

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO PLANO-ALTIMÉTRICO COM
RECEPTOR GPS EM DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO**

OTÁVIO YASSUO ITAME

Tese apresenta à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Outubro - 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO PLANO-ALTIMÉTRICO COM
RECEPTOR GPS EM DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO**

OTÁVIO YASSUO ITAME

Orientador: Prof. Dr. Zacarias Xavier de Barros

Tese apresenta à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Energia na Agricultura)

BOTUCATU – SP

Outubro – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Itame, Otávio Yassuo, 1956-

I88a Avaliação do posicionamento plano-altimétrico com receptores GPS em diferentes tipos de uso do solo / Otávio Yassuo Itame . - Botucatu : [s.n.], 2008.
 xi, 153 f. : gráfs., tabs.

 Tese(Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008
 Orientador: Zacarias Xavier de Barros
 Inclui bibliografia

 1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Levantamento topográfico. 3. Estatística - Análise. I. Barros, Zacarias Xavier de . II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu) Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO PLANO-ALTIMÉTRICO COM
RECEPTOR GPS EM DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO”**

ALUNO: OTÁVIO YASSUO ITAME

ORIENTADOR: PROF. DR. ZACARIAS XAVIER DE BARROS

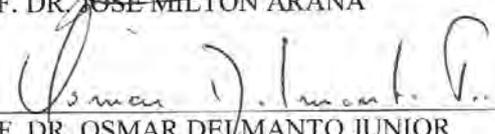
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. ZACARIAS XAVIER DE BARROS



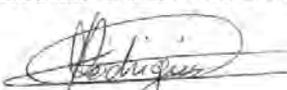
PROF. DR. JOSÉ MILTON ARANA



PROF. DR. OSMAR DELMANTO JUNIOR



PROF. DR. LINCOLN GEHRING CARDOSO



PROF. DR. VILMAR ANTONIO RODRIGUES

Data da Realização: 01 de outubro de 2008.

*Á minha esposa Ana Maria e meus
filhos Gabriel, Jacqueline e Daniel,
pelo amor, compreensão e constante
incentivo.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por iluminar sempre meus caminhos e conduzir minhas ações, proporcionando meios e condições para o desenvolvimento desta tese.

Ao Prof. Dr. Zacarias Xavier de Barros, pela orientação, discussões e sugestões na realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Agrônômicas, área de concentração Energia na Agricultura, pela oportunidade.

Aos colegas Edgar dos Reis, Thiago Omodei Gestinari e Wesley da Silva Ribeiro, pelo auxílio na coleta e processamento dos dados.

A Prof. Dra. Arlete Aparecida Correia Meneguette, pelo apoio e solidariedade.

Ao Departamento de Cartografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Unesp/Presidente Prudente, que concedeu o afastamento para a realização do curso.

Ao Senhor José Jacinto Neto, proprietário da Fazenda Indiana, por permitir o uso da área de cultivo de seringueira e pastagem para a realização de levantamentos topográficos.

Ao Senhor Benedito J. Azevedo, gerente geral do Frigorífico BOM-MART, por permitir o uso da área com plantação de eucaliptos.

E por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esta tarefa fosse concluída.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Datum vertical	7
4.2 Redes de altitudes.....	9
4.2.1 Número geopotencial.....	10
4.2.2 Altitude dinâmica.....	12
4.2.3 Altitude ortométrica.....	14
4.2.4 Altitude normal.....	16
4.2.5 Vínculo entre as redes de altitudes e o nivelamento geométrico.....	18
4.3 Nivelamento geométrico.....	22
4.3.1 Efeitos sistemáticos envolvidos.....	26
4.3.1.1 Refração atmosférica.....	26
4.3.1.2 Colimação imperfeita do nível.....	28
4.3.1.3 Verticalidade imperfeita da mira.....	30
4.3.1.4 Aferição imperfeita da mira.....	32
4.3.1.5 Marés terrestres.....	34
4.4 Gravimetria.....	37
4.4.1 Campo de gravidade terrestre.....	37
4.4.1.1 Gravidade.....	37
4.4.1.2 Potencial da gravidade.....	40
4.4.2 Sentido físico do potencial da gravidade.....	41
4.5 Anomalia da gravidade.....	44
4.5.1 Anomalia ar livre.....	47
4.5.2 Correção do terreno.....	49
4.5.3 Anomalia Bourguer.....	50
4.6 Datum gravimétrico.....	52

4.6.1	Determinação da gravidade.....	52
4.6.1.1	Determinação absoluta da gravidade.....	52
4.6.1.2	Determinação relativa da gravidade.....	53
4.6.2	Redes gravimétricas.....	54
4.7	Determinação da ondulação a partir no GPS/Nivelamento.....	54
4.8	Sistema de Posicionamento Global (GPS).....	56
4.8.1	Segmento Espacial.....	57
4.8.1.1	Características dos Sinais GPS.....	58
4.8.2	Segmento de Controle.....	58
4.8.3	Segmento de Usuário.....	59
4.8.3.1	Antena.....	60
4.8.3.2	Seção de Rádio Frequência.....	60
4.8.3.3	Canais.....	60
4.8.3.4	Microprocessador.....	61
4.8.3.5	Interface com o Usuário.....	61
4.8.3.6	Memória.....	62
4.8.3.7	Suprimento de Energia.....	62
4.8.3.8	Classificação dos Receptores GPS.....	62
4.8.4	Fontes de Erros.....	63
4.8.4.1	Multi-caminho.....	67
4.8.4.2	Orientação e centro de fase da antena.....	67
4.8.4.3	Medição da altura da antena.....	67
4.8.5	Modelo de observação.....	68
4.8.6	Precisão na altitude.....	70
4.9	Sistemas de Referência.....	73
4.9.1	Sistema de Referência Associado ao GPS (WGS 84).....	73
4.9.2	Sistema Geodésico Brasileiro.....	76
4.9.2.1	Situação atual.....	76
4.9.2.2	Sistema de referência geocêntrico das Américas (SIRGAS).....	77
4.9.2.3	Transformações e atualizações de coordenadas.....	77
4.10	Análise estatística.....	78
4.10.1	Análise de exatidão e de precisão.....	78

4.10.2	Análise de tendências e precisão.....	80
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	82
5.1	Material.....	82
5.1.1	Área de Estudo.....	82
5.1.2	Equipamentos.....	82
5.2	Planejamento.....	84
5.3	Coleta de dados.....	84
5.3.1	Levantamento com Estação Total.....	85
5.3.2	Nivelamento Geométrico.....	85
5.3.3	Coleta de dados com GPS.....	86
5.4	Processamento dos dados.....	86
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
6.1	Ondulações geoidais nas RRNN.....	102
7	CONCLUSÕES.....	103
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
	ANEXO 1 (Caderneta de campo e processamento dos dados – estação total).....	108
	ANEXO 2 (Caderneta de campo – nivelamento geométrico).....	117
	ANEXO 3 (Resultado do processamento dos dados GPS – levantamento na área de Pastagem e seringueiras).....	121
	ANEXO 4 (Resultado do processamento dos dados GPS – levantamento na área de eucaliptos).....	135

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Especificações para nivelamento geométrico no Brasil.....	31
Tabela 2 – Parâmetros do elipsóide WGS 84.....	75
Tabela 3 – WGS 84 e suas realizações.....	75
Tabela 4 – Coordenadas das estações fixas no WGS 84.....	76
Tabela 5 – Acurácia relacionada à portadora.....	79
Tabela 6 – Combinação linear da fase do código.....	83
Tabela 7 – Coordenadas do ponto UEPP.....	91
Tabela 8 – Coordenadas planimétricas dos pontos na pastagem obtidos com estação total.....	92
Tabela 9 – Coordenadas planimétricas dos pontos no seringal obtidas com estação total....	93
Tabela 10 – Coordenadas planimétricas dos pontos no eucaliptal obtidas com estação total.....	93
Tabela 11 – Resultado do processamento dos dados da estação total (pastagem e seringal)	94
Tabela 12 – Resultado do processamento dos dados da estação total (eucaliptos).....	94
Tabela 13 – Desníveis entre os vértices na área de pastagem (nivelamento geométrico)	95
Tabela 14 – Desníveis entre os vértices na área de seringal (nivelamento geométrico).....	95
Tabela 15 – Desníveis entre os vértices na área com eucaliptos (nivelamento geométrico).	96
Tabela 16 – Coordenadas tridimensionais obtidas com GPS na área de pastagem.....	97
Tabela 17 – Coordenadas tridimensionais obtidas com GPS na área com seringueiras.....	97
Tabela 18 – Coordenadas tridimensionais obtidas com GPS na área com eucaliptos.....	98
Tabela 19 – Discrepâncias entre as coordenadas na área com pastagem.....	98
Tabela 20 – Discrepâncias entre as coordenadas na área com seringal.....	99
Tabela 21 – Discrepâncias entre as coordenadas na área com eucaliptos.....	99
Tabela 22 – Discrepâncias entre as diferenças de nível na área com pastagem.....	100
Tabela 23 – Discrepâncias entre as diferenças de nível na área com seringueiras.....	100
Tabela 24 – Discrepâncias entre as diferenças de nível na área com eucaliptos.....	101
Tabela 25 – Análise da exatidão e precisão dos pontos na área com pastagem.....	104

Tabela 26 – Análise da exatidão e precisão dos pontos na área com seringueiras.....	105
Tabela 27 – Análise da exatidão e precisão dos pontos na área com eucaliptos.....	105
Tabela 28 – Análise de tendências e de precisão na área de pastagem.....	107
Tabela 29 – Análise de tendências e de precisão na área com seringueiras.....	107
Tabela 30 – Análise de tendências e de precisão na área com eucaliptos.....	107
Tabela 31 – RRNN e ondulação geoidal.....	108

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Altitude normal e teluróide.....	23
Figura 2 – Processo de medição do nivelamento geométrico.....	30
Figura 3 – Erro devido à refração num lance de visadas iguais.....	32
Figura 4 – Acúmulo do erro de refração.....	33
Figura 5 – Variação diurna do gradiente vertical da temperatura.....	34
Figura 6 – Efeito do erro de colimação.....	35
Figura 7 – Correção de colimação para um lance.....	35
Figura 8 – Efeito do erro de verticalidade.....	36
Figura 9 – Gráfico resultante da aferição de uma mira.....	38
Figura 10 – Correção astronômica.....	41
Figura 11 – Componentes da força de gravidade.....	45
Figura 12 – Redução da gravidade.....	52
Figura 13 – Correção do terreno.....	55
Figura 14 – Altitudes geométrica e ortométrica.....	61
Figura 15 – Localização da área de estudo.....	89

1 RESUMO

Neste trabalho, foram realizados levantamentos topográficos para a avaliação do efeito da cobertura vegetal, na recepção de sinais GPS, para obtenção de posicionamento tri-dimensional, considerando os estudos realizados em diferentes tipos de uso do solo.

Vértices foram implantados em diferentes tipos de uso do solo; em área com pastagem, com plantação de seringueiras e com eucaliptos, e as suas posições determinadas com estação total, nivelamento geométrico e com receptores GPS.

Na avaliação do posicionamento altimétrico adotou-se como valores de referência os desníveis determinados com o nivelamento geométrico para avaliação dos dados obtidos com receptores GPS. As coordenadas planimétricas obtidas com receptores GPS foram analisadas utilizando-se com valores de referência os dados obtidos com a estação total.

No levantamento topográfico com estação total foram adotadas as prescrições estabelecidas nas Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13.133, Execução de Levantamentos Topográficos, para poligonais do tipo IVP.

Foi realizada a análise de exatidão e de precisão do posicionamento tri-dimensional, adotando como padrão a NBR 13133 da ABNT para a classe do levantamento executado.

Para aplicações do GPS na altimetria há necessidade do conhecimento da ondulação geoidal (N), que neste trabalho, para a sua determinação foram coletados dados com receptor na referência de nível (RN).

Os resultados obtidos indicam que cuidados especiais devem ser tomados nos levantamentos com receptores GPS em áreas com cobertura vegetal, pois estas interferem na propagação das ondas eletromagnéticas provenientes dos satélites podendo inviabilizar o posicionamento.

Palavras chave: Posicionamento tri-dimensional; levantamento topográfico; Sistema de Posicionamento Global (GPS); análise de exatidão e precisão.

EVALUATION OF PLANIMETRIC AND HEIGHT POSITIONING USING A GPS RECEIVER IN DIFFERENT TYPES OF LAND USE

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: OTÁVIO YASSUO ITAME

Adviser: ZACARIAS XAVIER DE BARROS

2 SUMMARY

In this work, topographic surveys were carried out in order to evaluate the effect of vegetal cover, on the reception of GPS signals, for 3D positioning, considering studies to be made in different types of land use.

Points were set up on different types of land use, in areas containing grass, rubber trees and eucalyptus, which had their positions defined using a total station, geometric leveling and GPS receivers

In the evaluation of height positioning it was adopted as reference values the height differences determined by geometric levelling in order to evaluate data obtained through GPS receivers. Planimetric coordinates obtained by using GPS receivers were analysed using as reference values the data obtained using a total station.

During the topographic survey using a total station the recommendations set up by the Brazilian Association for Technical Rules (ABNT) NBR 13.133, regarding the execution of topographic surveys, for transverses of type IVP.

Accuracy and precision analysis was made on the 3D positioning, also considering ABNT NBR 13.133, for the class of topographic survey which was carried out.

In order to apply GPS on height positioning it is necessary to know the geoidal undulation (N) and, in this work, N was computed based upon data acquired employing receivers at the level reference (RN).

The results obtained indicate that special care must be taken during the surveys carried out with the use of GPS receivers on areas with vegetal cover, because it

causes interference in the propagation of electromagnetic waves from the satellite which can even make the positioning become unviable.

Keyword: 3D positioning; topographic surveys; Global Positioning System (GPS); Accuracy and precision analysis.

3 INTRODUÇÃO

Na maioria das aplicações, sejam em levantamentos geodésicos ou topográficos, utiliza-se de altitudes ortométricas, que são as altitudes referenciadas ao geóide, definido como sendo a superfície equipotencial do campo da gravidade que mais se aproxima do nível médio dos mares não perturbados (AYHAN, 1993).

O datum vertical brasileiro é o nível médio dos mares registrado pelo marégrafo de Imbituba, localizado no litoral do Estado de Santa Catarina. As altitudes ortométricas brasileiras são referidas a esse marégrafo e transportadas por todo o país por nivelamento geométrico.

Embora, o órgão oficial responsável pelas determinações das referências de nível (RRNN) no território brasileiro seja a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), existem outras instituições que têm realizado essa tarefa.

Atualmente, as determinações das coordenadas tridimensionais têm sido realizadas com uso do GPS (Global Positioning System). Contudo, as coordenadas altimétricas obtidas com GPS são as altitudes geométricas, que necessitam ser transformadas em altitudes ortométricas.

Diante desses fatores, para a avaliação das coordenadas tridimensionais, um outro, preponderante, é o estudo e a determinação da ondulação do geóide (que é definido como a distância contada sobre a normal, da superfície do elipsóide à superfície do geóide), no ponto considerado (GEMAEL, 1999).

A determinação da altitude ortométrica, é imprescindível em muitas atividades cotidianas em mapeamento, distribuição de água, saneamento, planejamento urbano, entre outros, praticamente não evoluiu durante um século e, até bem pouco tempo não havia alternativa para se evitar os inconvenientes da morosidade e do elevado custo do nivelamento clássico. Isto é particularmente problemático para os países com dimensões continentais, como é o caso do Brasil, que além das dificuldades geográficas naturais, é economicamente inviável a implantação de rede de nivelamento, que se estenda por todas as regiões do país, de maneira a possibilitar uma distribuição geográfica adequada às necessidades dos usuários.

Atualmente nas atividades mencionadas é possível substituir os métodos tradicionais, pelo uso do Sistema de Posicionamento Global (GPS) combinado com alturas geoidais obtidas de modelos de alta resolução. Neste caso, dois requisitos são fundamentais: um geóide com precisão compatível às necessidades, e uma rede GPS suficientemente densa que permita a aplicação desta metodologia de forma eficiente. Esta combinação tem motivado inúmeros trabalhos nestes últimos anos.

Neste trabalho, são apresentadas metodologias a avaliação do posicionamento tri-dimensional, por métodos estatísticos, de pontos obtidos com receptores GPS em áreas com diferentes tipos de cobertura vegetal.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram selecionadas três áreas com diferentes tipos de cobertura vegetal; uma área com pastagem, outra com seringueiras e uma terceira com eucaliptos. Nestas áreas foram materializados pontos formando polígonos que foram levantados com estação total e com receptores GPS para a determinação de suas coordenadas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Datum vertical

Datum vertical é a superfície de referência à qual estão vinculadas todas as altitudes de uma determinada rede altimétrica. Para as altitudes referidas ao campo gravífico real a superfície de referência é, em termos rigorosos, o geóide, que é a superfície equipotencial do campo da gravidade que mais se aproxima do nível médio dos mares não perturbados (VANICEK & KRAKIWSKY, 1986).

Segundo Gemael (1999), o datum utilizado para definição das altitudes é o geóide. A materialização do geóide pode ser feita na costa oceânica através do registro das variações do nível do mar usando marégrafos, estabelecidos em pontos adequados. O nível médio obtido após grandes intervalos de tempo (≥ 1 ano) é considerado como nível médio local do mar (uma aproximação do geóide).

O valor médio, contudo, devido às influências sistemáticas presentes nos registros maregráficos, como consequência da dinâmica do oceano, não é rigorosamente coincidente com o geóide. O afastamento entre o nível médio do mar e o geóide é chamado de topografia da superfície do mar e pode atingir valores iguais ou superiores a 1 metro (TORGE, 1991).

Dentre as influências sistemáticas que afetam o nível do mar podem ser destacadas as seguintes: marés oceânicas, variações na pressão atmosférica, alterações nas correntes oceânicas, variações nos ventos, mudanças na massa específica da água (em função

da temperatura, salinidade e pressão), flutuações nas descargas dos rios, alterações na configuração batimétrica e fusão glacial, entre outras.

As variações periódicas do nível do mar são, em sua maior parte, eliminadas pela adoção do nível médio. Todavia, influências não periódicas, tais como algumas componentes da maré e efeitos oceanográficos e meteorológicos aproximadamente constantes, afetam o valor médio. Embora a precisão interna da média anual dos valores das observações do nível do mar seja da ordem de 1 cm, podem ocorrer desvios ocasionais da ordem de 10 cm, ou maiores, entre médias anuais, em função dos efeitos geradores da topografia da superfície do mar (FORRESTER, 1980).

Ainda segundo o mesmo autor, com o propósito de corrigir o efeito de tal topografia na determinação do datum vertical, têm sido desenvolvidos alguns métodos, tais como: nivelamento estérico (steric leveling), estudo de circulação global e altimetria por satélites. Entretanto, com base no conhecimento atual do comportamento do oceano, a correção da topografia da superfície do mar ainda não pode ser feita de modo eficaz. Na melhor das hipóteses os métodos propostos permitem a determinação do afastamento instantâneo entre o nível do mar e o geóide. A topografia do nível médio do mar, permanente ou quase estacionária, só poderia ser obtida após a repetição das observações e cálculos durante um período relativamente longo.

Outros fenômenos, tais como: deslocamentos tectônicos de massas, redistribuição sazonal da massa atmosférica e águas subterrâneas e suas implicações nas variações do geóide, têm sido objetos de estudos. Todavia, o estágio atual de desenvolvimento desses estudos ainda não permite o estabelecimento de modelos que permitam expressá-los matematicamente com precisão desejável à sua aplicação no problema das altitudes de alta precisão (LADEN, 1980).

Assim, não obstante a fácil definição do geóide, superfície equipotencial do campo da gravidade, atualmente o acesso físico a esta superfície só pode ser conseguido a menos da topografia da superfície do mar, o que tem gerado diferenças de data entre redes verticais de países distintos, que podem atingir valores da ordem de 1 metro (RAPP, 1980).

4.2 Redes de Altitudes

A posição planimétrica de um ponto sobre a superfície terrestre é dada pela latitude e longitude de sua projeção sobre um determinado elipsóide de referência. O posicionamento altimétrico mais intuitivo seria então dado pela distância contada sobre a normal ao elipsóide entre a superfície do elipsóide e o ponto em questão. Entretanto, tem sido normalmente utilizado como superfície de referência para o posicionamento altimétrico, o geóide, que em primeira aproximação, o nível médio dos mares. Assim a separação, contada ao longo da vertical, entre o geóide e um ponto na superfície terrestre é denominada de altitude ortométrica.

Tais altitudes referidas ao geóide, ou simplesmente altitudes, têm sido tradicionalmente empregadas para fins de mapeamento. Contudo, é incorreto atribuir às altitudes o simples papel de controle para o mapeamento. Na realidade, uma rede de pontos com posições altimétricas bem definidas tem várias finalidades, nem sempre restritas ao âmbito da Geodésia.

As altitudes referidas ao geóide, associadas às ondulações geoidais, são necessárias para a redução ao elipsóide das distâncias medidas entre pontos da superfície terrestre. As estações de uma rede gravimétrica devem possuir altitudes conhecidas para a redução ao geóide dos valores observados de gravidade. A detecção de variações de altitudes pressupõe a existência de uma rede de pontos com altitudes bem definidas (BOMFORD, 1971)

Em outros setores do conhecimento humano também se faz presente a necessidade de algumas posições altimétricas bem determinadas. As altitudes são importantes na gestão urbana e rural, em grandes projetos de engenharia, em estudos ecológicos, em projetos afetos ao meio ambiente, na geografia, na planetologia, e na hidrografia (VANICEK & KRAKIWSKY, 1986).

Ainda segundo o mesmo autor, não obstante todos os objetivos citados, as altitudes servem basicamente para a composição de coordenadas verticais, devendo, por isso, preencher alguns requisitos. Há que existir univocidade na definição das altitudes, e esta deve ser referido ao campo gravífico terrestre suposto invariante com respeito ao tempo. Como já foi dito, a superfície de referência adotada é o geóide, geope que mais se

aproxima do nível médio dos mares não perturbado. Entende-se por geope como uma superfície equipotencial qualquer, do campo gravífico terrestre.

4.2.1 Número geopotencial (C)

Segundo Heiskanen e Moritz (1967), o número geopotencial de um ponto A sobre a superfície terrestre representa o trabalho necessário para que a força da gravidade transporte uma partícula de massa unitária do geóide ao ponto A ao longo da linha de força do campo gravífico vertical que contém tal ponto. Na realidade, o caminho a ser percorrido pela partícula de massa unitária pode ser qualquer um, devido ao caráter conservativo do campo gravífico terrestre. A colocação de um deslocamento ao longo da linha de força visa tão somente estreitar o vínculo entre a definição apresentada e a concepção de altitude.

E diz, ainda, que se pode definir o número geopotencial do ponto A como a diferença entre os geopotenciais (potenciais do campo gravífico terrestre) do geóide e do geope que contêm o tal ponto. Denotando o número geopotencial do ponto A por C_A , o geopotencial associado ao ponto A por W_A , e o geopotencial do geóide por W_O , tem-se:

$$C_A = W_O - W_A = \int_O^A g dl \quad (1)$$

Na equação (1) g é o valor da gravidade ao longo da vertical e A e dl é o incremento infinitesimal ao longo da mesma linha de força.

Constata-se que a diferença de número geopotencial entre dois pontos A e B da superfície da Terra é dada por

$$\Delta C_{AB} = C_B - C_A = \int_A^B g dl \quad (2)$$

onde a integração é conduzida ao longo da superfície terrestre entre os pontos A e B, sendo então g o valor observado da gravidade no referido trecho.

O conceito de número geopotencial foi adotado pela assembléia geral Associação Internacional de Geodésia em setembro 1954, tendo por unidade a chamada unidade geopotencial (u.g.p.), tal que:

$$1 \text{ u.g.p.} = 1 \text{ kGal.m} = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{Como } g = 9,8 \text{ m.s}^{-2} = 0,98 \text{ kGal,}$$

$$C = gH = 0,98H \quad (2a)$$

os valores dos números geopotenciais são calculados como sendo 2% menores do que os valores das respectivas altitudes brutas dos pontos (HEISKANEN e MORITZ, 1967).

Por se tratar de uma diferença de potencial, o número geopotencial C possui as seguintes características:

- é univocamente definido para cada ponto, ou seja, não depende da trajetória da linha de nivelamento usada para referir o ponto ao nível do mar;
- a integral de C em um circuito fechado é zero;
- é igual para todos os pontos de uma mesma superfície equipotencial;
- é positivo acima do geóide, zero no geóide e negativo abaixo deste;
- pode ser obtido a partir de observações feitas apenas sobre a superfície física da Terra;
- não tem dimensão de comprimento.

Como na prática não se dispões de uma distribuição contínua das grandezas envolvidas no cálculo de uma diferença de número geopotencial, a integral que se faz presente na equação (2) deve ser substituída por um somatório sobre um conjunto discreto de pontos nos quais foram observados valores de gravidade e desníveis. Assim, o valor aproximado da diferença de número geopotencial entre os pontos A e B é:

$$\Delta C_{AB} = \sum_A^B \bar{g}_{ij} \delta l_{ij} \quad (3)$$

sendo δl_{ij} o desnível entre dois pontos adjacentes i e j; \bar{g}_{ij} é a média aritmética entre g_i e g_j , valores de gravidade observados na superfície da Terra nos pontos i e j, respectivamente.

A equação (3) mostra que a diferença de número geopotencial pode ser obtida por uma combinação de observações gravimétricas e resultados de nivelamentos geométricos.

4.2.2 Altitude dinâmica (H^D)

De acordo com Nassar e Vanicek (1975), a escassez de observações gravimétricas na superfície terrestre conduz a um conhecimento bastante precário do campo gravífico real da Terra.

Neste caso, segundo os mesmos autores, deve-se fazer uso do campo gravífico normal da Terra, com os valores observados de gravidade sendo substituídos por valores de gravidade normal, bem como os geopes por esferopes (superfícies equipotenciais do campo gravífico normal). Faz-se então necessário definir o número esferopotencial de um ponto, ou seja, o número geopotencial baseado em valores de gravidade normal. O ponto inicial de referência para as altitudes é estabelecido normalmente através de determinação do nível dos mares numa estação de marégrafo, embora em termos rigorosos seja requerido o conhecimento da topografia da superfície do mar. A superfície de referência para as altitudes vinculadas ao campo gravífico normal passa a ser o esferope que contém o tal ponto inicial de referência na estação de marégrafo; o esferopotencial (potencial do campo gravífico normal), associado a este esferope é comumente denotado por U_M . Seja U_A o esferopotencial do esferope que contém o ponto A da superfície terrestre. Denotando o número esferopotencial de A por \tilde{C}_A , pode-se escrever:

$$\tilde{C}_A = U_M - U_A = \int_M^A \gamma dn \quad (4)$$

Na equação (4) γ é a gravidade normal ao longo da linha de força normal e dn é um incremento infinitesimal ao longo da mesma linha de força. A gravidade normal utilizada é obtida a partir da gravidade normal sobre o elipsóide ou Terra normal, γ_0 , e do gradiente vertical da gravidade normal. As fórmulas pertinentes são:

$$\gamma_0(\phi) = \gamma_E (1 + \alpha \sin^2 \phi + \beta \sin^2 2\phi) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\gamma_0} = -\frac{2\gamma_0}{a} (1 + m + f + \cos 2\phi) \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6) γ_E , α e β são coeficientes oriundos do campo da gravidade normal, a é o semi-eixo maior do elipsóide, f é o achatamento do elipsóide, m é o

parâmetro geodésico, dados por a^2bW^2/GM , Φ é a latitude, G é a constante da gravitação, M é a massa da Terra, b é o semi-eixo menor do elipsóide, e W é a velocidade angular da Terra.

De modo internamente análogo à equação (3) obtém-se a diferença de número esferopotencial entre dois pontos A e B através da fórmula:

$$\Delta\tilde{C}_{AB} = \sum_A^B \bar{\gamma}_{ij} \delta n_{ij} \quad (7)$$

A conversão dos números geopotenciais e esferopotenciais em unidades de comprimento requer uma divisão por um valor particular de gravidade. Quando tal valor é a gravidade normal sobre o elipsóide calculada para a latitude média da região de interesse obtém-se as chamadas altitudes dinâmicas, ditas reais ou normais conforme sejam utilizados os números geopotenciais ou os números esferopotenciais. A altitude dinâmica real de um ponto A é então dada por:

$$H_A^D = \frac{C_A}{\gamma_o(\bar{\Phi})} \quad (8)$$

enquanto que a altitude dinâmica normal pode ser calculada através da expressão:

$$\tilde{H}_A^D = \frac{\tilde{C}_A}{\gamma_o(\bar{\Phi})} \quad (9)$$

sendo $\bar{\Phi}$ a latitude média da região de interesse.

A diferença de altitude dinâmica real entre dois pontos A e B é dada por:

$$\Delta_{AB}^D = H_B^D - H_A^D = \frac{\Delta C_{AB}}{\gamma_o(\bar{\Phi})} \quad (10)$$

enquanto que a diferença de altitude dinâmica normal entre tais pontos pode ser calculada pela expressão:

$$\Delta\tilde{H}_{AB}^D = \tilde{H}_B^D - \tilde{H}_A^D = \frac{\Delta\tilde{C}_{AB}}{\gamma_o(\bar{\Phi})} \quad (11)$$

A defasagem existente entre uma diferença de altitude dinâmica real e uma diferença de altitude dinâmica normal recebe a denominação de correção de gravidade dinâmica. Tal correção reflete a influência do não conhecimento do campo gravífico real no

cálculo de uma altitude dinâmica, podendo ser obtida pela seguinte fórmula (NASSAR e VANICEK, 1975):

$$\Delta H_{AB}^D - \Delta \tilde{H}_{AB}^D = \frac{\Delta \ell_{AB}}{\gamma_o(\Phi)} \Delta \bar{g}_{AB} \quad (12)$$

Na equação (12) $\Delta \bar{g}_{AB}$ é a anomalia do ar livre ($\Delta g = g - \gamma_o(\Phi) + 0,3086h$) média entre os pontos A e B e $\Delta \ell_{AB}$ é o desnível oriundo do nivelamento geométrico.

Como às altitudes dinâmicas falta significado geométrico, a divisão por $\gamma_o(\Phi)$ somente obscurece o significado físico inerente aos números geopotenciais e esferopotenciais. Na realidade, tanto os sistemas dos números geopotenciais e esferopotenciais como o das altitudes dinâmicas representam grandezas físicas não muito intuitivas, pois descrevem pontos sobre a mesma superfície equipotencial como sendo igualmente elevados (BALAZS et al, 1980).

4.2.3 Altitude ortométrica (H^o)

Segundo Gemael (1999), a altitude ortométrica real de um ponto A do terreno é a distância entre o geóide e o ponto, medida ao longo da linha de força real vertical de A. As altitudes ortométricas reais proporcionam a separação entre a superfície terrestre e o geóide. Considerando a equação (1) e o valor médio da gravidade entre o ponto A e o geóide, dado por:

$$\bar{g}_A = \frac{1}{H_A^o} \int_0^A g dl,$$

chega-se à seguinte expressão para a altitude ortométrica real de A:

$$H_A^o = \frac{C_A}{\bar{g}_A} \quad (13)$$

O problema inerente ao uso das altitudes ortométricas reais é que \bar{g}_A não pode ser determinado com rigor, posto que não se conhece a verdadeira distribuição de densidade, dessa terra, ao longo da linha de força de A, necessitando-se então de um gradiente de gravidade hipotetizado ou postulado. Conseqüentemente podem-se obter tantos sistemas de

altitudes ortométricas reais quantos sejam os métodos utilizados para o cálculo de \bar{g}_A (HEISKANEN e MORITZ, 1967).

O sistema de altitudes ortométricas reais mais difundidos e empregados é o de Helmert, que aceita o gradiente de Poincaré-Prey, $-0,0848$ mgal/m, como sendo representativo para qualquer ponto entre a superfície terrestre e o geóide. O gradiente de Poincaré-Prey pressupõe uma densidade constante para a crosta de $2,67$ g/cm³ e, sendo constante, implica em uma variação linear da gravidade ao longo da linha de força. A gravidade média \bar{g}_A para o sistema das altitudes ortométricas reais de Helmert é dada por:

$$\bar{g}_A = g_A + 0,0424H_A \quad (14)$$

sendo g_A a gravidade observada no ponto A e H_A a altitude não ajustada de A oriunda do nivelamento geométrico.

Outros métodos mais sofisticados de obtenção da gravidade média \bar{g}_A foram desenvolvidos por Niethammer, Mader e Mueller. O valor médio da gravidade calculada por estes métodos para casos extremos de altitudes acentuadas difere de cerca de 1 mgal para o valor de Helmert. Esta constatação retifica o comportamento praticamente linear de g ao longo da linha de força, mostrando que as altitudes ortométricas reais podem ser calculadas com alto grau de exatidão (HEISKANEN e MORITZ, 1967). Vaniceck (1986) sugeriu também que o mais correto seria utilizar o gradiente do ar livre, $-0,03086$ mgal/m, notadamente nas áreas isostaticamente compensadas, para o cálculo de \bar{g}_A , mas as observações analisadas por Strange (1982) mostram a maior correção do gradiente de Poincaré-Prey (STRANGE, 1982). Tal fato leva à conclusão de que as altitudes de Helmert representam a melhor aproximação para as altitudes ortométricas reais.

A falta de informações gravimétricas é um problema tradicionalmente contornado pela utilização do campo gravífico normal. Por isso deve-se definir a chamada altitude ortométrica normal, que consiste na distância média, ao longo da linha de força normal, entre um ponto da superfície e o esferope que passa pelo ponto inicial de referência para as altitudes na estação de marégrafo. Denotando a altitude ortométrica normal de um ponto A por \tilde{h}_A^o tem-se:

$$\tilde{H}_A^o = \frac{\tilde{C}_A}{\gamma(\Phi)} \quad (15)$$

onde \tilde{C}_A é o número esferopotencial de A e $\bar{\gamma}(\Phi)$ é, em termos rigorosos, a gravidade normal média entre o ponto A e o esferope que passa pelo ponto inicial de referência para as altitudes. Na prática, porém, se aceita o valor médio entre os esferopes no ponto A e na superfície do elipsóide.

A defasagem entre uma diferença de altitude ortométrica real de Helmert e uma diferença de altitude ortométrica normal recebe a denominação de correção de gravidade ortométrica de Helmert. Tal correção reflete a influência do não conhecimento do campo gravífico real no cálculo de uma altitude de Helmert, podendo ser obtida pela seguinte fórmula (NASSAR & VANICEK, 1975):

$$\Delta H_{AB}^o - \Delta \tilde{H}_{AB}^o = -\frac{\bar{H}_{AB}}{\gamma_o(\Phi)} (\Delta g_B - \Delta g_A - 0,2238 \Delta l_{AB}) \quad (16)$$

Na equação (16) as anomalias da gravidade são do tipo do ar livre, \bar{H}_{AB} é a altitude média entre os pontos A e B, e Δl_{AB} é o desnível oriundo do nivelamento geométrico antes do ajustamento.

4.2.4 Altitude normal (H^n)

A redução ao geóide de valores de gravidade observados na superfície terrestre envolve hipóteses sobre a distribuição de densidade na crosta. Este é um problema que afeta vários cálculos geodésicos convencionais. A ondulação geoidal resulta da diferença entre as altitudes geométrica ou elipsoidal e a ortométrica. O cálculo da altitude ortométrica requer, por exemplo, a adoção do gradiente de Poincaré-Prey para a obtenção do valor médio da gravidade ao longo da linha de força entre o geóide e a superfície da Terra. Para evitar aproximações deste tipo MOLODENSKY propôs uma concepção diferente (GEMAEL, 1999).

A figura 1 mostra um ponto A do terreno projetado sobre o elipsóide ao longo da linha de força normal. Seja P um ponto situado sobre esta linha de força normal de modo que o esferopotencial de P iguale ao geopotencial de A, isto é, $U_P = W_A$. A variação de A ao longo da superfície terrestre faz com que P descreva uma superfície denominada teluróide.

A distância contada ao longo da linha de força normal entre o teluróide e o elipsóide é denominada altitude normal, denotada por H_A^N para o ponto A. A separação entre o teluróide e a superfície da Terra recebe a denominação de anomalia de altitude, denotada por ζ_A . A altitude elipsoidal de A é então dada pela soma da altitude normal com a anomalia de altitude.

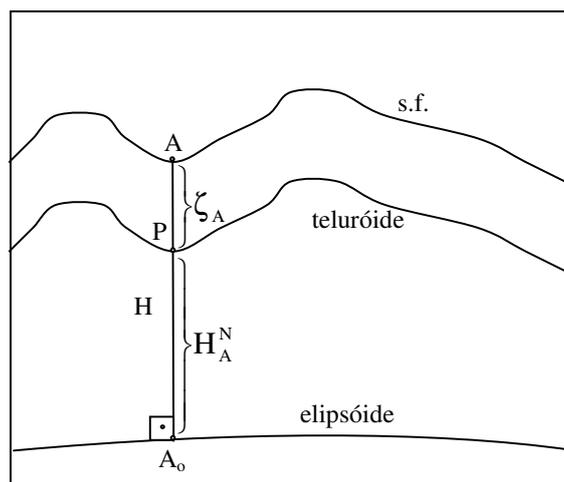


Figura 1 – Altitude normal e teluróide (Adaptado de Vanicek e Krakiwsky, 1986)

A altitude normal, bem como o teluróide, pode ser determinada a partir de observações gravimétricas e nivelamento geométrico. Inicialmente o número geopotencial de A é calculado com a equação (1) e a altitude normal pode então ser obtida pela seguinte expressão (HEISKANEN e MORITZ, 1967).

$$H_A^N = \frac{C_A}{\gamma_o(\Phi)} \left[1 + (1 + m + f \cos 2\Phi) \cdot \frac{C_A}{a\gamma_o(\Phi)} + \left(\frac{C_A}{a\gamma_o(\Phi)} \right)^2 \right] \quad (17)$$

Na equação (17) $\gamma_o(\phi)$ é a gravidade normal no ponto A_o sobre o elipsóide.

É interessante notar que, se o geopotencial W fosse igual ao esferopotencial U em qualquer ponto, o teluróide coincidiria com a superfície física da Terra, sendo nula a anomalia de altitude.

A Figura 1 mostra as anomalias de altitude contadas a partir do teluróide em direção à superfície terrestre, mas elas também podem ser referidas ao elipsóide, o que vem a gerar uma superfície que coincide com o geóide em mar aberto mas apresenta

discrepância deste de alguns centímetros nas demais regiões, com exceção das regiões montanhosas, nas quais este valor pode atingir alguns metros, que Molodensky denominou essa superfície de quase-geóide (VANICEK e KRAKIWSKY, 1986).

Apesar de não se tratar de uma superfície equipotencial, as altitudes normais podem ser consideradas como os valores que separam o quase-geóide da superfície terrestre.

4.2.5 Vínculo entre as redes de altitudes e o nivelamento geométrico

Segundo Gemael (1999), as altitudes dinâmicas, ortométricas ou normais podem ser obtidas a partir dos números geopotenciais. Na prática, contudo, costuma-se utilizar uma aproximação que consiste no desenvolvimento teórico de expressões que representem as discrepâncias entre os desníveis observados no nivelamento e as correspondentes diferenças de altitudes. A finalidade desta aproximação é estreitar o vínculo entre as diversas redes de altitudes e os resultados do nivelamento geométrico, fazendo com que as diferenças de altitudes difiram o menos possível dos desníveis observados. As altitudes assim obtidas são ditas altitudes práticas.

Essas discrepâncias ou correções usadas para calcular diferenças de altitude a partir dos desníveis observados são justificadas pela falta de paralelismo das superfícies equipotenciais, quer as altitudes estejam referidas ao campo gravífico real, quer estejam referidas ao campo gravífico normal. Na realidade, o principal motivo que induz à utilização das altitudes práticas diz respeito à exatidão com que certas grandezas devem ser avaliadas. As altitudes obtidas a partir de números geopotenciais necessitam de igual exatidão no numerador e no denominador de suas respectivas expressões, enquanto que a exatidão das altitudes práticas depende basicamente da exatidão com que as tais correções são calculadas, uma vez que o nivelamento geométrico é um processo de medição bastante preciso.

Considere-se inicialmente o caso em que as altitudes podem estar referidas ao campo gravífico real. Reunindo as equações (2) e (10) pode-se escrever a diferença de altitude dinâmica real do seguinte modo:

$$\Delta H_{AB}^D = \frac{\Delta C_{AB}}{\gamma_o(\bar{\phi})} = \frac{1}{\gamma_o(\bar{\phi})} \int_A^B g d\ell = \frac{1}{\gamma_o(\bar{\phi})} \int_A^B [g - \gamma_o(\bar{\phi})] d\ell + \int_A^B d\ell \quad (18)$$

O segundo termo da equação 18 representa o desnível observado Δl_{AB} ; o primeiro, portanto, é que a correção dinâmica (CD_{AB}). Tem-se então:

$$CD_{AB} = \int_A^B \frac{g - \gamma_o(\bar{\phi})}{\gamma_o(\bar{\phi})} d\ell = \sum \frac{g_i - \gamma_o(\bar{\phi})}{\gamma_o(\bar{\phi})} \delta \ell_i \quad (19)$$

A correção dinâmica é realmente muito pequena quando comparada à diferença de altitude dinâmica, pois $|g - \gamma_o(\bar{\phi})|/\gamma_o(\bar{\phi})$ é, em valor absoluto, muito inferior a $g/\gamma_o(\bar{\phi})$. Isso vem de encontro à principal característica das chamadas altitude práticas.

Uma forma de correção parcial aplicada ao desnível medido, buscando a consideração de ordem física em um nivelamento, é a aplicação da denominada correção ortométrica, $\delta H'$, a qual elimina o efeito da variação da distância entre geopes, devida à variação de latitude.

Cabe ser destacado que esta denominação embora usual, nada tem a ver com a definição precisa de altitude ortométrica. É o tipo de correção mais extensamente aplicada nas redes de nivelamento e também adotado no Brasil. Este tipo de correção independe de observações gravimétricas, sendo aplicada diretamente ao desnível bruto medido. Esta correção $\delta h'$ pode ser dada por (FREITAS e BLITZKOW, 1999):

$$\delta H' = 1542 \cdot 10^{-9} \cdot H_m \cdot \delta \phi' \cdot \text{sen}(2\phi) \quad (19a)$$

onde

$\delta H'$ – correção ortométrica do não paralelismo das superfícies equipotenciais, num trecho do nivelamento na mesma unidade de h_m ;

H_m – altitude média do trecho;

$\delta \phi'$ – é a diferença da latitude da linha de nivelamento, em minutos de arco;

ϕ – latitude média do trecho.

A correção ortométrica (CO_{AB}) pode ser obtida em função da correção dinâmica através da expressão:

$$CO_{AB} = CD_{AB} + \frac{\bar{g} - \gamma_o(\bar{\phi})}{\gamma_o(\bar{\phi})} H_A - \frac{\bar{g}_B - \gamma_o(\bar{\phi})}{\gamma_o(\bar{\phi})} H_B \quad (20)$$

onde \bar{g}_A e \bar{g}_B podem ser obtidos mediante o uso de um determinado gradiente de gravidade (Poincaré-Prey, por exemplo) e H_A e H_B , altitude de A e B, não necessitam ser conhecidas com muita exatidão.

A correção normal CN_{AB} é obtida diretamente a partir da equação (20) fazendo a substituição de \bar{g}_A e \bar{g}_B pelos respectivos valores médios de gravidade normal $\bar{\gamma}_A$ e $\bar{\gamma}_B$. Resulta então a expressão:

$$CN_{AB} = CD_{AB} + \frac{\bar{\gamma}_A - \gamma_o(\bar{\phi})}{\gamma_o(\bar{\phi})} H_A - \frac{\bar{\gamma}_B - \gamma_o(\bar{\phi})}{\gamma_o(\bar{\phi})} H_B \quad (21)$$

Para resumir, as diferenças de altitude dinâmica, ortométrica e normal, referidas ao campo gravífico real, podem ser respectivamente obtidas através de:

$$\Delta H_{AB}^D = \Delta \ell_{AB} + CD_{AB} \quad (22)$$

$$\Delta H_{AB}^o = \Delta \ell_{AB} + CO_{AB} \quad e \quad (23)$$

$$\Delta H_{AB}^N = \Delta \ell_{AB} + CN_{AB} \quad (24)$$

Considere-se agora o caso em que há informações gravimétricas insuficientes. A solução clássica consiste em contornar este problema através da adoção do campo gravífico normal. A partir das equações (5) e (6) pode-se expressar a gravidade normal para um ponto situado a uma altitude elipsoidal H , ou seja,

$$\gamma(\phi) = \gamma_E \left[1 + \alpha + \text{sen}^2 \phi + \beta \text{sen}^2 2\phi - k_1(\phi)H \right] \quad (25)$$

onde a função $k_1(\phi)$ é dada pela seguinte expressão:

$$k_1(\phi) = \frac{2}{a} (1 + \alpha \text{sen}^2 \phi + \beta \text{sen}^2 2\phi) (1 + m + f \cos 2\phi) \quad (26)$$

Em termos de diferença de potencial e equação de um esferope pode ser representada pelo valor constante do número esferopotencial associado a esse esferope, negligenciado a discrepância entre o esferope de referência para as altitudes ortométricas normais e a superfície do elipsóide, bem as ondulações geoidais, pode-se escrever:

$$\tilde{C} = \int_0^{h^{-0}} \gamma(\phi) dn = \int_0^{h^{-0}} \gamma_E (1 + \alpha \text{sen}^2 \phi + \beta \text{sen}^2 2\phi - k_1(\phi) h^{-0}) dn = \text{constante} \quad (27)$$

Considerando que γ_E pode ser incorporado a constante e realizando a integração, obtém-se a seguinte expressão:

$$(1 + \alpha \text{sen}^2 \phi + \beta \text{sen}^2 2\phi) H^{-0} - \frac{k_1(\phi)}{2} (H^{-0})^2 = \text{constante} \quad (28)$$

Esta última expressão relacionando as variáveis H^{-0} e ϕ será utilizada para deduzir a correção ortométrica que, adicionada aos desníveis observados, transformá-las-á em diferenças de altitudes ortométrica normal. Diferenciando a equação (28), obtém-se após algumas transformações:

$$d\tilde{H}^0 = -\tilde{H}^0 \frac{(\alpha \text{sen} 2\phi + 2\beta \text{sen} 4\phi - k_2(\phi) \tilde{H}^0)}{(1 + \alpha \text{sen}^2 \phi + \beta \text{sen}^2 2\phi - k_1(\phi) \tilde{H}^0)} d\phi \quad (29)$$

onde

$$k_2(\phi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{dk_1(\phi)}{d\phi} \quad (30)$$

Como em termos práticos todas as equações aqui desenvolvidas são aplicadas aos desníveis observados ao longo de seções, a equação (29) assume o seguinte aspecto:

$$CO_{AB} = -\tilde{H}^0 \frac{(\alpha \text{sen} 2\bar{\phi} + 2\beta \text{sen} 4\bar{\phi} - \bar{k}_2(\bar{\phi}) \tilde{H}^0)}{1 + \alpha \text{sen}^2 \bar{\phi} + \beta \text{sen}^2 2\bar{\phi} - k_1(\bar{\phi}) \tilde{H}^0} \Delta\phi \quad (31)$$

Na equação (31) \tilde{H}^0 é a altitude média da seção, $\bar{\phi}$ é a latitude média da seção e $\Delta\phi$ é a diferença de latitude entre os extremos da seção. Uma inspeção nas expressões de $k_1(\phi)$ e $k_2(\phi)$ mostra que elas podem ser negligenciadas para um cálculo prático de CO_{AB} ; não obstante, devido ao aspecto teórico do desenvolvimento apresentado, manter-se-á a equação (31) para a correção ortométrica.

As fórmulas usualmente encontradas para a correção dinâmica baseada no campo gravífico normal apresentam o problema de conterem erros da ordem do valor esperado da correção. Por isso as altitudes dinâmicas normais devem ser calculadas a partir

das altitudes ortométricas normais (BALAZS e YOUNG, 1982). Considerando a equação (27) dividida por $\gamma_0(\bar{\phi})$, obtém-se, de acordo com a equação (9),

$$\tilde{H}^D = \frac{\gamma_E}{\gamma_0(\bar{\phi})} (1 + \alpha \text{sen}^2 \phi + \beta \text{sen}^2 2\phi) \tilde{H}^0 - \frac{\gamma_E}{2\gamma_0(\bar{\phi})} k_1(\phi) (\tilde{H}^0)^2 \quad (32)$$

fórmula que fornece altitudes dinâmicas referidas ao campo gravífico normal.

Com a utilização do campo gravífico normal no lugar do campo gravífico real desaparece a distinção entre altitudes ortométricas e altitudes normais. Não faz sentido então procurar uma correção normal baseada no campo normal da gravidade, pois a mesma se confundiria com a correção ortométrica. Por isso permanecem as equações (19) e (24) para o cálculo de altitudes normais referidas ao campo gravífico real.

4.3 Nivelamento geométrico

Segundo IBGE (1988a), as redes geodésicas verticais são determinadas pelo método de nivelamento geométrico de precisão, projetadas de modo que os itinerários formem circuitos fechados, com perímetros de 400 km ou menos. Os circuitos são compostos por linhas de nivelamento, de comprimento máximo de 100 km, que ligam os pontos nodais da rede. As linhas, por sua vez, são formadas por seções de 3 km ou menos, que conectam estações adjacentes. Uma estação da rede vertical é denominada de Referência de Nível (RN) e geralmente é materializada no terreno por uma placa metálica cravada em construções, rochas ou marcos de concreto, ao longo das principais rodovias.

Os instrumentos básicos usados no nivelamento geométrico são um nível e um par de miras graduadas posicionadas verticalmente. A medição fundamental é o desnível observado δl entre dois pontos próximos ocupados por um par de miras ou por uma única mira colocada sucessivamente em ambos os lados no nível. Fica caracterizado deste modo um lance de nivelamento. O desnível associado a um lance é determinado por uma visada horizontal entre as duas estações de mira.

O nível consiste basicamente de um telescópio de pontaria capaz de girar em torno de um eixo vertical. A linha de visada é horizontalizada através de um nível de bolha ou automaticamente, com um compensador, que é um conjunto de prismas com

característica pendular, colocado na linha de colimação do telescópio, horizontalizando-a pela ação do campo gravítico terrestre. No nivelamento de alta precisão são utilizados níveis com objetiva de 45 a 60 mm de abertura e poder de ampliação de 35 a 50 vezes. Os níveis precisos são dotados de bolha de coincidência que materializam a visada horizontal com um erro máximo de $\pm 0,2''$ (dois décimos de segundo de arco), enquanto que nos níveis automáticos este erro situa-se entre $\pm 0,1''$ e $\pm 0,2''$ (TORGE, 1991).

Para que a pontaria seja ajustada a uma graduação da mira, a linha de visada é levantada ou abaixada paralelamente através de uma placa plano-paralela colocada na frente das lentes da objetiva; o correspondente deslocamento é medido por um micrômetro. As miras possuem três metros de comprimento e, em geral, gravadas sobre uma fita de invar, duas graduações entre as quais existe uma defasagem constante.

O desnível observado entre duas estações de mira é dado pela diferença entre as leituras das visadas de ré e de vante. Devido à distância bastante pequena entre as estações de mira, pode-se negligenciar o não paralelismo dos geopes, bem como a mudança na curvatura do geope que passa através do telescópio do nível. Assim, δl corresponde à separação entre os geopes que passam nas estações de mira. A figura 2 ilustra o processo de medição do nivelamento geométrico.

Uma seção de nivelamento é uma seqüência ininterrupta de lances conduzida entre dois pontos de controle verticais denominados referências de nível (RRNN). Em cada lance presume-se que as miras equidistam do nível para atenuar a influência da refração atmosférica, e que estão alinhadas com as respectivas linhas de força no campo gravítico real: considera-se ainda que o nível esteja perfeitamente horizontalizado e colimado (o erro de colimação resulta da defasagem angular entre a linha de visada real e a horizontal). Considerando que as miras têm um comprimento constante e que estejam aferidas de acordo com um padrão pré-fixado e que as condições atmosféricas são estáveis durante cada lance, o desnível observado entre as RN A e B, Δl_{AB} , é dado pelo somatório dos desníveis observados em cada lance:

$$\Delta l_{AB} = \sum_A^B \delta l_i \quad (33)$$

Por comodidade abandona-se aqui o duplo subscrito presente às equações (3) e (7).

Segundo Balazs (1980), o desnível $\Delta\ell_{AB}$ depende do caminho percorrido para ligar as RN A e B, pois os geopes não são paralelos. A consequência é que o resultado do nivelamento para uma seção não corresponde à diferença de altitude ortométrica entre A e B. Uma determinação unívoca de altitude somente é possível se forem considerados valores observados de gravidade para o subsequente cálculo de uma diferença de número geopotencial. A partir dos números geopotenciais pode-se obter um sistema específico de altitudes.

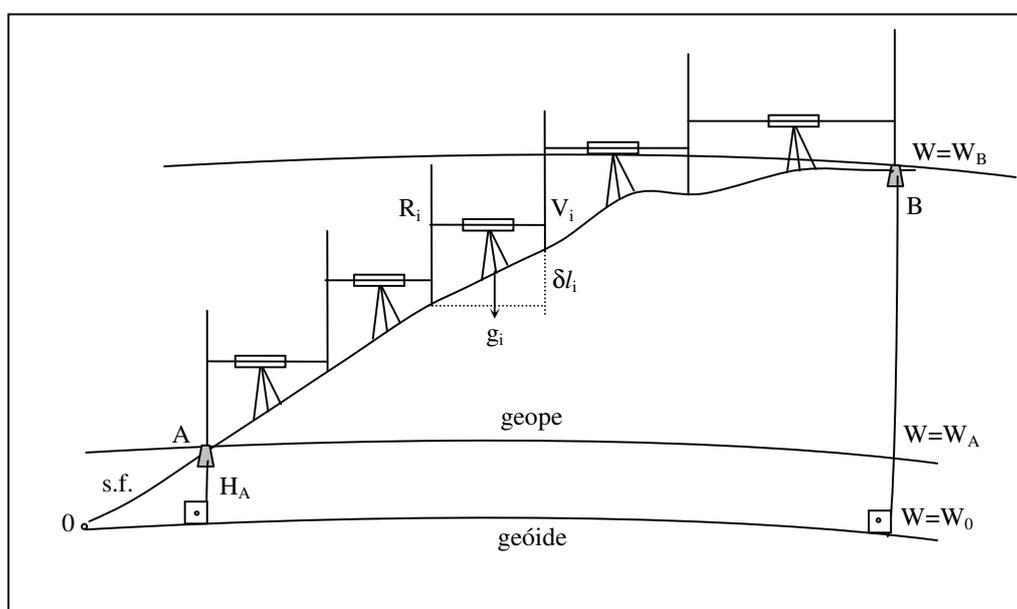


Figura 2 – Processo de medição do nivelamento geométrico (fonte: NASSAR e VANICEK, 1975)

Ainda segundo o mesmo autor, a exatidão do desnível $\Delta\ell_{AB}$ é função da exatidão dos desníveis $\delta\ell$ associados a cada lance. Determinadas prescrições de procedimentos e instrumentos são estipulados para o nivelamento geométrico com a finalidade de minimizar os erros inerentes a cada medição individual e de tornar aleatória a distribuição dos erros que inevitavelmente persistem.

Segundo Schomaker e Berry (1981), o nivelamento geométrico consiste de várias ordens de precisão, cada uma delas tendo sido estabelecida para suprir determinadas necessidades. Assim, é comum serem encontradas as denominações nivelamento

de alta precisão ou de 1ª ordem, nivelamento de precisão ou de 2ª ordem e nivelamento para fins topográficos ou de 3ª ordem. Acha-se na literatura contemporânea o termo nivelamento geodésico no sentido de nivelamento geométrico. Enfatiza-se que tal termo pode gerar confusão por ter sido utilizado durante muito tempo com o significado de nivelamento trigonométrico.

A qualidade do nivelamento geométrico é função da natureza e da magnitude dos erros associados às medições individuais. Os erros grosseiros são detectados e eliminados a contento por de operações de nivelamento e contranivelamento com um par de miras usadas alternadamente para as visadas de ré e de vante.

Os erros sistemáticos normalmente se acumulam proporcionalmente à distância e à variação de altitude, podendo assumir valores indesejáveis. Tais valores têm padronizado várias prescrições de procedimentos do nivelamento geométrico. Estes erros representam o efeito da falta de exatidão nos instrumentos ou no processo de nivelamento, que pode resultar de influência do meio ambiente, embora estas nem sempre sejam previsíveis. Alguns erros sistemáticos podem realmente ser eliminados através de um cumprimento rigoroso das prescrições de procedimentos. Outros podem ser satisfatoriamente controlados por meio de procedimentos de laboratório e campo. Entretanto, alguns erros sistemáticos são de difícil controle devido à complexidade física da fonte do erro.

Os erros acidentais inerentes aos resultados do nivelamento representam imperfeições aleatórias dos instrumentos, observações imprecisas e variações imprevisíveis no meio ambiente. Os erros acidentais não podem ser totalmente eliminados, mas podem ser mantidos pequenos através de processo de redundância, como o que é conseguido com nivelamento e contranivelamento e dupla escala nas miras. Diz-se então que eles representam o nível de ruído, ou seja, o limite na precisão com que o nivelamento pode medir desníveis.

As estimativas dos erros acidentais do nivelamento fixam, dependendo da ordem, valores máximos para o desvio-padrão do desnível associado a uma seção ou a uma linha de nivelamento (diz-se de uma seqüência ininterrupta de seções; um conjunto de linhas com retorno no ponto de partida denomina-se circuito). A Tabela 1 mostra as prescrições adotadas no Brasil para o nivelamento geométrico.

Tabela 1 – Especificações para nivelamento geométrico no Brasil.

Classificação	Alta precisão	De precisão		Topográfico
Aplicação	Fundamental	Áreas mais desenvolvidas	Áreas menos desenvolvidas	local
Erro padrão máximo	$2\text{mm.k}^{1/2}$	$3\text{mm.k}^{1/2}$	$4\text{mm.k}^{1/2}$	$6\text{mm.k}^{1/2}$
Diferença máxima aceitável entre o nivelamento e o contra-nivelamento de uma seção	$3\text{mm.k}^{1/2}$	$6\text{mm.k}^{1/2}$	$8\text{mm.k}^{1/2}$	$12\text{mm.k}^{1/2}$
Diferença máxima aceitável entre o nivelamento e o contra-nivelamento de uma linha	$4\text{mm.k}^{1/2}$	$6\text{mm.k}^{1/2}$	$8\text{mm.k}^{1/2}$	$12\text{mm.k}^{1/2}$
Valor máximo para a razão entre a discrepância acumulada e o perímetro do circuito	$0,5\text{mm.k}^{-1}$	5mm.k^{-1}	5mm.k^{-1}	10mm.k^{-1}

Fonte: IBGE (1998a)

4.3.1 Efeitos sistemáticos envolvidos

Dentre os efeitos sistemáticos que afetam o nivelamento geométrico podem ser destacados os seguintes:

4.3.1.1 Refração atmosférica

Segundo Kukkamaki (1979), as variações na densidade da atmosfera fazem com que a linha de visada se curve na direção em que aumenta a densidade. Tais variações resultam basicamente de mudanças na temperatura do ar. A figura 3 ilustra a influência da refração em um lance equilibrado, ou seja, visadas iguais.

Sabe-se que o erro causado pela refração aumenta proporcionalmente ao quadrado da distância da visada. Este erro pode então ser reduzido pelo encurtamento das distâncias de visada.

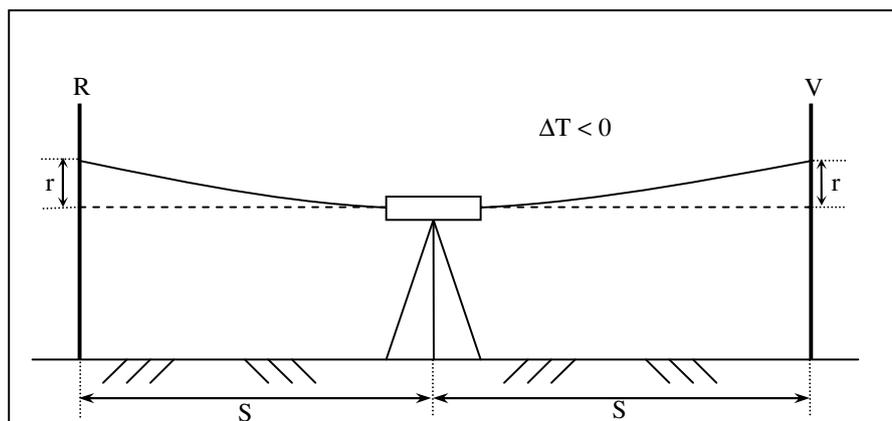


Figura 3 – Erro devido à refração num lance de visadas iguais
(Fonte: KUKKAMAKI, 1979)

Admitindo que as condições atmosféricas sejam as mesmas nas visadas de ré e de vante, consegue-se eliminar aproximadamente o erro em lances equilibrados. Entretanto, as condições atmosféricas são normalmente diferentes nas visadas de ré e de vante. O ar situado próximo ao chão muda de densidade mais rapidamente que o ar situado mais acima, o que pode ser visualizado imaginando-se camadas de ar de igual densidade acompanhando a superfície terrestre. Em terrenos inclinados, a visada na direção do aclave sofre uma refração maior mesmo em lances equilibrados, conforme mostra a figura 4.

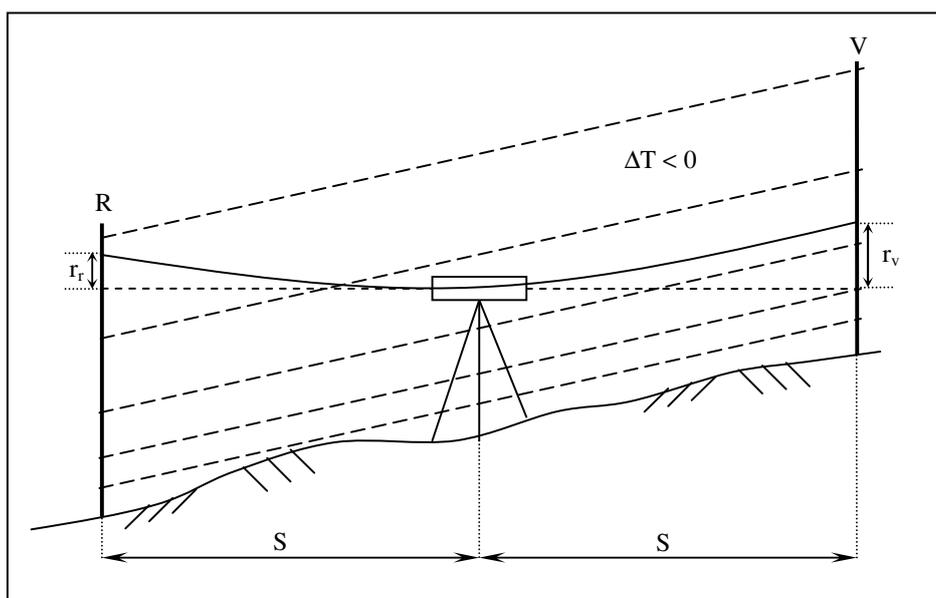


Figura 4 – Acúmulo do erro de refração (fonte: KUKKAMAKI, 1979)

Quando a linha de visada passa muito próxima ao solo, as mudanças na densidade do ar fazem com que ela se refrate imprevisivelmente. Por isso, os níveis devem ser posicionados de modo que sempre haja uma separação maior que 50 centímetros entre as linhas de visada e a superfície terrestre.

Segundo Hou (1972), devido a forte dependência entre os efeitos da refração e as variações de temperatura, é interessante comentar o comportamento da temperatura nas camadas inferiores da atmosfera. À noite, o solo é mais frio que o ar, fazendo com que a temperatura do ar cresça com a altura acima do solo pelo menos nos três primeiros metros: o gradiente vertical da temperatura é, então, positivo. Logo após o nascer do Sol, a temperatura passa a decrescer com a altura e o gradiente vertical torna-se negativo. Seu valor absoluto cresce até um limite que ocorre entre 13 e 15 horas, passando a diminuir até atingir zero, um pouco antes do pôr do Sol. Os valores absolutos do gradiente vertical são tanto maiores quanto mais limpo estiver o céu, quer seja dia quer seja noite. A figura 5 mostra a variação diurna do gradiente vertical da temperatura.

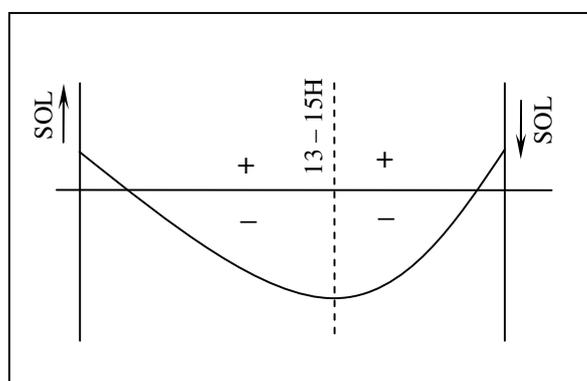


Figura 5 – Variação diurna do gradiente vertical da temperatura
(Fonte: HOU, 1972)

4.3.1.2 Colimação imperfeita do nível

O nível utilizado no nivelamento geométrico deve proporcionar uma linha de visada horizontal. Para tanto a linha de visada deve ser perpendicular à direção do vetor gravidade no ponto em que o nível está instalado. Na prática, devido a uma imperfeição

sistemática no processo de materialização da horizontalidade da linha de visada, esta última não assume rigorosamente a posição horizontal. O erro de colimação vem a ser a defasagem angular entre a linha de visada real e a horizontal. A figura 6 mostra o efeito do erro de colimação em uma leitura feita numa mira.

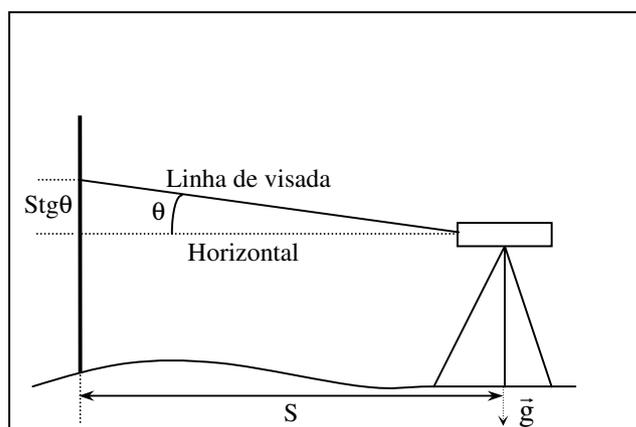


Figura 6 – Efeito do erro de colimação

Uma precaução óbvia para a diminuição do efeito do erro de colimação é a redução da distância de visada S . O ângulo θ deve ser medido antes da realização de qualquer trabalho e, se necessário, deve ser ajustado a uma determinada especificação. Para lances equilibrados, em que as distâncias de visada de ré e de vante são iguais, os erros de colimação cancelam-se quando da leitura de ré é subtraída a leitura de vante. Como é impossível equilibrar todos os lances, a contribuição total do erro de colimação pode ser limitada pela manutenção de um desequilíbrio (diferença entre as distâncias de visada de ré e de vante num determinado lance) pequeno com características acidentais (alternância de sinal). Havendo acúmulo sistemático, as correções de colimação devem ser aplicadas. Tais correções são calculadas a partir do desequilíbrio das visadas e de um valor determinado a priori para o ângulo θ . A Figura 7 ilustra a quantidade a ser introduzida como correção ao desnível associado a um lance.

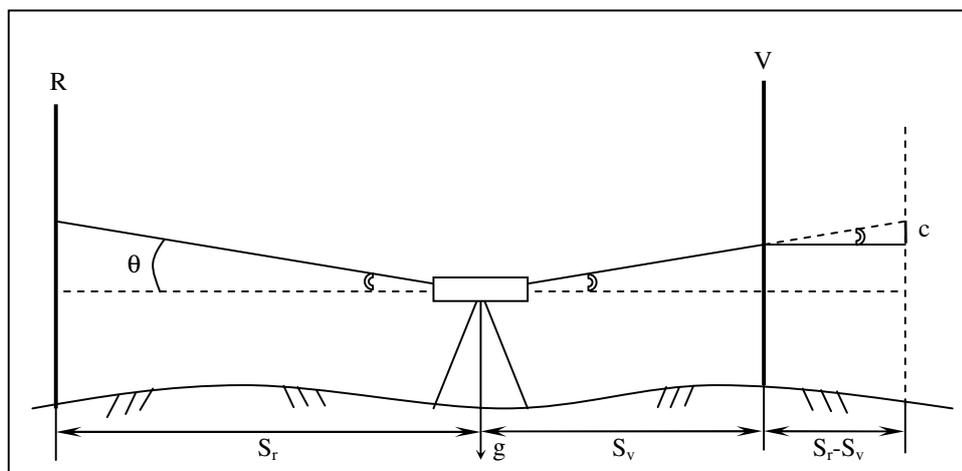


Figura 7 – Correção de colimação para um lance.

Verifica-se que, para um lance isolado a correção de colimação é dada por:

$$C = -\text{tg}\theta \cdot (S_r - S_v) = -\text{tg}\theta \cdot \Delta S \quad (34)$$

onde S_r e S_v denotam, respectivamente, as distâncias de visada de ré e de vante. Na realidade, aplica-se a correção do desnível resultante para a seção através da expressão:

$$C_s = -\text{tg}\theta \cdot \sum(\Delta S) \quad (35)$$

sendo $\sum(\Delta S)$ a soma algébrica dos desequilíbrios de todos os lances que formam a seção. A correção C_s é adicionada ao desnível da seção.

Para um nível bem projetado e sujeito a uma manutenção criteriosa, o erro de colimação não deve se alterar quando o instrumento é refocalizado ou girado em torno de seu eixo vertical.

4.3.1.3 Verticalidade imperfeita da mira

Para assegurar bons resultados ao nivelamento geométrico, há que se manter um relacionamento preciso entre as miras e as superfícies equipotenciais que passam nas estações de mira. Este relacionamento consiste no alinhamento das miras com a direção do vetor gravidade em cada estação de mira. Não havendo alinhamento, ou seja, não havendo

verticalidade, um erro é introduzido em cada observação. Este efeito está ilustrado na Figura 8.

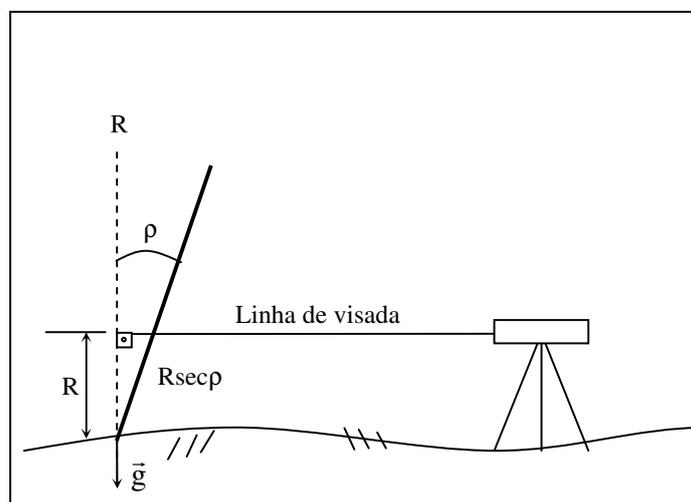


Figura 8 – Efeito do erro de verticalidade.

Embora possa ser mantido pequeno para miras dotadas de níveis de bolha esféricos, este erro acumula-se sistematicamente com a variação de altitude, especialmente em terrenos com inclinação muito acentuada, caso em que as leituras são feitas alternadamente nas partes alta e baixa das escalas.

A não realização de leituras na parte alta das escalas é uma medida que reduz o efeito do erro de verticalidade, muito embora isto nem sempre possa ser feito. A precaução básica é a centragem correta da bolha do nível esférico. No caso de ser utilizada uma mira que possui preso em sua parte superior uma par de hastes metálicas extensíveis, a tarefa de manter a verticalidade durante o lance torna-se mais fácil.

O mecanismo que prende as hastes metálicas à mira deve permitir que esta gire livremente em torno de seu eixo vertical. Para posicionar corretamente a mira, as hastes metálicas devem ser ajustadas até que a bolha do nível esférico assuma a posição central. Dá-se, então, um giro completo na mira. Se a operação anterior foi bem realizada, a posição da bolha não deve se alterar de mais que 1 ou 2 mm. Deste modo garante-se um ângulo ρ que atende às prescrições normalmente adotadas.

4.3.1.4 Aferição imperfeita da mira

Para que as correções devido ao erro de graduação e à dilatação térmica possam ser aplicadas, deve-se conhecer o coeficiente de dilatação térmica e o comportamento do erro de graduação associado a cada mira. Por isso, as miras devem se sujeitar a um rigoroso processo de aferição. Sugere-se que as miras sejam aferidas antes de serem utilizadas pela primeira vez e a cada intervalo de um ano de uso (SCHOMAKER & BERRY, 1981).

A aferição de uma mira consiste na medição precisa de pelo menos quatro intervalos da escala graduada. O National Geodetic Survey (NGS) dos Estados Unidos utiliza intervalos entre a base da mira e as graduações 0,2; 1; 2 e 3m e um interferômetro a laser para medição dos respectivos intervalos.

Ainda segundo o mesmo autor, uma aferição efetuada no laboratório permite a avaliação das correções devido aos erros de índice e de escala. Inicialmente são calculadas as diferenças entre os comprimentos medidos ou aferidos e os observados; estas diferenças representam os simétricos dos erros de graduação, ou seja, as correções de graduação. Estas correções são então plotadas num gráfico em função dos comprimentos observados (ver Figura 9).

Faz-se uma regressão linear (ajusta-se, por mínimos quadrados, uma reta a um conjunto de pontos plotados no plano definido por um par de eixos cartesianos) sobre o conjunto dos pontos que aparecem no gráfico. A interseção da reta resultante com o eixo das correções de graduação fornece a correção devido ao erro de índice, e a tangente do ângulo formado pela tal reta com o eixo dos comprimentos observados proporciona a correção devido ao erro de escala.

Em termos teóricos, é conveniente determinar um erro de graduação individual, isto é, um erro associado a cada graduação da escala. Isto, porém, implicaria num processo de aferição bem mais complexo, pois teriam que ser avaliadas as posições corretas de todas as graduações. Na prática acaba por prevalecer um esquema de aferição semelhante ao que está ilustrado na figura 9. A reta obtida através da regressão permite que seja analisado o comportamento da correção da graduação para qualquer intervalo da escala, sendo possível

eleger um valor médio de correção por intervalo de metro. Diz-se, então, que a mira apresenta um comprimento real de $1m - \epsilon_1$, sendo $(-\epsilon_1)$ a correção de graduação por metro.

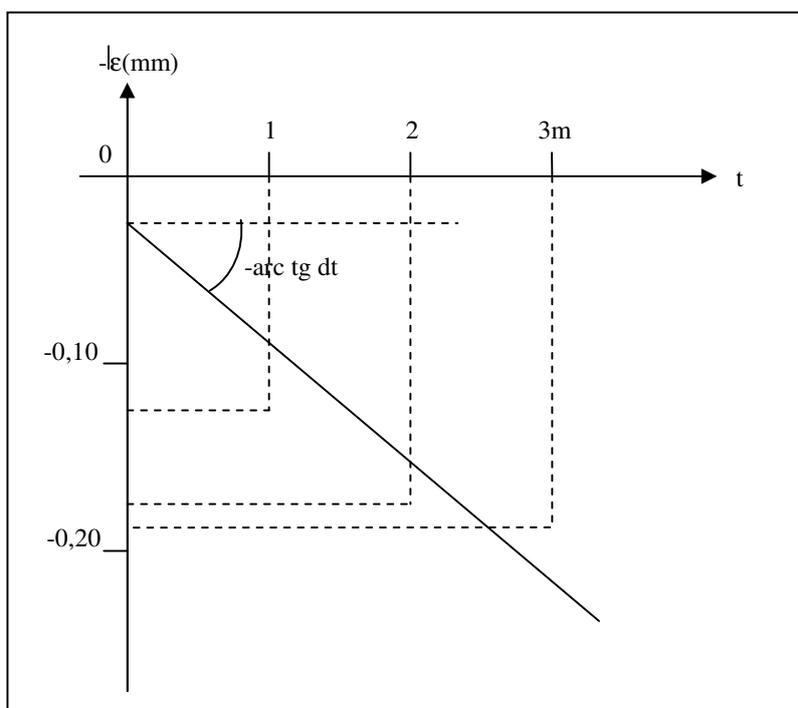


Figura 9 – Gráfico resultante da aferição de uma mira
(Fonte: SCHOMAKER & BERRY, 1981)

Os valores de ϵ_1 e de d_o para cada mira são os parâmetros efetivamente utilizados para a obtenção das correções devido aos erros de graduação e de índice. Tais correções são normalmente aplicadas aos desníveis das seções de nivelamento. Denotando estas correções por c_ϵ , tem-se para uma determinada seção, a seguinte expressão (SCHOMAKER & BERRY, 1981):

$$c_\epsilon = (-\bar{\epsilon}_1)\Delta\ell - \Delta d_o \quad (36)$$

Na equação (36) $(-\bar{\epsilon}_1)$ é o valor médio da correção de graduação por metro para o par de miras utilizado, $\Delta\ell$ é o desnível da seção e Δd_o é a diferença entre os erros de índice das miras que ocupam, respectivamente, as RN de partida e de chegada. Como foi dito, Δd_o é nulo para uma seção formada por um número par de lances. A correção c_ϵ é adicionada ao desnível de seção.

Uma única aferição para cada mira não permite que seja avaliado o coeficiente de dilatação térmica. Por isso, deve-se realizar um conjunto de, pelo menos, quatro aferições, cada uma numa temperatura diferente no intervalo de 15 a 35°C. As variações sofridas pelas graduações aferidas devido às mudanças na temperatura proporcionam o cálculo do coeficiente de dilatação térmica. Este conjunto de aferição deve ser realizado em intervalos de cinco anos (SCHOMAKER & BERRY, 1981),

Na prática, normalmente a temperatura de 20°C é adotada como padrão, sendo o coeficiente de dilatação térmica à ela referida. A correção da dilatação térmica costuma ser aplicada ao desnível de uma seção e é calculada pela fórmula:

$$c_t = \bar{\alpha}_t (\bar{T} - T_a) \Delta\ell \quad (37)$$

Na equação (37) $\bar{\alpha}_t$ é o coeficiente de dilatação térmica médio para o par de miras, \bar{T} é o valor médio das temperaturas observadas para as escalas das miras, T_a é a temperatura de aferição e $\Delta\ell$ o desnível da seção. A correção c_t deve ser somada ao desnível $\Delta\ell$.

É importante chamar a atenção para o problema da obtenção das temperaturas das escalas das miras durante os trabalhos de nivelamento. É errôneo imaginar que o simples registro das variações da temperatura do ar permite avaliar a temperatura média das escalas das miras. Discrepâncias da ordem de 7°C podem ser encontradas entre as temperaturas das escalas de invar e a do ar.

4.3.1.5 Marés terrestres

Após ter sido considerado o problema do erro de curvatura, os desníveis associados aos vários lances que compõem uma seção ficam referidos aos geopes que passam pelas posições ocupadas pelo nível. Contudo, o Sol e a Lua criam acelerações de maré (que significa um fenômeno de deformação sobre pontos no interior ou na superfície da Terra causado por variações nos potenciais gravitacionais dos outros corpos celeste; excetuando o Sol e a Lua, a influência dos demais é negligenciada) que perturbam periodicamente esses geopes.

Tais perturbações são representadas, em cada ponto, por uma deflexão. A componente vertical da deflexão afeta somente o valor da gravidade ao longo do caminho seguido, o que, na prática, não afeta o desnível observado. A componente horizontal, por sua vez, introduz um pequeno erro, dado pela inclinação sofrida pelo vetor gravidade e, conseqüentemente, pelos geopes.

Como o efeito das acelerações de maré é inicialmente uma função do tempo e da direção seguida pelo nivelamento, ele não pode ser reduzido por procedimentos de campo. Embora este efeito seja muito pequeno (valor máximo da ordem de 0,1 mm/km), deve-se aplicar uma correção a cada seção componente de linhas de nivelamento que se estendem por grandes áreas. Tal correção, esquematizada na figura 10, é denominada correção astronômica (CA).

A correção astronômica é calculada a partir da data, da hora, das posições geográficas aproximadas das referências de nível que definem a seção e de um valor médio da gravidade para a região. Com a data, a hora e o valor médio da gravidade são calculados os azimutes, as distâncias zenitais e as correspondentes deflexões (η) causadas pelos componentes horizontais das acelerações de maré atribuídas ao Sol e à Lua. Com as posições geográficas das referências de nível, são calculados o comprimento e o azimute da seção. As correções astronômicas são aplicadas separadamente ao nivelamento e ao contranivelamento, pois estes são conduzidos em horários distintos (HEISKANEN & MORITZ, 1967).

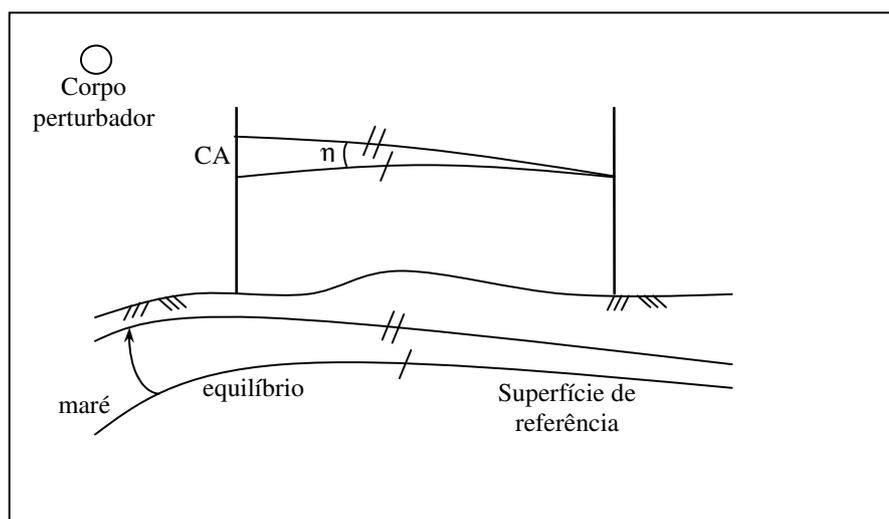


Figura 10 – Correção astronômica (Fonte: BALAZS e YOUNG, 1982)

As fórmulas básicas para a obtenção da correção astronômica são (BALAZS e YOUNG, 1982); (LONGMAN, 1959):

$$CA = 0,7S_s [\operatorname{tg}\eta_L \cos(A_L - A) + \operatorname{tg}\eta_s \cos(A_s - A)] \quad (38)$$

$$\eta_L = \left[3GM_L r \operatorname{sen} 2z_L / 2d^3 + 3GM_L r^2 (5 \cos^2 z_L - 1) \operatorname{sen} z_L / 2d^4 \right] / g_M \quad (39)$$

$$\eta_s = (3GM_s r \operatorname{sen} 2z_s / 2D^3) / g_M \quad (40)$$

Os parâmetros astronômicos são obtidos no Astronomical Almanac (U. S. Naval Observatory) que comparecem às equações (38), (39) e (40) têm os seguintes significados:

S_s – comprimento da seção;

η_L – deflexão causada pela componente horizontal da aceleração da maré atribuída à Lua;

η_s – deflexão causada pela componente horizontal da aceleração da maré atribuída ao Sol;

A_L – azimute da Lua;

A_s – azimute do Sol;

A – Azimute da seção;

G – constante newtoniana da gravitação;

M_L – massa da Lua;

M_s – massa do Sol;

z_L – distância zenital da Lua;

z_s – distância zenital do Sol;

d – distância entre os centros da Terra e da Lua;

D – Distância entre os centros da Terra e do Sol;

r – distância entre o ponto da superfície terrestre e o centro da Terra; e

g_m – valor médio da gravidade para a região.

Na equação (38) nota-se que o efeito das marés terrestres é mais preponderante quando o azimute do astro perturbador coincide com o azimute da seção. A correção é positiva quando a referência de nível final situa-se ao norte da inicial, pois os azimutes são contados no sentido horário a partir do sul. O fator multiplicativo 0,7 introduz

uma redução na correção astronômica justificada pelas características elásticas da crosta terrestre (SCHOMAKER e BERRY, 1981).

4.4 Gravimetria

A realização de uma rede geodésica de altitudes necessita do conhecimento dos valores da gravidade nas RRNN (referências e nível) que compõem a rede altimétrica. Tais valores são essenciais para a obtenção dos números geopotenciais, que são a base de qualquer sistema de altitudes. As operações gravimétricas de campo são bem menos dispendiosas e mais rápidas do que os procedimentos envolvidos no nivelamento geométrico de uma linha. O pequeno acréscimo no custo total dos levantamentos necessários ao estabelecimento de uma rede altimétrica, resultante da inclusão da gravimetria na sua rotina, é compensado pelo benefício da realização de um sistema de altitudes unívoco, que não pode ser alcançado apenas com o nivelamento geométrico. Neste item serão resumidos os principais aspectos relacionados com as atividades gravimétricas necessárias á consecução dos objetivos deste trabalho.

4.4.1 Campo da gravidade terrestre

4.4.1.1 Gravidade

As medições gravimétricas, normalmente são feitas na superfície física da Terra, ou acima dela. Os resultados dessas medições estão sujeitos, portanto, aos efeitos da força física que atuam naquele espaço físico. Dentre estas forças destaca-se, notavelmente, a gravidade. Assim, os aspectos geométricos do campo de gravidade ocupam relevante posição nos estudos dos fenômenos geodésicos, mormente da altitude.

A lei da gravitação universal estabelece que todos os corpos atraem-se mutuamente com uma força cuja intensidade é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Para duas massas pontuais, M e m, a lei da gravitação pode ser escrita da seguinte forma:

$$f^g = GMm/r^2 \quad (41)$$

onde, f^g é a intensidade da força gravitacional, M e m são massas pontuais interativas, concentradas em volume negligenciável em comparação com a distância r , entre elas e G é um coeficiente de proporcionalidade, conhecido como constante de gravitação, cujo valor numérico no sistema CGS é de $6,672 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, com precisão estimada de $0,001 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ e, no SI, é de $6,672 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, adotada pela União Astronômica Internacional em 1976 (VANICEK e KRAKIWSKY, 1986).

Embora a atração gravitacional entre duas massas seja mútua, na prática, é usual distinguir-se dentre elas a atraída e a atrativa. Assim, se m é atraída por M , composta de várias partículas, a equação (41) pode ser escrita como a soma das atrações exercidas sobre m pelas partículas de M . Quando a massa M é contínua, as massas consideradas sobre o volume total, v , do corpo são integradas, em vez de serem somadas. Então a seguinte equação vetorial pode ser escrita:

$$f^g = -GM \int_v (dM/r^2)(r/r) \quad (42)$$

onde os vetores são representados em negrito e $dM = \rho dv$, sendo ρ a massa específica do corpo.

Esta equação pode ser usada para estudar a força gravitacional exercida pela Terra sobre corpos cujas dimensões possam ser consideradas negligenciáveis em comparação com a da Terra.

Além da força gravitacional, outra força atua sobre as massas vinculadas à Terra, como consequência de seu movimento de rotação. Se considerarmos uma rotação com velocidade angular constante ω , com um raio de rotação \mathbf{p} , em torno de um eixo considerado fixo em relação à Terra (Figura 11), esta força, chamada de força centrífuga, é dada por:

$$f^c = \rho \omega^2 m \quad (43)$$

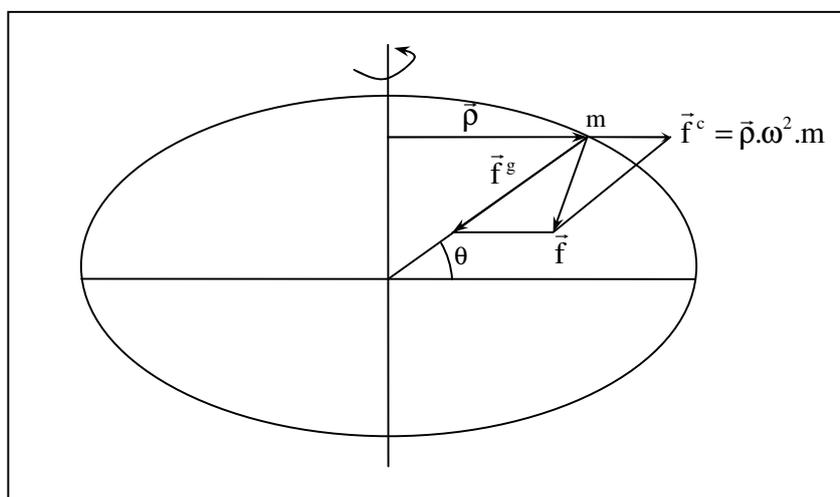


Figura 11 – Componentes da força de gravidade

A resultante entre as forças gravitacional e centrífuga constitui o que é conhecido como força da gravidade, ou seja,

$$f = f^g + f^c$$

ou

$$f = \left[-G \int (1/r^2) (r/r) dM + \rho \omega^2 \right] m \quad (44)$$

Pode-se dizer que a massa M da Terra produz um efeito físico no espaço em torno de si, comumente chamado de campo da gravidade, percebido através da força exercida sobre outra massa m , situada nessa região.

O *campo da gravidade* g , normalmente chamado apenas *gravidade*, produzido pela Terra em um determinado ponto, pode ser definido como a força exercida na unidade de massa colocada naquele ponto. Então,

$$g = -G \int_{\nu} (1/r^2) (r/r) dm + \rho \omega^2 \quad (45)$$

cuja intensidade, negligenciando a pequena diferença de direção entre a resultante e a componente gravitacional, face à pequena intensidade da componente centrífuga, é dada por:

$$g = G \int_{\nu} (1/r^2) dM - \rho \omega^2 \cos \phi \quad (46)$$

onde ϕ é a latitude geocêntrica.

No SI (Sistema Internacional de medidas) a intensidade do campo da gravidade é medida em N.kg^{-1} ou m.s^{-2} e equivale, dimensionalmente, a uma aceleração. No sistema CGS (Centr metro, Grama, Segundo) a gravidade   medida em cm.s^{-2} , também chamada de gal em homenagem a Galileu. Entretanto, nas medidas gravimétricas a unidade básica adotada é o miligal (mGal) que é a milésima parte do gal. Assim,

$$1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m.s}^{-2}$$

e

$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$$

A intensidade da gravidade na superfície da Terra varia entre aproximadamente 978 gals no equador e 983 gals nos p los, isto é, num intervalo de 5 gals. Considerando o valor de $\omega = 72,92115 \times 10^{-6} \text{ rd.s}^{-1}$, a componente centrífuga   cerca de 1/288 do valor total da força da gravidade e varia de zero nos p los a 3,4 gals no equador. Apesar de sua pequena intensidade, se comparada com a componente gravitacional, a componente centrífuga atua como a causa básica da varia o da gravidade na superfície da Terra. O achatamento nas regiões polares também contribui para esse efeito, aumentando da mesma forma o valor da gravidade nos p los.

4.4.1.2 Potencial da gravidade

Segundo Vanicek e Krakiwsky (1986), sabe-se que o campo da gravidade é conservativo e que, portanto, possui um correspondente potencial escalar $W = W(x, y, z)$, tal que

$$\mathbf{g} = \text{grad } W.$$

Esse escalar é conhecido como potencial da gravidade e pode ser definido como a energia potencial por unidade de massa colocada no campo da gravidade. O potencial da gravidade   então expresso em J.kg^{-1} ou $\text{m}^2.\text{s}^{-2}$.

O potencial da gravidade da Terra, também chamado geopotencial, pode ser escrito como a soma do potencial gravitacional W^g com o potencial centrífugo W^c . Assim, para

$$W^g = G \int_v (1/r) dM \quad (47)$$

e

$$W^c = (1/2)\rho^2\omega^2 \quad (48)$$

e

$$W = W^g + W^c$$

e

$$g = \text{grad}(W^g + W^c) = \text{grad } W^g + \text{grad } W^c \quad (49)$$

Ainda segundo o mesmo autor, é importante observar que o potencial centrífugo age somente sobre os corpos ou partículas vinculadas à Terra, incluindo a atmosfera. Assim, corpos que não giram com a Terra estão isentos do potencial centrífugo W^c , estando sujeitos apenas ao potencial gravitacional W^g , por exemplo, os satélites artificiais.

O incremento do geopotencial dW ao se fazer um deslocamento elementar $ds=(dx,dy,dz)$ em uma direção arbitrária no campo da gravidade é dado por:

$$dW = (\partial W/\partial x)dx + (\partial W/\partial y)dy + (\partial W/\partial z)dz$$

ou, considerando que pela equação (49),

$$g = (\partial W/\partial x, \partial W/\partial y, \partial W/\partial z),$$

conclui-se que

$$W = g \cdot ds \quad (50)$$

donde se obtém:

$$dW = g \cdot ds \cdot \cos(g, s)$$

ou

$$dW/ds = g \cdot \cos(g, s) \quad (51)$$

ou, ainda,

$$dW/ds = g_s$$

que é a componente da gravidade segundo a direção do deslocamento ds .

4.4.2 Sentido físico do potencial da gravidade

A equação (50) mostra que o incremento do geopotencial é zero se o vetor deslocamento ds for perpendicular à direção do vetor g . Neste caso,

$$dW = 0$$

e

$$W = \text{constante} = C \quad (52)$$

Esta é a equação de uma superfície em relação à qual a gravidade é sempre normal. Tal superfície é chamada de superfície de nível ou superfície equipotencial do campo da gravidade ou, simplesmente, *geope*, devido à constância do potencial nela.

Atribuindo valores diferentes à constante em (52) obtém-se uma família de superfícies equipotenciais que têm a propriedade de não se tocarem. Caso isso acontecesse, as duas superfícies teriam o mesmo potencial C no ponto comum, e, de acordo com (52), isso significaria que todos os pontos de ambas as superfícies teriam o mesmo potencial C , isto é, as superfícies seriam totalmente coincidentes.

Devido à distribuição irregular de massa na Terra, os geopes possuem pequenas, porém, significantes irregularidades. Seus raios de curvatura variam irregularmente de ponto para ponto, provocando torções nas linhas de forças em todas as direções. Portanto, a vertical não é uma curva plana, mas reversa (VANICEK & KRAKIWSKY, 1986).

A equação (51) mostra que a derivada da função potencial em relação a qualquer direção é igual à componente da força segundo essa direção. Quando uma massa pontual se desloca ao longo da linha de ação da gravidade, porém, em sentido contrário, então $\cos(g, s) = -1$ e

$$dH = -dW/g \quad (53)$$

onde dH é o deslocamento normal à superfície equipotencial, em sentido contrário ao da gravidade, e H é chamada de altitude ortométrica. Esta equação fornece a conexão entre uma quantidade física, diferença de potencial, e uma quantidade geométrica, diferença de altitude, de geopes vizinhos.

De acordo com a equação a distância entre duas superfícies equipotenciais infinitamente próximas é inversamente proporcional à intensidade do campo. Pode-se, portanto, concluir que as superfícies equipotenciais estão mais próximas quanto maior for a intensidade da gravidade. Assim, os esferopes estão mais próximos nos pólos do que no equador.

Como o incremento dW do potencial é constante na transferência de uma superfície para outra, não dependendo da posição do ponto na mesma, também não dependerá da trajetória seguida pelo ponto em seu deslocamento; será apenas função dos

pontos extremos do percurso. Donde se conclui que o incremento do potencial dW em um circuito fechado é igual a zero.

O geope mais notável é o geóide, do qual faria parte a superfície dos oceanos, caso estes não estivessem sujeitos à ação das marés, ventos, correntes e outros fenômenos relacionados com a sua dinâmica. Portanto, compreende-se por geóide uma superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre, coincidente com o nível imperturbado dos oceanos e que se prolonga sob os continentes de modo tal que a direção da gravidade lhe é perpendicular em todos os seus pontos. O geóide é uma superfície contínua e levemente ondulada, mas não é uma superfície analítica, sua curvatura varia descontinuamente com a densidade no interior da Terra (HEISKANEN e MORITZ, 1967). Portanto, a forma do geóide, como também de qualquer geope, é resultado da distribuição de massa na Terra.

Para pontos situados no exterior ou na superfície da Terra é válida a equação diferencial generalizada de Laplace:

$$\Delta W = \partial^2 W / \partial x^2 + \partial^2 W / \partial y^2 + \partial^2 W / \partial z^2 = \omega^2 \quad (54)$$

onde Δ é o operador laplaciano.

No interior da Terra, o geopotencial W satisfaz a equação diferencial generalizada de Poisson (DEHLINGER, 1978):

$$\Delta W = 4\pi G\rho + 2\omega^2 \quad (55)$$

onde ρ é a massa específica no ponto considerado. No espaço exterior ($\rho=0$, negligenciando a massa específica do ar) a equação de Poisson iguala-se à de Laplace.

Em um sistema de coordenadas locais xyz , cujo eixo z é vertical e os eixos x e y são tangentes ao geope no ponto P , origem do sistema, a curvatura média J do geope em P é definida por (HEISKANEN e MORITZ, 1967):

$$J = -(W_{xx} + W_{yy})/2g \quad (56)$$

Onde os subscritos denotam derivada parcial:

$$W_{xx} = \partial^2 W / \partial x^2 \quad \text{e} \quad W_{yy} = \partial^2 W / \partial y^2$$

A equação (51), para $s=z$, permite concluir que

$$\partial g / \partial z = -W_{zz}, \text{ já que } \cos(g,z) = -1.$$

Combinando-se a equação diferencial generalizada de Poisson (55) com a (56), obtém-se a relação:

$$J = -(\Delta W - W_{zz})/2g$$

ou

$$-W_{zz} = -2gJ - \Delta W$$

que, considerando $W_z = -g$ e $W_{zz} = -\partial g/\partial z = -\partial g/\partial H$, resulta:

$$\partial g/\partial H = -2gJ + 4\pi G\rho - 2\omega^2 \quad (57)$$

que é a relação entre a variação vertical da gravidade e a curvatura média do geope.

4.5 Anomalia da gravidade

Segundo Vaniceck e Krakiwsky (1986), a determinação da gravidade normalmente é feita na superfície física da Terra, algumas vezes subterrânea ou subaquática. Os valores observados dependem, principalmente, da localização do ponto na superfície da Terra (isto é, de suas coordenadas horizontais e altitude) e, em menor grau, da topografia circundante e da distribuição de massa no subsolo. Desse modo, tais valores não podem ser comparados entre si na forma como são obtidos. Estas irregularidades do campo da gravidade, embora significativas e facilmente observadas, são pequenas se comparadas com a magnitude da própria gravidade. Portanto, para melhor analisá-las é conveniente dividir o campo da gravidade em duas partes, uma que varia regularmente, refletindo uma forma ideal da Terra, representada por um modelo, e outra que varia irregularmente, chamada de anomalia.

A parte que varia regularmente corresponde ao campo da gravidade gerado por um elipsóide de revolução, com ligeiro achatamento polar, dotado de movimento de rotação em torno de seu eixo menor, coincidente com o eixo principal de inércia polar da Terra, com massa e velocidade angular iguais às desta, cuja superfície limitante possui esferopotencial constante, igual ao geopotencial do geóide. Esta terra fictícia, denominada Terra Normal é geradora do campo da gravidade normal, cuja intensidade é denotada por γ . O potencial da gravidade da terra normal é chamado de esferopotencial, normalmente representada pela letra U. A superfície equipotencial do campo da gravidade da terra normal é comumente chamada de esferope.

O valor de γ depende da distância ao centro da massa da Terra e da latitude ϕ . Por ser dotado de simetria rotacional, seu valor independe da longitude. O valor da gravidade normal na superfície do elipsóide de referência é geralmente denotado por γ_0 .

Ainda segundo o mesmo autor, procurando unificar mundialmente a definição de gravidade normal, a IAG (International Association of Geodesy) adotou em 1930, em Estocolmo, a fórmula:

$$\gamma_0 = 978049,0(1 + 0,0052884 \text{ sen}^2\phi - 0,0000059 \text{ sen}^2 2\phi)\text{mGal} \quad (58)$$

Recomendando o seu uso para todos os trabalhos gravimétricos. Esta fórmula tornou-se conhecida como “fórmula internacional da gravidade”. Em 1967, a Assembléia Geral da IAG aprovou novos parâmetros para o elipsóide de referência, cuja gravidade normal é expressa pela fórmula:

$$\gamma_0 = 978031,85(1 + 0,005278895 \text{ sen}^2\phi + 0,000023462 \text{ sen}^4\phi)\text{mGal} \quad (59)$$

ou, equivalentemente,

$$\gamma_0 = 978031,85(1 + 0,0053024 \text{ sen}^2\phi + 0,0000059 \text{ sen}^2 2\phi)\text{mGal}$$

com precisão de $4\mu\text{Gal}$. A equação (59) foi chamada de “fórmula internacional da gravidade 1967”. A fórmula da gravidade normal mais recentemente adotada pela IAG é a “fórmula internacional da gravidade 1980”:

$$\gamma_0 = 978032,7(1 + 0,0052790414 \text{ sen}^2\phi + 0,0000232718 \text{ sen}^4\phi + 0,0000001262 \text{ sen}^6\phi)\text{mGal} \quad (60)$$

com precisão de $0,7\mu\text{Gal}$.

Tradicionalmente, a anomalia, Δg , é definida como a diferença entre o valor da gravidade na superfície do geóide, g_o , e o valor da gravidade normal no elipsóide, γ_0 :

$$\Delta g = g_o - \gamma_0$$

Esta definição de anomalia atende aos objetivos geodésicos, visto que a aplicação da integral de Stokes, utilizada na determinação da altura geoidal (N), pressupõe a inexistência de massas exteriores ao geóide.

Como a gravidade é observada na superfície física da Terra, ponto A da figura 12, para a obtenção da anomalia é necessário reduzi-la para a superfície do geóide. Esta operação é conhecida como redução dos valores da gravidade. Para tanto a distância AO entre o ponto na superfície física e o geóide, como também a lei de variação do valor da gravidade real neste trajeto, devem ser conhecidas. Visto que a variação do valor da gravidade sobre AO é função da distribuição de massa no interior da Terra e, portanto, não pode ser rigorosamente conhecida, a redução da gravidade é feita com base na variação da gravidade normal, o que preserva na anomalia o efeito daquela heterogênea distribuição.

Portanto, as magnitudes das anomalias dependem de:

- distribuição de massa no interior da Terra, principalmente na crosta; e
- altura geoidal N .

Assim, a partir do conhecimento das anomalias da gravidade sobre a superfície total da Terra, a altura do geóide em relação ao elipsóide pode ser determinada (a solução deste problema é considerada na Geodésia Física). Quando as medidas gravimétricas são utilizadas para fins geológicos, leva-se em conta a relação entre anomalias e distribuição de massa; a relação entre anomalia e altura geoidal é, então, negligenciada ou considerada na forma de pequenas correções. Como a variação na altura do geóide é pequena e gradual, o fator de correção aplicável varia muito pouco de ponto para ponto e na prática é considerado constante em áreas não muito extensas.

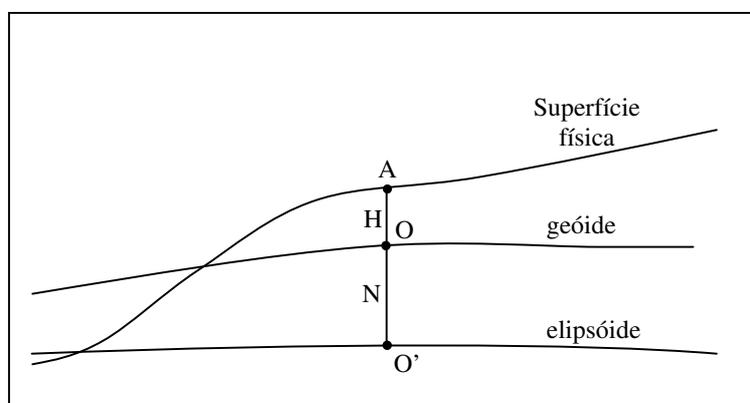


Figura 12 – Redução da gravidade (fonte: adaptado de TORGE, 2001)

Com as modernas técnicas de posicionamento por satélites, a determinação da altitude geométrica AO' , em muitos casos, se tornou mais acessível do que a determinação da altitude ortométrica AO . Assim, para objetivos geofísicos é mais prático e conveniente usar a altitude geométrica, que elimina o efeito da altura geoidal (N), reduzindo a gravidade observada para a superfície do elipsóide. Obviamente este procedimento não atende aos objetivos geodésicos.

Por outro lado, ao invés de utilizar a variação da gravidade normal com a altitude, para redução do valor da gravidade, poderia ser utilizada a variação da gravidade real, observada na superfície física. Este procedimento reduziria o efeito da distribuição de massa e seria conveniente para os objetivos geodésicos. Entretanto, isso não contempla os interesses geofísicos.

Assim, a definição inicial de anomalia atende, sem grandes prejuízos, aos objetivos geodésicos e geofísicos e, portanto, sempre que possível, deve ser adotada em benefício da homogeneização de sua definição.

4.5.1 Anomalia de ar livre (FREE AIR)

Segundo Vanicek e Krakiwsky (1986), para se obter uma anomalia deve-se reduzir o valor de g para o ponto O a uma profundidade H , como ilustra a Figura 13. Isso pode ser feito com auxílio de uma fórmula que correlaciona a variação da gravidade normal com a altitude:

$$\partial\gamma/\partial H = -2\gamma_0(1+m+2\alpha\cos^2\phi)/a \quad (61)$$

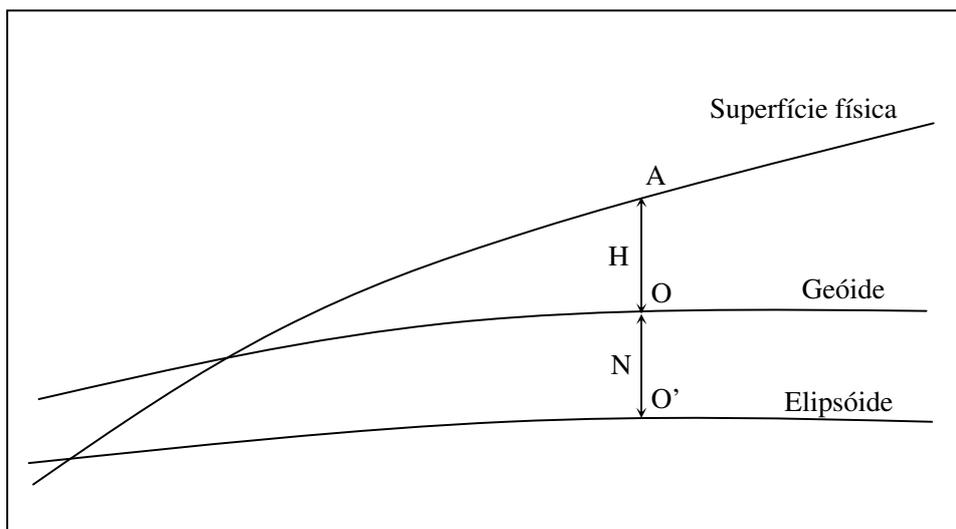


Figura 13 – Redução da gravidade (Fonte: VANICEK e KRAKIWSKY, 1986)

que expressa o valor da variação da gravidade normal com a altitude na superfície do elipsóide de referência.

Para o elipsóide de referência de 1967, achatamento $\alpha=0,0033529237$, razão entre a força centrífuga e a gravidade no equador $m=0,0034498014$ e $a=6378160\text{m}$, o valor de $\partial\gamma/\partial H$ para a latitude de 45° é:

$$\partial\gamma/\partial H = -0,30856\text{mGal/m}$$

Este valor, que não diferencia muito daqueles para o equador e os pólos, é normalmente utilizado para representar a chamada redução de ar livre (free air).

A fórmula para o cálculo da anomalia de ar livre pode, portanto, ser escrita como a diferença entre os valores da gravidade reduzida e normal, ou seja:

$$G_o = g + 0,3086H \quad (62)$$

e

$$\Delta g_a = g - \gamma_o + 0,3086H \quad (63)$$

Na redução de ar livre as massas situadas entre os níveis do ponto de observação e da superfície do geóide são ignoradas. Contudo a presença dessas massas aumenta o valor observado da gravidade g , o que aumenta o valor da anomalia. Esse efeito é particularmente percebido em montanhas onde a anomalia de ar livre para pontos localizados

nos cumes é sempre maior do que para pontos nos vales. Assim, a anomalia de ar livre, além de refletir os efeitos da altura geoidal e das diferenças de massa específica nas rochas situadas abaixo do ponto de observação, reflete também o efeito das massas externas, causado pelas diferenças nas altitudes dos pontos de observação. Para compensar esta indesejável correlação positiva que a anomalia de ar livre possui com a altitude, algumas correções devem ser adicionadas.

Existem diversos tipos de reduções que representam correções adicionais, com base em diferentes suposições acerca das massas internas e externas da Terra e seus efeitos.

De modo geral a anomalia da gravidade pode ser escrita na forma:

$$\Delta g = g - \gamma_0 + 0,3086H + \delta g$$

onde δg é uma correção que define a natureza específica da redução.

4.5.2 Correção do terreno

Segundo, Sazhina e Grushinsky (1972), a correção do terreno considera todas as formas de relevo de modo a reduzir o valor da gravidade em um determinado ponto àquele que seria obtido se a camada de massa fosse plana e uniforme abaixo do ponto considerado.

A presença de uma massa extra CDE como ilustra a figura 14, acima do ponto de observação originará uma força adicional dirigida para aquela massa. A componente vertical δg , dessa força reduzirá o valor de g . A lacuna de massa na região ABC também diminuirá o valor de g em relação ao valor que seria obtido se essa região fosse completamente cheia. Portanto, a correção do terreno é sempre positiva, tendendo para zero quando o terreno circunvizinho ao ponto de observação for pouco acidentado.

Ao avaliar o efeito do relevo é usual representar a área circunvizinha ao ponto de observação como prisma curvilíneo adjacente, limitados por circunferências concêntricas no ponto e por radiais ao mesmo. O efeito de cada prisma é calculado analiticamente considerando sua espessura constante. O efeito total do relevo é obtido pela soma dos efeitos individuais dos prismas.

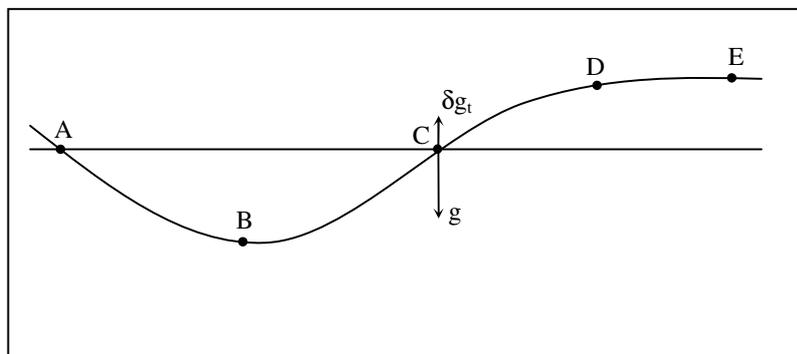


Figura 14 – Correção do terreno

A atração de um prisma corresponde à n -ésima parte do anel e é dada por (SAZHINA e GRUSHINSKY, 1972):

$$\delta g_t = 2\pi G\rho \left[(R_1^2 + \Delta H^2)^{\frac{1}{2}} - (R_2^2 + \Delta H^2)^{\frac{1}{2}} + R_2 - R_1 \right] / n \quad (64)$$

onde R_1 e R_2 são, respectivamente, os raios interno e externo do anel e ΔH é a altura do prisma.

Na prática, costuma-se empregar uma grade transparente que representa os prismas em planta por compartimentos em forma de trapézios curvilíneos, delimitados por circunferências concêntricas e radicais. Essa grade é superposta a um mapa topográfico de modo que seu centro coincida com o ponto em estudo. Para cada trapézio curvilíneo é extraída do mapa a sua altitude média. Subtraindo-se da altitude média de cada trapézio a latitude do ponto, obtém-se a altura ΔH do excesso ou falta de massa existente naquele compartimento, então a equação (64) fornece a correção para o prisma em questão. Este procedimento, estendido a todos os compartimentos, dá origem a um conjunto de correções que somadas resultam na correção do terreno para o ponto.

4.5.3 Anomalia Bouguer

A redução de Bouguer é adicionada à anomalia de ar livre de modo a corrigir o efeito da atração da camada de massa existente entre a superfície do geóide e a

altitude do ponto, camada essa representada por um disco homogêneo, de raio infinito e espessura constante H igual à altitude do ponto de observado. Tal correção é dada pela equação (GROTEN, 1980):

$$\delta g_b = -2\pi G\rho H \quad (65)$$

Substituindo π e G pelos seus valores e fazendo as adequadas conversões de unidades, obtém-se:

$$\delta g_b = -0,0419\rho H \quad (66)$$

onde δg_b é dada em mGal, para ρ em g/cm^3 e H em metros.

Essa é a expressão da correção de Bouguer propriamente dita que corrige o efeito da atração do platô de Bouguer. Tal efeito aproxima-se sensivelmente daquele produzido por uma calota de mesma espessura e raio esférico igual a 166,7 km. Para fins geofísicos é suficiente considerar apenas a correção de Bouguer propriamente dita associada à correção do terreno. Para fins geodésicos, entretanto, é incluído um terceiro termo com a função de converter o platô de Bouguer na calota mencionada. Assim, a anomalia de Bouguer é dada pela fórmula:

$$\Delta g_b = g - \gamma_o + 0,3086H - 0,0419\rho H + \delta g_t \quad (67)$$

Do ponto de vista da melhor representação do efeito das massas anômalas reveladas nas anomalias da gravidade, a anomalia de Bouguer apresenta vantagens sobre a anomalia de ar livre, particularmente em virtude da remoção do efeito da camada de massa entre o ponto de observação e o geóide. A dependência da anomalia Bouguer em relação à altitude é muito menor do que na anomalia de ar livre, o que significa que em regiões montanhosas a primeira varia mais suavemente do que a segunda. Esta última qualidade torna a anomalia de Bouguer mais indicada do que a de ar livre para interpolação de valores da gravidade. Alias esta talvez seja a utilidade mais relevante da anomalia de Bouguer para ao geodesta. Na maioria das vezes ela é apenas utilizada como etapa intermediária para a obtenção de outros tipos mais completos de anomalias que consideram o efeito das massas externas ao geóide até o antípoda (GEMAEL,1999).

4.6 Datum gravimétrico

Em geodésia é fundamental que os valores da gravidade estejam referidos a um sistema de referência global. O primeiro datum gravimétrico mundial foi o de Viena, adotado em 1900 e que vigorou até 1909, quando foi substituído pelo datum de Potsdam. Em ambos os casos o referencial era constituído de um único ponto onde o valor da gravidade foi determinado diretamente através de pêndulos. O datum de Potsdam vigorou até 1971, quando uma nova idéia foi concebida, segundo a qual a referência não é mais um único ponto mas uma rede internacional de estações gravimétricas distribuídas por diversos países. De acordo com esta nova concepção a Assembléia Geral da I.U.G.G (International Union of Geodesy and Geophysics), reunida em Moscou, adotou a “International Gravity Standardization Net” 1971 (IGSN71) como novo datum. A IGSN71 (International Gravity Standardization Net 1971) é o atual datum gravimétrico mundial, que contém 1854 estações, cujos valores de gravidade foram determinados com desvios padrão inferiores a 0,1 mGal, a partir do ajustamento de 10 medidas absolutas da gravidade, obtidas com gravímetros de queda livre e aproximadamente 24.000 medidas relativas (IAG, 2000).

4.6.1 Determinação da gravidade

Segundo Gemael (1999), a determinação do módulo do vetor gravidade determinado da tanto pelo método absoluto como pelo relativo. No método absoluto o valor da gravidade g é determinado diretamente em uma estação, enquanto no método relativo determinação requer a ocupação de duas estações e conduzem à diferença de g entre ambas.

4.6.1.1 Determinação absoluta da gravidade

Segundo Gemael (1999), o gravímetro de queda livre baseia-se no deslocamento de um corpo em queda livre no vácuo de acordo com a equação do movimento uniformemente acelerado:

$$z_i = z_0 + v_0(t_i - t_0) + g(t_i - t_0)^2/2 \quad (68)$$

onde z_i é a posição do corpo no instante t_i , z_0 e v_0 são, respectivamente, a posição e a velocidade no instante inicial t_0 .

O valor de g é determinado medindo-se z_i em diversos instantes t_i , por técnicas interferométricas combinadas com cronometragem eletrônica controlada por crista de quartzo. O caso de obtenção de um sistema superabundante, com redundância de observações, pode-se utilizar o método dos mínimos quadrados para a obtenção de g , t_0 , z_0 e v_0 .

4.6.1.2 Determinação relativa da gravidade

Segundo Gemael (1999), a determinação relativa da gravidade é feita com o uso de gravímetros diferenciais ou relativos. Devido a sua portabilidade e facilidade operacional, os gravímetros diferenciais são tão largamente usados que é comum associar-se o termo gravímetro a esse tipo de instrumento. Contudo, tais instrumentos não são capazes de medir diretamente a gravidade; medem somente a diferenças de gravidade entre pontos

De acordo com o tipo de sensor utilizado costuma-se distinguir dentre os gravímetros diferenciais os mecânicos e os supercondutores. Os gravímetros mecânicos são de longe os mais utilizados nos trabalhos geodésicos. Os supercondutores, até o presente momento, são usados apenas para medidas estacionárias relacionadas principalmente com os estudos de variações da gravidade.

Segundo Groten (1980) e Escobar (1985), os gravímetros mecânicos baseiam-se no princípio do dinamômetro, de acordo com a lei de Hooke. São constituídos basicamente de uma mola da qual pende uma massa, cujo peso varia com a gravidade. A variação do peso é compensada pela variação da tensão na mola, que por sua vez é proporcional à mudança no seu comprimento. Assim, a diferença de gravidade entre dois pontos pode ser determinada em função da variação do comprimento da mola.

Dentre os gravímetros mecânicos atualmente em uso destaca-se o LaCoste & Romberg, que na versão geodésica é capaz de medir diferenças de gravidade de amplitude até 7.000 mGal, com precisão melhor do que 0,05 mGal. Informações mais

minuciosas sobre os gravímetros, suas características e cuidados operacionais podem ser encontradas nas contribuições de GROTEN (1980) e ESCOBAR(1985).

4.6.2 Redes gravimétricas

Analogamente às redes altimétricas, geralmente os levantamentos gravimétricos são conduzidos em linhas, ao longo das principais rodovias, de modo a formar uma estrutura de rede. As redes gravimétricas são comumente divididas em categorias, de acordo com o rigor das prescrições técnicas obedecidas nos levantamentos. Assim, costuma-se designar por rede gravimétrica fundamental, básica, de 1ª ordem ou de alta precisão, àquela que é ligada diretamente ao datum mundial (IGSN71), extraído deste sua escala e origem e em cujo levantamento são obedecidas as prescrições adequadas (DMA, 1974).

As redes fundamentais são normalmente redes nacionais que visam tornar o referencial gravimétrico mais acessível no território de um país. No Brasil, estão sendo ultimados os esforços para o estabelecimento de rede gravimétrica fundamental brasileira, com a participação de algumas instituições, dentre as quais podem ser citadas: Observatório Nacional, Universidade Federal do Paraná e o Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (ESCOBAR, 1985).

Redes regionais, de 2ª ordem ou de adensamentos, são estabelecidas normalmente com objetivos específicos, como a realização de sistemas de altitudes, prospecção geofísica, entre outros. As prescrições, neste caso, são menos rigorosas e variam de acordo com o objetivo colimado.

4.7 Determinação da ondulação a partir do GPS/nivelamento

Para os usuários da área de Topografia e Geodésia, uma característica muito importante, do GPS, em relação aos tradicionais métodos de levantamento, é a não necessidade de intervisibilidade das estações. Além de poder ser usado sob quaisquer condições climáticas.

Segundo Arana (2000), ao lado das novas possibilidades proporcionadas pelo GPS, surgiram novas dificuldades. O uso do GPS em levantamento proporciona as coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z). Estas coordenadas podem ser transformadas em latitude, longitude e altitude geométrica. As componentes horizontais (X, Y) podem ser diretamente relacionadas a uma rede geodésica, contudo, a altitude geométrica necessita do conhecimento da ondulação do geóide para ser relacionada à altitude ortométrica, utilizada na maioria dos empreendimentos.

Na grande maioria dos trabalhos de posicionamento em obras de engenharia, levantamento geodésico e topográfico faz-se necessária a determinação da altitude ortométrica (altitude referenciada ao geóide). Surge então a necessidade de transformar a altitude geométrica obtida com o GPS, em altitude ortométrica. Esta transformação, do ponto de vista matemático, constitui-se numa operação simples, envolvendo a altitude geométrica e altura geoidal no ponto. Conforme se pode ver na figura 01, as altitudes ortométricas e geométricas estão relacionadas por:

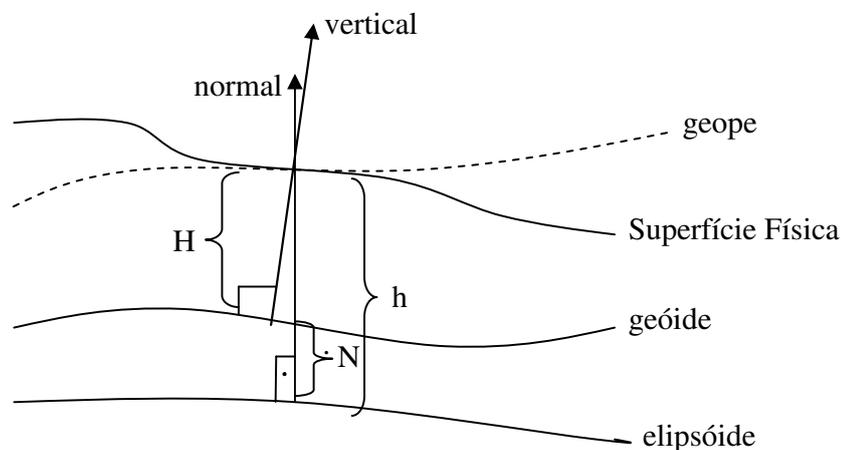


Figura 01- Altitudes geométrica e ortométrica (fonte Arana, 2000)

$$H \cong h - N \quad (69)$$

onde,

H - altitude ortométrica;

h - altitude geométrica; e

N - ondulação do geóide.

Ainda, segundo Arana (2000), a realização do rastreamento dos satélites do GPS sobre as referências de nível propicia a determinação da ondulação do geóide. Assim, em uma linha formada por duas referências de nível com altitudes geométricas conhecidas, pode-se interpolar a ondulação do geóide em pontos desta linha, ou próxima à mesma.

O sistema altimétrico brasileiro é realizado com a materialização de referências de nível que tendem a refletir o comportamento da superfície física em relação ao geóide. A origem altimétrica brasileira é a equipotencial do nível médio dos mares, registrado pelo marégrafo de Porto Henrique Lages, na cidade de Imbituba, litoral de Santa Catarina.

Para explorar as potencialidades do GPS na altimetria, faz-se necessário o conhecimento da altura geoidal, com precisão compatível ao levantamento proposto.

De acordo com Vanicek e Krakiwsky (1986), a altitude ortométrica é definida como a distância, contada ao longo da vertical, do geóide ao ponto pertencente à superfície física; e a altitude geométrica é definida como a distância, contada sobre a normal, da superfície do elipsóide de referência ao ponto; e a ondulação do geóide é definida como a distância, contada sobre a normal, da superfície do elipsóide à superfície do geóide

4.8 Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O GPS, ou NAVSTAR-GPS (NAVgation Satellite with Time And Ranging) é um sistema de radio-navegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América – DoD (Department of Defense), com o objetivo de ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas, proporcionando posicionamento tri-dimensional (SEEBER,1993).

O GPS foi concebido para ser um sistema de abrangência global, possibilitando ao usuário ter em qualquer local da superfície terrestre pelo menos quatro satélites disponíveis que possibilite o posicionamento em tempo real, sob quaisquer condições climáticas.

Segundo Monico (2000), em razão da alta acurácia proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frota, etc.).

Esse sistema tem facilitado todas as atividades que necessitam de posicionamento, fazendo que algumas concepções antigas pudessem ser postas em prática, como por exemplo, com o desenvolvimento da agricultura de precisão, que é um conceito estabelecido por volta de 1929.

O princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medida de distância entre o usuário e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites num sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. Neste caso, o problema se reduziria à solução de um sistema de três equações, a três incógnitas. A quarta medida é necessária em razão do não sincronismo entre os relógios dos satélites e o do usuário, adicionando uma incógnita ao problema.

No GPS há dois tipos de serviços, os quais são conhecidos como SPS (Standard Positioning Service – Serviço de Posicionamento Padrão) e PPS (Precise Positioning Service – Serviço de Posicionamento Preciso).

O SPS é um serviço de posicionamento e tempo padrão que está disponível a todos os usuários do globo, sem cobrança de qualquer taxa. Atualmente este serviço proporciona precisão no posicionamento da ordem de 10m e 15m, com nível de confiança de 95% em planimetria e altimetria, respectivamente.

O GPS na sua concepção é formado por três segmentos principais: espacial, controle e usuário.

4.8.1 Segmento espacial

Segundo Monico (2000), o segmento espacial consiste de 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, numa altitude de aproximadamente 20.200 km. Os planos orbitais são inclinados 55° em

relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Essa configuração garante que no mínimo quatro satélites GPS seja visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora.

Cada satélite carrega padrões de frequência altamente estáveis (césio e rubídio) com estabilidade entre 10^{-12} e 10^{-13} por dia, formando uma referência de tempo muito precisa.

4.8.1.1 Características dos sinais GPS

Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras: L1 e L2. Elas são geradas a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz, a qual é multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Dessa forma, têm-se as frequências (L) e os comprimentos de onda (λ) que são:

$$L1 = 1.575,42 \text{ MHz e } \lambda \cong 19 \text{ cm}$$

$$L2 = 1.227,60 \text{ MHz e } \lambda \cong 24 \text{ cm}$$

Essas duas frequências são geradas simultaneamente, permitindo aos usuários, corrigir grande parte dos efeitos em razão da refração ionosférica.

O código C/A (Coarse Acquisition – fácil aquisição) com comprimento de onda de aproximadamente 300m, é transmitido a uma razão de 1,023 MHz.

O código P (Precise or Protected - preciso ou protegido) tem sido reservado para uso dos militares americanos e dos usuários autorizados. Ele é transmitido a uma frequência de 10,23 MHz, o que corresponde a uma sequência de 10,23 milhões de dígitos binários por segundo, resultando num comprimento de onda de 30 m. Esse comprimento de onda, menor que o do código C/A, faz que as medidas resultantes do código P sejam mais precisas.

4.8.2 Segmento de controle

Segundo Monico (2000), o sistema de controle é composto por 5 estações monitoras (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs),

das quais três com antenas para transmitir os dados para os satélites (Ascencion Island, Diego Garcia e Kwajalein), e uma estação de controle central (MCS – Máster Control Station) localizada em Colorado Spring, em Colorado. Essas cinco estações pertencem à AAF (American Air Force); que em conjunto com sete estações do NIMA (Nacional Imagery and Mapping Agency), compõem as estações monitoras GPS do DoD (Department of Defense).

Cada estação monitora é equipada com oscilador externo de alta precisão e receptor de dupla frequência, que rastreia todos os satélites visíveis e transmite os dados para as MCS para determinar as órbitas dos satélites, que as transmitem (broadcast ephemeris) efemérides transmitidas, e as correções dos relógios dos satélites, visando atualizar periodicamente as mensagens de navegação.

4.8.3 Segmento de usuários

O segmento de usuários é constituído pelos receptores GPS, os quais devem ser apropriados para os propósitos a que se destina, tal como em navegação, geodésia ou outra atividade qualquer, podendo a categoria ser dividida em civil e militar (MONICO, 2000).

Atualmente, há uma grande variedade de receptores no mercado civil, para as mais diversas atividades. Os receptores GPS apresentam os seguintes componentes:

- antena com pré-amplificador;
- Seção de radiofrequência (RF) para identificação e processamento do sinal;
- microprocessador para controle do receptor, amostragem e processamento dos dados;
- oscilador;
- interface para o usuário, painel de exibição e comandos;
- provisão de energia; e
- memória para armazenagem dos dados.

4.8.3.1 Antena

Segundo Monico (2000), a antena detecta as ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites, convertendo-as em corrente elétrica, amplifica o sinal e os envia para a parte eletrônica do receptor. Em razão da estrutura dos sinais GPS, todas as antenas devem ser polarizadas circularmente à direita (RHCP: Right Hand Circularly Polarised). A antena deve ter boa sensibilidade para garantir a recepção de sinais fracos, e o padrão de ganho deve permitir recepção em todas as elevações e azimutes visíveis. Vários tipos de antenas estão disponíveis no mercado: monopole ou dipole, helix, spiral helix, microstrip e choke ring.

4.8.3.2 Seção de rádio frequência

Os sinais que entram no receptor são convertidos na divisão de RF para uma frequência mais baixa, denominada frequência intermediária (FI), que é mais fácil de ser tratada nas demais partes do receptor. Isso é realizado pela combinação do sinal recebido pelo receptor com um sinal senoidal gerado pelo oscilador do receptor. Normalmente, os osciladores dos receptores GPS são de quartzo, de qualidade melhor que os utilizados no relógio de pulso.

O sinal com a FI contém toda a modulação presente no sinal transmitido, mas a onda portadora se apresenta alterada em frequência. Essa alteração é a diferença entre a frequência recebida (original) e a gerada no oscilador do receptor. Ela é denominada frequência de batimento da onda portadora.

4.8.3.3 Canais

Segundo Monico (2000), o canal de um receptor é considerado a sua unidade eletrônica primordial, podendo o receptor possuir um ou mais canais. Os tipos de canais podem ser divididos em multicanais (canais dedicados), seqüenciais e multiplexados.

Nos receptores multicanais, também denominados canais paralelos, cada canal rastreia continuamente um dos satélites visíveis. No mínimo quatro canais são necessários para obter posição e correção do relógio em tempo real. Se mais canais estiverem

disponíveis, um maior número de satélites pode ser rastreado. Os receptores modernos contam com até doze canais para dada frequência.

Nos receptores seqüenciais, o canal alterna entre satélites dentro de intervalos regulares, normalmente não coincidentes com a transmissão dos dados, fazendo com que a mensagem do satélite só seja recebida completamente depois de várias seqüências. Alguns receptores dispõem de um canal dedicado para a leitura das mensagens de navegação. Na maioria dos casos, utilizam-se canais seqüenciais rápidos, cuja taxa de alternância é da ordem de um segundo.

Na técnica multiplex, seqüências são efetuadas entre satélites numa velocidade muito alta, e quando for o caso, nas duas frequências. A razão de troca é bem sincronizada com as mensagens de navegação (diferente da técnica seqüencial), permitindo que elas sejam obtidas quase que simultaneamente. Uma vantagem da técnica multiplex sobre a de multicanais é a não necessidade de considerar os efeitos sistemáticos entre canais. Um receptor que usa a técnica multiplex necessita da ordem de 30 segundos para obter a primeira posição, tal como nos receptores com canais dedicados.

4.8.3.4 Microprocessador

O microprocessador é necessário no controle das operações do receptor (obter e processar o sinal, decodificar a mensagem de navegação), bem como para calcular posições e velocidade, além de outras funções (controle dos dados de entrada e saída, mostrar informações). Ele usa, essencialmente, dados digitais para efetuar suas funções.

4.8.3.5 Interface com o usuário

A unidade de comando e display proporciona a interação com o usuário. As teclas podem ser usadas para entrar com comandos visando selecionar as mais variadas opções de coleta de dados, monitoramento das atividades do receptor, mostrar as coordenadas calculadas, além de outros detalhes. Pode-se citar, dentre eles, o DOP (Dilution of Precision – diluição da precisão), satélites que são rastreados, ângulo de elevação, bem como possibilidade de entrar com a altura da antena e identificação da estação. A maioria dos

receptores dispõem de padrão de operação preestabelecido, não requerendo intervenção do usuário.

4.8.3.6 Memória

Os receptores dispõem também de memória interna para armazenamento das observações (pseudodistância e medidas de fase da portadora) e das efemérides transmitidas. Alguns receptores possuem, além desta, capacidade de armazenar os dados diretamente em cartões (PCMCIA), e nos discos rígidos ou disquetes de microcomputadores ligados externamente.

4.8.3.7 Suprimento de energia

O suprimento de energia foi um fator muito crítico nos receptores da primeira geração, em razão do alto consumo. Os receptores modernos são concebidos para que tenham consumo mínimo de energia. Alguns chegam mesmo a operar com baterias comuns (pilhas), embora possam ter uma bateria interna recarregável, em adição à entrada de energia externa.

4.8.3.8 Classificação dos receptores GPS

Os receptores GPS podem ser classificados segundo vários critérios, um deles é, de acordo com a comunidade usuária, a classificação em (LEICK, 1995):

- receptores de uso militar; e
- receptores de uso civil.

Podem também ser classificados de acordo com a aplicação:

- receptores de navegação;
- receptores geodésicos;
- receptores para SIG (Sistemas de Informações Geográficas);
- receptores de aquisição de tempo; etc.

Podem ainda ser classificados segundo o tipo de dados que proporciona:

- código C/A;
- código C/A e portadora L1;
- código C/A e portadoras L1 e L2;
- código C/A e P e portadoras L1 e L2;
- portadora L1; e
- portadora L1 e L2.

4.8.4 Fontes de erros

Segundo Monico (2000), as medidas de distâncias entre o satélite e a antena do receptor baseiam-se nos códigos gerados nos satélites; o receptor gera uma réplica do código produzido no satélite. O retardo entre a chegada de uma transição particular do código e a réplica do mesmo, gerado no receptor, é o tempo de propagação do sinal no trajeto que liga o satélite ao receptor. O receptor realiza esta medida usando a técnica de correlação cruzada.

Uma observável é a fase do código, e a partir desta a pseudo-distância é determinada pelo tempo de propagação do sinal multiplicado pela velocidade da luz. Esta observável é denominada de pseudo-distância em razão de não haver um perfeito sincronismo entre os relógios do satélite e do receptor.

Outra observável utilizada é a fase da portadora; esta é a observável básica para a maioria das atividades geodésicas. A fase da portadora é determinada pela diferença entre a fase do sinal emitido pelo satélite, recebida no receptor, e a fase do sinal gerado no receptor, ambas no instante t . A fase observada é denominada de frequência de batimento.

As observáveis GPS estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático estabelecido deve ser capaz de detectar problemas. Assim, as fontes de erros envolvidas no processo de medidas devem ser conhecidas. Os erros sistemáticos devem ser parametrizados e eliminados por técnicas apropriadas. Os erros aleatórios não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e

são, normalmente, as discrepâncias remanescentes nas observações após todos os erros grosseiros e sistemáticos serem minimizados.

O posicionamento GPS está sujeito a erros relacionados com os satélites, com a propagação do sinal e erros relacionados com a estação. Quanto aos erros relacionados aos satélites, tem-se (LEICK, 1995):

- erros orbitais, As coordenadas dos satélites calculadas a partir das efemérides são, normalmente, estabelecidas como fixas no processo de ajustamento dos dados GPS; assim, qualquer erro nas coordenadas dos satélites se propaga para a posição do usuário. No posicionamento relativo os erros orbitais são praticamente eliminados.

- erros nos relógios dos satélites, O tempo dissimulado pelos relógios atômicos a bordo dos satélites, embora precisos, diferem do sistema de tempo GPS; o valor pelo qual eles diferem do tempo GPS está contido na mensagem de navegação, na forma de coeficientes de um polinômio de segunda ordem, conforme a seguinte equação:

$$Dt(t)=a_0+a_1(t-t_0)+a_2(t-t_0)^2 \quad (70)$$

onde:

- t_0 – tempo de referência do relógio;
- a_0 – estado do relógio no tempo de referência;
- a_1 – marcha do relógio; e
- a_2 – variação da marcha do relógio.

Os sinais emitidos pelos satélites, ao atravessarem a atmosfera, sofrem refração, fazendo com que o sinal descreva uma trajetória curva, causando um atraso do sinal. A trajetória curva deve-se ao fato da atmosfera possuir densidades variáveis e os sinais emitidos pelos satélites, ao atravessarem-na sofrem sucessivas refrações, causando uma trajetória curva. O retardo do sinal é consequência da diferença de velocidade de propagação do sinal no vácuo e na atmosfera. A calibração na fase de testes dos satélites permite que seja determinada a magnitude do atraso e a introduz como parte dos coeficientes do polinômio do relógio.

O meio de propagação dos sinais emitidos pelos satélites é formado, essencialmente, pela troposfera e pela ionosfera. A troposfera se estende da superfície terrestre até, aproximadamente, 50 km e é um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente

da frequência do sinal. Entretanto, a ionosfera é um meio dispersivo e a refração depende da frequência do sinal, o que implica que a fase da portadora e a modulação são afetadas em quantidades diferentes. A ionosfera compreende, aproximadamente, de 50 a 1000 km acima da superfície terrestre.

Como os sinais GPS atravessam ambas as camadas, ionosfera e atmosfera neutra (a qual inclui a estratosfera a troposfera), o efeito do atraso de propagação para a ionosfera, por ser um meio dispersivo, pode ser eliminado quando for observado, simultaneamente, os sinais GPS nas duas portadoras. Normalmente, este é o procedimento utilizado para os levantamentos geodésicos.

A atmosfera neutra, sendo um meio não dispersivo, causa outro problema. No posicionamento, a determinação da altitude é mais afetada pela “fraqueza geométrica” da constelação dos satélites do que as componentes horizontais.

O atraso troposférico tem um efeito de aproximadamente 2,4 m (aparente aumento na distância medida, satélite-antena) para observações aos satélites no zênite; causa um aumento aparente de aproximadamente 9,5 m nas observações aos satélites com 15° de elevação (DODSON, 1995). Entretanto com uso de modelos troposféricos, estes valores podem ser reduzidos para, aproximadamente, 0,25 m. O efeito deste erro é consideravelmente reduzido no posicionamento pelo método relativo.

Com relação aos erros relacionados com o receptor e antena, tem-se: o erro do relógio; o erro entre canais; o centro de fase da antena. Cada receptor possui sua própria escala de tempo, definida pelo oscilador interno, a qual difere de escala de tempo GPS. No posicionamento relativo os erros dos relógios são praticamente eliminados, não exigindo para a maioria das aplicações, padrões de tempo altamente estáveis.

Nos receptores que possuem mais de um canal de rastreamento, podem ocorrer erros sistemáticos entre canais. Neste tipo de receptor, cada um dos canais registra os dados de um satélite particular, estando, porém sujeitos a este tipo de erro. A correção do erro entre canais é realizada no próprio receptor no início de cada levantamento, onde são consumadas as calibrações de canais.

O centro eletrônico da antena é um ponto no qual as medidas dos sinais são referenciadas e geralmente não coincide com o centro físico da antena. A discrepância varia com a intensidade e direção dos sinais e é diferente para a portadora L1 e a

portadora L2. Recomenda-se que nos levantamentos sejam usadas antenas de mesmo fabricante e mesmo modelo. Recomenda-se ainda, que as antenas envolvidas num projeto estejam orientadas em uma mesma direção.

Além dos erros já citados, existem os erros relacionados com a estação, podendo ser as coordenadas da estação base (fixa) ou erros resultantes de fenômenos geofísicos, que podem causar variações nas coordenadas das estações envolvidas no levantamento. Entre estes, cita-se o efeito de marés terrestres, da carga dos oceanos e o da carga atmosférica (DODSON, 1995).

No posicionamento GPS, o modo relativo nos proporciona diferenças de coordenadas tridimensionais (ΔX , ΔY , ΔZ). Neste modo de posicionamento, pelo menos um dos pontos rastreados simultaneamente deve ser injuncionado como fixo, qualquer erro em suas coordenadas irá ser propagado para as coordenadas dos pontos determinados a partir do mesmo.

A deformação da Terra devido às forças das marés (chama-se força de maré em um ponto P a diferença da atração exercida pelo Sol e pela Lua sobre a unidade de massa colocada nesse ponto e no centro da Terra), denominada de Marés Terrestres, num período de 6 horas a superfície, em uma região próxima ao equador, desloca-se de aproximadamente 40 cm (Gemael, 1986). A variação é devido à atração luni-solar, sendo que os períodos principais destas variações são de 12 e 24 horas, semi-diurna e diurna, respectivamente. Os efeitos, para uma região não muito extensa, podem ser considerados similares, esperando-se que, no posicionamento relativo este efeito seja minimizado. Para bases longas estes efeitos devem ser modelados.

A variação das coordenadas das estações causadas pelo movimento do pólo deve também ser considerada, pois, a componente radial desta variação atinge até 25 mm. No entanto, no posicionamento relativo este efeito é praticamente eliminado.

O peso dos oceanos exerce uma força sobre a superfície terrestre e sobre ela produz cargas periódicas, resultando em deslocamentos. A magnitude do deslocamento depende do alinhamento do Sol, da Lua e da posição do observador, podendo, em algumas partes do globo, a componente vertical alcançar até 10 cm.

A carga atmosférica também exerce força sobre a superfície terrestre. Variações da distribuição de massa atmosférica induzem em deformações sobre a costa,

principalmente na direção da vertical. A maioria dos programas para processamento de dados FPS ainda não apresenta modelos para correções dessa natureza (DODSON, 1995)

4.8.4.1 Multi-caminho

O multi-caminho ocorre quando os sinais GPS são refletidos de objetos próximos, ou mesmo da superfície, antes de atingir a antena do receptor. O multi-caminho pode causar erros na altitude elipsoidal de poucos metros, quando utilizadas as observações do código, e de poucos centímetros quando utilizada a fase da portadora. Entretanto, o valor exato do erro provocado pelo multi-caminho não pode ser determinado, pois, este depende de fatores específicos do local.

4.8.4.2 Orientação e Centro de fase da antena

O centro de fase (eletrônico) da antena não coincide, necessariamente, com o seu centro geométrico. O centro de fase pode variar de acordo com a posição de cada satélite (elevação e azimute). A maioria dos programas computacionais corrige este efeito. Entretanto, com a finalidade de minimizar o efeito do centro de fase da antena em um levantamento, procedimentos especiais devem ser tomados, tais como: preferencialmente, utilizar antenas de um mesmo fabricante e mesmo modelo; e nas coletas de dados GPS todas as antenas devem ser orientadas na mesma direção.

4.8.4.3 Medição da altura da antena

O erro na medida da altura da antena, cuja distância deve ser contada sobre a vertical acima do marco de coleta de dados, é provavelmente, o mais comum erro cometido durante o levantamento GPS. Este erro é crítico para o levantamento de altitude, pois no processamento dos dados, este não é detectado. Assim, sugerem-se procedimentos específicos nas realizações das medidas das alturas das antenas. Assim, adotou-se os procedimentos nas realizações de medidas das alturas da antena, tais como:

- múltiplas medidas em mais de um sistema de unidades;

- medidas realizadas em diferentes partes da antena; e
- calcular a altura vertical e verificar no campo.

4.8.5 Modelo de observação

A observável fase da portadora $\varphi_i^p(t)$ para a estação **i** e satélite **p** é dado por (LEICK, 1995):

$$\varphi_i^p(t) = \varphi_i(t) - \varphi^p(t) + N_i^p(1) + I_{i,\varphi}^p(t) + \frac{f}{c} T_i^p(t) + d_{i,\varphi}(t) + d_{i,\varphi}^p(t) + d_\varphi^p(t) + E_\varphi \quad (72)$$

onde:

- $\varphi_i(t)$ - Fase no receptor *i*, no instante *t*;
- $\varphi^p(t)$. Fase no satélite *p*, no instante *t*;
- $N_i^p(1)$. Número inteiro, inicial, da ambigüidade;
- $I_{i,\varphi}^p(t)$. Efeito da ionosfera;
- $T_i^p(t)$. Efeito da troposfera;
- $d_{i,\varphi}(t)$. Atraso devido aos componentes eletrônicos do receptor;
- $d_\varphi^p(t)$. Atraso devido aos componentes eletrônicos do satélite;
- $d_{i,\varphi}^p(t)$. Multi-caminho; e
- E_p . Erro de medida de fase.

A simples diferença de fase ($\varphi_{ij}^p(t)$) é dada por:

$$\varphi_{ij}^p(t) = \varphi_i^p(t) - \varphi_j^p(t) \quad (73)$$

A dupla diferença de fase ($\varphi_{ij}^{p,q}(t)$) é dada por:

$$\varphi_{ij}^{p,q}(t) = \varphi_i^p(t) - \varphi_j^q(t) \quad (74)$$

O uso da dupla diferença de fase elimina os erros dos relógios dos satélites e do receptor (LEICK, 1995).

Das observações GPS, matematicamente por combinações lineares tem-se as grandezas derivadas das observações, conforme segue:

- *Wide lane* (L_{Δ})

$$L_{\Delta} = L_1 - L_2 \quad (86,2 \text{ cm}) \quad (75)$$

- *Narrow lane* (L_{Σ})

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 \quad (10,7 \text{ cm}) \quad (76)$$

- Livre de ionosfera (L_0)

$$L_0 = \frac{L_{\Delta} + L_{\Sigma}}{2} \quad (5,4 \text{ cm}) \quad (77)$$

Para a solução da ambigüidade têm-se os métodos: geométrico, combinação da fase do código com a fase da portadora, método procura; e método combinado. No presente trabalho utilizou-se do método da combinação da fase do código com a fase da portadora.

Combinações lineares também podem ser formadas com a fase do código, ver Tabela 6. Na quarta coluna (-VI), a tabela contém o fator de ampliação ionosférica que mede a influência atmosférica sobre o código.

Tabela 6 – Combinação linear da fase do código

Sinal	n	m	-VI	σ (m)
C_1	1	0	- 0,779	0,47
C_2	0	1	- 1,283	0,47
C_{Δ}	1	- 1	1,000	2,68
C_{Σ}	1	0	- 1,000	0,33

Fonte: Seeber, 1993.

As combinações das portadoras (fase ou código) proporcionam diferentes comprimentos de ondas, observa-se que quanto menor o comprimento de onda, resultante da combinação linear, mais precisa é a medida na posição, no entanto, mais difícil será a resolução da ambigüidade.

4.8.6 Precisão na altitude

Conforme já citado, o GPS proporciona um grande potencial nos vários campos de levantamentos, mapeamentos e informações geográficas. Muitas destas aplicações requerem apenas o posicionamento em duas dimensões, embora, este proporcione coordenadas tri-dimensionais sem a necessidade de coleta de dados extras.

No entanto, o GPS não proporciona a mesma precisão (acurácia) na determinação da componente altitude, comparada com as componentes horizontais. Isto não apenas devido à inerente geometria da constelação dos satélites, mas também devido a vários erros observacionais na fonte, os quais afetam principalmente a componente altitude.

Entretanto, alta precisão na determinação da componente altura pode ser obtida quando são adotadas estratégias no processamento dos dados GPS. Nesta seção são abordados com ênfase especial os erros que afetam a componente altura.

A tabela 5 contém a acurácia aproximada do GPS, onde C/A refere-se aos levantamentos executados utilizando-se apenas o código C/A, L1 a fase da portadora L1, L1 & L2 fases das portadoras na dupla frequência.

A componente altitude é afetada pelo modo (técnica) de levantamento e pela observável utilizada no levantamento GPS. Utilizando-se de técnicas de levantamentos e de combinações de procedimentos de processamentos, a precisão da altitude elipsoidal esperada é de 1,5 a 2 vezes menos acurada que as componentes horizontais (FEATHERSTONE, et al,1988).

A geometria do GPS, intrinsecamente influencia na precisão da altitude, isto devido ao fato de que os satélites são observados acima do horizonte (da antena) e esta fraqueza geométrica é quantificada pelo Vertical Dilution Of Precision (VDOP). Um

importante procedimento é executar a coleta de dados GPS em horários que o VDOP está o menor possível.

O VDOP proporciona uma indicação da precisão dos resultados que serão obtidos, e depende dos fatores:

- precisão da observação de pseudo-distância, expressa pelo erro equivalente do usuário (User Equivalent Range Error – UERE), que está associado do desvio-padrão da observação δ_r ; e
- à configuração da constelação dos satélites.

Tabela 5 - Acurácia relacionada à portadora

Método de levantamento	Observável	Horizontal (m)	Vertical(m)
Posicionamento absoluto	C/A	100	140
Estático diferencial	C/A	0,5 – 2,0	1,0 – 3,0
Estático relativo	L1	0,02	0,03
Estático relativo	L1 & L2	0,005	0,02
Estático rápido	L1 & L2	0,02	0,03
Cinemático	C/A	2,0 – 5,0	3,0 – 8,0
Cinemático	L1	0,03	0,05
Cinemático	L1 & L2	0,01	0,02
Real Time Diferencial	C/A	3,0 – 5,0	4,0 – 8,0
Real Time Diferencial	L1	0,1	0,2
Real Time Diferencial	L1& L2	0,05	0,1

Fonte: FEATHERSTONE, et all,1988.

A relação entre δ_r e o desvio-padrão associado ao posicionamento δ_p é descrito pelas expressões (SEEBER, 1993);

$$\begin{aligned}\delta_p &= \text{DOP}\delta_r \\ \delta_v &= \text{VDOP}\delta_r \\ \delta_p &= \text{PDOP}\delta_r\end{aligned}\tag{71}$$

O PDOP, geometricamente, pode ser interpretado como o inverso do volume V de um tetraedro formado pelas posições da antena do receptor e dos satélites.

$$\text{PDOP} = \frac{1}{V}$$

A melhor situação geométrica ocorre quando o volume é maximizado, implicando em um PDOP mínimo.

Uma outra causa geométrica que afeta a altitude elipsoidal GPS é a aproximada correlação entre o erro das efemérides e o comprimento da linha base; esta relação é dada por:

$$\frac{\sigma_b}{b} \cong \frac{\sigma_\rho}{\rho}$$

Onde, b representa o comprimento da linha base, σ_b é o erro relativo à linha base, ρ representa a distância entre o observador e o satélite observado e σ_ρ seu erro relativo. Assumindo que a distância do satélite ao observador seja de 20.000km e as efemérides transmitidas possuam erro da ordem de 10 m, terão erros em altitude de aproximadamente $\pm 0,5$ parte por milhão (mm/km). Entretanto, nos levantamentos onde se pretende obter a altitude com uso das efemérides transmitidas, o comprimento da linha base deve ser tanto menor quanto possível. Em levantamentos GPS com linhas de bases longas, recomenda-se o uso de efemérides precisas produzidas pelo International GPS Service (IGS). Normalmente estas efemérides estão disponíveis aos usuários poucos dias após a execução dos levantamentos, e estas, normalmente, são de uma ordem de magnitude melhor que as efemérides transmitidas.

Os sinais transmitidos pelo GPS atravessam a ionosfera e a atmosfera neutra (que inclui a estratosfera e a troposfera), sendo o atraso atmosférico afetado por ambas as camadas. Por ser a ionosfera, um meio dispersivo, os efeitos do atraso dos sinais podem ser grandemente minimizados utilizando-se de rastreadores que observam simultaneamente as duas fases das frequências das portadoras GPS. A atmosfera neutra é um meio que não é dispersivo e, assim, seu efeito não pode ser eliminado utilizando-se as duas frequências portadoras. Assim sendo, o efeito da camada atmosférica deve ser eliminado por modelos atmosféricos.

4.9 Sistemas de referência

Um sistema de referência é caracterizado pela idéia conceitual desse sistema. Um referencial ideal seria aquele em que a origem estivesse em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, o que caracteriza um referencial inercial, dentro do conceito da mecânica de Newton. No entanto, num sistema de referência terrestre, a origem é o geocentro, que possui aceleração em seu movimento de translação em torno do Sol, muito embora pequena. Isso o qualifica como um referencial “quase-inercial”. Logo, a definição pode ser bastante complexa. Além disso, envolve fatores relacionados à deformação da Terra em âmbito global, regional e local, bem como outros. Fazem parte, ainda, da definição a teoria fundamental envolvida e os padrões adotados. Por exemplo, os modelos usados para determinação da velocidade das estações, baseados na teoria das placas tectônicas ou a partir das medidas de longa duração, se inserem na definição de um sistema de referência terrestre. Num sistema de referência inercial, uma das dificuldades se deve ao fato de os objetos estelares terem movimento próprio. Diante dessa complexidade, é necessário adotar, por convenção, uma definição do referencial, quer seja terrestre ou inercial.

Quando um referencial é definido e adotado por convenção, a etapa seguinte é caracterizada pela coleta de observações a partir de pontos sobre a superfície terrestre (rede), devidamente materializados. Faz parte, ainda, o processamento e análise, bem como a divulgação dos resultados, que é, essencialmente um conjunto de coordenadas associado a uma época particular. As coordenadas podem vir acompanhadas de suas respectivas velocidades. Esse conjunto materializa o sistema de referência.

Uma vez materializado o referencial, outro aspecto muito importante é a sua densificação, que é um procedimento que em geral, visa reduzir o espaçamento entre estações (OLIVEIRA,1988).

4.9.1 Sistema de referência associado ao GPS (WGS 84)

A forma da Terra tem sido representada, matematicamente, por um elipsóide de revolução. É conveniente adotar a superfície elipsoidal como superfície de referência, pois, isto facilita as operações matemáticas, e esta é a razão pela qual o elipsóide é

largamente utilizado em projeções cartográficas e no estabelecimento de coordenadas horizontais em redes geodésicas. A superfície elipsoidal, usualmente não é utilizada como superfície de referência na altimetria por não possuir um significado físico.

Para modelar as observáveis e descrever as órbitas dos satélites, o posicionamento com o GPS requer sistemas de referência bem definidos e consistentes. A acurácia do sistema deve ser compatível com o sistema de posicionamento, caso contrário, os resultados deteriorarão a alta acurácia proporcionada pelo sistema de posicionamento.

O sistema de referência usado pelo GPS é global e geocêntrico, pois as órbitas dos satélites têm como pólo o centro de massa da Terra. As estações terrestres são, usualmente, referidas num sistema fixo à Terra, que rotaciona com a mesma e os movimentos dos satélites são melhores descritos num sistema de referência inercial.

A Geodésia Espacial utiliza-se de sistemas de referência inercial, que são referenciadas no espaço fixo (Space-Fixed), denominados sistema inercial de referência (Conventional Inertial System- CIS) usado na descrição dos movimentos dos satélites; e o Earth-Fixed, denominado Sistema de Referência Terrestre (Conventional Terrestrial System – CTS), usado para o posicionamento a partir de estações de observações.

O sistema de referência do GPS, quando se utilizam efemérides transmitidas é o WGS 84 (World Geodetic System 1984). Desta forma, quando um levantamento é realizado com uso do GPS, as coordenadas dos pontos envolvidos serão obtidas nesse sistema de referência. Na figura 14 que ilustra o WGS84, é possível visualizar a origem é que centro de massa da Terra, com os eixos cartesianos X, Y e Z. O elipsóide de referência é o GRS80 (Geodetic Reference System 1980), que é geocêntrico.

Na Tabela 2 encontram-se listados os parâmetros fundamentais do WGS 84.

Tabela 2 - Parâmetros do elipsóide do WGS84

Parâmetros	valor	Descrição
a	6378137	Semi-eixo maior
f	1/298,2572221	Achatamento
ω	$7292115 \cdot 10^{-8}$ rad/s	Velocidade angular da Terra
GM	$3986005 \cdot 10^8$ m ³ /s ²	Constante gravitacional da Terra

Fonte: MONICO, 2008.

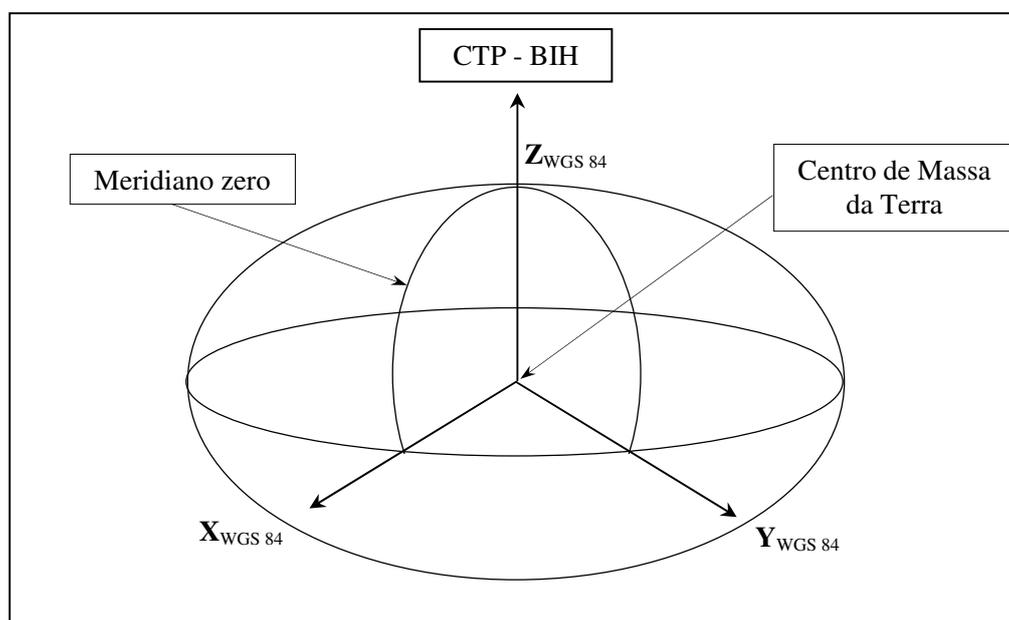


Figura 14 – Sistema de referência adotado no GPS (WGS 84)
(Fonte: Mônico, 2008)

O WGS84 sofreu refinamentos, e atualmente, encontra-se em sua quarta realização (MONICO, 1997). A Tabela 3 contém as realizações do WGS84 e os períodos de vigência das respectivas realizações.

Tabela 3 – WGS84 e suas realizações

Modelo	Vigência
WGS84 (1ª realização)	Até 28/junho/1994
WGS84 (G730)	29/junho/1994
WGS84 (G873)	29/janeiro/1997
WGS84 (G1150)	20/janeiro/2002

Fonte: MONICO (2008).

A realização G873 apresenta discrepâncias máximas com o SIRGAS (Sistema de Referências Geocêntrico para as Américas) (ITRF1994, época 1995,4) na ordem de 2 cm. (FORTES,1998).

Para exemplificar a importância e compatibilização entre as diferentes realizações do WGS84, apresenta-se na Tabela 3 as coordenadas da estação PARA no sistema WGS84 primeira realização e no WGS84 (G873), conforme segue:

As diferenças das coordenadas da estação PARA, considerando as duas realizações implica em uma diferença linear de 0,82 m entre os dois conjuntos de coordenadas. Utilizando-se do mesmo procedimento para a estação UEPP, as diferentes realizações WGS84 proporcionam uma diferença linear de 0,67m.

Tabelas 4 - Coordenadas das estações fixas nos WGS84

ESTAÇÃO		WGS84(1 ^a realização)	WGS84 (G873)
PARA	Latitude	25° 26' 54,1362''	25° 26' 54,1291''
	Longitude	49° 13' 51,4116''	49° 13' 51,4368''
	Altitude geométrica	925,868 m	925,759 m
UEPP	Latitude	22° 07' 11,6664''	22° 07' 11,6594''
	Longitude	51° 24' 30,70155''	51° 24' 30,7216''
	Altitude geométrica	431,084 m	430,945 m

Compatível com o SIRGAS (ITRF94)

4.9.2 Sistema Geodésico Brasileiro

4.9.2.1 Situação atual

A definição, implantação e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é de responsabilidade da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O referencial horizontal do SGB é definido sob a condição de paralelismo entre o seu sistema de coordenadas cartesianas e o do CTRS (Conventional Terrestrial Reference System)

A figura geométrica da Terra é definida pelo Elipsóide de Referência 1967, cujos parâmetros definidores são:

$$A \text{ (semi-eixo maior)} = 6.378.160\text{m}$$

$$F \text{ (achatamento)} = 1/298,25$$

Nessa definição fica implícito que o semi-eixo menor do elipsóide é paralelo ao eixo de rotação da Terra, e o plano do meridiano origem é paralelo ao plano do meridiano de Greenwich, tal como definido pelo BIH (*Bureau International de l'Heure* – Serviço Internacional da Hora).

O referencial altimétrico é materializado pela superfície equipotencial que coincide com o nível do mar, definido pelas observações maregráficas tomadas na baía de Imbituba, no litoral de Santa Catarina (IBGE 1996).

4.9.2.2 Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS)

O SIRGAS, criado recentemente e com campanha GPS realizada no período de 26 de maio a 14 de junho de 1995, culminou com a realização de um sistema de referência geocêntrico, usando algumas estações do International GPS Service – Serviço GPS Internacional (IGS) como pontos fiduciais, as quais são referenciadas ao ITRF-94. Nessa campanha foram ocupadas 65 estações ao todo, sendo que destas 7 são pertencentes ao IGS. Do total das estações ocupadas, 10 estão localizadas no Brasil.

4.9.2.3 Transformações e atualizações de coordenadas

Diante do exposto, pode-se notar que a transformação de coordenadas entre as várias realizações dos referenciais geodésicos utilizados na prática é de fundamental importância e deve ser realizado como todo o cuidado.

No que concerne às aplicações de GPS, no Brasil, a transformação de coordenadas entre o WGS84 e o SAD69 (South American Datum of 1969), e vice-versa, é de fundamental importância. Enquanto o WGS84 é o sistema do GPS, o SAD69 é o adotado na maioria das atividades de posicionamento no Brasil.

Um outro aspecto que requer atenção, é a atualização das coordenadas em razão do tempo, uma prática comum para quem utiliza as várias realizações do ITRFs (International Reference Frame), ou mesmo o SIRGAS

4.10 Análise Estatística

4.10.1 Análise da exatidão e da precisão

A análise da exatidão é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas no modelo e as coordenadas de referência.

Segundo Costa Neto (1977), para a análise da exatidão utilizar-se-á da estimativa intervalar dada pela distribuição t de Student, sendo particularmente válida para amostras pequenas (até 30 pontos).

A análise consiste em construir um intervalo de confiança de 90% de certeza para a média populacional μ a partir da média amostral \bar{x} e da variância amostral S^2 , dada por:

$$\mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha}) \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (78)$$

onde:

μ = média populacional

\bar{x} = média amostral

S = desvio padrão amostral

n = tamanho da amostra

Em seguida, aplica-se um teste de hipótese com nível de significância de 10%, para validação da exatidão, confrontando:

$H_0 : \mu \leq x$, contra

$H_1 : \mu > x$

onde x é o erro máximo admissível em acurácia.

O cálculo da estatística é dado por:

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (79)$$

onde μ_0 é a média populacional esperada e t é a estatística amostral, que deve ser verificada com o valor de t_α tabelado da distribuição t de Student. A estatística t amostral não satisfazendo a desigualdade $t < t_\alpha$ rejeita-se a hipótese nula.

Para a realização da análise da precisão, que é a coerência interna dos elementos do posicionamento plano-altimétrico, pode-se utilizar da distribuição Qui-quadrado χ^2 que consiste em construir um intervalo de confiança de 90% para o desvio padrão populacional S a partir do desvio padrão amostral s .

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n - 1) \cdot s^2}{\chi_{1-\alpha}^2}} \quad (80)$$

onde σ é o desvio padrão estimado da população e $\chi_{1-\alpha}^2$ que se obtém da tabela da distribuição Qui-quadrado, onde o argumento é o grau de liberdade associado à certa probabilidade α .

Posteriormente aplica-se um teste de hipótese com nível de significância de 10%. Para validação da precisão, formula-se a seguinte hipótese:

$$H_0 : \sigma^2 \leq x^2, \text{ contra}$$

$$H_1 : \sigma^2 > x^2$$

onde, x são os erros máximos admissíveis (desvio padrão) em precisão.

Calculada a variância σ^2 da população estimada, determina-se a estatística que é dada por:

$$\chi^2 = \frac{(n - 1) \cdot s^2}{\sigma_0^2} \quad (81)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, ou seja:

$$\chi^2 \leq \chi_{1-\alpha}^2 \quad (82)$$

Ainda, para a realização de análise estatística de documentos cartográficos, Merchant (1982), apresentam outra proposta, como segue, fazendo-se a análise de tendências e de precisão.

4.10.2 Análise de tendências e precisão

A exatidão do documento cartográfico é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas no documento e as suas homólogas de referência.

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r \quad (83)$$

A média e o desvio padrão, calculados como segue:

$$\Delta X_i = X_i^r - X_i^c$$

onde X_i^r são as coordenadas de referência e X_i^c são as coordenadas dos modelos.

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (84)$$

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \quad (85)$$

No teste de tendência são avaliadas as hipóteses:

$$H_0: \overline{\Delta X} = 0, \text{ contra}$$

$$H_1: \overline{\Delta X} \neq 0$$

Calcula-se a estatística amostral t, e verifica-se se o valor encontra no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula.

O valor de t amostral é calculado por:

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (86)$$

e o intervalo de confiança é dado por:

$$|t_x| < t_{(n-1; \alpha / 2)}$$

A estatística t não satisfazendo a desigualdade, não se aceita a hipótese nula, que significa que o documento não está livre de tendência.

Para verificar a precisão, a análise é realizada comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o desvio padrão esperado para a classe desejada, formulando-se a seguinte hipótese:

$$H_0 : S_X^2 = \sigma_X^2, \text{ contra}$$

$$H_1 : S_X^2 > \sigma_X^2$$

Onde, σ_X é o desvio padrão esperado para a classe de interesse.

Calculado o desvio padrão esperado, realiza-se a estatística através da expressão:

$$\chi_X^2 = (n - 1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (87)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, como segue:

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1; \alpha)}^2$$

Não sendo obedecida, não se aceita a hipótese H_0 .

5 MATERIAL E MÉTODOS

Com a finalidade de atingir os objetivos deste trabalho, selecionou-se a região de Presidente Prudente, SP, para a realização dos experimentos de campo áreas com diferentes coberturas vegetais: pastagem, seringal e eucaliptos.

Nas três áreas selecionadas foram materializados com piquetes de madeira e identificados por meio de estacas, 6 pontos aleatoriamente distribuídos.

5.1 Material

5.1.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região de Presidente Prudente, Estado de São Paulo, que se encontra destacada na Figura 16.

5.1.2 Equipamentos

- Receptor GPS TRIMBLE 4000 SSI (pertencente à RBMC);
- Nível automático Zeiss NI007 e acessórios;
- Microcomputador AMD Athlon processador 1,09 GHz e 512 MB de RAM;
- Receptor GPS Sokkia Hiper
- Estação Total Topcon Modelo GTS-239 e acessórios

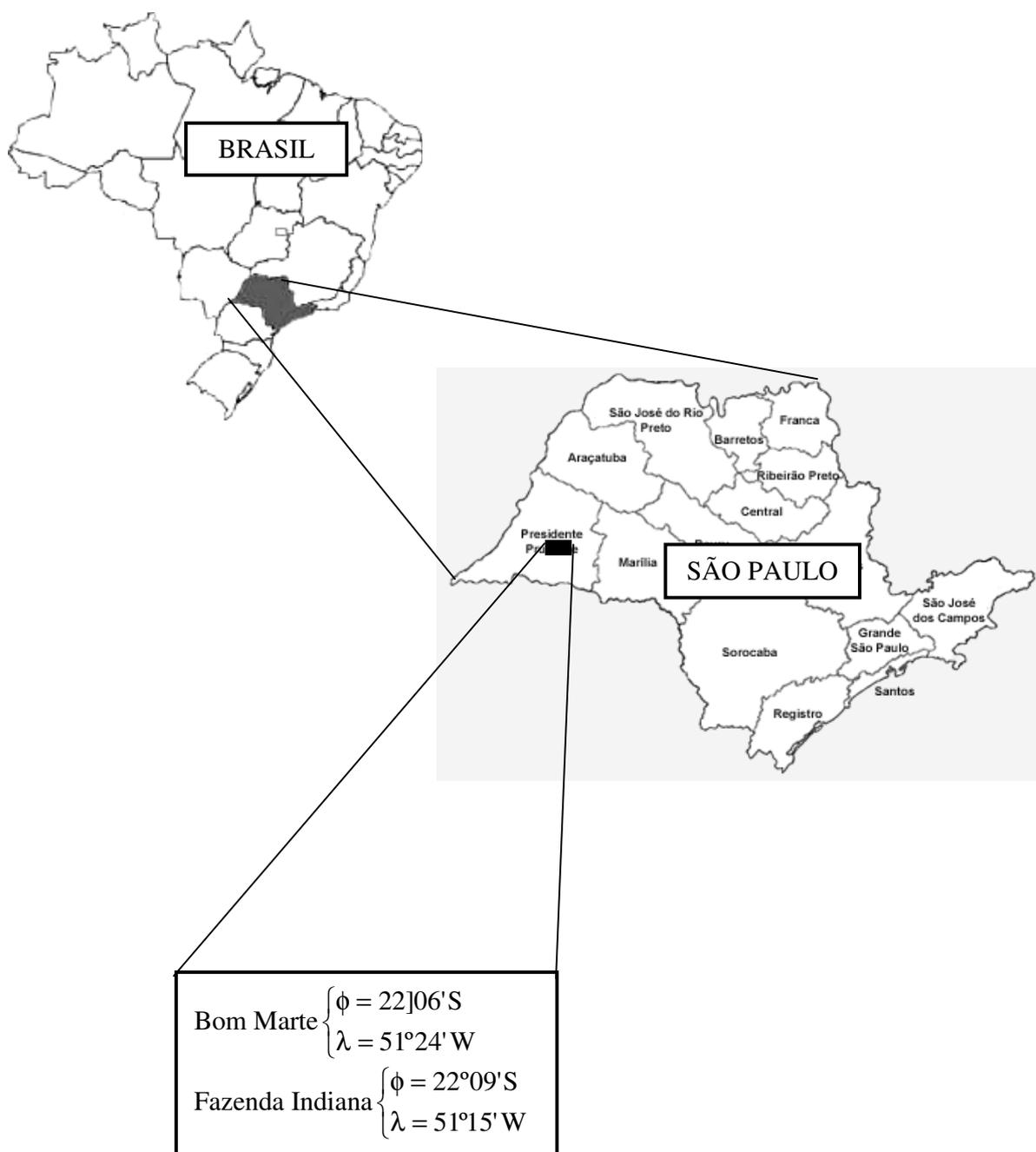


Figura 15 – Localização da área de estudo (Latitude e Longitude médias).

5.2 Planejamento

Com as áreas definidas e reconhecidas, os pontos foram materializados com piquetes e sinalizados com estacas testemunhas.

Foram selecionadas três áreas: pastagem, que foi adotada como referência em razão da cobertura ser superficial e, portanto, os dados não sofrerem interferência; seringal, plantado em 1990 com espaçamento de 6m x 4m e, uma área com eucaliptos plantados em 1993 com espaçamento de 3m x 1,5m

Num local de pastagem que fica localizada em uma área contígua à do seringal, foram implantados e levantados os pontos.

Em cada uma das áreas foram materializados e levantados 6 pontos. Os levantamentos foram realizados com o uso de receptores GPS e também com estação total.

Para a orientação e para se estabelecer o referencial, foram levantados dois pontos em local sem obstrução de sinal, que foram adotados como pontos bases para o levantamento convencional, com uso de estação total.

Utilizou-se também de uma referência de nível, RN 3117-Z, implantada na cisterna, no campus da FCT/Unesp, que foi ocupada com receptor GPS, para a determinação da posição tridimensional, porém, sendo dela utilizada apenas a altitude, para a determinação da ondulação do geóide.

5.3 Coleta de dados

Para a coleta dos dados, foi utilizado o ponto UEPP pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), com as coordenadas no sistema UTM, e a altitude ortométrica (medida sobre a vertical, do ponto sobre a superfície ao geóide). As coordenadas desse ponto são fornecidas pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A coleta de dados para o desenvolvimento do trabalho foi executada em três etapas; levantamento topográfico planimétrico (poligonação) com a utilização de

estação total, levantamento altimétrico por nivelamento geométrico com uso de nível de luneta e com receptores GPS.

Na Tabela 7 encontram-se as coordenadas E e N no sistema UTM e a altitude ortométrica do ponto UEPP, pertencente à RBMC.

Tabela 7 – Coordenadas do ponto UEPP

Ponto	E (m)	N (m)	H (m)
UEPP	457.915,964	7.553.888,221	435,471

5.3.1 Levantamento com estação total

O levantamento foi realizado com a Estação Total Topcon modelo GTS-239, tendo-se o cuidado de seguir as recomendações estabelecidas nas normas para levantamentos topográficos NBR13133 que estabelece que as medições sejam realizadas adotando-se para medida dos ângulos o método das direções e com as observações angulares feitas com uma serie de uma posição conjugada, ou seja, na posição direta e na invertida do instrumento. Recomenda também, a mesma norma, que as observações lineares sejam recíprocas. Assim, as observações no presente trabalho foram realizadas seguindo-se estas prescrições estabelecidas na referida norma.

A caderneta de campo com os dados de ângulos e distâncias da poligonal, coletados com a estação total, encontra-se no anexo 01.

5.3.2 Nivelamento geométrico

Para a obtenção dos desníveis com precisão, classe IIN, os pontos materializados e estes formam polígonos que foram levantados por nivelamento geométrico com visadas iguais, utilizando-se de nível de luneta e um par de miras verticais.

Neste levantamento, o equipamento utilizado foi o nível NI007 da Zeiss, que proporciona precisão de 2,0 mm por quilômetro de duplo nivelamento.

5.3.3 Coleta de dados com GPS

A coleta de dados com receptores GPS foi realizada adotando-se o método de posicionamento estático rápido, que proporciona grande rendimento nos levantamentos, quando comparado com o método estático.

Na coleta de dados adotou-se um tempo de coleta de mais 20 minutos nas áreas de estudo, caracterizando assim, levantamento pelo método estático.

Sabe-se de antemão que, em razão das características do próprio levantamento, os dados coletados em áreas com cobertura vegetal poderão sofrer interferências devido à copa das árvores e que estas degradarão a qualidade dos sinais.

Todos os pontos levantados com a estação total foram rastreados com receptores GPS, e estes após o processamento de dados obtidos as coordenadas. Estas serão comparadas e posteriormente determinadas as possíveis discrepâncias, para assim, poder avaliar as suas utilizações.

5.4 Processamento dos dados

Os dados coletados com a estação total foram processados no programa computacional Topograph 98 SE, desenvolvido pela Char Pointer, para a obtenção das coordenadas planimétricas no sistema UTM.

Na Tabela 8 encontram-se as coordenadas UTM dos vértices localizados na área de pastagem, num total de seis pontos, e na Tabela 9 os que se encontram no seringal e, na Tabela 10 as coordenadas dos pontos localizados no eucaliptal, os quais foram adotados como sendo os de referência por terem sido determinados com uso da estação total.

Tabela 8 – Coordenadas planimétricas dos pontos na pastagem obtidas com estação total

Ponto	N (m)	E (m)
P1	7.550.080,658	474.114,394
P2	7.550.058,188	474.118,599
P3	7.550.033,942	474.119,822
P4	7.550.004,965	474.121,185
P5	7.550.005,743	474.088,077
P6	7.550.054,753	474.052,915

Tabela 9 – Coordenadas planimétricas dos pontos no seringal obtidas com estação total

Ponto	N (m)	E (m)
P7	7.550.110,673	474.052,665
P8	7.550.127,860	474.018,857
P9	7.550.152,192	473.985,986
P10	7.550.186,574	474.010,224
P11	7.550.163,525	474.045,102
P12	7.550.140,264	474.089,023
RN 3109V	7.550.097,487	474.111,849

Tabela 10 – Coordenadas planimétricas dos pontos no eucaliptal obtidas com estação total

Ponto	E (m)	N (m)
E1	457.287,445	7.554.464,155
E2	457.311,792	7.554.463,944
E3	457.341,134	7.554.469,280
E4	457.374,013	7.554.465,519
E5	457.413,267	7.554.455,006
E6	457.463,255	7.554.454,055

Na Tabela 10, encontram-se as coordenadas planimétricas no sistema UTM, SAD 69, que são as adotadas como valores de referência, determinadas com estação total.

Neste levantamento realizado com estação total, a poligonal implantada tem 13 vértices, sendo que destes, 6 estão localizados em área com pastagem, 6 na área de seringal e uma referência de nível implantada pelo IBGE. O resultado do processamento apresenta os valores que estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado do processamento dos dados da estação total

	Observado	Compensado
Perímetro	480,767	480,543
	Erros	Tolerâncias
Angular	0°01'40"	0°01'48"
Relativo	1:30.678	1:5.000
Linear	0,016	
Eixo Norte	0,009	
Eixo Este	-0,013	
Altimétrico	0,020	0,035

Na Tabela 12, encontram-se os resultados do processamento dos dados obtidos com estação total na área com eucaliptos, tendo como pontos de apoio E0 e E7, determinados com GPS e isentos de obstrução dos sinais.

Tabela 12 – Resultado do processamento dos dados da estação total

	Observado	Compensado
Perímetro	261,1735	261,0584

	Erros	Tolerâncias
Angular	0°00'15"	0°01'25"
Relativo	1:130525	1:5.000
Linear	0,0020	
Eixo Norte	0,0020	
Eixo Este	0,0002	
Altimétrico	0,000	0,026

O levantamento altimétrico dos vértices da poligonal foi realizado por nivelamento geométrico composto com visadas iguais, obtendo-se os desníveis que são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15 respectivamente da área com pastagem, seringal e eucaliptal.

Tabela 13 – Desníveis entre os vértices na área de pastagem

Pontos	ΔH (m)
P1-P2	1,301
P1-P3	2,980
P1-P4	4,705
P1-P5	4,931
P1-P6	3,930
P1-P7	0,100

No processamento dos dados, do levantamento convencional, os pontos de partida e de chegada da poligonal levantada, foram determinados com GPS adotando-se o posicionamento relativo estático, que proporciona alta precisão.

Tabela 14 – Desníveis entre os vértices na área de seringal

Pontos	ΔH (m)
P7-P8	-0,344
P8-P9	-0,658
P9-P10	-3,377
P10-P11	-3,647
P11-P12	-3,283
P12-RN 3109V	-0,439

Tabela 15 – Desníveis entre os vértices na área com eucaliptos.

Pontos	ΔH (m)
E0-E1	4,196
E0-E2	3,146
E0-E3	5,982
E0-E4	6,026
E0-E5	3,161
E0-E6	1,520

Neste processamento obteve-se o erro angular e linear de fechamentos, que foram compensados adotando os procedimentos usuais nos levantamentos topográficos, ou seja, a correção angular sendo igual para todos os ângulos medidos e a correção linear proporcional ao comprimento dos lados, como mostrado nas Tabelas 11 e 12 onde se encontram as coordenadas dos vértices localizados na pastagem e no seringal, respectivamente.

As coordenadas tridimensionais resultantes do posicionamento com o uso de receptores GPS, foram obtidas utilizando-se do programa Trimble Geodetic Officer (TGO) da Trimble, apresentadas na tabela 16, sendo as planimétricas no sistema UTM e a altimétrica em altitude geométrica.

A estação base no processamento destes dados, foi a RBMC, denominada UEPP, que está localizada no campus da Unesp de Presidente Prudente, que dista aproximadamente 20 km da área de estudo com plantação de seringueiras e pastagem. A área com plantação de eucaliptos está localizada distante aproximadamente 800 metros da estação UEPP, mesmo assim, determinou-se um ponto base, para a partir deste determinar o posicionamento dos demais pontos.

Tabela 16 – Coordenadas tridimensionais obtidas com GPS na área de pastagem

Ponto	E (m)	N (m)	h (m)
P1	7.550.080,658	474.114,394	451,241
P2	7.550.058,188	474.118,599	452,568
P3	7.550.033,941	474.119,822	454,243
P4	7.550.004,961	474.121,200	455,951
P5	7.550.005,738	474.088,079	457,543
P6	7.550.054,748	474.052,936	455,168

Na Tabela 17 estão relacionadas as coordenadas tridimensionais dos pontos localizados na área com seringueiras.

Com as coordenadas tridimensionais dos pontos levantamentos com a estação total, que são adotados como os valores de referência, e os obtidos com receptores GPS que são os sujeitos à verificação, procederam-se a análise de tendência e da exatidão, sempre tomando como parâmetros os valores dos erros de fechamentos obtidos dos levantamentos topográficos clássicos.

Tabela 17 – Coordenadas tridimensionais obtidas com GPS na área com seringueiras

Ponto	E (m)	N (m)	h (m)
P7	7.550.110,673	474.052,693	451,191
P8	7.550.127,849	474.018,879	450,795
P9	7.550.152,828	473.992,059	455,260
P10	7.550.186,605	474.010,246	447,799
P11	7.550.163,536	474.045,110	447,525
P12	7.550.140,270	474.089,023	447,877
RN 3109V	7.550.097,482	474.111,843	450,514

Na Tabela 18 encontram-se as coordenadas plano-altimétricas dos pontos implantados na área com eucaliptos, determinados com uso de receptores GPS.

Tabela 18 – Coordenadas tridimensionais obtidas com GPS na área com eucaliptos

Ponto	E (m)	N (m)	h (m)
E1	457.287,490	7.554.463,297	403,205
E2	457.311,844	7.554.463,241	402,169
E3	457.341,144	7.554.468,678	405,022
E4	457.376,195	7.554.465,221	407,079
E5	457.413,360	7.554.454,765	402,239
E6	457.463,496	7.554.453,935	400,889

Com as coordenadas dos pontos levantados verificaram-se as discrepâncias entre as respectivas coordenadas, tendo-se sempre, como referência os valores obtidos com estação total. Do processando obteve-se os seguintes resultados, para a área de pastagem, de seringal e, de eucaliptal que são apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21, respectivamente.

Tabela 19 – Discrepâncias entre as coordenadas na área com pastagem

Ponto	Diferença (N)	Diferença (E)	Erro Linear
P1	0,000	0,000	0,000
P2	0,000	0,000	0,000
P3	0,001	0,000	0,001
P4	0,004	-0,015	0,016
P5	0,005	-0,002	0,005
P6	0,005	-0,021	0,022
Média			0,007
Erro médio			0,010

As discrepâncias nos dados do levantamento altimétrico encontram-se nas Tabelas 22, 23 e 24, sendo estas obtidas pela diferença entre os desníveis do nivelamento geométrico e das altitudes geométricas resultantes do GPS, respectivamente na área com pastagem, com seringueiras e com eucaliptos.

Tabela 20 – Discrepâncias entre as coordenadas na área com seringal

Ponto	Diferença (N)	Diferença (E)	Erro Linear
P7	0,000	-0,028	0,028
P8	-0,011	-0,022	0,025
P9	-0,636	-6,073	6,106
P10	-0,031	-0,021	0,037
P11	-0,011	-0,008	0,014
P12	-0,006	0,000	0,006
Média			0,889
Erro médio			2,300
Média (sem P9)			0,020
Erro médio (sem P9)			0,012

Tabela 21 – Discrepâncias entre as coordenadas na área com eucaliptos

Ponto	Diferença (N)	Diferença (E)	Erro Linear
E1	0,858	-0,045	0,859
E2	0,703	-0,053	0,704
E3	0,602	-0,010	0,602
E4	0,298	-2,182	2,202
E5	0,241	-0,093	0,258
E6	0,705	-0,241	0,745
Média			0,895
Erro médio			0,672
Média (sem E4)			0,634
Erro médio (sem E4)			0,229

Tabela 22 – Discrepâncias entre as diferenças de nível na área com pastagem

Ponto	ΔH – Nivelamento Geométrico	ΔH - GPS	Dif ΔH
P1-P2	1,301	1,327	-0,026
P1-P3	2,980	3,002	-0,022
P1-P4	4,705	4,710	-0,005
P1-P5	4,931	6,302	-1,371
P1-P6	3,930	3,927	0,003
P1-RN	-0,544	---	
Média da diferença			0,284
Erro médio			0,608
Média da diferença (sem P1-P5)			-0,013
Erro médio (sem P1-P5)			0,014

Tabela 23 – Discrepâncias entre as diferenças de nível na área com seringueiras

Ponto	ΔH – Nivelamento Geométrico	ΔH - GPS	Dif ΔH
P1-P7	-0,100	-0,050	-0,050
P1-P8	-0,444	-0,446	0,002
P1-P9	-0,758	4,019	3,261
P1-P10	-3,477	-3,442	-0,035
P1-P11	-3,747	-3,716	-0,031
P1-12	-3,383	-3,364	-0,019
Média da diferença			0,521
Erro médio			1,342
Média da diferença (sem P1-P9)			-0,027
Erro médio (sem P1-P9)			0,019

Tabela 24 – Discrepâncias entre as diferenças de nível na área com eucaliptos

Ponto	ΔH – Nivelamento Geométrico	ΔH - GPS	Dif ΔH
E0-E1	4,196	4,168	0,028
E0-E2	3,146	3,132	0,014
E0-E3	5,982	5,985	-0,003
E0-E4	6,026	8,041	-2,015
E0-E5	3,161	3,201	-0,040
E0-E6	1,520	1,850	-0,330
Média da diferença			-0,385
Erro médio			0,810
Média da diferença (sem E0-E4)			-0,066
Erro médio (sem E0-E4)			0,150

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram avaliados realizando-se análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos obtidas dos levantamentos de campo tendo como referência as oriundas do processamento de dados da estação total.

Nestas circunstâncias, as coordenadas avaliadas são as do levantamento realizado com receptores GPS.

Na avaliação da exatidão, para comprovação dos resultados dos levantamentos realizados em área de pastagem, calculou-se a média populacional estimada μ a partir da média amostral \bar{x} , tomando-se o intervalo de confiança de 90% e 5 graus de liberdade com a equação 78, com os dados das coordenadas tridimensionais, da área com pastagem (Tabela 19):

$$\mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha}) \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right)$$

Onde:

Média das discrepâncias (coordenada N) $\bar{x} = 0,007$

Desvio padrão amostral $S = 0,010$

Conforme a tabela $t_{\alpha} = 1,476$

Tamanho da amostra $n = 6$

$\mu \leq 0,0130$

ou seja, a média estimada da população é inferior a 0,0130 no intervalo de confiança de 90%.

Em seguida, fez-se a avaliação da exatidão dos pontos (conjunto) através da distribuição t de Student, com a equação 79:

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Onde μ_0 é a média populacional esperada, que para o conjunto de pontos no presente trabalho é igual a (segundo a NBR 13133 fechamento de poligonais tipo IVP de precisão regional, o erro linear admissível é calculado pela expressão $T_p \leq c + d\sqrt{L}$, onde L é o comprimento da poligonal em km, d é coeficiente tirado da tabela que para este caso $d=0,58$ e c é a precisão dos pontos de referencia) 0,388 m, que é o erro padrão adotado, e assim, formula-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 0,388$$

$$H_1: \mu > 0,388$$

$$\text{E obtém-se } t = -93,326$$

Como $t = -93,326 < 1,476$, aceita-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%, e pode ser considerado sem erro excessivo, estando dentro da exatidão requerida.

Para avaliar a precisão, o desenvolvimento é semelhante ao da determinação da exatidão, diferenciando-se no tipo de teste aplicado, utilizando-se neste caso o desvio padrão, que é calculado com a equação 80:

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha}^2}}$$

Onde:

$$\text{Média amostral } \bar{x} = 0,007$$

$$\text{Desvio padrão amostral } S = 0,010$$

$$\text{Tamanho da amostra } n = 6$$

$$\text{Intervalo de confiança de } 90\%$$

$$\text{Obtém-se } \sigma = 0,0176$$

Após o cálculo da estimativa do desvio padrão da população, aplica-se um teste de hipótese através da distribuição Qui-quadrado, com a equação 81:

$$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$$

Onde σ_0^2 é a variância populacional esperada ($\sigma_0 = 0,140$) e o argumento é o grau de liberdade associado à probabilidade de 90% para a validação da precisão.

Formula-se o teste:

$H_0: \sigma \leq 0,388$, contra

$H_1: \sigma > 0,388$

Como $\chi_{1-\alpha}^2 = 0,003 < \chi_{\alpha}^2 = 9,236$, aceita-se a hipótese H_0 ao nível de significância de 10%.

Na Tabela 25 têm-se os resultados da avaliação realizada para a exatidão e precisão do conjunto de pontos implantados na área de pastagem levantados com GPS.

Tabela 25 – Análise da exatidão e precisão dos pontos na área com pastagem.

	Erro linear	ΔH
\bar{x}	-0,007	0,284
S	0,010	0,608
t_{α} (tabela)	1,476	1,533
$\chi_{1-\alpha}^2$ (tabela)	1,610	1,064
χ_{α}^2 (tabela)	9,236	7,779
μ	0,013	0,701
μ_0	0,388	0,008
σ	0,0176	1,179
t	-93,326	1,015
χ^2	0,003	184,832

Na Tabela 26 encontram-se os resultados da avaliação realizada para a obtenção da exatidão e precisão do conjunto de pontos levantados com GPS na área com seringueiras.

Tabela 26 – Análise da exatidão e precisão dos pontos na área com seringueiras.

	Erro linear	ΔH
\bar{x}	0,889	0,521
S	2,300	1,342
t_{α} (tabela)	1,476	1,476
$\chi^2_{1-\alpha}$ (tabela)	1,610	1,610
χ^2_{α} (tabela)	9,236	9,236
μ	2,275	1,330
μ_0	0,388	0,008
σ	4,053	2,365
t	0,534	0,936
χ^2	175,196	140.700,313

Na Tabela 27 encontram-se os resultados da avaliação realizada para a obtenção da exatidão e precisão do conjunto de pontos levantados com GPS na área com eucaliptos.

Tabela 27 – Análise da exatidão e precisão dos pontos na área com eucaliptos.

	Erro linear	ΔH
\bar{x}	0,895	-0,385
S	0,672	0,810
t_{α} (tabela)	1,476	1,476
$\chi^2_{1-\alpha}$ (tabela)	1,610	1,610
χ^2_{α} (tabela)	9,236	9,236
μ	1,300	0,873
μ_0	0,286	0,006
σ	1,184	1,427
t	2,220	1,146
χ^2	27,604	91.125

Verifica-se pela Tabela 27 que os pontos determinados com GPS estão com valores dos erros excessivamente grandes, estatisticamente.

Outro critério de avaliação dos pontos é através do modelo apresentado por Merchant (1982), onde se faz a análise de tendências e de precisão.

Para o teste de tendências avaliam-se as hipóteses:

$$H_0: \overline{\Delta X} = 0, \text{ contra}$$

$$H_1: \overline{\Delta X} \neq 0$$

Neste critério de avaliação verifica-se se há tendência calculando a estatística amostral t com a expressão 86, com os dados da Tabela 19, que apresenta as discrepâncias entre as coordenadas obtidas com estação total e GPS na área de pastagem:

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \cdot \sqrt{n}$$

Onde:

$$\text{Média da amostra } \overline{\Delta X} = 0,007$$

$$\text{Desvio padrão da amostra } S_{\Delta X} = 0,010$$

$$\text{Tamanho da amostra } n = 6$$

Obtendo-se $t_\alpha = 1,714$, verifica-se se o valor encontrado está no intervalo de aceitação ou de rejeição da hipótese nula.

A precisão é analisada formulando-se a seguinte hipótese:

$$H_0: S_x^2 = \sigma_x^2, \text{ contra}$$

$$H_1: S_x^2 \neq \sigma_x^2$$

Onde:

$$\text{Desvio padrão esperado para os pontos } \sigma_x^2 = 0,388^2$$

$$\text{Desvio padrão da amostra } S_{\Delta X}^2 = 0,010, \text{ e}$$

$$\text{Tamanho da amostra } n = 6.$$

Realiza-se a estatística com a expressão 87:

$$\chi_x^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_x^2}$$

Obtendo-se para os pontos em questão, $\chi_x^2 = 0,003$.

Nas Tabelas 28, 29 e 30, encontram-se os resultados destes testes realizados, da análise de tendências e de precisão, nas áreas com pastagem, seringueiras e eucaliptos, respectivamente.

Tabela 28 – Análise de tendências e de precisão na área de pastagem.

	Erro linear	ΔH
\bar{x}	0,007	0,284
S	0,010	0,608
t	1,715	1,144
t_{α}	1,476	1,476
χ^2_{α}	9,236	9,236
χ^2	0,006	51.342

Tabela 29 – Análise de tendências e de precisão na área com seringueiras.

	Erro linear	ΔH
\bar{x}	0,889	0,521
S	2,300	1,432
t	0,947	0,891
t_{α}	1,476	1,476
χ^2_{α}	9,236	9,236
χ^2	323,365	284.808

Tabela 30 – Análise de tendências e de precisão na área com eucaliptos.

	Erro linear	ΔH
\bar{x}	0,859	0,385
S	0,704	0,810
t	2,989	1,164
t_{α}	1,476	1,476
χ^2_{α}	9,236	9,236
χ^2	30,296	91.125

Analisando as Tabelas 28, 29 e 30, verifica-se que apenas as coordenadas planimétricas obtidas com uso de GPS, na área de pastagem, não são rejeitados quando aplicados os testes de análise de tendências e de precisão.

6.1 Ondulações geoidais nas RRNN

O IBGE está desenvolvendo uma linha de nivelamento geométrico na região de Presidente Prudente, SP, passando pela área de estudo, onde tem materializado uma referência de nível denominado RN 3109V, que estava previsto a sua utilização para a determinação da ondulação do geóide.

A referência de nível está implantada e, o IBGE disponibilizou a altitude ortométrica (provisória) da referida referência. Assim, a ondulação do geóide (N) foi obtida também nessa referência de nível.

Na Tabela 23 encontram-se as referencias de nível localizada no campus da FCt/Unesp (cisterna) e também da referência RN 3109V, com altitude ortométrica provisória, onde foram obtidas as coordenadas tri-dimensionais com uso do GPS, calculando-se assim a ondulação geoidal nesses pontos.

Tabela 23 – RN e a ondulação geoidal

RN	h (m)	H (m)	$N_{\text{GPS/niv.}}$ (m)
3117Z	443,574	444,1792	-0,605
3109V	450,514	451,400	-0,886

De acordo com os dados da Tabela 23, constata-se que há diferença de 0,281 m entre as ondulações do geóide determinadas nas referências de nível, contudo, é necessário considerar o fato da RN 3109V estar com a altitude ortométrica provisória..

7 CONCLUSÕES

O principal inconveniente da altitude ortométrica reside no fato de que (gravidade média), da equação (13), não pode ser medido. Seu cálculo baseado em hipóteses simplificativas, tais como na altitude de Helmert (equação 14), dá margem ao surgimento de tantos tipos de altitudes ortométricas quantos forem os valores de \bar{g}_A selecionados. Além disso, exceto para o geóide, pontos situados na mesma superfície equipotencial não têm a mesma altitude ortométrica, ou seja, a altitude ortométrica da superfície não perturbada de um lago normalmente não é constante.

Os significados físico e geométrico da altitude normal são menos óbvios do que o da altitude ortométrica, que é mais intuitiva, visto que está totalmente referida ao campo da gravidade real. Porém, em vista da impossibilidade de efetuar observações entre o geóide e o geope, como também o não conhecimento da densidade de massas acima do geóide com suficiente precisão, dificulta a obtenção da altitude ortométrica e a torna de caráter puramente teórico.

Da Tabela 19, constata-se que as coordenadas planimétricas obtidas com estação total e com GPS não apresentam divergências significativas, como era de se esperar, pois os pontos estão em local que não apresenta obstrução de sinais provenientes dos satélites GPS, contudo, nota-se que em apenas um ponto há divergência significativa relacionada a determinação dos desníveis, P1-P5.

Constata-se analisando as Tabelas 28, 29 e 30, que apresentam as análises da exatidão e precisão nas áreas com pastagem, com seringueiras e eucaliptos, respectivamente, que nos levantamentos deve-se evitar o uso de receptores GPS quando há presença de cobertura vegetal, pois estas tendem a degradar a qualidade dos resultados do posicionamento, seja planimétrico ou altimétrico.

O cuidado que se deve tomar quando da utilização de receptores GPS nos levantamentos altimétricos é com relação a ondulação geoidal, pois nestes posicionamentos as altitudes determinadas são as geométricas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANA, J. M. (2000) **O uso do GPS na elaboração de Carta Geoidal**. Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná – UFPR.

_____ (2005) **Elaboração da Carta de Ondulação do Geóide de Presidente Prudente**. Relatório de Pesquisa Trienal. Departamento de Cartografia da FCT/Unesp – Campus de Presidente Prudente. 55p.

AYHAN, M. E. (1993) Geoid Determination in Turkey (TG-91). **BulletinGéodésique**. Springer-Verlag, Berlin. V67. n 1.

BALAZS, E. et al. (1980) **Geodetic levelling and its applications**. Reviews of Geophysics and Sapce Physics. 18(2): 510.

BALAZS, E. I.; YOUNG, G. M. (1982) **Corrections applied by the National Geodetic Survey to precise leveling observations**. NOAA, Rockville.

BARBOSA, L. G. (1996) **Proposta de Unificação do sistema Altimétrico da Grande São Paulo**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 107p.

BONFORD, G. (1971) **Geodesy**. Oxford University Press, 3^a ed., Oxford.

COSTA NETO, P. L. O. (1977) **Estatística**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 264p.

DEHLINGER, P. (1978) **Marine Gravity**. Amsterdam, Elsevier, p. 25-25.

DODSON, A. H. (1995) GPS for height Determination, **Survey Reviews**, New York, v.34, n.256.

ESCOBAR, I. P. (1985) **Injunções relativas em ajustamento gravimétrico**. Dissertação de Mestrado, UFPR.

ESCOBAR, I. P.; GEMAEL, C.; BLITSKOW, D. (1995) **Um modelo matemático para a realização de um sistema de altitudes**. XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Salvador, Bahia.

FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C.; KIRBY, J. F. (1998) Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS, **Survey Review**. New York, v.34, n.267.

FORRESTER, W. D. (1980) **Principles of Oceanographic Levelling**. International Symposium on Problems Related to the Redefinition of North American Vertical Geodetic Network, Ottawa, (2): 122-132.

FORTES, L. P. S. (1998) **Sistema de Referência para a América do Sul – SIRGAS**. Boletim Informativo, n.5 IBGE. Rio de Janeiro.

FREITAS, S. R.; BLITZKOW, D. (1999) **Altitude e Geopotencial**. International Geoid Service, Bulletin n° 9, Special Issue for South America, Italy.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. (1998a) **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos: coletânea das normas vigentes**. Rio de Janeiro: IBGE/Departamento de Geodésia. 74p.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. (1994) **Utilização de GPS no controle de qualidade de cartas**. In: I COBRAC, 2. Florianópolis. Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis.

GEMAEL, C. (1986) **Marés Terrestres**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Departamento de Geociências, Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba.

GEMAEL, C. (1999) **Introdução à Geodésia Física**. Editora da Universidade Federal do Paraná-UFPR. Curitiba.

GROTEN, E. (1980) **Geodesy and the Earth's Gravity Field**. Bonn, Dummlers Verlag, p.309.

HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H. (1967) **Physical Geodesy**. W. H. Freeman, San Francisco.

HOU, C. Y. et al (1972) **Refraction in Precise Levelling**. *Surveying and Mapping*, 32 (2): 232.

IAG (International Association of Geodesy). (2000) **The Geodesist's Handbooks**, *Journal of Geodesy*. Vol. 74, p.128-133.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO – IGG. (1962) **Nivelamento geral do Estado: altitudes de precisão.** Boletim nº 36, São Paulo.

KUKKAMAKI, T. J. (1979) **Levelling Refraction Research: its Presente State and Future Possibilities.** In: TENGSTRON, E. & TELEKI, G. Refractive Influences in Astrometry and Geodesy. Dordrecht, D. Reidel., p.293.

LEAL, E. M.; DALMOLIN, Q. (1999) **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD.** In: GIS Brasil 99; V Congresso e Feira para usuários em Geoprocessamento da América Latina. Salvador, BA.

LEICK, A. (1995) **GPS – Satellite Surveying.** John Wiley & Sons. New York. 2ª ed.

LI, Z. (1991) **Effects of check points em the realibility of DTM accuracy estimates obtained from experimental tests.** Photogrammetric Engineering, vol. 57, n 10. October 1991. p.1333-1340.

LONGMAN, I. M. (1959) **Formulas for computing the tidal accelarions due to the moon and the sun.** Journal of Geophysical Research. 64(12).

MEDINA, A. S.; GEMAEL, C.; FREITAS, S. R. C. (2002) **A Altitude e o Sistema de Referência Vertical.** Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente. Anais. p.001-004.

MERCHAT, D. C. (1982) **Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps.** Technical papers of the americam compress on surveying and mapping. Vol 1, p.222-231

MELLO, M. P. (1986) **Cinquenta anos de IBGE: a Geodésia e a Cartografia (1936-1986).** Revista Brasileira de Cartografia, nº 40. p, 62-67.

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

NASSAR, M. M.; VANICEK, P. (1975) **Levelling and gravity.** New Brunswick, UNB.

RAPP, R. H. (1980) **Precise Definition of th Geoid and its Realization for vertical Datum Applications.** International Symposium on Problems Related to the Redefinition of the North American Vertical Geodetic Networks, Ottawa, (2): 553-566.

RIBEIRO, G. P.; LUZ, R. T. **Resultados Preliminares do Ajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro.** In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 15. São Paulo. Anais... p.155-162.

SAZHINA, N.; GRUSHINSKI, N. (1971) **Gravity Prospecting.** Moscou, Mir Publishers, p.63.

SEEBER, G. (1993) **Satelite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Waltger de Gruyter. Belin.

SCHOMAKER, E. J.; BERRY, R. M. (1981) **Geodetic leveling**. NOAA, Rochville.

STANGE, W. E. (1982) **An evaluatin of orthometric height accuracy using bore hole gravity**. Bulletin Géodésique, (56): 300-311.

TORGE, W. (1991) **Geodesy: The Concepts**. 2^a ed. Nw Brunswick, Canadá, North-Holland.

VANICEK, P. (1986) **Geodesy: The Concepts**. 2^a dc., New Brunswick, Canada. North-Holland.

VANICEK, P.; KRAKIWISKY, E, J. (1986) **Geodesy: the concepts**. North-Holland, Amsterdam, 498p.

ANEXO 1

CADERNETAS DE CAMPO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

(LEVANTAMENTOS COM ESTAÇÃO TOTAL)

Char Pointer Informática

Data: 05/09/08 Hora: 16:30 Página: 1

Caderneta: Poligonal 01 (pasto/seringueira)

Projeto: Doutorado Local: Indiana/SP

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
RN		1,234				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P7		272°48'35"	92°48'30"	93°04'50"	266°55'25"	1,465	48,5760	
Vane	P8		112°17'30"	292°17'25"	87°28'35"	272°31'45"	1,450	17,0450	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P8		1,472	7.550.080,6580	474.114,3940	451,2400	

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	RN		345°42'35"	165°42'40"	92°44'20"	267°15'55"	1,205	17,0470	
Vante	P9		163°42'30"	343°42'45"	86°47'45"	273°12'25"	1,445	22,9020	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P9		1,495	7.550.058,1880	474.118,5990	452,5700	

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P8		61°00'25"	241°00'15"	93°23'05"	266°37'15"	1,440	22,9080	
Vante	P10		248°42'45"	68°43'05"	86°06'30"	273°54'00"	1,460	24,3420	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P10		1,488				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P9		138°27'20"	318°27'30"	94°01'45"	265°56'40"	1,460	24,3490	
Vante	P11		318°39'05"	138°39'00"	86°34'40"	273°25'40"	1,500	29,0740	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P11		1,534				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P10		133°24'00"	313°22'45"	93°35'05"	266°27'10"	1,458	29,0800	
Vante	P12		47°25'35"	227°25'25"	89°42'40"	270°17'30"	1,485	33,1390	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P12		1,425				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P11		301°43'05"	121°43'00"	90°15'20"	269°44'50"	1,475	33,1280	
Vane	P1		174°42'40"	354°42'35"	90°57'10"	269°03'30"	1,445	60,3590	

Char Pointer Informática Data: 05/09/08 Hora: 16:30 Página: 2
 Caderneta: Poligonal 01 (pasto/seringueira) Projeto: Doutorado Local: Indiana/SP

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P1		1,465				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P12		144°12'05"	324°12'10"	89°09'20"	270°51'05"	1,395	60,3540	
Vante	P2		359°36'00"	179°36'00"	94°05'10"	265°55'10"	1,470	56,0920	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P2		1,495				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P1		85°34'35"	265°34'35"	85°56'25"	274°04'00"	1,435	56,0870	
Vante	P3		202°46'45"	22°46'40"	90°30'00"	269°30'20"	1,510	37,9440	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P3		1,534				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P2		74°52'25"	254°52'20"	89°34'45"	270°25'50"	1,470	37,9470	
Vante	P4		264°25'55"	84°25'55"	90°35'00"	269°25'20"	1,435	40,9160	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P4		1,470				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P3		277°41'20"	97°41'20"	89°35'50"	270°27'15"	1,480	40,9210	
Vante	P5		186°21'25"	6°21'45"	93°47'20"	266°13'00"	1,405	42,1800	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P5		1,438				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P4		207°34'55"	108°51'05"	89°48'35"	270°11'40"	1,405	41,8230	
Vante	P6		115°51'15"	295°51'30"	90°15'55"	269°44'20"	1,520	41,8240	

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P6		1,530				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P5		288°51'10"	108°51'05"	89°48'35"	270°11'40"	1,405	41,8230	
Vante	P7		103°17'50"	283°17'55"	89°36'20"	270°23'50"	1,505	49,7240	

Char Pointer Informática Data: 05/09/08 Hora: 16:30 Página: 3
 Caderneta: Poligonal 01 (pasto/seringueira) Projeto: Doutorado Local: Indiana/SP

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P7		1,497				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P6		293°52'35"	113°52'30"	90°25'15"	269°35'00"	1,500	49,7220	
Vante	RN		147°53'05"	327°53'00"	86°59'10"	273°01'05"	1,205	48,5750	

Char Pointer Informática

Data: 05/09/08 Hora: 16:30 Página: 3

Caderneta: Poligonal 01 (pasto/seringueira)

Projeto: Doutorado Local: Indiana/SP

Meridiano	Datum
-51°00'00"	SAD-69

Estação	DH Plana	Desnível	Azimute Plano	Norte	Este	Altitude
P8			169°24'01"			
P9				7.550.058,188	474.118,599	451,590
	24,2764	1,6841	177°06'43"			
P10				7.550.033,9424	474.119,8221	454,2741
	29,0099	1,7276	177°18'29"			
P11				7.550.004,9646	474.121,1846	456,0017
	33,1172	0,2055	271°20'47"			
P12				7.550.005,7428	474.088,0765	456,2072
	60,3187	-0,9930	324°20'34"			
P1				7.550.054,7529	474.052,9147	455,2142
	55,9204	-4,0190	359°44'38"			
P2				7.550.110,6727	474.052,6648	451,1951
	37,9258	-0,3467	296°56'54"			
P3				7.550.127,8601	474.018,8572	450,8484
	40,8968	-0,3165	306°30'35"			
P4				7.550.152,1920	474.985,9862	450,5320
	42,0664	-2,7189	35°10'59"			
P5				7.550.186,5735	474.010,2244	447,8131
	41,8050	-0,2715	123°27'32"			
P6				7.550.163,5247	474.045,1016	447,5416
	49,7004	0,3653	117°54'22"			
P7				7.550.140,2637	474.089,0226	447,9069
	48,4859	2,8417	151°54'56"			
RN				7.550.097,4869	474.111,8485	450,7486
	17,0203	0,5404	171°23'55"			
P8				7.550.080,6580	474.114,3940	451,2890
			169°24'01"			
P9						

Char Pointer Informática

Data: 05/09/08 Hora: 16:30 Página: 3

Caderneta: Poligonal 01 (pasto/seringueira)

Projeto: Doutorado Local: Indiana/SP

Meridiano	Datum
-51°00'00"	SAD-69

	Observados	Compensados
Perímetro	480,7671 m	480,5431 m
Área		

	Erros	Tolerância	Fora
Angular	0°01'40"	0°01'48" (=0°00'30"xN ^{1/2})	
Relativo	1:30678	1:5000	
Linear	0,0157 m		
Eixo Norte	0,0090 m		
Eixo Este	-0,0129 m		
Altimétrico	0,020 m	0,035 m (=50mmxk ^{1/2})	

Char Pointer Informática

Data: 05/09/08 Hora: 16:37 Página: 1

Caderneta: Bom Mart

Projeto: Doutorado Local: Presidente Prudente/SP

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P0		1,367				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P7		295°34'20"	115°34'30"	91°04'40"	268°55'40"	1,430	161,7790	161,7510
Vante	P1		175°52'15"	355°52'15"	84°09'00"	275°51'05"	1,445	41,9400	41,7210

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P1		1,488	7.554.463,2970	457.287,4900	403,2050	

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P0		205°23'40"	25°23'30"	95°56'40"	264°03'50"	1,335	41,9460	41,7210
Vante	P2		140°45'30"	320°45'15"	92°31'50"	267°28'35"	1,450	24,3840	24,3600

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P2		1,376	7.554.463,2410	457.311,8440	402,1690	

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P1		305°15'20"	125°15'20"	87°34'00"	272°26'10"	1,364	24,3780	24,3560
Vante	P3		114°27'10"	294°27'00"	84°35'55"	275°26'15"	1,380	29,9700	29,8360

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P3		1,410				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P2		62°39'20"	242°39'25"	95°33'40"	264°26'35"	1,345	29,9780	29,8370
Vante	P4		259°29'20"	79°29'20"	89°53'00"	270°07'15"	1,435	33,1090	33,1080

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P4		1,470				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P3		317°15'35"	137°15'45"	90°14'10"	273°59'45"	1,380	33,1090	33,1080
Vante	P5		145°43'40"	325°43'40"	94°05'20"	265°54'45"	1,430	40,7580	40,6550

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P5		1,463				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P4		22°44'25"	202°44'30"	86°00'20"	273°59'45"	1,440	40,7560	40,6570
Vane	P6		188°50'15"	8°50'10"	91°56'35"	268°03'35"	1,405	50,0480	50,0190

Char Pointer Informática Data: 05/09/08 Hora: 16:37 Página: 2
 Caderneta: Bom Mart Projeto: Doutorado Local: Presidente Prudente/SP

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P6		1,440				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P5		311°20'15"	131°20'30"	88°08'45"	271°51'30"	1,350	50,0450	50,0190
Vante	P7		216°21'00"	36°20'55"	96°22'15"	263°37'55"	1,540	41,7330	41,4750

Estação	Descrição	HI	Norte	Este	Cota	Azimute
P7		1,572				

Tipo	Nome	Descrição	AHD	AHI	AVD	AVI	HS	DI	DH
Ré	P6		40°22'30"	220°22'25"	83°43'10"	276°17'05"	1,410	41,7260	41,4750
Vante	P0		319°06'30"	139°06'35"	88°57'15"	271°03'10"	1,335	161,7730	161,7460

Meridiano	Datum
-51°00'00"	SAD-69

Estação	DH Plana	Desnível	Azimute Plano	Norte	Este	Altitude
P7						
			274°50'04"			
P0				7.554.426,3190	457.304,9820	398,5700
	41,7026	4,1779	335°07'57"			
P1				7.554.464,1550	457.287,4451	402,7479
	24,3473	-0,9985	90°29'47"			
P2				7.554.463,9441	457.311,7915	401,7494
	29,8233	2,8266	79°41'35"			
P3				7.554.469,2802	457.341,1336	404,5759
	33,0934	0,0325	96°31'34"			
P4				7.554.465,5189	457.374,0125	404,6084
	40,6381	-2,8785	104°59'36"			
P5				7.554.455,0055	457.413,2671	401,7299
	49,9970	-1,6521	91°05'22"			
P6				7.554.454,0548	457.463,2550	400,0778
	41,4568	-4,7437	176°05'58"			
P7				7.554.412,6941	457.466,0751	395,3341
			274°50'04"			
P0						

	Observados	Compensados
Perímetro	261,1735 m	261,0584 m
Área		

	Erros	Tolerância	Fora
Angular	0°01'15"	0°01'25" (=0°00'30"xN ^{1/2})	
Relativo	1:130524	1:5000	
Linear	0,0020 m		
Eixo Norte	0,0020 m		
Eixo Este	0,0002 m		
Altimétrico	0,092 m	0,026 m (=50mmxk ^{1/2})	X

ANEXO 2
CADERNETA DE CAMPO
(NIVELAMENTO GOEMÉTRICO)

Projeto: Tese			Local Indiana-SP			Data:		
Instrumento: NI 007			De: RN3109			A: RN3109		
Ponto Visado Estação	Dist. Ré	Leituras Estadimétricas		Dist. Vante	Fio Nivelador		Desnível Ré-Vante	Observ.
		Ré	Vante		Ré	Vante		
Transp.								
RN/P1					1,670	1,126	0,544	
P1/P2					2,791	1,490	1,301	
P2/P3					2,800	1,121	1,679	
P3/P4					2,836	1,111	1,725	
P4/P5					1,111	0,885	0,226	
P5/P6					0,990	1,991	-1,001	
P6/Aux					0,621	2,126	-1,505	
Aux/P7					0,771	3,296	-2,525	
P7/P8					1,526	1,870	-0,344	
P8/P9					1,546	1,860	-0,314	
P9/Aux					0,726	2,541	-1,815	
		A transportar					-2,029	

Projeto: Tese			Local Frigorífico Bom Mart			Data:		
Instrumento: NI 007			De: P0			A: P0		
Ponto Visado Estação	Dist. Ré	Leituras Estadimétricas		Dist. Vante	Fio Nivelador		Desnível Ré-Vante	Observ.
		Ré	Vante		Ré	Vante		
Transp.								
P0/sapata					3,996	0,275	3,721	
Sapata/P1					1,285	0,810	0,475	
P1/P2					0,810	1,860	-1,050	
P2/sapata					2,911	1,285	1,626	
Sapata/P3					2,640	1,430	1,210	
P3/P4					1,430	1,386	0,044	
P4/P5					0,755	3,620	-2,865	
P5/P6					0,659	2,300	-1,641	
P6/sapata					0,150	3,275	-3,125	
Sapata/P7					0,575	2,181	-1,606	
P7/P0					3,906	0,701	3,205	
		A transportar						
							(ΔH)=	-0,006

ANEXO 3

RESULTADO DO PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS

(LEVANTAMENTO NA ÁREA DE PASTAGEM E SERINGUEIRAS)

Relatório de ajuste da rede

Projeto : LevantamentoSeringal

Nome do usuário	tg1	Data & Horário	16:46:57 18/6/2008
Sistema de coordenadas	UTM	Zona	22 South
Datum do projeto	WGS 1984		
Datum vertical		Modelo de Geóide	EGM96 (Global)
Unidades de coordenadas	Metros		
Unidades de distância	Metros		
Unidades de altura	Metros		

Configurações do estilo do ajuste - Limites de Confiança de 95%

Tolerâncias residuais

Para terminar iteração : 0,000010m

Corte final da convergência : 0,005000m

Apresentação da covariância

Horizontal

Erro linear propagado [E] : U.S.

Termo constante [C] : 0,00000000m

Escala sobre erro linear [S] : 1,96

Tridimensional

Erro linear propagado [E] : U.S.

Termo constante [C] : 0,00000000m

Escala sobre erro linear [S] : 1,96

Erros de Elevação foram usados nos cálculos.

Controles do ajuste

Computar correlações para o geóide : Falso

Ajustes horizontal e vertical foram efetuados

Erros de configuração

GPS

Erro na altura da antena : 0,000m

Erro de centralização : 0,000m

De volta para cima

Resumo estatístico

Ajuste bem feito em 1 iterações

Fator de referência da rede : 1,00

Teste de chi quadrado ($\alpha=95\%$) : PASS.

Graus de liberdade : 1,00

Estatísticas de observação GPS

Fator de referência : 1,00

Número de redundância (r) : 1,00

Estatísticas de observação GPS individual

Ident observação	Fator de referência	Número de redundância
BL1	1,00	1,00
BL13	1,00	0,00
BL14	1,00	0,00
BL15	1,00	0,00
BL16	1,00	0,00
BL17	1,00	0,00

BL18	1,00	0,00
BL19	1,00	0,00
BL20	1,00	0,00
BL21	1,00	0,00
BL22	1,00	0,00
BL23	1,00	0,00

Estratégias de ponderação

Observações GPS

Escalar definido pelo usuário aplicado à todas observações

Escalar : 1,00

De volta para cima

Coordenadas ajustadas

Ajuste efetuado em WGS-84

Número de pontos : 13

Número de pontos restritos : 2

Somente horizontal e altura : 2

Coordenadas de grid ajustadas

Erros são relatados com uso de $1,96\sigma$.

Nome do ponto	Dir Norte	Erro N	Dir Leste	Erro L	Elevação	Erro el.	Fixar
PPTE	7553844,608m	0,000m	457866,057m	0,000m	N/A	N/A	N L a
LGE2_DKHS_S7	7550011,132m	0,000m	474003,041m	0,000m	N/A	N/A	N L a
log0518l_RHMO	7549962,122m	0,001m	474038,184m	0,001m	N/A	N/A	
log0518b_RHMO	7550084,233m	0,006m	473968,984m	0,012m	N/A	N/A	
log0518c_RHMO	7550109,209m	0,010m	473942,159m	0,018m	N/A	N/A	
log0518d_RHMO	7550142,989m	0,005m	473960,351m	0,006m	N/A	N/A	
log0518e_RHMO	7550119,920m	0,006m	473995,215m	0,007m	N/A	N/A	

log0518f_RHMO	7550096,654m	0,004m	474039,128m	0,003m	N/A	N/A	
log0518h_RHMO	7550037,042m	0,001m	474064,499m	0,001m	N/A	N/A	
log0518i_RHMO	7550014,572m	0,001m	474068,704m	0,001m	N/A	N/A	
log0518j_RHMO	7549990,325m	0,001m	474069,927m	0,001m	N/A	N/A	
log0518k_RHMO	7549961,345m	0,001m	474071,305m	0,001m	N/A	N/A	
log0518a_RHMO	7550067,057m	0,003m	474002,798m	0,007m	N/A	N/A	

Coordenadas geodésicas ajustadas

Erros são relatados com uso de $1,96\sigma$.

Nome do ponto	Latitude	Erro N	Longitude	Erro L	Altura	erro alt	Fixa r
PPTE	22°07'11,65710 "s	0,000 m	51°24'30,72250" O	0,000 m	431,050 m	0,000 m	Lat Long a
LGE2_DKHS_S 7	22°09'17,47473 "s	0,000 m	51°15'07,67415" O	0,000 m	450,652 m	0,000 m	Lat Long a
log0518l_RHM O	22°09'19,07062 "s	0,001 m	51°15'06,45002" O	0,001 m	453,027 m	0,002 m	
log0518b_RHM O	22°09'15,09539 "s	0,006 m	51°15'08,85901" O	0,012 m	446,279 m	0,036 m	
log0518c_RHM O	22°09'14,28163 "s	0,010 m	51°15'09,79413" O	0,018 m	450,744 m	0,037 m	
log0518d_RHM O	22°09'13,18400 "s	0,005 m	51°15'09,15700" O	0,006 m	443,282 m	0,014 m	
log0518e_RHM O	22°09'13,93617 "s	0,006 m	51°15'07,94108" O	0,007 m	443,008 m	0,016 m	
log0518f_RHM O	22°09'14,69523 "s	0,004 m	51°15'06,40926" O	0,003 m	443,360 m	0,011 m	
log0518h_RHM O	22°09'16,63538 "s	0,001 m	51°15'05,52689" O	0,001 m	446,724 m	0,003 m	
log0518i_RHM O	22°09'17,36639 "s	0,001 m	51°15'05,38140" O	0,001 m	448,052 m	0,002 m	
log0518j_RHM O	22°09'18,15506 "s	0,001 m	51°15'05,34007" O	0,001 m	449,727 m	0,002 m	

log0518k_RHM O	22°09'19,09768 "s	0,001 m	51°15'05,29366" O	0,001 m	451,435 m	0,002 m	
log0518a_RHM O	22°09'15,65586 "s	0,003 m	51°15'07,67940" O	0,007 m	446,675 m	0,013 m	

Deltas da coordenada

Nome do ponto	Δ Dir Norte	Δ Dir Leste	Δ Elevação	Δ Altura	Δ Separação do Geóide
PPTE	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
LGE2_DKHS_S7	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518l_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518b_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518c_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518d_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518e_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518f_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518h_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518i_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518j_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518k_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A
log0518a_RHMO	0,000m	0,000m	N/A	0,000m	N/A

De volta para cima

Comparações da coordenada de controle

Valores mostrados são coord de controle menos coord. ajustadas

Nome do ponto	Δ Dir Norte	Δ Dir Leste	Δ Elevação	Δ Altura
PPTE	N/A	N/A	N/A	N/A
LGE2_DKHS_S7	N/A	N/A	N/A	N/A

De volta para cima

Observações ajustadas

Ajuste efetuado em WGS-84

Observações GPS

Grupo de transformação GPS: <Padrão GPS>

Rotação do azimute : 0°00'00,0000" (1,96 σ) : 0°00'00,0091"

Escala da rede : 1,00000000 (1,96 σ) : 0,00000005

Número de observações : 12

Número de dados fora do padrão : 4

Ajuste da observação (Tau crítico = 0,00). Quaisquer erros estão em **Vermelho**.

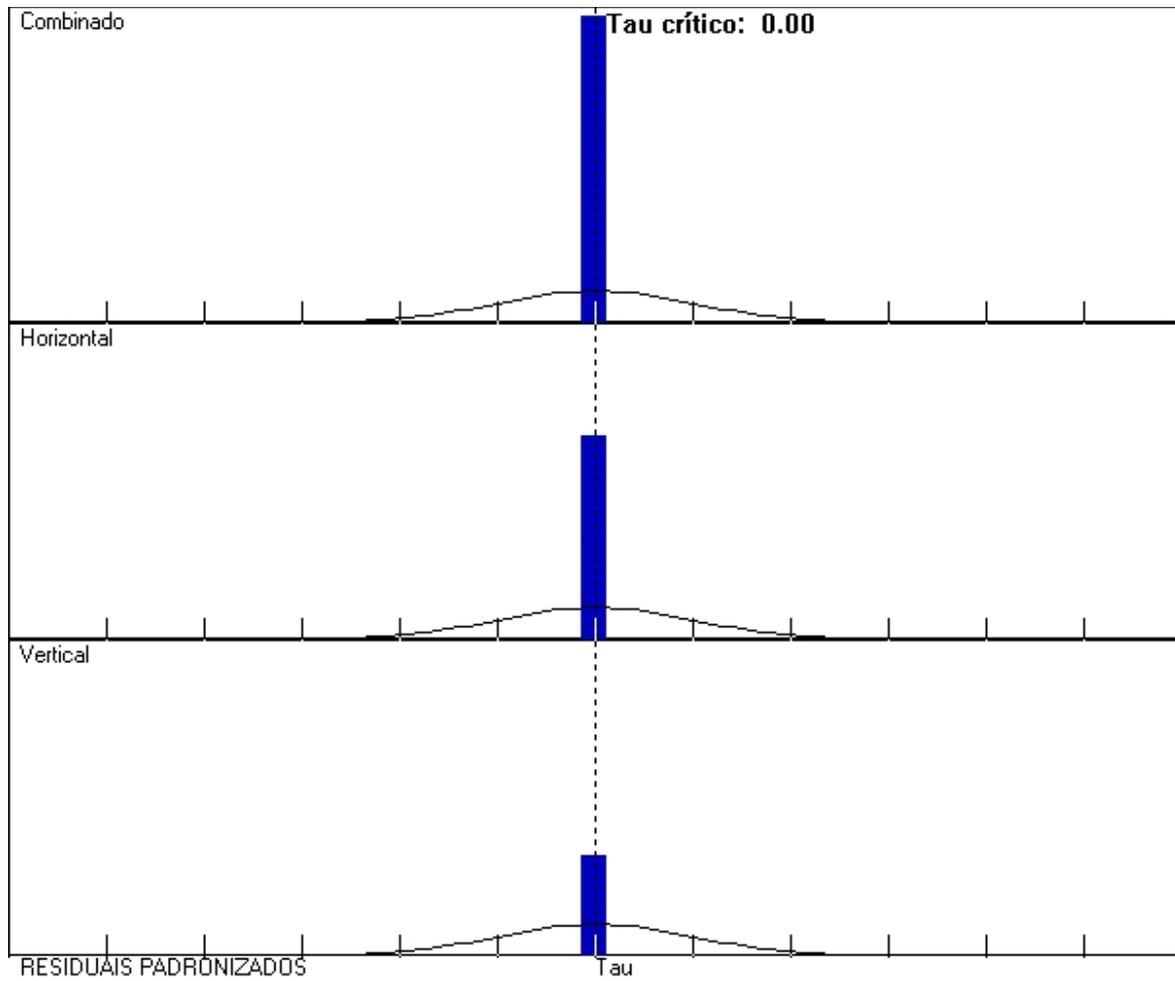
Obs. Ident	Do Pt.	Para Pt.		Observação	Erro a posteriori (1,96 σ)	Residual	Padrão Residual
<u>BL1</u> 	PPTE	LGE2_DKHS_S7	Az.	103°31'02,33 79"	0°00'00,00 91"	0°00'00,00 00"	0,00
			Δ Al.	19,603m	0,000m	0,000m	0,00
			Dist.	16592,467m	0,001m	0,000m	0,00
<u>BL21</u> 	LGE2_DKHS_S7	log0518j_RH MO	Az.	107°22'30,36 18"	0°00'02,69 90"	0°00'00,00 00"	0,00
			Δ Al.	-0,926m	0,002m	0,000m	0,00
			Dist.	70,075m	0,001m	0,000m	0,00
<u>BL13</u> 	LGE2_DKHS_S7	log0518l_RH MO	Az.	144°27'11,55 86"	0°00'02,97 71"	0°00'00,00 00"	0,00
			Δ Al.	2,374m	0,002m	0,000m	0,00
			Dist.	60,331m	0,001m	0,000m	0,00
<u>BL23</u> 	LGE2_DKHS_S7	log0518a_RH MO	Az.	359°50'46,25 87"	0°00'24,30 46"	0°00'00,00 00"	0,00

			ΔAI .	-3,977m	0,013m	0,000m	0,00
			Dis t.	55,947m	0,003m	0,000m	0,00
BL14	LGE2_DKHS _S7	log0518b_RH MO	Az.	335°06'51,71 10"	0°00'28,33 12"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAI .	-4,373m	0,036m	0,000m	0,00
			Dis t.	80,677m	0,007m	0,000m	0,00
BL15	LGE2_DKHS _S7	log0518c_RH MO	Az.	328°15'52,90 87"	0°00'30,11 72"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAI .	0,092m	0,037m	0,000m	0,00
			Dis t.	115,482m	0,011m	0,000m	0,00
BL16	LGE2_DKHS _S7	log0518d_RH MO	Az.	342°09'18,21 19"	0°00'08,86 02"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAI .	-7,371m	0,014m	0,000m	0,00
			Dis t.	138,649m	0,005m	0,000m	0,00
BL17	LGE2_DKHS _S7	log0518e_RH MO	Az.	355°58'49,75 84"	0°00'13,50 44"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAI .	-7,644m	0,016m	0,000m	0,00
			Dis t.	109,111m	0,006m	0,000m	0,00
BL18	LGE2_DKHS _S7	log0518f_RH MO	Az.	22°58'22,760 4"	0°00'08,26 86"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAI .	-7,293m	0,011m	0,000m	0,00
			Dis t.	92,859m	0,004m	0,000m	0,00
BL19	LGE2_DKHS _S7	log0518h_RH MO	Az.	67°14'09,126 4"	0°00'02,79 44"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAI	-3,929m	0,003m	0,000m	0,00

			.				
			Dis t.	66,722m	0,001m	0,000m	0,00
BL20	LGE2_DKHS _S7	log0518i_RH MO	Az.	87°05'46,055 2"	0°00'02,28 39"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAl .	-2,600m	0,002m	0,000m	0,00
			Dis t.	65,778m	0,001m	0,000m	0,00
BL22	LGE2_DKHS _S7	log0518k_RH MO	Az.	126°12'00,32 63"	0°00'02,24 12"	0°00'00,00 00"	0,00
			ΔAl .	0,782m	0,002m	0,000m	0,00
			Dis t.	84,524m	0,001m	0,000m	0,00

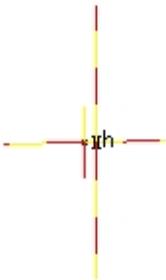
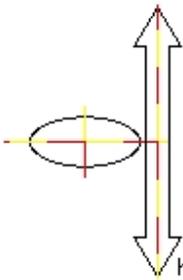
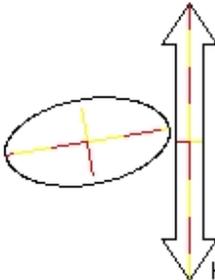
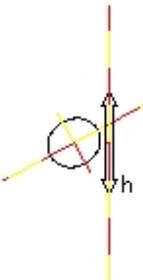
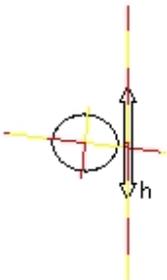
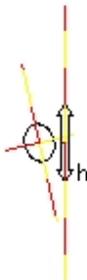
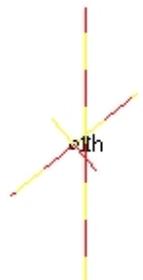
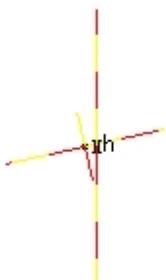
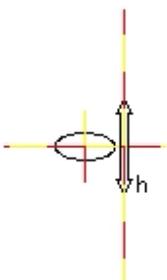
De volta para cima

Histogramas de residuais padronizados



De volta para cima

Elipses de erro do ponto

log0518l_RHMO	log0518b_RHMO	log0518c_RHMO
 1°	 0°	 9°
Marcar tamanho: 0,0100m Escalar bivariado horizontal: $2,45\sigma$ Escalar univariante vertical: $1,96\sigma$		
log0518d_RHMO	log0518e_RHMO	log0518f_RHMO
 29°	 -7°	 -78°
Marcar tamanho: 0,0100m Escalar bivariado horizontal: $2,45\sigma$ Escalar univariante vertical: $1,96\sigma$		
log0518h_RHMO	log0518i_RHMO	log0518j_RHMO
 39°	 29°	 25°
Marcar tamanho: 0,0100m Escalar bivariado horizontal: $2,45\sigma$ Escalar univariante vertical: $1,96\sigma$		
log0518k_RHMO	log0518a_RHMO	
 12°	 -1°	

Marcar tamanho: 0,0100m Escalar bivariado horizontal: 2,45 σ Escalar univariante vertical: 1,96 σ

De volta para cima

Termos de covariante

Ajuste efetuado em WGS-84

A partir do ponto	Para o ponto		Componentes	Erro a posteriori (1,96 σ)	Precisã o horiz. (Índice)	Precisã o 3D (Índice)
PPTE	LGE2_DKHS_S 7	Az.	103°31'02,3379 "	0°00'00,0000 "	1:0	1:0
		Δ Al.	19,603m	0,000m		
		Δ Ele v	?	?		
		Dist.	16592,467m	0,000m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518l_RHM O	Az.	144°27'11,5586 "	0°00'02,9771 "	1:74511	1:74511
		Δ Al.	2,374m	0,002m		
		Δ Ele v	?	?		
		Dist.	60,331m	0,001m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518b_RHM O	Az.	335°06'51,7110 "	0°00'28,3312 "	1:11380	1:11380
		Δ Al.	-4,373m	0,036m		
		Δ Ele v	?	?		
		Dist.	80,677m	0,007m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518c_RHM O	Az.	328°15'52,9087 "	0°00'30,1172 "	1:10512	1:10512
		Δ Al.	0,092m	0,037m		
		Δ Ele v	?	?		

		Dist.	115,482m	0,011m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518d_RHM O	Az.	342°09'18,2119 "	0°00'08,8602 "	1:26022	1:26022
		ΔAl.	-7,371m	0,014m		
		ΔEle v	?	?		
		Dist.	138,649m	0,005m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518e_RHM O	Az.	355°58'49,7584 "	0°00'13,5044 "	1:17355	1:17355
		ΔAl.	-7,644m	0,016m		
		ΔEle v	?	?		
		Dist.	109,111m	0,006m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518f_RHM O	Az.	22°58'22,7604" "	0°00'08,2686 "	1:23104	1:23104
		ΔAl.	-7,293m	0,011m		
		ΔEle v	?	?		
		Dist.	92,859m	0,004m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518h_RHM O	Az.	67°14'09,1264" "	0°00'02,7945 "	1:59215	1:59215
		ΔAl.	-3,929m	0,003m		
		ΔEle v	?	?		
		Dist.	66,722m	0,001m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518i_RHM O	Az.	87°05'46,0552" "	0°00'02,2839 "	1:79395	1:79395
		ΔAl.	-2,600m	0,002m		
		ΔEle v	?	?		
		Dist.	65,778m	0,001m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518j_RHM O	Az.	107°22'30,3618 "	0°00'02,6990 "	1:75633	1:75633
		ΔAl.	-0,926m	0,002m		

		ΔEle_v	?	?		
		Dist.	70,075m	0,001m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518k_RHM O	Az.	126°12'00,3263 "	0°00'02,2412 "	1:93239	1:93239
		ΔAl.	0,782m	0,002m		
		ΔEle_v	?	?		
		Dist.	84,524m	0,001m		
LGE2_DKHS_S 7	log0518a_RHM O	Az.	359°50'46,2587 "	0°00'24,3046 "	1:17656	1:17656
		ΔAl.	-3,977m	0,013m		
		ΔEle_v	?	?		
		Dist.	55,947m	0,003m		

ANEXO 4

RESULTADO DO PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS

(LEVANTAMENTO NA ÁREA DE EUCALIPTOS)

Sumário da linha da base BL10 (PPTE para E0)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 04:20:26	
Tipo de Solução:	L1 fixo	
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável	
Efeméride usada:	Transmitir	
Dados Met:	Padrão	
Distância do declive da linha da base:	815,3512m	
Máscara de Elevação:	10 graus	
Índice de variação:	3,1	
Variação de referência:	4,379	
RMS:	0,007m	
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0010m	
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0056m	
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 11:33:25.000	1493, 300805,000
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 14:29:40.000	1493, 311380,000
Tempo de ocupação:	02:56:15.000	

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	PPTE				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7553844,6076m	Latitude	22°07'11,65710"s	Latitude	22°07'11,65710"s
Dir Leste	457866,0566m	Longitude	51°24'30,72250"O	Longitude	51°24'30,72250"O
Elevação	431,0500m	Altura	431,0500m	Altura	431,0500m
Para:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554382,7050m	Latitude	22°06'54,10275"s	Latitude	22°06'54,10275"s
Dir Leste	457255,0738m	Longitude	51°24'51,99782"O	Longitude	51°24'51,99782"O
Elevação	394,1496m	Altura	394,1496m	Altura	394,1496m
Linha da					

base:					
Δ Dir Norte	538,0974m	Azimute p frente SN	311°31'28"	Δ X	-371,1575m
Δ Dir Leste	-610,9828m	Distância elip.	814,4629m	Δ Y	-512,5380m
Δ Elevação	-36,9004m	Δ Altura	-36,9004m	Δ Z	514,1444m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0005m	σ Azimute p frente SN	0,121 segundos	σ Δ X	0,0015m
σ Δ Dir Leste	0,0004m	σ Distância elips.	0,0004m	σ Δ Y	0,0019m
σ Δ Elevação	0,0027m	σ Δ Altura	0,0027m	σ Δ Z	0,0012m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

	De	Para
Nome do ponto:	PPTE	E0
Arquivo de dados:	ppte2331.rnx	08192331-2.rnx
Tipo Receptor:	NetRS	Unknown
Número de série do receptor:	4427235643	8QVBK4URHM
Tipo de antena:	Zephyr Geodetic	HiPer GD

Medido até:		Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	0,0025m	1,5180m
	APC	0,0558m	1,6240m

Sumário da linha da base BL34 (E0 para E1)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 04:52:24	
Tipo de Solução:	L1 fixo	
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável	
Efeméride usada:	Transmitir	
Dados Met:	Padrão	
Distância do declive da linha da base:	41,9539m	
Máscara de Elevação:	10 graus	
Índice de variação:	7,0	
Variação de referência:	1,320	
RMS:	0,004m	
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0027m	
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0063m	
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 11:38:45.000	1493, 301125,000
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 12:08:40.000	1493, 302920,000
Tempo de ocupação:	00:29:55.000	

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s

Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E1				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554419,6832m	Latitude	22°06'52,89856"s	Latitude	22°06'52,89856"s
Dir Leste	457237,5824m	Longitude	51°24'52,60482"O	Longitude	51°24'52,60482"O
Elevação	398,7842m	Altura	398,7842m	Altura	398,7842m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	37,7646m	Azimute p frente SN	334°58'54"	Δ X	-2,5101m
Δ Dir Leste	-17,7500m	Distância elip.	41,7438m	Δ Y	-25,1614m
Δ Elevação	4,1678m	Δ Altura	4,1678m	Δ Z	33,4773m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0017m	σ Azimute p frente SN	11,692 segundos	σ Δ X	0,0020m
σ Δ Dir Leste	0,0023m	σ Distância elips.	0,0016m	σ Δ Y	0,0049m
σ Δ Elevação	0,0055m	σ Δ Altura	0,0055m	σ Δ Z	0,0032m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

		De	Para
Nome do ponto:		E0	E1
Arquivo de dados:		08192331-2.rnx	08262331-3.rnx
Tipo Receptor:		Unknown	HiPer
Número de série do receptor:		8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:		HiPer GD	HiPer GD
Medido até:		Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	1,5180m	1,4200m
	APC	1,6240m	1,5260m

Sumário da linha da base BL37 (E0 para E2)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 04:53:55	
Tipo de Solução:	L1 fixo	
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável	
Efeméride usada:	Transmitir	
Dados Met:	Padrão	
Distância do declive da linha da base:	38,4275m	
Máscara de Elevação:	10 graus	
Índice de variação:	7,4	
Variação de referência:	1,544	
RMS:	0,004m	
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0023m	
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0048m	
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 12:10:55.000	1493, 303055,000
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 12:30:50.000	1493, 304250,000

Tempo de ocupação:

00:19:55.000

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s
Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E2				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554419,6275m	Latitude	22°06'52,90253"s	Latitude	22°06'52,90253"s
Dir Leste	457261,9361m	Longitude	51°24'51,75479"O	Longitude	51°24'51,75479"O
Elevação	397,7486m	Altura	397,7486m	Altura	397,7486m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	37,7089m	Azimute p frente SN	10°05'21"	Δ X	15,9078m
Δ Dir Leste	6,6037m	Distância elip.	38,2972m	Δ Y	-9,1801m
Δ Elevação	3,1322m	Δ Altura	3,1322m	Δ Z	33,7541m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0017m	σ Azimute p frente SN	9,282 segundos	σ Δ X	0,0024m
σ Δ Dir Leste	0,0017m	σ Distância elips.	0,0016m	σ Δ Y	0,0028m
σ Δ Elevação	0,0039m	σ Δ Altura	0,0039m	σ Δ Z	0,0026m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
--	----------	----------	----------

X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

		De	Para
Nome do ponto:		E0	E2
Arquivo de dados:		08192331-2.rnx	0826233m-3.rnx
Tipo Receptor:		Unknown	HiPer
Número de série do receptor:		8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:		HiPer GD	HiPer GD
Medido até:		Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	1,5180m	1,4200m
	APC	1,6240m	1,5260m

Sumário da linha da base BL35 (E0 para E3)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 04:55:57
Tipo de Solução:	L1 fixo
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável
Efeméride usada:	Transmitir
Dados Met:	Padrão
Distância do declive da linha da base:	56,4737m
Máscara de Elevação:	10 graus

Índice de variação:	15,8		
Varição de referência:	2,681		
RMS:	0,006m		
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0038m		
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0117m		
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 12:32:20.000	1493, 304340,000	
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 12:53:50.000	1493, 305630,000	
Tempo de ocupação:	00:21:30.000		

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s
Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E3				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554425,0647m	Latitude	22°06'52,72829"s	Latitude	22°06'52,72829"s
Dir Leste	457291,2364m	Longitude	51°24'50,73158"O	Longitude	51°24'50,73158"O
Elevação	400,6011m	Altura	400,6011m	Altura	400,6011m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	43,1462m	Azimute p frente SN	39°55'17"	Δ X	41,7393m
Δ Dir Leste	35,9040m	Distância elip.	56,1522m	Δ Y	5,4684m
Δ Elevação	5,9847m	Δ Altura	5,9847m	Δ Z	37,6458m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0018m	σ Azimute p	8,195 segundos	σ Δ X	0,0046m

		frente SN			
$\sigma \Delta$ Dir Leste	0,0023m	σ Distância elips.	0,0019m	$\sigma \Delta Y$	0,0048m
$\sigma \Delta$ Elevação	0,0071m	$\sigma \Delta$ Altura	0,0071m	$\sigma \Delta Z$	0,0039m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

	De	Para
Nome do ponto:	E0	E3
Arquivo de dados:	08192331-2.rnx	0826233m00-3.rnx
Tipo Receptor:	Unknown	HiPer
Número de série do receptor:	8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:	HiPer GD	HiPer GD
Medido até:	Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	1,5180m
	APC	1,6240m
		1,4200m
		1,5260m

Sumário da linha da base BL42 (E0 para E4)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 05:16:20	
Tipo de Solução:	L1 fixo	
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável	
Efeméride usada:	Transmitir	
Dados Met:	Padrão	
Distância do declive da linha da base:	81,7329m	
Máscara de Elevação:	10 graus	
Índice de variação:	17,3	
Variação de referência:	2,376	
RMS:	0,005m	
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0041m	
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0091m	
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 12:55:30.000	1493, 305730,000
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 13:15:45.000	1493, 306945,000
Tempo de ocupação:	00:20:15.000	

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s
Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E4				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554421,6070m	Latitude	22°06'52,84384"s	Latitude	22°06'52,84384"s
Dir Leste	457326,2874m	Longitude	51°24'49,50849"O	Longitude	51°24'49,50849"O
Elevação	402,6572m	Altura	402,6572m	Altura	402,6572m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	39,6885m	Azimute p frente SN	60°56'08"	Δ X	69,4958m

Δ Dir Leste	70,9550m	Distância elip.	81,3313m	Δ Y	26,8900m
Δ Elevação	8,0408m	Δ Altura	8,0408m	Δ Z	33,5787m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0018m	σ Azimute p frente SN	5,428 segundos	σ Δ X	0,0028m
σ Δ Dir Leste	0,0026m	σ Distância elips.	0,0024m	σ Δ Y	0,0052m
σ Δ Elevação	0,0059m	σ Δ Altura	0,0059m	σ Δ Z	0,0033m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

	De	Para
Nome do ponto:	E0	E4
Arquivo de dados:	08192331-2.rnx	0826233m01-4.rnx
Tipo Receptor:	Unknown	HiPer
Número de série do receptor:	8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:	HiPer GD	HiPer GD
Medido até:	Base da montagem da antena	Base da montagem da antena

Altura antena	Medido	1,5180m	1,4200m
	APC	1,6240m	1,5260m

Sumário da linha da base BL39 (E0 para E5)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 05:03:17	
Tipo de Solução:	L1 fixo	
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável	
Efeméride usada:	Transmitir	
Dados Met:	Padrão	
Distância do declive da linha da base:	112,0974m	
Máscara de Elevação:	10 graus	
Índice de variação:	12,5	
Variação de referência:	1,893	
RMS:	0,005m	
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0030m	
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0048m	
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 13:17:10.000	1493, 307030,000
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 13:37:45.000	1493, 308265,000
Tempo de ocupação:	00:20:35.000	

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s
Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E5				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554411,1511m	Latitude	22°06'53,18718"s	Latitude	22°06'53,18718"s
Dir Leste	457363,4526m	Longitude	51°24'48,21227"O	Longitude	51°24'48,21227"O
Elevação	397,8177m	Altura	397,8177m	Altura	397,8177m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	29,2326m	Azimute p frente SN	75°01'36"	Δ X	93,2610m
Δ Dir Leste	108,1203m	Distância elip.	112,0447m	Δ Y	56,6747m
Δ Elevação	3,2013m	Δ Altura	3,2013m	Δ Z	25,6161m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0015m	σ Azimute p frente SN	2,964 segundos	σ Δ X	0,0029m
σ Δ Dir Leste	0,0022m	σ Distância elips.	0,0021m	σ Δ Y	0,0029m
σ Δ Elevação	0,0035m	σ Δ Altura	0,0035m	σ Δ Z	0,0016m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

		De	Para
Nome do ponto:		E0	E5
Arquivo de dados:		0819233l-2.rnx	0826233n-3.rnx
Tipo Receptor:		Unknown	HiPer
Número de série do receptor:		8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:		HiPer GD	HiPer GD
Medido até:		Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	1,5180m	1,4200m
	APC	1,6240m	1,5260m

Sumário da linha da base BL38 (E0 para E6)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 05:04:18
Tipo de Solução:	L1 fixo
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável
Efeméride usada:	Transmitir
Dados Met:	Padrão
Distância do declive da linha da base:	160,8662m
Máscara de Elevação:	10 graus
Índice de variação:	5,5
Variação de referência:	5,354
RMS:	0,008m
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0075m
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0176m

Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 13:39:30.000	1493, 308370,000
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 13:59:35.000	1493, 309575,000
Tempo de ocupação:	00:20:05.000	

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s
Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E6				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554410,3211m	Latitude	22°06'53,21861"s	Latitude	22°06'53,21861"s
Dir Leste	457413,5887m	Longitude	51°24'46,46240"O	Longitude	51°24'46,46240"O
Elevação	396,4668m	Altura	396,4668m	Altura	396,4668m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	28,4025m	Azimute p frente SN	79°58'53"	Δ X	131,4584m
Δ Dir Leste	158,2564m	Distância elip.	160,8456m	Δ Y	89,2196m
Δ Elevação	1,8504m	Δ Altura	1,8504m	Δ Z	25,2292m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0033m	σ Azimute p frente SN	4,154 segundos	σ Δ X	0,0045m
σ Δ Dir Leste	0,0025m	σ Distância elips.	0,0025m	σ Δ Y	0,0058m
σ Δ Elevação	0,0076m	σ Δ Altura	0,0076m	σ Δ Z	0,0045m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

	De	Para
Nome do ponto:	E0	E6
Arquivo de dados:	08192331-2.rnx	0826233n00-3.rnx
Tipo Receptor:	Unknown	HiPer
Número de série do receptor:	8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:	HiPer GD	HiPer GD
Medido até:	Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	
		1,5180m
	APC	
		1,6240m
		1,4200m
		1,5260m

Sumário da linha da base BL33 (E0 para E7)

Processado:	segunda-feira, ago 25, 2008 05:05:07
Tipo de Solução:	L1 fixo
Aceitabilidade da solução:	Solução aceitável
Efeméride usada:	Transmitir
Dados Met:	Padrão
Distância do declive da linha da base:	161,7580m
Máscara de Elevação:	10 graus

Índice de variação:	91,8		
Varição de referência:	0,077		
RMS:	0,001m		
Precisão horizontal 1-sigma (escalado):	0,0003m		
Precisão vertical 1-sigma (escalado):	0,0005m		
Hora de início (Hora GPS):	08/08/20, 14:08:00.000	1493, 310080,000	
Tempo de parada (Hora GPS):	08/08/20, 14:28:35.000	1493, 311315,000	
Tempo de ocupação:	00:20:35.000		

Componentes da linha da base (Marca para Marca)

De:	E0				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554381,9185m	Latitude	22°06'54,12836"s	Latitude	22°06'54,12836"s
Dir Leste	457255,3324m	Longitude	51°24'51,98887"O	Longitude	51°24'51,98887"O
Elevação	394,6164m	Altura	394,6164m	Altura	394,6164m
Para:	E7				
Grid		Local		WGS 84	
Dir Norte	7554369,0527m	Latitude	22°06'54,56104"s	Latitude	22°06'54,56104"s
Dir Leste	457416,4749m	Longitude	51°24'46,36557"O	Longitude	51°24'46,36557"O
Elevação	391,4206m	Altura	391,4206m	Altura	391,4206m
Linha da base:					
Δ Dir Norte	-12,8659m	Azimute p frente SN	94°43'15"	Δ X	121,0160m
Δ Dir Leste	161,1426m	Distância elip.	161,7164m	Δ Y	106,7565m
Δ Elevação	-3,1958m	Δ Altura	-3,1958m	Δ Z	-11,1273m

Erros padrão

Erros da linha da base:					
σ Δ Dir Norte	0,0010m	σ Azimute p	1,340 segundos	σ Δ X	0,0006m

		frente SN			
$\sigma \Delta$ Dir Leste	0,0007m	σ Distância elips.	0,0006m	$\sigma \Delta Y$	0,0015m
$\sigma \Delta$ Elevação	0,0020m	$\sigma \Delta$ Altura	0,0020m	$\sigma \Delta Z$	0,0016m

Matriz de covariância a posteriori

	X	Y	Z
X	0,000m ²		
Y	0,000m ²	0,000m ²	
Z	0,000m ²	0,000m ²	0,000m ²

Ocupações

	De	Para
Nome do ponto:	E0	E7
Arquivo de dados:	08192331-2.rnx	08262330-3.rnx
Tipo Receptor:	Unknown	HiPer
Número de série do receptor:	8QVBK4URHM	8RUS73RDKH
Tipo de antena:	HiPer GD	HiPer GD
Medido até:	Base da montagem da antena	Base da montagem da antena
Altura antena	Medido	
		1,5180m
	APC	1,6240m
		1,4200m
		1,5260m