

Variação do Centro de Fase de Antenas GPS na Determinação da Posição de alta Precisão

GPS antenna phase center variations for high precision positioning determination

Jaime Freiburger Jr. ¹
Kurt Seitz ²
Michael Mayer ²
Bernhard Heck ²
Cláudia Pereira Krueger ¹

¹ Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geomática
www.cienciasgeodesicas.ufpr.br
Curitiba-PR, Brasil
jaime@ufpr.br
ckrueger@ufpr.br

² Universität Karlsruhe (TH)
Geodätisches Institut
www.gik.uni-karlsruhe.de
Karlsruhe, Alemanha
mmayer@gik.uni-karlsruhe.de
seitz@gik.uni-karlsruhe.de
heck@gik.uni-karlsruhe.de

Resumo: O objetivo deste trabalho é investigar a influência das características do centro de fase de antenas GPS na determinação de coordenadas geodésicas. As coordenadas foram determinadas segundo três diferentes modelagens da antena. Os resultados foram comparados com resultados os provindos da modelagem correta. Mostrou-se que se as correções do centro de fase das antenas forem negligenciadas na estimação das linhas de base, elas influenciarão o resultado final em variações de coordenadas da ordem do milímetro nas componentes horizontais e na ordem do centímetro na componente vertical.

Palavras-chave: *Offset* do centro de fase de antenas GPS, variações do centro de fase, variação de coordenadas, deslocamento.

Abstract: The goal of this paper is to investigate the influence of the GPS antenna phase center characteristics on coordinate estimation. Coordinate differences were obtained from three processing strategies with regard to the correct GPS antenna modelling using a GPS software. The comparisons have shown that neglecting phase center corrections in the baseline estimation may influence the position on the order of millimeters for the horizontal components and centimeters for the vertical component.

Keywords: GPS antenna phase center offset, phase center variation, coordinates variation, displacement.

1. INTRODUÇÃO

As variações do centro de fase (*Phase Center Offset*, denotadas pela sigla PCV) das antenas GPS apresentam-se como uma grandeza geométrica de influência direta no posicionamento GPS dada pela alteração da medida de fase e conseqüente alteração da medida de distâncias. Os centros de fase médios nas portadoras L1 e L2 podem estar deslocados de alguns milímetros do eixo de simetria da antena, onde é realizada a tomada de medição do sinal (Chong e Kam, 2000, p. 464). Esta não-coincidência do centro de fase eletrônico com o centro mecânico é uma característica que se deve às diferenças construtivas de cada instrumento, portanto dependente da realidade eletrônica (tipo e construção das partes de recepção) e mecânica (material, forma e tamanho do invólucro) do instrumento (Wanninger, 2002, p. 51). A este deslocamento constante tridimensional chama-se *offset* do centro de fase médio (*Phase Center Offset*, denotado pela sigla PCO).

As variações do centro de fase (PCV) consistem de um deslocamento adicional, de caráter sistemático, que se comporta conforme o ângulo de incidência dos sinais GPS, portanto da configuração espacial dos satélites (azimute e ângulo de elevação) (Wübbena et al., 2000). A descrição das PCV se fundamenta em um ponto de referência físico na antena (ARP – *antenna reference point*), no centro de fase eletrônico médio ou *offset* médio (PCO – *phase center offset*) e nas respectivas variações (PCV) (Menge, 2003, p. 61). Na figura 1 observa-se uma representação dos centros de fase nas portadoras L1 e L2 e as variações associadas.

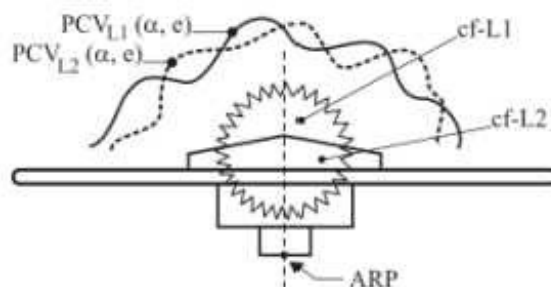


Figura 1 : Centros de fase em L1 e L2.

Os valores de correção destes deslocamentos estão fundamentados em uma exata descrição dessas variações em deslocamentos dependentes da direção em recepção puntiforme em relação ao ARP. As coordenadas tridimensionais do *offset* do centro de fase médio em L1 e L2 são fornecidos pelos fabricantes da maioria dos modelos de antenas GPS a fim de que sejam introduzidos no processamento das linhas de base. Da mesma forma, a modelagem das PCV pode ser conduzida via métodos de calibração a fim de que sejam compensadas no processamento das linhas de base em soluções de alta precisão (Rothacher e Schmid, 2003).

No trabalho proposto, realizou-se o processamento de cinco linhas de base providas de uma campanha GPS realizada no observatório do *Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)*. Os processamentos foram conduzidos segundo quatro possibilidades de modelagem do centro de fase das antenas envolvidas. Por meio de técnicas especiais, foi avaliada a influência das correções na determinação das coordenadas precisas e analisada a contribuição dos valores de correção na solução de posicionamento.

2. ELEMENTOS DE ESTUDO

Os dados selecionados para a realização das análises são provenientes de uma campanha realizada em setembro de 2003 pela Universidade de Karlsruhe, Alemanha. O objeto do estudo delimitava o efeito de multicaminho dos sinais GPS (Lacerda, 2003, p. 1). Nestes experimentos, cinco marcos geodésicos foram empregados como estações relativas. Estes marcos se localizam no observatório do *Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)* conforme ilustra a figura 2.

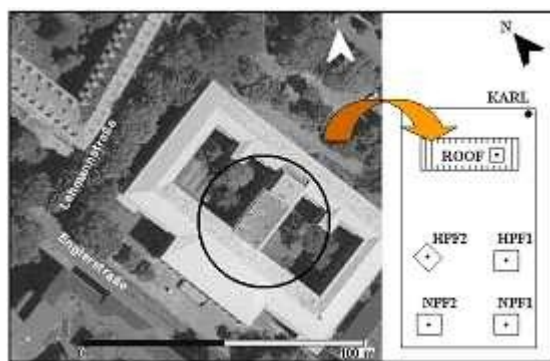


Figura 2 : Disposição das estações GPS – *Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe*.

Foram empregadas quatro antenas Trimble Compact L1/L2 wGP (receptor Trimble 4000 SSI) que foram instaladas nos marcos NPF1, NPF2, HPF2 e ROOF. Um conjunto antena-receptor modelo Trimble 4800 Internal foi instalado na estação HPF1. Foram realizadas observações pelo método relativo estático com taxa de 30 segundos de gravação e obtidos em seções de 24 horas, referentes aos dias GPS 267 e 268. O processamento foi conduzido em relação às coordenadas da estação de referência KARL, pertencente à SAPOS (*Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung*), a rede nacional alemã de serviços de posicionamento por satélites.

3. PROGRAMA GPSURVEY

As observações foram processadas com emprego do programa computacional GPSurvey. Trata-se de um conjunto de aplicativos desenvolvidos para avaliação e controle de projetos geodésicos com emprego do GPS. O processamento das observações foi conduzido com o módulo denominado *Weighted Ambiguity Vector Estimator* (WAVE).

3.1 Configuração e preparo dos dados

Os dados a serem processados podem ser inseridos no programa GPSurvey em formato de arquivo RINEX. A estação de referência deve ser selecionada como estação de controle fixo contendo suas coordenadas precisas. As dimensões físicas da antena a serem consideradas no cálculo da altura ao marco são obtidas a partir de um arquivo de texto denominado *antena.ini*. Trata-se de um cadastro de antenas onde cada instrumento é descrito por um grupo de informações, dentre elas o nome do arquivo de texto com extensão *pct* (*phase correction table*) que contém uma tabela de valores de correção do centro de fase da antena (PCO e PCV). O quadro 1 exemplifica uma seção do arquivo *antena.ini* em que constam algumas informações do modelo de antena Trimble 4800 Internal.

Quadro 1 – Seção do arquivo *antena.ini* (antena Trimble 4800 Internal)

```
[4800]
Name=4800 Internal
DCName=4800 Internal
Manufacturer=Trimble
Class=Survey
PartNumber=
CharCode=I8
Type=38
MeasMethod0=0.10920,0.03180,0.00000,"Reading from hook using 4800 tape"
MeasMethod1=0.00000,0.15560,0.00000,"Measured to bottom of antenna mount"
RINEXMethod=1
RINEXName=4800 INTERNAL
PhaseCorrTable=t4800.pct
Freq=2
```

Os arquivos pct são exclusivos para cada modelo de antena. Eles contêm, dentre outras informações, os valores dos *offsets* do centro de fase e as correções das variações do centro de fase em elevação. O quadro 2 exibe um trecho do conteúdo do arquivo *T4800.pct* (modelo Trimble T4800).

Observa-se que são informados os *offsets* médios do centro de fase em L1 e L2 nas componentes norte, leste e vertical assim como as correções das variações do centro de fase em elevação nas duas portadoras, entre outras informações.

Quadro 2 – Seção do arquivo *4800.PCT*

```

Processor name   : MRGPCT 1.0
Merge time      : Thu Sep 11 16:34:10 1997
Calibrated antenna : 4800
Mean phase center (mm) North East Up
L1NominalOffset =    0.3 -2.5 18.8
L2NominalOffset =    0.1 -2.1 27.9
Elevation range (deg) Start Stop Step
ElevationRange =     5  90  5
Azimuth step size (deg)
AzimuthStep = 0
Azimuth/elevation corrections (mm)
AZ=0
L1
1.8 4.4 5.2 6.1 7.4 8.9 10.2 10.8 10.8 10.2
9.0 7.6 6.1 4.6 3.2 2.0 0.9 0.0
L2
-3.4 -2.3 -0.2 1.4 2.3 2.6 2.7 2.6 2.4 2.2
2.0 1.6 1.2 0.8 0.3 -0.0 -0.2 0.0

```

3.2 Processamento dos dados: estratégias e objetivos

Nos procedimentos de cálculo adotados considerou-se apenas o resultado da observável L1, uma vez que o programa GPSurvey fornece suas soluções baseadas apenas na portadora L₁ para linhas de base curtas (máximo 30 metros). As soluções foram obtidas por meio do processamento das linhas de base para as quais foram empregados os ângulos de elevação iguais a 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 graus e lançadas em planilhas eletrônicas individuais. Os dados referentes às cinco antenas (quatro antenas Trimble Compact L1/L2wGP e uma antena Trimble 4800 Internal) foram trabalhados em conjunto, porém analisados separadamente. Os resultados das antenas Compact L1/L2 wGP foram agrupados em uma solução única representada pela média aritmética das soluções.

A fim de ser avaliada a influência das correções do *offset* e das variações do centro de fase das antenas GPS nas coordenadas finais, propuseram-se quatro diferentes possibilidades de modelagem do centro de fase destes instrumentos. Na tabela 1 estão enumeradas estas proposições com a respectiva descrição e representação simplificada.

Estas proposições foram concretizadas a partir da manipulação do conteúdo do arquivo pct, de forma que para simular ausência de modelagem do *offset* do centro de fase (PCO) foram atribuídos valores zero aos respectivos campos.

O processamento das observações GPS forneceu as coordenadas cartesianas X, Y e Z das estações em cada uma das quatro possibilidades de modelagem do centro de fase das antenas. A figura 3 ilustra a organização dos instrumentos e pilares envolvidos e uma representação resumida desses procedimentos.

Tabela 1: Proposições para a modelagem do centro de fase.

Proposição	Características	Representação
1	Modelagem correta da antena. Consideradas as correções dos offsets do centro de fase d_N e d_L bem como os valores de correção das PCV especificadas;	$d_N, d_L + pcv$
2	Atribuição de valor zero aos offsets do centro de fase d_N e d_L e considerados os valores de correção das PCV;	$d_N = d_L = 0 + pcv$
3	Atribuição de valor zero aos offsets do centro de fase d_N e d_L bem como às correções das PCV;	$d_N = d_L = 0 - pcv$
4	Consideração dos offsets do centro de fase d_N e d_L e Atribuição de valor zero às correções das PCV.	$d_N, d_L - pcv$

Nota: d_N e d_L são as componentes norte e leste do *offset* do centro de fase.

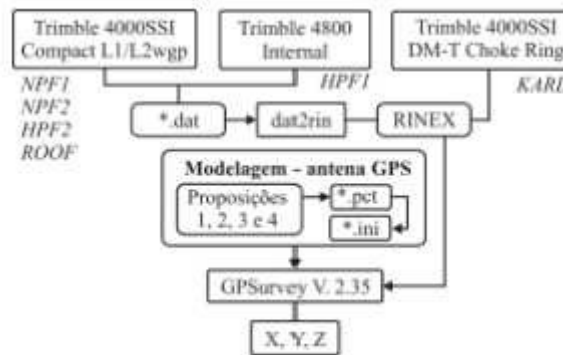


Figura 3 : Determinação das coordenadas X, Y e Z.

1 ANÁLISE DAS PROPOSIÇÕES

A posição relativa das estações, obtidas de acordo com cada proposição, foi descrita em relação às coordenadas cartesianas da estação de referência KARL. Assim, obtiveram-se as diferenças de coordenadas por meio da equação

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}_i^e = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i^e - \begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \end{pmatrix}_K^e \quad (1)$$

onde dx , dy e dz são as componentes do vetor posição, X , Y e Z são as coordenadas cartesianas da estação relativa e X_K , Y_K e Z_K são as coordenadas cartesianas da estação de referência KARL. O índice e indica o ângulo de elevação empregado no processamento e i a proposição de modelagem aplicada à antena da estação relativa.

As componentes do vetor posição podem ser reduzidas para um sistema topocêntrico local, sendo expressas pelas coordenadas norte (dn), leste (dl) e vertical (dv). Este cálculo é realizado por meio da equação (2) (Heck, 2003, p. 48), em que se acrescentaram os índices e e i :

$$\begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_i^e = \begin{pmatrix} -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}_i^e \quad (2)$$

onde φ e λ são a latitude e a longitude geodésicas da estação KARL.

A variação das coordenadas dn , dl e dv pode ser avaliada quando estas são comparadas com valores de referência. Considerando a modelagem correta das antenas, estes valores podem ser as coordenadas oriundas de observações processadas em um determinado ângulo de elevação α (equação 3) ou coordenadas oriundas de observações processadas com um mesmo ângulo de elevação que o das demais proposições (equação 4).

$$\begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta l \\ \Delta v \end{pmatrix}_1^e = \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_1^e - \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_1^\alpha \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta l \\ \Delta v \end{pmatrix}_i^e = \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_i^e - \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_1^e \quad (4)$$

Assim, as diferenças Δn , Δl e Δv formadas a partir destas comparações representam a variabilidade dos resultados de posicionamento gerados pelo mecanismo de cálculo do programa GPSurvey em função da modelagem do centro de fase e do ângulo de elevação dos satélites empregado no processamento das observações. Nas seções seguintes são analisadas as variações das coordenadas dn_i , dl_i e dv_i em função das proposições e do ângulo de elevação empregado a fim de se estudar as possibilidades de modelagem do centro de fase das antenas.

4.1 Iguais ângulos de elevação

Visando verificar as diferenças de coordenadas entre proposições, estabeleceram-se observações processadas com ângulo de elevação de 15° . Foi procedido ao cálculo da diferença entre as coordenadas dn , dl e dv provindas das proposições 2, 3 e 4 e as respectivas coordenadas provindas da modelagem correta das antenas (proposição 1). Este cálculo foi realizado conforme a equação 4, assumindo a forma

$$\begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta l \\ \Delta v \end{pmatrix}_i^{15^\circ} = \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_i^{15^\circ} - \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_1^{15^\circ} \quad (5)$$

A tabela 2 apresenta os *offsets* do centro de fase (PCO) bem como as diferenças Δn , Δl e Δv obtidas para a segunda, terceira e quarta proposições, representadas por P2, P3 e P4, respectivamente.

Mediante os dois modelos, observa-se que o módulo das diferenças provenientes da segunda proposição ($d_N=d_L=0 +pcv$) é igual ao dos valores de *offsets* dados, uma vez que apenas as correções das PCV foram aplicadas. Observa-se que a soma dos resultados provenientes da segunda ($d_N=d_L=0 +pcv$) e quarta ($d_N,d_L -pcv$) proposições completam os resultados provenientes da terceira proposição ($d_N=d_L=0 -pcv$) em que nenhuma correção foi aplicada. Nota-se que os valores das diferenças verticais foram representativas quando da ausência da modelagem das PCV. Estes valores podem ser verificados nas figuras da seção 4.3 (ângulos de elevação 15°).

Tabela 2 – Diferença de coordenadas

Modelo	Componente	PCO (mm)	$\Delta n, \Delta l, \Delta v$ (mm)		
			P2	P3	P4
4800 Internal	Norte	0,3	-0,3	-0,4	-0,1
	Leste	-2,5	2,5	2,5	0
	Vertical	18,8	0	-31,7	-31,7
Compact L1/L2 wgp	Norte	1,5	-1,5	-1,9	-0,4
	Leste	-1,5	1,5	1,4	-0,1
	Vertical	5,6	0	-35,7	-35,8

4.2 Proposição 1

As análises seguintes baseiam-se em um estudo comparativo das coordenadas dn , dl e dv provenientes do processamento em diferentes ângulos de elevação aplicando-se a modelagem correta das antenas. Foram tomados como valores de referência as coordenadas obtidas a partir de observações processadas com ângulo de elevação de 5° . As diferenças Δn , Δl e Δv foram calculadas conforme a equação (3) na forma

$$\begin{pmatrix} \Delta n \\ \Delta l \\ \Delta v \end{pmatrix}_1^e = \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_1^e - \begin{pmatrix} dn \\ dl \\ dv \end{pmatrix}_1^{5^\circ} \quad (6)$$

onde o índice e denota o ângulo de elevação para o qual as coordenadas dn , dl e dv estão relacionadas.

A figura 4 ilustra os resultados da antena Trimble 4800 Internal provenientes das medições realizadas no pilar HPF1. Nota-se que as diferenças das coordenadas verticais variaram de até 12,8mm seguida pelas coordenadas norte com variação na ordem do milímetro e coordenadas leste com variação inferior ao milímetro. Verifica-se que as diferenças verticais tendem a crescer com o aumento do ângulo de elevação.

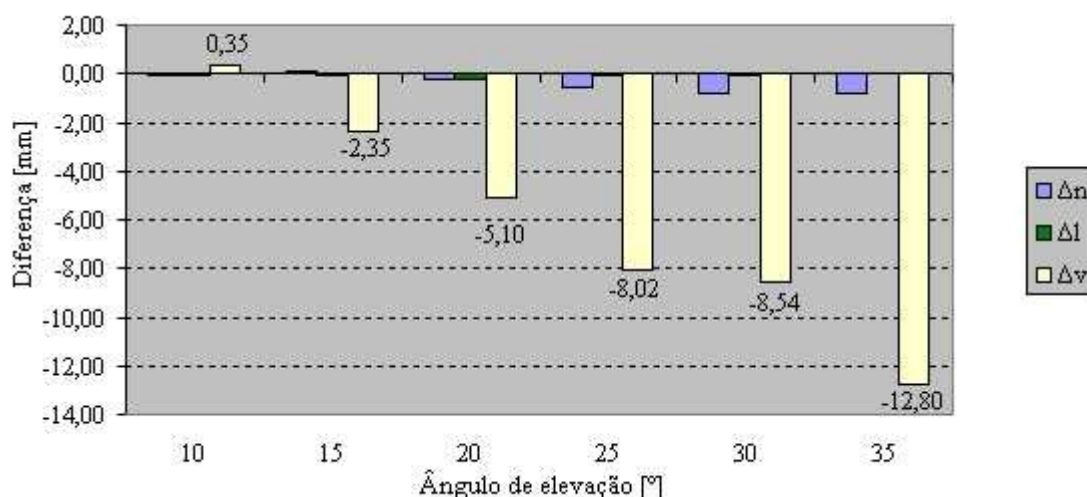


Figura 4 : Diferenças de coordenadas obtidas mediante a antena Trimble 4800 Internal, pilar HPF1, dia-GPS 267.

A figura 5 ilustra os resultados de uma antena Trimble Compact L1/L2wgp posicionada no pilar NPF2. Verifica-se a tendência das diferenças Δn , Δl e Δv crescer com o aumento do ângulo de elevação com ênfase na direção vertical.

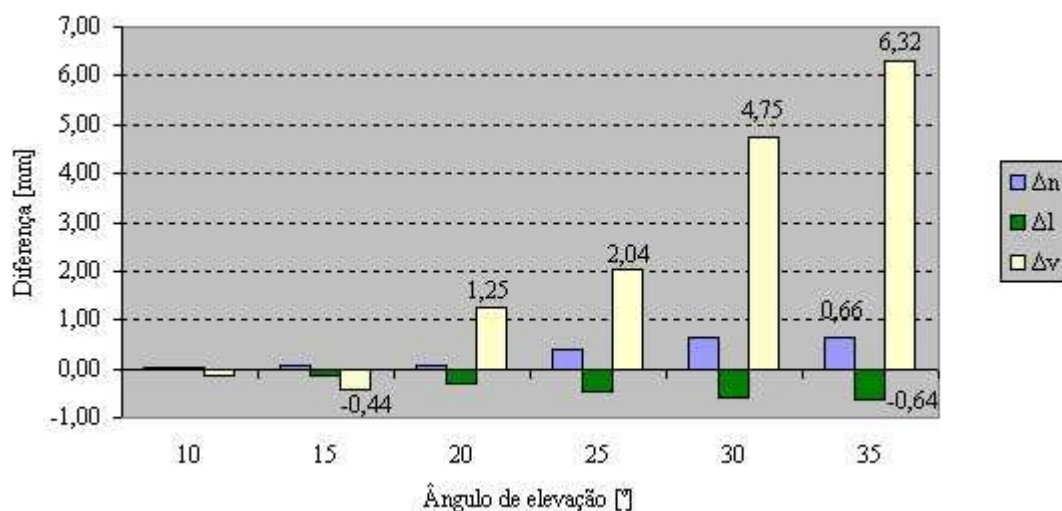


Figura 5 : Diferenças de coordenadas obtidas mediante a antena Trimble Compact L1/L2wgp, pilar NPF2, dia-GPS 267.

4.3 Demais proposições

As seguintes análises baseiam-se em um estudo comparativo das coordenadas norte (dn), leste (dl) e vertical (dv) provenientes do processamento com os ângulos de elevação considerados. Os resultados obtidos a partir da modelagem correta do centro de fase foram tomados como referência. As diferenças Δn , Δl e Δv foram calculadas conforme a equação (4). As figuras 6 e 7 ilustram as diferenças na proposição 2 ($d_n=d_l=0 +pcv$) para os modelos 4800 Internal e Compact L1/L2wgp, respectivamente.

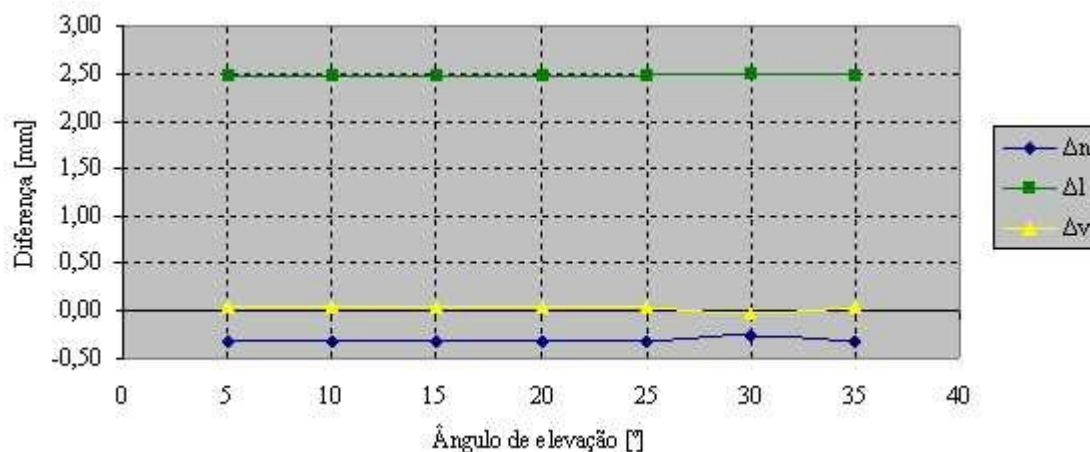


Figura 6 : Diferenças de coordenadas obtidas mediante a antena 4800 Internal, proposição [$d_n=d_l=0 +pcv$], dia-GPS 268.

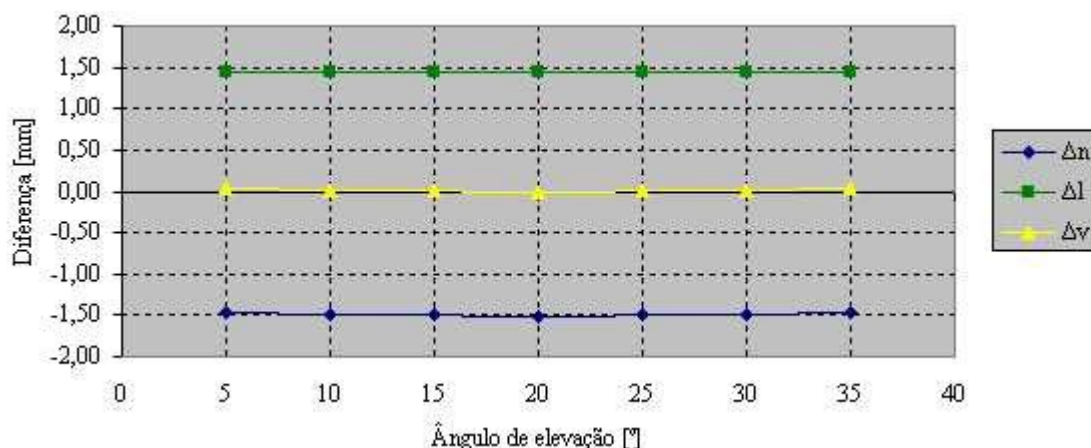


Figura 7 : Diferenças de coordenadas obtidas mediante a antena Compact L1/L2wgp, proposição $[dn=dl=0 +pcv]$, dia-GPS 268.

Observa-se que os *offsets* do centro de fase se manifestaram nos resultados apresentados. Eles são equivalentes aos valores definidos pela modelagem original das antenas e se apresentam constantes conforme aumenta o ângulo de elevação.

Os valores do *offset* vertical foram inseridos no processamento, logo as diferenças verticais (Δv) resultaram próximas a zero mostrando que não ocorreram alterações significativas nestas coordenadas. As componentes horizontais da terceira proposição resultaram próximas às da proposição anterior em virtude da não inclusão dos valores de *offset* no processamento (figuras 8 e 9).

As alterações significativas limitaram-se nas diferenças verticais, que podem ser atribuídas à ausência de modelagem das variações do centro de fase (condição *-pcv*).

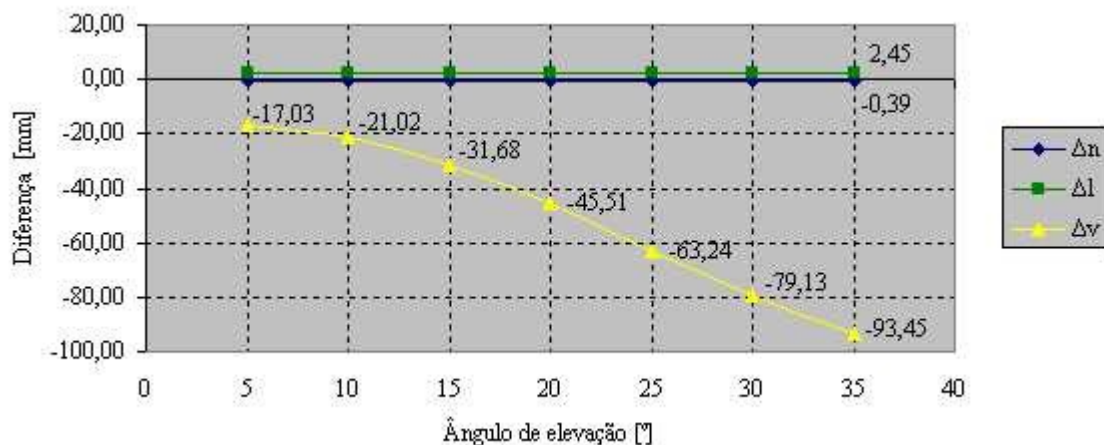


Figura 8 : Diferenças de coordenada obtidas mediante a antena Trimble 4800 Internal, proposição $[dn=dl=0 -pcv]$, dia-GPS 267.

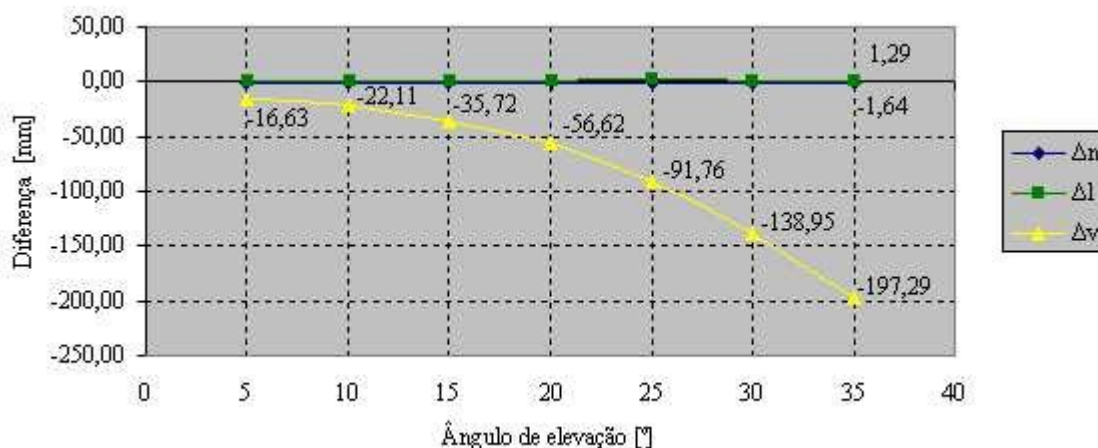


Figura 9 : Diferenças de coordenada obtidas mediante a antena Trimble Compact L1/L2wgp, proposição [dn=dl=0 -pcv], dia-GPS 267.

A análise da quarta proposição é visualizada nas figuras 10 e 11. Observa-se que a introdução dos valores do *offset* do centro de fase compensou estas diferenças visto que Δn e Δl resultaram em valores próximos a zero. Os erros na componente vertical Δv continuaram efetivos e cresceram conforme o grau de elevação. Consta-se que a ausência de modelagem das variações do centro de fase (condição -pcv) afetou principalmente as medições verticais.

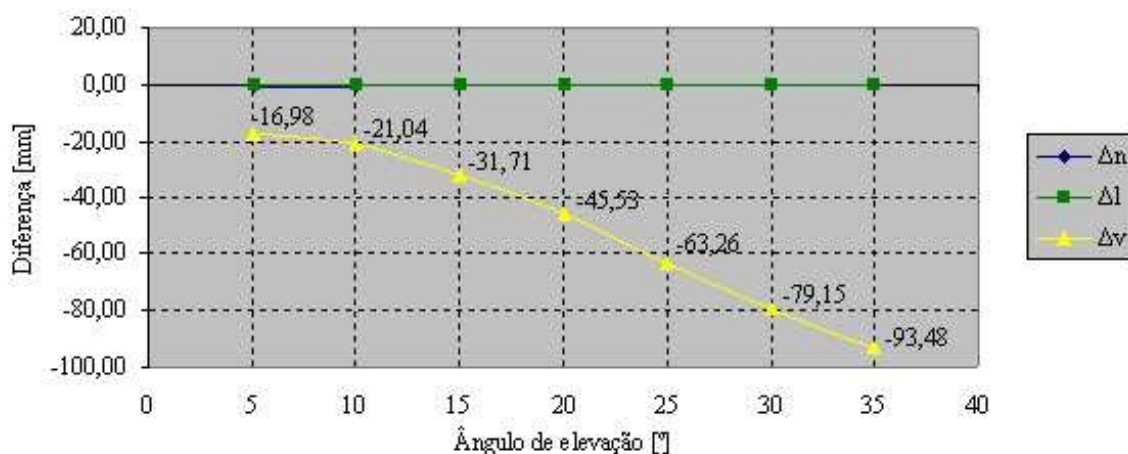


Figura 10 : Diferenças de coordenadas obtidas mediante a antena Trimble 4800 Internal, proposição [dn,dl -pcv], dia-GPS 267.

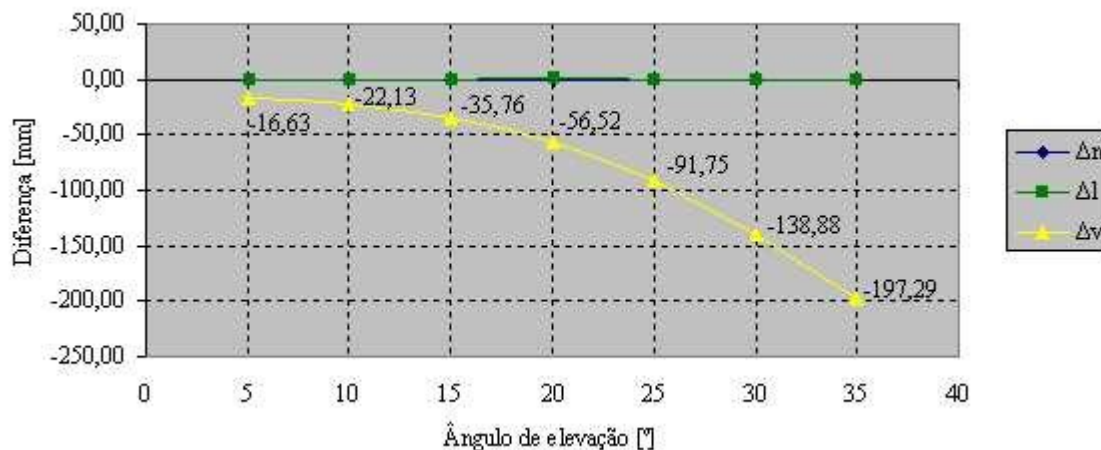


Figura 11 : Diferenças de coordenada obtidas mediante a antena Trimble Compact L1/L2wgp, proposição [dn,dl -pcv], dia-GPS 267.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, as correções do PCO e das PCV associadas de dois modelos de antenas GPS foram testadas em quatro possibilidades de modelagem do centro de fase destes instrumentos. Após a determinação das linhas de base, as diferenças de coordenadas foram calculadas em um sistema de referência local a fim de se verificar o efeito de cada modelagem sobre as componentes vertical e horizontal.

As análises mostraram que as diferenças de coordenadas em determinados ângulos de elevação correspondem exatamente aos valores de correção do PCO dos modelos de antena considerados, de forma que a modelagem incorreta do centro de fase dos instrumentos envolvidos pode introduzir diferenças na ordem de milímetros na componente horizontal e centímetros na componente vertical.

A magnitude dessas variações é representativa em atividades geodésicas e apontam a importância de se considerar as características do centro de fase das antenas GPS no processamento de observações GPS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro a esta pesquisa. O suporte técnico-científico foi provido pelo *Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)* – Instituto de Geodésia da Universidade de Karlsruhe (TH) – ao qual os autores externam seus agradecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chong, A. K.; Kam, B. B. (2000). A checking technique for high precision GPS antennas. **Survey Review**, v. 35, n. 277, p. 464-473.
- Heck, B. (2003). **Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung**: Klassische und moderne Methoden. 3. Auf. Heidelberg: Wichmann.
- Lacerda, C. F. (2003). **An Investigation on Multipath Effects in GPS Code and Phase Observations**. Karlsruhe, 2003. 70 f. Diplom. Geodetic Institute of Karlsruhe.
- Menge, F. (2003). **Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung**. Hannover, n. V, 2003. 199 f. PhD Thesis – University of Hannover.
- Rothacher, M.; Schmid, R. (2003). **Vergleich verschiedener Kalibriermethoden für GPS-Empfänger – und Satellitenantennen**. University of Munich.
- Wanninger, L. (2002). Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. **Zeitschrift für Vermessungswesen**, v. 127, n.1, p. 51-58.
- Wübbena, G.; Schmitz, M.; Menge, F.; Böder, V; Seeber, G. (2000). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real Time. **Paper presented at ION GPS 2000**.