

PPP COM INTEGRAÇÃO GPS/GLONASS: FUNDAMENTOS ENVOLVIDOS E ANÁLISES DE RESULTADOS

EMANOEL GOMES DE SOUSA SILVA

HAROLDO ANTONIO MARQUES

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG
Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE
emanoelg3@gmail.com, haroldoh2o@gmail.com

RESUMO – Dentre os sistemas de posicionamento que atualmente compõem o GNSS, têm-se o GPS e o GLONASS atuando em sua forma operacional, o que possibilita a aplicação de sistema multi-constelação no posicionamento geodésico. A integração destes dois sistemas pode fornecer melhor geometria para a estimativa dos parâmetros no processamento dos dados, bem como redundância, o que favorece a confiabilidade. O método PPP faz uso de órbitas e correções precisas de relógios dos satélites, além da observável livre da ionosfera, para a pseudodistância e fase da onda portadora. Além disto, se faz necessário o uso de modelagem matemática adequada para corrigir os diversos efeitos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e efeitos geodinâmicos afetando as estações terrestres. Neste trabalho apresenta-se os fundamentos envolvidos com integração GPS/GLONASS bem como experimentos no modo PPP cinemático envolvendo a utilização dos dois sistemas. Para a realização dos experimentos foi utilizado o software de PPP online do IBGE, o qual em sua versão atual permite processar observações GPS e GLONASS. As análises foram realizadas com base nas discrepâncias das coordenadas estimadas ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS. Além disto, os valores de GDOP e precisões foram analisados ao utilizar a integração GPS/GLONASS no PPP.

ABSTRACT - Among positioning systems that currently comprise the GNSS have GPS and GLONASS acting in its operational form, which allows the application of multi-constellation in geodetic positioning system. The integration of these two systems can provide better geometry for the estimation of parameters in data processing as well as redundancy, which favors reliability. The PPP method makes use of precise orbits and satellite clock corrections, beyond the ionosphere free observable for the pseudorange and phase of the carrier wave. More over, it is necessary to use appropriate mathematical modeling to correct the various effects involved in the propagation of GNSS signals and geodynamic effects affecting ground stations. This work presents the fundamentals involved with integrating GPS/GLONASS as well as experiments on the kinematics PPP mode involving the use of two systems. To perform experiments the online PPP software of IBGE was used, which in its current version allows to process GPS and GLONASS observations. The analyses were performed based on the discrepancies of the estimated coordinates by using only GPS and GPS/GLONASS. More over, the GDOP values and accuracies were analyzed using the GPS/GLONASS integration in PPP.

1 INTRODUÇÃO

O posicionamento geodésico atualmente é realizado em sua maioria a partir do GNSS (*Global Navigation Satellite System*). O GNSS engloba O GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLOBAL'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), COMPASS/BeiDou (CNSS - *Compass Navigation Satellite System*), Galileo, sistemas de aumento (*augmentation system*) e outros, além de outras definições tais como acurácia, integridade, etc. Dentre todos estes o GPS ainda é o mais utilizado na atualidade considerando que ele tem sido utilizado como sistema de navegação em sua forma operacional completa por aproximadamente três décadas, porém, o GLONASS atualmente encontra-se em sua forma totalmente operacional com uma constelação de satélites composta de 24 a 29 satélites (GLONASS, 2014). Isso torna possível a aplicação de sistema multi-constelação no posicionamento geodésico por satélites. A maior diferença entre os satélites GLONASS e GPS é que cada satélite GLONASS transmite na sua própria frequência e, dessa forma, a identificação dos satélites se dá pela frequência do sinal a partir da técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Acces*) (LEICK, 2005; MONICO, 2008). O GPS transmite os sinais utilizando a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*). Os dois sistemas encontram-se em fase de modernização onde o GLONASS

já possui satélites em fase experimental transmitindo os sinais com base na técnica CDMA, o que começou com o lançamento de satélites GLONASS-K no ano de 2011 (ICD GLONASS, 2008).

Para o GPS, a fase de modernização contempla a inclusão de um novo código civil na portadora L2 (L2C) através dos satélites do bloco IIR-M além da nova portadora L5 para os satélites do bloco IIF. Estes fatores facilitam a integração dos sinais GPS e GLONASS (GPS/GLONASS) para fins de posicionamento geodésico.

Com relação aos métodos de posicionamento geodésicos utilizando esses sistemas, destaca-se o método de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), o qual tem sido alvo de muitas investigações científicas e melhoramentos nos últimos anos. O PPP em sua forma convencional faz uso de órbitas e correções precisas de relógios dos satélites, além da observável livre da ionosfera, para a pseudodistância e fase da onda portadora. Diferentemente do posicionamento relativo, onde a maioria dos efeitos sistemáticos é eliminada no processo de diferenciação de medidas, o PPP requer a modelagem matemática precisa dos efeitos para obtenção de coordenadas com acurácia centimétrica. A estimativa das coordenadas pode ser no modo pós-processada ou próxima ao tempo real (latência de poucos segundos) (MARQUES, 2012). Além disto, se faz necessário o uso de modelagem matemática adequada para corrigir os diversos efeitos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS, tais como refração ionosférica e troposférica, multicaminho, efeitos da rotação da Terra, erros relacionados aos satélites, tais como erro de órbita, do relógio dos satélites, relatividade, atraso de hardware, centro de fase da antena do satélite e efeitos geodinâmicos afetando as estações terrestres. Neste trabalho, apresentam-se os fundamentos e modelos matemáticos envolvidos com a integração GPS/GLONASS e avaliação de resultados no modo PPP cinemático para estações no Brasil. Para a realização dos experimentos foi utilizado o software de PPP online do IBGE, o qual em sua versão atual permite processar observações GPS e GLONASS. As análises foram realizadas com base nas discrepâncias das coordenadas estimadas ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS. Além disto, os valores de GDOP e precisões foram analisados ao utilizara a integração GPS/GLONASS no PPP.

1.1 Integração GPS/GLONASS no PPP

A integração GPS/GLONASS no PPP requer compatibilização entre sistemas de referência e sistemas de tempo, uma vez que o sistema geodésico de referência adotado para o GPS é o WGS 84 (*World Geodetic System*) e para o GLONASS é o PZ-90 (*Parametry Zenli 1990*) e os sistemas de tempo são, respectivamente, tempo GPS e tempo GLONASS. Comparecem ainda os atrasos inter-frequência entre os dois sistemas. A compatibilização dos sistemas geodésicos de referência é realizada para as órbitas dos satélites e no caso do sistema de tempo, comparece um parâmetro incógnito no ajustamento do método PPP, o qual está relacionado com o erro do relógio do receptor.

As constantes utilizadas na transformação de coordenadas no referencial PZ90 para WGS84 pode ser escrita como ZINOIEV (2005):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} -0,47m \\ -0,51m \\ -1,56m \end{bmatrix} + (1 + 22 \cdot 10^{-9}) \begin{bmatrix} 1 & -1,728 \cdot 10^{-6} & -0,017 \cdot 10^{-6} \\ 1,728 \cdot 10^{-6} & 1 & 0,076 \cdot 10^{-6} \\ 0,017 \cdot 10^{-6} & 0,076 \cdot 10^{-6} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{PZ90} \quad (1)$$

O modelo matemático (unidades em metros) necessário para integração GPS/GLONASS no PPP pode ser descrito com base nas equações de pseudodistância e fase nas duas frequências (SEEBEER, 2003; MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$PD_{L_i}^G = \rho_G + c(dt_{rec}^G - dt_{sat}^G) + I_{L_i}^G + T^G + Orb^G + \vartheta_{PD^G} \quad (2)$$

$$\Phi_{L_i}^G = \rho_G - I_{L_i}^G + T^G + Orb^G + c(dt_{rec}^G - dt_{sat}^G) + \lambda_i^G N_{L_i}^G + \vartheta_{PD^G} \quad (3)$$

$$PD_{L_i}^R = \rho_R + c(dt_{rec}^R - dt_{sat}^R) + I_{L_i}^R + T^R + Orb^R + \vartheta_{PD^R} \quad (4)$$

$$\Phi_{L_i}^R = \rho_R - I_{L_i}^R + T^R + Orb^R + c(dt_{rec}^R - dt_{sat}^R) + \lambda_i^R N_{L_i}^R + \vartheta_{PD^R} \quad (5)$$

Onde o símbolo G e R representam respectivamente o GPS e GLONASS, os erros dos relógios do receptor são (dt_{rec}^G ou dt_{rec}^R) e do satélite (dt_{sat}^G ou dt_{sat}^R) e ainda, I_{L_i} , T e Orb , representam respectivamente o atraso ionosférico, troposférico e erro devido a orbita do satélite, o subscrito L_i representa a frequência na qual é realizada a medida.

Para o processamento dos dados na integração GPS/GLONASS comparece o parâmetro incógnito relacionado com o sistema de tempo (dt_{sys}). O erro do relógio do receptor pode ser descrito como (CAI & GAO, 2007):

$$dt_{rec} = t - t_{sys} \quad (6)$$

Onde t_{sys} denota o sistema de tempo GPS (T_{GPS}) para observações GPS ou o sistema de tempo GLONASS ($T_{GLONASS}$) para observações GLONASS. Uma vez que o erro do relógio do receptor está relacionado com o sistema de tempo, seja do GPS ou do GLONASS, o processamento dos dados com integração GPS/GLONASS no modo PPP inclui a estimativa de dois parâmetros de erro dos relógios do receptor. É possível escrever o erro do relógio do receptor relacionado com o GLONASS da seguinte maneira (CAI & GAO, 2007):

$$\begin{aligned} dt_{rec}^R &= t - t_{GLONASS} \\ &= \underbrace{t - t_{GPS}}_{dt_{rec}^G} + \underbrace{t_{GPS} - t_{GLONASS}}_{dt_{sys}} \\ &= dt_{rec}^G - dt_{sys} \end{aligned} \quad (7)$$

que é função do erro do relógio do receptor para o GPS e da diferença do sistema de tempo entre GPS e GLONASS. Aplicando a Equação (12) nas Equações (9) e (10), tem-se:

$$PD_{Li}^R = \rho_R + c \left(\underbrace{dt_{rec}^G + dt_{sys} - dt_{sat}^R}_{dt_{rec}^R} \right) + I_{Li}^R + T^R + Orb^R + dm^R + v_{PD}^R \quad (8)$$

$$\phi_{Li}^R = \rho_R - I_{Li}^R + T^R + Orb^R + dm^R + c \left(\underbrace{dt_{rec}^G + dt_{sys} - dt_{sat}^R}_{dt_{rec}^R} \right) + \lambda_i^R N_{Li}^R + v_{\phi}^R \quad (9)$$

A estimativa do PPP com integração GPS/GLONASS deve ser realizada com o uso das efemérides e correções de relógios precisas dos satélites, o que atualmente são disponibilizados pelos centros do IGS. Para a utilização de efemérides transmitidas do GLONASS, é necessário realizar um processo de integração numérica já que os parâmetros transmitidos são compostos por coordenadas, velocidades e acelerações em um dado instante. Com base nas Equações (8) e (9) pode-se então estimar as coordenadas das estações, erro do relógio do receptor para o sistema GPS (dt_{sys}), diferença do sistema de tempo (dt_{rec}^G), troposfera e ambiguidades para cada satélite.

2 METODOLOGIA DO TRABALHO

Para a investigação da integração GPS/GLONASS no modo PPP foram realizados experimentos utilizando observações coletadas em 3 estações pertencentes à RBMC, são elas: RECF situada em Recife-PE, PITN em Teresina-PI e UFPR em Curitiba-PR. Os dados coletados referem-se ao dia 10/06/2013 (dia do ano: 161, Semana GPS: 1796). Atualmente os arquivos de observação no formato RINEX fornecidos pelo IBGE para estas e demais estações da rede contêm observações de satélites GPS e GLONASS.

Os arquivos de observação foram editados com o software “TEQC” disponibilizado pela UNAVCO (*Non-profit University-governed Consortium*). Neste caso, para o processamento utilizando somente GPS as medidas GLONASS foram retiradas dos arquivos RINEX.

Para a geração de resultados no PPP com integração GPS/GLONASS foi utilizado o software de PPP online do IBGE. Os dados foram processados no modo PPP cinemático de forma que possibilitou avaliar as discrepâncias das coordenadas estimadas ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS.

As análises foram realizadas com base nas discrepâncias das coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*) obtidas nas duas soluções, a qual foi denominada de “erros”. Além disso, os valores de GDOP e das precisões estimadas em cada uma das soluções foram avaliadas considerando a série temporal diária dos processamentos para cada estação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os valores de GDOP para o processamento dos dados da estação RECF, PITN e UFPR.

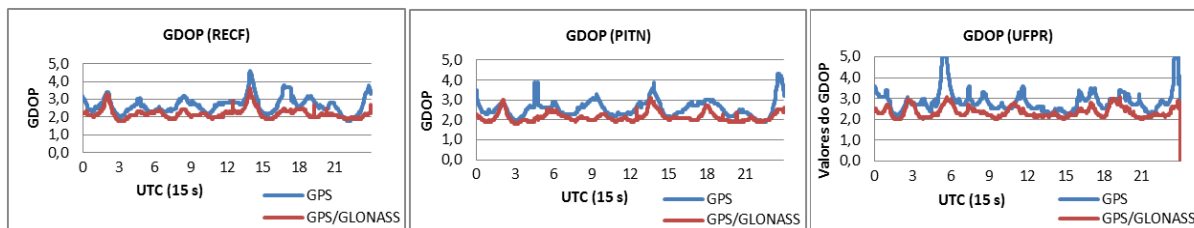


Figura 1 – Valores do GDOP para as estações RECF, PITN e UFPR.

Para a estação RECF valores melhores das soluções geradas pelo processamento dos dados da integração GPS/GLONASS, no que se pode inferir uma melhor qualidade do posicionamento nesta referida situação, os valores para a situação de integração tiveram uma variação dos valores de GDOP em torno de 2 contra valores de GDOP para a solução apenas GPS variando de 3 a 4 em todo a série temporal. O comportamento foi o mesmo observado nas estações PITN e UFPR.

A Figura 2 mostra os valores das discrepâncias na coordenadas UTM (E, N) ao utilizar somente GPS e GPS/GLONASS:

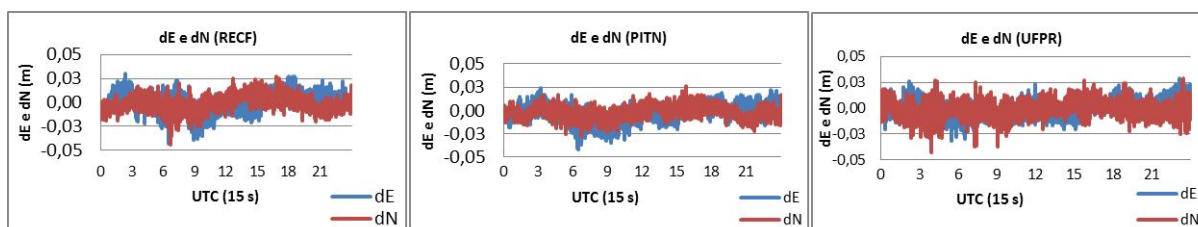


Figura 2 – Discrepância nas coordenadas E e N entre GPS e GPS/GLONASS para as estações RECF, PITN e UFPR.

Para os gráficos da figura 2 é importante destacar que os valores das discrepâncias em dN, em sua maioria, estiveram variando entre -0,04 m a 0,03 m, já as discrepâncias na coordenada N, ou seja, dN, tiveram variação um pouco maior: - 0,04 m a 0,04 m.

A figura 3 apresenta o valor da discrepância na coordenada de altura (h) ao utilizar soluções somente GPS e GPS/GLONASS:

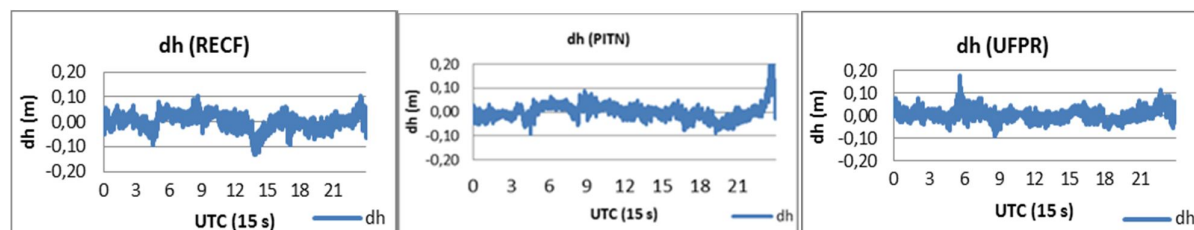


Figura 3 – Discrepância na coordenada de altura (h) entre GPS e GPS/GLONASS para as estações RECF, PITN e UFPR

Com relação aos gráficos da figura 3, nota-se que as estações RECF, PITN e UFPR tiveram mesmo comportamento ao longo da série temporal, variação nos valores de discrepância da coordenada de altura (h) entre -0,1 m a 0,1 m.

Na figura 4 é apresentado o valor do erro 2D calculado a partir das discrepâncias nas coordenadas E e N das estações RECF, PITN e UFPR:

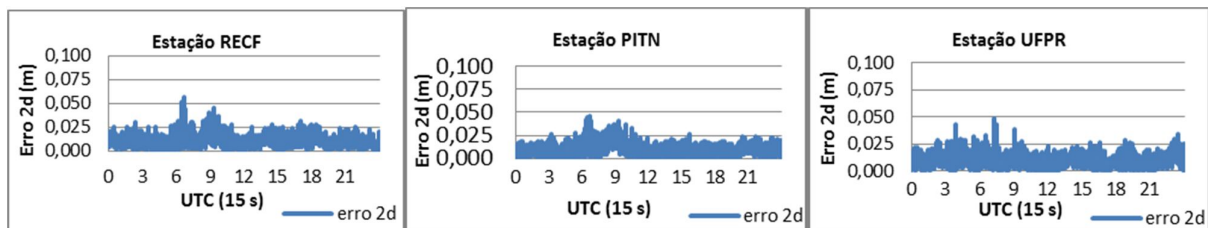


Figura 4 – Erro 2D das coordenadas UTM (E, N) das estações RECF, PITN e UFPR em metros.

Ao serem calculados o erro 2d das duas coordenadas (E,N) para as três estações produziram valores, quase todo o dia de observação, estiveram, em sua maioria, menores que 0,030 m na estações acima analisadas.

Ao adicionar mais uma componente ao erro 2d, a componente de altura (dh), foram gerados gráficos do erro 3d em função de (E, N, h) para a estação RECF, PITN e UFPR:

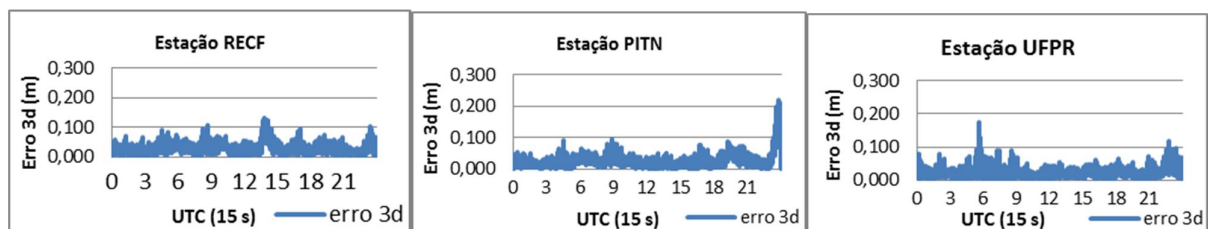


Figura 5 – Erro 3D das coordenadas UTM (E, N) e de altura (h) das estações RECF, PITN e UFPR em metros.

Os erros 3D para as estações analisadas foi, em geral, menores que 0,1 m. Pode-se verificar ainda maiores ocorrências de picos além do comportamento geral nos horários de 6h as 15 hs para a estações situadas na região nordeste, já para a estação UFPR o comportamento durante a série temporal foi praticamente o mesmo.

E por fim, apresentam-se na tabela 1 os valores de precisão nas coordenadas para as estações analisadas:

Tabela 1 – Precisão nas coordenadas ao longo do dia para a estação RECF, PITN e UFPR.

Estações RBMC	Precisão	GPS (m)	GPS/GLONASS (m)
RECF	σ_X	0,0331	0,0286
	σ_Y	0,0271	0,0223
	σ_Z	0,0122	0,0109
PITN	σ_X	0,0276	-0,0182
	σ_Y	0,0254	-0,0543
	σ_Z	0,0101	0,1812
UFPR	σ_X	-0,0066	0,0139
	σ_Y	-0,0685	0,0146
	σ_Z	0,1741	0,0105

A precisão para as coordenadas cartesianas da estação RECF, PITN e UFPR foram em geral, da ordem de centímetros, é importante notar que foram obtidas melhorias na qualidade do posicionamento quando utilizados dados da integração GPS/GLONASS.

Em algumas coordenadas as precisões obtidas pelo uso da solução GPS/GLONASS tenha apresentado comportamento contrário ao apresentado na maioria das coordenadas analisadas. Na estação PITN houve maior qualidade na estimativa das coordenadas ao longo do dia quando utilizado na solução GPS/GLONASS apenas na coordenada cartesiana X e na estação UFPR as melhorias em termos das precisões foram notadas quando utilizado dados da integração GPS/GLONASS nas coordenadas Y e Z. Na estação RECF as três coordenadas tiveram melhor estimativa ao longo do dia ao utilizar dados da integração GPS/GLONASS.

4 CONCLUSÃO

A partir dos experimentos realizados podemos concluir que a integração GPS/GLONASS proporcionou melhor precisão no posicionamento por ponto preciso em relação ao uso de dados apenas GPS. A precisão alcançada na maior parte das estações foi milimétrica para as coordenadas estimadas. Quanto à qualidade do posicionamento os valores baixos do GDOP que estão diretamente relacionados com as precisões obtidas sobre as coordenadas apresentaram melhorias quando utilizado dados GPS e GLONASS. O estudo da modelagem matemática envolvida com a integração GPS/GLONASS no PPP faz parte de uma dissertação de mestrado, a qual se encontra em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco).

AGRADECIMENTOS

Os autores desse artigo agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação pela organização do evento, o qual possibilitou a submissão deste presente artigo. Agradecem ainda a CAPES pelo apoio Financeiro através da concessão de bolsa de mestrado que financia esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CAI, C.; GAO, Y. **Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations**. Journal of Global Positioning System. V. 6, p.13-22, 2007

GLONASS. **Interface Control Document GLONASS Navigational radiosignal In L1, L2 (Edition 5.1)**. Moscow, 2008. 65p.

GLONASS. **GLONASS constellation status**, Disponível em: < <https://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>. Acesso: 26 Julho 2014.

MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

STATELLA, T; AGUIAR, C. R; MONICO, J. F. G; NOGUEIRA, J. R. **Cálculo dos vetores de posição e velocidade dos satélites GLONASS a partir das efemérides transmitidas e aspectos relacionados à sua integração com o GPS**. Pesquisas em Geociências, 40 (2): 177-183. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, SP, 2013.

UNAVCO. **TEQC Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products**. Disponível em: < <http://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/tutorial/tutorial.html>>. Acesso: 24 Julho 2014.

ZINOVIEV, A. E. **Using GLONASS in Combined GNSS Receivers: Current Status**. ION GNSS 18^o International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, California, 2005.