

Análise do serviço on-line de PPP (GDGPS - APPS) para Receptores de Dupla Frequência: um estudo envolvendo dados de estações da RBMC

Ivandro Klein, Marcelo Tomio Matsuoka, Sérgio Florêncio de Souza

Laboratório de Pesquisas em Geodésia (LAGEO), Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Caixa Postal: 15001, Porto Alegre, RS, Brasil.

ivandroklein@gmail.com, tomio.matsuoka@ufrgs.br, sergio.florencio@ufrgs.br

RESUMO

O PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) é um método de posicionamento por GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que vem sendo amplamente utilizado graças aos serviços on-line de processamento, muitos deles disponibilizados de forma gratuita. O PPP requer fundamentalmente dados GNSS de um único receptor e o emprego de efemérides e correções precisas do relógio dos satélites. Um dos serviços on-line de processamento PPP é o APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), disponibilizado de maneira pós-processada pela NASA e derivado do GDGPS (*Global Differential GPS*), um sistema de monitoramento GPS (*Global Positioning System*) em tempo real, com mais de 100 estações de monitoramento contínuo e distribuídas globalmente. Neste artigo, foi avaliado o serviço APPS processando dados GPS correspondentes a um período de 30 dias em duas estações do sul e norte do Brasil (POAL-Porto Alegre/RS, e IMPZ-Imperatriz/MA), pertencentes à rede oficial do referencial SIRGAS. Cada arquivo diário continha 24 horas de observações, com taxa de coleta de 15 segundos, e foram processados tempos de rastreamento de 2, 4, 6 e 24 horas para cada arquivo. As coordenadas diárias destas estações, estimadas pelo serviço APPS, foram atualizadas para a época de referência do SIRGAS2000 (2000,4) e comparadas com as coordenadas oficiais das estações. As discrepâncias (para o tempo de rastreamento de 24 horas) apresentaram erro médio quadrático inferior a 2 cm para as duas estações, tanto na componente vertical, quanto na resultante horizontal, evidenciando o potencial de uso do serviço PPP/APPS em aplicações de alta acurácia, como, por exemplo, em estudos geodinâmicos. Em relação à melhora da exatidão com o aumento do tempo de rastreamento, uma ocupação de 4 horas se mostra a mais vantajosa, segundo o estudo realizado (para ambas as estações, as variâncias dos erros são estatisticamente semelhantes para os tempos de rastreamento de 4 e 6 horas).

Palavras-chave: GPS, GDGPS, Posicionamento por Ponto Preciso, APPS.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ON-LINE PPP SERVICE (GDGPS - APPS) FOR DUAL-FREQUENCY RECEIVERS: A STUDY INVOLVING DATA FROM RBMC STATIONS. The PPP (Precise Point Positioning) is a positioning method by GNSS (*Global Navigation Satellite System*) that has gained great popularity, due to on-line services for processing, most of them available for free. The PPP requires GNSS data from a unique receiver and the use of precise ephemeris and corrections. One of these freely available on-line PPP processing services is the APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), a post-processed mode from NASA, and derivated from GDGPS (*Global Differential GPS*), which is a real-time GPS monitoring system with more than 100 globally distributed stations. This paper is focused on the evaluation of the APPS processing service to GPS data corresponding to a period of 30 days from the Brazilian stations POAL and IMPZ, respectively located in the South and North of Brazil, which belong to the official network of SIRGAS reference system. Each daily file contains 24 hours of observations with collection rate of 15 seconds, and it was processed time tracking of 2, 4, 6 and 24 hours. The daily coordinates of these stations, estimated by the PPP, have been updated to the SIRGAS2000 reference's epoch (2000,4), and compared with the official station coordinates. The discrepancies to a time tracking of 24 hours showed root mean square error less than 2 cm, both in planimetry and altimetry, which attests the potential use of PPP/APPS in high-accuracy applications, as geodynamic studies. It also shows an improve of accuracy of few millimeters when the time tracking increases to four hours, and minor or statically similar error variances when the time was six hours.

Key words: GPS, GDGPS, Precise Point Positioning, APPS.

INTRODUÇÃO

Um dos métodos atuais mais precisos para posicionamento terrestre é o uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) nos quais a posição é determinada por meio do rastreamento de sinais de satélites artificiais (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Dentre as diversas técnicas de posicionamento com GNSS, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) usa apenas um receptor, com efemérides precisas e correções precisas dos relógios dos satélites, normalmente de maneira pós-processada (Monico, 2008).

Devido aos serviços on-line de processamento, muitos deles disponibilizados de forma gratuita, atualmente o PPP é um método de posicionamento de amplo uso. Entre os serviços oferecidos está o CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning*), do NRCan (*Natural Resource Canada*), e o IBGE-PPP (IBGE, 2009), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em que o usuário envia seus arquivos com observações GNSS, e o próprio serviço processa os dados (Matsuoka *et al.*, 2009). A partir daí, as coordenadas de posicionamento do receptor, vinculadas a um referencial geodésico, são disponibilizadas ao usuário para o período processado, bem como outras informações técnicas que propiciam a análise do PPP realizado.

Outro serviço de processamento PPP on-line é o APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), derivado do GDGPS (2010, *Global Differential GPS – Global Positioning System*), disponibilizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O APPS é igualmente gratuito e pode ser utilizado de maneira pós-processada ou, sem gratuidade, em tempo-real.

O PPP pode ser empregado em diversas aplicações que exijam alta acurácia, como, por exemplo, em estudos geodinâmicos e, mais recentemente, no georreferenciamento de imóveis rurais no Brasil, graças à nova norma técnica do INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, Portaria N. 69 de 22/02/2010), que permite a determinação das coordenadas

dos vértices de apoio básico por meio desta técnica de posicionamento.

Baseado na contextualização supracitada, o objetivo deste artigo é avaliar o serviço APPS pós-processado para receptores de dupla frequência, nas regiões de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, e Imperatriz, no Maranhão, empregando diferentes tempos de rastreamento, além de uma comparação de resultados com o serviço IBGE-PPP (IBGE, 2009).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO PPP E APPS

Global Differential GPS

O GDGPS (*Global Differential GPS*) é um sistema de monitoramento GPS em tempo real, completo, preciso e robusto (GDGPS, 2010) que, por meio de uma rede global de estações de referência e softwares de processamento de dados em tempo real, fornece precisão decimétrica no posicionamento em qualquer localidade global, no solo, ar e espaço, independentemente da infraestrutura local. Foi desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*, NASA) para dar suporte às operações terrestres, aéreas e espaciais, bem como para a prestação de serviços a clientes governamentais e comerciais. O serviço possui uma rede global de monitoramento GPS em tempo real, com estações rastreando sinais nas portadoras L1 e L2 (GDGPS, 2010) e suas

observações são transmitidas para os centros GDGPS de operações, situados em Los Angeles, Pasadena e Denver, Estados Unidos. Nestes centros de operações, os dados são processados pelo Programa *Real Time GIPSY* (RTG), que executa correções diferenciais em tempo real para a órbita dos satélites e seus estados de relógios, bem como disponibiliza outros subprodutos e serviços (por exemplo, o APPS). A latência fundamental do sistema é de aproximadamente 5 segundos, a partir do rastreamento do sinal GPS pelo receptor da estação monitora até a produção e difusão das correções diferenciais em tempo-real (GDGPS, 2010).

A *NASA Global GPS Network* é uma rede geodésica com cerca de 70 estações ativas equipadas com receptores de dupla frequência, distribuídos globalmente. Dados adicionais de outras estações são fornecidos por uma variedade de parceiros internacionais, formando uma rede global com mais de 100 estações de monitoramento contínuo (Figura 1).

Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

O PPP consiste no uso das observáveis pseudodistância e/ou fase da onda portadora, coletadas por receptores de simples ou dupla frequência e com o uso de efemérides precisas. Nas efemérides precisas, ou pós-processadas, a órbita

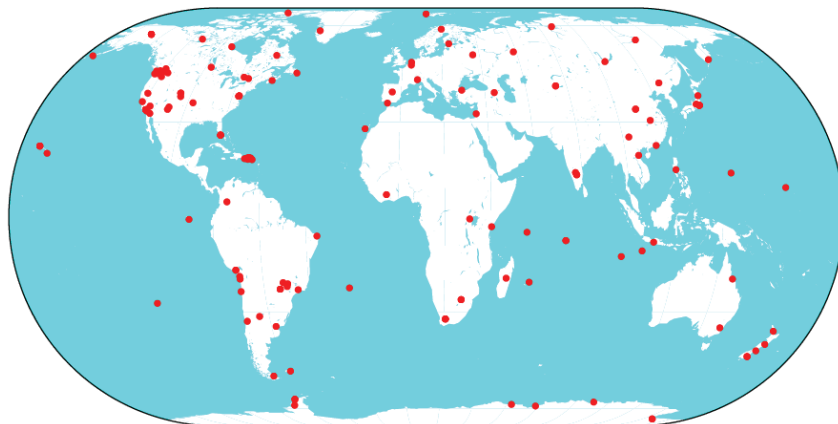


Figura 1. Distribuição global das estações da rede GDGPS (GDGPS, 2010).
Figure 1. Global distribution of GDGPS network stations (GDGPS, 2010).

(posição) e o erro do relógio (tempo) dos satélites são aferidos com alta precisão e disponibilizados por um meio de comunicação, como, por exemplo, a Internet (Monico, 2008). O referencial geodésico vinculado ao posicionamento será aquele das efemérides precisas.

Neste método, as coordenadas de um receptor podem ser consideradas parâmetros locais, enquanto os outros como a órbita e estado do relógio dos satélites, podem ser considerados como globais. Uma rede global de monitoramento GPS estima os parâmetros globais e resulta em efemérides precisas e permite ao usuário solucionar os parâmetros locais (coordenadas do receptor) por meio do PPP para cada época de observação processada (Teunissen e Kleusberg, 1999).

Para receptores de dupla frequência, deve-se usar como observável GPS no processamento, a combinação linear livre dos efeitos da Ionosfera (*ion-free*), e, para receptores de simples frequência, deve-se minimizar estes efeitos com emprego de algum modelo da Ionosfera disponível (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Segundo Leick (2004), o modelo matemático do PPP para receptores de dupla frequência, com uso da observável GPS *ion-free* (para a fase) é dado por (1).

$$\varphi_{r(IF)}^s = \frac{f_1}{c} \rho_r^s + f_1 (dt_r - dt^s) + N_{IF} + \frac{f_1}{c} T_{r0} + \frac{f_1}{c} dT_z m(E) \quad (1)$$

Onde

$\varphi_{r(IF)}^s$ = fase obtida da combinação linear *ion-free*;

ρ_r^s = distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite e do receptor;

dt_r = erro do relógio do receptor;

dt^s = erro do relógio do satélite;

N_{IF} = ambiguidade da observável *ion-free*;

T_{r0} = atraso troposférico aproximado por algum modelo disponível;

dT_z = atraso zenital troposférico residual a ser estimado no modelo;

$m(E)$ = função de mapeamento em função do ângulo de elevação E do satélite;

c = velocidade da luz no vácuo;

f_1 = frequência da observável *ion-free* (igual a da portadora L1).

Outros parâmetros podem ser considerados no modelo matemático, como, por exemplo, variação do centro de fase da antena dos satélites e receptor, marés terrestres, cargas oceânicas, efeitos relativísticos e fase *wind-up* (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Para a solução no PPP, é normalmente empregada a estimação sequencial nos dados por meio do Filtro de Kalman, por suas características de ser numericamente estável e considerar a variação dos parâmetros, em que pese o processamento aproximadamente duas vezes mais lento em relação à estimativa de mínimos quadrados das equações normais (Zumberge *et al.*, 1997).

Para Bisnath e Gao (2008), o PPP pode, normalmente, fornecer precisão (1 σ) centimétrica no modo de posicionamento estático e decimétrica no modo de posicionamento cinemático. Segundo os mesmos autores, o período de convergência, ou seja, o intervalo de tempo requerido para iniciar um posicionamento com precisão decimétrica é de, geralmente, 30 minutos, podendo tornar-se significativamente mais longo, antes da solução convergir para um posicionamento com precisão centimétrica. Mas este tempo de convergência pode ser melhorado, a partir do refinamento do modelo estocástico e da taxa de amostragem.

Explorando a aplicação de técnicas para a obtenção de solução fixa para a ambiguidade, o PPP tem o potencial para reduzir o tempo de convergência da solução, de minutos para segundos. No processamento GPS de duplas diferenças (posicionamento relativo), onde a solução fixa da ambiguidade tem sido amplamente utilizada, os parâmetros de ambiguidade das duplas diferenças entre as observáveis GPS são inteiros, melhorando a precisão da solução da posição para poucos centímetros ou até milímetros, desde que as ambiguidades tenham sido fixadas para os seus valores inteiros corretos (Bisnath e Gao, 2008).

Para o PPP, que utiliza observações não diferenciadas (um único receptor), os parâmetros das ambiguidades não são inteiros, pois estão corrompidos pela fração inicial da fase dos satélites e receptores GNSS (solução flutuante). Significativo progresso vem sendo feito, no entanto, na compreensão das características e na estimativa da referida solução fixa para a ambiguidade inicial da fase das observáveis GNSS no PPP. Maiores detalhes sobre PPP podem ser obtidos em Zumberge *et al.* (1997), Teunissen e Kleusberg (1999), Leick (2004), Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008), Monico (2008) e Bisnath e Gao (2008).

Automatic Precise Positioning Service - APPS

O APPS é um serviço de PPP, onde a órbita e o erro do relógio dos satélites são determinados com base nas estações monitoras que compõem a rede GDGPS, e os dados processados pelo *software JPL's GIPSY-OASIS, v.5* (GDGPS, 2010). Atualmente, o referencial vinculado é o ITRF2005 (IGS05), mas, para fins práticos, podem-se considerar os referenciais ITRF2005 e SIRGAS2000 compatíveis (Monico, 2008).

O APPS disponibiliza serviços em tempo real (não gratuito) ou de maneira pós-processada (gratuitamente), tanto no modo de posicionamento estático, quanto no cinemático. Se for necessário, além dos arquivos de observáveis GPS em formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), o APPS recebe arquivos com dados de pressão atmosférica e temperatura para melhorar o posicionamento em receptores a bordo de aviões e helicópteros, já que o posicionamento cinemático destas aeronaves é muito sensível à componente hidrostática da Troposfera (GDGPS, 2010).

As opções de processamento do APPS são o modo de posicionamento (estático ou cinemático), o tipo do receptor (atualmente apenas o processamento de dados de dupla frequência é disponibilizado), as efemérides utilizadas (“quase tempo real”, ou “mais precisas”), o código da portadora L1 (C/A ou P), o emprego ou não de arquivos de dados

de pressão atmosférica e temperatura, o ângulo mínimo de elevação dos satélites e a taxa de processamento das observações GPS em segundos.

Um fato importante é quanto à marca e o modelo da antena empregada, bem como sua altura. Essas informações devem estar no cabeçalho do arquivo de dados GPS submetido (Matsuoka *et al.*, 2009).

Para receptores de simples frequência (serviço ainda não disponível), o APPS aplicará correções ionosféricas baseadas nos dados do *Global JPL Ionospheric Map* (GIM), ou do *Real Time Ionosphere* (RTI), dependendo da disponibilidade. Os dados GIM normalmente estão disponíveis com latência de um dia, e os dados RTI normalmente estão disponíveis com latência de 5 minutos.

As efemérides utilizadas pelo APPS são de três tipos (GDGPS, 2010): (i) *JPL's Final products* (ou *FlinnR*), disponível gratuitamente por cerca de 10 dias após as observações serem coletadas e possuindo erro médio quadrático (EMQ) de cerca de três centímetros (as correções dos relógios dos satélites são fornecidas a cada cinco minutos); (ii) *JPL's Rapid products* (ou *QuickLookR*), igualmente gratuito por aproximadamente um dia depois que as observações são coletadas, apresentando EMQ de cerca de cinco centímetros, com correções dos relógios dos satélites fornecidas a cada cinco minutos; (iii) *JPL's Real Time products*,

disponível apenas comercialmente e um minuto após as observações serem coletadas, com EMQ de cerca de oito centímetros. As correções dos relógios dos satélites são fornecidas a cada minuto.

O serviço APPS caracteriza-se pelos seguintes parâmetros: coordenadas do receptor, estado do relógio do receptor, atraso zenital troposférico residual e ambiguidade da observável utilizada (solução flutuante). Aplica ainda as seguintes correções: centro de fase da antena, fase *Wind-up*, atraso troposférico, funções de mapeamento GMF, movimento do polo, relatividade, maré terrestre, carga oceânica e atraso ionosférico de segunda ordem (GDGPS, 2010). A Tabela 1 resume a exatidão nominal de posicionamento esperada deste serviço (Erro médio quadrático, em cm) para um arquivo de 24 horas de observações, com taxa de coleta de 1 segundo (1 Hz).

Para utilizar o serviço APPS, basta cadastrar-se e enviar os arquivos (formato RINEX) com as observáveis GPS, para a página eletrônica do serviço. Um link com os resultados do PPP e demais informações é imediatamente disponibilizado para download (GDGPS, 2010).

METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para o estudo do serviço APPS para receptores de dupla frequência, o PPP

foi aplicado nas estações POAL (Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil), e IMPZ (Imperatriz, Maranhão, Brasil) da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), ambas compondo a rede oficial do referencial SIRGAS (SIRGAS, 2010). O período de observação para cada estação foi de 30 dias, com arquivos diários de 24 horas de observações e com taxa de dados de 15 segundos.

Para a estação POAL, o período de observações processado foi o mês de Maio de 2009, e para a estação IMPZ, o período de observações processado foi o mês de Agosto de 2009. Foram escolhidas duas diferentes épocas de observações e duas estações de regiões distintas devido ao comportamento da Ionosfera, a maior fonte de erro sistemático nas observáveis GNSS, que varia tanto localmente, quanto temporalmente (Leick, 2004).

Além disso, também foram processados arquivos diários com 2, 4 e 6 horas (h) de observação para ambas as estações e para os mesmos períodos de processamento, visando avaliar a melhora da exatidão em relação ao aumento do tempo de rastreamento. As coordenadas diárias obtidas por meio do serviço de PPP-APPS, com 2h, 4h, 6h e 24h de observações processadas, foram comparadas com as coordenadas oficiais das estações divulgadas pelo IBGE (SIRGAS2000, *in* SIRGAS, 2010). Para isso, as coordenadas processadas e fornecidas pelo APPS, no dia/mês correspondente de 2009, foram atualizadas para a época de referência do SIRGAS2000 (maio de 2000 ou 2000,4), salientando que o APPS fornece as coordenadas no referencial ITRF2005 (IGS05).

Neste estudo, não se teve a preocupação de transformar as coordenadas de ITRF2005 para SIRGAS2000 (que é ITRF2000, <http://www.sirgas.org/index.php?id=53&L=0>), acompanhando-se apenas a evolução temporal das coordenadas. Consideraram-se, portanto, compatíveis para fins práticos o ITRF2005 e o SIRGAS2000, uma vez que analisando os parâmetros de transformação divulgados em <http://>

Tabela 1. Erro médio quadrático esperado no APPS para um arquivo de dados GPS de 24 horas de rastreamento, com taxa de coleta de 1 segundo. (*) A Ionosfera é uma importante fonte de erro no posicionamento dos usuários de receptores de simples frequência. Nas baixas latitudes e durante as tempestades ionosféricas, o erro de posicionamento pode ser maior do que apresentado na tabela (GDGPS, 2010).

Table 1. Root mean square error expected in the APPS from a GPS data file with 24 hours of tracking and collection rate of 1 second. (*) The ionosphere is an important source of error in the users' positioning of single frequency receivers. At low latitudes and during ionospheric storms, the positioning error may be greater than shown in the table (GDGPS, 2010).

Modo de posicionamento Tipo de usuário	Efemérides utilizadas	
	<i>QuickLookR</i>	<i>FlinnR</i>
Estático (dupla frequência)	< 5 cm	~1 cm
Cinemático (dupla frequência)	< 15 cm	< 5 cm
Aerotransportado (dupla frequência)	< 20 cm	< 10 cm
Estático* (simples frequência)	~20 cm	~10 cm
Cinemático* (simples frequência)	~50 cm	~25 cm
Aerotransportado* (simples frequência)	~50 cm	~25 cm

itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php, verificam-se parâmetros de translação menores que 1 mm e rotações nulas entre o ITRF2005 e o ITRF2000.

Para a redução das coordenadas à época 2000,4, as velocidades das estações foram obtidas com o uso do modelo VEMOS2009 (*Velocity Model for SIRGAS*, in SIRGAS, 2010), que é disponibilizado de modo gratuito a partir de um aplicativo computacional, na página eletrônica do SIRGAS. Este modelo possui uma grade do campo de velocidades de coordenadas para a placa litosférica sul-americana, sendo o modelo de velocidades de coordenadas recomendado para o referencial SIRGAS. O modelo matemático empregado na atualização das coordenadas é dado por SIRGAS (2010) e está expresso por (2).

$$\begin{aligned} X_t &= X_0 + V_x(t - t_0) \\ Y_t &= Y_0 + V_y(t - t_0) \\ Z_t &= Z_0 + V_z(t - t_0) \end{aligned} \quad (2)$$

Têm-se em (2):

X_0, Y_0, Z_0 = coordenadas da estação obtidas por PPP em cada dia processado no ano de 2009;

X_t, Y_t, Z_t = coordenadas da estação na época de referência do SIRGAS2000 (maio de 2000 ou 2000,4);

V_x, V_y, V_z = velocidades das coordenadas da estação em metros por ano, obtidas com o modelo VEMOS2009; t = época (em anos) para a qual se deseja atualizar as coordenadas (maio de 2000 ou 2000,4);

t_0 = época (em anos) das coordenadas das estações inicialmente estimadas pelo PPP (dia/mês correspondente de 2009).

Após esta redução temporal de coordenadas, as coordenadas fornecidas no sistema cartesiano geocêntrico (X Y Z) foram transformadas em coordenadas de um sistema geodésico local, (leste - E, norte - N e vertical - u), com o objetivo de analisar separadamente a componente horizontal e vertical.

A origem adotada foram as posições oficiais das estações divulgadas pelo IBGE (SIRGAS2000). Desse modo, as coordenadas estimadas transformadas para esse sistema local já representam os valores de discrepâncias com relação às coordenadas conhecidas das estações. Detalhes sobre a formulação

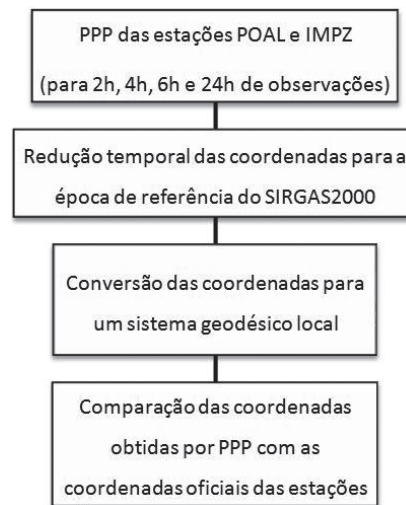


Figura 2. Fluxograma das etapas realizadas para o processamento dos dados no estudo do serviço APPS para receptores de dupla frequência.
Figure 2. Flowchart of realized steps to the data processing in the analysis of on-line PPP service (GDGPS - APPS) for dual-frequency receivers.

envolvida na transformação para o sistema geodésico local podem ser obtidos em Monico (2008, p. 394). A Figura 2 resume o fluxograma das etapas realizadas.

As coordenadas das estações estimadas pelo serviço PPP – APPS para os arquivos diários com 24h de observações foram também comparadas com as coordenadas estimadas pelo serviço PPP do IBGE (IBGE, 2009), igualmente acessível sem custos e on-line, além de ser derivado do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pe-lo *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* – NR-Can. Os arquivos diários enviados ao serviço continham as mesmas 24h de observações, e sua redução temporal de coordena-das para a época de re-

ferência do SIRGAS2000 foi feita de maneira análoga.

ANÁLISES E RESULTADOS

As Figuras 3, 4, 5 e 6 ilustram as discrepâncias em metros nas componentes leste (E), norte (N) e vertical (u) do período processado para cada estação (POAL e IMPZ), obtidas a partir da comparação entre as coordenadas estimadas pelo serviço APPS, com as coordenadas oficiais das estações na mesma época de referência (2000,4).

Nota-se que os erros apresentam magnitude milimétrica/centimétrica para as duas estações, raramente ultrapassando o valor de 2 cm no processamento de 24h de observações tanto em planimetria quanto em altimetria. E a amplitude dos erros diminui em geral, conforme se aumenta o tempo de rastreo. Para a estação POAL, os erros variam entre -3 cm e +3 cm para o tempo de rastreo de 2h, e entre -1 cm e +2 cm para 24h. Para a estação IMPZ os erros variam entre -4 cm e +8 cm, para o tempo de rastreo de 2h, e entre 0 cm e +3 cm, para 24h. Nota-se, ainda, que em grande parte dos casos, é a componente vertical que apresenta as maiores discrepâncias.

Em alguns dias, o erro na componente vertical, principalmente da estação POAL, se mostrou inferior a 1 milímetro, devendo-se salientar que a exatidão das altitudes geométricas oficiais das estações, fornecidas pelo IBGE, é de ordem centimétrica.

As Tabelas 2 e 3 sintetizam os resultados para a componente horizontal resultante das estações POAL e IMPZ ($\sqrt{E^2 + N^2}$), apresentando o erro médio quadrático (EMQ), e o erro mínimo, máximo e médio em cada tempo de rastreo processado (2h, 4h, 6h e 24h). Da análise destas tabelas é possível perceber que, para as duas estações, os erros na resultante horizontal mais uma vez diminuem, conforme se aumenta o tempo de rastreo, apresentando magnitude máxima de poucos centímetros, em geral inferior a 2 cm. Os erros máximos, médios e o EMQ do tempo de rastreo processado de 2h para ambas as estações diferem um pouco mais que em tempos maiores de rastreo. E, a

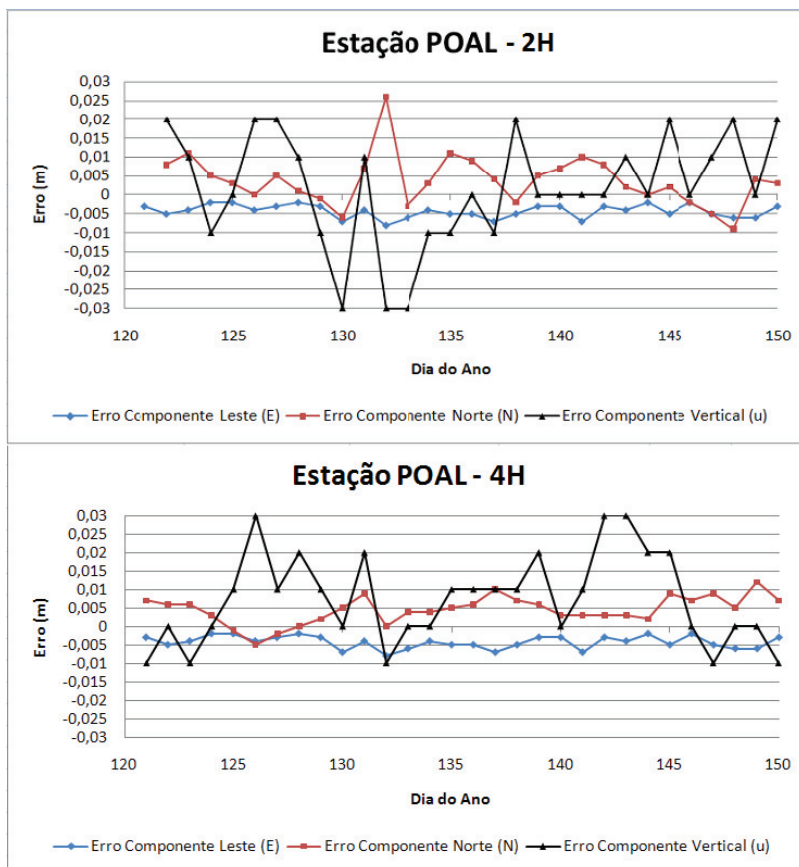


Figura 3. Discrepâncias da estação POAL para os processamentos de 2h e 4h de observações.
Figure 3. Discrepancies of POAL station in the processing of 2h and 4h of tracking time.

Tabela 2. Erros na componente horizontal para a estação POAL para os tempos de rastreo processados de 2, 4, 6 e 24 horas.

Table 2. Errors in the horizontal component to the POAL station in tracking times processed of 2, 4, 6 and 24 hours.

Tempo de rastreo processado	Erros (m) - Planimetria			
	EMQ	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
2h	0,016	0,003	0,055	0,013
4h	0,008	0,002	0,013	0,008
6h	0,007	0,002	0,017	0,007
24h	0,005	0,002	0,009	0,005

Tabela 3. Erros na componente horizontal para a estação IMPZ para os mesmos tempos de rastreo processados.

Table 3. Errors in the horizontal component to the IMPZ station in the same tracking times processed.

Tempo de rastreo	Erros (m) - Planimetria			
	EMQ	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
2h	0,028	0,005	0,078	0,024
4h	0,016	0,01	0,021	0,015
6h	0,015	0,009	0,028	0,015
24h	0,014	0,01	0,018	0,014

partir de 4h, os resultados melhoram muito pouco (3 mm para até 24h de observações processadas), o que constitui um bom período de ocupação para usuários comuns, que desejam rastrear apenas algumas horas em cada ponto.

As Tabelas 4 e 5 sintetizam os resultados para a componente vertical (u) das estações POAL e IMPZ que, respectivamente, apresentaram o erro médio quadrático (EMQ) e o erro mínimo, máximo e médio em cada tempo de rastreo processado. Sua análise permite avaliar que, para as duas estações, os erros altimétricos diminuem sensivelmente conforme se aumenta o intervalo de observações, apresentando magnitude máxima de poucos centímetros, em geral inferior a 3 cm. Os valores dos erros são ligeiramente maiores que os da análise planimétrica, como era esperado, uma vez que, segundo Matsuoka *et al.* (2009), no posicionamento por GPS, a configuração espacial da órbita dos satélites favorece a determinação horizontal e não a vertical.

É ainda importante salientar que o serviço pós-processado é gratuito e que foram utilizados arquivos de receptores de dupla frequência com taxa de coleta de dados de 15 segundos, além de correções *FlinnR*, disponíveis 10 dias após as observações terem sido coletadas, propiciando resultados coerentes com os divulgados pelo GDGPS (2010, ver também Tabela 1).

Foram realizados também testes estatísticos para verificar se a média e a variância dos erros são significativamente semelhantes ou diferentes conforme os tempos de rastreo processados em cada estação. Para comparação de variâncias dos erros, foi utilizado o teste F, e, para comparação de médias dos erros, foi utilizado o teste t. Para a coordenada leste, as variâncias dos erros diminuem conforme se aumenta o tempo de rastreo, em um comportamento semelhante ao já visto. Apenas nos tempos de rastreo de 4h e 6h houve variâncias estatisticamente iguais para as duas estações. O teste t indicou maior erro médio para o tempo de rastreo de 2h, em relação aos tempos

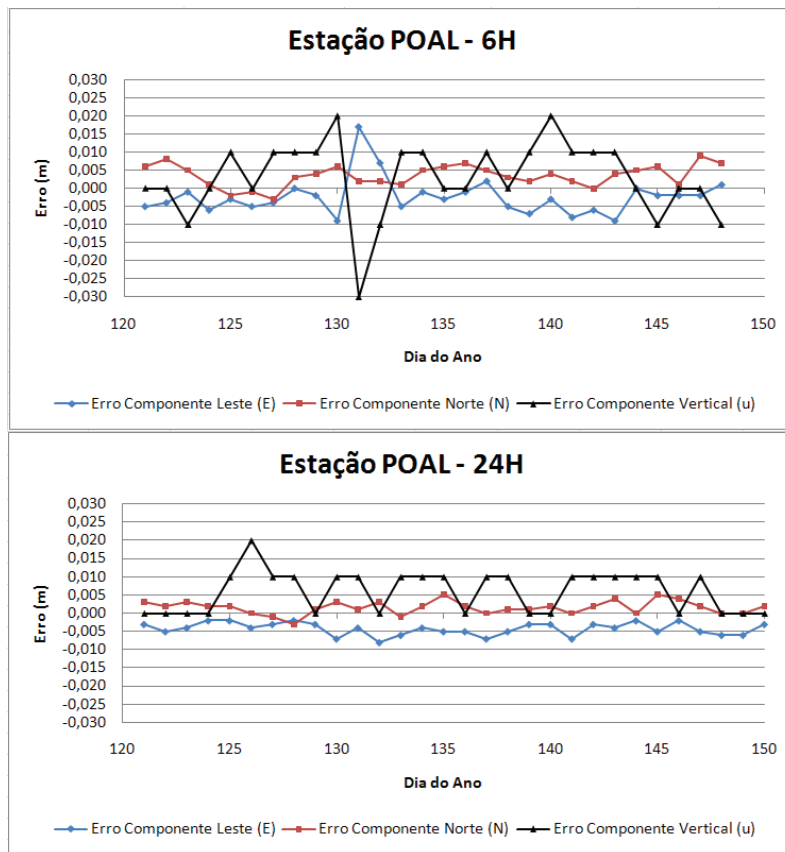


Figura 4. Discrepâncias da estação POAL para os processamentos de 6h e 24h de observações.

Figure 4. Discrepancies of POAL station in the processing of 6h and 24h of tracking time.

Tabela 4. Erros na componente vertical para a estação POAL para os mesmos tempos de rastreamento processados.

Table 4. Errors in the vertical component to the POAL station in the same tracking times processed.

Tempo de rastreamento	Erros (m) - Altimetria			
	EMQ	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
2h	0,015	0	0,03	0,011
4h	0,014	0	0,03	0,011
6h	0,011	0	0,03	0,008
24h	0,008	0	0,02	0,006

Tabela 5. Erros na componente vertical para a estação IMPZ para os mesmos tempos de rastreamento processados.

Table 5. Errors in the vertical component to the IMPZ station in the same tracking times processed.

Tempo de rastreamento	Erros (m) - Altimetria			
	EMQ	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
2h	0,023	0	0,04	0,021
4h	0,031	0	0,06	0,026
6h	0,024	0	0,04	0,021
24h	0,018	0,01	0,03	0,017

de rastreamento de 4h, 6h e 24h, em ambas as estações. Para a coordenada norte, as variâncias de erros também diminuíram conforme o tempo de observação foi ampliado e, mais uma vez, apenas em tempos de rastreamento de 4h e 6h, houve variâncias estatisticamente iguais para as estações POAL e IMPZ. Nesta última também os tempos de rastreamento de 6h e 24h. O teste t indicou que, para as duas estações, o tempo de rastreamento que apresentou menor erro médio foi o correspondente ao período de 24h, em relação aos tempos de rastreamento de 2h, 4h e 6h.

Para a coordenada vertical as variâncias apresentam comportamento semelhante aos das coordenadas leste e norte para a estação POAL. Na estação IMPZ, entretanto, todos os tempos de processamento apresentam variâncias de erros estatisticamente iguais e o teste t indicou que o tempo de rastreamento de 24h apresentou menor erro médio, em relação aos tempos de rastreamento de 2h, 4h e 6h.

Visando a uma análise relativa entre o serviço APPS, com outro serviço de PPP bastante conhecido e utilizado, também foram comparadas as discrepâncias com as coordenadas estimadas pelo serviço IBGE-PPP e aquelas oficiais das estações, considerando a evolução temporal de coordenadas.

As tabelas 6 e 7 resumem os resultados do processamento pelo serviço IBGE-PPP para a componente vertical e horizontal nas duas estações. Comparando os resultados das tabelas com os obtidos com o serviço APPS, para o mesmo período de tempo de 24 horas (Tabelas 2, 3, 4 e 5), é possível avaliar que os serviços apresentaram desempenho muito semelhante, com diferenças entre seus resultados de EMQ menores que 1 cm. Assim, o estudo realizado permite concluir que os dois serviços de PPP apresentam níveis de exatidão semelhantes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método de posicionamento GNSS, denominado PPP, popularizou-se nos últimos anos, em grande parte pela gratuidade de seu processamento on-line.

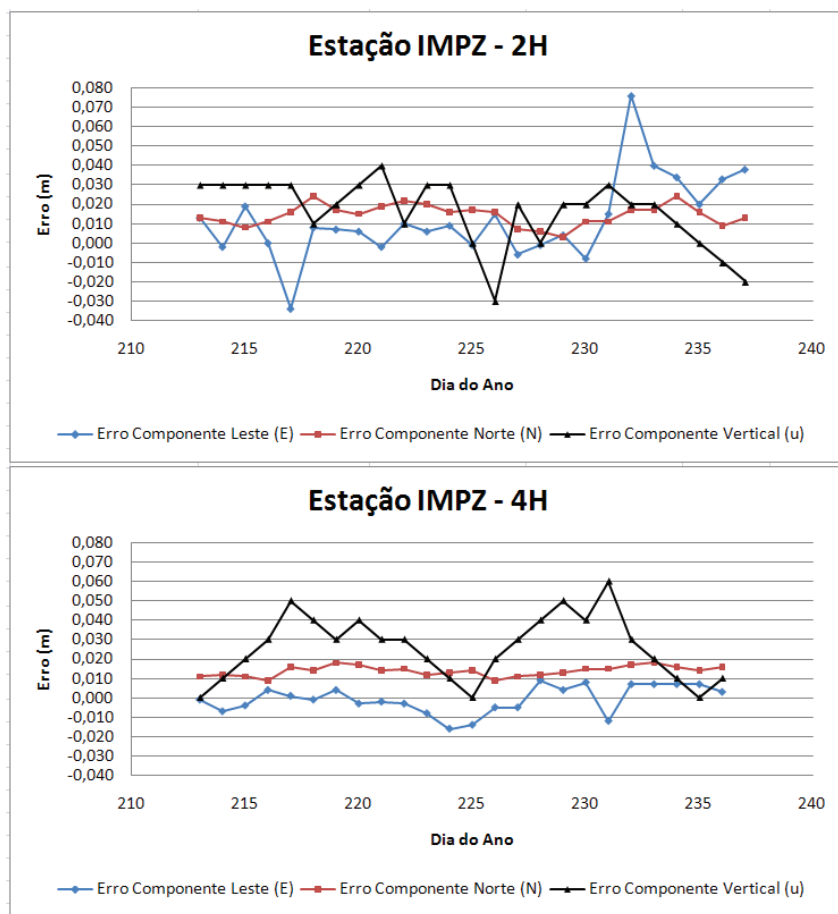


Figura 5. Discrepâncias da estação IMPZ para os processamentos de 2h e 4h de observações.

Figure 5. Discrepancies of IMPZ station in the processing of 2h and 4h of tracking time.

Tabela 6. Erro nas componentes vertical e horizontal para a estação POAL pelo serviço IBGE-PPP, com tempo de rastreo de 24 h.

Table 6. Error in vertical and horizontal components to the POAL station by the IBGE-PPP service with tracking time of 24 hours.

Componente	Erros (m)			
	EMQ	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
Horizontal	0,015	0,009	0,019	0,014
Vertical	0,009	0	0,02	0,008

Tabela 7. Erro nas componentes vertical e horizontal para a estação IMPZ através do serviço IBGE-PPP e com o tempo de rastreo de 24 h.

Table 7. Error in vertical and horizontal components to the IMPZ station by the IBGE-PPP service with tracking time of 24 hours.

Componente	Erros (m)			
	EMQ	Erro Mínimo	Erro Máximo	Erro Médio
Horizontal	0,006	0	0,015	0,005
Vertical	0,015	0	0,03	0,009

O objetivo da presente contribuição era avaliar a utilização do serviço APPS, um subproduto do sistema NASA/GDGPS, com receptores de dupla frequência, utilizando dados de duas estações brasileiras oficiais do referencial SIRGAS, a POAL, no sul do Brasil, e a IMPZ, no norte.

Cada arquivo diário processado continha 24h de observações com taxa de coleta de 15 segundos, tendo sido avaliados dados do mês de maio de 2009 para a POAL, e o de agosto do mesmo ano, para a estação IMPZ. As coordenadas diárias destas estações, estimadas pelo serviço APPS, foram atualizadas para a época de referência do SIRGAS2000 (2000,4) e comparadas com as coordenadas oficiais das estações divulgadas pelo IBGE.

As discrepâncias apresentaram erro médio quadrático inferior a 2 cm para as duas estações tanto na componente vertical quanto na resultante horizontal, evidenciando o potencial de uso do serviço PPP/APPS em aplicações de alta acurácia para receptores de dupla frequência, como seria o caso dos estudos geodinâmicos.

Além disso, para as estações POAL e IMPZ, também foram processados arquivos com 2h, 4h e 6h de observações, correspondentes aos mesmos períodos de processamento anteriores (maio e agosto de 2009, respectivamente). Observou-se uma melhora sensível nos resultados diretamente relacionada ao tempo de observação (taxas de poucos milímetros para cada duas horas extras de rastreo), com EMQ de ordem centimétrica/milimétrica tanto para a componente vertical quanto para a horizontal. Estes resultados são compatíveis com posicionamentos geodésicos de precisão, onde raramente são usados períodos maiores que 6 horas de rastreo em um mesmo ponto.

Analisando o aumento da exatidão em relação ao tempo de rastreo conclui-se que, a partir de uma ocupação de 4h sobre o ponto de interesse, a componente horizontal resultante já é compatível com aquela obtida quando se realiza

o processamento de 24h. Além disso, os resultados do teste F para variâncias indicam que para ambas as estações, os tempos de rastreamento de 4h e 6h apresentaram variâncias de erros estatisticamente iguais para as três componentes (leste, norte e vertical).

É importante, contudo, destacar que em todos os tempos de rastreamento os resultados apresentaram discrepâncias médias centimétricas, o que permite inferir a potencialidade do uso do serviço APPS igualmente em aplicações práticas.

Foram ainda comparados os resultados advindos dos serviços APPS e IBGE-PPP para um tempo de rastreamento de 24h, e conclui-se que ambos são similares em termos dos resultados aferidos. Assim, recomendam-se estudos sobre o PPP

em tempo real, bem como o PPP de arquivos com receptores de simples frequência quando disponíveis, mas sempre tomando em conta que o serviço APPS em tempo-real não é gratuito. É ainda importante dar seguimento aos testes, visando verificar a eficiência do serviço em tempos de ocupação rápida, menores que 2 horas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IBGE, pelos dados das estações POAL e IMPZ, ao SIRGAS, pelo modelo VEMOS2009, e ao JPL, por disponibilizar de forma gratuita o serviço on-line de processamento PPP (o APPS). À CAPES, pela bolsa de Mestrado do primeiro autor, e ao CNPq, pela Bolsa de Produtividade

em Pesquisa (Proc. n. 307472/2009-4) do segundo autor.

REFERÊNCIAS

- BISNATH, S.; GAO, Y. 2008. Current state of precise point positioning and future prospects and limitations. *Observing our changing earth*, 133:615-623.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. 2008. *GNSS – Global Navigation Satellite System: GPS, GLONASS, GALILEO, and More*. New York, SpringerWien, 516 p.
- IBGE. 2009. *Manual do Usuário Posicionamento Por Ponto Preciso*. Diretoria de Geociências. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf, acesso em: 01/03/2010.
- INCRA. 2010. Portaria n° 69, de 22 de Fevereiro de 2010: Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais. 2ª Edição. Disponível em: <http://www.in.gov.br/imprensa/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=81&data=04/03/2010>, acesso em: 08/03/2010.
- GDGPS - GLOBAL DIFFERENTIAL GPS. 2010. *The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS (GDGPS) System*. The NASA Global Differential GPS System, Jet Propulsion Laboratory (JPL). Disponível em: <http://apps.gdgps.net/>, acesso em: 20/01/2010.
- LEICK, A. 2004. *GPS satellite surveying*. 3ª ed., New Jersey, John Wiley & Sons, 435 p.
- MATSUOKA, M.T.; AZAMBUJA, J.L.F.; SOUZA, S.F.; VERONEZ, M. 2009. Potencialidades do serviço on-line de Posicionamento por Ponto Preciso (CSRS-PPP) em aplicações geodésicas. *Gaea - Journal of Geoscience*, 5(1):42-48. <http://dx.doi.org/10.4013/gaea.2009.51.05>
- MONICO, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo, Editora Unesp, 476 p.
- SIRGAS. 2010. *Velocity Model (VEMOS) for SIRGAS*. Disponível em: <http://www.sirgas.org/index.php?id=54>, acesso em: 01/03/2010.
- TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUSBERG, A. 1999. *GPS For Geodesy*. Berlin, Editora Springer Verlag, 650 p.
- ZUMBERGE, J.F.; HEFLIN, M.B.; JEFFERSON, D.C.; WATKINS, M.M.; WEBB, F.H. 1997. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3):5005-5017. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB03860>

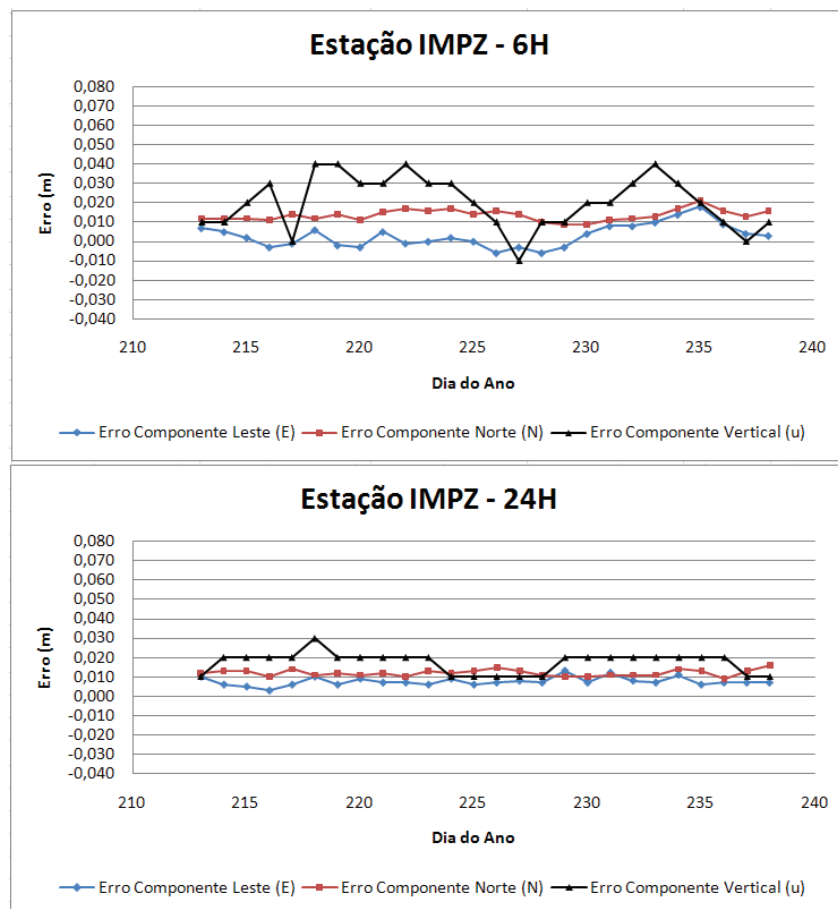


Figura 6. Discrepâncias da estação IMPZ para os processamentos de 6h e 24h de observações.

Figure 6. Discrepancies of IMPZ station in the processing of 6h and 24h of tracking time.

Submetido em: 24/05/2010

Aceito em: 11/10/2010