

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/1 127-140
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

COMBINAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO EM TEMPO QUASE REAL: RESULTADOS PRELIMINARES

*Combination of Time Series of Troposphere Zenith Path Delays in Near Real Time:
Preliminary Results*

**Vinicius Francisco Rofatto¹, Luiz Fernando Sapucci² &
João Francisco Galera Monico³**

¹Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Instituto de Geografia – IG

Rua Goiás, 2000, B. Vila Nova, 38500-000, Monte Carmelo, MG, Brasil.
rofatto@hotmail.com / rofattaum@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC

Cachoeira Paulista – SP, Brasil

luiz.sapucci@cptec.inpe.br

³Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305, Cx. Postal 957, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
galera@fct.unesp.br

Recebido em 21 Julho, 2014/ Aceito em 27 de Setembro, 2014

Received on July 21, 2014/ Accepted on September 27, 2014

RESUMO

Um dos produtos meteorológicos advindos do processamento de alta precisão de dados GNSS é a estimativa do atraso zenital troposférico, o qual pode ser utilizado para quantificar o vapor d'água integrado na coluna atmosférica, importante medida para as ciências atmosféricas. Como são diversas as fontes de erros presentes nessas observações, diferentes metodologias de minimização ou tratamento podem ser empregadas ao utilizar diferentes softwares ou estratégias de processamento, o que gera no final soluções com sutis diferenças. A combinação de séries temporais do atraso zenital troposférico obtidas em diferentes metodologias visa gerar uma solução única, mais confiável se comparada com as soluções individuais. Esse artigo propõe uma combinação em tempo quase real do atraso zenital troposférico baseada em múltiplas soluções para um instante específico. Nessas circunstâncias, optou-se por uma combinação obtida por meio do método dos mínimos quadrados, com controle de qualidade realizado pelo processo de detecção, identificação e adaptação de eventuais inconsistências. As estimativas do atraso zenital troposférico foram obtidas por meio dos softwares de processamento de dados GNSS, GAMIT e GIPSY-OASIS II, os quais utilizam diferentes métodos e estratégias de processamento. Ambos os softwares representam o estado da arte em processamento de dados GNSS. Diversas possibilidades foram investigadas e seus impactos nas estimativas do atraso troposférico puderam ser avaliados. As séries temporais foram geradas e as soluções combinadas para cada instante em uma janela deslizante foram produzidas junto com o viés entre as estimativas do atraso troposférico para cada software. Utilizando esse procedi-

mento metodológico é possível obter os valores do atraso troposférico mais consistentes e confiáveis, os quais podem ser assimilados em modelos numéricos utilizados para previsão de tempo.

Palavras-chaves: IWV-GNSS, GNSS Meteorologia, Atraso Zenital Troposférico, Método de Combinação de Séries Temporais.

ABSTRACT

One of meteorological products obtained from the high-precision GNSS data processing is the zenithal tropospheric delay, which can be used to quantify the integrated water vapor, an important measurement for atmospheric sciences. Different methods of attenuation or treatment of the several error sources in the GNSS observations can be employed using different software or processing strategies, which generate final solutions with subtle differences. The combination of time series of tropospheric delay from several available solutions aims to generate a single solution, more reliable than each individual series. This paper proposes a combination in near real time of tropospheric delays parameters based on multiple solutions for a specific time. Under these circumstances, it was decided a combination derived by the least squares method and the quality control process based on detection, identification and adaptation. The zenithal tropospheric delay was derived by two different GNSS data processing software: GIPSY-OASIS II and GAMIT, each one using different processing methods and strategies. Both software represent the state of art in GNSS data processing. Various possibilities were investigated and their impact on troposphere zenith path delays estimates was assessed. Time series were generated and combined solution for each instant of the slide window were produced together with the bias between the troposphere delay estimates for each software. Using such methodological procedure it is possible to obtain tropospheric delay values more consistent and reliable, which may be assimilated in numerical model used for weather forecasting.

Keywords: IWV-GNSS, GNSS Meteorology, Zenithal Tropospheric Delay, Combination Method of Time Series.

1. INTRODUÇÃO

Os sinais transmitidos pelos satélites GNSS (*Global Navigation Satellite System*) propagam-se através de camadas atmosféricas de diferentes naturezas e composição química. Nestas condições, diversos tipos de perturbações podem ocorrer na direção e velocidade de propagação e na intensidade do sinal (SEEBER, 2003). Em termos de propagação de ondas de radiofrequência, a atmosfera terrestre pode ser estratificada em duas partes: a ionosfera e a troposfera. A porção ionizada da atmosfera, a ionosfera, é considerada um meio dispersivo, isto significa que nesta circunstância a propagação de sinais depende da frequência. A combinação de medições simultâneas em duas ou mais frequências permite eliminar a maior parte do efeito ionosférico. Essa é a principal razão para a introdução de uma segunda frequência na concepção do GPS (*Global Positioning System*) (MONICO, 2008). Diferente da ionosfera, a troposfera é um meio não dispersivo para as frequências empregadas nos sistemas GNSS. Neste caso, a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma esteja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995). Por isso, é comum denominar a troposfera como neutrosfera

(camada eletricamente neutra). Neste sentido, para fins de posicionamento, os efeitos devido à troposfera devem ser tratados para atingir a precisão requerida. No entanto, a refração do sinal devido à troposfera pode ser útil para a Meteorologia, pois esse parâmetro é proporcional à quantidade de vapor d'água na atmosfera.

A quantificação do vapor d'água atmosférico usando dados GNSS é possível pela alta precisão obtida na determinação da influência que a massa de vapor exerce sobre a antena GNSS na propagação dos sinais emitidos pelos satélites. Essa influência é quantificada ao determinar o atraso zenital troposférico (*ZTD – Zenithal Tropospheric Delay*) como um dos parâmetros estimados no ajustamento de observações GNSS ao isolar todas as outras fontes de erros em tais observáveis, aplicando modelos ou utilizando informações já conhecidas. As informações do vapor d'água integrado na atmosfera (*Integrated Water Vapor - IWV*) ou *ZTD* podem ser muito úteis em processos de assimilação de dados, no qual as mesmas são incluídas na Modelagem Numérica de Tempo, para contribuir para a geração de Previsões de Tempo (PNT) de melhor qualidade. Esse processo é denominado Assimilação de

dados e a disponibilidade dos dados em tempo quase real e a incerteza das informações são de extrema importância nesse processo.

Dependendo a estratégia de processamento dos dados GNSS em tempo quase real, ou do modelo funcional ou estocástico empregado nesse processo, as soluções podem divergir sutilmente uma das outras. A questão é: qual é a solução mais confiável e qual é a precisão? A combinação de soluções de ZTD em tempo quase real (*Near Real Time*) pode ajudar a responder as duas partes dessa questão ao gerar uma solução única, bem como no monitoramento da qualidade de cada solução individual e da solução final. Esse monitoramento funciona como um controle de qualidade, o qual é uma etapa essencial quando se usa tais estimativas de ZTD e IWV na assimilação de dados para PNT.

Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos no sentido de combinar as soluções de ZTD. Pacione et al. (2011), descreveram dois métodos de combinação de ZTD. Trata-se do método dos mínimos quadrados e o de filtro de Kalman. Na validação intra-técnica, ou seja, na comparação entre os dois métodos citados, verificou-se que as soluções resultantes para o período de novembro de 2008 a novembro de 2009 têm um desempenho muito semelhante, com coeficiente de correlação de 0,99 entre as séries temporais de ZTD, viés (efeito sistemático) de -0,17 mm (estação MEDI localizada na Itália) a 1,52 mm (estação MOSE também pertencente à Itália) e desvio-padrão de $\pm 1,60$ mm (estação ONSA – Suécia) a $\pm 3,82$ mm (estação LDB2 – Alemanha).

Como há a possibilidade de realizar o processamento dos dados com diferentes softwares e estratégias, existe a necessidade de se ter um produto de ZTD internamente consistente com base em várias soluções individuais, principalmente para as obtidas a partir do processamento em tempo quase real.

A combinação de séries temporais de ZTD de uma estação terrestre a partir de soluções individuais advindas do processamento de dados GNSS, geralmente pode ser obtida a partir da técnica de ajustamento pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados). A combinação permite determinar adequadamente a incerteza e identificar problemas que revelam baixa qualidade das soluções individuais de ZTD, servindo como um indicador de qualidade para

ser utilizado no processo de assimilação. Além disso, sendo um processo dinâmico é possível monitorar continuamente essa incerteza, de forma que eventuais falhas em todo o sistema sejam identificadas e, na pior das hipóteses, esses dados sejam rejeitados.

Na assimilação das observações em modelos de PNT, faz-se necessário conhecer as incertezas das observações advindas de diferentes fontes de observação da atmosfera. Para o caso das estimativas do ZTD, provenientes dos dados GNSS, essa incerteza ainda é algo em estudo. No CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) esse assunto é alvo de pesquisa, na qual diversas possibilidades têm sido testadas empiricamente. Valores como 5% do valor de IWV ou uma metodologia de determinação dinâmica dentro do processo de assimilação tem sido testada. Porém, é possível determinar a priori tais incertezas de cada solução a partir do processo de combinação de séries temporais de ZTD em tempo quase real, o que poderá contribuir significativamente com a assimilação operacional desses dados. Em Gouveia et al., 2014 é mostrado a modelagem do ZTD ou ZND (*Zenithal Neutrospheric Delay*) a partir de modelos de PNT com a finalidade de melhorar o posicionamento geodésico. O presente artigo tem por finalidade determinar a melhor solução de ZTD em tempo quase real, o qual deverá ser utilizado para melhorar a PNT. Trata-se de um processo, em que o objetivo é estimar valor do ZTD, em especial a componente úmida da troposfera (*ZWD – Zenithal Wet Delay*), pois esta pode ser convertida em valores do IWV, tornando uma ferramenta para a PNT.

Apresenta-se nesse artigo um método de combinação de janelas de ZTD no tempo, no qual é possível determinar o viés entre as séries temporais de cada software e a qualidade de cada solução. As soluções individuais de ZTD foram geradas por dois softwares distintos, GIPSY-OASIS II (GOA-II) e GAMIT, e o processo de combinação foi simulado em tempo quase real, pois os dados disponíveis referem-se ao ano de 2009.

2. ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO (ZTD)

O ZTD é dividido em duas componentes

devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera: úmida (ZWD - Zenithal Wet Delay), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (ZHD - Zenithal Hydrostatic Delay), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. O ZHD depende apenas da densidade total do ar atmosférico. Por isso, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão atmosférica realizadas na superfície. Em condições meteorológicas típicas o ZHD é cerca de 2,3 m (~ 8ns). Um erro na pressão de superfície de 0,3 hPa causa um erro de cerca de 1 mm na componente ZHD. A fim de alcançar uma precisão de 0,1 mm, a pressão tem que ser medida com uma precisão de $\pm 0,03$ hPa. O erro devido à suposição de equilíbrio hidrostático depende do vento e é cerca de 0,01% responsável pelo atraso (0,2 mm). Sob severas condições meteorológicas, as acelerações verticais podem atingir 1% da aceleração da gravidade, o que pode causar erro nos ZHD de cerca de 20 mm (Davis et al., 1985).

A segunda componente, o ZWD, está relacionado com a pressão parcial do vapor d'água é muito variável com relação ao espaço e ao tempo, fazendo com que o ZWD seja de difícil predição. Uma opção bastante viável, e por isso, muito empregada é estimar valor do ZTD obtido a partir do processamento de dados GNSS e subtrair o valor do ZHD, obtido a partir da pressão atmosférica medida na superfície. Assim chega-se no valor do ZWD. Para aplicações de técnicas geodésicas espaciais para fins de posicionamento e navegação, o ZWD é tipicamente estimado como um parâmetro "incomôdo" no processo de ajustamento. Por outro lado, existe o interesse dos meteorologistas pela componente úmida da troposfera, pois esta pode ser convertida em IWV.

Além das componentes, ZHD e ZWD, que compõe o ZTD, existem também as variações horizontais da refratividade do ar, geralmente, produzidas pela componente úmida e freqüentemente estão associadas à passagem de frentes frias, as quais são responsáveis pelas mudanças abruptas na concentração dos elementos atmosféricos, principalmente, do vapor d'água (EMARDSON, 1998). Essas variações horizontais são denominadas de gradientes troposféricos, os quais também podem

ser estimados no processamento de dados GNSS.

A predição do ZTD envolve a aplicação de funções teóricas determinadas a partir de observações de condições meteorológicas ou de padrões atmosféricos. Modelos para prever o atraso são derivados a partir de um conjunto de dados regionais ou globais e postulações teóricas. A maioria dos modelos teóricos fornece valores de atraso zenitais que são utilizados em conjunto com as funções de mapeamento, as quais não somente mapeiam o atraso zenital total, mas também aparecem na derivada parcial usada no processo de ajustamento para estimar a componente úmida, ou também referida como atraso residual, já que a componente hidrostática é mantida fixa no processo.

Os modelos encontrados na vida prática para usuários de receptores GNSS são basicamente dois: o de Hopfield (SEEBER, 2003) e o de Saastamoinen (Saastamoinen, 1973). O modelo Saastamoinen é derivado a partir das leis dos gases enquanto que o modelo de Hopfield foi desenvolvido a partir de um ajustamento empírico de dados meteorológicos globais. Outra forma, que é usualmente empregada e apresenta melhores resultados, é a estimativa dos valores de ZTD obtida a partir do ajustamento das observações GNSS, utilizando filtros baseados nas condições estado-espaço-tempo dos parâmetros referentes ao atraso troposférico. Essa técnica pode fornecer resultados com boa precisão ao explorar as propriedades estocásticas do ZWD, como a baixa variação em intervalos curtos de tempo (SAPUCCI, 2001 e 2005).

Dessa forma, o atraso troposférico total (T_D) pode ser expresso, de forma completa, como (MacMillan, 1995):

$$T_D(e, \alpha) = ZHD m_{f_h}(e) + ZWD m_{f_w}(e) + m_{f_{az}}(e) \cot(e) [GN \cos(\alpha) + GE \sin(\alpha)] \quad (1)$$

Na equação (1), $m_{f_h}(e)$ e $m_{f_w}(e)$ são funções de mapeamento para componente hidrostática e úmida, respectivamente. O parâmetro de entrada para ambas as funções de mapeamento é o ângulo de elevação no vácuo (e), já que o efeito de curvatura, geralmente, é inserido implicitamente na função de mapeamento hidrostática. O coeficiente $m_{f_{az}}(e)$ é a função de mapeamento do gradiente (geralmente adotase a função de mapeamento da componente úmida

no processamento de dados GNSS), G_N e G_E são as componentes do gradiente horizontal na direção norte e leste, respectivamente, e o fator $\cot(e)$ representa o aumento da refratividade na mudança horizontal com a diminuição da elevação ao longo do caminho do sinal. Os valores dos gradientes da refratividade atmosférica podem ser determinados por meio do ajustamento das observações GNSS, aproveitando algumas características estocásticas desses parâmetros. Como eles têm alta correlação temporal, permitem a aplicação do mesmo processo utilizado para determinar o atraso zenital da componente úmida, denominado *Random Walk*. A não modelagem do gradiente da refratividade da componente úmida produz, sobre os resultados finais, erros de de 3 a 7 mm na estimativa dos valores do ZWD (EMARDSON, 1998).

O desenvolvimento de pesquisas buscando obter melhorias na modelagem do ZTD não está somente relacionada à obtenção de melhores coordenadas no posicionamento, mas também está diretamente relacionada com a meteorologia, no sentido de encontrar os melhores valores de ZTD e IWV que descrevam a situação física da atmosfera, e isso pode ter impactos positivos na assimilação em modelos de PNT. Para mais detalhes da modelagem do ZTD a partir dos modelos de PNT na América do Sul pode ser visto em Sapucci et al., 2008.

3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA COMBINAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE ZTD EM TEMPO QUASE REAL

Nessa seção do trabalho são apresentados os dados e os softwares disponíveis para a realização dos experimentos, bem como a descrição da metodologia proposta nesse trabalho para a combinação de séries temporais de ZTD em tempo quase real. De forma geral, a ideia da combinação é remover o viés das séries temporais individuais de ZTD, conseqüentemente obtêm-se assim uma solução mais confiável.

3.1 Dados disponíveis

Na combinação de séries temporais de ZTD foi realizada uma simulação utilizando ZTD em tempo quase real dos dias 233 a 239 do ano de 2009 para a estação SMAR. A combinação só foi possível para os dias que havia ZTD disponíveis

tanto para o software GAMIT como para o GOA-II. A estação SMAR encontra-se em uma região de clima subtropical com chuvas bem distribuídas ao longo dos meses, sendo comum a ocorrência de neve ou geadas em determinados lugares durante o inverno.

Os dados utilizados pertencem às estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) que possuem coleta em tempo real (denominada RBMC-IP) sendo atualmente composta de (Maio de 2014) 62 estações. Essas estações da RBMC são materializadas e cravadas em pilares estáveis. A maioria dos receptores da rede coleta e armazena continuamente as observações do código e da fase das ondas portadoras transmitidos pelos satélites das constelações GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), enquanto alguns rastreiam apenas GPS. A figura 1 apresenta as estações referente à RBMC.

Além da RBMC, atualmente, 13 estações ativas disponibilizam dados em tempo real, compondo o que vem sendo denominado de Rede GNSS-SP (Rede GNSS do Estado de São Paulo). Algumas das estações estão equipadas com estações Meteorológicas automáticas, cujos dados são utilizados no contexto de GNSS Meteorologia (figura 2).

No Laboratório de Geodésia Espacial da FCT – UNESP, os dados são armazenados em tempo real por meio de um servidor FTP (*File Transfer Protocol*). Uma outra alternativa que



Fig. 1 – Figura ilustrando as estações pertencentes a RBMC.

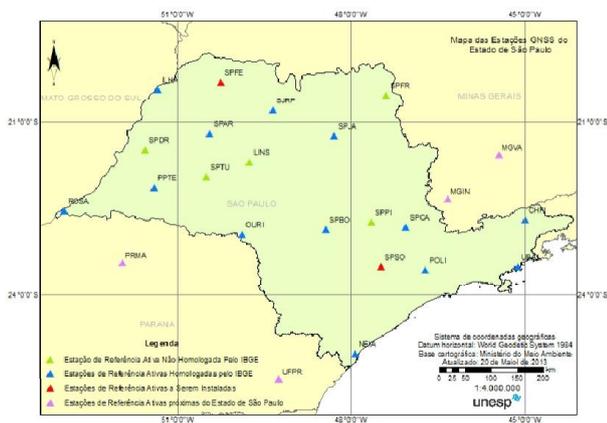


Fig. 2 – Figura ilustrando as estações da Rede GNSS-SP.

vem sendo realizada para ter acesso aos dados da RBMC – IP é o uso do aplicativo BKG_Ntrip_Client (*BNC*). Além disso, foram desenvolvidas rotinas auxiliares para disponibilizar os dados compactados a cada hora (taxa de coleta de 1 segundo) e por dia (taxa de coleta de 15 segundos), automaticamente via Internet. No processamento de dados GNSS em tempo quase real, tanto no GOA-II como no GAMIT, os dados foram concatenados em janela de 8 horas com intervalo de 30 segundos. Essa concatenação é realizada visando a estratégia de processamento conhecida como janela deslizante (*sliding window*), que tem por objetivo reduzir o custo computacional relacionado ao grau das equações normais envolvidas no ajustamento, isto é o número total de parâmetros a serem estimados no processamento. Estudos relacionados à estratégia da janela deslizante podem ser encontrados em Zheng, 2006; Sapucci et al., 2007.

3.2 Softwares disponíveis

Os softwares de processamento de dados GNSS utilizados nessa pesquisa são descritos brevemente nessa seção. Tratam-se do GOA-II e GAMIT. A principal diferença entre eles é que o GOA-II é baseado no método PPP (*Precise Point Positioning*) de posicionamento, ou seja, as observáveis não são diferenciadas, enquanto o GAMIT no método relativo em rede, tendo como observável básica as duplas diferenças. Além disso, o GAMIT utiliza o MMQ para estimar os parâmetros e o *ZTD* é modelado pelo processo de Gauss Markov de primeira ordem, onde é possível definir a variação do *ZTD* e sua correlação no tempo. O processo *Random Walk* é utilizado no GOA-II, e este processo é

derivado do Gauss Markov de primeira ordem quando a correlação temporal tende ao infinito. No processo estocástico *Random Walk* utilizado no Filtro de Kalman do GOA-II, assume-se que a variância aumenta linearmente com o tempo, descrevendo um processo não estacionário em contraste com o processo Gauss Markov. Para mais detalhes sobre processos estocásticos ver Gelb et al. (1974).

Os atuais softwares científicos de processamento de dados GNSS, normalmente usam tanto estratégias estocásticas como determinísticas para estimar os parâmetros troposféricos, incluindo os gradientes horizontais.

Em termos de processos determinísticos, as estratégias de estimação mais comuns são baseadas no MMQ com um fator de escala polinomial para descrever a variabilidade do *ZWD* (*Zenith Wet Delay* – componente úmida do *ZTD* ou também referenciada como parte residual do *ZTD* no processamento de dados GNSS, já que a componente hidrostática – *ZHD* (*Zenith Hydrostatic Delay*) – é mantida fixa no ajustamento). No entanto, algumas fontes de erro, tais como efeitos da carga oceânica, são absorvidas pelos parâmetros polinomiais (CHANG e TSENG, 1999).

Uma técnica alternativa para estimar o atraso troposférico é caracterizar a atmosfera com leis probabilísticas ou modelos estatísticos. Os efeitos da troposfera sobre a propagação de ondas de rádio podem então ser preditos variando as dimensões espaciais e temporais de acordo com uma dada função densidade de probabilidade ou estocasticamente (TRALLI et al., 1990). Simplesmente, o modelo matemático pode ser resolvido por uma função linear constante (*piecewise linear*) da parte residual do *ZTD*, *ZWD*, com base nos critérios que o atraso é correlacionado no tempo por algum processo estocástico. Como citado anteriormente, os processos estocásticos mais apropriados para a estimativa do atraso são basicamente dois: *Random Walk* e o *Gauss-Markov* de primeira ordem.

Com o avanço dos pacotes de softwares científicos, tais como GAMIT e GOA-II, o *ZTD* pode ser estimado a cada 30 minutos ou menos, em conjunto com outros parâmetros. Esse processo para uma rede de estações GNSS de monitoramento contínuo, como a RBMC,

pode ser feito em tempo quase real, isto significa que, a disponibilidade da solução (latência) pode ser dada a cada hora, aproximadamente. No processamento de dados GNSS para estimativa do ZTD, os parâmetros a serem estimados incluem coordenadas da estação, erro do relógio do receptor, parâmetros de orientação da Terra, ambiguidade da fase da onda portadora, entre outros. Nota-se o grande número de parâmetros envolvidos no processamento, o que poderá causar instabilidade no processo de estimação, resultando em uma solução com grandes erros sistemáticos na estimativa do ZTD. Para isso, a estratégia de processamento de dados adotada é a janela deslizante. Este processo foi desenvolvido para processar pequenos segmentos de dados GNSS com mínima degradação na estimativa do ZTD.

Esta estratégia é adotada nos softwares utilizados nesta pesquisa para a simulação do processamento em tempo quase real. A determinação do tamanho ideal da janela é algo que ainda vem sendo investigado (FOSTER et al., 2005, SAPUCCI et al., 2007), pois ela está associada com a eficiência do processo e a qualidade final das estimativas do ZTD.

3.3 Descrição do método de combinação de séries temporais de ZTD

A metodologia proposta nesse artigo para a combinação de séries temporais de ZTD em tempo quase real foi realizada considerando uma abordagem de uma janela temporal de ZTD utilizando os softwares GOA-II e GAMIT. Nessa metodologia, considera-se não somente as estimativas de ZTD para a janela atual, mas também as janelas de épocas anteriores. A confiabilidade na solução final é garantida pela utilização dos resultados advindos do GOA-II e GAMIT. A Tabela 1 apresenta as estratégias adotadas para cada software, GOA-II e GAMIT, na estimativa do ZTD NRT.

Vale notar que o GOA-II e GAMIT utilizam efemérides precisas ultra-rápidas advindas do JPL/NASA (*Jet Propulsion Laboratory*) e IGS (*International GNSS Service*), respectivamente, o que permite que os valores de ZTD sejam estimados em com latência menor que 2 horas. Essa configuração permite que os valores de ZTD sejam utilizados no processo de assimilação do CPTEC, onde a latência máxima permitida é

Tabela 1: Estratégia e configurações adotadas na estimativa do ZTD em NRT

Software	GOA-II	GAMIT
<i>Método de Posicionamento</i>	PPP	Relativo em Redes
<i>Função de Mapeamento</i>	GMF	GMF
<i>Correção dos efeitos de Carga Oceânica</i>	Modelo FES2004	Modelo FES2004
<i>Ângulo de Elevação</i>	10°	10°
<i>Processo Estocástico</i>	<i>Random Walk</i>	<i>Gauss-Markov de primeira ordem</i>
<i>Injunção Inicial</i>	0,5 m	0,5 m
<i>Taxa de Variância do ZTD</i>	5 mm / $\sqrt{\text{hora}}$	2 cm / $\sqrt{\text{hora}}$
<i>Órbitas e correções dos relógios dos satélites</i>	Ultra-rápida JPL	Ultra-rápida IGS
<i>Janela Deslizante</i>	8 horas	8 horas

3,5 horas.

O modelo utilizado para a correção dos efeitos de carga oceânica foi o FES2004 para ambos os softwares, seguindo as recomendações do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) (LYARD et al., 2006).

A injunção inicial para a estimativa da parte residual do ZTD, foi de 50 mm para ambos os softwares. Esse valor foi baseado em Jin et al., 2007, onde obtiveram a variabilidade anual do ZTD de 150 estações GNSS pertencentes ao IGS e distribuídas globalmente para um período de 12 anos.

Todos os dados disponíveis compondo a janela para uma determinada época são utilizados dentro do processo, como pode ser observado pela Figura 3, onde se ilustra a estrutura proposta para a combinação de ZTD em tempo quase real utilizando uma janela de 8 horas.

Cada chave representada na figura 3 é um par de séries compostas dentro de uma janela comum de t até $t-7$ horas para o GOA-II e o GAMIT. Nesse sentido, leva-se em consideração não só a época atual (t), mas também as soluções

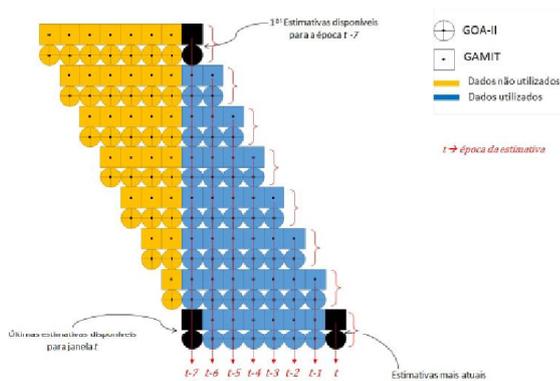


Fig. 3 – Estrutura proposta para combinação do ZTD em tempo quase real.

das janelas anteriores. O modelo funcional na equação abaixo descreve a combinação de ZTD em tempo quase real utilizando as janelas disponíveis:

$$L_{(n)}^{(k)}(t) = C(t) + b^{(k)} + v_{(n)}^{(k)}(t), \text{ para } t=t, t-1, t-2, \dots, t-7 \quad (2)$$

Na equação (2), o termo $L_{(n)}^{(k)}$ são as observações de ZTD para uma determinada época t , compondo um lote comum de n estimativas de ZTD para cada k séries temporais de diferentes softwares. Os termos $C(t)$ e $b^{(k)}$ são os parâmetros a serem determinados no ajustamento, onde o primeiro diz respeito à solução combinada para uma determinada época, e o segundo é o viés entre cada k séries temporais.

O vetor dos resíduos é representado por $v_{(n)}^{(k)}(t)$. Para exemplificar, a figura 4 ilustra o vetor das observações contendo as janelas comuns para as estimativas de ZTD das 14:30 horas de cada software, GOA-II e GAMIT, considerando as séries temporais dentro de cada grupo sem lacunas e falhas. Esse método é baseado na combinação entre janelas de estimativas de ZTD.

A Figura 5 mostra a composição da matriz *design* transposta, A^T , levando em consideração todos os dados disponíveis na janela, sem considerar falhas, ou seja, 72 observações para 9 parâmetros (63 graus de liberdade).

Outro aspecto importante diz respeito ao intervalo das estimativas do ZTD em tempo quase real. Enquanto no GOA-II foi configurado para estimar o ZTD a cada 5 minutos considerando o ruído do processo de $5 \text{ mm}/\sqrt{\text{hora}}$, no GAMIT o ZTD foi estimado a cada hora utilizando um processo com ruído de $2 \text{ cm}/\sqrt{\text{hora}}$ considerando uma correlação temporal de 100 horas (τ), o

que na verdade torna o processo praticamente um Random Walk, já que a correlação temporal tende ao infinito. No GAMIT as estimativas de ZTD são parametrizadas com essa variação estocástica a partir do modelo de Saastamoinen (1973) com uma interpolação linear por partes. O GOA-II utiliza o Filtro de Kalman com Random Walk para estimar o ZTD. Ambos os softwares utilizam um processamento baseado na janela deslizante de 8 horas de dados GNSS. No GAMIT as estimativas de ZTD são extraídas da hora central da janela de modo a evitar os efeitos de borda, o que melhora consideravelmente as estimativas do ZTD em tempo quase real em termos de processamento e acurácia, e é sugerido por trabalhos anteriores (por exemplo, FANG e BOCK, 1998). Dessa forma, tem-se janela de comprimento de 8 horas, com movimento de +1 hora, extraindo os valores da época central de cada hora, como pode ser observado pela figura 6.

Por meio dessas estratégias de processamento, 96 estimativas de ZTD para o GOA-II são obtidas para uma determinada janela de 8 horas, enquanto para o GAMIT observa-se uma quantidade inferior de 8 estimativas compondo a janela para a mesma época. Nesse sentido, numa etapa anterior a realização da combinação propriamente dita, foi realizado a reestruturação das séries temporais do GOA-II. Para isso, uma suavização foi realizada por meio da média horária dos valores das séries de ZTD estimadas pelo GOA-II, de modo que o intervalo fosse equivalente ao do GAMIT. A Figura 7 mostra o resultado desse processo.

Vale ressaltar que a média também foi realizada para a qualidade (*erro formal*) das estimativas do ZTD na reestruturação das séries do GOA-II. A figura 8 mostra a média das incertezas para o GOA-II e GAMIT para a janela de 8 horas de dados, ou seja, para o mesmo intervalo de amostragem.

Os valores do desvio-padrão (qualidade) das estimativas do ZTD advindas do GOA-II mostram-se muito otimista com variações típicas de $\pm 1,8 \text{ mm}$ a $\pm 3,0 \text{ mm}$, enquanto no GAMIT, mais realístico, apresentou tais valores em torno de $\pm 3,5 \text{ mm}$ a $\pm 7,0 \text{ mm}$. Na verdade, esses erros formais advindos do processamento com o GOA-II e GAMIT deveriam apresentar valores ainda maiores, se fossem considerados

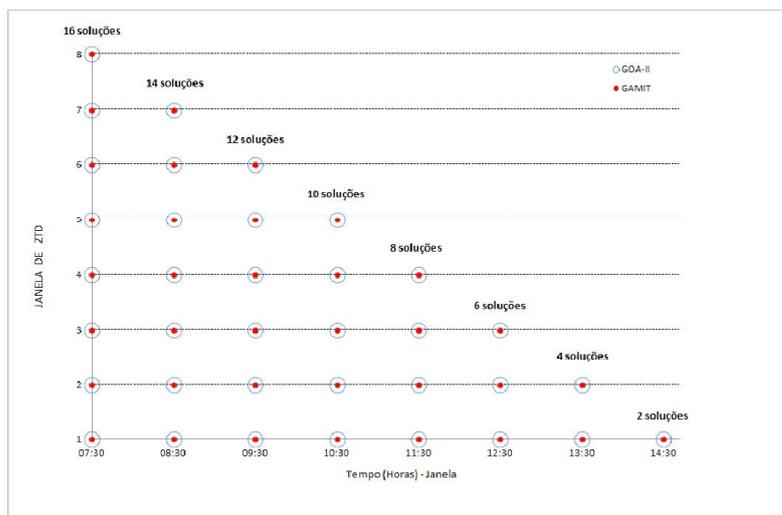


Fig. 4 – Exemplo das estimativas de ZTD compondo o vetor de observações para combinação das soluções do GOA-II e GAMIT.

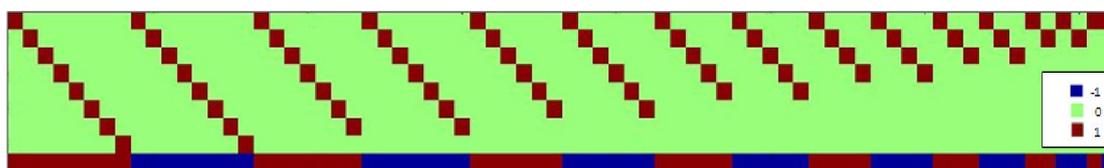


Fig. 5 – Matriz A^T completa para combinação da janela de 8 horas para GOA-II e GAMIT.

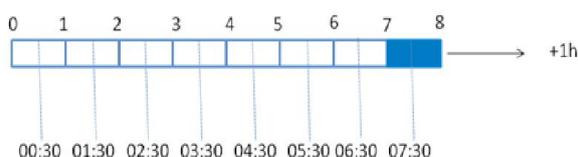


Fig. 6 – Esquema de processamento utilizando janela deslizante em tempo quase real com tamanho de 8 horas e passo de +1 hora.

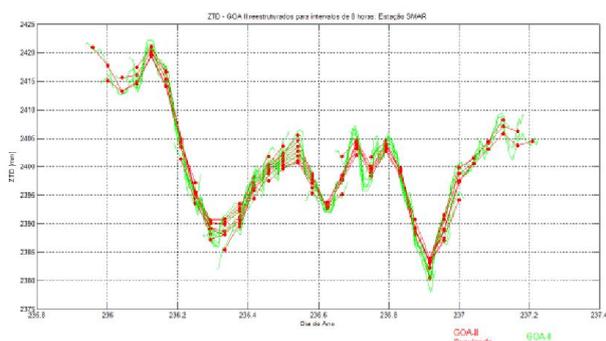


Fig. 7 – Exemplo de Reestruturação das séries de ZTD advindas do processamento com o GOA-II para a estação SMAR.

outras incertezas, principalmente de órbita e relógio dos satélites GPS. Esses valores podem torna-se mais condizentes com a realidade pela aplicação de um fator escalar de cerca de quatro ou seis vezes os erros teóricos advindos do processamento no modo estático. (VYAS

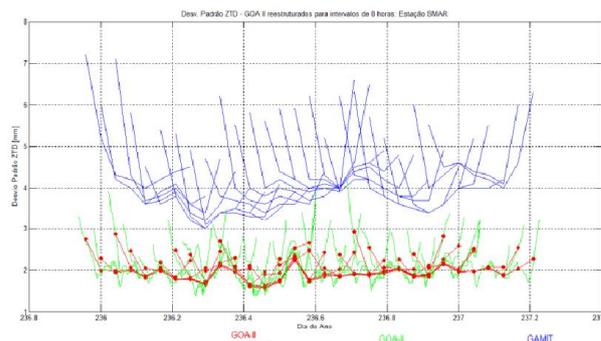


Fig. 8 – Exemplo de Reestruturação dos erros formais de ZTD advindos do processamento com o GOA-II (verde), GOA-II reestruturado (vermelho) e GAMIT (azul) para a estação SMAR.

et al., 2011). A determinação desse fator de ponderação é algo em estudo. Dessa forma, na combinação das soluções de ZTD, as MVC das observações contendo as estimativas do GOA-II e GAMIT foram escalonadas, aplicando um fator de modo a fornecer uma matriz peso (P) que pondere adequadamente as medidas no processo de ajustamento e que seja mais condizente com a expectativa.

Após ter sido realizado a combinação das soluções no ajustamento, foi aplicado o conhecido procedimento DIA (Detecção, Identificação e Adaptação) para a detecção e

identificação de possíveis erros grosseiros nas observações e de erros no modelo (funcional e estocástico). Detalhes do procedimento DIA podem ser encontrados em Camargo (1992) e Teunissen (1998).

Com a descrição do método de combinação proposto nesse artigo, alguns experimentos foram realizados e são apresentados na próxima seção.

4. RESULTADOS

Os ZTD em tempo quase real referente aos dias 233 a 239 de 2009 foram utilizados para combinação das séries temporais para a estação SMAR. Cada dia do ano tem-se 24 processamentos com janela deslizante de 8 horas para os softwares GOA-II e GAMIT. Uma única janela de combinação consisti num total de 72 observações, necessárias para estimar por meio do MMQ, 8 parâmetros de ZTD combinados e 2 vieses por estação, mas considerando as informações de ZTD sem falhas.

Fatores de ponderação na ordem de duas vezes o do GAMIT foi aplicado para as séries dos desvios do ZTD do GOA-II. A figura 9 mostra o desvio-padrão escalonado com a finalidade de obter um modelo estocástico mais adequado à realidade física.

Para a estação SMAR adotou fator escalar 8,0 de ponderação da MVC para o GOA-II e 4,0 para o GAMIT, seguindo a ideia de Vyas et al. (2011).

Com a adaptação do modelo estocástico, os parâmetros do modelo de combinação foram determinados por meio do MMQ. A figura 10 apresenta as soluções combinadas das séries temporais de ZTD, a qualidade da combinação e o viés estimado entre cada uma das soluções do GOA-II e GAMIT para a estação SMAR.

No canto superior esquerdo da figura 10 é mostrado as variâncias advindas do MMQ, e os pontos na cor preta presentes são considerados as melhores soluções, pois quanto mais distante da primeira janela, maior é a redundância do modelo, já que são disponibilizadas várias vezes dentro da janela de combinação. Essa indicação da qualidade poderá ser utilizada a priori na assimilação de dados em modelos de PNT como forma de maximizar os benefícios gerados pela inclusão desses dados.

O viés entre as séries individuais de

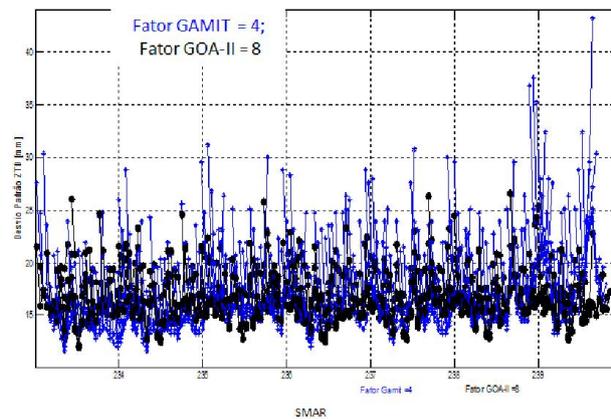


Fig. 9 – Fator escalar aplicados para as Séries Temporais de ZTD GOA-II e GAMIT.

cada software apresentaram valores de -5,3 mm a 3,8 mm para estação SMAR. Em termos globais, o valor de IWV de 1 kg/m² corresponde aproximadamente 7 mm de ZWD, portanto, teoricamente, os vieses estimados das séries ficam numa faixa de IWV equivalente à 0,5 kg/m² e 0,8 kg/m². Verifica-se também que para o dia 235 o decaimento acentuado do viés de um valor de 3,9 mm para -5,3 mm, enquanto os valores de ZTD aumentaram consideravelmente. Pode-se dizer que o GOA-II passou a subestimar o vapor d'água em relação ao GAMIT considerando o ZWD proporcional ao IWV e vice-versa. Vespe e Pacione (2007) notaram que as soluções dos centros de análises que utilizam o Bernese e o GOA-II tendem a subestimar as incertezas do ZTD e sua distribuição não é exatamente Gaussiana, enquanto o GAMIT tende a superestimar as incertezas e a distribuição é muito próxima da Gaussiana.

No canto inferior direito da figura 10 representa a detecção de erro no modelo e/ou na observação, a qual é baseada na distribuição estatística Qui-Quadrado (χ^2), conforme o procedimento DIA. Nota-se que não existem erros presentes nas observações e/ou modelo, pois o Qui-Quadrado calculado é menor que o Qui-Quadrado tabelado a um nível de significância de 5%.

Para avaliar o impacto da combinação das estimativas do ZTD em tempo quase real, o pós-processamento do GOA-II cobrindo a semana do dia 233 a 239 de 2009 foi realizado utilizando janela de 24 horas e seguindo as estratégias destacadas nesse artigo. Na figura 11 apresenta as diferenças das soluções do GOA-II, GAMIT

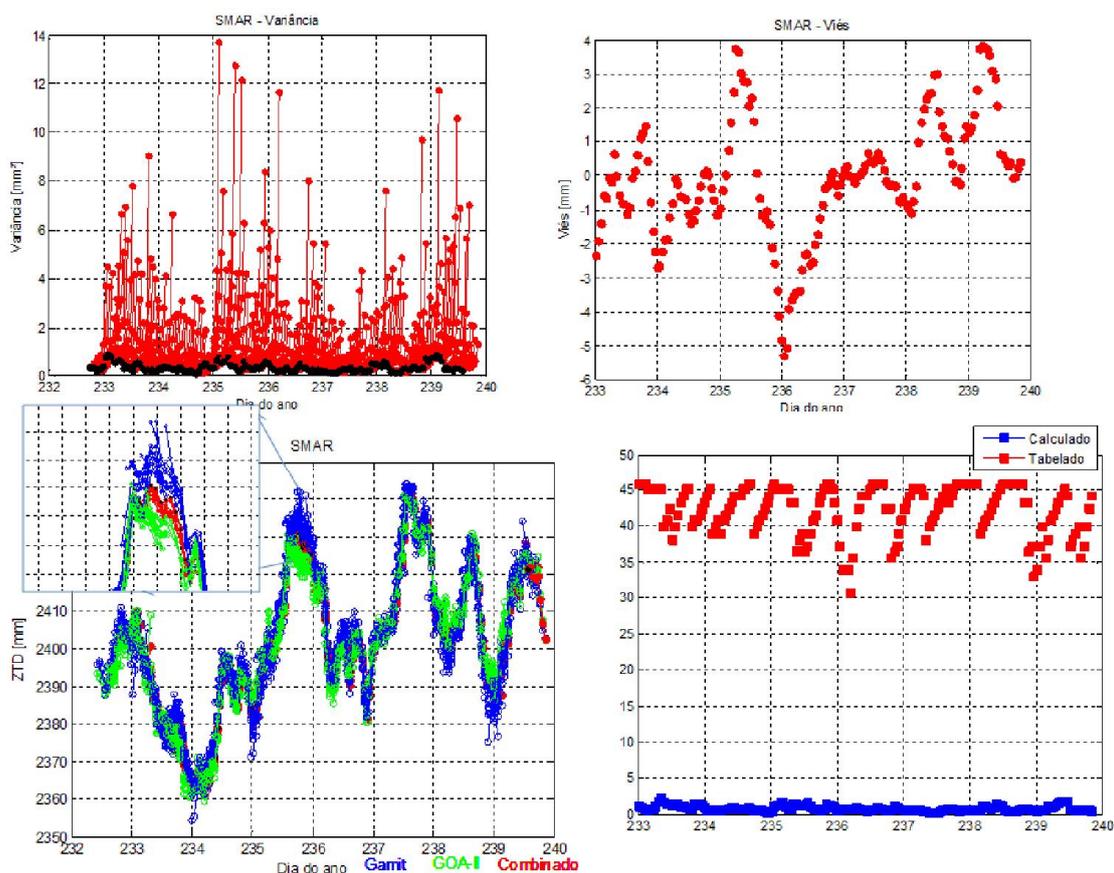


Fig. 10 – Resultado da combinação de séries temporais de ZTD para estação SMAR.

e Combinado em relação ao pós-processado para estação SMAR.

Os resultados mostram claramente que para estação SMAR as soluções do GOA-II foram melhores do que as do GAMIT, tendo como base o produto combinado. Para essa estação a solução combinada apresentou resultados mais coerentes quando comparado com a solução pós-processada. Observa-se uma diminuição nos valores do RMS, sendo no máximo de 3,2 mm, como pode ser observado pelas estatísticas apresentadas pela figura 12.

A solução individual advinda do GOA-II foi a que apresentou menor tendência quando comparada com a solução pós-processada.

Nota-se que em geral as soluções individuais do GAMIT tende a prejudicar a solução combinada. Nesse caso, a combinação ponderou adequadamente as observações, já que a Matriz P foi escalonada por fatores empíricos apropriados para o GOA-II e GAMIT, como pode ser observado pela precisão mostrada pelo desvio padrão do método combinado, o qual foi melhor que as soluções individuais na comparação com o ZTD pós-processado.

Dessa forma, pode-se dizer que a qualidade do produto combinado foi obtida de forma homogênea, e que o modelo funcional e o estocástico são adequados para a realidade física. A qualidade da solução combinada foi da ordem de 2,8 mm, enquanto para o GAMIT foi de 4,5 mm e para o GOA-II de 3,2 mm para os melhores resultados.

Por meio do método apresentado de combinação de séries temporais de ZTD, pode-se determinar a solução mais confiável baseada na estimativa do viés de cada software, bem como as incertezas do ZTD combinado. Dentro do contexto de assimilação de dados e PNT, o melhor resultado dependerá não somente da capacidade de modelar com eficiência a atmosfera terrestre, mas também da qualidade do estado inicial da previsão. Por meio da lei de propagação de erros, um determinado erro da análise do estado inicial, poderá causar maiores erros para o estado futuro, deteriorando as previsões de tempo. (SAPUCCI, 2007). Dessa forma, um dos aspectos importante, é que na assimilação de dados, as incertezas das observações de ZTD e/ou IWV devem ser bem conhecidas para melhor descrição do estado

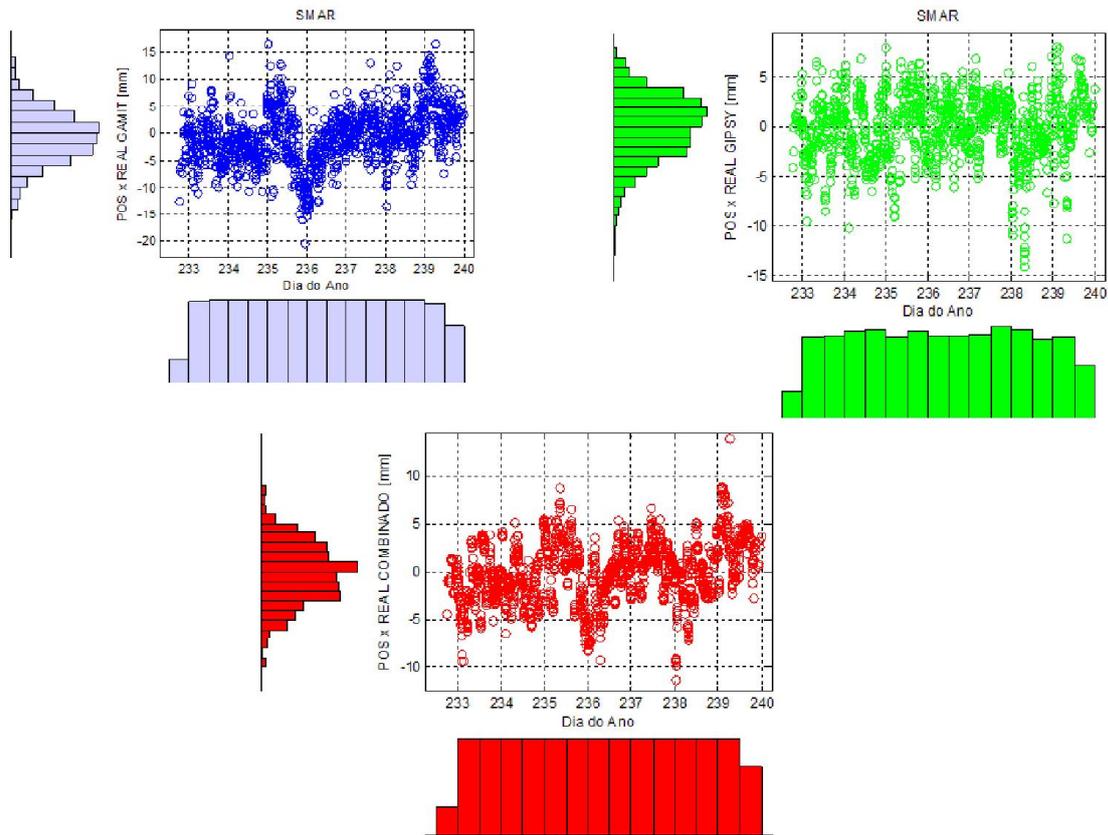


Fig. 11 – Diferenças entre as séries de ZTD GOA-II (verde), GAMIT (azul) e Combinado (vermelho) em relação às soluções pós-processadas para estação SMAR.

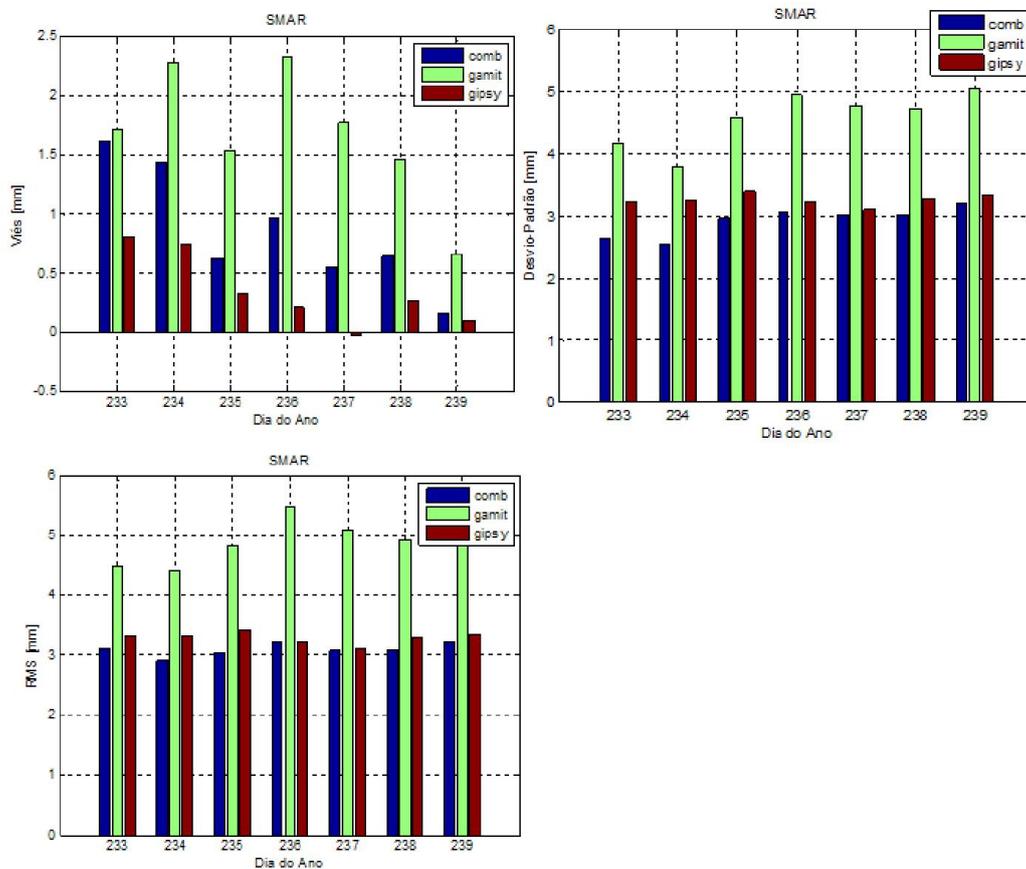


Fig. 12 – Estatísticas das diferenças entre as séries de ZTD GOA-II (vermelho), GAMIT (verde) e Combinado (azul) em relação às soluções pós-processadas para estação SMAR.

inicial da atmosfera.

Portanto, com a finalidade de selecionar adequadamente um conjunto válido de ZTD no início do processo de assimilação, a combinação de séries temporais de ZTD deverá servir como uma ferramenta de controle de qualidade, uma vez que nesse processo determina-se não somente as incertezas do ZTD combinado, mas também o viés das soluções individuais de ZTD de cada software. Assim, a combinação contribui com informações adicionais para a assimilação, e conseqüentemente, melhora a modelagem da atmosfera.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As múltiplas soluções (duas no caso do presente artigo, GOA-II e GAMIT) de ZTD disponíveis para um determinado instante é o ponto chave do método de combinação de séries temporais proposto nesse artigo. As potencialidades desse método são inúmeras, tais como realizar análises das estimativas sucessivas e de seus erros em tempo quase real. Por exemplo, pode-se por meio do desenvolvimento de um filtro, identificar se as estimativas para época atual estão enviesadas em relação às soluções anteriores, o que torna possível corrigir a janela das estimativas mais atuais e fornecer o produto com melhor qualidade para modelos de PNT.

A modelagem estocástica do método proposto deverá ser melhorada, já que a matriz P foi escalonada utilizando fatores determinados empiricamente. O problema relacionado ao fator de ponderação é algo em estudo e poderá ser otimizado pela aplicação das componentes de variância (VCE – *Variance Component Estimation*), que permitirá obter um modelo estocástico otimizado. Dentro desse contexto de controle de qualidade, o processo apresentado de combinação de séries temporais de ZTD também deverá contemplar a análise de confiabilidade interna e externa, a fim de detectar erros nos modelos e observações, com certo nível de probabilidade, bem como analisar a influência dos erros não detectados nos parâmetros.

Para trabalhos futuros recomenda-se avaliar a melhor estratégia de combinação, por meio de simulação de dados sintéticos. Realizar simulações para comparar as soluções de ZTD em tempo quase real com pós-processado, bem como com as soluções de ZTD advindas do

IGS. Sugere-se também aprimorar o método de combinação no que diz respeito à injeção do viés, de forma que seja utilizada a média ponderada do viés ao invés de considerar o viés igual para todas as observações no processo de ajustamento.

Como potencial futuro, os novos softwares instalados no Laboratório de Geodésia Espacial/UNESP, e em outras instituições brasileiras, como a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), poderão estimar séries de ZTD em tempo quase real, e a partir dessa gama de soluções disponíveis será possível realizar a combinação com maior redundância de informações de diferentes fontes, e como resultado será o contínuo melhoramento desse produto advindo da Geodésia e disponível para a Meteorologia.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de uma bolsa de estudo (processo: 2011/03549-8) e pelo apoio direto a essa pesquisa (projeto temático GNSS-SP processo: 2006/04008-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHANG, C. C., TSENG, C. L. Testing on Tropospheric Modelling for GPS Tracking Stations in Taiwan, **Geomatics Research Australasia**, 1999, No 70, p. 77-94.

CAMARGO, P. O. **Controle de qualidade aplicado ao filtro de Kalman**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992, p. 97.

DAVIS, J. L.; HERRING, T. A., SHAPIRO, I.; ROGERS, A. E.; ELGENED, G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of base line length. **Radio Science**. v. 20, n. 6, p. 1593-1607, 1985.

EMARDSON, T.; RAGNE, Studies of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. **Technical Report**, n. 339, 1998.

FANG, P.; BOCK, Y. Sliding Window Procedure for Super Near Real-time Continuous GPS Water Vapor Estimation Using Predicted Orbits. *Supp.*

- Geophysicae **Anais**, 1998.
- FOSTER, J.; BEVIS, M.; BUSINGER, S. GPS Meteorology: Sliding-window analysis. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, v. 22 n. 6, p. 687–695, 2005.
- GELB, A., KASPER, J. F., NASH, R. A., PRICE, C. F., SUTHERLAND, A. A. **Applied Optimal Estimation**. Sixth printing, The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts, and London, England, 1974, p. 317-356.
- GOUVEIA, T. A. F., SAPUCCI, L. F., MONICO, J. F. G., ALVES, D. B. M. Avaliação Robusta da Modelagem Neutrosférica sobre o Território Brasileiro Baseada em Modelos de Previsão Numérica de Tempo da América do Sul. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol.20, no.3, Curitiba, 2014.
- JIN, S., PARK, J., CHO, J., PARK, P. Seasonal variability of GPS-derived zenith tropospheric delay (1994–2006) and climate implications. **Journal of Geophysical Research**, Atmospheres, Vol. 112, 2007.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2. ed. John Wiley and Sons Ltd. 1995. 650p.
- LYARD, F., LEFEVRE, F., LETELLIER, T., FRANCIS, O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. **Ocean Dynamics**, 2006, p. 394-415.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Unesp. 2008. 287p.
- PACIONE, R.; PACE, R.; VEDEL, H.; HAAN, S.; LANOTTE, R.; VESPE, F. Combination methods of tropospheric time series. **Advances in Space Research**. Publicado por Elsevier Ltd, v. 47, n. 2, p. 323-335, 2011.
- SAASTAMOINEN, J. Contributions to the theory of atmospheric re-fraction. **Bulletin Géodésique**, p. 105, 279-298, 106, 383-397, 107, 13-34, 1973.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D. L.; SOUZA, R. A. F. Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real. **Revista Brasileira de Geofísica**. vol.25 no.3, São Paulo, 2007.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. (Dissertação). Presidente Prudente SP, Brasil, 167 f, 2001.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 202 f., 2005.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; ROSA, G. P. S. Avaliação das Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul Obtidas Usando Modelo de Previsão Numérica de Tempo com Alta Resolução Espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.14, n.4, 2008.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: Foundations, Methods & Applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 586p.
- TRALLI, D. M., LICHTEN, S. M. Stochastic Estimation of Tropospheric Path Delays in Global Positioning System Geodetic Measurements. **Bulletin Géodésique**. 1990, p. 127-159. 64 v.
- TEUNISSEN, P. J. G. Quality control and GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for geodesy**. 2. ed. New York: Springer Verlag, 1998. Cap. 7, p. 271-318.
- VYAS, R. M., LIM, S., RIZOS, C. Analysis of Zenith Path Delay in Dynamically Changing Environment. University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, **IGNSS Symposium**, 2011, Seção 3B.
- VESPE, F., PACIONE, R. Tropospheric Processing for NRT and Post-Processing GPS Applications at ASI. Londres, Inglaterra. **EUREF Symposium**, 2007, Seção 4.4.
- ZHENG, Y. **Generation of Network-Based Differential Corrections for Regional GNSS Services**. Tese de Doutorado, Faculty of the Built Environment and Engineering, Australia, 2006, p. 92.