conjecturadas por OCCHIPINTI, ou seja, a pressão atmosférica é função apenas da variação de altitude.

Desconsiderar os efeitos das marés na variação da pressão atmosférica, considerar a atmosfera seca, e calcular a pressão adotando a temperatura constante e igual a 15° , durante todo o período de observação, definitivamente não é ser fiel a verdade meteorológica local.

Um exemplo deste fato pode ser comprovado pela gráfico 3 que representa a variação da pressão atmosférica em Belém, para um mesmo ponto, a mesma altitude, com separação de apenas 1 hora de medição. Durante este dia de medição a temperatura máxima chegou a $34,4^{\circ}$ C e a umidade relativa do ar estava em 54%.

Gráfico 3 – Variação da pressão atmosférica em 15/julho

7.5.3 Coleta “in loco” nas estações de observação

Baseado no exposto no item 7.5.2, tomou-se a decisão de também coletar “in loco” os dados de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

Com a colaboração do Prof. Dr. Antônio Carlos Lôla da Costa, docente do curso de meteorologia na UFPA²⁹, foi utilizado nestas medições, um par de psicrômetros instalados em abrigos meteorológicos móveis.

Foram executadas medições em todas as estações onde foram observados dados GPS, durante todo o tempo de rastreamento, ou seja, sempre que se observou um determinado vetor, nas duas extremidades, havia um abrigo meteorológico móvel com um psicrômetro e um barômetro instalados em seu interior.

7.5.3.1 Abrigos meteorológicos

De acordo com o MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1964), os instrumentos meteorológicos devem ser instalados em abrigos meteorológicos, a fim de garantir leituras que sejam representativas das condições reinantes no exterior do abrigo.

As informações indicadas nos termômetros só podem ser representativas do ar circundante, quando os instrumentos estiverem livres de radiações estranhas.

Os abrigos meteorológicos cumprem bem esta finalidade, além de manter os instrumentos secos, livres de precipitação e de insolação direta, na foto 2 é apresentado o abrigo móvel, utilizado na malha GPS99.

²⁹ Universidade Federal do Pará

Foto 2 - Abrigo meteorológico móvel (utilizado na coleta de dados em Belém-Pa).

A base do abrigo deve estar a 1,20m acima do nível do solo e disposto de tal forma que se obtenha o máximo de proteção contra os raios solares quando estiver aberto para leituras.

7.5.3.2 O psicrômetro – Temperatura e Umidade relativa do ar

Há vários métodos para se medir a umidade do ar. Nesta pesquisa foram utilizadas medidas psicrométricas. Esta escolha deu-se em função da simplicidade de sua utilização e também por questões de logística.

O Psicrômetro é um equipamento que mede a umidade relativa do ar, de modo indireto, em percentagem (%). Compõe-se de dois termômetros idênticos, um denominado termômetro de bulbo seco, e outro com o bulbo envolvido em gaze ou cadarço de algodão mantido constantemente molhado, denominado termômetro de bulbo úmido.

Há dois tipos de psicrômetros, o de ventilação forçada e o de ventilação natural que estão representados na foto 3.

Foto 3 - Psicrômetros de ventilação forçada e natural respectivamente

Os psicrômetros utilizados nas medições deste trabalho, são de ventilação natural, possuem termômetros com resolução de $0,2^\circ$ e são apresentados na foto 4. A evaporação da água causa o resfriamento do bulbo, que é indicado na coluna termométrica.

Foto 4 - Psicrômetro utilizado na coleta de dados meteorológicos em Belém.

Quanto mais seco estiver o ar, maior será a evaporação e também o resfriamento, desta forma o termômetro úmido sempre indicará uma temperatura inferior a do termômetro de bulbo seco com exceção do ar saturado, quando as temperaturas hipoteticamente devem ser iguais.

O reservatório de água e a mecha devem estar dispostos de tal forma que a água chegue ao bulbo do termômetro com a mesma temperatura aproximada do reservatório. O tecido que recobre o bulbo úmido, obrigatoriamente fino, porém bastante trançado, deve estar limpo e bem ajustado a ele. A água do reservatório deve ser destilada, constantemente observada e substituída.

A medida de temperatura do ar a ser utilizada, é a temperatura medida no termômetro de bulbo seco. De posse das duas temperaturas, bulbo seco e bulbo úmido, pode-se obter os valores da umidade relativa do ar por meio das tabelas específicas de cada instrumento.

Estas tabelas foram fornecidas junto com os psicrômetros para realização deste trabalho pelo Prof. Antônio Carlos Lôla da Costa -UFPA.

7.5.4 A pressão atmosférica

Define-se em meteorologia a pressão atmosférica num ponto qualquer, como sendo igual ao peso da coluna de ar, de seção unitária, que se estende do ponto considerado até o limite superior da atmosfera.

Sabe-se que a pressão para um dado local, varia com o tempo, com a altitude e sofre variações diárias em função das marés. Belém é uma cidade de topografia plana. A variação entre os pontos de menor e maior altitude da cidade está em torno de 10 a 15 metros.

Inicialmente foram coletados valores de pressão atmosférica "in loco", contudo, ocorreram grandes distorções nas leituras, função da falta de aferição dos barômetros utilizados. Em função disso, optou-se por adotar a pressão atmosférica média horária para o período de cada observação GPS, coletada pela estação meteorológica SBBE, pertencente a Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo- Divisão de Meteorologia Aeronáutica do

Ministério da Aeronáutica.

A estação meteorológica SBBE, é uma estação de classe SEM-1 com as seguintes coordenadas: latitude $01^{\circ} 23' S$ e longitude $048^{\circ} 29' W$, altitude ortométrica de 17,00m.

Os dados meteorológicos são coletados pela estação SBBE em intervalos regulares de 1 hora, 7 dias por semana, 365 dias por ano.

Os valores de pressão atmosférica referentes aos dias e períodos nos quais foram observados os dados GPS, estão representados no gráfico 4.

Gráfico 4 – Pressão atmosférica, Estação SBBE- Aeronáutica

Pode-se notar que o comportamento da pressão atmosférica para todos os dias foi bastante similar, comportamento uniforme e oscilação média de 3 mb durante o período observado. Uma única exceção ocorreu no dia 15/julho onde verificou-se uma brusca e acentuada variação da pressão atmosférica que está representada no gráfico 3.

7.5.5 Metodologia utilizada no cálculo de temperatura e umidade relativa do ar

Em cada estação coletou-se através do psicrômetro, temperaturas do termômetro seco e úmido a cada 30 minutos de observação. Obtiveram-se um mínimo de 4 leituras.

Foi calculada a média aritmética para as duas temperaturas, bulbo seco e úmido respectivamente. A média aritmética das temperaturas observadas no termômetro de bulbo seco, foi adotada como temperatura do ar durante o período de observação.

A diferença entre a média das temperaturas no termômetro de bulbo seco e a média das temperaturas no termômetro de bulbo úmido, é chamada de depressão psicrométrica.

De posse da depressão psicrométrica e da média das temperaturas no bulbo úmido, calculou-se a umidade relativa do ar nas tabelas do apêndice II.

Os valores médios para temperatura ambiente e umidade relativa do ar nas duas extremidades dos vetores para cada uma das estações de observação GPS, estão respectivamente representados nos gráficos 5 e 6.

Gráfico 5 – temperatura do ar / estação de observação

Gráfico 6 – Umidade relativa do ar / estação de observação

8 OS SOFTWARES UTILIZADOS

Este capítulo apresenta uma descrição do programa OMNI, GPSurvey e GIPSY, desenvolvidos respectivamente pelo NGS, Trimble e JPL. Apresenta também, os procedimentos necessários ao processamento em cada um destes programas.

8.1 OMNI

O OMNI é um pacote computacional de processamento de dados GPS, composto por mais de 50 programas. A versão mais recente é a 4.0 e foi utilizada nesta pesquisa. É uma ferramenta científica para análise e edição de dados GPS, desenvolvida em 1994 pelo National Geodetic Survey e coordenado por MADER e HILLA, HILLA (1999).

Esta versão funciona adequadamente em ambiente computadorizado, cujo sistema operacional seja o DOS. Tanto o programa OMNI v4.0, quanto seu manual de utilização, incluindo um exemplo de processamento, são de domínio público e estão disponíveis na internet sob o endereço: <ftp://www.ngs.noaa.gov/pub/omni/update>.

O processamento através do OMNI requer inicialmente a conversão dos arquivos gerados pelo receptor, chamados de dados brutos, para um formato que o OMNI consiga processar. Isto pode ser feito de dois modos.

No OMNI há dois programas de inicialização que desempenham esta tarefa, o ARGO e o RINGO fazem esta conversão. A diferença entre eles, está no fato de se poder utilizar o programa ARGO/NGS apenas para converter os dados brutos em dados com extensões específicas do National Geodetic Survey (NGS) e o RINGO pode ser utilizado para conversão em dados no

formato RINEX³⁰.

8.1.1 Fluxograma simplificado do OMNI

O fluxograma da figura 12, é uma representação simplificada dos procedimentos que foram utilizados no processamento dos dados GSP no software OMNI v4.0 para este trabalho.

Figura 12 – fluxograma simplificado para o processamento OMNI v4.0

³⁰ Receiver Independent Exchange format

Nesta pesquisa, optou-se pela conversão no formato RINEX dos arquivos originais, formato padrão do receptor utilizado, pelo fato de ser um padrão reconhecido pela maioria dos softwares de processamento de observações GPS.

No OMNI podem ser feitas diferentes análises e estratégias com possíveis reiteraões para obter-se o desvio padrão mínimo para as soluções de coordenadas das estações. Os diversos procedimentos factíveis no OMNI envolvem:

- Análise preliminar da integridade dos dados observados;
- Verificação do tempo de observação de cada satélite;
- Verificação ângulos de elevação da trajetória de cada satélite durante o período de observação;
- Determinação do melhor ou melhores satélites para serem utilizados como referência para um determinado intervalo de processamento;
- Inserção de efemérides precisas ou utilização das efemérides transmitidas;
- Ocorrência e extensão de “cycle slip”³¹, para possíveis correções automáticas e/ou manuais quando necessário;
- Omissão ou não de satélites “doentes” ou que possam comprometer a precisão do processamento por excesso de ruído ou excessivas perdas de ciclos;
- Resolução ou fixação da ambigüidade para a(s) fase(s) da portadora.

³¹ Um salto na gravação da fase da portadora, geralmente ocasionado pela perda do sinal emitido pelo satélite na antena do receptor ou ruídos no sinal, chamado de perda de ciclo.

8.1.2 Obtenção de efemérides precisas

Os satélites GPS emitem sinais, dentre os quais está a mensagem de navegação. Ela é transmitida na razão de 50 bps³², sendo superposta nas duas frequências L1 e L2. Ela contém informações tais como: efemérides, correções de relógio de satélite, órbitas, saúde e outras correções de satélites, LEICK (1995).

As efemérides são as posições de um objeto celeste em função do tempo, geralmente apresentadas através de uma lista. No caso dos satélites GPS elas podem ser: efemérides transmitidas ou simplesmente efemérides, HOFFMAN-WELLENHOF et. al. (1997).

As efemérides transmitidas na mensagem de navegação do sinal dos satélites GPS, são as chamadas "broadcast" ou simplesmente efemérides transmitidas. As precisas são baseadas em dados observados, obtidos através de uma rede mundial de pontos GPS e calculadas por várias instituições.

As efemérides precisas estão disponíveis alguns dias após a coleta de dados e estão expressos como posições e velocidades dos satélites a intervalos constantes. Estes dados são informações de cada satélite e representam o vetor posição em km e o vetor velocidade em km/s, REMONDI(1989) apud HOFFMAN et. al. (1997).

Nesta pesquisa utilizou-se os dados fornecidos pelo International GPS Service for Geodynamics – USA. Os dados foram obtidos pela internet, dos arquivos correspondentes aos dias de observação nas semanas GPS 1018, 1019 e 1020 respectivamente nos seguintes endereços:

<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/1018;>

<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/1019;>

<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/1020;>

³² Bits por segundo

O IGS disponibiliza diversos produtos, tais como órbitas e correções de relógios de satélites de diversas precisões e disponibilidades diferentes, KOUBA et al. (1998):

Produto	Disponibilidade (dias)	Intervalo (minutos)	Precisão	
			Órbitas	relógios
preditos	Tempo real	15	50 cm	150 ns
rápidos	1-2	15	10 cm	0,5 ns
finais	<12	15	5 cm	0,3 ns

Tabela 7 – Produtos disponibilizados pelo IGS - Adaptada de KOUBA et. al. (1998).

8.1.3 Inserção de efemérides precisas no OMNI

As efemérides precisas (finais) dos satélites GPS, fornecidas pelo IGS, estão disponíveis em dois formatos, o EF18 e o SP3. O EF18 é um arquivo binário e o SP3 é o ASCII equivalente.

Note-se que o OMNI utiliza efemérides no formato SP1, que é um padrão de efemérides distribuídas anteriormente pelo NGS³³.

Objetivando manter compatibilidade com uma variedade de aplicações, o NGS fornece a quem necessitar, programas de conversão de formato de arquivos. Neste trabalho foram necessários os programas: SP3_EF18 e EF18_SP1.

Os programas, assim como procedimentos a serem seguidos nestas conversões, estão disponíveis na internet no seguinte endereço: <http://www.ngs.noaa.gov/GPS/Utilities>.

Após estas duas conversões, deve-se renomear o arquivo de efemérides precisas, de acordo com a convenção determinada pelo usuário. Aqui, foi

³³ National Geodetic Survey

utilizado o DOY como nome do arquivo, seguido da extensão eph. Como no exemplo: 193.eph.

8.2 GPSurvey v 2.2

O GPSurvey é desenvolvido pela Trimble. A versão utilizada neste trabalho, foi a v 2.2. É de fácil utilização e tem uma interface com o ambiente Windows. Processa dados GPS de código e fase ou fases da portadora.

O GPSurvey possibilita o processamento de dados GPS coletados por diversos modos de posicionamento e estratégias de ocupação, tais como: posicionamento estático, estático rápido e cinemático. Permite o processamento de vetores além do chamado ponto simples (single point³⁴) utilizando apenas o código (pseudodistância).

É um software comercial, sendo assim não possibilita intervenções pessoais no processamento, característica dos softwares científicos.

Aceita arquivos de variáveis meteorológicas, desde que tenham sido gerados por um receptor trimble, durante o período de rastreamento.

Apesar de todos os pontos que compõem a malha GPS99, terem sido observados com receptores Trimble, não houve o cuidado de inserir estes dados nos receptores quando do rastreamento, pois seria um transtorno calcular as médias das variáveis que estavam sendo medidas simultaneamente às observações GPS.

Há também a possibilidade de inserir no processamento, as efemérides precisas, contudo, por questões de tempo, esta análise não pode ser realizada.

Trata-se de um software comercial, ou seja, é um programa onde um usuário comum de GPS, consiga descarregar os dados coletados e de forma simples, tanto quanto possível, processá-los sem um profundo conhecimento científico de GPS.

³⁴ Ponto simples

Todas as avaliações acerca da influência da coleta e inserção de variáveis meteorológicas durante o processamento de dados GPS foram fundamentadas no processamento OMNI.

O GPSURVEY utiliza o modelo de Hopfield para estimar o atraso troposférico. Este modelo está descrito no item 3.3.3.1.

Esta característica do GPSurvey, inviabiliza algumas análises e possíveis intervenções que possam melhorar a qualidade dos dados observados tais como:

- ↳ Análise da perda de ciclos individualmente entre a antena de cada satélite e a antena do receptor;
- ↳ Análise de ruídos no sinal de cada satélite;
- ↳ Inserir e modificar os valores de variáveis meteorológicas reais, que possam alimentar modelos atmosféricos para predição de possíveis erros na trajetória do sinal GPS, etc.

8.2.1 GIPSY – O software do PPP

Infelizmente um dos objetivos deste trabalho não pode ser alcançado. A comparação entre o processamento relativo e o PPP para pontos de uma rede de linha base curta, não pode ser realizada em função da incapacidade de processamento através do Auto-GIPSY dos arquivos gerados pelo receptor utilizado nas observações da rede GPS99.

Todo este trabalho foi norteado em função das informações bibliográficas disponíveis acerca do PPP. Desde a escolha de equipamentos (receptores de dupla frequência), tempo mínimo de observação, ângulo de corte, taxa de gravação de dados (épocas), etc..

A incapacidade do software em reconhecer e processar os dados levantados neste trabalho, reside num detalhe de especificação dos receptores utilizados no levantamento da rede GPS99, detalhe este que é omitido em todos os artigos sobre o assunto.

Após inúmeras tentativas frustradas em processar os pontos pelo AG, contatou-se via email o Dr. Zunberge através do e-mail jfz@cobra.jpl.nasa.gov, ele redirecionou os questionamentos ao Sr. Juan Ceva do ITSS³⁵, Pasadena, California, responsável no JPL por informações e esclarecimentos a usuários através do e-mail: jcc@cobra.jpl.nasa.gov.

Foi relatado a ele que os procedimentos recomendados pelo próprio JPL, estavam sendo seguidos rigorosamente. Os dados observados haviam sido convertidos no formato RINEX, com todas as corretas especificações, encontravam-se numa área de ftp anonymous, de livre acesso e o endereço do ftp estava contido no e-mail enviado ao jpl.

Em resposta através de e-mail o Sr. Juan do ITSS disse ter aberto um dos arquivos RINEX, disponíveis em nosso endereço de ftp anonymous, o arquivo base1930.99o. Argumentou que embora o cabeçalho do arquivo RINEX indicasse que haviam sido coletados " dados de P2 ", O registro não conteria tais medidas de P2, havendo apenas medidas de L1, P1, L2 e D1. Como pode ser visto no exemplo da figura 13.

2	OBSERVATION DATA										RINEX VERSION / TYPE
RINGO	**/ 2/ 8 16:17										PGM / RUN BY / DATE
tapan											COMMENT
											MARKER NAME
											MARKER NUMBER
											OBSERVER / AGENCY
											REC # / TYPE / VERS
											ANT # / TYPE
4226535.8374	-4774340.6942	-147612.6560								APPROX POSITION XYZ	
1.7800	.0000	.0000								ANTENNA: DELTA H/E/N	
1	2	7	2	4	7	10	13	14	16	WAVELENGTH FACT L1/2	
1	2	5	16	19	24	26	27			WAVELENGTH FACT L1/2	
4	L1	P1	L2	D1							# / TYPES OF OBSERV
15											INTERVAL
99	7	12	12	20	60.000000						TIME OF FIRST OBS
99	7	12	17	22	.011000						TIME OF LAST OBS
12											# OF SATELLITES
2	984	984	982	984							PRN / # OF OBS
4	831	831	743	831							PRN / # OF OBS
7	1201	1201	1198	1201							PRN / # OF OBS
10	944	944	939	944							PRN / # OF OBS
13	140	140	130	140							PRN / # OF OBS
14	13	13	0	13							PRN / # OF OBS
16	271	271	265	271							PRN / # OF OBS

Figura 13 – Início do arquivo RINEX do ponto base1930.99o

³⁵ Information Technology and Scientific Services

Ainda segundo o Sr. Juan , "o AG precisa de L1, L2, P1 ou C1 e P2 para processar os dados. Infelizmente, se os dados que não se enquadram neste padrão, o AG não dispõe de recursos para processá-los".

Os receptores Trimble 4000SST series utilizados nas observações deste trabalho são de dupla frequência, contudo não apresentam registros de C1 tão-pouco a de P2. Apenas L1, P1, L2 e D1. Este fato impossibilitou o processamento dos pontos da malha GPS99 pelo AG.

9 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO OMNI

Este capítulo expõe os resultados obtidos através do software OMNI v4.0, considerando diferentes condutas de processamento, afim de avaliar a influência de diferentes correções durante o processamento de dados GPS para vetores de linhas base curta.

9.1 Referência Inicial

Através de uma consulta bibliográfica ao IBGE, obteve-se uma relação dos pontos da rede planimétrica pertencente a este instituto que estavam localizados dentro ou próximos da área de estudo.

Esta consulta resultou em 3 pontos dentro da RMB. São eles: SA-22-4L, SA-22-5L e o SAT-PA-02. O vértices SA-22-4L e SA-22-5L são resultado de levantamento trigonométricos e o SAT-PA-02 foi determinado através de observações de satélites pelo sistema de posicionamento TRANSIT, possuindo precisão inferior aos demais.

A malha GPS99 apresenta uma distribuição radial. Havia necessidade da escolha de um ponto georeferenciado para inicialização dos vetores. Dentre os referidos acima, o escolhido para referenciar a toda a rede foi o SA-22-5L.

O SA-22-5L, é um vértice oficial pertencente a rede trigonométrica do IBGE, situa-se no interior da base distribuidora da PETROBRAS no bairro do Tapanã em Belém e sofreu reajustamento global em setembro/96. Um resumo do vértice SA-22-5L é apresentado no Anexo B. Por conveniência a partir daqui este vértice será denominado pelo código 5L e pelo nome de estação TAPAN.

Foram realizadas conversões entre data e sistemas de coordenadas no vértice 5L, para viabilizar os dados de inicialização necessários a cada software de processamento GPS. Para tal, foi utilizado o programa Geobase VB50 – v1.1.4, desenvolvido pela Base Aerofotogrametria e Projetos S/A. Estas coordenadas são apresentadas na tabela 8.

Coordenadas	SAD-69	WGS-84
Geográfica	Latitude: 01 20 04,4286 S	Latitude: 01 20 05,717545 S
	Longitude: 48 28 56,6381 W	Longitude: 48 28 58,16403 W
	Altitude: 7,97 m	Altitude: -15,717 m
UTM	N: 9852346,430 m	N: 9852307,375 m
	E: 780162,110 m	E: 780113,860 m
	MC: 51	MC: 51
Cartesiana	X: 4226630,04618 m	X: 4226563,176 m
	Y: -4774380,126151 m	Y: -4774375,756 m
	Z: -147556,01833 m	Z: -147594,531 m

Tabela 8 - Coordenadas do vértice 5L - IBGE

A escolha do vértice 5L para inicialização dos vetores deu-se em função de algumas de suas características, tais como:

- Posição central em relação a distribuição da malha de pontos GPS99;
- O comprimento dos vetores são inferiores a 35 quilômetros, o que caracteriza linhas base curtas;
- Horizonte desobstruído para ângulo de corte de 15°;
- Nenhum transmissor de ondas de rádio ou televisão nas proximidades;
- Marco estável, preservado e de fácil acesso.

9.2 Processamento OMNI

No software OMNI foram processados os vetores entre o ponto escolhido como referência para toda a malha GPS99 e os pontos da rede. Os dados originais, sofreram um processo de conversão inicial para o formato RINEX, como descrito em 8.1.1. A figura 14 apresenta a configuração vetorial adotada nos diferentes processamentos com o OMNI.

Figura 14 – Configuração vetorial adotada nos processamentos OMNI

Vetores independentes entre o ponto 5L e os pontos da malha foram processados utilizando diferentes considerações de correções, numa tentativa de compará-las entre si e também com os resultados obtidos no processamento GPSurvey.

Para todas as condutas de processamento no OMNI, foram obtidos resultados com as diferentes variações de correções inseridas. Houve também a preocupação de obter a solução L1, L2 e L3 (ion free) para cada vetor, objetivando analisar os resultados encontrados no processamento das diferentes fases da portadora assim como a solução L3 para vetores com linha base curta.

São duas as possibilidades de processamento neste trabalho: vetores independentes e por pontos simples, pois os dados foram coletados apenas por dois receptores utilizando o conceito de linha base.

Segundo SEGANTINE (1995), a solução vetor por vetor ou base simples, é uma boa prática, pois se todos os pontos forem processados juntos, um possível erro de um ou mais pontos será distribuído entre os demais.

Os pontos que apresentam erros podem ser facilmente identificados por análise de dados estatísticos. Há vários parâmetros que indicam a qualidade do levantamento realizado. O primeiro envolve análises relativas a estatística dos vetores individuais.

A alteração brusca do desvio padrão (RMS^{36}) é um bom indicador se uma base apresenta problemas. Para vetores com comprimento de linha base inferiores a 20Km, o RMS deve ser igual ou inferior a 0,01m e para vetores com comprimento de linha base maiores que 100 quilômetros, o RMS deve ser igual ou inferior a 0,03m, MADER (1991).

Os procedimentos gerais adotados no processamento OMNI para este trabalho, estão resumidos na figura 15.

³⁶ Root Mean Square

Figura 15 – Descrição passo-a-passo dos procedimentos adotados no processamento OMNI para este trabalho.

A seguir são apresentados graficamente os resultados obtidos com os vetores (ΔX , ΔY , ΔZ e L), latitude, longitude, altura e desvio padrão para as diferentes condutas analisadas no OMNI. Por considerar desnecessário sua inclusão no texto principal, todos os valores obtidos estão apresentados no anexo C.

Como critério para análise e comparação dos resultados obtidos através do OMNI em cada uma das condutas adotadas nos processamentos, foi adotada a média geométrica espacial dos desvios padrão da posição geodésica definida como MGE dada pela seguinte equação:

$$MGE = \sqrt{(\sigma_{lat})^2 + (\sigma_{long})^2 + (\sigma_{alt})^2}$$

Equação 39 – Média Geométrica Espacial dos desvios da posição geodésica

Onde:

σ_{lat} = desvio padrão da latitude geodésica da estação em metros;

σ_{long} = desvio padrão da longitude geodésica da estação em metros;

σ_{alt} = desvio padrão da altitude geométrica da estação em metros.

9.2.1 Conduta 1 de processamento OMNI

Aqui são apresentadas 2 soluções: L1 “float”³⁷ e L3 “float” para cada ponto. Nas duas soluções foram incluídas efemérides precisas, fornecidas pelo IGS através do endereço: <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product>, e variáveis meteorológicas padrão do software (temperatura do ar=20°, pressão atmosférica=1013mb e umidade relativa do ar=50%) em todos os vetores.

Na tabela 9 são apresentados os valores de MGE na condução 1, para as soluções de processamento de L1float e L3float.

Ordem	Estação	L1 float	L3 float	Ordem	Estação	L1 float	L3 float
1	VCAN1	0.0301	0.0383	11	MARAM	0.1035	0.1418
2	VCAN2	0.0164	0.0217	12	COTIJ	0.0132	0.0171
3	BENGU	0.0634	0.1612	13	MOSQ1	0.0437	0.0209
4	TENON	0.0346	0.0449	14	MOSQ3	0.0402	0.0150
5	JSEFF	0.0208	0.0200	15	GUAMA	0.0236	0.0463
6	IAURA	0.0310	0.0578	16	CENTR	0.0179	0.0218
7	OUTE1	0.0580	0.0776	17	VPESO	0.0492	0.0467
8	OUTE2	0.0163	0.0202	18	MOSQ2	0.0277	0.0231
9	OUTE3	0.0252	0.0255	19	UTING	0.0123	0.0114
10	ICOAR	0.0093	0.0157	20	CEFET	0.0186	0.0198

Tabela 9 – MGE para a condução 1 de processamento OMNI

³⁷ A solução float, é aquela na qual o N, número de ciclos da fase da portadora entre os centros de fase das antenas do satélite e do receptor respectivamente é um número real.

Os gráficos 7 e 8 referem-se a um resumo de a MGE e RMS respectivamente obtidos para a conduta 1 de processamento OMNI.

Gráfico 7 - MGE/Solução/Conduta 1

Gráfico 8 – RMS/ Solução/ Conduta 1

9.2.2 Conduta 2 de processamento OMNI

Aqui são apresentadas 3 soluções: L1 “float”, L1 “fix³⁸” e L3 “float”, para cada ponto da rede. Vale ressaltar que a solução L3 “fix” não foi gerada pelo OMNI para nenhum dos vetores. Maiores detalhes, no capítulo 11.

Todas estas soluções foram processadas considerando a inclusão de efemérides precisas fornecidas pelo IGS e de variáveis meteorológicas reais, coletadas “in loco”, como descrito no item 7.5.3.

A média geométrica espacial para as 3 soluções obtidas na condução 2 de processamento, estão apresentadas na forma de um gráfico de esferas, onde cada esfera tem a área proporcional a MGE.

A tabela 10 apresenta os valores de MGE para as soluções da condução 2 de processamento OMNI.

Ordem	Estação	L1 float	L1 fix	L3 float
1	VCAN1	0.026325	0.028054	0.038283
2	VCAN2	0.016404	0.012590	0.021743
3	BENGU	0.008553	0.005886	0.013536
4	TENON	0.034622	0.011721	0.044933
5	JSEFF	0.020835	0.017612	0.020026
6	IAURA	0.034987	0.023563	0.041600
7	OUTE1	0.070162	0.037319	0.104863
8	OUTE2	0.016337	0.010565	0.027476
9	OUTE3	0.035319	0.035319	0.04139
10	ICOAR	0.009352	0.006964	0.015681
11	MARAM	0.109000	0.025636	0.141905
12	COTIJ	0.013165	0.011100	0.017059
13	MOSQ1	0.044231	0.078397	0.027039
14	MOSQ3	0.035678	0.024948	0.012874
15	GUAMA	0.023789	0.019871	0.04658
16	CENTR	0.020516	0.015190	0.024358
17	VPESO	0.053625	0.041279	0.049255
18	MOSQ2	0.028098	0.024893	0.023033
19	UTING	0.012289	0.009955	0.011325
20	CEFET	0.016300	0.011700	0.017300

Tabela 10 – MGE para a condução de processamento 2

³⁸ A solução fix, é aquela na qual o N, número de ciclos da fase da portadora entre os centros de fase das antenas do satélite e do receptor respectivamente é um número inteiro.

O gráfico 9 refere-se ao resumo da MGE e no gráfico 10 são apresentadas as variações de RMS, ambos relativos às soluções obtidas na conduta 2 de processamento OMNI.

Gráfico 9 – MGE/ Estação/ Conduta 2

Gráfico 10 – RMS/Solução/ Conduta 2

10 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO GPSURVEY

Este capítulo expõe os resultados obtidos através do software GPSURVEY, considerando diferentes condutas de processamento, afim de comparar e avaliar as diferenças entre o posicionamento relativo e por pontos simples. Além da repetibilidade deste posicionamento.

Tentou-se neste processamento reproduzir as mesmas condições e informações que um usuário comum teria ao processar os dados obtidos nas seções de observação.

Foram utilizadas nos processamentos as efemérides transmitidas pelos satélites GPS.

Não foram adicionados dados meteorológicos coletados “in loco” no processamento, pois essas informações não são inseridas neste software como informações de inicialização.

Para inserir os dados meteorológicos no processamento GPS, é necessário um arquivo específico para isso. Este arquivo pode ser gerado pelo próprio receptor quando nas seções de observação é informado ao receptor as condições meteorológicas locais ou pode ser editado, já que trata-se de um arquivo texto no formato ASC.

Não foi possível inserir no receptor estes dados quando das seções de observação, em virtude da metodologia adotada para coleta e cálculo da temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, descrita em detalhes no Item 7.5.3.

A opção de se editar um arquivo ASC (*.met) foi descartada em função

de que em se tratando de um software comercial, provavelmente um usuário comum, não teria informações suficientes de como e com que finalidade executar este procedimento.

Além do fato de que na quase totalidade das seções de observação GPS executadas por usuários comuns, não se coleta dados meteorológicos.

10.1 Inicialização

O GPSURVEY é um software de processamento de dados GPS, desenvolvido e comercializado pela TRIMBLE. Os receptores utilizados nas observações GPS também foram da TRIMBLE, sendo assim, não houve nenhuma incompatibilidade entre ele e os dados originais gerados no receptor.

Neste processamento, a posição geodésica dos pontos observados foi calculada pelo processamento de ponto simples.

10.2 A solução do ponto simples

Neste método a solução de navegação é estimada pelos mínimos quadrados pelas equações de medida a cada época, para cada satélite localizado pelo receptor.

A predição da pseudodistância é feita utilizando-se a equação 40.

$$\hat{\rho}_i = |r_i - \hat{r}_u| + c \cdot \hat{b}_u + \hat{\varepsilon}_{\rho_i}$$

Equação 40 - Predição da pseudodistância para o posicionamento por ponto simples

Onde r_i é a posição do satélite na época transmitida, r_u é a posição do receptor no tempo recebido, c é a velocidade da luz no vácuo, b_u é o erro do

relógio do receptor em segundos, e $\widehat{\varepsilon}_{pi}$ é composto por atrasos atmosféricos, modelagem das efemérides dos satélites, AS, ruído do receptor, etc (em metros).

O resíduo $\Delta\rho$ é a diferença entre a medida atual e a predita. Pode ser modelado com o erro relacionado linearmente para o local estimado, $\Delta x = [\Delta r^T c \Delta b]^T$, pela execução de uma expansão de Taylor sobre o ponto estimado. O resultado linearizado é dado por:

$$\Delta\rho_i = \widehat{\rho}_i - \rho_i = \left[-\widehat{l}_i^T \ 1 \right] \begin{bmatrix} \Delta r \\ c \cdot \Delta b \end{bmatrix} + \Delta\varepsilon_{pi}$$

Equação 41 – Resultado linearizado da expansão de Taylor para o resíduo $\Delta\rho$.

Onde:

$$\widehat{l}_i \equiv \frac{r_i - \widehat{r}_u}{|\widehat{r}_i - r_u|}, \quad \Delta r \equiv \widehat{r}_u - r_u, \quad \Delta b \equiv \widehat{b}_u - b_u, \quad \Delta\varepsilon_{pi} \equiv \widehat{\varepsilon}_{pi} - \varepsilon_{pi}$$

Onde $\widehat{l}_i$ é o comprimento estimado do vetor entre as antenas do receptor e do satélite. $\Delta\varepsilon_{pi}$ é o erro residual após as influências conhecidas serem removidas.

Todas as medições são então combinadas dentro de um sistema de equações normais:

$$\Delta\rho = G\Delta x + \Delta\varepsilon_p$$

Onde:

$$\Delta\rho \equiv \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_n \end{bmatrix}, \quad G \equiv \begin{bmatrix} -\widehat{l}_1^T & 1 \\ -\widehat{l}_2^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\widehat{l}_n^T & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta x \equiv \begin{bmatrix} \Delta r_u \\ c \cdot \Delta b_u \end{bmatrix}, \quad \Delta\varepsilon_p \equiv \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{p1} \\ \Delta\varepsilon_{p2} \\ \vdots \\ \Delta\varepsilon_{pn} \end{bmatrix}$$

10.3 O resultado final do posicionamento por ponto simples

Os pontos observados e processados como pontos simples através do software GPSURVEY, são apresentados na figura 16, que foi gerada através do software ARQVIEW GIS v3.1, a partir das coordenadas UTM em SAD-69, obtidas para cada ponto.

Figura 16 – Coordenadas UTM (SAD-69) posicionamento por pontos

Aqui são apresentados os resultados do processamento por ponto simples, nele foram utilizadas as efemérides transmitidas e todas as demais correções transmitidas no sinal GPS.

A tabela 11 apresenta as coordenadas geodésicas dos pontos observados por um período de 2 hs, exceto o ponto 5L. As coordenadas referem-se ao WGS84.

Estação	Ponto	Data	Latitude (S)	Longitude (W)	Altura
BENGU	120	13/07/99	1 22 17.26168	048 27 13.26801	8.65572
CEFET	151	28/07/99	1 26 14.83035	048 27 42.83863	18.18020
CENTR	004L	22/07/99	1 27 15.76336	048 29 32.61611	92.36995
COTIJ	150	20/07/99	1 15 47.98848	048 33 20.88006	-1.44804
GUAMA	103	22/07/99	1 28 33.04967	048 27 18.87533	5.05672
IAURA	112	14/07/99	1 24 58.72417	048 22 43.40070	-10.45021
ICOAR	128	19/07/99	1 17 41.48389	048 29 23.70417	-12.32093
JSEFF	118	14/07/99	1 23 41.04513	048 22 41.76628	-9.88904
MARAM	0002	19/07/99	1 23 32.11165	048 26 38.82832	1.71954
MOSQ1	135	21/07/99	1 09 55.19231	048 28 25.21727	-11.16126
MOSQ2	142	27/07/99	1 07 13.86544	048 23 14.44234	6.52552
MOSQ3	148	21/07/99	1 03 47.31614	048 20 00.08110	-22.61075
OUTE1	131	15/07/99	1 15 24.00893	048 28 06.68202	-22.74120
OUTE2	132	15/07/99	1 15 45.19089	048 26 03.59005	-15.05270
OUTE3	133	15/07/99	1 13 53.99055	048 25 49.32678	-20.74143
TENON	127	13/07/99	1 18 52.50204	048 25 47.01681	-14.39993
UTING	110	28/07/99	1 25 07.79072	048 26 19.78555	24.41057
VCAN1	113	12/07/99	1 24 50.41611	048 29 35.56680	-17.84176
VCAN2	119	12/07/99	1 22 46.51572	048 28 46.50714	2.56736
VPESO	104	27/07/99	1 27 14.06792	048 30 12.87291	-25.08445

Tabela 11 – Resultados finais do processamento por ponto simples

10.4 Variabilidade da posição da estação TAPAN – 5L

As coordenadas oficiais fornecidas pelo IBGE para o ponto 5L em SAD-69 e suas respectivas conversões para WGS-84 estão apresentadas na tabela 12.

Coordenadas	SAD-69	WGS-84
Geográficas	Latitude: 01 20 04,4286 S Longitude: 48 28 56,6381 W Altitude: 7,97 m	Latitude: 01 20 05,717545 S Longitude: 48 28 58,16403 W Altitude: -15,717 m

Tabela 12 – Coordenadas do ponto 5L fornecidas pelo IBGE.

Coordenadas do ponto 5L/dia de observação em WGS-84 e seus erros estimados, estão apresentados no gráfico 11.

Gráfico 11 – Coordenadas geodésicas do ponto 5L – posicionamento por ponto simples

A estação TAPAN (vértice 5L) foi observada durante todos dos 10 dias nos quais foram realizadas medições GPS. Assim, seu processamento foi realizado durante cada um dos dias em separado e também para os 10 dias de observações.

As coordenadas geodésicas finais deste processamento são apresentadas na tabela 13, assim como seus erros estimados de posição

Ponto	Data	Período (h)	Latitude (S)	Longitude (W)	Altura	Erro (m)
5L	12/07/99	5,5	1 20 06.02926	48 28 58.39524	-3.26662	3.026
5L	13/07/99	5,0	1 20 06.08815	48 28 58.33792	-6.248	3.300
5L	14/07/99	5,5	1 20 06.12547	48 28 58.14361	-19.010	3.082
5L	15/07/99	8,0	1 20 06.08895	48 28 58.07182	-26.776	2.622
5L	19/07/99	5,0	1 20 06.11330	48 28 58.03430	-17.109	3.129
5L	20/07/99	7,0	1 20 05.90550	48 28 58.06750	-18.666	2.956
5L	21/07/99	7,5	1 20 05.84710	48 28 57.93901	-15.739	2.674
5L	22/07/99	5,0	1 20 06.04442	48 28 58.13721	-8.873	3.150
5L	27/07/99	8,5	1 20 06.05135	48 28 58.12872	-15.248	2.476
5L	28/07/99	5,0	1 20 05.93326	48 28 58.27935	-6.273	3.027
Média			1.335006299	48.48282041	-13.720862	
Desvio padrão			2,6409.10 ⁰⁵	3,9669.10 ⁰⁵	7.339828684	
Variância			6,97438.10 ⁻¹⁰	1.57363.10 ⁻⁰⁹	53.87308511	

Tabela 13 – Resultado final do processamento por ponto simples do ponto 5L/dia de observação

Na tabela 14 são apresentados os resultados do processamento por ponto simples do ponto 5L, durante os 10 dias de observação, totalizando 62 horas de observação.

Ponto	Data	Período (h)	Latitude (S)	Longitude (W)	Altura	Erro (m)
5L	12 a 28/07	62	1 20 05.96606	48 28 58.15218	-11.548	3.0212

Tabela 14 – Resultado final do posicionamento por ponto simples do ponto 5L durante 62 hs de observação

Há de se notar que a coleta de dados que totaliza 62 horas de observação foi feita em 10 dias, ou seja, de forma descontínua. O resultado final deste processamento indica claramente que ele não deve ser utilizado, pois apresenta um erro bastante significativo e uma perda de tempo de observação desnecessária, pois pode-se notar que com 5,5 h de observação, chegou-se a um erro espacial da mesma ordem.

A seguir são apresentadas na tabela 15 para efeito de comparação as coordenadas geodésicas em WGS-84 dos pontos pertencentes a malha

GPS99, para todos os processamentos executados. Onde: ϕ é latitude, λ é longitude e h altura geométrica.

Ponto	OMNI					GPSURVEY
	Conduta 1		Conduta 2			Ponto simples
	L1float	L3float	L1float	L1fix	L3float	
4L						
$\phi=$	-1 27 15.3079	-1 27 15.3089	-1 27 15.3080	-1 27 15.3075	-1 27 15.3091	-1 27 15.7634
$\lambda=$	-48 29 32.6727	-48 29 32.6697	-48 29 32.6728	-48 29 32.6717	-48 29 32.6696	-48 29 32.6161
$h=$	76.4071	76.4052	76.4039	76.4764	76.4015	92.3700
103						
$\phi=$	-1 28 32.7919	-1 28 32.7836	-1 28 32.7916	-1 28 32.7915	-1 28 32.7833	-1 28 33.0497
$\lambda=$	-48 27 18.9277	-48 27 18.9055	-48 27 18.9277	-48 27 18.9246	-48 27 18.9054	-48 27 18.8753
$h=$	2.7048	2.6597	2.7088	2.6812	2.6635	5.0567
104						
$\phi=$	-1 27 13.7436	-1 27 13.7442	-1 27 13.7435	-1 27 13.7417	-1 27 13.7442	-1 27 14.0679
$\lambda=$	-48 30 13.2445	-48 30 13.2505	-48 30 13.2445	-48 30 13.2449	-48 30 13.2504	-48 30 12.8729
$h=$	-19.0204	-19.9188	-19.0203	-19.0458	-18.9190	-25.0844
110						
$\phi=$	-1 25 07.5264	-1 25 07.5268	-1 25 07.5263	-1 25 07.5263	-1 25 07.5267	-1 25 07.7907
$\lambda=$	-48 26 19.5386	-48 26 19.5361	-48 26 19.5387	-48 26 19.5365	-48 26 19.5361	-48 26 19.7855
$h=$	10.5268	10.5648	10.5238	10.4725	10.5619	24.41006
112						
$\phi=$	-1 24 58.2962	-1 24 58.2943	-1 24 58.2962	-1 24 58.2961	-1 24 58.2963	-1 24 58.7242
$\lambda=$	-48 22 43.4080	-48 22 43.3954	-48 22 43.4080	-48 22 43.4081	-48 22 43.4036	-48 22 43.4007
$h=$	-9.0298	-8.7491	-8.9967	-8.8708	-8.8661	-10.4502
113						
$\phi=$	-1 24 50.0702	-1 24 50.0713	-1 24 50.0701	-1 24 50.0701	-1 24 50.0701	-1 24 50.4161
$\lambda=$	-48 29 35.6500	-48 29 35.6514	-48 29 35.6501	-48 29 35.6508	-48 29 35.6515	-48 29 35.5668
$h=$	-17.6966	-17.6576	-17.7011	-17.6736	-17.6623	-17.8418
118						
$\phi=$	-1 23 40.5877	-1 23 40.5882	-1 23 40.5877	-1 23 40.5883	-1 23 40.5882	-1 23 41.0451
$\lambda=$	-48 22 41.7210	-48 22 41.7198	-48 22 41.7211	-48 22 41.7218	-48 22 41.7199	-48 22 41.7663
$h=$	4.1608	4.1316	4.1626	4.1446	4.1333	-9.8890
119						
$\phi=$	-1 22 46.2615	-1 22 46.2622	-1 22 46.2615	-1 22 46.2613	-1 22 46.2622	-1 22 46.5157
$\lambda=$	-48 28 46.0467	-48 28 46.0465	-48 28 46.0467	-48 28 46.0467	-48 28 46.0465	-48 28 46.5071
$h=$	-0.1852	-0.2197	-0.1882	-0.1961	-0.2226	2.5674
120						
$\phi=$	-1 22 16.7819	-1 22 16.7823	-1 22 16.7798	-1 22 16.7797	-1 22 16.7803	-1 22 17.2617
$\lambda=$	-48 27 12.8816	-48 27 12.8761	-48 27 12.8794	-48 27 12.8794	-48 27 12.8804	-48 27 13.2680
$h=$	-8.6957	-9.1372	-8.4111	-8.3806	-8.3694	8.6557
127						
$\phi=$	-1 18 52.2756	-1 18 52.2761	-1 18 52.2756	-1 18 52.2762	-1 18 52.2761	-1 18 52.5020
$\lambda=$	-48 25 47.0832	-48 25 47.0832	-48 25 47.0832	-48 25 47.0820	-48 25 47.0832	-48 25 47.0168
$h=$	-13.1033	-13.03007	-13.1048	-13.00511	-13.0323	-14.3999
128						
$\phi=$	-1 17 40.9278	-1 17 40.9273	-1 17 40.9279	-1 17 40.9279	-1 17 40.9273	-1 17 41.4839
$\lambda=$	-48 29 23.9990	-48 29 23.9992	-48 29 23.9990	-48 29 23.9995	-48 29 23.9992	-48 29 23.7042
$h=$	-13.8058	-13.8587	-13.8058	-13.7942	-13.8586	-12.3209
131						
$\phi=$	-1 15 23.4953	-1 15 23.4931	-1 15 23.4852	-1 15 23.4956	-1 15 23.4927	-1 15 24.089
$\lambda=$	-48 28 06.6174	-48 28 06.6209	-48 28 06.6190	-48 28 06.6165	-48 28 06.6243	-48 28 06.6820
$h=$	-18.2767	-18.2805	-18.3992	-18.4838	-18.4019	-22.7412
132						
$\phi=$	-1 15 45.0742	-1 15 45.0727	-1 15 45.0735	-1 15 45.0733	-1 15 45.0728	-1 15 45.1909
$\lambda=$	-48 26 04.0550	-48 26 04.0558	-48 26 04.0553	-48 26 04.0549	-48 26 04.0566	-48 26 03.5901
$h=$	-6.2651	-6.2802	-6.2787	-6.2896	-6.2781	-15.0527
133						
$\phi=$	-1 13 53.0674	-1 13 53.6060	-1 13 53.6084	-1 13 53.6084	-1 13 53.6057	-1 13 53.9906
$\lambda=$	-48 25 49.2224	-48 25 49.2209	-48 25 49.2238	-48 25 49.2238	-48 25 49.2212	-48 25 49.3268
$h=$	-13.7187	-13.8011	-13.7408	-13.7408	-13.7957	-20.7414
135						
$\phi=$	-1 09 55.0508	-1 09 55.0489	-1 09 55.0509	-1 09 55.0511	-1 09 55.0489	-1 09 55.1923
$\lambda=$	-48 28 25.3001	-48 28 25.2960	-48 28 25.3000	-48 28 25.2983	-48 28 25.2967	-48 28 25.2173
$h=$	-17.1414	-17.0775	-17.1419	-17.1696	-17.0673	-11.1613
142						
$\phi=$	-1 07 13.5747	-1 07 13.5712	-1 07 13.5748	-1 07 13.5746	-1 07 13.5713	-1 07 13.8654
$\lambda=$	-48 23 14.5179	-48 23 14.5186	-48 23 14.5177	-48 23 14.5154	-48 23 14.5184	-48 23 14.4423
$h=$	-8.3082	-8.2647	-8.3104	-8.5157	-8.2667	6.5255

Ponto	OMNI					GPSURVEY
	Conduta 1		Conduta 2			Ponto simples
	L1float	L3float	L1float	L1fix	L3float	
148						
$\phi=$	-1 03 47.2028	-1 03 47.1971	-1 03 47.2030	-1 03 47.2020	-1 03 47.1977	-1 03 47.3161
$\lambda=$	-48 20 00.4611	-48 20 00.4690	-48 20 00.4606	-48 20 00.4609	-48 20 00.4682	-48 20 00.0811
$h=$	-16.6269	-16.4772	-16.6197	-16.4618	-16.4837	-22.6107
150						
$\phi=$	-1 15 47.9832	-1 15 47.9826	-1 15 47.9832	-1 15 47.9833	-1 15 47.9826	-1 15 47.9885
$\lambda=$	-48 33 20.9367	-48 33 20.9376	-48 33 20.9367	-48 33 20.9353	-48 33 20.9376	-48 33 20.8801
$h=$	-16.5966	-16.6225	-16.5950	-16.5391	-16.6209	-1.4480
151						
$\phi=$	-1 26 14.6164	-1 26 14.6175	-1 26 14.6164	-1 26 14.6165	-1 26 14.6174	-1 26 14.8303
$\lambda=$	-48 27 42.7243	-48 27 42.7230	-48 27 42.7243	-48 27 42.7245	-48 27 42.7230	-48 27 42.8386
$h=$	13.2208	13.1422	13.2234	13.2618	13.1449	18.1802
PA02						
$\phi=$	-1 23 32.09321	-1 23 32.0947	-1 23 32.0931	-1 23 32.0918	-1 23 32.0939	-1 23 32.1116
$\lambda=$	-48 26 38.8683	-48 26 38.8665	-48 26 38.8690	-48 26 38.8680	-48 26 38.8658	-48 26 38.8283
$h=$	-7.5631	-7.6499	-7.4991	-7.4470	-7.6521	1.7195

Tabela 15 - Comparação das coordenadas em WGS-84 para os diversos processamentos analisados.

11 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

11.1 Sobre o PPP

Uma grande vantagem deste serviço é a análise eficaz de dados observados com receptores GPS de diferentes fabricantes sem a necessidade de formar dados diferenciados com receptores de referência. É alcançada uma precisão diária de alguns poucos milímetros na dimensão horizontal e aproximadamente 1cm na dimensão vertical para receptores estacionários.

Uma grande limitação é o fato de que o receptor utilizado nas seções de observação, tem que receber os sinais L1, L2, P1 ou C1 e P2. Se o receptor for de dupla frequência mas não corresponder a este padrão, o AG não processa os dados. Os detalhes encontram-se no item 8.3.

Esta informação é omitida nos artigos que versam sobre o assunto e o conhecimento deste fato só foi possível graças as diversas tentativas frustradas de processamento realizadas pelo autor dos dados da malha GPS99 através do AG.

Em contato mantido via e-mail com o responsável pelo serviço no JPL, descobriu-se que os dados não podiam ser processados em função da ausência do código C1 ou P2 nos dados gerados pelo receptor 4000 SST da Trimble, utilizado para as observações GPS deste trabalho.

11.2 A solução mais precisa: L1 ou L3 (ion free)?

Os gráficos 12 e 13, representam as Médias Geométricas Espaciais para a solução do processamento L1 float (conduta 2/OMNI) e L3 float (conduta 2/OMNI) respectivamente.

Gráfico 12 – Solução float – conduta 2

Gráfico 13 – Solução L3 float – Conduta 2

Para vetores menores que 10Km, a solução L1 apresenta MGE variando entre 0,009m e 0,109m, quando comparados com a variação para L3 que varia de 0,014m até 0,142m. Consequentemente, a solução L1 é a melhor solução para esses comprimentos de vetores;

Para vetores entre 10Km e 35Km, a solução L1 apresenta variação da MGE entre 0,012m e 0,062m e a solução L3 apresenta variação entre 0,013m e 0,072m. Ou seja as duas soluções apresentam soluções equivalentes. Apenas um detalhe chama atenção. O comprimento dos vetores é inversamente proporcional a MGE para a solução L3 e diretamente proporcional para a solução L1, o que indica que a partir de 10Km, a solução L3 é a mais precisa.

Este comportamento correlacionando precisão da solução final de L1 e de L3 com os comprimentos dos vetores também se verificaram na conduta1 de processamento OMNI, ou seja, para vetores de comprimento inferiores a 35 km, preferencialmente menores que 10Km, pode ser utilizada a solução apenas de L1 com uma precisão equivalente a mesma ordem de grandeza daquela que seria obtida se fossem processadas L1 e L3 (ion free).

É obvio que as afirmações acima, necessitam que as medições sejam executadas sob condições semelhantes às observadas neste trabalho:

- ↳ Período de baixa atividade solar;
- ↳ Período diurno;
- ↳ Sem variação brusca do TEC, ou seja, livre dos efeitos provocados pelos jatos de elétrons livres, característicos da região equatorial e
- ↳ Receptor de boa qualidade, ainda que seja de simples frequência;

11.3 A solução mais precisa: Resolver (float) ou Fixar (fix) a ambigüidade?

Os gráficos 14 e 15, representam as Médias geométricas Espaciais para a solução do processamento L1float (conduta 2/OMNI) e L1fix (conduta 2/OMNI) respectivamente.

Gráfico 14 – Solução L1 float – Conduta 2

Gráfico 15 – Solução L1 fix – Conduta 2

Para vetores menores que 10Km, a solução L1float apresenta MGE variando entre 0,009m e 0,109m, a solução L1fix apresenta MGE variando entre 0,007m e 0,037m. Esta comparação indica que para esses vetores a solução L1fix é a que deve ser utilizada.

Para vetores entre 10Km e 35Km, a solução L1float apresenta variação da MGE entre 0,012m e 0,062m e a solução L1fix apresenta variação entre 0,010m e 0,078 m. Ou seja, a solução float é ligeiramente melhor que a solução fix.

Nota-se que para esses vetores o comprimento não é o fator mais relevante sob o ponto de vista da precisão. Os resultados são muito similares. Ficando, portanto, a critério da experiência individual de cada usuário a escolha de fixar ou não a ambigüidade para esse vetores

Esta análise foi baseada apenas nos resultados obtidos no processamento de L1 com a resolução e fixação da ambigüidade. Para que a análise fosse mais geral, deveriam ser apresentados os resultados do processamento de L3 com a resolução e fixação da ambigüidade, o que não foi possível.

Foi adotada a seguinte metodologia de processamento no OMNI, para a obtenção das diversas soluções para cada uma das condutas:

- ↳ Processamento de L1 float;
- ↳ Processamento de L2 float;
- ↳ Processamento de L3 (ion-free) float;
- ↳ Armazenamento das três soluções para que em seguida fosse feito:
- ↳ Processamento de L1 fix;
- ↳ Processamento de L2 fix e
- ↳ Processamento de L3 fix.

Infelizmente não foi possível gerar uma solução L3fix pelo processamento direto no OMNI. Uma das tentativas utilizadas foi a de obter uma solução L3float* em função das soluções fixas de L1 e L2, o que foi possível.

Para obter alguma resposta sobre o porque não foi possível gerar uma solução L3 fix, utilizou-se o recurso da edição do arquivo "INTGR" do OMNI, onde estão contidos os valores fixados da ambigüidade.

Foi executada a edição deste arquivo e fixadas diretamente nele as ambigüidades do sinal GPS para todos os satélites. Após este procedimento, o OMNI gerou uma solução L3 fix.

A solução L3fix gerada a partir da edição do arquivo "INTGR" é idêntica a solução L3float* gerada em função das soluções fixas de L1 e L2, indicando que o OMNI não fixa a ambigüidade em L3 para vetores de bases curtas.

Talvez isso se deva ao fato do OMNI ter sido desenvolvido pelo NGS para implantação de redes que apresentam vetores de várias centenas de quilômetros (comprimentos de muito superiores aos medidos neste trabalho).

Provavelmente os filtros internos do software tenham sido criados para processar vetores longos e impeçam a fixação da ambigüidade de L3 naqueles de comprimentos inferiores a um determinado valor. Certamente todos os vetores medidos neste trabalho encontram-se neste caso.

11.4 A solução mais precisa: Inserir ou não variáveis meteorológicas reais no processamento (Conduta 1 x Conduta 2)?

O gráfico 16 representa as comparações das Médias Geométricas Espaciais das condutas 1 e 2 para a solução do processamento L1 float e o gráfico 17 , representa as comparações das Médias Geométricas Espaciais das condutas 1 e 2 para a solução do processamento L3 float.

As condutas 1 e 2 distinguem-se pelo fato de que na conduta 1 foram utilizados no processamento, os valores padrões do software para variáveis meteorológicas padrões do software, temperatura=20°, pressão atmosférica=1013,00mb e umidade relativa do ar=50%.

Na conduta 2 foram utilizados para as variáveis meteorológicas os valores reais de cada estação. Definindo-se como reais os valores medidos

pelo autor, durante o período de observação em cada uma das estações de observação GPS, de acordo com o descrito no item 9.2.2.

Gráfico 16 – Comparação entre as condutas 1 e 2 para L1 float

Gráfico 17 – Comparação entre as condutas 1 e 2 para L3 float

Observa-se nos gráficos de comparação entre as condutas de processamento para as diferentes soluções L1 e L3, que o comportamento da MGE é bastante similar.

Apenas duas sensíveis variações podem ser notadas para os mesmos pontos nas quatro soluções. O que nos indica algum tipo de erro ocorreu durante as medições nas estações BENGU e CEFET.

No posicionamento relativo é útil a aplicação de correções ionosféricas e troposféricas se as correções diferenciais entre as estações podem ser determinadas com precisão. Se este não é o caso, ou seja, os dados meteorológicos não são representativos das condições atmosféricas atuais, pode ser melhor não aplicar as correções, pois não serão nada confiáveis.

Devido a ionosfera e a troposfera serem altamente correlacionadas para curtas distâncias, a maioria dos atrasos são comuns em ambas as estações. Em termos de efeitos troposféricos, uma exceção a esta regra, pode ser aplicar para estações próximas, porém, com diferentes elevações.

Uma das conclusões importantes desta análise, é a de que os efeitos troposféricos, que são influenciados pelos valores das variáveis meteorológicas locais, são eliminados na dupla diferenciação, o que gera resultados similares de soluções com e sem a inclusão de variáveis meteorológicas reais, quando os vetores tem comprimentos inferiores a 35Km.

Uma outra possibilidade para justificar a similaridade entre as soluções obtidas para as duas condutas, é a de que o modelo de Marini & Murray, utilizado pelo OMNI para correção do atraso troposférico, não seja adequado e representativo para as condições atmosféricas da Região metropolitana de Belém, em plena Amazônia brasileira.

Sugere-se que em trabalhos futuros se aprofundem, os estudos sobre a modelagem dos efeitos troposféricos sob as condições específicas da Amazônia. Talvez com a proposição de modelagem específica que melhor represente as peculiaridades meteorológicas locais.

11.50 RMS de todas as soluções geradas no OMNI

O gráfico 18 representa a variação gráfica do RMS para as 5 soluções analisadas, nas duas condutas adotadas para o processamento OMNI.

Gráfico 18 – Variação do RMS para todas as soluções processadas no OMNI

- Os maiores RMS são da solução L1 fix, este resultado já era esperado em função de que a solução float, sob o ponto de vista estatístico é a melhor solução a ser adotada, contudo as análises da MGE para as diferentes soluções, indicam que a solução fix é a melhor solução sobre o ponto de vista físico;
- A análise gráfica dos resultados de RMS, indica claramente que para vetores de comprimento até a 14 km, as diferenças entre todas as soluções processadas, chegam no máximo a 10mm;
- Ainda para vetores até 14 km, observa-se que as soluções de L1 float para as duas condutas, e as soluções L3 float também para as duas condutas, tem praticamente o mesmo valor de RMS, o que ratifica as conclusões obtidas na análise da influência meteorológica feita a partir da MGE;

Em outras palavras, se o critério para adoção da melhor solução for o de menor RMS, note-se o seguinte:

- a) Vetores até 14 km, deve-se adotar independente das condutas, qualquer uma das soluções de L1 float;
- b) Vetores entre 14 km e 35 km, deve-se adotar independente da conduta, qualquer uma das soluções L3 float.

11.60 Posicionamento por ponto simples versus Posicionamento relativo

O processamento por ponto simples realizado através do software GPSurvey, não forneceu os desvios de cada ponto com 2 horas de observação, para que fosse comparado aos desvios fornecidos pelo OMNI. Assim, são apresentadas apenas as coordenadas geodésicas em WGS84 para os dois casos: o ponto simples do GPSurvey (tabela 15) e o relativo do OMNI (tabela 16, onde adotou-se a solução L3 float da conduta 1, para efeitos de comparação).

Posicionamento por ponto – GPSurvey			
Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Altura (m)
BENGU	1 22 17.26168	048 27 13.26801	8.65572
CEFET	1 26 14.83035	048 27 42.83863	18.18020
CENTR	1 27 15.76336	048 29 32.61611	92.36995
COTIJ	1 15 47.98848	048 33 20.88006	-1.44804
GUAMA	1 28 33.04967	048 27 18.87533	5.05672
IAURA	1 24 58.72417	048 22 43.40070	-10.45021
ICOAR	1 17 41.48389	048 29 23.70417	-12.32093
JSEFF	1 23 41.04513	048 22 41.76628	-9.88904
MARAM	1 23 32.11165	048 26 38.82832	1.71954
MOSQ1	1 09 55.19231	048 28 25.21727	-11.16126
MOSQ2	1 07 13.86544	048 23 14.44234	6.52552
MOSQ3	1 03 47.31614	048 20 00.08110	-22.61075
OUTE1	1 15 24.00893	048 28 06.68202	-22.74120
OUTE2	1 15 45.19089	048 26 03.59005	-15.05270
OUTE3	1 13 53.99055	048 25 49.32678	-20.74143
TENON	1 18 52.50204	048 25 47.01681	-14.39993
UTING	1 25 07.79072	048 26 19.78555	24.41057
VCAN1	1 24 50.41611	048 29 35.56680	-17.84176
VCAN2	1 22 46.51572	048 28 46.50714	2.56736
VPESO	1 27 14.06792	048 30 12.87291	-25.08445

Tabela 16 – Coordenadas Geodésicas em WGS-84 do processamento por ponto simples

Posicionamento Relativo – OMNI			
Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Altura (m)
BENGU	-1 22 16.78227	-48 27 12.87606	-9.1372
CEFET	-1 26 14.61747	-48 27 42.72301	13.1422
CENTR	-1 27 15.30894	-48 29 32.66969	76.4052
COTIJ	-1 15 47.98258	-48 33 20.93761	-16.6225
GUAMA	-1 28 32.78364	-48 27 18.90546	2.6597
IAURA	-1 24 58.29429	-48 22 43.39537	-8.7491
ICOAR	-1 17 40.92730	-48 29 23.99921	-13.8587
JSEFF	-1 23 40.58822	-48 22 41.71980	4.1316
MARAM	-1 23 32.09321	-48 26 38.86834	-7.5631
MOSQ1	-1 9 55.04890	-48 28 25.29602	-17.0775
MOSQ2	-1 7 13.57118	-48 23 14.51860	-8.2647
MOSQ3	-1 3 47.19711	-48 20 0.46898	-16.4772
OUTE1	-1 15 23.49313	-48 28 6.62090	-18.2805
OUTE2	-1 15 45.07267	-48 26 4.05581	-6.2802
OUTE3	-1 13 53.60595	-48 25 49.22092	-13.8011
TENON	-1 18 52.27556	-48 25 47.08321	-13.1033
UTING	-1 25 7.52677	-48 26 19.53606	10.5648
VCAN1	-1 24 50.07130	-48 29 35.65142	-17.6576
VCAN2	-1 22 46.26220	-48 28 46.04648	-0.2197
VPESO	-1 27 13.74419	-48 30 13.25045	-18.9188

Tabela 17 - Coordenadas Geodésicas em WGS-84 do processamento relativo–OMNI

As coordenadas obtidas pelo processamento dos vetores no OMNI e por ponto simples no GPSurvey diferem entre si por de diversos fatores:

- ➡ Foram processados em cada um dos softwares, observáveis GPS diferentes. No OMNI foram utilizadas as fases da portadora L1 e L2 , já no GPSurvey, foi usado o código C/A (pseudodistância);
- ➡ O posicionamento por ponto simples, está sujeito a todas as influências de degradação intencional do sinal GPS: multicaminhamento, atrasos e cintilações provocados pela ionosfera e troposfera terrestres. Já no posicionamento relativo, pode-se

minimizar ou eliminar grande parte desses efeitos nocivos a precisão da posição final;

- ↳ No OMNI foram inseridas efemérides precisas no processamento, o que não foi feito no GPSurvey;
- ↳ Através da combinação das fases da portadora L1 e L2 no OMNI, que gera a L3 (ion free), pode-se cancelar a maioria dos efeitos ionosféricos no sinal GPS, aumentando a precisão do posicionamento final. Isso é impossível fazer no posicionamento por ponto simples.

11.7A variação do posicionamento por ponto simples

O vértice 5L (estação TAPAN) é um vértice geodésico pertencente a rede do IBGE, foi a estação escolhida pelo autor para servir de referência no processamento dos vetores. Adicionalmente, serviu também para a análise da variabilidade da solução do posicionamento por ponto simples. Nela foram coletadas 62 horas de observações GPS, distribuídos em 10 dias.

Foram geradas soluções por pontos simples para cada um dos dias individualmente e também foram processados o total de horas observadas durante estes 10 dias.

O gráfico 19, representa a MGE para cada um dos dias observados. Nota-se que quanto maior a quantidade de horas observadas, menores vão ficando as bolhas e conseqüentemente, aumentando a precisão da solução.

Um exemplo disso pode ser visto ao se comparar o resultado para o dia 13/07/99 com 3,3m de erro espacial para 5 horas de observação e no dia 27/07/99 com 2,4m de erro espacial em 8,5 horas de observação.

Gráfico 19 – MGE para as soluções de cada dia em função do número de horas observadas na estação 5L.

11.8A influência da variação da pressão atmosférica na precisão final de uma observação GPS.

Durante os dias nos quais foram feitas as observações GPS, houve apenas um dia onde ocorreu uma brusca mudança na pressão atmosférica (15/07/99). Em todos os outros dias de observação, a pressão atmosférica teve um comportamento bastante similar.

No decorrer do dia 15/07/99, foram observados também, os valores extremos das variáveis meteorológicas, a temperatura do ar mais elevada e umidade relativa mais baixa, respectivamente, 34,4° e 54%.

Esses picos de temperatura, umidade relativa e principalmente pressão atmosférica ocorreram por volta das 14:00 hs. Até então, apresentavam comportamento semelhante aos outros dias, como pode ser notado no gráfico 3.

Ao término da seção de observações daquele dia, este comportamento

atípico nas condições meteorológicas locais prosseguiram, voltando as condições de normalidade quando se iniciou a seção de observação do dia 16/07/99.

Observa-se no gráfico 20 que a MGE variou durante este período de 0,03m para cerca de 0,110m, aumento 267%.

No gráfico 21, que o RMS variou de 0,015m para 0,03m, ou seja, aumentou 100% neste período.

Gráfico 20 – Variação da MGE em 15/07/99

Gráfico 21 – Variação do RMS em 15/07/99

É provável que o comportamento diferenciado das condições meteorológicas locais neste dia e no período específico a partir das 14:00h, tenha influenciado no aumentos da MGE e RMS, trazendo como consequência direta a diminuição da precisão na posição do ponto observado.

Finalmente o autor sugere que se desenvolvam trabalhos futuros no sentido de:

- ↳ Compreender e prever o comportamento da pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar e suas repentinas variações;
- ↳ Estudar a correlação entre as variações repentinas de variáveis meteorológicas e a precisão da posição de um ponto geodésico observado com o sistema de posicionamento NAVSTAR/GPS;
- ↳ Desenvolver modelos que possam minimizar estes efeitos, com a finalidade de aumentar a precisão da posição de um ponto observado sob estas condições meteorológicas;

ANEXO A

Neste anexo, são apresentadas as monografias dos pontos geodésicos estabelecidos pelo autor para subsídio deste trabalho

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. do vértice: PA-02	Estação: Maram
Data: 19/07/99	Altura de antena: 1,61 m
Período de rastreio: 12:17 h - 14:17 h	Município: Belém
Local: Estação de rádio da marinha	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto com chapa cravada no topo (SAT PA-02) 00096. A 10 m da esquina NE da estação de rádio da marinha, localizada na Rua da marinha, Bairro da Marambaia, Belém.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. do vértice: 4L	Estação: Centr
Data: 22/07/99	Altura de antena: 1,67 m
Período de rastreo: 8:30 h - 10:45 h	Município: Belém
Local: Manuel Pinto da Silva	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de centro com chapa (4-L - 1976) cravada na laje de cobertura do Ed. Manoel Pinto da Silva, esquina da Av. Nazaré com Av. Serzedelo Correa , bairro do Centro, Belém.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 5L	Estação: Tapan
Data: 12 a 28/07/99	Altura de antena:
Período de rastreio:	Município: Belém
Local: IBGE-Tapanã	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de centro com chapa (5-L 1976), canto sudoeste do galpão de distribuição da PETROBRAS, na Rodovia Arthur Bernardes, Bairro do Tapanã, Belém (vértice do IBGE).

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 103	Estação: Guama
Data: 22/07/99	Altura de antena: 1,63 m
Período de rastreio: 11:30 a 13:30 h	Município: Belém
Local: UFPA/Guamá	Responsável: Uchôa

Descrição da estação

Rio Guamá

90 0 90 180 270 360 450 Meters

Descrição de acesso:

Chapa metálica cravada no topo do mirante da Reitoria da UFPA, no campus universitário do Guamá, em Belém.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 104	Estação: Vpeso
Data: 27/07/99	Altura de antena: 1,68 m
Período de rastreo: 14:50 a 16:50 h	Município: Belém
Local: Praça do relógio/Ver o peso	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto no Jardim da praça do relógio, frente a doca do Ver o Peso, Bairro do comércio, Belém.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 110	Estação: Guama
Data: 27/07/99	Altura de antena: 1, m
Período de rastreio: 8:50 a 10:50 h	Município: Belém
Local: ETA, COSANPA/Utinga	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Chapa metálica cravada no topo da estação de tratamento de água (ETA) da COSANPA, bairro do Utinga, Belém.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 112	Estação: laura
Data: 14/07/99	Altura de antena: 1,46 m
Período de rastreio: 12:45 a 14:45 h	Município: Belém
Local: Igreja de Santana do Aurá	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto situado frente a Igreja de Santana do Aurá, bairro do Aurá, Ananindeua. Acesso pela Rodovia BR 316.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 113	Estação: Vcan1
Data: 22/07/99	Altura de antena: 1,70 m
Período de rastreio: 12:16 a 14:16 h	Município: Belém
Local: Ponte sobre o canal Jacaré	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Chapa metálica na lateral direita da ponte sobre o canal do Jacaré, Av. Arthur Bernardes, Miramar, sentido Belém-Val de Cans.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 118	Estação: Jseff
Data: 14/07/99	Altura de antena: 1,51 m
Período de rastreo: 9:45 a 11:45 h	Município: Belém
Local: CAIC Júlia Seffer	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Chapa metálica no topo do reservatório de água da Escola Estadual de 1º e 2º graus, Eneida de Moraes, Conjunto Residencial Júlia Seffer, Ananindeua.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 119	Estação: Vcan2
Data: 12/07/99	Altura de antena: 1,70 m
Período de rastreo: 9:45 a 11:45 h	Município: Belém
Local: Bombeiros INFRAERO	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Chapa metálica no topo do reservatório de água do corpo de bombeiros da INFRAERO, Av. Arthur Bernardes, bairro da Pratinha.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 120	Estação: Bengu
Data: 13/07/99	Altura de antena: 1,52 m
Período de rastreio: 9:05 a 11:05 h	Município: Belém
Local: Chácara Nakashi/Bengui	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto na lateral da quadra de esportes da Chácara Nakashi, Rua do japonês, bairro do Bengui, Belém.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 127	Estação: Tenon
Data: 13/07/99	Altura de antena: 1,64 m
Período de rastreo: 11:50 a 13:50 h	Município: Belém
Local: Chácara Portal do céu	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Chapa metálica cravada na base da biruta do campo de pouso da chácara Portal do Céu, Rua Alacides Nunes, Tenoné.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 128	Estação: Icoar
Data: 13/07/99	Altura de antena: 1,64 m
Período de rastreio: 11:50 a 13:50 h	Município: Belém
Local: Praça do Cruzeiro	Responsável: Uchôa

Descrição da estação

Descrição de acesso:

Marco de concreto situado na praça do Cruzeiro, entrocamento da Rua do Cruzeiro com a Tv. Siqueira Mendes, Icoaraci.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 131	Estação: Oute1
Data: 15/07/99	Altura de antena: 1,49 m
Período de rastreio: 14:35 a 16:35 h	Município: Belém
Local: Praia grande, Outeiro	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

metálica cravada na calçada frente ao Hotel Nóbrega, Praia grande, Ilha de Outeiro.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 132	Estação: Oute2
Data: 15/07/99	Altura de antena: 1,59 m
Período de rastreio: 9:15 a 11:15 h	Município: Belém
Local: Estrada da fazenda COIMPA	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Percorrendo-se 2400 m a partir da ponte sobre o Rio Maguari em direção a Outeiro, entrando a direita no sentido da fazenda COIMPA, percorre-se 100m e entra-se a esquerda com 400 m, chega-se ao marco de concreto, Ilha do Outeiro.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 133	Estação: Oute3
Data: 15/07/99	Altura de antena: 1,39 m
Período de rastreio: 12:10 a 14:10 h	Município: Belém
Local: Granja Ferreira/Outeiro	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto localizado na granja do Sr. Ferreira, à Estrada do Fama, Rua do Tucumaera, Rua Vista Alegre, Ilha do Outeiro.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 135	Estação: Mosq1
Data: 21/07/99	Altura de antena: 1,68 m
Período de rastreio: 11:35 a 13:35 h	Município: Belém
Local: Beira mar c/siqueira Mendes	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto situado a Rua Siqueira Mendes com Av. Beira Mar, obra calçada de pedras na Ilha do Mosqueiro.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 142	Estação: Mosq2
Data: 27/07/99	Altura de antena: 1,83 m
Período de rastreio: 11:30 a 13:30 h	Município: Belém
Local: Trevo Chapéu virado/ Carananduba	Responsável: Uchôa

Descrição da estação

Descrição de acesso:

Marco de concreto, ao centro da “ilha” do trevo de acesso a Carananduba e Chapéu Virado, ao Km 33,8 da PA- 391, Ilha de Mosqueiro.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 148	Estação: Mosq3
Data: 21/07/99	Altura de antena: 1,53 m
Período de rastreio: 9:00 a 11:00 h	Município: Belém
Local: Praça Bacuri, Baía do Sol	Responsável: Uchôa

Descrição da estação

Descrição de acesso:

Marco de concreto localizado próximo ao coreto da praça Bacuri, frente a Escola Municipal Dr. Lauro Chaves, Baía do Sol, Ilha de Mosqueiro.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 150	Estação: Cotij
Data: 20/07/99	Altura de antena: 1,575 m
Período de rastreo: 10:16 a 12:16 h	Município: Belém
Local: Igreja de S.Francisco, Cotijuba	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Marco de concreto próximo ao canto externo da cerca de proteção da Igreja de São Francisco de Assis, a cerca de 100 m do porto.

ESTAÇÃO GPS – MONOGRAFIA DE MARCO GEODÉSICO

Identif. Do vértice: 151	Estação: Cefet
Data: 28/07/99	Altura de antena: 1,775 m
Período de rastreio: 11:45 a 13:45 h	Município: Belém
Local: Reservatório CEFET, Marco.	Responsável: Uchôa

Descrição da estação **Descrição de acesso:**

Chapa metálica cravada no topo do Reservatório elevado de água do CEFET-PA, Bairro do Marco, Acesso pela Av. Almirante Barroso.

ANEXO B

Nome: SA-22-5L	Município: Belém	Estado: Pará
Latitude: 01 20 04,4286 S	UTM (N): 9852346,430	MC: 51
Longitude: 48 28 56,6381 W	UTM (E): 780162,110	Medição: set/76
Sigma Lat: 0,626 m	Fator de escala: 1,00057178	Ajuste: set/96
Sigma Lon: 0,728 m	Conv.M.Plana: -00 03 31	Datum: SAD-69
Altitude: 7,97 m	Datum: Imbituba	Medição: set/76
Classe: Trigonométrica		

Localização: Interior da base do Tapanã, pertencente a PETROBRAS na cidade de Belém.

Descrição: O marco de centro possui uma chapa estampada 5-L 1976, cravada no canto sudoeste da calçada do galpão S-5 da PETROBRAS, no local exato de uma antiga estação poligonal denominada Tapanã-2

Itinerário: Parte-se do centro da cidade de Belém, pela Av. Pedro Álvares Cabral, Rodovia Arthur Bernardes, passando pela Base aérea e por fiscalização militar. A base do Tapanã da PETROBRAS/distribuidora, encontra-se um pouco aquém do cruzamento entre as rodovias Artur Bernardes e Tapanã.

Tabela 1 – Resumo da estação SA-22-5L (adaptada do IBGE)

ANEXO C

Conduta 1de processamento OMNI

Aqui são apresentadas 2 soluções: L1 “float” e L3 “float” para cada ponto. Nas duas soluções foram incluídas efemérides precisas e variáveis meteorológicas padrão do software (temperatura do ar = 20°, pressão atmosférica = 1013mb e umidade relativa do ar = 50%).

Vetor: 5L-VCAN1			Estação: VCAN1		desvios
ΔX (m)	1007.8932		Latitude	-1 24 50.07021	0.0065
ΔY (m)	609.6797	L1 float RMS= 0.0253	Longitude	-48 29 35.65000	0.0136
ΔZ (m)	8731.3800		Altura (m)	-17.6966	0.0260
L (m)	8810.4798				
ΔX (m)	1007.9010	L3 float RMS= 0.0321	Latitude	-1 24 50.07130	0.0083
ΔY (m)	609.7375		Longitude	-48 29 35.65142	0.0174
ΔZ (m)	8731.4143		Altura (m)	-17.6576	0.0331
L (m)	8810.5187				

Vetor: 5L-VCAN2			Estação: VCAN2		desvios
ΔX (m)	-213.3398		Latitude	-1 22 46.26154	0.0021
ΔY (m)	-324.1270	L1 float RMS= 0.0142	Longitude	-48 28 46.04670	0.0063
ΔZ (m)	4930.1264		Altura (m)	-0.1852	0.0150
L (m)	4945.3735				
ΔX (m)	-213.3217	L3 float RMS= 0.0186	Latitude	-1 22 46.26220	0.0028
ΔY (m)	-324.1576		Longitude	-48 28 46.04648	0.0083
ΔZ (m)	4930.1461		Altura (m)	-0.2197	0.0199
L (m)	4945.3943				

Vetor: 5L-BENGU			Estação: BENGU		desvios
ΔX (m)	-2378.0111		Latitude	-1 22 16.78187	0.0133
ΔY (m)	2223.0978	L1 float RMS= 0.0058	Longitude	-48 27 12.88158	0.0307
ΔZ (m)	4024.7082		Altura (m)	-8.6957	0.0538
L (m)	5176.4251				
ΔX (m)	-2377.8461	L3 float RMS= 0.0138	Latitude	-1 22 16.78227	0.0335
ΔY (m)	2223.5417		Longitude	-48 27 12.87606	0.0756
ΔZ (m)	4024.7099		Altura (m)	-9.1372	0.1384
L (m)	5176.5413				

Vetor: 5L-TENON			Estação: TENON			desvios
ΔX (m)	-4457.4385	L1 float RMS= 0.0244	Latitude	-1 18 52.27556	0.0054	
ΔY (m)	-3876.5060		Longitude	-48 25 47.08321	0.0173	
ΔZ (m)	-2255.1202		Altura (m)	-13.1033	0.0295	
L (m)	6323.1024					
ΔX (m)	-4457.4863	L3 float RMS = 0.0314	Latitude	-1 18 52.27605	0.0070	
ΔY (m)	-3876.4518		Longitude	-48 25 47.08322	0.0226	
ΔZ (m)	-2255.1035		Altura (m)	-13.0307	0.0382	
L (m)	6323.0969					
Vetor: 5L-JSEFF			Estação: JSEFF			desvios
ΔX (m)	-8615.2109	L1 float RMS= 0.0199	Latitude	-1 23 40.58769	0.0029	
ΔY (m)	-7824.2763		Longitude	-48 22 41.72099	0.0085	
ΔZ (m)	6598.3850		Altura (m)	4.1608	0.0188	
L (m)	13378.3348					
ΔX (m)	-8615.2187	L3 float RMS= 0.0189	Latitude	-1 23 40.58822	0.0028	
ΔY (m)	-7824.3228		Longitude	-48 22 41.71980	0.0081	
ΔZ (m)	6598.4007		Altura (m)	4.1316	0.0181	
L (m)	13378.3748					
Vetor: 5L-IAURA			Estação: IAURA			desvios
ΔX (m)	-8528.5849	L1 float RMS= 0.0277	Latitude	-1 24 58.29615	0.0066	
ΔY (m)	-7843.2577		Longitude	-48 22 43.40797	0.0103	
ΔZ (m)	8984.1783		Altura (m)	-9.0298	0.0285	
L (m)	14661.8182					
ΔX (m)	-8529.0635	L3 float RMS = 0.0508	Latitude	-1 24 58.29429	0.0122	
ΔY (m)	-7843.3057		Longitude	-48 22 43.39537	0.0190	
ΔZ (m)	8984.1280		Altura (m)	-8.7491	0.0532	
L (m)	14662.0914					
Vetor: 5L-OUTE1			Estação: OUTE1			desvios
ΔX (m)	-1321.2787	L1 float RMS= 0.0241	Latitude	-1 15 23.49530	0.0118	
ΔY (m)	-911.5669		Longitude	-48 28 6.61741	0.0486	
ΔZ (m)	-8666.3403		Altura (m)	-18.2767	0.0294	
L (m)	8813.7499					
ΔX (m)	-1321.1962	L3 float RMS = 0.0316	Latitude	-1 15 23.49313	0.0158	
ΔY (m)	-911.4970		Longitude	-48 28 6.62090	0.0653	
ΔZ (m)	-8666.4071		Altura (m)	-18.2805	0.0388	
L (m)	8813.7959					
Vetor: 5L-OUTE2			Estação: OUTE2			desvios
ΔX (m)	-4155.2218	L1 float RMS= 0.0124	Latitude	-1 15 45.07416	0.0034	
ΔY (m)	-3426.5304		Longitude	-48 26 4.05503	0.0078	
ΔZ (m)	-8003.4383		Altura (m)	-6.2651	0.0139	
L (m)	9646.8650					
ΔX (m)	-4155.1945	L3 float RMS = 0.0150	Latitude	-1 15 45.07267	0.0042	
ΔY (m)	-3426.5251		Longitude	-48 26 4.05581	0.0097	
ΔZ (m)	-8003.4842		Altura (m)	-6.2802	0.0172	
L (m)	9646.8893					
Vetor: 5L-OUTE3			Estação: OUTE3			desvios
ΔX (m)	-4542.7896	L1 float RMS= 0.0219	Latitude	-1 13 53.60740	0.0039	
ΔY (m)	-3680.6067		Longitude	-48 25 49.22237	0.0173	
ΔZ (m)	-11426.5102		Altura (m)	-13.7187	0.0179	
L (m)	12835.4563					
ΔX (m)	-4542.7690	L3 float RMS = 0.0221	Latitude	-1 13 53.60595	0.0039	
ΔY (m)	-3680.6972		Longitude	-48 25 49.22092	0.0175	
ΔZ (m)	-11426.5566		Altura (m)	-13.8011	0.0181	
L (m)	12835.5162					

Vetor: 5L-ICOAR			Estação: ICOAR			desvios	
ΔX (m)	529.1324	L1 float RMS= 0.0035	Latitude	-1 17 40.92784		0.0013	
ΔY (m)	607.1911		Longitude	-48 29 23.99895		0.0039	
ΔZ (m)	-4446.0256		Altura (m)	-13.8058		0.0083	
L (m)	4518.3853						
ΔX (m)	529.1732	L3 float RMS = 0.0142	Latitude	-1 17 40.92730		0.0022	
ΔY (m)	607.1571		Longitude	-48 29 23.99921		0.0065	
ΔZ (m)	-4446.0434		Altura (m)	-13.8587		0.0141	
L (m)	4518.4030						
Vetor: 5L-MARAM			Estação: MARAM			desvios	
ΔX (m)	-3128.6340	L1 float RMS= 0.0198	Latitude	-1 23 32.09321		0.0553	
ΔY (m)	2962.1693		Longitude	-48 26 38.86834		0.0644	
ΔZ (m)	6337.2670		Altura (m)	-7.5631		0.0593	
L (m)	7663.1424						
ΔX (m)	-3128.6178	L3 float RMS = 0.0262	Latitude	-1 23 32.09473		0.0750	
ΔY (m)	-2962.2724		Longitude	-48 26 38.86652		0.0887	
ΔZ (m)	6337.3115		Altura (m)	-7.6499		0.0814	
L (m)	7663.2124						
Vetor: 5L-COTIJ			Estação: COTIJ			desvios	
ΔX (m)	5967.5679	L1 float RMS= 0.0139	Latitude	-1 15 47.98318		0.0019	
ΔY (m)	5514.4671		Longitude	-48 33 20.93672		0.0053	
ΔZ (m)	-7914.3364		Altura (m)	-16.5966		0.0119	
L (m)	11342.7481						
ΔX (m)	5967.6053	L3 float RMS = 0.0179	Latitude	-1 15 47.98258		0.0025	
ΔY (m)	5514.4661		Longitude	-48 33 20.93761		0.0069	
ΔZ (m)	-7914.3556		Altura (m)	-16.6225		0.0154	
L (m)	11342.7807						
Vetor: 5L-MOSQ1			Estação: MOSQ1			desvios	
ΔX (m)	-1030.9892	L1 float RMS= 0.0331	Latitude	-1 9 55.05078		0.0056	
ΔY (m)	-368.1836		Longitude	-48 28 25.30013		0.0326	
ΔZ (m)	-18752.2780		Altura (m)	-17.1414		0.0285	
L (m)	18784.2069						
ΔX (m)	-1031.1275	L3 float RMS = 0.0199	Latitude	-1 9 55.04890		0.0028	
ΔY (m)	-368.2193		Longitude	-48 28 25.29602		0.0133	
ΔZ (m)	-18752.3345		Altura (m)	-17.0775		0.0159	
L (m)	18784.2716						
Vetor: 5L-MOSQ3			Estação: MOSQ3			desvios	
ΔX (m)	12849.2340	L1 float RMS= 0.0309	Latitude	-1 3 47.20278		0.0122	
ΔY (m)	10565.1226		Longitude	-48 20 0.46111		0.0198	
ΔZ (m)	30048.6226		Altura (m)	-16.6269		0.0328	
L (m)	34345.9510						
ΔX (m)	12849.1539	L3 float RMS = 0.0114	Latitude	-1 3 47.19711		0.0045	
ΔY (m)	10564.8467		Longitude	-48 20 0.46898		0.0074	
ΔZ (m)	30048.7940		Altura (m)	-16.4772		0.0123	
L (m)	34345.9861						
Vetor: 5L-GUAMA			Estação: GUAMA			desvios	
ΔX (m)	-2055.3966	L1 float RMS= 0.0195	Latitude	-1 28 32.79193		0.0108	
ΔY (m)	-2306.1050		Longitude	-48 27 18.92778		0.0151	
ΔZ (m)	15570.6692		Altura (m)	2.7048		0.0146	
L (m)	15874.1461						
ΔX (m)	-2055.8875	L3 float RMS = 0.0379	Latitude	-1 28 32.78364		0.0213	
ΔY (m)	-2306.5915		Longitude	-48 27 18.90546		0.0296	
ΔZ (m)	15570.4135		Altura (m)	2.6597		0.0285	
L (m)	15874.0296						

Vetor: 5L-CENTR			Estação: CENTR			desvios	
ΔX (m)	950.6149	L1 float RMS= 0.0145	Latitude	-1 27 15.30790	0.0038		
ΔY (m)	535.5278		Longitude	-48 29 32.67271	0.0084		
ΔZ (m)	13193.3731		Altura (m)	76.4071	0.0153		
L (m)	13238.4120						
ΔX (m)	950.5467	L3 float RMS = 0.0174	Latitude	-1 27 15.30894	0.0047		
ΔY (m)	535.4638		Longitude	-48 29 32.66969	0.0102		
ΔZ (m)	13193.4051		Altura (m)	76.4052	0.0187		
L (m)	13238.4364						
Vetor: 5L-VPESO			Estação: VPESO			desvios	
ΔX (m)	1952.3104	L1 float RMS= 0.0268	Latitude	-1 27 13.74356	0.0059		
ΔY (m)	1296.0651		Longitude	-48 30 13.24454	0.0231		
ΔZ (m)	13142.9178		Altura (m)	-19.0204	0.0430		
L (m)	13350.1906						
ΔX (m)	1952.3805	L3 float RMS = 0.0251	Latitude	-1 27 13.74419	0.0056		
ΔY (m)	1296.2620		Longitude	-48 30 13.25045	0.0219		
ΔZ (m)	13142.9398		Altura (m)	-18.9188	0.0409		
L (m)	13350.2416						
Vetor: 5L-MOSQ2			Estação: MOSQ2			desvios	
ΔX (m)	-8290.8154	L1 float RMS= 0.0346	Latitude	-1 7 13.57471	0.0056		
ΔY (m)	-6662.8150		Longitude	-48 23 14.51789	0.0152		
ΔZ (m)	-23710.8749		Altura (m)	-8.3082	0.0225		
L (m)	25987.2336						
ΔX (m)	-8290.8295	L3 float RMS = 0.0295	Latitude	-1 7 13.57118	0.0047		
ΔY (m)	-6662.7664		Longitude	-48 23 14.51860	0.0126		
ΔZ (m)	-23710.9824		Altura (m)	-8.2647	0.0188		
L (m)	25987.3238						
Vetor: 5L-UTING			Estação: UTING			desvios	
ΔX (m)	-3540.0578	L1 float RMS= 0.0127	Latitude	-1 25 7.52635	0.0027		
ΔY (m)	-3398.8335		Longitude	-48 26 19.53864	0.0063		
ΔZ (m)	9268.0833		Altura (m)	10.5268	0.0102		
L (m)	10487.2039						
ΔX (m)	-3540.1424	L3 float RMS = 0.0116	Latitude	-1 25 7.52677	0.0025		
ΔY (m)	-3398.8582		Longitude	-48 26 19.53606	0.0058		
ΔZ (m)	9268.0972		Altura (m)	10.5648	0.0095		
L (m)	10487.2527						
Vetor: 5L-CEFET			Estação: CEFET			desvios	
ΔX (m)	-1583.3299	L1 float RMS= 0.0224	Latitude	-1 26 14.61644	0.0041		
ΔY (m)	-1729.6647		Longitude	-48 27 42.72434	0.0080		
ΔZ (m)	11328.2043		Altura (m)	13.2208	0.0163		
L (m)	11568.3571						
ΔX (m)	-1583.3079	L3 float RMS = 0.0237	Latitude	-1 26 14.61747	0.0043		
ΔY (m)	-1729.7513		Longitude	-48 27 42.72301	0.0085		
ΔZ (m)	11328.2340		Altura (m)	13.1422	0.0174		
L (m)	11568.3961						

Conduta 2 de processamento OMNI

Aqui são apresentadas 4 soluções: L1 "float", L1 "fix" e L3 "float", para cada ponto da rede. A solução L3 "fix" não foi gerada pelo OMNI. Todas estas

soluções foram processadas considerando a inclusão de efemérides precisas e variáveis meteorológicas reais, coletadas “in loco”.

Vetor: 5L-VCAN1			Estação: VCAN1		desvios
ΔX (m)	1007,8988	L1 float RMS = 0,0253	Latitude	-1 24 50,07014	0,0064
ΔY (m)	609,6786		Longitude	-48 29 35,65011	0,0136
ΔZ (m)	8731,3776		Altura (m)	-17,7011	0,0259
L (m)	8810,4780				
ΔX (m)	1007,8971	L1 fix RMS = 0,0254	Latitude	-1 24 50,07010	0,0013
ΔY (m)	609,7140		Longitude	-48 29 35,65083	0,0015
ΔZ (m)	8731,3770		Altura (m)	-17,6736	0,0120
L (m)	8810,4796				
ΔX (m)	1007,9065	L3 float RMS = 0,0321	Latitude	-1 24 50,07122	0,0082
ΔY (m)	609,7363		Longitude	-48 29 35,65154	0,0174
ΔZ (m)	8731,4118		Altura (m)	-17,6623	0,0331
L (m)	8810,5168				

Vetor: 5L-VCAN2			Estação: VCAN2		desvios
ΔX (m)	-213,3371	L1 float RMS = 0,0143	Latitude	-1 22 46,26152	0,0021
ΔY (m)	-324,1286		Longitude	-48 28 46,04673	0,0063
ΔZ (m)	4930,1258		Altura (m)	-0,1882	0,0150
L (m)	4945,3728				
ΔX (m)	-213,3332	L1 fix RMS = 0,0153	Latitude	-1 22 46,26128	0,0009
ΔY (m)	-324,1354		Longitude	-48 28 46,04668	0,0012
ΔZ (m)	4930,1185		Altura (m)	-0,1961	0,0125
L (m)	4945,3658				
ΔX (m)	-213,3191	L3 float RMS = 0,0186	Latitude	-1 22 46,26219	0,0028
ΔY (m)	-324,1592		Longitude	-48 28 46,04651	0,0083
ΔZ (m)	4930,1455		Altura (m)	-0,2226	0,0199
L (m)	4945,3937				

Vetor: 5L - BENGU			Estação: BENGU		desvios
ΔX (m)	-2378,2161	L1 float RMS = 0,0089	Latitude	-1 22 16,77983	0,0013
ΔY (m)	-2222,8973		Longitude	-48 27 12,88092	0,0039
ΔZ (m)	4024,6524		Altura (m)	-8,4111	0,0075
L (m)	5176,3897				
ΔX (m)	-2378,2717	L1 fix RMS = 0,0116	Latitude	-1 22 16,77968	0,0006
ΔY (m)	-2222,9056		Longitude	-48 27 12,87940	0,0008
ΔZ (m)	4024,6485		Altura (m)	-8,3806	0,0058
L (m)	5176,4158				
ΔX (m)	-2378,2558	L3 float RMS = 0,0139	Latitude	-1 22 16,78030	0,0021
ΔY (m)	-2222,8772		Longitude	-48 27 12,88039	0,0061
ΔZ (m)	4024,6680		Altura (m)	-8,3694	0,0119
L (m)	5176,4115				

Vetor: 5L - TENON			Estação: TENON		desvios
ΔX (m)	-4457,4375	L1 float RMS = 0,0244	Latitude	-1 18 52,27556	0,0054
ΔY (m)	-3876,5071		Longitude	-48 25 47,08321	0,0173
ΔZ (m)	-2255,1202		Altura (m)	-13,1048	0,0295
L (m)	6323,1024				
ΔX (m)	-4457,5014	L1 fix RMS = 0,0253	Latitude	-1 18 52,27613	0,0015
ΔY (m)	-3876,4925		Longitude	-48 25 47,08198	0,0017
ΔZ (m)	-2255,1015		Altura (m)	-13,0511	0,0115
L (m)	6323,1318				
ΔX (m)	-4457,4853	L3 float RMS = 0,0314	Latitude	-1 18 52,27605	0,0070
ΔY (m)	-3876,4529		Longitude	-48 25 47,08322	0,0226
ΔZ (m)	-2255,1035		Altura (m)	-13,0323	0,0382
L (m)	6323,0969				

Vetor: 5L - JSEFF				Estação: JSEFF			desvios
ΔX (m)	-8615.2103	L1 float RMS = 0.0199		Latitude	-1 23 40.58769		0.0029
ΔY (m)	-7824.2735			Longitude	-48 22 41.72106		0.0085
ΔZ (m)	6598.3849			Altura (m)	4.1626		0.0188
L (m)	13378.3328						
ΔX (m)	-8615.1807	L1 fix RMS = 0.0217		Latitude	-1 23 40.58826		0.0013
ΔY (m)	-7824.2717			Longitude	-48 22 41.72181		0.0015
ΔZ (m)	6598.4021			Altura (m)	4.1446		0.0175
L (m)	13378.3211						
ΔX (m)	-8615.2181	L3 float RMS = 0.0188		Latitude	-1 23 40.58822		0.0028
ΔY (m)	-7824.3200			Longitude	-48 22 41.71987		0.0081
ΔZ (m)	6598.4006			Altura (m)	4.1333		0.0181
L (m)	13378.3728						

Vetor: 5L - IAURA				Estação: IAURA			desvios
ΔX (m)	-8528.6067	L1 float RMS = 0.0290		Latitude	-1 24 58.29621		0.0070
ΔY (m)	-7843.2330			Longitude	-48 22 43.40798		0.0106
ΔZ (m)	8984.1811			Altura (m)	-8.9967		0.0326
L (m)	14661.8193						
ΔX (m)	-8528.6868	L1 fix RMS = 0.0344		Latitude	-1 24 58.29607		0.0018
ΔY (m)	-7843.1355			Longitude	-48 22 43.40814		0.0021
ΔZ (m)	8984.1796			Altura (m)	-8.8708		0.0234
L (m)	14661.8129						
ΔX (m)	-8528.7937	L3 float RMS = 0.0337		Latitude	-124 58.29629		0.0083
ΔY (m)	-7843.2245			Longitude	-48 22 43.40364		0.0125
ΔZ (m)	8984.1865			Altura (m)	-8.8661		0.0388
L (m)	14661.9269						

Vetor: 5L - OUTE1				Estação: OUTE1			desvios
ΔX (m)	-1321.1616	L1 float RMS = 0.0201		Latitude	-1 15 23.48521		0.0121
ΔY (m)	-911.6268			Longitude	-48 28 6.61896		0.0565
ΔZ (m)	-8666.3458			Altura (m)	-18.3992		0.0398
L (m)	8813.7439						
ΔX (m)	-1321.1616	L1 fix RMS = 0.0230		Latitude	-1 15 23.49564		0.0019
ΔY (m)	-911.7402			Longitude	-48 28 6.61653		0.0023
ΔZ (m)	-8666.3343			Altura (m)	-18.4838		0.0372
L (m)	8813.7443						
ΔX (m)	-1321.0381	L3 float RMS = 0.0291		Latitude	-1 15 23.49268		0.0181
ΔY (m)	-911.5187			Longitude	-48 28 6.62427		0.0845
ΔZ (m)	-8666.4234			Altura (m)	-18.4019		0.0594
L (m)	8813.7905						

Vetor: 5L - OUTE2				Estação: OUTE2			desvios
ΔX (m)	-4155.2062	L1 float RMS = 0.0091		Latitude	-1 15 45.07351		0.0033
ΔY (m)	-3426.5341			Longitude	-48 26 4.05533		0.0096
ΔZ (m)	-8003.4585			Altura (m)	-6.2787		0.0128
L (m)	9646.8763						
ΔX (m)	-4155.2103	L1 fix RMS = 0.0093		Latitude	-1 15 45.07332		0.0011
ΔY (m)	-3426.5522			Longitude	-48 26 4.05485		0.0015
ΔZ (m)	-8003.4644			Altura (m)	-6.2896		0.0104
L (m)	9646.8894						
ΔX (m)	-4155.1788	L3 float RMS = 0.0150		Latitude	-1 15 45.07275		0.0054
ΔY (m)	-3426.5083			Longitude	-48 26 4.05655		0.0161
ΔZ (m)	-8003.4816			Altura (m)	-6.2781		0.0216
L (m)	9646.8745						

Vetor: 5L - OUTE3			Estação: OUTE3		desvios
ΔX (m)	-4542.7421	L1 float RMS = 0.0224	Latitude	-1 13 53.60844	0.0176
ΔY (m)	-3680.5951		Longitude	-48 25 49.22376	0.0213
ΔZ (m)	-11426.4790		Altura (m)	-13.7408	0.0220
L (m)	12835.4084				
ΔX (m)	-4542.7421	L1 fix RMS = 0.0224	Latitude	-1 13 53.60844	0.0176
ΔY (m)	-3680.5951		Longitude	-48 25 49.22376	0.0213
ΔZ (m)	-11426.4790		Altura (m)	-13.7408	0.0220
L (m)	12835.4084				
ΔX (m)	-4542.7672	L3 float RMS = 0.0261	Latitude	-1 13 53.60565	0.0208
ΔY (m)	-3680.6882		Longitude	-48 25 49.22116	0.0249
ΔZ (m)	-11426.5656		Altura (m)	-13.7957	0.0257
L (m)	12835.5211				

Vetor: 5L - ICOAR			Estação: ICOAR		desvios
ΔX (m)	529.1316	L1 float RMS = 0.0085	Latitude	-1 17 40.92786	0.0013
ΔY (m)	607.1905		Longitude	-48 29 23.99892	0.0039
ΔZ (m)	-4446.0251		Altura (m)	-13.8058	0.0084
L (m)	4518.3847				
ΔX (m)	529.1381	L1 fix RMS = 0.0099	Latitude	-1 17 40.92792	0.0005
ΔY (m)	607.2116		Longitude	-48 29 23.99953	0.0008
ΔZ (m)	-4446.0228		Altura (m)	-13.7942	0.0069
L (m)	4518.3860				
ΔX (m)	529.1724	L3 float RMS = 0.0142	Latitude	-1 17 40.92732	0.0022
ΔY (m)	607.1565		Longitude	-48 29 23.99918	0.0065
ΔZ (m)	-4446.0429		Altura (m)	-13.8586	0.0141
L (m)	4518.4023				

Vetor: 5L - MARAM			Estação: MARAM		desvios
ΔX (m)	-3128.6599	L1 float RMS = 0.0214	Latitude	-1 23 32.09318	0.0589
ΔY (m)	-2962.1068		Longitude	-48 26 38.86905	0.0684
ΔZ (m)	6337.2678		Altura (m)	-7.4991	0.0611
L (m)	7663.1294				
ΔX (m)	-3128.7169	L1 fix RMS = 0.0235	Latitude	-1 23 32.09179	0.0021
ΔY (m)	-2962.0899		Longitude	-48 26 38.86804	0.0016
ΔZ (m)	6337.2262		Altura (m)	-7.447	0.0255
L (m)	7663.1117				
ΔX (m)	-3128.6343	L3 float RMS = 0.0267	Latitude	-1 23 32.09395	0.0755
ΔY (m)	-2962.2892		Longitude	-48 26 38.86576	0.0892
ΔZ (m)	6337.2874		Altura (m)	-7.6521	0.0805
L (m)	7663.2057				

Vetor: 5L - COTIJ			Estação: COTIJ		desvios
ΔX (m)	5967.5665	L1 float RMS = 0.0139	Latitude	-1 15 47.98323	0.0019
ΔY (m)	5514.4680		Longitude	-48 33 20.93671	0.0053
ΔZ (m)	-7914.3360		Altura (m)	-16.5950	0.0119
L (m)	11342.3360				
ΔX (m)	5967.4975	L1 fix RMS = 0.0154	Latitude	-1 15 47.98325	0.0011
ΔY (m)	5514.4815		Longitude	-48 33 20.93533	0.0010
ΔZ (m)	-7914.3340		Altura (m)	-16.5391	0.0110
L (m)	11342.7164				
ΔX (m)	5967.6039	L3 float RMS = 0.0179	Latitude	-1 15 47.98262	0.0025
ΔY (m)	5514.4670		Longitude	-48 33 20.93759	0.0069
ΔZ (m)	-7914.3552		Altura (m)	-16.6209	0.0154
L (m)	11342.7801				

Vetor: 5L - MOSQ1			Estação: MOSQ1		desvios
ΔX (m)	-1030.9914	L1 float RMS = 0.0335	Latitude	-1 9 55.05087	0.0056
ΔY (m)	-368.1864		Longitude	-48 28 25.30002	0.0331
ΔZ (m)	-18752.2752		Altura (m)	-17.1419	0.0288
L (m)	18784.2043				
ΔX (m)	-1031.0125	L1 fix RMS = 0.0362	Latitude	-1 9 55.05105	0.0027
ΔY (m)	-368.2421		Longitude	-48 28 25.29831	0.0028
ΔZ (m)	-18752.2703		Altura (m)	-17.1696	0.0783
L (m)	18784.2016				
ΔX (m)	-1031.1189	L3 float RMS = 0.0198	Latitude	-1 9 55.04889	0.0034
ΔY (m)	-368.1980		Longitude	-48 28 25.29668	0.0205
ΔZ (m)	-18752.3344		Altura (m)	-17.0673	0.0173
L (m)	18784.2706				

Vetor: 5L - MOSQ3			Estação: MOSQ3		desvios
ΔX (m)	-12849.2504	L1 float RMS = 0.0308	Latitude	-1 3 47.20301	0.0104
ΔY (m)	-10565.127		Longitude	-48 20 0.46061	0.0175
ΔZ (m)	-30048.6153		Altura (m)	-16.6197	0.0293
L (m)	34345.9523				
ΔX (m)	-12849.3493	L1 fix RMS = 0.0370	Latitude	-1 3 47.20196	0.0020
ΔY (m)	-10565.0036		Longitude	-48 20 0.46088	0.0048
ΔZ (m)	-30048.6447		Altura (m)	-16.4618	0.0244
L (m)	34345.9769				
ΔX (m)	-128493.1664	L3 float RMS = 0.0110	Latitude	-1 3 47.19771	0.0037
ΔY (m)	-10564.8669		Longitude	-48 20 0.46824	0.0063
ΔZ (m)	-30048.7754		Altura (m)	-16.4837	0.0106
L (m)	34345.9808				

Vetor: 5L - GUAMA			Estação: GUAMA		desvios
ΔX (m)	-2055.4017	L1 float RMS = 0.0195	Latitude	-1 28 32.79159	0.0109
ΔY (m)	-2306.1038		Longitude	-48 27 18.92768	0.0152
ΔZ (m)	15570.6589		Altura (m)	2.7088	0.0147
L (m)	15874.1365				
ΔX (m)	-2055.4553	L1 fix RMS = 0.0462	Latitude	-1 28 32.79149	0.0026
ΔY (m)	-2306.1881		Longitude	-48 27 18.92458	0.0028
ΔZ (m)	15570.6551		Altura (m)	2.6812	0.0195
L (m)	15874.1519				
ΔX (m)	-2055.8926	L3 float RMS = 0.0381	Latitude	-1 28 32.78330	0.0214
ΔY (m)	-2306.5905		Longitude	-48 27 18.90536	0.0298
ΔZ (m)	15570.4032		Altura (m)	2.6635	0.0287
L (m)	15874.0199				

Vetor: 5L - CENTR			Estação: CENTR		desvios
ΔX (m)	950.6192	L1 float RMS = 0.0146	Latitude	-1 27 15.30795	0.0059
ΔY (m)	535.5273		Longitude	-48 29 32.67281	0.0095
ΔZ (m)	13193.3745		Altura (m)	76.4039	0.0172
L (m)	13238.4137				
ΔX (m)	950.5446	L1 fix RMS = 0.0195	Latitude	-1 27 15.30751	0.0012
ΔY (m)	535.5585		Longitude	-48 29 32.67167	0.0027
ΔZ (m)	13193.3629		Altura (m)	76.4764	0.0149
L (m)	13238.3980				
ΔX (m)	950.5481	L3 float RMS = 0.0169	Latitude	-1 27 15.30914	0.0069
ΔY (m)	535.4597		Longitude	-48 29 32.66963	0.0112
ΔZ (m)	13193.4111		Altura (m)	76.4015	0.0205
L (m)	13238.4423				

Vetor: 5L - VPESO			Estação: VPESO		desvios
ΔX (m)	1952.3086	L1 float RMS = 0.0292	Latitude	-1 27 13.74353	0.0064
ΔY (m)	1296.0636		Longitude	-48 30 13.24446	0.0252
ΔZ (m)	13142.9168		Altura (m)	-19.0203	0.0469
L (m)	13350.1892				
ΔX (m)	1952.3337	L1 fix RMS = 0.0616	Latitude	-1 27 13.74174	0.0044
ΔY (m)	1296.0537		Longitude	-48 30 13.24486	0.0053
ΔZ (m)	13142.8613		Altura (m)	-19.0458	0.0407
L (m)	13350.1373				
ΔX (m)	1952.3788	L3 float RMS = 0.0266	Latitude	-1 27 13.74416	0.0059
ΔY (m)	1296.2603		Longitude	-48 30 13.25038	0.0231
ΔZ (m)	13142.9388		Altura (m)	-18.9190	0.0431
L (m)	13350.2402				

Vetor: 5L - MOSQ2			Estação: MOSQ2		desvios
ΔX (m)	-8290.8177	L1 float RMS = 0.0351	Latitude	-1 7 13.57481	0.0057
ΔY (m)	-6662.8200		Longitude	-48 23 14.51773	0.0154
ΔZ (m)	-23710.8718		Altura (m)	-8.3104	0.0228
L (m)	25987.2328				
ΔX (m)	-8290.7350	L1 fix RMS = 0.0591	Latitude	-1 7 13.57456	0.0028
ΔY (m)	-6663.0209		Longitude	-48 23 14.51542	0.0034
ΔZ (m)	-23710.8835		Altura (m)	-8.5157	0.0245
L (m)	25987.2686				
ΔX (m)	-8290.8317	L3 float RMS = 0.0285	Latitude	-1 7 13.57128	0.0047
ΔY (m)	-6662.7711		Longitude	-48 23 14.51844	0.0126
ΔZ (m)	-23710.9794		Altura (m)	-8.2667	0.0187
L (m)	25987.3229				

Vetor: 5L - UTING			Estação: UTING		desvios
ΔX (m)	-3540.0552	L1 float RMS = 0.0127	Latitude	-1 25 7.52631	0.0027
ΔY (m)	-3398.8352		Longitude	-48 26 19.53867	0.0063
ΔZ (m)	9268.0820		Altura (m)	10.5238	0.0102
L (m)	10487.2024				
ΔX (m)	-3540.0714	L1 fix RMS = 0.0142	Latitude	-1 25 7.52633	0.0009
ΔY (m)	-3398.9181		Longitude	-48 26 19.53649	0.0015
ΔZ (m)	9268.0814		Altura (m)	10.4725	0.0098
L (m)	10487.2343				
ΔX (m)	-3540.1398	L3 float RMS = 0.0116	Latitude	-1 25 7.52673	0.0025
ΔY (m)	-3398.8597		Longitude	-48 26 19.53609	0.0058
ΔZ (m)	9268.0959		Altura (m)	10.5619	0.0094
L (m)	10487.2512				

Vetor: 5L - CEFET			Estação: CEFET		desvios
ΔX (m)	-1583.3321	L1 float RMS = 0.0223	Latitude	-1 26 14.61636	0.0040
ΔY (m)	-1729.6630		Longitude	-48 27 42.72432	0.0080
ΔZ (m)	11328.2019		Altura (m)	13.2234	0.0163
L (m)	11568.3548				
ΔX (m)	-1583.3471	L1 fix RMS = 0.0228	Latitude	-1 26 14.61645	0.0011
ΔY (m)	-1729.6253		Longitude	-48 27 42.72477	0.0013
ΔZ (m)	11328.2056		Altura (m)	13.2618	0.0117
L (m)	11568.3549				
ΔX (m)	-1583.3102	L3 float RMS = 0.0236	Latitude	-1 26 14.61739	0.0043
ΔY (m)	-1729.7497		Longitude	-48 27 42.72299	0.0085
ΔZ (m)	11328.2316		Altura (m)	13.1449	0.0173
L (m)	11568.3939				

ANEXO D

Aqui são apresentadas as imagens solares, obtidas para os dias nos quais foram realizadas as observações GPS.

Foram geradas pelo telescópio espacial ultravioleta SOHO, recebidas diariamente nos observatórios de . Kitt Peak – Arizona, Holloman AFB – New Mexico e Learmonth – Australia. Disponibilizadas pelo Space Environment Center, através da internet desde janeiro de 1997 sob a URL:

http://www.sec.noaa.gov/solar_images/ImageIndex.cgi

DATAS	IMAGENS SOLARES		
12/07/99	99/07/12 at 08:43 UT	99/07/12 at 13:57 UT	99/07/12 at 17:19 UT
13/07/99	99/07/13 at 08:05 UT	99/07/13 at 13:49 UT	99/07/13 at 18:39 UT
14/07/99	99/07/14 at 17:57 UT	99/07/14 at 20:05 UT	99/07/14 at 21:54 UT
15/07/99	99/07/15 at 08:03 UT	99/07/15 at 14:12 UT	99/07/15 at 20:35 UT
19/07/99	99/07/19 at 08:15 UT	99/07/19 at 08:30 UT	99/07/19 at 21:30 UT

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D.; FULLER-ROWELL, T. (1999). The Ionosphere. Space Environment Center. Topics SE-14.
- ANSELMO, J.C.(1994). Modeling of GPS L1 L2 Signal Propagation through the Ionosphere. ION GPS – 94.
- AXELRAD, P.; BROWN, R.G.(1994). Gps Navigation Algorithms. American Institute of Aeronautics and Astronautics.Global Positioning System: Theory and Applications,v I.Parkinson and Spilker, Eds./Axelrad and Enge, Assoc. Eds
- BLACK, H.D.(1978). An easily implemented algorithm for tropospheric range correction. Journal of Geophysical Research, 38(B4), pp.1825-1828.
- BLACK, H.D.; EISNER, A.(1984). Correcting satellite doppler data for tropospheric effects. Journal of Geophysical Research, 89(D2), pp.2616-2626.
- BOON,W.; SEGANTINE, P.C.L. (1999). Testing JPL's PPP Service. GPS Solutions, pp 73-76, Vol.3, no. 1.
- BRUNNER, F.K.;WELSCH,W.M.(1993).Effects of Troposphere on GPS Measurements. GPS WORLD, p 42-44, January.

- BRUNNER,F.K. (1984). Geodetic Refraction:Effects of electromagnetic wave propagation through the atmosphere.Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.Alemanha.
- BOUCHER, C.; ALTAMINI,Z. (1996). International Terrestrial Reference Frame. GPS World. september, v 7, nº 9.
- CATÁLOGO DE PRODUTOS E SERVIÇOS ELETRÔNICOS DO IBGE.(1999). <http://www.ibge.gov.br/disseminacao/produtoservico/catalogo/prodserv/prodserv10.shtm>. 12/10/1999.
- CHAPMAN, S. (1931). The absorption and Dissociative or Ionizing Effect of Monochromatic Radiation in na Atmosphere on a Rotating Earth. Parte I e Parte II. Grazing Incidence. Proc. Phys. Soc., Vol. 43, p 484.
- CODEM;CONSÓCIO AEROCARTA/BASE (1999). Levantamento aerofotogramétrico do município de Belém – Execução de apoio básico suplementar.
- COHEM, N.;DAVIES, K. (1994). Radio Wave propagation. Space Enviroment Center. Topics SE-10. P 1-4.
- COSTA,S.M.A.;PEREIRA,K.D.;BEATTIE,D.S.(1999).A integração da rede geodésica brasileira ao SIRGAS: Resultados preliminares. Geo Convergência: aplicação de tecnologias geográficas integradas. p 17-24 Março.
- DAVIES, K.(1989). Ionospheric Radio. Peter Peregrinos Ltda. Londres.
- FEDERATION OF ASTRONOMICAL AND GEOPHYSICAL DATA ANALYSIS SERVICES(1998). International GPS Service for Geodynamics. July.

- GOAD,C.C.;GOODMAN, L.(1974). A modified Hopfield tropospheric refraction correction model. American Geophysical Union Annual Fall Meeting, San Francisco, Dezembro 12-17.
- GREGORIUS, T. (1996). Gipsy-Oasis II, How it works. Department of Geomatics, University of Newcastle.
- GREGORIUS, T.; BLEWITT, G. (1998). The Effect of Weather Fronts on GPS Measurements. GPS World, maio.
- GURTNER, W.; MADER, G.M.(1999). The RINEX Format: Current Status, Future Developments. United States Department of Transportation, National Transportation Library.
- HARTMANN, G.K.; LEITINGER, R.(1984). Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz. Bulletin Géodésique, 58, pp 109-136.
- HILLA, S. (1999). A more recent version of OMNI on the NGS anonymous ftp server (OMNI version 4.0). steveh@ngs.noaa.gov (31/08/99).
- HOFFMANN-WELLENHOF, B. et. al. (1997). Global Positioning System: Theory and Practice. Springer-Verlag Wien New York.
- HOPFIELD, H.S.(1976). Tropospheric range error parameters: further studies. Applies Physics Laboratory report CP015, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.(2000). <http://www.ibge.gov.br/geodesia/planimetrica>. 22/01/2000.
- JANES,H.W.;LANGLEY, R.B.; WEWBY,S.P.(1989). A comparison of several models for the prediction of tropospheric propagation delay.Physical Science Laboratory. VII,p.777-12. Apresentado ao Proceedings of the

Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. New Mexico, 1989.

KAHMEN, H.; FAIG, W. (1988). Surveying. Walter de Gruyter & Co. Berlin.

KEE, C.; YUN D. (1997). Development of Local Ionospheric Time Delay Model for Single-frequency DGPS Users. ION-97.

KLOBUCHAR, J.A. (1994). Ionospheric Effects on GPS-Global Positioning System. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Washington, D.C.

KLOBUCHAR, J.A. (1991). Ionospheric Effects on GPS. Hanscom Air Force Base, Massachusetts. Global positioning System: Theory and Applications, Volume II.

KOUBA, J et al. (1998). A Discussion of IGS Solutions and Their Impact on Geodetic and Geophysical Applications. GPS Solutions, v 2, No 2, p 3-15.

KUNCHES, J. (1995). Navigation. Space Environment Center. Topics SE-11.

LANGLEY, R.B. (1999). The GPS End-of-Week Rollover. <http://www.gpsworld.com/0299/1198innovation.html>. 29/09/1999.

LAROCCA, A.P.C. (2000). Análise de estratégias para processamento de redes geodésicas com o sistema GPS. 203 p. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

LEICK, A. (1995). GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, Inc. A Wiley-Interscience Publication. New York.

MADER, G. (1991). STATISTIC DATA EDITING FOR THE OMNI GPS PROGRAMS. Geosciences Laboratory Ocean and Earth Sciences –

National Ocean Service – National Oceanic and Atmospheric Administration. Rockville Maryland.

MADER, G. et.al.(1999). OMNI 4.0 – UPDATE. [ftp://www.ngs.noaa.gov,](ftp://www.ngs.noaa.gov/diretorio/pub/omni/update)
diretório pub/omni/update.

MADER, G. et. al. (1998). OMNI 4.0 – UPDATE OF USER'S GUIDE- NEW MERGE. Rockville, Maryland.

MILLMAN, G.H.:REINSMITH, G.M. (1974). An Analysis of the Incoherent Scatter- Faraday Rotation Technique for Ionospheric Propagation Error Correction. General Electric Technical Information Series Report, R74EMH2, fevereiro.

MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA (1964). Manual de Meteorologia Aeronáutica. Ed. Técnica de aviação. Rio de Janeiro.

MONICO,J.F.G.;ASHKENAZI, V.;MOORE, T.(1996). Geodetic Reference System and Accuracy Estimates of the Brazilian GPS Network. Instituto de Geociências – UFRGS. Porto Alegre.

NICOLAIDES, B.W.P.; UPADHYAY, T.N. (1996). Ionospheric error compensation for GPS receivers using real-time ionospheric model.

PARKINSON, B.W. (1994). GPS Error Analysis. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Vol.1, pp.489-568.

RICHARDUS, P. (1984). Project surveying. A.A.BALKEMA/ ROTTERDAM/ BOSTON.

RUSH, C.M.(1986). Ionospheric Radio Propagation Models and Prediction Models- A Mini Review. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-34, p.1163.

- SANTERRE, R. (1989). GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning. Technical Report, No.145, University of new Brunswick.
- SCHAAL, R.E. (1998). Medições de deslocamentos em obras civis de grande porte com GPS. Proposta de metodologia de análise dos resultados e tratamento dos dados. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Transportes.
- SEEBER, G. (1993). Satellite Geodesy. Walter de Gruyter & Co. Berlim.
- SEGANTINE, P.C.L. (1995). Estabelecimento e ajuste de uma rede geodésica no estado de São Paulo, com o Sistema de Posicionamento NAVSTAR/GPS. 9p. Tese - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SEGANTINE, P.C.L. (1998). Sistema de Posicionamento Global. Apostila. São Carlos, SP, publicação EESC-USP.
- SOUZA, J.M. (2000). Uso do sistema de informação na análise e otimização do atendimento a locais de potencial risco de incêndios, para a cidade de São Carlos(SP). 160 p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Space Enviroment Center. (1997). URL: Imagens solares. http://www.sec.noaa.gov/solar_images/ImageIndex.cgi.17/01/2000.
- SPIPKER JR.,J.J.(1994).Tropospheric Effects on GPS. American Institute of Aeronautics and Astronautics.Global Positioning System: Theory and Applications,v I.Parkinson and Spilker, Eds./Axelrad and Enge, Assoc. Eds
- TIME SERVICE DEPT., U.S. NAVAL OBSERVATORY .(1999). Washington, DC. <http://tycho.usno.navy.mil>. 20/09/1999.

- TASCIONE, T.F. et.al. (1988). New Ionospheric and Magnetospheric Specification Models. Radio Science, Vol.23, pp.211-222.
- TORGE,W. (1991). Geodesy 2nd edition. Berlin, Water de Gruyter.
- TRIMBLE NAVIGATION. (1989). Model 4000SST GPS Surveyor - Operation Manual. Trimble Navigation Limited. Part Number 14907.585 North Mary Avenue Sunnyvale, CA 94086-3642.
- VANÍCEK,P.;KRAKIWSKY,E.(1986). Geodesy the concepts second edition. Elsevier. Amsterdan.
- WALLACE,J.M.; HOBBS P. V.(1977). Atmospheric Science: Na introductory survey. Academic Press. San Diego,California.
- WANNINGER.L (1991). Effects of severe ionospheric conditions on GPS data processing.IAG Symposium G-2, IUGG XX General Assembly, 16 Agosto.
- WANNINGER.L.(1993). Ionospheric Monitoring Using IGS data. IGS Workshop.p 1-10.Institut für Erdmennung.Universität Hannover-Alemanha.
- WANNINGER.L.,SEEBER.G.,CAMPOS,M.A.(1991). Use of GPS in the South of Brazil under severe ionospheric conditions. IAG Symposium G1.Viena-Austria.
- YIONOULIS, S.M. (1970). Algorithm to compute refraction effects on range measurements. Journal of Geophysical Research, 75(36), pp. 7636-7637.
- YUAN, J.; JACOB, I.T. (1991) Investigation of ionospheric time delay for the use of differencial GPS.First International Symposium Real Time Differencial Applications of the Global Positioning System. Dusseldorf, Alemanha.

ZUMBERGE, J.F. et al.(1997).Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal Geophysical Research.

ZUMBERGE, J.F. et al. (1997). The International GPS Service: A Global resource for GPS Applications and Research. Institute of Navigation ION GPS-97. Missouri.

ZUMBERGE, J.F. (1998). Characteristics and Applications of Precise GPS Clock Solutions Every 30 Seconds. Navigation: Journal of the Institute of Navigation. V 44, No 4, p 449-456.

ZUMBERGE, J.F. (1999). Automated GPS Data Analysis Service. GPS Solutions, v 2, No 3, p 76-78.

APÊNDICE I

Aqui são apresentados os valores das variáveis meteorológicas medidas pelo autor durante as seções de observação.

Data: 22/07/99

DOY: 203

Ponto: 4L

Temperatura média do ar: 29.3°

Desvio Padrão: 1.14

Umidade relativa do ar: 70%

Pressão atmosférica: 1112.4 mb

Data: 22/07/99

DOY: 203

Ponto: 103

Temperatura média do ar: 32°

Desvio Padrão: 0,52

Umidade relativa do ar: 63 %

Pressão atmosférica: 1111,3

Data: 27/07/99

DOY: 208

Ponto: 104

Temperatura média do ar: 33°

Desvio Padrão: 0,8

Umidade relativa do ar: 56%

Pressão atmosférica: 1009,5 mb

Data: 28/07/99

DOY: 209

Ponto: 110

Temperatura média do ar: 29°

Desvio Padrão: 1,08

Umidade relativa do ar: 73%

Pressão atmosférica: 1112,9

Data: 14/07/99

DOY: 195

Ponto: 112

Temperatura média do ar: 32,4°

Desvio Padrão: 0,2

Umidade relativa do ar: 54%

Pressão atmosférica: 1009,4

Data: 12/07/99

DOY: 193

Ponto: 113

Temperatura média do ar: 32°

Desvio Padrão: 0,65

Umidade relativa do ar: 51 %

Pressão atmosférica: 1010,6 mb

Data: 19/07/99

DOY: 200

Ponto: SAT. PA-02

Temperatura média do ar: 31°

Desvio Padrão: 0,61

Umidade relativa do ar: 67%

Pressão atmosférica: 1111,5 mb

Data: 14/07/99

DOY: 195

Ponto: 118

Temperatura média do ar: 31,4°

Desvio Padrão: 0,97

Umidade relativa do ar: 73%

Pressão atmosférica: 1111,00 mb

Data: 12/07/99

DOY: 193

Ponto: 119

Temperatura média do ar: 30,6°

Desvio Padrão: 0,81

Umidade relativa do ar: 64%

Pressão atmosférica: 1111,7 mb

Data: 13/07/99

DOY: 194

Ponto: 120

Temperatura média do ar: 29,8°

Desvio Padrão: 1,29

Umidade relativa do ar: 75%

Pressão atmosférica: 1111,8 mb

Data: 13/07/99

DOY: 194

Ponto: 127

Temperatura média do ar: 31,5°

Desvio Padrão: 0,9

Umidade relativa do ar: 62%

Pressão atmosférica: 1111,1 mb

Data: 19/07/99

DOY: 200

Ponto: 128

Temperatura média do ar: 28,4°

Desvio Padrão: 0,57

Umidade relativa do ar: 78%

Pressão atmosférica: 1113,2 mb

Data: 15/07/99

DOY: 196

Ponto: 131

Temperatura média do ar: 32,8°

Desvio Padrão: 1,68

Umidade relativa do ar: 54 %

Pressão atmosférica: 1058,6 mb

Data: 15/07/99

DOY: 196

Ponto: 132

Temperatura média do ar: 30,8°

Desvio Padrão: 0,89

Umidade relativa do ar: 63 %

Pressão atmosférica: 1010,1 mb

Data: 15/07/99

DOY: 196

Ponto: 133

Temperatura média do ar: 33,5 °

Desvio Padrão: 0,79

Umidade relativa do ar: 49 %

Pressão atmosférica: 1009,1 mb

Data:

DOY: 202

Ponto: 135

Temperatura média do ar: 32,4 °

Desvio Padrão: 0,87

Umidade relativa do ar: 61 %

Pressão atmosférica: 1111,4 mb

Data: 27/07/99

DOY: 208

Ponto: 142

Temperatura média do ar: 31,2 °

Desvio Padrão: 0,47

Umidade relativa do ar: 64 %

Pressão atmosférica: 1111,6

Data: 21,7

DOY: 202

Ponto: 148

Temperatura média do ar: 28,2°

Desvio Padrão: 0,50

Umidade relativa do ar: 82 %

Pressão atmosférica: 1012,4 mb

Data: 20/07/99

DOY: 201

Ponto: 150

Temperatura média do ar: 30,7 °

Desvio Padrão: 0,34

Umidade relativa do ar: 69 %

Pressão atmosférica: 1013,3

Data: 28/07/99

DOY: 209

Ponto: 151

Temperatura média do ar: 31,8 °

Desvio Padrão: 0,59

Umidade relativa do ar: 59 %

Pressão atmosférica: 1012 mb

APÊNDICE II

Aqui são apresentadas as tabelas utilizadas para cálculo da umidade relativa do ar, aplicadas à mediadas psicrométricas (psicrômetros não aspirados).

tem. Unido °C	Depressão psicrométrica (t - t ₂)°C														
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
0.	100,0	96,0	92,0	88,2	84,5	80,8	77,3	73,8	70,4	67,1	63,9	60,7	57,7	54,7	51,8
1.	100,0	96,2	92,4	88,8	85,2	81,7	78,3	75,0	71,8	68,6	65,6	62,5	59,6	56,8	54,0
2.	100,0	96,3	92,8	89,3	85,9	82,6	79,3	76,2	73,1	70,0	67,1	64,2	61,4	58,7	56,0
3.	100,0	96,5	93,1	89,8	86,5	83,3	80,2	77,2	74,2	71,3	68,5	65,8	63,1	60,4	57,9
4.	100,0	96,7	93,4	90,2	87,1	84,1	81,1	78,2	75,3	72,6	69,9	67,2	64,6	62,1	59,6
5.	100,0	96,8	93,7	90,6	87,6	84,7	81,9	79,1	76,4	73,7	71,1	68,6	66,1	63,6	61,3
6.	100,0	96,9	93,9	91,0	88,2	85,4	82,6	79,9	77,3	74,8	72,3	69,8	67,4	65,1	62,8
7.	100,0	97,1	94,2	91,4	88,6	85,9	83,3	80,7	78,2	75,7	73,3	71,0	68,7	66,4	64,2
8.	100,0	97,2	94,4	91,7	89,1	86,5	83,9	81,5	79,0	76,7	74,3	72,1	69,8	67,7	65,5
9.	100,0	97,3	94,6	92,0	89,5	87,0	84,5	82,1	79,8	77,5	75,3	73,1	70,9	68,8	66,8
10.	100,0	97,4	94,8	92,3	89,9	87,4	85,1	82,8	80,5	78,3	76,1	74,0	71,9	69,9	67,9
11.	100,0	97,5	95,0	92,6	90,2	87,9	85,6	83,4	81,2	79,1	77,0	74,9	72,9	70,9	69,0
12.	100,0	97,6	95,2	92,8	90,5	88,3	86,1	83,9	81,8	79,8	77,7	75,7	73,8	71,9	70,0
13.	100,0	97,6	95,3	93,1	90,9	88,7	86,6	84,5	82,4	80,4	78,4	76,5	74,6	72,8	71,0
14.	100,0	97,7	95,5	93,3	91,2	89,0	87,0	85,0	83,0	81,0	79,1	77,2	75,4	73,6	71,8
15.	100,0	97,8	95,6	93,5	91,4	89,4	87,4	85,4	83,5	81,6	79,8	77,9	76,1	74,4	72,7
16.	100,0	97,9	95,8	93,7	91,7	89,7	87,8	85,9	84,0	82,1	80,3	78,6	76,8	75,1	73,5
17.	100,0	97,9	95,9	93,9	91,9	90,0	88,1	86,3	84,4	82,7	80,9	79,2	77,5	75,8	74,2
18.	100,0	98,0	96,0	94,1	92,2	90,3	88,5	86,6	84,9	83,1	81,4	79,8	78,1	76,5	74,9
19.	100,0	98,0	96,1	94,2	92,4	90,6	88,8	87,0	85,3	83,6	81,9	80,3	78,7	77,1	75,6
20.	100,0	98,1	96,2	94,4	92,6	90,8	89,1	87,3	85,7	84,0	82,4	80,8	79,2	77,7	76,2
21.	100,0	98,1	96,3	94,5	92,8	91,0	89,3	87,7	86,0	84,4	82,8	81,3	79,7	78,2	76,8
22.	100,0	98,2	96,4	94,7	92,9	91,3	89,6	88,0	86,4	84,8	83,2	81,7	80,2	78,8	77,3
23.	100,0	98,2	96,5	94,8	93,1	91,5	89,9	88,3	86,7	85,2	83,6	82,1	80,7	79,2	77,8
24.	100,0	98,3	96,6	94,9	93,3	91,7	90,1	88,5	87,0	85,5	84,0	82,6	81,1	79,7	78,3
25.	100,0	98,3	96,7	95,0	93,4	91,9	90,3	88,8	87,3	85,8	84,3	82,9	81,5	80,2	78,8
26.	100,0	98,4	96,7	95,1	93,6	92,0	90,5	89,0	87,6	86,1	84,7	83,3	81,9	80,6	79,2
27.	100,0	98,4	96,8	95,2	93,7	92,2	90,7	89,3	87,8	86,4	85,0	83,6	82,3	81,0	79,7
28.	100,0	98,4	96,9	95,3	93,8	92,4	90,9	89,5	88,1	86,7	85,3	84,0	82,6	81,3	80,1
29.	100,0	98,5	96,9	95,4	94,0	92,5	91,1	89,7	88,3	86,9	85,6	84,3	83,0	81,7	80,4
30.	100,0	98,5	97,0	95,5	94,1	92,7	91,3	89,9	88,5	87,2	85,9	84,6	83,3	82,0	80,8

Term. úmido °C	Depressão psicrométrica (t - t _u)°C												
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
31.	100,0	98,5	97,1	95,6	94,2	92,8	91,4	90,1	88,7	87,4	86,1	84,9	83,4
32.	100,0	98,5	97,1	95,7	94,3	92,9	91,6	90,3	88,9	87,7	86,4	85,1	83,7
33.	100,0	98,6	97,2	95,8	94,4	93,1	91,7	90,4	89,1	87,9	86,6	85,4	84,0
34.	100,0	98,6	97,2	95,8	94,5	93,2	91,9	90,6	89,3	88,1	86,8	85,6	84,4
35.	100,0	98,6	97,3	95,9	94,6	93,3	92,0	90,7	89,5	88,3	87,1	85,9	84,7
36.	100,0	98,6	97,3	96,0	94,7	93,4	92,1	90,8	89,7	88,5	87,3	86,1	84,9
37.	100,0	98,7	97,4	96,1	94,8	93,5	92,2	91,0	89,8	88,6	87,5	86,3	85,2
38.	100,0	98,7	97,4	96,1	94,9	93,6	92,4	91,2	90,0	88,8	87,7	86,5	85,4
39.	100,0	98,7	97,4	96,2	94,9	93,7	92,5	91,3	90,1	89,0	87,8	86,7	85,6
40.	100,0	98,7	97,5	96,2	95,0	93,8	92,6	91,4	90,3	89,1	88,0	86,9	85,8
41.	100,0	98,7	97,5	96,3	95,1	93,9	92,7	91,6	90,4	89,3	88,2	87,1	86,0
42.	100,0	98,8	97,5	96,3	95,1	94,0	92,8	91,7	90,5	89,4	88,3	87,3	86,2
43.	100,0	98,8	97,6	96,4	95,2	94,1	92,9	91,8	90,7	89,6	88,5	87,4	86,4
44.	100,0	98,8	97,6	96,4	95,3	94,1	93,0	91,9	90,8	89,7	88,6	87,6	86,5
45.	100,0	98,9	97,6	96,5	95,3	94,2	93,1	92,0	90,9	89,8	88,8	87,7	86,7
46.	100,0	98,9	97,7	96,5	95,4	94,3	93,2	92,1	91,0	90,0	88,9	87,9	86,9
47.	100,0	98,9	97,7	96,6	95,5	94,4	93,3	92,2	91,1	90,1	89,1	88,0	87,0
48.	100,0	98,9	97,7	96,6	95,5	94,4	93,4	92,3	91,2	90,2	89,2	88,2	87,2
49.	100,0	98,9	97,8	96,7	95,6	94,5	93,4	92,4	91,3	90,3	89,3	88,3	87,3
50.	100,0	98,9	97,8	96,7	95,6	94,6	93,5	92,5	91,4	90,4	89,4	88,4	87,5
51.	100,0	98,9	97,9	96,7	95,7	94,6	93,6	92,6	91,5	90,5	89,6	88,6	87,6
52.	100,0	98,9	97,8	96,8	95,7	94,7	93,7	92,6	91,6	90,6	89,7	88,7	87,7
53.	100,0	98,9	97,9	96,8	95,8	94,7	93,7	92,7	91,7	90,7	89,8	88,8	87,9
54.	100,0	98,9	97,9	96,8	95,8	94,8	93,8	92,8	91,8	90,8	89,9	88,9	88,0
55.	100,0	98,9	97,9	96,9	95,9	94,8	93,9	92,9	91,9	90,9	90,0	89,0	88,1
56.	100,0	99,0	97,9	96,9	95,9	94,9	93,9	92,9	92,0	91,0	90,2	89,3	88,4
57.	100,0	99,0	97,9	96,9	95,9	95,0	94,0	93,0	92,1	91,1	90,2	89,3	88,4
58.	100,0	99,0	98,0	97,0	96,0	95,0	94,0	93,1	92,1	91,2	90,3	89,4	88,5
59.	100,0	99,0	98,0	97,0	96,0	95,1	94,1	93,2	92,2	91,3	90,4	89,5	88,6
60.	100,0	99,0	98,0	97,0	96,1	95,1	94,2	93,2	92,3	91,4	90,5	89,6	88,7

Term. úmido °C	Depressão psicrométrica (t - t _u)°C												
	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4
0.	48,9	46,2	43,5	40,8	38,3	35,8	33,3	30,9	28,6	26,4	24,2	22,0	19,9
1.	51,2	48,6	46,0	43,5	41,0	38,6	36,3	34,0	31,7	29,6	27,5	25,4	23,4
2.	53,4	50,8	48,3	45,9	43,6	41,2	39,0	36,8	34,6	32,6	30,5	28,5	26,6
3.	55,4	52,9	50,5	48,2	45,9	43,7	41,5	39,4	37,3	35,3	33,4	31,4	29,6
4.	57,2	54,9	52,6	50,3	48,1	46,0	43,9	41,8	39,8	37,9	36,0	34,1	32,3
5.	58,9	56,7	54,5	52,3	50,2	48,1	46,1	44,1	42,2	40,3	38,5	36,7	34,9
6.	60,5	58,4	56,2	54,1	52,1	50,1	48,1	46,2	44,4	42,5	40,8	39,0	37,3
7.	62,0	59,9	57,9	55,8	53,9	51,9	50,1	48,2	46,4	44,6	42,9	41,2	39,6
8.	63,4	61,4	59,4	57,5	55,5	53,7	51,8	50,1	48,3	46,6	44,9	43,3	41,7
9.	64,7	62,8	60,8	58,9	57,1	55,3	53,5	51,8	50,1	48,4	46,8	45,2	43,6
10.	66,0	64,1	62,2	60,3	58,6	56,8	55,1	53,4	51,7	50,1	48,6	47,0	45,5
11.	67,1	65,3	63,4	61,7	59,9	58,2	56,5	54,9	53,3	51,7	50,2	48,7	47,2
12.	68,2	66,4	64,6	62,9	61,2	59,5	57,9	56,3	54,8	53,2	51,7	50,3	48,8
13.	69,2	67,4	65,7	64,0	62,4	60,8	59,2	57,7	56,1	54,6	53,2	51,8	50,4
14.	70,1	68,4	66,8	65,1	63,5	61,9	60,4	58,9	57,4	56,0	54,5	53,2	51,8
15.	71,0	69,3	67,7	66,1	64,6	63,0	61,5	60,1	58,6	57,2	55,8	54,5	53,1
16.	71,8	70,2	68,6	67,1	65,6	64,1	62,6	61,2	59,8	58,4	57,0	55,7	54,4
17.	72,6	71,0	69,5	68,0	66,5	65,0	63,6	62,2	60,8	59,5	58,2	56,9	55,6
18.	73,3	71,8	70,3	68,8	67,4	66,0	64,6	63,2	61,8	60,5	59,2	58,0	56,7
19.	74,0	72,5	71,1	69,6	68,2	66,8	65,5	64,1	62,8	61,5	60,2	59,0	57,8
20.	74,7	73,2	71,8	70,4	69,0	67,6	66,3	65,0	63,7	62,4	61,2	60,0	58,8
21.	75,3	73,9	72,5	71,1	69,7	68,4	67,1	65,8	64,5	63,3	62,1	60,9	59,7
22.	75,9	74,5	73,1	71,8	70,4	69,1	67,9	66,6	65,4	64,1	62,9	61,8	60,6
23.	76,4	75,1	73,7	72,4	71,1	69,8	68,6	67,3	66,1	64,9	63,7	62,6	61,5
24.	77,0	75,6	74,3	73,0	71,7	70,5	69,2	68,0	66,8	65,7	64,5	63,4	62,3
25.	77,5	76,1	74,8	73,6	72,3	71,1	69,9	68,7	67,5	66,4	65,2	64,1	63,0
26.	77,9	76,6	75,4	74,1	72,9	71,7	70,5	69,3	68,2	67,0	65,9	64,8	63,7
27.	78,4	77,1	75,9	74,6	73,4	72,2	71,1	69,9	68,8	67,7	66,6	65,5	64,4
28.	78,8	77,6	76,3	75,1	73,9	72,8	71,6	70,5	69,4	68,3	67,2	66,1	65,1
29.	79,2	78,0	76,8	75,6	74,4	73,3	72,1	71,0	69,9	68,8	67,8	66,7	65,7
30.	79,6	78,4	77,2	76,0	74,9	73,8	72,6	71,5	70,5	69,4	68,3	67,3	66,3

Term. úmido °C	Depressão psicrométrica (t - t _u)°C												
	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4
31.	79,9	78,8	77,6	76,5	75,3	74,2	73,1	72,0	71,0	69,9	68,9	67,9	66,9
32.	80,3	79,1	78,0	76,9	75,7	74,6	73,6	72,5	71,5	70,4	69,4	68,4	67,4
33.	80,6	79,5	78,4	77,2	76,1	75,1	74,0	73,0	71,9	70,9	69,9	68,9	67,9
34.	80,9	79,8	78,7	77,6	76,5	75,4	74,4	73,4	72,4	71,4	70,4	69,4	68,4
35.	81,3	80,1	79,0	78,0	76,9	75,8	74,8	73,8	72,8	71,8	70,8	69,8	68,8
36.	81,5	80,4	79,4	78,3	77,2	76,2	75,2	74,2	73,2	72,2	71,2	70,3	69,3
37.	81,8	80,7	79,7	78,6	77,6	76,6	75,6	74,6	73,6	72,6	71,7	70,7	69,8
38.	82,1	81,0	80,0	78,9	77,9	76,9	75,9	74,9	73,9	73,0	72,0	71,1	70,2
39.	82,3	81,3	80,3	79,2	78,2	77,2	76,2	75,3	74,3	73,4	72,4	71,5	70,6
40.	82,6	81,6	80,5	79,5	78,5	77,5	76,6	75,6	74,7	73,7	72,8	71,9	71,0
41.	82,8	81,8	80,8	79,8	78,8	77,8	76,9	75,9	75,0	74,1	73,1	72,2	71,4
42.	83,1	82,0	81,0	80,1	79,1	78,1	77,2	76,2	75,3	74,4	73,5	72,6	71,7
43.	83,3	82,3	81,3	80,3	79,3	78,4	77,5	76,5	75,6	74,7	73,8	72,9	72,1
44.	83,5	82,5	81,5	80,6	79,6	78,7	77,7	76,8	75,9	75,0	74,1	73,3	72,4
45.	83,7	82,7	81,7	80,8	79,8	78,9	78,0	77,1	76,2	75,3	74,4	73,6	72,7
46.	83,9	82,9	81,9	81,0	80,1	79,2	78,3	77,4	76,5	75,6	74,7	73,9	73,0
47.	84,1	83,1	82,2	81,2	80,3	79,4	78,5	77,6	76,7	75,8	75,0	74,2	73,3
48.	84,3	83,3	82,4	81,5	80,5	79,6	78,7	77,9	77,0	76,1	75,3	74,4	73,6
49.	84,4	83,5	82,6	81,7	80,8	79,9	79,0	78,1	77,2	76,4	75,6	74,7	73,9
50.	84,6	83,7	82,8	81,9	81,0	80,1	79,2	78,3	77,5	76,6	75,8	75,0	74,2
51.	84,8	83,9	83,0	82,1	81,2	80,3	79,4	78,6	77,7	76,9	76,1	75,2	74,4
52.	84,9	84,0	83,1	82,2	81,4	80,5	79,6	78,8	77,9	77,1	76,3	75,5	74,7
53.	85,1	84,2	83,3	82,4	81,6	80,7	79,8	79,0	78,2	77,3	76,5	75,7	74,9
54.	85,3	84,4	83,5	82,6	81,7	80,9	80,0	79,2	78,4	77,6	76,8	76,0	75,2
55.	85,4	84,5	83,6	82,8	81,9	81,1	80,2	79,4	78,6	77,8	77,0	76,2	75,4
56.	85,5	84,7	83,8	82,9	82,1	81,3	80,4	79,6	78,8	78,0	77,2	76,4	75,6
57.	85,7	84,8	84,0	83,1	82,3	81,4	80,6	79,8	79,0	78,2	77,4	76,6	75,8

Term. úmido °C	Depressão psicrométrica (t - t _u) °C														
	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8
0,	14,0	12,1	10,3	8,5	6,8	5,1	3,4	1,8	,3	-1,2	-2,7	-4,2	-5,5	-6,9	-8,2
1,	17,6	15,8	14,1	12,3	10,7	9,0	7,4	5,9	4,4	2,9	1,5	,1	-1,3	-2,6	-3,9
2,	21,0	19,3	17,6	15,9	14,3	12,7	11,1	9,6	8,2	6,7	5,3	4,0	2,7	1,4	,1
3,	24,2	22,5	20,8	19,2	17,6	16,1	14,6	13,1	11,7	10,3	9,0	7,7	6,4	5,1	3,9
4,	27,1	25,5	23,9	22,3	20,8	19,3	17,8	16,4	15,0	13,7	12,4	11,1	9,8	8,6	7,4
5,	29,9	28,3	26,7	25,2	23,7	22,3	20,9	19,5	18,1	16,8	15,5	14,3	13,0	11,8	10,7
6,	32,5	30,9	29,4	27,9	26,5	25,0	23,7	22,3	21,0	19,7	18,5	17,2	16,0	14,9	13,7
7,	34,8	33,3	31,9	30,4	29,0	27,6	26,3	25,0	23,7	22,4	21,2	20,0	18,9	17,7	16,6
8,	37,1	35,6	34,2	32,8	31,4	30,1	28,8	27,5	26,2	25,0	23,8	22,6	21,5	20,4	19,3
9,	39,2	37,7	36,4	35,0	33,7	32,3	31,1	29,8	28,6	27,4	26,2	25,1	24,0	22,9	21,8
10,	41,1	39,7	38,4	37,1	35,7	34,5	33,2	32,0	30,8	29,6	28,5	27,4	26,3	25,2	24,1
11,	43,0	41,6	40,3	39,0	37,7	36,5	35,2	34,1	32,9	31,7	30,6	29,5	28,4	27,4	26,4
12,	44,7	43,4	42,1	40,8	39,6	38,3	37,2	36,0	34,8	33,7	32,6	31,5	30,5	29,4	28,4
13,	46,3	45,0	43,8	42,5	41,3	40,1	38,9	37,8	36,7	35,6	34,5	33,4	32,4	31,4	30,4
14,	47,8	46,6	45,3	44,1	42,9	41,8	40,6	39,5	38,4	37,3	36,3	35,2	34,2	33,2	32,2
15,	49,3	48,0	46,8	45,6	44,5	43,3	42,2	41,1	40,0	39,0	37,9	36,9	35,9	34,9	34,0
16,	50,6	49,4	48,2	47,1	45,9	44,8	43,7	42,6	41,5	40,5	39,5	38,5	37,5	36,5	35,6
17,	51,9	50,7	49,5	48,4	47,3	46,2	45,1	44,0	43,0	42,0	41,0	40,0	39,0	38,1	37,1
18,	53,1	51,9	50,8	49,7	48,6	47,5	46,4	45,4	44,4	43,3	42,4	41,4	40,4	39,5	38,6
19,	54,2	53,1	52,0	50,9	49,8	48,7	47,7	46,6	45,6	44,7	43,7	42,7	41,8	40,9	40,0
20,	55,3	54,2	53,1	52,0	50,9	49,9	48,9	47,8	46,9	45,9	44,9	44,0	43,1	42,2	41,3
21,	56,3	55,2	54,1	53,1	52,0	51,0	50,0	49,0	48,0	47,1	46,1	45,2	44,3	43,4	42,5
22,	57,2	56,2	55,1	54,1	53,0	52,0	51,0	50,1	49,1	48,2	47,2	46,3	45,4	44,5	43,7
23,	58,2	57,1	56,0	55,0	54,0	53,0	52,0	51,1	50,1	49,2	48,3	47,4	46,5	45,6	44,8
24,	59,0	58,0	56,9	55,9	54,9	54,0	53,0	52,0	51,1	50,2	49,3	48,4	47,5	46,7	45,8
25,	59,8	58,8	57,8	56,8	55,8	54,8	53,9	53,0	52,0	51,1	50,3	49,4	48,5	47,7	46,8
26,	60,6	59,6	58,6	57,6	56,6	55,7	54,8	53,8	52,9	52,0	51,2	50,3	49,4	48,6	47,8
27,	61,3	60,3	59,4	58,4	57,4	56,5	55,6	54,7	53,8	52,9	52,0	51,2	50,3	49,5	48,7
28,	62,0	61,1	60,1	59,1	58,2	57,3	56,4	55,5	54,6	53,7	52,9	52,0	51,2	50,4	49,6
29,	62,7	61,7	60,8	59,8	58,9	58,0	57,1	56,2	55,3	54,5	53,6	52,8	52,0	51,2	50,4
30,	63,3	62,4	61,4	60,5	59,6	58,7	57,8	56,9	56,1	55,2	54,4	53,6	52,8	52,0	51,2

Term. úmido °C	Depressão psicrométrica (t - t _u) °C														
	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8
31,	63,9	63,0	62,1	61,2	60,3	59,4	58,5	57,6	56,8	55,9	55,1	54,3	53,5	52,7	51,9
32,	64,3	63,6	62,7	61,8	60,9	60,0	59,1	58,3	57,4	56,6	55,8	55,0	54,2	53,4	52,6
33,	65,1	64,2	63,3	62,4	61,5	60,6	59,8	58,9	58,1	57,3	56,4	55,6	54,8	54,1	53,3
34,	65,6	64,7	63,8	62,9	62,0	61,2	60,3	59,5	58,7	57,9	57,1	56,3	55,5	54,7	54,0
35,	66,1	65,2	64,3	63,5	62,6	61,7	60,9	60,1	59,3	58,5	57,7	56,9	56,1	55,4	54,6
36,	66,6	65,7	64,8	64,0	63,1	62,3	61,5	60,6	59,8	59,0	58,3	57,5	56,7	56,0	55,2
37,	67,1	66,2	65,3	64,5	63,6	62,8	62,0	61,2	60,4	59,6	58,8	58,0	57,3	56,5	55,8
38,	67,5	66,7	65,8	64,9	64,1	63,3	62,5	61,7	60,9	60,1	59,3	58,6	57,8	57,1	56,4
39,	68,0	67,1	66,2	65,4	64,6	63,8	63,0	62,2	61,4	60,6	59,8	59,1	58,4	57,6	56,9
40,	68,4	67,5	66,7	65,8	65,0	64,2	63,4	62,6	61,9	61,1	60,3	59,6	58,9	58,1	57,4
41,	68,8	67,9	67,1	66,3	65,5	64,7	63,9	63,1	62,3	61,6	60,8	60,1	59,3	58,6	57,9
42,	69,1	68,3	67,5	66,7	65,9	65,1	64,3	63,5	62,8	62,0	61,3	60,5	59,8	59,1	58,4
43,	69,5	68,7	67,9	67,1	66,3	65,5	64,7	64,0	63,2	62,5	61,7	61,0	60,3	59,6	58,9
44,	69,9	69,1	68,3	67,5	66,7	65,9	65,1	64,4	63,6	62,9	62,1	61,4	60,7	60,0	59,3
45,	70,2	69,4	68,6	67,8	67,0	66,3	65,5	64,8	64,0	63,3	62,6	61,8	61,1	60,4	59,7
46,	70,6	69,8	69,0	68,2	67,4	66,6	65,9	65,1	64,4	63,7	63,0	62,2	61,5	60,8	60,2
47,	70,9	70,1	69,3	68,5	67,8	67,0	66,2	65,5	64,8	64,0	63,3	62,6	61,9	61,2	60,6
48,	71,2	70,4	69,6	68,9	68,1	67,3	66,6	65,9	65,1	64,4	63,7	63,0	62,3	61,6	61,0
49,	71,5	70,7	69,9	69,2	68,4	67,7	66,9	66,2	65,5	64,8	64,1	63,4	62,7	62,0	61,3
50,	71,8	71,0	70,2	69,5	68,7	68,0	67,3	66,5	65,8	65,1	64,4	63,7	63,1	62,4	61,7
51,	72,1	71,3	70,5	69,8	69,0	68,3	67,6	66,9	66,2	65,5	64,8	64,1	63,4	62,7	62,1
52,	72,3	71,6	70,8	70,1	69,3	68,6	67,9	67,2	66,5	65,8	65,1	64,4	63,7	63,1	62,4
53,	72,6	71,9	71,1	70,4	69,6	68,9	68,2	67,5	66,8	66,1	65,4	64,7	64,1	63,4	62,8
54,	72,9	72,1	71,4	70,6	69,9	69,2	68,5	67,8	67,1	66,4	65,7	65,1	64,4	63,7	63,1
55,	73,1	72,4	71,6	70,9	70,2	69,5	68,8	68,1	67,4	66,7	66,0	65,4	64,7	64,1	63,4
56,	73,4	72,6	71,9	71,2	70,5	69,8	69,1	68,4	67,7	67,0	66,3	65,7	65,0	64,4	63,7
57,	73,6	72,9	72,2	71,4	70,7	70,0	69,3	68,6	68,0	67,3	66,6	66,0	65,3	64,7	64,0
58,	73,8	73,1	72,4	71,7	71,0	70,3	69,6	68,9	68,2	67,6	66,9	66,2	65,6	65,0	64,3
59,	74,1	73,4	72,6	71,9	71,2	70,5	69,8	69,2	68,5	67,8	67,2	66,5	65,9	65,3	64,6
60,	74,3	73,6	72,9	72,2	71,5	70,8	70,1	69,4	68,8	68,1	67,4	66,8	66,2	65,5	64,9