

Análises de Séries temporais resultantes do Processo de Integração de Redes geodésicas

Prof^a Msc. Maria Lígia Chuerubim ¹

Prof. Dr. João Carlos Chaves²

Prof. Dr. João Francisco Galera Monico ³

¹ UFU

Faculdade de Engenharia Civil (FECIV)

38408-100 Uberlândia MG

¹ marialigia@feciv.ufu.br

^{2, 3} UNESP

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

19060-900 Presidente Prudente SP

² jcchaves@fct.unesp.br

³ galera@fct.unesp.br

Resumo: Neste artigo apresenta-se uma metodologia de integração de redes GNSS (*Global Navigation Satellite System*) locais no contexto de uma solução regional para o Brasil, com base em dados gerados pelas redes ativas RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), GNSS SP (Rede GPS Ativa do oeste do Estado de São Paulo, e em soluções SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) no formato SINEX (*Software Independent Exchange Format*), utilizando o princípio da combinação das equações normais, contribuindo à análise das séries temporais das estações utilizadas com a identificação de efeitos sazonais e locais, bem com a manutenção e densificação da rede SIRGAS na América Latina.

Palavras chaves: Integração de redes GNSS, combinação de equações normais, séries temporais, SINEX.

Abstract: In this paper a methodology for integrating networks GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sites in the context of a regional solution for Brazil is presented, based on data generated by the active networks RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring), GNSS SP (GPS Active Network of Western São Paulo State, and solutions SIRGAS (Geodetic Reference System for Americas) in SINEX format (*Software Independent Exchange Format*), using the principle of the combining the normal equations, contributing to the analysis of time series of stations used with the identification of seasonal and local the effects, as well as the maintenance and densification and network SIRGAS in Latin America.

Keywords: Integration of GNSS networks, Combination of Normal equations, time series, SINEX.

1 Introdução

A estrutura de uma rede geodésica pode ser caracterizada por um conjunto de pontos materializados no terreno e conectados entre si, cujas posições foram determinadas por meio de observações e cálculos rigorosos. No que concerne ao estabelecimento de redes geodésicas, a integração é considerada, em um sentido mais amplo, como a estrutura mínima necessária ao estabelecimento de futuros levantamentos, que podem ser adicionados a redes

geodésicas já existentes a partir de métodos de ajustamento, ou ainda por processos de densificação de redes.

Dentre as formas de integração existentes pode-se citar a conexão entre sistemas de referência terrestres de mesma natureza ou de concepções distintas (geocêntrico e topocêntrico), com base no ajustamento de redes ou por meio de órbitas GPS – *Global Positioning System* (transmitidas e precisas) ou, ainda, com base em modelagens de transformação (transformação de similaridade) e distorção provenientes das materializações dos sistemas de referência, visando à integração entre esses sistemas no contexto nacional ou internacional. Neste contexto pode-se citar, como exemplo, a integração do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) ao SIRGAS, com base nas estações que compõem a RBMC; a conexão entre as redes SIRGAS e ITRS (*International Terrestrial Reference System*), através da utilização de produtos ITRF/IGS (*International GNSS Service*), efemérides precisas e coordenadas; a combinação entre soluções por apenas um único tipo de técnica de posicionamento espacial ou por diferentes técnicas espaciais como GPS, VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) (ROTHACHER, 2002).

Neste trabalho, o termo integração de redes refere-se à densificação de uma rede geodésica regional a partir do estabelecimento de redes geodésicas locais, com base em uma metodologia de integração de redes locais no contexto de uma solução regional para o Brasil, contribuindo à manutenção e densificação do SIRGAS na América do Sul, com base em processamentos contínuos das estações GPS pertencentes às redes ativas RBMC e a Rede GNSS SP (Rede GPS Ativa do oeste do Estado de São Paulo), com o intuito de monitorar a variação temporal das coordenadas destas estações, bem como a qualidade dos dados disponibilizados para a densificação desta rede.

2 Fundamentos envolvidos no processo de integração de redes geodésicas

No processamento, são aplicados os modelos das Duplas - Diferenças (DDs) das observáveis GPS para corrigir erros comuns às estações envolvidas no posicionamento estático. Desta forma, considerando-se uma rede geodésica constituída por  receptores e  satélites rastreados em   épocas distintas, tem-se que o vetor das observações formados entre as DDs de fase, tomando o satélite 1 como referência, obtém-se o vetor do conjunto de observações dado por:



onde  . A Matriz Variância-Covariância (MVC) do conjunto de observações será definida pela precisão de cada observação   e pela correlação existente entre esse conjunto de observações   em uma determinada época. Desta forma obtém-se a matriz Peso do conjunto de observações:



O vetor dos parâmetros incógnitos será dado por:



(3)

onde   . A matriz design  será dada pelas derivadas parciais em relação às componentes    e  de cada estação. Com base na matriz  , na matriz Peso (Equação 2) e no vetor de observações (Equação 1), obtém-se as equações normais   e  da rede local (GEMAEL, 1994).

Para realizar a integração dessas soluções com uma solução regional torna-se necessária a reconstrução das equações normais a partir das informações contidas nos arquivos SINEX da rede regional, como o fator de variância a posteriori   , parâmetros ajustados   e aproximados (X_0^R)  , MVC dos parâmetros ajustados   , bem como de um número mínimo de estações comuns a ambas as redes. Desta forma, com base na   e no  , obtém-se a  da rede regional:



(4)

E, a partir dos conjuntos de   e   , obtém-se o vetor X_a^R (X_0^R) :



(5)

com base no qual se torna possível obter a matriz   pela seguinte Equação:



(6)

Multiplicando-se ambos os lados da Equação 6 por  tem-se:



(7)

Com essas informações, a integração entre redes regionais e locais deve ser realizada em termos de suas equações normais obtidas, respectivamente, do processamento dos dados GPS e dos arquivos SINEX. Para tanto, tais soluções devem estar livres de injunções ou de fracamente injuncionadas, caso contrário, uma solução de forte injunção poderá deformar a geometria da rede e comprometer a integração entre as mesmas.

Portanto, com base em uma série temporal obtida a partir de várias soluções semanais, em uma determinada época de referência   , podem-se estimar as coordenadas de um conjunto de estações e suas respectivas velocidades, em uma determinada época  , com base em um conjunto de vetores-posição   e suas respectivas MVCs,  , a partir de  observações, ou seja:



,

(8)

em que cada corresponde à solução semanal integrada na época . Logo, considerando-se épocas e estações, tem-se a seguinte representação matricial:



$$\begin{bmatrix}
 X_i(t_1) - X_i^0(t_0) - V_{X_i}^0 \Delta t^1 \\
 X_i(t_2) - X_i^0(t_0) - V_{X_i}^0 \Delta t^2 \\
 \vdots \\
 X_i(t_k) - X_i^0(t_0) - V_{X_i}^0 \Delta t^k \\
 \hline
 X_n(t_1) - X_n^0(t_0) - V_{X_n}^0 \Delta t^1 \\
 X_n(t_2) - X_n^0(t_0) - V_{X_n}^0 \Delta t^2 \\
 \vdots \\
 X_n(t_k) - X_n^0(t_0) - V_{X_n}^0 \Delta t^k
 \end{bmatrix}
 \quad (9)$$

com , e , , na época , e , na época .

O desenvolvimento das equações de pseudo-observação (Equação 10) baseia-se na combinação de soluções semanais GPS, o que conduz à deficiência em orientação solucionada pelo conceito de uma rede sem rotação (NNR – *No Net Rotation*). Contudo, o desenvolvimento desta pesquisa comprehende estações localizadas em sua maioria na placa litosférica sul americana, o que implica que a aplicação da condição da condição NNR não influenciará nos resultados, uma vez que deve ser aplicada quando se tem um número de estações que representem a Terra em sua globalidade. Aplicou-se, portanto, a condição de origem (NNT – *No Net Translation*), por meio dos vértices das estações que estabelecem o datum da rede (MONICO, 2005):

$$\sum_{i=1}^n \vec{\Delta X}_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n \vec{\Delta V}_i = 0$$

$$,$$
(10)

onde  e  correspondem aos vetores das correções aos parâmetros aproximados e n ao número de estações que estabelecem o datum. Matricialmente essa condição é representada por:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(11)

onde a matriz  apresenta dimensões  , para cada estação envolvida nessa condição. Verifica-se, que a escolha das estações deve estar atrelada ao seu comportamento geofísico, localização geográfica e período de observação. A condição NNT (Equação 11) é introduzida somente na solução final, nas colunas correspondentes as coordenadas das estações que fazem parte da condição NNT, para que desta forma a solução não seja de forte injunção.

Desta forma, ao aplicar o conceito de NNT (Equação 11) a Equação (9) passará a ser representada por:

$$\begin{bmatrix} V_{X_1^1} \\ V_{X_1^2} \\ \vdots \\ V_{X_1^k} \\ \vdots \\ V_{X_n^1} \\ V_{X_n^2} \\ \vdots \\ V_{X_n^k} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \Delta^1 I & \cdots & 0 & 0 \\ I & \Delta^2 I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 \\ I & \Delta^k I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I & \Delta^1 I \\ 0 & 0 & \cdots & I & \Delta^2 I \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I & \Delta^k I \\ C_{NNT} & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X}_i^0(t_0) \\ V_{X_i}^0(t_0) \\ \vdots \\ \vec{X}_n^0(t_0) \\ V_{X_n}^0(t_0) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i(t_1) - X_i(t_0) - V_{X_i}^0 \Delta^1 \\ X_i(t_2) - X_i(t_0) - V_{X_i}^0 \Delta^2 \\ \vdots \\ X_i(t_k) - X_i(t_0) - V_{X_i}^0 \Delta^k \\ \vdots \\ X_n(t_1) - X_n(t_0) - V_{X_n}^0 \Delta^1 \\ X_n(t_2) - X_n(t_0) - V_{X_n}^0 \Delta^2 \\ \vdots \\ X_n(t_k) - X_n(t_0) - V_{X_n}^0 \Delta^k \\ 0 \end{bmatrix}$$
(12)

e, por conseguinte, o sistema de equações normais para cada solução individual, será dado por (MONICO, 2006):

$$N = A^T N_s A + C^T C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k N_s^i + C^T C & \sum_{i=1}^k N_s^i \Delta t_s^i \\ \sum_{i=1}^k N_s^i \Delta t_s^i & \sum_{i=1}^k N_s^i (\Delta t_s^i)^2 \end{bmatrix},$$
(13)

onde a matriz peso é igual à equação normal de cada solução semanal, ou seja,  , em que  representa o número de épocas. Nesta etapa, cada solução individual é conservada livre de injunções, para que possa ser utilizada na obtenção da solução final.

Portanto, o sistema de equações normais para o sistema de Equações (13) será dado por:

$$\begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^k N_{X_i} + C^T C & \sum_{i=1}^k N_{X_i} \Delta t_i & \dots & N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} & N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} \Delta t_i \\
 \sum_{i=1}^k N_{X_i} \Delta t_i & \sum_{i=1}^k N_{X_i} (\Delta t_i)^2 & \dots & N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} \Delta t_i & N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \\
 N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} & N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} \Delta t_i & \dots & \sum_{i=1}^k N_{X_n} & \sum_{i=1}^k N_{X_n} \Delta t_i \\
 N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} \Delta t_i & N_{X_n, X_1}^{i=1, \dots, k} & \dots & \sum_{i=1}^k N_{X_n} \Delta t_i & \sum_{i=1}^k N_{X_n} (\Delta t_i)^2
 \end{bmatrix} \xrightarrow{\rightarrow} \begin{bmatrix} \vec{X}_1^0(t_0) \\ \vec{V}_1^0(t_0) \\ \vdots \\ \vec{X}_n^0(t_0) \\ \vec{V}_n^0(t_0) \end{bmatrix} = \\
 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k N_{X_i}^i (\vec{X}_i(t_1) - \vec{X}_i^0(t_0) - \vec{V}_{X_i}^0 \Delta t^1) \\ \sum_{i=1}^k N_{X_i}^i \Delta t^i (\vec{X}_i(t_1) - \vec{X}_i^0(t_0) - \vec{V}_{X_i}^0 \Delta t^1) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k N_{X_n}^i (\vec{X}_n(t_1) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^1) \\ \sum_{i=1}^k N_{X_n}^i \Delta t^i (\vec{X}_n(t_1) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Desta forma, os parâmetros que não são comuns às soluções são preenchidos com zero, ou seja, ocorre a expansão para a matriz normal, de tal forma que cada solução semanal contenha os mesmos parâmetros. Assim, ao combinar  soluções semanais (coordenadas) obtém-se os parâmetros  e  de cada estação na época de referência  :

$$\begin{bmatrix} \vec{X}_1^0(t_0) \\ \vec{V}_1^0(t_0) \\ \vdots \\ \vec{X}_n^0(t_0) \\ \vec{V}_n^0(t_0) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Os parâmetros ajustados (Equação 15) compreendem a solução final do ajustamento (coordenadas e velocidades e respectivas precisões) de cada uma das estações com base nas soluções semanais estimadas a cada época.

3 Metodologia

Para a estimativa das coordenadas e velocidades das estações, buscou-se corrigir os principais erros que influenciam o posicionamento por satélites como: os efeitos de 1^a e 2^a ordem da ionosfera; a modelagem do atraso troposférico, com a aplicação de modelos empíricos (*Saastamoinen*) e funções de mapeamento (VMF - *Viena Mapping Function*); a modelagem absoluta das variações do centro de fase das antenas GPS e a aplicação das correções inerentes ao efeito das cargas dos oceanos (FES2004) e da atmosfera. Foram utilizados, para o período de dados (2006 a 2008), os arquivos de observação GPS no formato RINEX das estações Brasília (BRAZ), Bom Jesus (BOMJ), Cuiabá (CUIB), Imperatriz (IMPZ), Manaus (NAUS), Presidente Prudente (PPTE) e Viçosa (VICO) da RBMC, disponibilizados pelo IBGE, no seguinte endereço: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/RBMC/dados>, no formato RINEX. Foram utilizadas, ainda, soluções semanais SIRGAS compreendendo as estações SIRGAS-CON (Rede de Operação Contínua SIRGAS) disponíveis para este período, precisamente 193 estações, fracamente injuncionadas, no formato SINEX (<ftp://ftp.dgfi.badw-muenchen.de/pub/gps/SIR/>), bem como dados das estações Ilha Solteira (ILHA), Ourinhos

(OURI), Rosana (ROSA), São José do Rio Preto (SJRP) e Lins (LINS), pertencentes à Rede GNSS SP (<http://gege.prudente.unesp.br>).

Os dados GPS das redes locais foram corrigidos dos efeitos de 2^a ordem da ionosfera com o aplicativo RINEX_HO (MARQUES, 2008) e processados diariamente com o *software* Bernese 5.0, com base no ajustamento de “rede livre” (BERNESE, 2007). Essas soluções diárias são armazenadas e combinadas semanalmente com o módulo ADDNEQ2 do Bernese, que permite a combinação de soluções com base nas equações normais, resultando em soluções semanais locais livres de injunção. As soluções semanais da rede local, posteriormente, podem ser integradas a uma rede de âmbito regional como a rede SIRGAS. Para tanto, basta haver estações comuns entre as mesmas e utilizar soluções disponibilizadas pela rede regional em formatos que possibilitem a aplicação desta metodologia, como o formato SINEX.

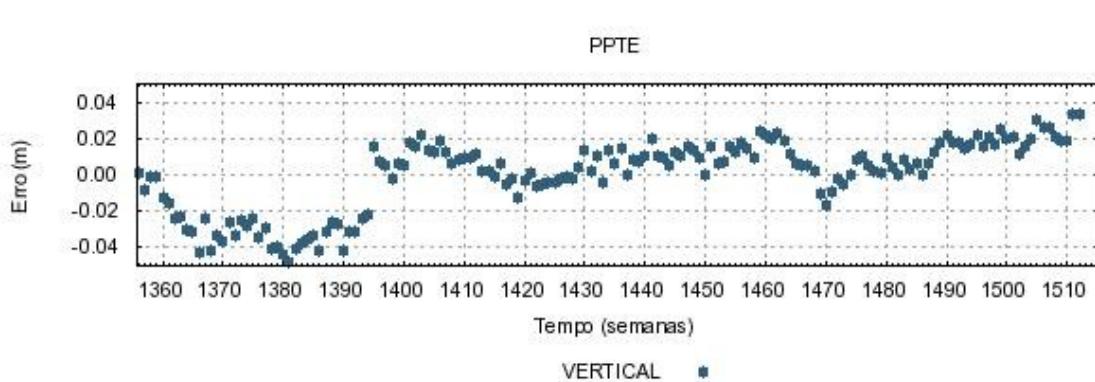
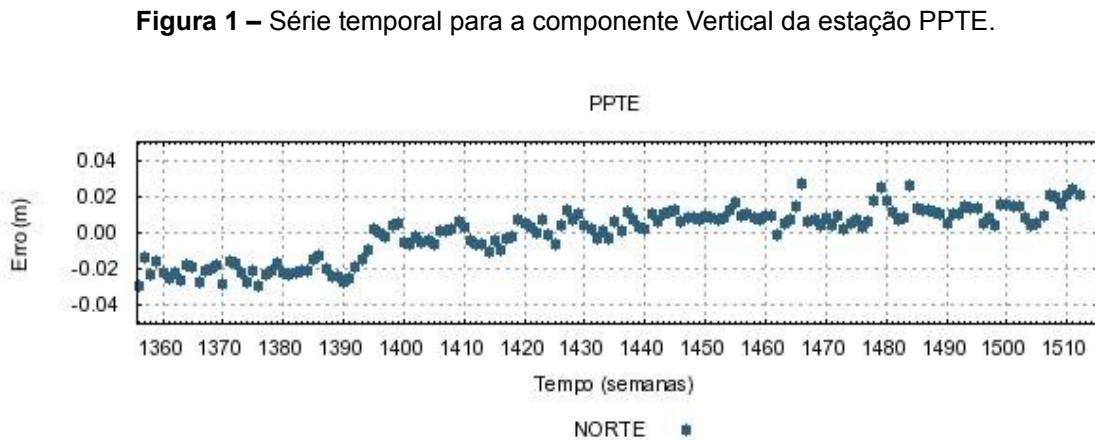
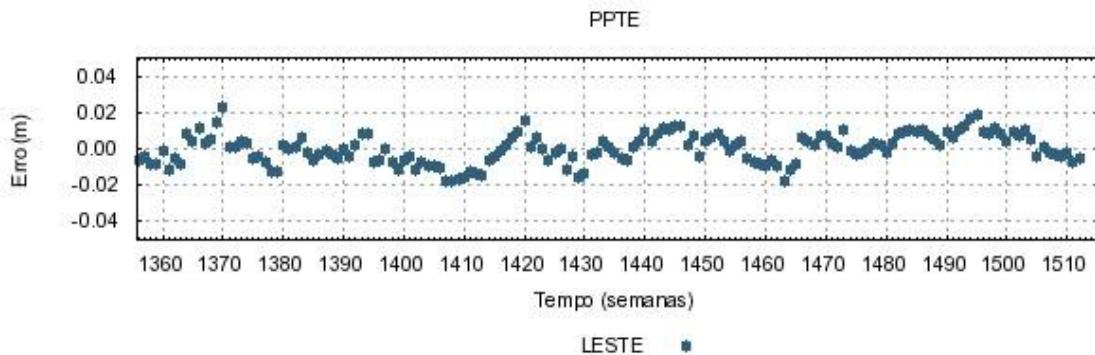
Neste trabalho, foram utilizadas as soluções semanais SIRGAS fracamente injuncionadas (*loosely constrained*), cujas equações normais foram reconstruídas utilizando-se o módulo SNX2NQ0 do Bernese. A integração entre essas redes foi feita com o módulo ADDNEQ2 de duas formas: rede livre (*free network*) e coordenadas injuncionadas (*coordinates constrained*). O primeiro caso aplica-se às soluções multianuais, em que se obtém coordenadas e velocidades das estações para um período maior e igual a três anos de dados. As soluções injuncionadas, destinam-se a fins práticos como atividades que envolvam posicionamento. Nessas soluções, as coordenadas das estações que definem o *datum* são injuncionadas e estimadas juntamente com as coordenadas das estações envolvidas no processamento.

4 Experimentos e resultados

Para o processamento adotou-se a época média de referência 2007,507, uma vez que a precisão das coordenadas se deteriora a medida que a época de referência definida se afasta da época média do intervalo de dados utilizado no processamento (2006 a 2008). Os resultados obtidos com o *software* Bernese, resultaram na estimativa das coordenadas de 193 estações, dessas estações apenas 92 tiveram suas velocidades estimadas por apresentarem um período e quantidade de dados de no mínimo 3 anos. Nesta etapa, as coordenadas das estações BOMJ, BRAZ, St. Croix VLBA/USA (CRO1), CUIB, IMPZ, Kourou (KOUR), La Plata (LPGS), NAUS, O'Higgins/Antarctica (OHI2), PPTE, Santiago (SANT), VICO foram estimadas com injunções relativas (*constrained*) na etapa de combinação das equações normais pelo módulo ADDNEQ2.

Com o intuito de analisar os resultados obtidos na época de referência 2007,507, realizou-se a comparação com a solução SIRGAS denominada SIR09P01 (época de referência 2005,0), disponíveis no endereço <ftp://ftp.dgfi.badw-muenchen.de/pub/gps/SIRGAS/>, e atualizada para a época de referência dos dados, para que dessa forma pudesse se calcular as discrepâncias entre essas soluções. O Erro Médio Quadrático (EMQ) foi de, aproximadamente, 5 mm para a componente X e de 3 cm para as componentes Y e Z. Com relação ao erro médio, este se apresentou maior para a componente Z com magnitude de 3 cm, o que implica na suspeita da existência de erro sistemático nessas componentes, uma vez que para a componente Z. Para as componentes X e Y o erro médio atinge em torno de 3 mm.

A discrepância entre a solução obtida neste trabalho e a solução SIR09P01 na época 2007,507 é da ordem centimétrica. Observa-se, que embora algumas estações apresentem valores mais discrepantes, em sua maioria a magnitude destas discrepâncias é em torno de 2 cm para a componente Este, 3 cm para a componente Norte e de 1 cm para a componente vertical. Como forma de visualizar melhor estes valores, foram geradas as séries temporais das coordenadas das estações envolvidas no processo de integração, com base nas soluções semanais fixas resultantes do processo de combinação das equações normais. Nas Figuras 1 a 3 têm-se as séries temporais para a estação PPTE, em termos de suas coordenadas E, N e U:



Verifica-se, com base nas séries temporais da estação PPTE que a componente Leste (Figura 1) caracteriza uma série estacionária, ou seja, sem tendência. Todavia, essa série apresenta, ainda que em menor grau, a sazonalidade, fato que também se evidencia para as componentes Norte (Figura 2) e para a componente Vertical (Figura 3). Além disso, verifica-se que para a componente Norte uma tendência linear ascendente para o período analisado. Um comportamento semelhante é observado para a componente Vertical, ainda que em menor grau.

Para a estação LPGS, observa-se também uma variação compatível a série obtida para a estação PPTE, como ilustram as Figuras 4 a 6, em termos de suas coordenadas E, N e U:

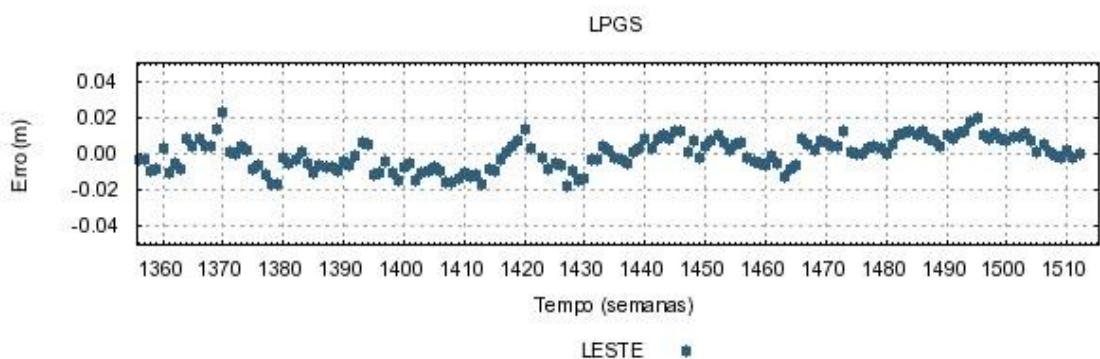


Figura 4 – Série temporal para a componente Leste da estação LPGS

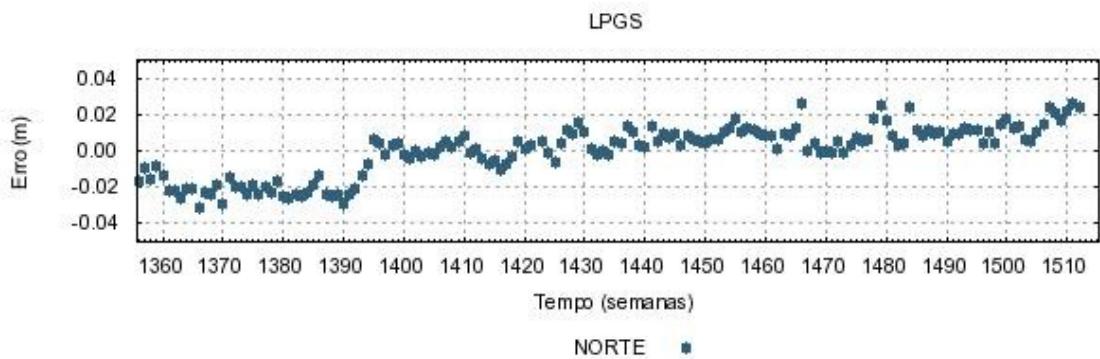


Figura 5 – Série temporal para a componente Norte da estação LPGS

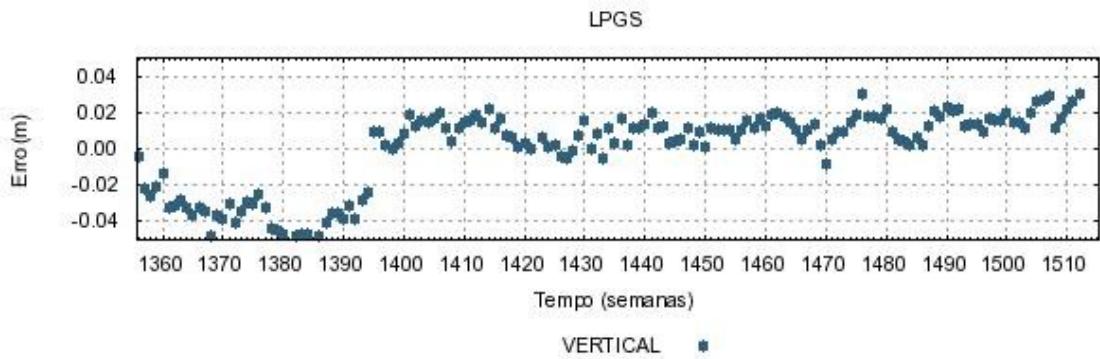


Figura 6 – Série temporal para a componente Vertical da estação LPGS

Para a estação NAUS foram geradas as séries temporais apresentadas nas Figuras 7 a 9:

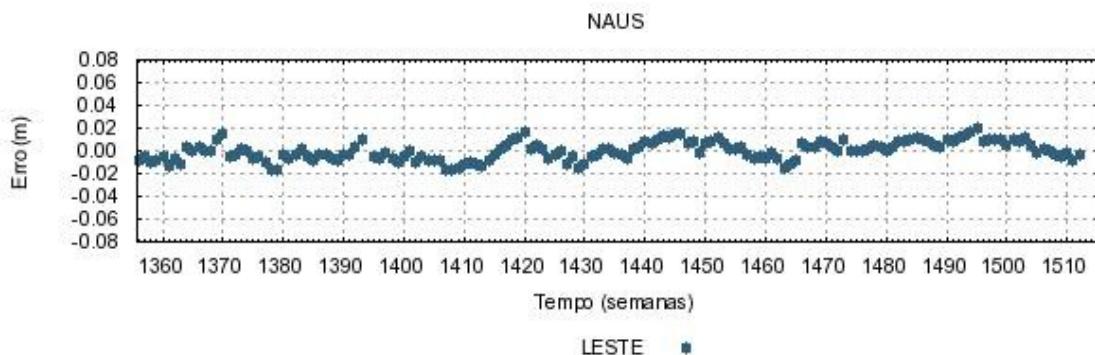


Figura 7 – Série temporal para a componente Leste da estação NAUS

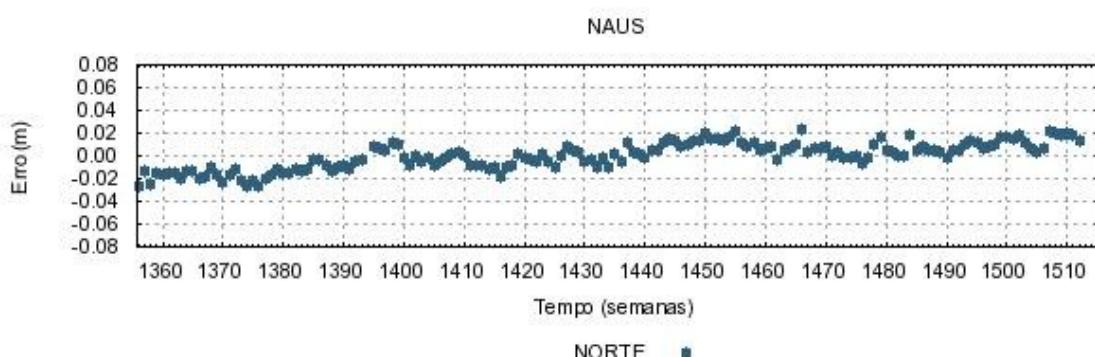


Figura 8 – Série temporal para a componente Norte da estação NAUS

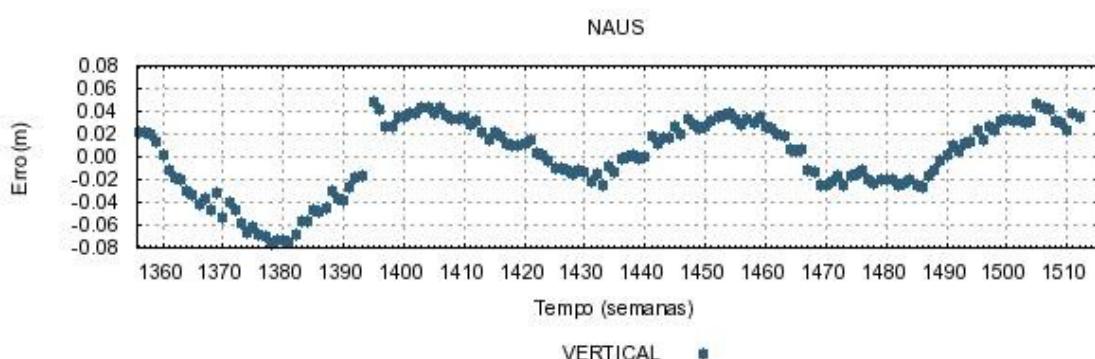


Figura 9 – Série temporal para a componente Vertical da estação NAUS

Nas séries temporais da estação NAUS, verifica-se que as componentes Este (Figura 7), Norte (Figura 8) e Vertical (Figura 9) apresentam sazonalidade, sendo que a componente Norte apresenta ainda a tendência. Apesar do período de dados analisados, o comportamento altimétrico da estação NAUS (Figura 9) mostra a relação existente entre a altitude desta estação e dados limnológicos do Rio Amazonas. Nos períodos de cota máxima (maio a junho) o volume de água do Rio Amazonas aumenta, o que conduz a um deslocamento vertical para a

componente altimétrica de, aproximadamente, 8 cm. Para os períodos de cota mínima (outubro a janeiro), a componente altimétrica tende a sofrer um deslocamento vertical para cima de no máximo 5 cm, o que caracteriza a anticorrelação existente entre a componente altimétrica da estação com o volume de água do Rio Amazonas.

Para as velocidades de 92 estações estimadas as maiores discrepâncias observadas foram para a componente vertical, podendo atingindo até 5 cm/ano como, por exemplo, para a estação UNSA (Salta, Argentina).

5 Conclusões

Com base nos experimentos realizados neste trabalho constatou-se que a aplicação da correção do efeito de 2^a ordem não apresenta uma melhora expressiva na estimativa das coordenadas ajustadas, apresentando valores da ordem milimétrica. Todavia, no posicionamento de redes GNSS de alta precisão, essas correções são necessárias, uma vez que envolvem o processamento de linhas de bases longas (acima de 100 km) e também períodos de dados extensos que abrangem períodos de mínima e máxima atividade da ionosfera.

Verificou-se, com base nas soluções integradas, que embora o período de dados seja de apenas 3 anos, pode-se avaliar por meio dos experimentos realizados o comportamento temporal das coordenadas das estações e identificar a presença de efeitos sazonais e locais que afetam, em especial, a componente vertical. Entretanto, o estudo da variação temporal das coordenadas requer um período de dados superior ao utilizado neste trabalho, além da utilização de dados qualitativos associados ao clima, localização geográfica, incidência de fenômenos geofísicos, geomorfologia, principalmente em um país de grandes extensões continentais como o Brasil.

Quanto à estimativa da velocidade das estações embora o período de dados seja de 3 anos, os resultados obtidos foram condizentes com os valores encontrados na literatura. Contudo, entende-se que para a obtenção de valores mais realísticos seja necessário dispor de um período superior de observações, que varia de 5 anos ou mais, como se verifica em trabalhos realizados pelo DGFI e em Costa (1999).

6 Referências Bibliográficas

- BERNESE GPS Software – Version 5.0 (BERNESE).** *Tutorial*. 2007. Disponível em: <<http://www.bernese.unibe.ch/download.html>>. Acesso em: mar/2008.
- Costa, S. M. A.** *Integração da rede geodésica brasileira aos sistemas de referência terrestres*. 170f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1999.
- Gemael, C.** *Ajustamento de observações: aplicações à Geodésia*. 320p. Curitiba: UFPR, 1994.
- Marques, F. A.** *Influência da ionosfera no posicionamento GPS: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2^a e 3^a ordem da ionosfera*. 150f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.
- Monico, J. F. G.** *As condições NNT e NNR na realização de um referencial*. Curitiba: Boletim de Ciências Geodésicas, v. 11, nº 1, p. 45-52, 2005.
- Monico, J. F. G.** *Fundamentos matemáticos envolvidos na realização do ITRS*. Curitiba: Boletim de Ciências Geodésicas, v. 12, nº 2, p. 337-351, 2006.
- Rothacher, M.** *Towards a rigorous combination of space geodetic techniques*. IERS Technical Note, n° 30, 2002.