

**ASSIMILAÇÃO DO IWV-GPS NO BRASIL: OTIMIZAÇÃO DAS ESTIMATIVAS
DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO EM TEMPO REAL**

Luiz Fernando Sapucci

João Francisco Galera Monico

Luiz Augusto Toledo Machado

Resumo

A assimilação do IWV (*Integrated Water Vapor*) em modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) apresenta um benefício em potencial que é minimizar os erros na estrutura vertical da umidade com impactos positivos para a previsão de fenômenos atmosféricos á curto prazo. O emprego das redes de monitoramento contínuo dos sinais GPS em bases terrestres na quantificação do IWV disponibiliza uma fonte adicional de informações da umidade para os modelos de PNT. Esforços têm sido realizados para possibilitar a utilização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo das Satélites GPS (RBMC) no monitoramento do IWV sobre o território Brasileiro. Para que tais valores do IWV-GPS sejam obtidos com a menor latência é necessário que o processamento seja otimizado, de forma que o melhor resultado seja obtido com o menor custo computacional. Para essa otimização deve-se definir qual é o tamanho ideal da chamada janela deslizante (*sliding window*) de dados GPS envolvido no processamento em tempo real que seja a menor possível e que forneça os melhores resultados. O objetivo desse trabalho é identificar qual é o tamanho ideal dessa janela deslizante que otimize o processo de obtenção das estimativas do atraso zenital troposférico (*ZTD*) em tempo real. Para isso um experimento foi realizado

onde janelas contendo 1, 3, 6, e 12 horas de dados GPS foram testadas através de simulações de processamento em tempo real. Ao comparar os resultados obtidos com valores pós processados para um período de um mês de dados (720 casos avaliados), observou-se que uma janela de 6 horas de dados foi obtido a melhor relação custo computacional e acurácia. Com essa configuração foram obtidas estimativas do *ZTD* com um rms de 1,02 cm (ou 1,57 kg m⁻² nas estimativas do IWV) em uma latência de 70 minutos, os quais são resultados satisfatórios, pois tal latência atendem as exigências da atual configuração dos sistemas de assimilação utilizados no Brasil e a acurácia é menor que a incerteza das estimativas pós processadas ao compara-las com as radiossondas.

Palavras chave: Processamento GPS em Tempo real; Assimilação de dados; IWV-GPS.

Abstract

The IWV (*Integrated Water Vapor*) assimilation into Numerical Weather Prediction (NWP) model minimize the error in the vertical structure of humidity generating positive impacts in the prediction of atmospheric phenomenon in nowcast. The IWV values from Brazilian Network of Continuous Monitoring (RBMC) of GPS signals are additional source of humidity information available to NWP models operating in the Meteorological Brazilian Center. In this process the latency that this information is available involve the optimization of the GPS data processing to provide the better result applying the lowest computational cost. In order to obtain this optimization it is necessary to determine the ideal size data sliding-window involved real time data processing, which must be the lower possible and provide the best results. The focus of this paper is investigate the ideal size of the data

sliding-window that optimize the GPS process to obtain Zenithal Tropospheric Delay in real time. An experiment was carried out in which sliding-windows containing 1, 3, 6 and 12 hours of GPS data were evaluated using simulations of the real time process. The *ZTD* values from GPS data pos processed were used as reference in this evaluation. The experiment period was of 1 month (June, 2004), in which 720 pairs of values were generated each epoch. The results obtained showed that sliding-windows containing 7 hours of the data GPS generated the better relation between accuracy and CPU time. In this configuration was obtained *ZTD* estimates with rms of the 1.02 cm (or 1.57 kg m⁻² in the IWV estimates) with a latency of the 70 minutes. This results are satisfactory, because this latency satisfies the exigencies of the Brazilian assimilation system and this accuracy is better than uncertainty of the pos process *ZTD* estimative when compared with radiosondes.

Keywords: GPS processing in Real Time, Data assimilation; IWV-GPS.

1. Introdução

O emprego das redes de monitoramento contínuo dos sinais GPS em bases terrestres na quantificação do IWV (*Integrated Water Vapor*) é uma aplicação multidisciplinar com grande potencial para o monitoramento da concentração do vapor d'água atmosférico, a qual abre boas perspectivas para diversos estudos relacionados às ciências atmosféricas. Diversos projetos têm explorado essa técnica envolvendo centros de pesquisas na área de Meteorologia e de Geodésia em vários países. Como exemplo pode-se destacar o SUOMINET (*Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and*

Education) (Ware et al. 2000) nos Estados Unidos da América; O GASP (*GPS Atmosphere Sounding Project*) que é responsável pela aplicação da densa rede de receptores GPS da Alemanha na Predição Numérica do Tempo (Reigber et al., 2001); O COST-716 (*European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research 716*) que envolve instituições de 15 diferentes países europeus (Marel 2001); e o “GPS/MET Japan” (Tsuda et al., 1998) com uma rede de quase 1000 estações criada inicialmente para monitoramento de abalos sísmicos. Seguindo essa tendência mundial, esforços têm sido realizados para possibilitar a utilização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo das Satélites GPS (RBMC) (Fortes et al., 1997) no monitoramento do IWV sobre o território Brasileiro. O objetivo disso é disponibilizar mais uma fonte de informações da umidade para os modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT). A assimilação do IWV apresenta um benefício em potencial para a PNT que é minimizar os erros na estrutura vertical da umidade com impactos positivos para a previsão de fenômenos atmosféricos, principalmente para a previsibilidade da precipitação pluviométrica á curto prazo (Kuo et al., 1996).

O principio básico da PNT consiste obter o estado futuro da atmosfera em uma instante t a partir do conhecimento de seu estado inicial em um instante t_0 ao empregar as leis de evolução desse estado. O sucesso na previsão está relacionado à capacidade de se modelar, com maior eficiência, a atmosfera terrestre e principalmente descrever com precisão o seu estado inicial. Para isso o maior número possível de informação sobre as variáveis atmosféricas deve ser disponibilizado no momento em que o processo é iniciado. Nisso está envolvido o que é conhecido por “latência” das informações, que pode ser definida como sendo o período compreendido entre o instante em que tal informação está disponível à um determinado processo e o instante ao qual ele se refere. No caso das informações atmosféricas, os fatores responsáveis pela latência estão relacionados ao tempo

de coleta, armazenamento e envio das estações coletoras os centros de previsão de tempo. Para que a eficiência da PNT seja obtida necessita-se que a maior quantidade possível de informação com a menor latência seja disponível ao processo.

Para o caso dos valores do IWV a partir das observações GPS, além dos fatores responsáveis pela latência já mencionados, existe também o tempo de processamento dos dados para a estimativa do atraso zenital troposférico (*DZtrop*) em tempo real (Rocken et al., 1997), os quais são convertidos em valores do IWV (Bevis et al., 1992). Para que tais valores tenham a menor latência é necessário que o processamento seja otimizado, de forma que o melhor resultado seja obtido com o menor custo computacional. Para essa otimização deve-se definir qual é o tamanho ideal da chamada janela deslizante (do inglês *sliding window*) de dados GPS envolvido no processamento em tempo real que seja a menor possível e que forneça os melhores resultados. O objetivo desse trabalho é identificar qual é o tamanho ideal da janela deslizante que otimize as estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real. Para isso um experimento foi realizado onde diferentes janelas de dados são testadas através de simulações de processamento em tempo real. A avaliação é feita ao comparar os resultados obtidos com valores pós processados. Como o processo de utilização de informações atmosféricas por um modelo de PNT, denominado assimilação, está intimamente relacionado ao tema principal desse trabalho, uma breve descrição desse processo é apresentada, destacando os detalhes mais relevantes do ponto de vista da latência dos valores do IWV obtidos a partir das observáveis GPS (IWV-GPS).

2. Assimilação dos valores do IWV-GPS em modelos de PNT no Brasil

O processo de assimilação de informações em um modelo de PNT é um procedimento cíclico onde os resultados de uma integração curta, tipicamente de 6 h, são

usados como um chute inicial (FG do inglês *first guess*) gerados em um passo anterior ($t-6$), que combinado com as observações disponíveis para o processo, em um instante t , formam o estado inicial da atmosfera, o qual é utilizado para a integração do modelo gerando o chute inicial do próximo passo ($t+6$) (Kalnay, 2003). A combinação do FG com as observações é chamado de fase de análise, e a saída da análise no senso estatístico é o estado inicial ótimo para ser usado como condição inicial no modelo de previsão de tempo para épocas futuras ($t+6$, $t+12$, ...).

Atualmente no Brasil apesar de haver vários centros de previsão que rodarem modelos de PNT operacionalmente, O CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) é o único que realiza assimilação de dados em seus modelos de PNT. Os demais Centros apenas rodam seus modelos a partir da condição inicial fornecida por outros Centros como o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) ou o ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*). O sistema de assimilação utilizado no CPTEC é o *Physical-space Statistical Analysis System - PSAS* (Da Silva et al. 1995, Cohn et al 1998) desenvolvido no DAO/NASA (*Data Assimilation Office da National Aeronautics Space Administration*). O modelo global de PNT utilizado nesse centro é o CPTEC-COLA (Kinter et al., 1997), com resolução de 200x200, 100x100 e 63x63 km (próximo ao equador). Para a América do Sul é utilizado o modelo regional ETA (Black, 1994) com resolução de 40x40 e 20x20 km.

Tanto para o modelo global como o para o modelo regional o PSAS é disparado 4 vezes diariamente como análises sendo regradas para os horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC). A figura 1 apresenta um esquema dos horários que se referem as rodadas do PSAS, destacando o momento em que ele é acionados e o tamanho da janela de dados

utilizados. Nessa figura duas configurações são apresentadas: uma atual e uma futura em fase de estudo. Observa-se que atualmente o PSAS é disparado 3 horas após os horários sinóticos e que a janela de dados é de ± 2 horas. Na futura configuração o mesmo será disparado 2 horas após os horários sinóticos, utilizando uma janela de ± 1 hora de dados. Essa configuração futura é para privilegiar as previsões de curto prazo, que serão geradas adicionalmente as obtidas nas atuais rodadas. O esquema da figura 1 mostra que atualmente a latência máxima permitida pelo processo de assimilação é de 180 minutos, e que na futura configuração essa latência máxima passará para de 120 minutos. Esses valores da latência devem ser levados em consideração ao otimizar a obtenção das estimativas do *DZtrop* a partir das observações GPS quase que em tempo real.

2.1. Determinação das estimativas do atraso zenital troposférico quase em tempo real

Há diversos fatores que influenciam as observáveis GPS gerando erros na determinação da posição da antena GPS (Monico, 2000). Entre eles está o atraso nos sinais gerados pela influência dos gases que compõem a atmosfera terrestre. Para a quantificação do *IWV* utilizando o GPS necessitasse estimar com precisão os valores desse atraso na direção zenital. Isso é obtido ao aplicar uma estratégia adequada que minimize os demais erros presentes em tais observáveis (Sapucci, 2001), além de funções de mapeamento que relacionam esse atraso na direção satélite-receptor para a direção zenital (Spilker et al., 1994).

Na estimativa do atraso zenital troposférico (*DZtrop*) para conversão em valores do *IWV* o maior problema está relacionado com os erros nas efemérides (posição dos satélites) e nas correções dos relógios dos satélites GPS a serem utilizadas no processamento em

tempo real (Rocken et al., 1997b). As opções para solucionar esse problema são basicamente duas. Na primeira opção, as posições dos satélites são previstas a partir do processamento dos dados GPS coletados por receptores pertencentes a redes de monitoramento contínuo. Essas efemérides são utilizadas no processamento em tempo real visando obter as estimativas do *DZ_{trop}*, levando em consideração a época em que foram geradas, pois a qualidade de sua previsão é degradada no tempo (Rocken et al., 1997b). A segunda opção é através da utilização das efemérides ultra-rápidas disponibilizadas pelos centros de análise GPS (IGS - *International GNSS Service*), as quais foram criadas especialmente para esse fim (NASA, 2005b). Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos visando avaliar a qualidade das órbitas ultra-rápidas e os resultados obtidos mostram que elas possuem alta qualidade (Reigber et al., 2001). Tais resultados tornaram a primeira opção citada acima inviável, sendo por isso pouco utilizada atualmente.

Um outro problema associado às estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real está relacionado às etapas de previsão, filtragem e suavização do filtro de Kalman envolvido nesse processo. Essas etapas não são adequadamente executadas em toda a janela de dados utilizada no processo, o que gera um aumento da incerteza dos valores obtidos no início e no final da janela considerada. Enquanto no início esse aumento é devido ao processo de previsão, no fim da janela é devido à execução precária do processo de suavização. Esse fato está intimamente ligado à latência das estimativas do atraso zenital troposférico, pois as estimativas mais precisas, em uma determinada época, só estarão disponíveis depois de um certo tempo. Esse tempo é necessário para que o processo de suavização seja executado suficientemente nessa época, aumentando a qualidade final das estimativas. Esse intervalo de tempo está associado com o tamanho da janela de dados utilizado no processamento. Assim, os valores do atraso podem ser

estimados com uma latência de 1,5 h (Marel, 2001), 1 h (Reigber et al., 2001) e até 30 min ou menos (Rocken et al., 1997b), dependendo do tamanho da janela de dados utilizada e da precisão requerida. A determinação do tamanho da janela ideal é algo ainda que está sendo investigado (Foster et al., 2005), pois ela está associada com a eficiência do processo e a qualidade final das estimativas do IWV.

2.1. Determinação do IWV a partir das estimativas do atraso zenital troposférico

Devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera, o atraso zenital troposférico (DZ_{trop}) é dividido em duas componentes: úmida (D_{ZW}), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (D_{ZH}), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera (Spilker et al., 1994). A componente hidrostática depende apenas da densidade do ar atmosférico, e por isso, se considerado o equilíbrio hidrostático seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão à superfície (P_0), da latitude do local (φ), e da altitude (h_0) em quilômetros (Davis et al., 1985):

$$Z_{HD} = (2,27671422 \times 10^{-3}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2 \varphi - 0,00028h)}, \quad (1)$$

Assim, ao tomar um valor do atraso zenital troposférico obtido a partir das observações GPS e subtrair o atraso troposférico da componente hidrostática, obtido a partir de valores de pressão à superfície, chega-se no valor do atraso zenital da componente úmida (D_{ZW}). A relação entre os valores do D_{ZW} e a quantidade de vapor d'água atmosférico (IWV) existente no momento em que foram feitas as observações GPS está em

função da temperatura média troposférica (T_m). Essa relação pode ser expressa pela seguinte equação (Bevis et al., 1992):

$$IWV = D_{ZW} \cdot \frac{10^6}{R_w \left[k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right]}, \quad (2)$$

onde $R_w = (461,5181) Jkg^{-1}K^{-1}$ é a constante específica para o vapor d'água, $k_2 = 22,10 K hPa^{-1}$ e $k_3 = 373900 K^2 hPa^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica cujo valores foram determinados experimentalmente (Bevis et al., 1994). Os valores de T_m podem ser aproximados a partir de medidas de temperatura efetuadas à superfície (Bevis et al., 1992). Para regiões do território brasileiro uma modelagem adequada que relaciona os valores de T_m com informações obtidas à superfície foi desenvolvida empregando 90.000 radiossondas (Sapucci et al., 2004).

3 Experimento para avaliação do tamanho ideal da janela deslizante de dados GPS

Para determinar o tamanho ideal da janela deslizante de dados, realizou-se um experimento onde diferentes tamanhos foram testados. Os critérios utilizados para a avaliação dos diferentes casos testados estão relacionados com a otimização do processo, ou seja, melhor qualidade com o menor tempo de processamento (menor latência). Na avaliação da qualidade, os resultados obtidos numa simulação de um processamento em tempo real são comparados com valores obtidos no pós-processamento.

Os dados GPS utilizados nesse experimento são provenientes da estação UEPP Localizada em Presidente Prudente - SP (latitude $22^{\circ}07'S$, longitude $51^{\circ}24'W$ e 435 m de altitude). O receptor utilizado (marca Trimble, modelo 4000SSI e antena modelo ROGUE-

T, do tipo *Choke Ring*) foi configurado para disponibilizar as observações GPS em arquivos contendo uma hora de dados. O período de coleta dos dados utilizados foi de 1/6/2004 a 30/6/2004.

As efemérides utilizadas na simulação do processamento em tempo real foram as do tipo ultra-rápida produzida pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Essas efemérides diferem das fornecidas por outros centros em dois aspectos. Elas não apresentam predição para épocas futuras àquela em que foram disponibilizadas e as coordenadas dos satélites e o erro do relógio são disponibilizados com uma taxa de 5 minutos. Para o pós-processamento dos dados as efemérides utilizadas foram as do tipo precisa, também produzidas pelo JPL.

O software utilizado para o processamento dos dados GPS, tanto em tempo real como pós-processados, foi o GOA-II (Gregorius, 1996), com máscara de elevação de 10°, intervalo de processamento de 30 segundos, função de mapeamento de Niell (Niell, 1996) e o processo estocástico para estimar o DZ_{trop} foi o *Random Walk* com o valor do sigma do processo estocástico de $5 \text{ mm } h^{-1/2}$.

A metodologia utilizada nesse experimento consiste basicamente no processamento de um conjunto de dados de diferentes tamanhos, utilizando efemérides ultra-rápidas, e comparando com os resultados obtidos com o processamento convencional pós-processado usando efemérides precisas e arquivos de dados de 24 horas. Esse procedimento pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. Os arquivos de dados GPS no formato RINEX contendo observações coletadas num período de uma hora foram concatenados formando arquivos maiores. Com isso, foram gerados 24 arquivos por dia para cada uma das janelas avaliadas;
2. Para simular o processamento em tempo real, as efemérides ultra-rápidas obtidas via ftp (do endereço: *sideshow.nasa.gov.br*) foram organizadas de forma que, para o

processamento de cada um dos arquivos obtidos na etapa 1, elas contivessem as mesmas características da versão obtida em tempo real;

3. Para as diferentes janelas de dados consideradas foi feito um processamento utilizando as efemérides ultra-rápidas do JPL. Foi processados todos os 30 dias considerados na campanha, gerando um total de 720 processamentos para cada uma das janelas testadas;
4. Com o objetivo de se isolar todas as influências externas aos resultados obtidos com as duas formas de processamento dos dados, os valores de temperatura e pressão atmosférica utilizados na conversão dos valores do Z_{TD} em IWV foram constantes. A equação 1 foi substituída pela equação

$$D_{ZH} \cong 1,013 * 2,27 * \exp(-h_0 * 0,116 * 10^{-3}) = 2,187 m, \quad (3)$$

h_0 é a altitude geométrica da estação UEPP. Para a aplicação da equação 2, o valor da T_m utilizado foi aquele sugerido por Sapucci (2001) valido para essa estação, que é de 276,38 K.

3.1 Análise dos resultados

A análise dos resultados obtidos foi feita de tal forma que os indicadores da qualidade estivessem relacionados com o tempo de latência das estimativas obtidas. Para isso, os valores das medidas da tendência (viés), da dispersão em torno do viés (DP) e da acurácia (EMQ) foram calculados em função do tempo de latência. Tais valores foram determinados para cada época em que os valores IWV-GPS foram gerados (taxa de 5 minutos) ao considerar 720 pares de dados. Nas figuras 2, 3, 4 e 5 são mostrados os valores dos indicadores da qualidade obtida com as janelas deslizantes de dados de 1, 3, 6 e 12 horas, respectivamente.

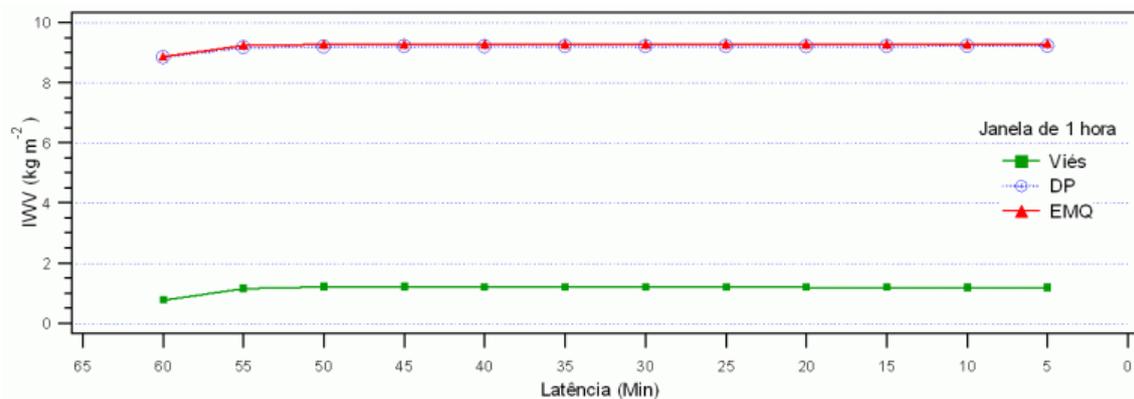


Figura 2 – Indicadores da qualidade dos valores do IWW-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 1 hora.

Os resultados mostrados na figura 2 indicam que, ao considerar uma janela de 1 hora, tanto os valores do viés como o do desvio padrão independem da latência, permanecendo constantes. Além disso, essa configuração apresenta um viés positivo e relativamente pequeno ($+1,0 \text{ kg m}^{-2}$). Porém, o resultado mais relevante é a alta dispersão ($9,0 \text{ kg m}^{-2}$). O melhor resultado é obtido no início da janela, onde há uma leve diminuição, tanto no viés como no desvio padrão.

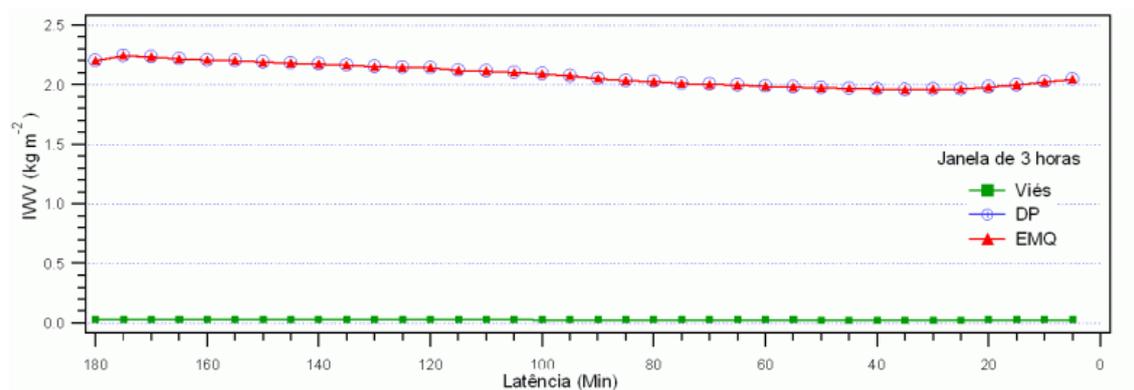


Figura 3 - Indicadores da qualidade dos valores do IWW-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 3 horas.

Com uma janela deslizante de 3 horas (figura 3) verifica-se que a qualidade das estimativas melhora significativamente em relação à janela de 1 hora. Há praticamente a ausência de viés, independentemente da latência considerada, e a dispersão mostra-se variante dentro do período considerado (1,95 a 2,25 kg m⁻²), com o pico de mínima na latência de 30 minutos.

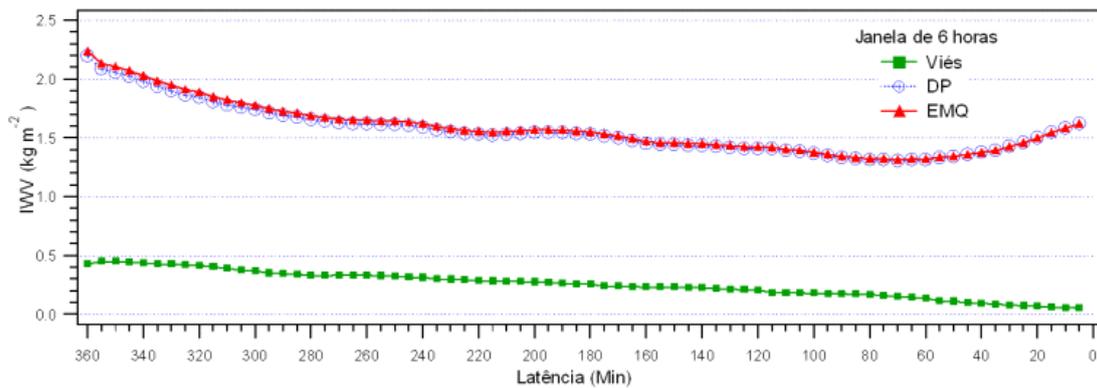


Figura 4 – Indicadores da qualidade dos valores do IWV-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 6 horas.

Nos valores apresentados na figura 30, observa-se que com a utilização da janela de 6 horas de dados, os valores do viés apresentam-se crescentes com a latência, sendo praticamente nulo no fim do período considerado (latência nula) e 0,5 kg m⁻² no início (latência de 6 horas). Já os valores do desvio padrão indicam que a dispersão é maior nas extremidades da janela e menor nas épocas intermediárias. O pico de mínima dispersão é de 1,3 kg m⁻² com aproximadamente 1 hora de latência, época onde os melhores resultados são obtidos utilizando essa janela de dados.

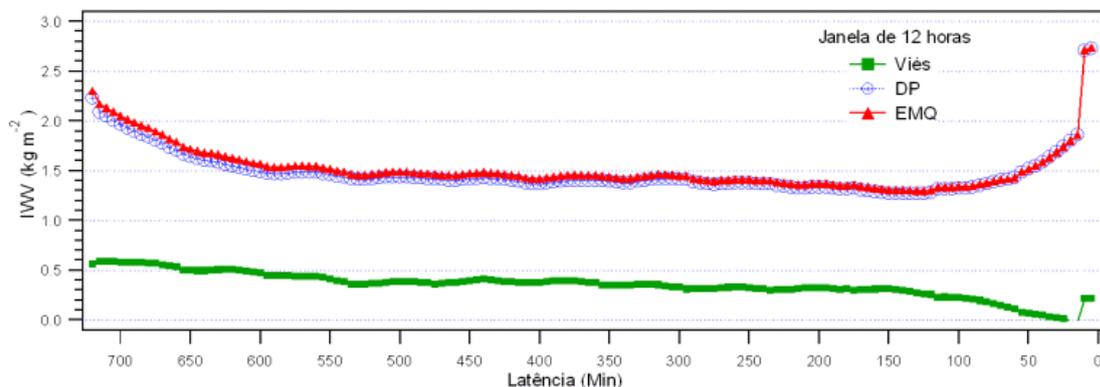


Figura 5 – Indicadores da qualidade dos valores do IWW-GPS obtidos quase que em tempo real (simulação) utilizando janela deslizante de 12 horas.

Com a utilização da janela de 12 horas (figura 5) os resultados foram semelhantes aos obtidos com uma janela de 6 horas. Os valores do viés foram também crescentes com a latência, diferenciando apenas pelos valores maiores no início e no fim da janela considerada, pois, nesse caso, no início da janela foi de $0,3 \text{ kg m}^{-2}$ e no final de $0,6 \text{ kg m}^{-2}$. Já a medida de dispersão em função da latência, verifica-se que os valores do desvio padrão são mais influenciados pelos processos de predição no início da janela e de suavização no final. Nesses períodos, a dispersão (DP de $2,3 \text{ kg m}^{-2}$) é maior do que a observada no interior (DP de $1,3 \text{ kg m}^{-2}$). No entanto, pode-se observar que, além do pico de mínima não ser significativamente menor do que o registrado com a janela deslizante de 6 horas, a latência é bem maior. Com uma janela de dados de 12 horas, a menor dispersão ($1,27 \text{ kg m}^{-2}$) é obtida com uma latência de 2 horas.

Na tabela 1 são apresentados quantitativamente os valores dos indicadores de qualidade do IWW-GPS obtidos em tempo real, resumindo os melhores resultados apresentados nas figuras 2, 3, 4 e 5. Os resultados presentes nessa tabela sugerem que a melhor qualidade (EMQ de $1,295 \text{ kg m}^{-2}$) das estimativas IWW-GPS em tempo real é obtida com uma latência de 2 horas ao utilizar uma janela de dados de 12 horas. No entanto, se a

análise for feita do ponto de vista da otimização do processo, a configuração que empregou 6 horas de dados gerou os melhores resultados, pois o valor do EMQ foi praticamente o mesmo obtido com 12 horas, porém com uma latência de 55 minutos menor. Para outras aplicações em que a precisão das estimativas do IWV não é fundamental, a melhor opção é fornecida com a utilização de uma janela de dados de 3 horas, pois com uma latência de 35 minutos são obtidos valores do IWV-GPS melhores que 2 kg m^{-2} .

Tabela 1 – Latência dos valores do IWV-GPS de melhor qualidade obtidos quase que em tempo real comparados com valores pós-processados

Janela de dados	Número de dados Considerados	Latência (minutos)	Viés (kg m^{-2})	Desvio padrão (kg m^{-2})	EMQ (kg m^{-2})
1 hora	720	60	+0,772	8,844	8,878
3 horas	720	35	+0,025	1,958	1,958
6 horas	720	70	+0,153	1,305	1,314
12 horas	720	125	+0,259	1,269	1,295

Como os valores de referência utilizados nessa análise foram os pós-processados, os resultados devem ser ponderados pelos apresentados em Sapucci 2006. Como visto na comparação com as radiossondas, os valores do IWV-GPS tendem a ser maiores do que os gerados por essa técnica. Nos valores do IWV-GPS obtidos em tempo real, essa tendência é ainda maior, pois como pode ser observado na tabela 1, o viés, mesmo que pequeno, foi sempre positivo em todas as janelas consideradas. Por outro lado, as efemérides utilizadas nesse processo são fornecidas a cada 5 minutos, e com o uso dessas em um processo sistemático podem-se obter estimativas do IWV com alta resolução temporal, quase que em tempo real (latência de 70 minutos). Esses resultados são animadores, se for considerado o potencial que eles podem gerar para a PNT e outras aplicações associadas às redes ativas de receptores GPS. Apesar de não serem testados aqui, outros softwares de processamento podem gerar resultados semelhantes, como, por exemplo, o GAMIT (King & Bock, 1996) e

o BERNESE (Rothacher & Mervart, 1996), bem como a utilização das efemérides ultra-rápidas do IGS.

4. Conclusões

O presente trabalho apresentou uma avaliação do tamanho adequado da janela de dados a ser utilizada para se obter os melhores resultados com a menor latência. Diversos tamanhos de janelas foram testadas e os resultados obtidos foram avaliados ao comparara com resultados pós-processados. Foi observado que a janela de 6 horas é a que fornece os melhores resultados ($1,3 \text{ kg m}^{-2}$) com uma latência de 70 minutos. Esses resultados são satisfatórios, pois tal latência atendem as exigências da atual configuração dos sistemas de assimilação utilizados no Brasil e a acurácia é menor que a incerteza das estimativas pós processadas ao compara-las com as radiossondas.

Ao longo da extensa área do território brasileiro há uma deficiência na coleta das informações meteorológicas, principalmente quando se trata da quantificação do vapor d'água atmosférico. O emprego de técnicas que envolvem satélites artificiais em órbita da terra é a alternativa mais viável para minimizar tal deficiência. O emprego de redes de receptores GPS na quantificação do IWV é uma dessas técnicas a qual deve ser amplamente explorada no Brasil, pois enquanto os satélites sondadores atmosféricos fornecem alta resolução espacial, essa técnica fornece alta resolução temporal. Essa alta resolução temporal pode trazer consigo informações sobre a atmosfera que poderá ser melhor explorada no futuro.

Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem ao Dr. Mick Stewart da Universidade de Tecnologia de Curtin - Austrália pelo apoio logístico; À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (processo N° 01/12761-9) pelo suporte financeiro

Referências bibliográficas

BEVIS, M., BUSINGER, S., HERRING, T.A., ROCKEN, C., ANTHES, R.A. & WARE, R.H. - 1992 - GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*. v. 97, p.15.787-15.801, October.

BEVIS, M., CHISWELL, G., HERRING, T. A., ANTHES, R., ROCKEN, C. & WARE R.H. - 1994 - GPS Meteorology: mapping zenith wet delays into precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, v.33, p.379-386.

BLACK, T. L. - 1994 - The New NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 256-278.

COHN, S. E., SILVA, A., GUO J., SIENKIEWICZ, M. & LAMICH, D. - 1998 - Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. *Mon. Wea. Rev.*, v.126, p.2913-2926.

DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO I., ROGERS, A .E. & ELGENED, G. - 1995 - Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. *Radio Sci.*, v. 20, p.1593-1607, 1985.DA SILVA et al.

FORTES, L.P.S. - 1997 - Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). 1997. 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

FOSTER, J., BEVIS, M. & BUSINGER, S. - 2005 - GPS Meteorology: Sliding-window analysis *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v. 22 n. 6, p. 687–695.

GREGORIUS T. - 1996 - How it Works... GIPSY OASIS II, Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne.

KALNAY, E. - 2003 - Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, London, 341pp.

KING, R. W. & BOCK, Y. - 1996 - Documentation of GAMIT GPS analysis software, version 9.4, Massachusetts Institute of Technology and Scripps Institution of Oceanography.

KINTER, J. L. et al. - 1997 - The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model. Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report v.1, n. 51. Calverton, USA.

KUO, Y. H., ZUO, X. & GUO, Y. R. - 1996 - Variational Assimilation of Precipitable Water Using Nonhydrostatic Mesoscale adjoin Model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments. Mon. Wea. Rev., v.124, p.122-147.

MAREL, H. - 2001 - Exploitation of Ground Based GPS for Numerical Weather Prediction and climate applications in Europe. Delf University of Technology, Department of Geodesy, Thijsseweg 11, 2629 JA Delf, The Netherlands.

MONICO, J. F. G.- 2000 - Posicionamento por Ponto de Alta Precisão Utilizando o GPS: Uma solução para a Geodinâmica. Revista Brasileira de Geofísica, v.18, p. 39-48.

NASA. NATIONAL AERONAUTICS SPACE ADMINISTRATION - 2005 - IGS International GNSS Service. Disponível em <<http://igsb.jpl.nasa.gov>>. Acessado em 26 set de 2005.

NIELL, A. E. - 1996- Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research, v. 101, n.B2, p. 3227-3246.

REIGBER, C., GENDT G., DICK, G. & TOMASSINI M. - 2001 - Near real- time water vapor monitoring in a German GPS network and assimilation into weather forecast model. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation, n 14 2001, Salk Lake City- Utah.

ROCKEN, C., ANTHES, R., EXNER, M., HUNT, D., SOKOLOVSKIY, S., WARE, R., GORBUNOV, M., SCHREINER, W., FENG, D., HERMAN, B., KUO, Y. & ZOU, X. - 1997 - Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. J. Geophys. Res., v.102, p.29849-29866.

ROCKEN, C., VAN HOVE, T. & WARE, R. H. - 1997b - Near Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor. Geophy. Res. Lett., v.24, p.3221-3224.

ROTHACHER, M. & MERVART, L. - 1996 - Bernese GPS Software Version 4.0 Reference Manual, Technical Report. Berne.

SAPUCCI, L. F. - 2001 - Precipitable Water Measurements Using GPS: a Case Study in Brazil. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation., n. 14 2001, Salt Lake City, Utah.

SAPUCCI, L. F. ; MACHADO, L. A. T. & MONICO, J. F. G. - 2004 - Modelagem da temperatura média troposférica no Brasil para quantificação do IWV utilizando GPS. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia.

SPILKER, J., J. JR. - 1994 - Tropospheric Effects on GPS. American Institute of Aeronautics and Astronautics 1994. v. 1, Capítulo 13, p. 517 – 546

TSUDA, T., HEKI, K., MIYAZAKI, S., AONASHI, K., HIRAHARA, K., NAKAMURA, H., TOBITA, M., KIMATA, F., TABEL, T., MATSUSHIMA, T., KIMURA, F., SATOMURA, M., KATO, T. & NAITO, I. - 1998 - GPS meteorology project of Japan - exploring frontiers of geodesy. Research News Earth Planets Space, 50(10).

WARE, R, FULKER, D. W., STEIN, S. A., ANDERSON, D. N., AVERY, S. K., CLARK, R. D., DROEGEMEIER, K. K., KUETTNER, J. P., MINSTER, J. B. & SOROOSHIAN S. – 2000 - SUOMINET: A Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and Education. Bulletin of the American Meteorological Society, n. 81, n. 4.