

AJUSTAMENTO DE REDES GPS: USAR OU NÃO LINHAS DE BASE TRIVIAIS?

MAURÍCIO DOS SANTOS SILVA
VERÔNICA MARIA COSTA ROMÃO

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG
Departamento de Cartografia, Recife - PE
ccmauricio@globo.com
vcosta@ufpe.br

RESUMO - Neste trabalho é feita uma comparação entre os resultados de ajustamentos que usam todas as linhas de base (triviais e independentes) e ajustamentos que usam apenas linhas de base independentes, situação em que é possível fazer diferentes combinações. Procura-se determinar quão significativamente se alteram as coordenadas dos vértices da rede e suas incertezas. Com tal finalidade, foram usados dados de algumas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e dados de um conjunto de rastreios estáticos realizados durante um levantamento hidrográfico (LH) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), no decorrer do último trimestre de 2007, na cidade de Florianópolis-SC. Buscou-se adotar diversas combinações de pontos e configurações de rede, em diferentes dias de rastreamento. Os testes desenvolvidos mostraram que as coordenadas dos vértices pouco variam em função do procedimento adotado no ajustamento. Já as incertezas mostraram-se mais coerentes quando todas as linhas de base das sessões de rastreamento são ajustadas ao mesmo tempo. A forma como as incertezas variam no decorrer do dia, torna possível associá-las ao atraso ionosférico.

ABSTRACT – In this paper, results from adjustments of all the baselines (trivial and independent) of a session are compared with results from adjustment of only independent baselines, situation where it is possible to make different combinations. It is tried to determine how significantly the net stations coordinates and its uncertainties vary. To achieve this, it was used some data from the Brazilian Network for Continuous GPS Monitoring (RBMC) and some GPS static positioning obtained in a hydrographic survey carried out in Florianópolis – SC, by the Brazilian Navy. It was adopted many points combinations and net configurations, using data obtained in different days. The developed tests had shown that the coordinates of the stations had almost no variation in function of the procedure adopted in the adjustment. The uncertainties, otherwise, were more coherent when all the baselines of the sessions are adjusted together. The form as the uncertainties varies in elapsing of the day, becomes possible to associate them to the ionospheric delay.

1 INTRODUÇÃO

É comum que pontos rastreados em campo sejam pós-processados em programas adquiridos em conjunto com os receptores GPS geodésicos, os chamados programas comerciais, que geram coordenadas com suas respectivas incertezas. Esse tipo de programa faz, em um primeiro estágio, o processamento de linhas de base (LB). No segundo estágio, o ajustamento de sessão, surge uma dúvida: incluir ou não as linhas de base triviais? Esse é o nome que se dá àquelas LB que são originadas com dados da mesma sessão de rastreamento que já foram usados para gerar outras linhas, as linhas de base independentes.

Para avaliar o efeito do uso de LB triviais nos ajustamentos GPS, foram utilizados dados de um

levantamento hidrográfico realizado em Florianópolis-SC, pela Marinha do Brasil, no final de 2007, durante o qual foram executados rastreios estáticos usando receptores GPS geodésicos de dupla frequência. Foram utilizadas também algumas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), mantida pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os vértices utilizados distam de 2 a 1000 km entre si, e as sessões estudadas possuem de 3 a 6 vértices.

O uso dessas linhas triviais no ajustamento da sessão amplia artificialmente a redundância de dados e, por isso, os valores das incertezas resultantes para as coordenadas dos vértices ficam menores. Nesse caso, de acordo com estudos anteriores, as incertezas deveriam ser

multiplicadas por um fator $\frac{n}{2}$, onde n é o número de receptores, tornando-se maiores e alcançando um valor mais realista. Esse escalar não seria aplicável a ajustamentos feitos com linhas de base de sessões diferentes, somente para LB obtidas a partir de uma mesma sessão de rastreamento.

Em contrapartida, se as LB triviais não forem usadas no ajustamento, e somente as independentes forem usadas, as incertezas têm valores mais corretos, mas que variam conforme a combinação de LB independentes adotada. Qualquer que seja o caso, não foi registrada variação expressiva nas coordenadas, somente nas suas incertezas.

Os estudos a que se referem os parágrafos anteriores foram conduzidos a partir de sessões ajustadas isoladamente. O objetivo deste artigo é dimensionar o efeito do emprego de linhas de base triviais sobre as coordenadas e as incertezas dos vértices de uma rede GPS, quando o ajustamento é efetuado combinando LB de 2, 3 ou 4 sessões, usando um programa comercial de processamento.

Uma variação de poucos centímetros foi observada nas coordenadas quando se variou o número de sessões combinadas ou se trocaram as linhas de base selecionadas para os ajustamentos. As variações se mostraram presentes nas incertezas dessas coordenadas.

O escalar $\frac{n}{2}$ mostrou-se não aplicável à quase totalidade dos ajustamentos realizados nesta pesquisa. Os testes efetuados com sessões combinadas também recomendam a inclusão de linhas de base triviais no ajustamento de rede. Para compensar o aumento artificial na redundância é proposto um outro fator obtido empiricamente, que é função do número de vértices da rede e do número de sessões combinadas no ajustamento.

2 FONTES DE ERROS NOS RASTREIOS GPS

Três grupos de erros degradam o posicionamento GPS: os relacionados com os satélites (como efemérides imprecisas e erros no relógio), os relacionados com a propagação do sinal na atmosfera (atrasos troposférico e ionosférico) e os relacionados com os receptores (erro de relógio, ruídos, multicaminhamento, etc.).

2.1. Erros Associados aos Satélites

Gemael e Andrade (2004) afirmam que as efemérides transmitidas dos satélites GPS são obtidas por previsão, estimativa, extrapolação, o que deteriora, em parte, a sua precisão. O erro dessas efemérides é da ordem de 15 a 25m, e vai significar 1 ppm na precisão relativa (1 mm de erro no comprimento de uma base de 1 km), considerando-se um posicionamento relativo.

Neste trabalho todos os processamentos foram executados usando efemérides precisas, extraídas de

http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html. De acordo com Monico (2000), no cálculo das efemérides precisas adota-se um dos vários ITRF existentes, adensados no Brasil por meio do SIRGAS.

2.2. Erros Resultantes da Propagação do Sinal

Smith (1996) afirma que os efeitos atmosféricos são bem conhecidos nos levantamentos e que os sinais sofrem atrasos que podem gerar erros significativos. Esses erros ocorrem na trajetória do sinal através da ionosfera e da troposfera e são causados por:

- Refração troposférica – conforme Torge (2001), é o efeito causado no interior da troposfera, da tropopausa e da estratosfera, estendendo-se da superfície da Terra até 50 km altura. Segundo Monico (2000) a refração troposférica depende da densidade da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite, e afeta igualmente todas as frequências transmitidas pelos satélites. A refração anula-se no posicionamento relativo de estações próximas entre si. Porém, quando a distância entre as estações é grande (maior que 50 km), ou quando a diferença de altura entre elas é significativa (regiões montanhosas), as condições atmosféricas observadas em cada estação não se correlacionam (Seeber, 2003).

- Refração ionosférica – conforme Wolf e Ghilani (2006), a ionosfera, que fica entre 50 e 1500 km acima da terra, é primariamente composta por íons positivos que afetam a propagação das ondas eletromagnéticas e, segundo El Rabbany (1994), o atraso é proporcional ao número de elétrons livres ao longo da trajetória do sinal, o chamado *Total Electron Content* (TEC). Os mapas TEC dos dias rastreados nesta pesquisa, foram obtidos no endereço <http://madrigal.haystack.mit.edu/madrigal>.

Seeber (2003) afirma que as portadoras L1 e L2 sofrem diferentes atrasos na ionosfera e que os receptores de dupla frequência fazem uso dessa propriedade, corrigindo grande parte dos efeitos em razão da refração. Nesta pesquisa todos os receptores utilizados são de dupla frequência e não foram adotados modelos de correção ionosférica.

2.3. Erros Oriundos do Receptor

Neste grupo enquadram-se os erros originados nos arredores da estação, os multicaminhos, e na própria antena receptora, devido às variações no centro de fase da antena.

- Multicaminhos – segundo Seeber (2003), esse erro ocorre quando, além do sinal direto do satélite, reflexos desse mesmo sinal alcançam a antena do receptor. Os sinais são refletidos por ruas, corpos d'água, edificações, veículos, etc.

Se há suspeita de haver multicaminhos na área de rastreamento, Trimble (2001) recomenda que a estação seja ocupada por um período mais longo, de forma que no processamento haja dados suficientes para eliminar efeitos indesejados.

- Variação do centro de fase da antena – para a determinação de alturas exige-se o conhecimento exato da posição do centro de fase da antena. Entretanto, esse centro não é um ponto físico, nem tampouco estável. Para quaisquer antenas GPS o centro de fase muda conforme a direção dos sinais de um satélite, dependendo, sobretudo, da elevação desse satélite. Ignorar a variação nos centros de fase significa inserir erros verticais de até 10 cm na posição medida. Nesta pesquisa usou-se a altura do centro de fase L1, conforme dados de calibração fornecidos pelo National Geodetic Survey (NGS) no endereço <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>.

3 PRINCÍPIOS DE POSICIONAMENTO

De acordo com International (2005) há essencialmente 3 princípios de posicionamento por meio do GPS:

- Posicionamento Absoluto – fornece coordenadas em WGS84 em tempo real, com o uso de 1 receptor. São medidas pseudo-distâncias por meio do tempo que o código C/A leva para se deslocar do satélite ao receptor. É possível também ser feito usando-se as ondas portadoras, após um processo denominado inicialização, em que as ambigüidades dos satélites são determinadas.

- Posicionamento Relativo – tendo-se receptores instalados em dois pontos, é determinado o vetor que liga ambos. Conhecendo-se as coordenadas de um desses pontos, pode-se adicioná-las às componentes do vetor e as coordenadas do segundo ponto pode ser determinada (International, 2005). Por meio de um pós-processamento dos dados, eliminam-se erros e aumenta-se a exatidão das coordenadas. As coordenadas não são, assim, obtidas em tempo real.

- Posicionamento Diferencial – um receptor principal faz posicionamento absoluto, enquanto um segundo determina correções à pseudo-distância ou à fase das portadoras. Dispondo dessas correções, o receptor principal tem a possibilidade de melhorar a exatidão das coordenadas. Se essas correções forem determinadas em tempo real e transmitidas imediatamente ao receptor principal, este vai poder obter coordenadas também em tempo real.

4 A REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO (RBMC)

Para realizar posicionamento relativo, o usuário deve dispor de dois ou mais receptores, estando um instalado em um ponto de coordenadas conhecidas. Com o advento dos chamados Sistemas de Controle Ativos, o usuário dispõe de receptores instalados em pontos de coordenadas precisas e rastreando permanentemente. No Brasil, tal sistema é mantido pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e recebe o nome de Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

As estações da RBMC desempenham justamente o papel do ponto de coordenadas conhecidas, eliminando

a necessidade de que o usuário instale receptores nas estações de referência.

A RBMC vem sendo integrada à Rede Incri de Bases Comunitárias (RIBaC). Isso fez com que houvesse um grande salto no número de estações: de 24 estações em 2006 para 44 estações em MAR/08. A expectativa é de que esse número chegue a 80 estações até 2009 (IBGE 2007).

Os dados coletados pelas estações estão sendo disponibilizados através do portal do INCRA (<http://ribac.incra.gov.br>) e do IBGE (<ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC>). No primeiro são disponibilizados arquivos horários com intervalo de coleta de cinco segundos, já no outro portal, os arquivos são diários com intervalo de coleta de 15 segundos (IBGE, 2007).

5 ERROS QUE AFETAM AS OBSERVAÇÕES

Segundo Machado e Monico (2004), a qualidade do resultado do ajustamento é limitada devido à impossibilidade do modelo matemático representar a realidade física com total fidelidade e às imperfeições do sistema de observação. Tais limitações são traduzidas nos erros inerentes às observações, os quais são divididos em três classes: grosseiros, sistemáticos e aleatórios (Gemael, 1994).

Dalmolin (2004) afirma que erros acidentais ou randômicos são uma dispersão com respeito à média, presentes nas medidas que representam uma mesma quantidade. Já os erros maiores que 3 vezes o desvio-padrão são, geralmente, oriundos de enganos de notação, digitação, identificação do objeto medido, etc, sendo chamados de erros grosseiros. Para os erros grosseiros, a única solução é descartar os dados e repetir as medições. Segundo Gemael (1994), os erros sistemáticos podem ser corrigidos por meio da aferição do instrumento de medida ou compensados com o uso de fórmulas matemáticas. Já os erros acidentais têm comportamento aleatório, são inevitáveis e o seu tratamento é baseado na teoria da probabilidade (Santos, 2006)

Os erros sistemáticos mais freqüentes nos rastreios GPS são, segundo Fernandes (2005), os relacionados no quadro 1.

6 AJUSTAMENTO DE REDES GPS

6.1. Linhas de Base Triviais e Linhas de Base Independentes

Em uma sessão de rastreio que use três receptores, três linhas de base são formadas. Porém, duas linhas, que vamos chamar de independentes, seriam suficientes para que se obtivessem as coordenadas de todos os pontos. Logo, a terceira linha é redundante. Linhas triviais são as linhas redundantes de uma sessão.

Quadro 1 – Erros sistemáticos mais frequentes nos trabalhos com GPS

ERRO SISTEMÁTICO	FORMA DE REDUZIR
Erros orbitais	Técnica de observação (posicionamento relativo ou diferencial) ou uso de efemérides precisas.
Erros dos relógios dos satélites e dos receptores	Técnica de observação (posicionamento relativo ou diferencial).
Refração ionosférica	Modelo matemático ou técnica de observação (posicionamento relativo ou diferencial); uso de rastreadores de dupla frequência.
Multicaminhamento	Uso de <i>groundplane</i> ou antena <i>choke ring</i> , escolha adequada do local do vértice ou alongamento da sessão.
Excentricidade da estação	Múltipla ocupação do vértice.
Altura do centro de fase da antena	Múltipla ocupação do vértice.

Qualquer sessão de rastreio que use três ou mais receptores vai produzir linhas de base triviais. Conforme Seeber (2003), para n receptores operando simultaneamente, valem as seguintes expressões:

número total de linhas de base produzidas na sessão

$$\frac{n(n-1)}{2} \quad (6.1)$$

número de linhas de base independentes da sessão

$$(n-1) \quad (6.2)$$

Observando a figura 1, nota-se que a terceira linha (AB), que fecha a figura, foi produzida com dados já utilizados para produzir RA e RB.

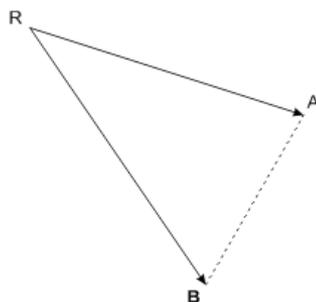


Figura 1 – Linha de base trivial

Sendo assim, quando ela é usada no ajustamento, cria uma falsa redundância. Para que essa linha possa contribuir para a solução do problema, deve ser oriunda de uma outra sessão de rastreio. (Fernandes 2004).

6.2. Desdobramentos do Uso de Linhas de Base Triviais

Os valores das coordenadas dos pontos envolvidos no ajustamento não variam de forma expressiva com a inclusão das LB triviais no ajustamento, fato citado por Beck et al. (1989) e Hollmann et al (1990). Em outras palavras, a variação significativa ocorre somente nas incertezas dessas coordenadas.

Conforme a equação 2.6, se são usados n receptores em uma determinada sessão de rastreio, serão produzidos $n-1$ vetores independentes. Os demais são triviais, combinações lineares dos independentes e que, por isso, nem sequer produzem erro de fechamento. Vincenty (1987) afirma que a covariância atua como um elo de ligação entre as LB, garantindo a solução única, independente do ponto mantido fixo na redução inicial.

A seguinte linha de ação pode ser adotada a partir de um programa comercial:

- fazer inicialmente um processamento, gerando $\frac{n(n-1)}{2}$ linhas de base, o que faz do método uma aproximação. Nesse caso os vetores não são mais linearmente correlacionados, pois o elo de ligação entre eles – a covariância – se perdeu ou nem mesmo foi obtida. Esse tipo de solução já produz erros de fechamento; e

- fazer o ajustamento de sessão. Se apenas LB independentes forem usadas, o resultado dependerá de quais $n-1$ linhas de base são selecionadas dentre as diversas combinações possíveis, e não haverá solução única.

Com isso, a abordagem do processamento de linhas de base funciona melhor se forem efetivamente usadas todas as $\frac{n(n-1)}{2}$ linhas de base no ajustamento.

No Canadá, já no início da década passada, Canadá (1992) recomendava o uso das linhas de base triviais nos ajustamentos de sessão.

Em contrapartida, quando isso é feito, há um aumento artificial nos graus de liberdade e os sigmas das coordenadas apresentam-se menores e irreais. Para compensar esse efeito, Vincenty (1987), Beck et al. (1989), Craymer et al. (1990), Craymer e Beck (1992) e Craymer (1995) defendem que as incertezas das coordenadas devem ser escaladas por $\frac{n}{2}$.

Craymer e Beck (1992) afirmam que o uso do escalar $\frac{n}{2}$ só é eficaz, dentre outras coisas, se:

- Nenhuma LB ficar fora do ajustamento; e
- As ambigüidades forem inteiras.

Na prática, não é simples garantir que as condições acima relacionadas sejam atendidas.

7 CÁLCULOS REALIZADOS

Foram utilizados dados GPS de duas fontes:

- Levantamento realizado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) em Florianópolis-SC, durante o qual foram executados rastreamentos estáticos usando receptores geodésicos de dupla frequência; e
- Estações da RBMC.

Para o processamento das redes formadas por pontos rastreados em Florianópolis pela DHN, dois pontos foram adotados como fixos e tiveram suas coordenadas calculadas a partir das estações da RBMC apresentadas na figura 2:

- CPSC – adotado como fixo nos dias 276, 316 e 319; e
- CAIS – adotado como fixo no dia 277.

Para testar o efeito do uso de LB triviais, foram processados e ajustados dados de rastreios GPS realizados em sessões:

- Com 3, 4, 5 e 6 receptores, fazendo com que as configurações abrangessem a maior parte dos casos práticos;
- Com diferentes tempos de rastreio – 10min a 17h
- Em diferentes períodos do dia – entre 00:00 e 20:30
- Com diferentes comprimentos de linhas de base – de 2 a 1000 km

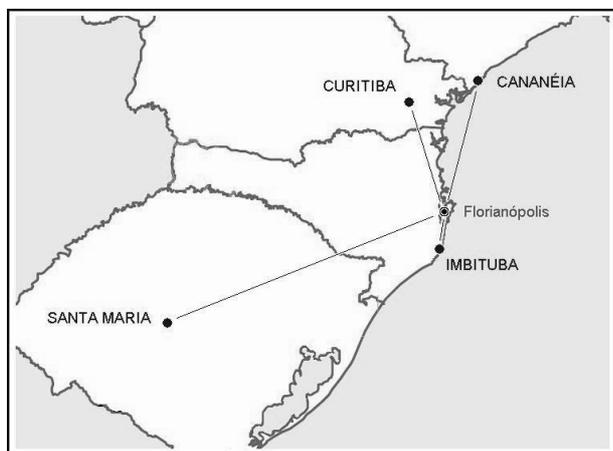


Figura 2 - Estações da RBMC usadas no cálculo de CPSC e CAIS

Além disso, os ajustamentos foram feitos combinando diferentes números de sessões: uma, duas, três ou quatro sessões.

8 ORGANIZAÇÃO E REGISTRO DOS RESULTADOS

De maneira geral, cada sessão isolada foi submetida a um processamento de linhas de base usando-se o programa TGO. Dispondo-se de todas as $\frac{n(n-1)}{2}$

linhas de base dessa sessão, foi feito inicialmente um ajustamento de sessão usando-se todas as LB. Fez-se o registro das coordenadas determinadas e suas incertezas. Em seguida foram feitos ajustamentos de sessão a partir de uma série de diferentes combinações de LB independentes. Novamente todas coordenadas e incertezas foram registradas. Por fim, foram calculadas as médias das coordenadas e das incertezas obtidas a partir de LB independentes e foi determinada, para cada vértice, a razão entre o sigma médio oriundo das LB independentes e o primeiro sigma resultante do uso de todas as LB. O mesmo cálculo foi executado para outras sessões e combinações de LB independentes.

A partir de 44 tabelas produzidas nesses cálculos, foi efetuada uma análise dos resultados obtidos e elaborada uma nova tabela onde foram anotados:

- a) a variação absoluta das coordenadas horizontais e verticais dos vértices;
- b) a variação relativa das incertezas das coordenadas;
- c) o valor médio das incertezas horizontais e verticais; e
- d) o escalar a ser aplicado às incertezas das coordenadas resultantes do ajustamento que usou todas as LB, a fim de tornarem-se mais realistas.

A tabela 1 traz o fator escalar médio encontrado nos ajustamentos, de acordo com o número de estações rastreadas e o número de sessões combinadas no ajustamento.

Tabela 1 – Resumo dos Resultados obtidos no TGO

nº. de vértices	nº. de sessões	Fator escalar	
		$\frac{n}{2}$	Calculado
3	2	1,5	1,36
4	2	2	1,53
	4	2	1,30
5	2	2,5	1,71
	3	2,5	1,50
6	3	3	1,60

As seguintes opções foram feitas por ocasião do processamento e ajustamento dos dados:

- Foram usadas efemérides precisas produzidas pelo IGS;
- Considerou-se não haver erros na medição da altura da antena e na centragem do tripé;
- Foi usada máscara de elevação de 13°; e
- Os erros fornecidos eram de 1 sigma, o que equivale a um grau de confiança de 68%.

9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

9.1. Coordenadas e suas Incertezas

Os resultados foram organizados em tabelas e fornecem subsídios interessantes para a análise dos ajustamentos executados. Nessas tabelas foram estabelecidos diversos indicadores que favorecem a comparação entre os diversos resultados.

Para cada combinação de LB independentes que se ajusta são produzidas diferentes latitudes, longitudes e alturas, com suas respectivas incertezas (sigmas), para cada vértice da rede. As seguintes informações puderam ser extraídas dessas tabelas:

a) Em 83% dos casos, as coordenadas horizontais (latitude e longitude) de cada um dos vértices da sessão de rastreo (ou combinação de sessões) estudada variou menos que **0,001"** de uma combinação de LB independentes ajustada para outra. Isso representa uma variação linear menor que **3cm**;

b) No caso da coordenada vertical (a altura geométrica), a variação não ultrapassou o valor de **4 cm** em 83% dos casos;

c) Quando duas sessões foram combinadas, as coordenadas horizontais produzidas apresentaram valores similares aos obtidos nos ajustamentos das sessões isoladas. Já a coordenada vertical apresentou um valor intermediário aos obtidos em cada sessão isolada;

d) A variação dos sigmas foi, em média, 3 vezes maior nos ajustamentos combinando sessões. Isso indica que os sigmas obtidos a partir das sessões isoladas mostraram-se mais homogêneos que os obtidos nos ajustamentos feitos a partir da combinação de sessões.

e) As incertezas das coordenadas foram maiores na componente vertical. Tanto nos ajustamentos de sessões isoladas, como nos ajustamentos combinando sessões, o sigma vertical foi, em média, três vezes maior que os horizontais;

f) Os sigmas obtidos nos ajustamentos envolvendo combinação de sessões foram, em média, dez vezes maiores que os sigmas das sessões isoladas. Esses valores de incertezas podem ser considerados mais realistas, em virtude de terem sido calculados a partir de uma porção maior de dados; sobretudo dados obtidos em diferentes horários ou dias;

g) Ainda nos ajustamentos combinando duas ou mais sessões de rastreo, a variação das incertezas, de uma combinação de LB independentes para outra, foi em média de 300%;

Dependendo do conjunto de LB independentes selecionado para o ajustamento, pode-se ter uma variação significativa nos sigmas das coordenadas. Isto é, o processo de seleção das LB torna-se decisivo. Em um dos ajustamentos essa variação no valor dos sigmas das coordenadas é de até 670%.

9.2. Fator Escalar

Somente em alguns casos os fatores escalares, calculados com base em resultados de ajustamentos de

sessões isoladas, coincidiram com a expressão $\frac{n}{2}$,

conforme defendem Vincenty (1987), Beck et al. (1989), Craymer et al. (1990), Craymer e Beck (1992) e Craymer (1995). Nesta pesquisa, houve 31 experimentos em que sessões de rastreo foram ajustadas isoladamente antes de serem combinadas em pares. Nesses ajustamentos, apenas em seis casos o fator escalar obtido em uma das sessões

do par foi igual ou bem próximo de $\frac{n}{2}$. Somente em dois

casos ambas as sessões do par, ajustadas isoladamente,

resultaram em escalares iguais ou bem próximos de $\frac{n}{2}$.

Nos demais 83% dos casos os escalares oscilaram de 0.1 até 10. Isso evidencia o quanto instável é o valor do escalar para situações de sessões isoladas.

Porém, quando múltiplas sessões são ajustadas em combinado, os valores do escalar é bem mais coerente com expressões dependentes de n . A expressão abaixo, obtida empiricamente no decorrer desta pesquisa, fornece uma boa aproximação para o fator escalar dos ajustamentos que combinam linhas de base independentes de mais de uma sessão:

$$1,10 \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^{\frac{1}{s}} \quad (9.1)$$

Onde:

n número de receptores na sessão; e

s número de sessões combinadas no ajustamento.

Na terceira coluna da tabela 2 foi relacionado cada fator escalar médio encontrado nos ajustamentos, conforme o número de estações rastreadas e o número de sessões combinadas no ajustamento.

Tab. 2 – Fator escalar obtido conforme o número de vértices ajustados

nº. de vértices (n)	nº. de sessões (s)	Fator obtido nos ajustamentos	$1,10 \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^{\frac{1}{s}}$
3	2	1,36	1,35
4	2	1,53	1,56
	4	1,30	1,31
5	2	1,71	1,74
	3	1,50	1,49
6	3	1,60	1,59

Na coluna da direita foram relacionados os valores de escalar obtidos a partir da expressão empírica, conforme a equação 9.1.

9.3. Variação dos Resultados no Decorrer do Dia

Com base em sessões de 90 min, rastreadas em diferentes momentos do dia e ajustadas isoladamente, foi possível estimar que horários do dia proporcionam resultados de menores incertezas. Para produzir uma padronização que favorecesse a comparação dos sigmas, todos os dados ajustados foram de uma rede formada por 4 pontos da RBMC.

Por meio do gráfico na figura 2 é possível notar que os ajustamentos que apresentaram menores sigmas foram resultantes dos rastreios realizados entre 03:00 e 04:30 e entre 19:00 e 20:30. Já os maiores sigmas concentram-se entre 13:00 e 17:00.

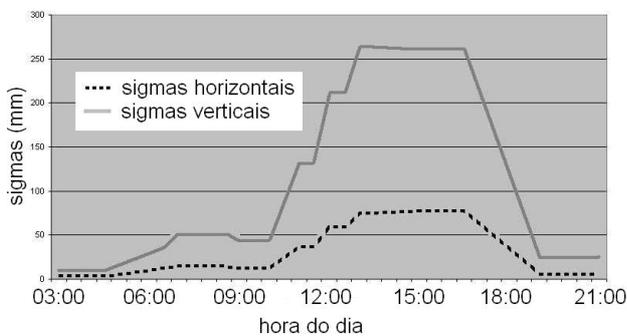


Fig 2 – Valores médios das incertezas no decorrer do dia

A indicação do gráfico está coerente com o que foi abordado sobre refração ionosférica no item 2.2, e condiz com os mapas TEC estudados e cuja amostra encontra-se na figura 3.

10 CONCLUSÕES

Pouca variação pode ser observada nas coordenadas dos vértices das redes, em função do número de sessões combinadas, ou em função das linhas de base selecionadas. As possíveis variações se observam nas incertezas dessas coordenadas.

Observou-se que os sigmas das coordenadas obtidas nos ajustamentos que usam todas as LB da sessão são menores que a média dos sigmas obtidos nas combinações de LB independentes. Porém, como a inclusão das linhas de base triviais produz uma falsa redundância no ajustamento, as incertezas geradas nos ajustamentos feitos só com LB independentes tornam-se mais realistas. Em contrapartida, o resultado desse tipo de ajustamento varia conforme a combinação de LB independentes feita.

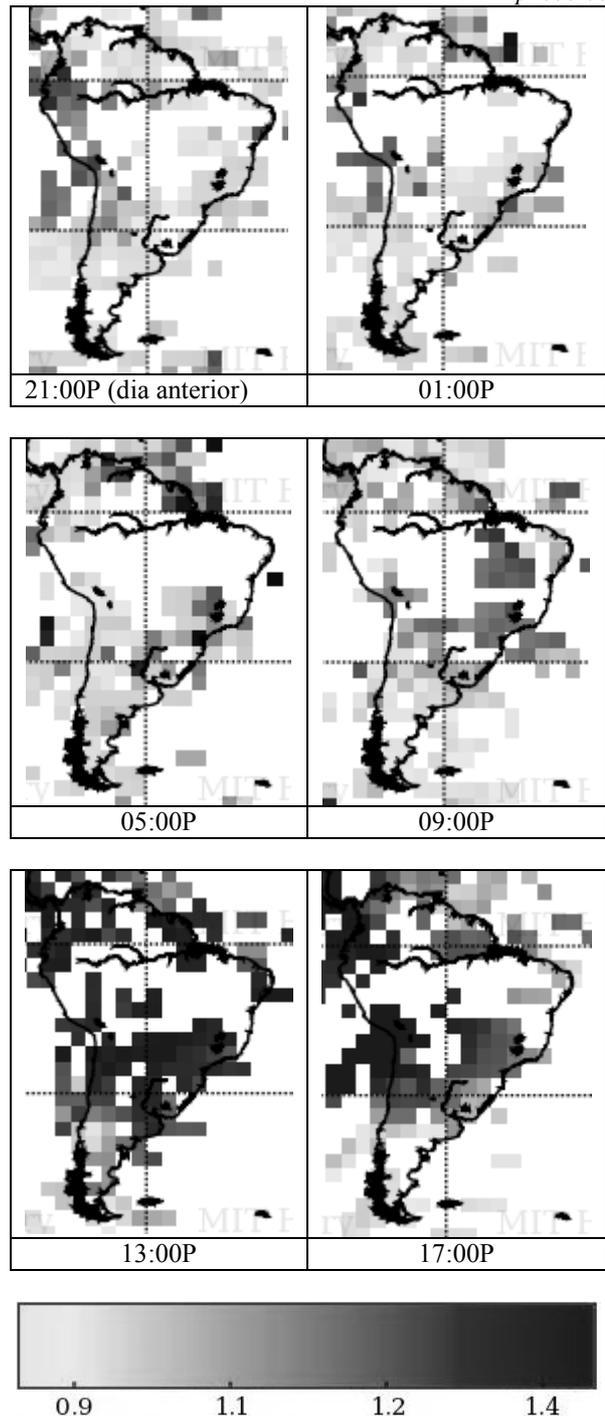


Fig 6 – Amostra de mapas TEC para o dia 274

Isso faz com que alguns autores, já citados nesta pesquisa, afirmem que a opção mais adequada é fazer o ajustamento com todas as linhas de base, evitando o problema da diversidade de resultados, devendo as incertezas ser multiplicadas por $\frac{n}{2}$. Quanto a esse assunto, o seguinte pode ser verificado:

a) O fator $\frac{n}{2}$ é sugerido por outros autores para escalar

as incertezas das coordenadas oriundas de ajustamentos de sessões isoladas. Estudos anteriores não contemplaram os ajustamentos que combinam linhas de base rastreadas em momentos distintos, ou seja, diferentes sessões de rastreamento. Além disso, algumas condições deveriam ser atendidas para que o fator seja aplicável. Essas condições, citadas no item 6.2, são difíceis de serem atendidas na prática. Por fim, em poucos ajustamentos feitos nesta

pesquisa, o fator $\frac{n}{2}$ mostrou-se aplicável; e

b) No caso dos ajustamentos de linhas de base de diferentes sessões, os escalares, a serem aplicados às incertezas resultantes do ajustamento quando todas as LB, tiveram comportamento bastante homogêneo. De maneira empírica, puderam ter seus valores correlacionados ao número de vértices da rede (n) e ao número de sessões (s), por meio da expressão 9.1.

O fato de os sigmas verticais terem valores três vezes maiores que os horizontais condiz com as características do sistema GPS, que privilegia o posicionamento horizontal.

Ainda que os ajustamentos de redes a partir de sessões isoladas produzam incertezas, em média, dez vezes menores, esses valores devem ser considerados irrealistas. A combinação de sessões proporciona uma melhor amostragem de dados, obtidos em diferentes condições.

Nos ajustamentos de LB independentes de sessões combinadas não devem ser adotadas linhas de base que, sendo de sessões distintas, se sobreponham. É provável que esse procedimento reduza a rigidez da rede, além de diminuir o número de circuitos fechados. O que foi denominado aqui de circuito é cada um dos diversos triângulos formados pelos vértices da rede.

Por fim, pode-se fazer uso de ajustamentos com 1 sessão (sessão isolada), desde que a informação de incerteza não seja de importância fundamental.

Ficou evidente que a refração ionosférica interferiu de forma expressiva nas incertezas das coordenadas. Torna-se, assim, muito recomendável fazer uma consulta aos mapas TEC na fase de planejamento do rastreamento GPS, a fim de obter informações sobre o horário do dia em que o atraso ionosférico é menos intenso.

REFERÊNCIAS

BECK, N.; DUVAL, R.; TAYLOR, P. **GPS Processing Methods: Comparison with Precise Trilateration**. Journal of Surveying Engineering, Vol. 115, nº 2, 1989. p 181-197.

CANADA CENTRE FOR SURVEYING (CCS). **Guidelines and Specifications for GPS Surveys**. Release 2.1. Vancouver: Geodetic Survey Division, 1992. 63p.

CRAYMER, M.R.; WELLS, D.E.; VANICEK, P.; DEVLIN, R.L. **Specifications for Urban GPS Surveys**. Surveying and Land Information System, vol 50, nº 4, 1990. p 251-259

CRAYMER M. R.; BECK, N. **Session Versus Baseline Processing**. International Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation: New Mexico, 1992. p 995-1004.

CRAYMER, M.R. **Recommended Procedure for the Adjustment of Individual GPS Baseline Solutions** - Internal Report. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, 1995. 1p.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. 2 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2004. 175p.

EL-RABBANY, A.E-S. **The Effect of Physical Correlations on the Ambiguity Resolution and Accuracy Estimation in GPS Differential Positioning**. Tese (Pós-doutorado em Filosofia). Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report nº 170. Fredericton: University of New Brunswick, 1994. 161p.

FERNANDES, R. A. **Linhas de Base Independentes e Redundância em Redes GPS**. Anais Hidrográficos, Tomo LXI. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2004. p 35-42.

FERNANDES, R. A. **Teoria dos Erros** - Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2005. 467p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Integração da RBMC e RIBaC**. Revista Ponto de Referência, nº 2. Rio de Janeiro, IBGE, 2007. p 22-23.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações - Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 1994. 319p.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J.B. **Geodésia Celeste**. Curitiba: Editora UFPR, 2004, 389p.

HOLLMANN, R.; OSWALD, W.; WELSCH, W. **Processing of GPS Phase Observations in Every Day Life: How Much Can Various Network Solutions Differ and How Can They Be Compared?** Manuscripta Geodaetica, Vol. 15, 1990. p 124-136.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Manual on Hydrography** - Publication M-13. 1 ed. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2005, 540 p.

MACHADO, W. C.; MONICO, J. F. G. **Controle de Qualidade do Ajustamento Recursivo de Observações GPS em Linhas de Base Curtas.** Boletim de Ciências Geodésicas, Vol 10, nº 2. Curitiba: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2004. p 123-140

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

SANTOS, A. J. P. M. **Proposta de Ajustamento para Melhoria da Confiabilidade e Precisão dos Pontos de Redes Geodésicas para Fins Topográficos Locais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Transportes). São Carlos: Universidade de São Paulo (USP), 2006. 183p.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications.** 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SMITH, J. R. **Introduction to Geodesy – The History and Concepts of Modern Geodesy.** New York: John Wiley & Sons, 1996. 224p.

TORGE, W. **Geodesy.** 3 ed. New York: Walter de Gruyter, 2001. 416p.

TRIMBLE GEOMATICS OFFICE (TGO) Version 1.5 – **WAVE Baseline Processing User Guide.** Sunnyvale, EUA: Trimble Navigation Limited, 2001. 178p.

VINCENY, T. **On the Use of GPS Vectors in Densification Adjustments.** Surveying and Mapping, Vol. 47, No. 2, 1987. p 103-108.

WOLF, P. R.; GHILANI, C.D. **Elementary Surveying – An Introduction to Geomatics.** 11 ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006. 916p.