

PREDIÇÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NA AMÉRICA DO SUL PARA POSICIONAMENTO GNSS EM TEMPO REAL

Luiz Fernando Sapucci¹
João Francisco Galera Monico²
Elizabeth Silvestre Espinoza³
Luiz Augusto Toledo Machado⁴

- 1 Universidade Estadual Paulista (FCT) – sapucci@prudente.unesp.br
- 2 Universidade Estadual Paulista (FCT) – galera@prudente.unesp.br
- 3 Instituto de Pesquisas Espaciais (CPTEC) – elizabeth@cptec.inpe.br
- 4 Instituto de Pesquisas Espaciais (CPTEC) – machado@cptec.inpe.br

RESUMO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*), é uma iniciativa dos usuários civis das técnicas de navegação por satélite, que visa tornar a integração dessas técnicas um método alternativo à navegação aérea comercial. Para obter maior eficiência na utilização dessas técnicas em tempo real, há a necessidade de modelar adequadamente as fontes de erros presentes em suas observáveis. A troposfera, depois da ionosfera, é a maior fonte desses erros. Ao contrário da ionosfera, a modelagem adequada da troposfera na América do Sul não tem recebido a merecida atenção. Os modelos troposféricos disponíveis para aplicações em tempo real nessa região não são totalmente apropriados, pois foram desenvolvidos a partir de observações meteorológicas realizadas, em sua grande maioria, no hemisfério norte. Uma solução para esse problema seria a utilização dos modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT) que podem proporcionar previsões do atraso zenital troposférico, com algumas horas de antecedência, em qualquer local da América do Sul. Com o objetivo de investigar a contribuição que os modelos de PNT podem fornecer na modelagem da troposfera em tempo real, um experimento foi realizado. Os valores preditos por um modelo de PNT foram comparados com os valores estimados a partir de observações GPS pós-processadas. Considerando a promissora aplicação do GNSS no monitoramento do vapor d'água atmosférico, informação de grande importância para os meteorologistas, e que o atraso zenital troposférico deve ser estimado de forma apropriada para obter posicionamento GPS de qualidade, o presente trabalho visa mostrar para a comunidade geodésica brasileira os grandes benefícios que o sinergismo entre a Meteorologia e a Geodésia poderá trazer para ambas as ciências.

Palavras-chave: GNSS; Atraso Zenital Troposférico; PNT.

ABSTRACT

The GNSS (Global Navigation Satellite System) is a civil initiative of the navigation by satellite techniques users with the purpose of turning them as a commercial air traffic alternative method. The largest efficiency of such techniques is obtained, either in real time or post-processed, when all error sources are appropriately modeled. The ionosphere and troposphere are the largest error sources in these techniques. However, differently of the ionosphere, the tropospheric modelling in South America has not received appropriated attention. The available tropospheric models to be applied in real time are inappropriate. They were developed using, in great majority, meteorological observations from Northern Hemisphere. A solution to this problem would be the application of Numerical Weather Prediction (NWP) models to generate zenithal tropospheric delay predictions, with some hours of antecedence, at any place of South America. The objective of this paper is to investigate the NWP models contribution for real time tropospheric modelling. An experiment was accomplished where the NWP model predicted values are compared with zenithal tropospheric delay estimated from pos-processed GPS observations. Considering the very promising application of GNSS in the atmospheric water vapor estimation and that high precision zenithal tropospheric delay estimation is very important for high precision positioning, and that these information are very important for meteorologists and geodesists respectively, the present work has as main objective to show to the Brazilian geodetic community the great benefits that can be obtained from the synergism between the Meteorology and Geodesy sciences.

Keywords: GNSS; Zenithal Tropospheric Delay; NWP.

1. INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*), ao integrar os vários sistemas de posicionamento por satélite existente, tem como principal objetivo viabilizar a navegação de alta precisão. É uma iniciativa que permite disponibilizar as técnicas de navegação por satélite como um método alternativo à navegação aérea comercial. Em 2010 será implantado o CNS-ATM (*Communication Navigation System-Air Traffic Management*), um novo sistema de navegação e gerenciamento do tráfego aéreo que irá modificar o atual sistema de navegação para um sistema onde o GNSS assumirá um papel de grande importância, a idéia é compactar ainda mais os aviões

nas aerovias nas proximidades dos aeroportos. Isso trará um aumento considerável na segurança dos usuários, principalmente durante as manobras mais críticas que são os pousos e decolagens das aeronaves. Para isso, os pesquisadores envolvidos com o GNSS têm trabalhado no desenvolvimento de técnicas que possibilitem assegurar a integridade e disponibilidade dos sistemas de navegação que o compõem, além de incentivar o desenvolvimento de modelos que minimizem, em tempo real, os erros presentes nas observáveis de tais sistemas.

Atualmente, as maiores fontes de erros nas observáveis GNSS são as influências da troposfera e da ionosfera. Como as camadas que compõem a atmosfera são altamente variáveis espacialmente, a modelagem das mesmas deve ser regionalizada. Na América do Sul, modelos da ionosfera específicos para essa região têm sido desenvolvidos, visando viabilizar a aplicação dos sistemas de posicionamento via satélite na navegação aérea (CAMARGO, 1999). Quanto à troposfera, o desenvolvimento de modelos troposféricos específicos para a América do Sul não tem tido a merecida atenção, se considerada a importância do tema no posicionamento via satélite em tempo real. Os modelos disponíveis para modelar a troposfera foram desenvolvidos a partir de dados meteorológicos coletados, em sua maioria, em regiões do hemisfério norte, não sendo totalmente apropriados para a América do Sul. Uma solução para esse problema seria desenvolver tais modelos a partir de informações meteorológicas coletadas nessa região. No entanto, ainda assim ficaria uma dúvida quanto aos valores de temperatura e pressão à superfície, exigidos para o bom desempenho dos modelos em tempo real (SAPUCCI & MONICO, 2001). A utilização desses valores obtidos de forma indireta, a partir de uma atmosfera padrão, é responsável pelas maiores imprecisões nessa modelagem, pois gera perda da sensibilidade dos modelos às variações diárias e anuais do atraso zenital troposférico.

Uma solução para esse problema na América do Sul seria a utilização dos modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT) que podem, além de fornecer valores de temperatura, umidade e pressão à superfície, proporcionar previsões do atraso zenital troposférico com algumas horas de antecedência, em qualquer local da América do Sul.

A técnica denominada "Previsão Numérica do Tempo" é rotineiramente utilizada para prever o tempo através de processos computacionais ao utilizar equações matemáticas para descrever o comportamento da atmosfera segundo algumas leis físicas que o governam. Como é grande a dificuldade de se obter soluções exatas para essas equações em épocas futuras, empregam-se técnicas de modelagem numérica dando origem aos modelos de "Previsão Numérica do Tempo".

O objetivo desse trabalho é investigar a contribuição que os modelos de PNT podem fornecer na modelagem em tempo real da principal influência da troposfera, que é o atraso na propagação dos sinais GNSS. Com o emprego das funções de

mapeamento esse problema se reduz à determinação na direção zenital onde os perfis gerados pelo modelo de PNT podem ajudar na solução. Com o objetivo de avaliar a performance dos modelos de PNT nessa nova aplicação, é realizado um experimento onde previsões do atraso zenital troposférico geradas por esse modelo são comparadas com valores estimados a partir de observações GPS (*Global Positioning System*) pós-processadas, simulando uma aplicação em tempo real.

2. MODELOS DE PREVISÃO NUMÉRICA DO TEMPO (PNT)

Devido ao crescente interesse nas previsões de fenômenos meteorológicos, a previsão do tempo por métodos numéricos teve grande desenvolvimento nos últimos anos, apesar de ainda ser um grande desafio científico. O seu princípio é bastante simples: conhecendo as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante t , se é conhecido o seu estado inicial no instante t_0 . No entanto, a complexidade dos modelos para a obtenção das previsões são muitas e exige alta capacidade computacional (CHALEYAT *et al.*, 2003).

O sucesso na previsão está relacionado à capacidade de se modelar, com maior eficiência, a atmosfera terrestre e descrever com precisão o estado inicial. Para isso utilizá-se as leis fundamentais da mecânica e da termodinâmica para o ar e a água presente na atmosfera. Além disso, devem-se considerar as especificidades do sistema climático, como a esfericidade da Terra, a influência dos raios solares, o papel do relevo, dos oceanos e da vegetação, etc. Essa modelagem tão minuciosa gera um sistema extremamente complexo, que é necessário para privilegiar a interação de fenômenos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na atmosfera terrestre.

Essa modelagem pode ser traduzida em um sistema de equações que relacionam diversas grandezas meteorológicas como pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, em diversos níveis de altitude, as quais têm forte correlação entre si, além de dependerem de outras variáveis. As suas derivadas com relação ao tempo t ou em relação as coordenadas x , y e z compõem um sistema de derivadas parciais cuja complexidade impossibilita a obtenção de uma solução exata. Assim, a busca de uma boa aproximação dos valores da solução desse sistema é o único recurso disponível. Isto é obtido por processos numéricos que, apesar de serem muitos, têm como idéia básica discretizar as equações no espaço e no tempo em um número finito de células. Considera-se que no interior de cada uma das células as grandezas meteorológicas têm um valor uniforme. Obtem-se assim, um sistema com equações simplificadas em que o número de incógnitas, apesar de grande, é finito. Isso permite que a solução possa ser obtida numericamente com o emprego dos supercomputadores.

Os modelos que rodam atualmente podem ser classificados pela área de abrangência da superfície modelada. Eles podem ser globais ou regionais. Os

modelos globais cobrem toda a superfície do globo enquanto que os modelos regionais, têm uma melhor resolução espacial abrangendo somente porções da superfície terrestre. Entre os diversos modelos Globais pode-se destacar, pela sua sofisticação, o modelo EMC (*Environmental Modeling Center*) do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) do EUA. O modelo do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE), em Cachoeira Paulista-SP, o único operacional na América Latina, e uma derivação do modelo do NCEP. Como possuem melhor resolução espacial, o emprego dos modelos regionais certamente pode fornecer valores do atraso zenital troposférico mais precisos que os modelos globais. No entanto, os modelos globais têm grande importância nesse processo, pois estes fornecem condições iniciais e condições de contorno lateral para a inicialização dos modelos regionais, uma vez que os fenômenos atmosféricos não possuem limites geográficos.

3. PREDIÇÕES ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO USANDO OS MODELOS DE PNT

A variação na refratividade atmosférica (N) causa mudanças na direção e diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas ao se propagarem na troposfera. Isso gera na trajetória dos sinais GNSS uma leve curvatura, se comparada à trajetória geométrica entre um satélite no espaço e um receptor na superfície da Terra. A diferença entre o comprimento da trajetória efetivamente percorrida pelo sinal (S) e o comprimento da trajetória geométrica (S_g) é denominado atraso troposférico (D_{TROP}), dado por:

$$D_{TROP} = S - S_g = 10^{-6} \int N ds . \quad (1)$$

Para facilitar a modelagem das variações da refratividade, e por consequência o atraso troposférico, são empregadas as funções de mapeamento (DAVIS, *et al.*, 1985; NIEL, 1996; entre outros). Por intermédio delas, as variações da refratividade em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. Desta forma, a refratividade atmosférica pode ser considerada como uma função da temperatura (T), da densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h). Assim tem-se (SPILKER *et al.*, 1994):

$$DZ_{trop} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh + \int_{h_0}^{\infty} (k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh , \quad (2)$$

onde DZ_{trop} é o atraso zenital troposférico, $R_h = 287,0538 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ é a constante específica para os gases hidrostáticos, Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água, $k_1 = 77,60 \text{ K hPa}^{-1}$, $k_2' = 22,10 \text{ K hPa}^{-1}$ e $k_3 = 373900 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica cujo valores foram determinados experimentalmente (BEVIS et al., 1994).

Devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera, o atraso zenital troposférico (Dz_{trop}) é dividido em duas componentes: úmida (Dz_w), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (Dz_h), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. A componente hidrostática é modelada pela primeira parcela da equação (2), enquanto que a componente úmida é modelada pela segunda parcela dessa equação. Nota-se que o atraso zenital troposférico da componente hidrostática depende apenas da densidade do ar atmosférico. Por isso, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão à superfície (P_0) em hPa , da latitude do local (φ), e da altitude (h_0) em quilômetros. A expressão para a determinação do Dz_h é dada pela equação (DAVIS et al., 1985):

$$Dz_h = (2,27683157 \times 10^{-3}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028h_0)}. \quad (3)$$

A precisão dos valores de Dz_h fornecidos pela equação (3) depende da qualidade das medidas de pressão atmosférica. Para barômetros com precisão de $0,5 \text{ hPa}$ a precisão dos resultados obtidos pela equação (3) é de 1 mm .

Aplicando os valores preditos das variáveis prognósticas gerados pelo modelo de PNT na segunda parcela da equação (2), realizando uma integração numérica, é possível determinar valores do atraso zenital troposférico da componente úmida nos mesmos intervalos em que o modelo numérico gera as previsões. Por outro lado, aplicando os valores de pressão atmosférica à superfície, preditos pelo modelo, na equação (3) pode-se obter o atraso zenital da componente hidrostática. Resta, portanto, avaliar a qualidade dos valores obtidos ao aplicar essa técnica.

4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PREDIÇÕES DO DZ_{TROP}

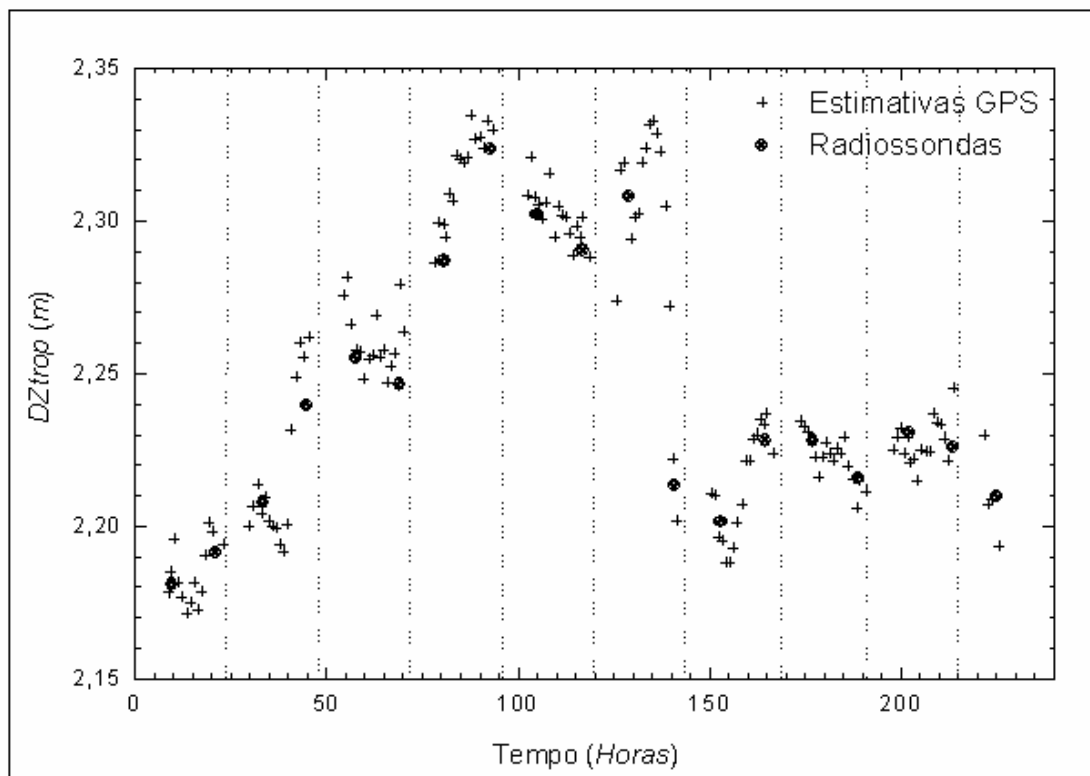
Para avaliar a qualidade dessas previsões, foi realizado um experimento onde é feita a comparação dos valores do DZ_{trop} preditos pelo modelo de PNT com valores estimados utilizando dados GPS. Os dados GPS foram processados no software GOA-II (*GIPSY: GPS Inferred Positioning SYstem; OASIS: Orbit Analysis and Simulation Software II*) (GREGORIUS, 1996) gerando estimativas do atraso zenital

troposférico. Tais estimativas são usadas nesse trabalho como valores de referência para avaliar a qualidade das previsões do DZ_{trop} obtidas pela aplicação do modelo de PNT. Por isso, serão apresentados os resultados de uma campanha onde foram realizadas coletas de dados GPS simultaneamente ao lançamento de radiossondas, visando mostrar a boa qualidade das estimativas geradas pelo GOA-II. As radiossondas são munidas de dispositivos que medem *in loco* as quantidades atmosféricas que estão relacionadas com o atraso troposférico (como pressão, temperatura e umidade) ao percorrer o perfil vertical troposférico utilizando um balão inflado com hidrogênio ou hélio. A radiossonda é o meio utilizado para medir as variáveis dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera, para a descrição das condições iniciais que serão assimiladas pelo MPNT. A utilização da radiossondagem permite determinar precisamente o DZ_{trop} .

4.1. INDICADORES DE QUALIDADE DAS ESTIMATIVAS DO DZ_{TROP} OBTIDAS NO GOA-II

A campanha de coleta de dados GPS simultâneo ao lançamento de radiossondas foi realizada no aeroporto Campo de Marte em São Paulo pelo DPV (Destacamento de Proteção ao Vôo) da FAB (Força Aérea Brasileira), no período de 21 a 30 de junho de 2001 (dias 172 ao 181 de 2001). As radiossondas utilizadas na campanha

FIGURA 01 – VALORES DO DZ_{trop} OBTIDOS PELO GOA-II E PELA UTILIZAÇÃO DE RADIOSSONDAS.



são da marca VAISALA, modelo RS-80. E a antena GPS utilizada é da marca ASHTECH, modelo Marine III – L1/L2 - ASH 700700.C, e o receptor GPS é da marca ASHTECH, modelo ZXII.

Para a determinação do atraso zenital troposférico, os dados GPS foram processados pelo GOA II utilizando o método de posicionamento por ponto de alta precisão (MONICO, 2000), com intervalo de processamento de 30 segundos e ângulo de elevação mínimo do satélite de 10° . A função de mapeamento utilizada foi a de Niell (NIELL, 1996). Os valores do atraso troposférico foram estimados pela aplicação do processo estocástico *Random Walk* (GREGORIUS, 1996) para cada intervalo de 5 minutos da campanha. Os valores do atraso zenital troposférico foram quantificados a partir de uma integração numérica dos dados dos perfis atmosféricos coletados pelas 19 radiossondas lançadas. A figura 1 apresenta os valores do D_{ZW} determinados por ambas as técnicas. Os valores obtidos a partir das observações GPS se referem à média para cada período de 30 minutos dessa campanha.

Analisando a Figuras 1 pode-se notar que as estimativas do DZ_{trop} obtidas pelo GPS mostram boa compatibilidade com os valores gerados pelas radiossondas avaliadas. Os indicadores de qualidade, ao tomar os valores obtidos pelas radiossondas como referência, comprovam isso, pois o erro médio foi de 2 mm e o desvio padrão de 9 mm, gerando um EMQ (Erro Médio Quadrático) de apenas 10 mm. Nessa análise, o fato de que também as radiossondas apresentarem incertezas em seus valores não pode deixar de ser considerado. Por esse motivo, as diferenças encontradas acima estão dentro do erro das medidas e portanto não são significativas.

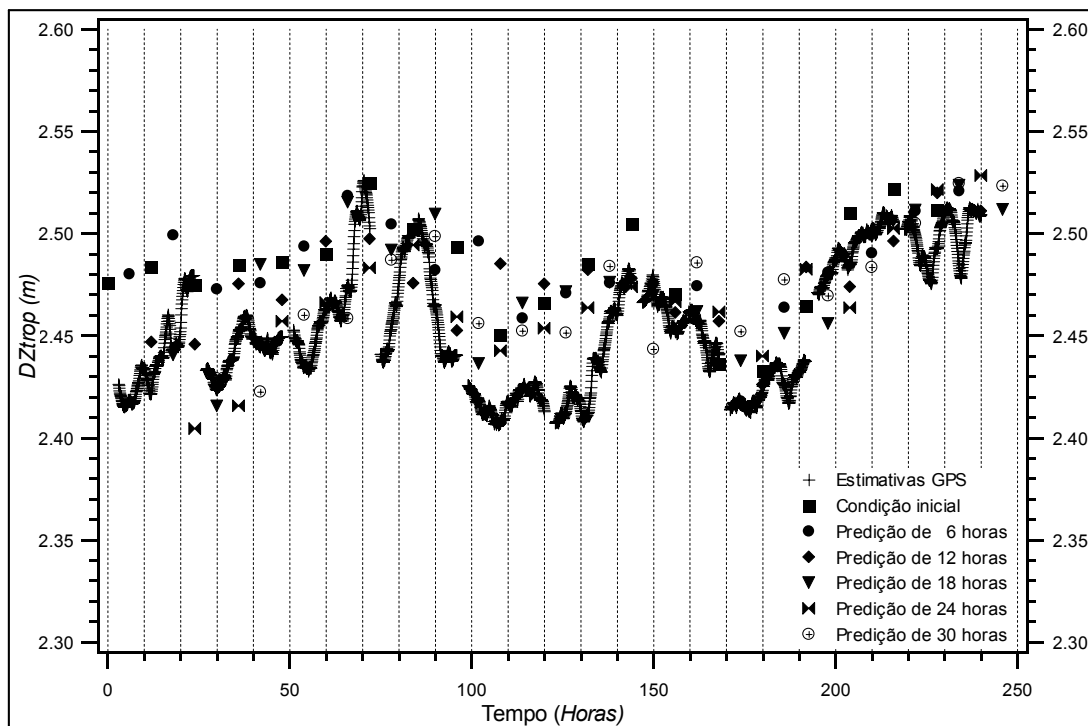
4.2. EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO DAS PREDIÇÕES DO DZ_{TROP} OBTIDAS PELO MODELO DE PNT

As previsões do DZ_{trop} avaliadas nesse experimento são provenientes do modelo regional ETA que é utilizado operacionalmente no CPTEC. Esse modelo possui uma resolução horizontal de 40 km com 38 camadas no perfil vertical, cujo domínio cobre a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes. As previsões são geradas duas vezes ao dia, uma com condição inicial às 00:00 e outra às 12:00 UTC. A condição inicial é proveniente da análise do NCEP e as condições de contorno lateral são provenientes das previsões do modelo global do CPTEC e atualizadas a cada 6 horas. O prazo de integração é de 72 horas. As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura, umidade específica, ventos, pressão à superfície, energia cinética turbulenta e água líquida da nuvem. A partir de cada ponto de grade (as células mencionadas anteriormente) é possível gerar perfis verticais das variáveis prognósticas em um ponto qualquer da área sob abrangência do modelo através de técnicas de interpolação. Valores das variáveis prognósticas

são preditos para 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66 e 72 horas após a inicialização do modelo.

Para a realização do experimento, foi interpolado, a partir das saídas do modelo ETA do CPTEC, perfis e valores à superfície para as coordenadas da antena GPS da estação UEPP da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS). As variáveis contidas em tais perfis foram: temperatura, pressão atmosférica, altitude geopotencial e umidade relativa. Os valores de tais variáveis foram aplicados na segunda parcela da equação (2) e através de integração numérica foram geradas as previsões do atraso zenital troposférico da componente úmida. Os valores de pressão à superfície gerados pelo modelo foram aplicados na equação (3) para determinar previsões do atraso zenital troposférico da componente hidrostática. Com a soma dessas componentes foram calculados os valores do DZ_{trop} .

FIGURA 02 – COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS GPS COM AS PREDIÇÕES DO DZ_{trop} DE 6, 12, 18, 24 e 30 HORAS OBTIDAS PELO MODELO DE PNT/CPTEC.

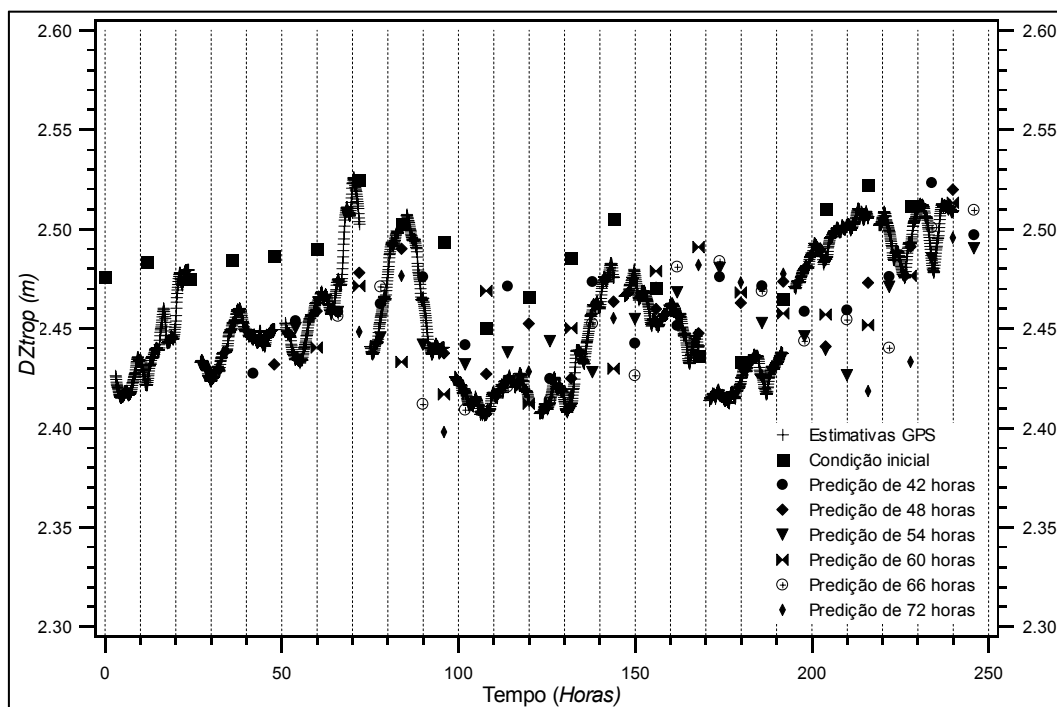


Para avaliar a qualidade dessas previsões são utilizados como valores de referência às estimativas do atraso zenital troposférico geradas pelo processamento dos dados GPS coletados na estação UEPP no *software* GOA-II. O tipo de processamento utilizado é o mesmo descrito na seção anterior. O período escolhido para a comparação dos valores compreende o período entre os dias 16 e 25 de novembro de 2002.

4.3. RESULTADOS

As figuras 2 e 3 mostram as diferenças entre as previsões do Dz_{trop} obtidas pelos perfis gerados pelo de PNT e as estimativas GPS. Nessas figuras os valores do DZ_{trop} são apresentados em função do tempo (em horas UTC) tendo uma referência inicial a primeira hora do dia 16/11/2002. Na figura 2 estão presentes os resultados obtidos a partir dos perfis da condição inicial do modelo, das previsões de 6, 12, 18, 24, e 30 horas, além das estimativas GPS em maior destaque. Na figura 3, além das mesmas estimativas GPS da figura 2, são apresentados os resultados obtidos a partir dos perfis das previsões de 42, 48, 54, 60, 66 e 72 horas. A condição inicial do modelo também está presente nessa última figura para verificar a tendência das previsões mais afastadas da inicialização do modelo. As previsões de 36 horas não estão presentes devido a um erro que ocorreu ao gerar seus perfis. As lacunas nas estimativas GPS são decorrentes de falhas na configuração do receptor, que ficou sem coletar dados das 0 hora até as 3 da manhã durante os dias em que foram realizadas as comparações.

FIGURA 03 – COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS GPS COM AS PREDIÇÕES DO DZ_{trop} DE 42, 48, 54, 60, 66 E 72 HORAS OBTIDAS PELO MODELO DE PNT/CPTEC.



Em uma primeira análise dos resultados mostrados nas figuras 2 pode-se notar que as previsões são compatíveis com as estimativas GPS e que acompanharam as pequenas oscilações do DZ_{trop} que ocorreram no período avaliado. No entanto, nota-se também a presença de um possível erro sistemático que mantém as previsões acima das estimativas GPS. As diferenças não são regulares, pois em certos períodos

as predições se afastam das estimativas (como é o caso entre as horas 90 e 140), e em outras elas se aproximam bastante (entre 150 e 200).

Na figura 3 nota-se que as predições de 48 à 72 horas após a condição inicial apresentaram tendência de diminuição dos valores do DZ_{trop} , chegando a oscilarem entre as estimativas GPS. Um fato que deve ser ressaltado é que as predições mais próximas da época inicial apresentaram menor dispersão, o que é de se esperar considerando o aumento do erro do modelo a medida que a previsão avança no tempo. Tal dispersão se mantém alta em todo o período avaliado. Visualmente é maior em torno da hora 200 onde também é maior a quantidade de predições.

Para uma análise mais minuciosa das diferenças entre as técnicas avaliadas, na tabela 1 são apresentados os valores dos indicadores de qualidade das predições ao tomar como referência as estimativas GPS. Os valores apresentados nessa tabela confirmam as afirmações feitas acima. O EMQ indica que o uso das predições pode gerar um erro de 1-2% apenas, o que é um resultado muito bom se comparado com os erros gerados pelos modelos disponíveis sem utilizar informações de pressão, temperatura e umidade à superfície. O erro médio diminuiu consideravelmente para as predições mais distantes da época inicial, chegando a 1 mm. No entanto, a dispersão aumentou consideravelmente, como já discutido anteriormente. O fato do número de comparações ser pequeno, entre 17 e 19 apenas, deve ser levado em consideração nessa análise. A suspeita da possível presença de um erro sistemático nos resultados do experimento é confirmada pelos valores do erro médio apresentado na tabela 1. Nas predições de poucas horas, onde a dispersão é menor o erro médio é negativo, o que indica uma tendência nos resultados.

TABELA 01 – INDICADORES DE QUALIDADE DAS PREDIÇÕES DO DZ_{trop} GERADAS PELO MODELO DE PNT/CPTEC

INDICADORES DE QUALIDADE				
Predição (Horas)	Número de comparações	Erro médio (m)	Desvio Padrão (m)	EMQ (m)
0	19	-0,0282	0,0204	0,0348
6	20	-0,0325	0,0248	0,0409
12	18	-0,0192	0,0295	0,0352
18	19	-0,0212	0,0231	0,0314
24	18	-0,0065	0,0312	0,0318
30	18	-0,0160	0,0258	0,0303
42	17	-0,0070	0,0300	0,0308
48	17	0,0008	0,0243	0,0243
54	17	0,0054	0,0323	0,0327
60	17	0,0012	0,0368	0,0368
66	17	0,0096	0,0355	0,0368
72	17	0,0113	0,0436	0,0451

As oscilações do *DZtrop* ocorrida durante o período em que foi realizado o experimento não favoreceu a avaliação da qualidade das previsões. A ausência de mudanças bruscas da umidade, da temperatura ou da pressão gerou pequenas oscilações, o que não permitiu analisar o comportamento das previsões em situações mais críticas da modelagem troposférica.

5. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no experimento mostram que a aplicação dos modelos de PNT na modelagem da troposfera em tempo real é bastante promissora. O uso dos perfis gerados pelo modelos de PNT na determinação do *DZtrop* gerou previsões com boa qualidade e sensíveis às pequenas oscilações diárias. As maiores falhas na modelagem da troposfera pelos modelos convencionais é que eles não acompanham as oscilações diárias e anuais do atraso zenital troposférico (SAPUCCI, 2001). Porém, a possível presença de erros nos resultados obtidos indica que há a necessidade de mais pesquisas nessa área que tenha o objetivo de refinar as previsões do *DZtrop*.

Inicialmente há a necessidade de avaliar de forma mais eficiente tais previsões, utilizando um período maior de dados e outras estações distribuídas na América do Sul. Uma outra iniciativa nessa direção seria avaliar a qualidade das previsões nas diferentes componentes do atraso troposférico. Para isso há a necessidade de um barômetro de boa qualidade e com pequena taxa de coleta junto à estação GPS, com a finalidade de avaliar as previsões da pressão à superfície geradas pelos modelos de PNT.

Com o adequado refinamento das previsões, e com o desenvolvimento de uma estratégia operacional de interpolação dos perfis, e distribuição das previsões do *DZtrop* gerados pelos modelos de PNT, estará disponível uma ótima opção na modelagem da troposfera na América do Sul. Isso beneficiará não só a navegação aérea, mais toda a comunidade geodésica envolvida em atividades que utilizam a aplicação das técnicas GNSS em tempo real.

Devido aos fins pelos quais ela foi concebida, atualmente a RBMC apenas permite técnicas de pós-processamento GPS, pois os dados são disponibilizados para os usuários só após o término do dia. No entanto, quando passar a disponibilizar os dados em intervalos menores, diversas outras áreas da ciência serão beneficiadas. Com o processamento quase em tempo real dos dados GPS coletados pela RBMC diversos subprodutos de interesse dessas áreas podem ser gerados. Uma dessas áreas é a meteorologia, pois com a aplicação do GPS na quantificação do vapor d'água integrado na atmosfera (*IWV*), a partir do atraso zenital troposférico, os meteorologistas podem passar a usufruir dessa infra-estrutura para obter informações desse importante elemento atmosférico. A baixa precisão e a falta de continuidade na obtenção dos valores do *IWV* são algumas das maiores fontes de erros na previsão

da precipitação pluviométrica gerada pelos modelos de PNT. Assim, as estimativas do atraso zenital troposférico, geradas quase em tempo real a partir dos dados GPS da RBMC, poderão ser assimiladas nos modelos de PNT contribuindo com as previsões meteorológicas e com a própria geodésia na melhoria das previsões do atraso zenital troposférico geradas por esse mesmo modelo. Com essas considerações acredita-se que o presente trabalho atingiu seu principal objetivo, que é mostrar para a comunidade geodésica brasileira os grandes benefícios que o sinergismo entre a Meteorologia e a Geodésia poderá trazer para ambas as ciências e por consequência, à sociedade brasileira.

6. REFERÊNCIAS

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

CAMARGO, P. O. Modelo Regional da Ionosfera Para Uso em Posicionamento com Receptores de uma Freqüência. Curitiba, 1999. 196p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

CHALEYAT M., BRETTE, J., DARCHE, M, GOLDSTEIN, C., MASHAAL, M., TRONEL, G. *Prever o tempo um grande desafio*. Disponível em < www.fc.up.pt/cmup/monograph/posters_todos.html> Acesso em: 10 abr. 2003.

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

GREGORIUS THIERRY. *How it Works... GIPSY OASIS II*, Departament of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996.

MONICO, J. F. G. Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e aplicações. Editora Unesp, 291 p., 2000.

NIELL, A. E. *Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths*. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No.B2, Pages 3227-3246, 1996.

SAPUCCI, L F, MONICO, J. F. G. Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território

Brasileiro utilizando GPS. In: Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. Curitiba, 2001, v. 1, p. 47-61.

SAPUCCI, L. F. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. Presidente Prudente, 2001. 165p. Dissertação de Mestrado– Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.

SPIPKER, J., J. JR., *Tropospheric Effects on GPS*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Vol 1 Capítulo 13, pg. 517 – 546, 1994.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o suporte financeiro da FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo, Processo N° 01/12761-9.