

PREVISÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO PARA A AMÉRICA DO SUL: VARIABILIDADE SAZONAL E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

*Predictions of Tropospheric Zenithal Delay for South America:
Seasonal Variability and Quality Evaluation*

Luiz Fernando Sapucci¹
Luiz Augusto Toledo Machado¹
João Francisco Galera Monico²

¹**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.
E-mail: sapucci;machado@cptec.inpe.br

²**Universidade Estadual Paulista**
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, SP, Brasil.
E-mail: galera@prudente.unesp.br

RESUMO

O atraso zenital troposférico (Z_{TD} - *Zenithal Tropospheric Delay*) é um dos fatores que geram erros nas observáveis envolvidas nos métodos de posicionamento por satélites. Frequentemente, ele é minimizado com o emprego de modelos desenvolvidos empiricamente a partir de observações atmosféricas. No entanto, tais modelos são incapazes de fornecer a precisão exigida para algumas aplicações em tempo real, como na navegação e locação. Com a implantação, em 2010, do novo sistema de navegação e gerenciamento do tráfego aéreo, denominado CNS-ATM (*Communication Navigation Surveillance - Air Traffic Management*), a aplicação de métodos de posicionamento por satélites na navegação aérea será bastante explorada, pois permitem obter boa precisão em tempo real. O emprego das previsões dos valores do Z_{TD} obtidas a partir da Previsão Numérica de Tempo (PNT), denominada modelagem dinâmica, apresenta-se como uma alternativa para modelar e, portanto, prever os efeitos dos gases atmosféricos nos sinais de radiofrequência em tempo real. Desde março de 2004 essa modelagem encontra-se operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) gerando previsões do Z_{TD} para toda a América do Sul. Os objetivos desse trabalho são estudar a variabilidade sazonal do Z_{TD} e avaliar a qualidade dos valores gerados nessa modelagem. Na avaliação são utilizadas estimativas do Z_{TD} obtidas a partir de dados GPS coletados em algumas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sinais GPS (RBMC) no período de 1 ano. Nessa avaliação, os valores do EMQ resultantes ficaram entre 4 e 11 cm. Ao considerar a variabilidade temporal do Z_{TD} , as vantagens apresentadas por essa técnica, os resultados obtidos nessa avaliação e as melhorias que ocorrerão no futuro, esse trabalho mostra que a modelagem dinâmica apresenta-se com grande potencial em se tornar a alternativa mais apropriada para as aplicações dos métodos de posicionamento por satélite em tempo real.

Palavras chaves: Atraso Zenital Troposférico; Previsão Numérica de Tempo; GPS, Posicionamento em tempo real.

ABSTRACT

The Zenithal Tropospheric Delay (Z_{TD}) is an important error source in the observable involved in the positioning methods using artificial satellite. Frequently, the Z_{TD} influence in the positioning is minimized by applying empirical models. However, such models are not able to supply the precision required to some real time applications, such as navigation and location. In 2010 it will be implanted the new navigation and administration system of the air traffic, denominated CNS-ATM (*Communication Navigation Surveillance - Air Traffic Management*). In this new system the application of positioning techniques by satellites in the air traffic will be quite explored because they provide good precision in real time. The predictions of Z_{TD} values from Numeric Weather Prediction (NWP), denominated dynamic

modeling, is an alternative to model the atmospheric gases effects in the radio-frequency signals in real time. The Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC) has generated operationally prediction of Z_{TD} values to South American Continent since March, 2004. The aims of the present paper are to investigate the Z_{TD} seasonal variability and evaluate the quality of predicted Z_{TD} values. One year of GPS data from Brazilian Continuous GPS Network (RBMC) was used in this evaluation. The RMS values resulting from this evaluation were in the range of 4 to 11 cm. Considering the Z_{TD} temporal variability, the advantages provide by this modeling, the results obtained in this evaluation and the future improvements, this work shows that the dynamic modeling has great potential to become the most appropriate alternative to model Z_{TD} in real time.

Keywords: Zenithal Tropospheric Delay; Numerical Weather Prediction; GPS; Real Time positioning.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os vários erros que afetam os métodos de posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais estão os causados pela atmosfera terrestre. Com relação aos efeitos causados nos sinais de radiofrequência, a atmosfera pode ser dividida em ionosfera e camada eletricamente neutra. A ionosfera é a camada da atmosfera que abrange a região entre 50 e 1000 km acima da superfície da Terra. Seus efeitos nos sinais de radiofrequência geram variações em sua velocidade, que é proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) nela presente (CAMARGO *et al.*, 2000). Como é um meio dispersivo, sua influência é dependente da frequência do sinal, o que permite que combinações entre sinais de diferentes frequências minimizem os erros gerados por essa influência (SEEBER, 1993).

A atmosfera eletricamente neutra é a camada localizada entre a ionosfera e a superfície da Terra, com altura de até 50 km. Nela está incluída a troposfera, tropopausa, estratosfera e parte da estratopausa. O gradiente vertical da concentração dos gases presente nessa camada gera nos sinais de radiofrequência que a atravessam um atraso no tempo de propagação e, por consequência, erros nas coordenadas finais caso o mesmo não seja considerado e minimizado (MONICO, 2000). Como a maior concentração dos gases está na troposfera, tais efeitos são comumente denominados pelos geodestas de troposféricos (SPILKER, 1994).

Ao contrário do que ocorre na ionosfera, para frequências menores que 30 GHz, o atraso troposférico independe da frequência do sinal, e para minimizar seus efeitos sobre os sinais de radiofrequência utiliza-se uma modelagem empírica (SPILKER, 1994). A primeira etapa dessa modelagem é o emprego das funções de mapeamento (DAVIS *et al.*, 1985; NIELL, 1996 e 2001; BOEHM e SCHUH, 2004) as quais são responsáveis por converter o atraso na direção satélite-receptor para a direção zenital, obtendo com isso o atraso zenital troposférico (Z_{TD} - *Zenithal Tropospheric Delay*). A segunda etapa consiste em aplicar modelos teóricos que relacionam o Z_{TD} com valores de temperatura pressão e umidade na superfície terrestre, medidos durante a coleta GPS ou obtido a partir de uma atmosfera padrão. Para as aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites que utilizam curtos intervalos de tempo de coleta de dados e não requerem alta precisão (m), tais

modelos são suficientes. Normalmente são aplicações GPS que utilizam apenas a pseudodistância. No entanto, eles são inapropriados para aplicações em tempo real, tal como a navegação aérea, que requerem melhor nível de precisão (dm), pois tais modelos são ineficientes na modelagem das oscilações do Z_{TD} .

Em 2010, pretende-se implantar um novo sistema de navegação e gerenciamento do tráfego aéreo, denominado CNS-ATM (*Communication Navigation Surveillance - Air Traffic Management*) (ICAO, 2005). Além dos métodos convencionais de orientação e controle já utilizados oficialmente pelas empresas aéreas, esse novo sistema de navegação também empregará sistemas de posicionamento por satélites. Nessa nova concepção, o uso de sistemas de determinação e distribuição de correções dos erros presentes nas observáveis envolvidas nesses sistemas será mais frequente e exigirá um adequado nível de acurácia. Objetiva-se ao empregar tais sistemas obter boa acurácia em tempo real, uma exigência básica da navegação aérea. Um exemplo desses sistemas é o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que envolve os principais sistemas de posicionamento por satélite. Para o bom desempenho desse sistema uma modelagem adequada dos efeitos da troposfera é requerida em todo o globo terrestre.

A utilização das previsões dos valores do Z_{TD} , geradas por modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (KINTER *et al.*, 1997), denominada modelagem dinâmica (SAPUCCI *et al.*, 2004), apresenta-se como uma alternativa para minimizar os efeitos da troposfera nos sinais de radiofrequência para aplicações em tempo real. Essa modelagem encontra-se operacional para regiões da América do Sul no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>).

Ela destina-se às aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites, como o GPS, GLONASS, entre outros, que necessitam boa precisão em tempo real, bem como outras atividades espaciais que empregam sinais de radiofrequência, como, por exemplo, na determinação de órbitas de satélites em geral. Esse tipo de modelagem troposférica já tem sido explorado atualmente em outras regiões do globo e tem proporcionado bons resultados (JENSEN, 2003; JUPP *et al.*, 2003; SCHULER *et al.*, 2000).

Os objetivos desse trabalho envolvem o estudo da variabilidade temporal do Z_{TD} e a avaliação da qualidade da modelagem dinâmica disponível no CPTEC-INPE. Para o estudo da variabilidade temporal são utilizados campos da condição inicial do Z_{TD} nas diferentes estações sazonais do ano. Para a avaliação são utilizadas estimativas do Z_{TD} obtidas pelo pós-processamento de dados coletados em 8 estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sinais GPS (RBMC), as quais são consideradas como valores de referência.

2. PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO (PNT) E A MODELAGEM DINÂMICA DO Z_{TD}

O princípio envolvido na PNT é relativamente 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 é elevada e exige alta capacidade computacional (RICHARDSON, 1922). Apesar do grande desenvolvimento dessa técnica nos últimos anos, gerar resultados confiáveis ainda é um grande desafio científico.

O sucesso na previsão está relacionado à capacidade de modelar, com maior eficiência, a atmosfera terrestre e descrever com precisão o estado inicial. Para isso, utilizam-se as leis fundamentais da mecânica e da termodinâmica para o ar e a água presentes na atmosfera. Além disso, as especificidades do sistema climático devem ser consideradas, como a esfericidade da Terra, a influência dos raios solares, o papel do relevo, dos oceanos e da vegetação etc. Nesse processo está envolvido o Modelo de Circulação Geral (MCG), o qual, de forma minuciosa, gera um sistema extremamente complexo, que leva em consideração a interação dos fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera terrestre. A modelagem dinâmica do Z_{TD} recebe aqui essa denominação por estar baseada nas leis da termodinâmica que governam os movimentos atmosféricos utilizadas pelo modelo de circulação geral (MCG), como as leis de conservação de massa, de energia e de momentum angular (KINTER *et al.*, 1997).

2.1 Modelo de Circulação Geral (MCG)

O MCG pode ser traduzido em um sistema de equações que relacionam diversas grandezas meteorológicas, como pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, em diversos níveis da atmosfera, as quais têm forte correlação entre si, além de dependerem de outras variáveis. As suas derivadas com relação ao tempo t ou em relação às coordenadas geográficas 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. A solução é obtida 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. Obtém-se, assim, um sistema com equações simplificadas em que o número de incógnitas, apesar de grande, é finito (CHARNEY *et al.*, 1950). Isso permite que a solução possa ser obtida numericamente com o emprego dos supercomputadores.

O MCG em uso no CPTEC tem sua origem naquele usado para previsão de tempo de médio prazo pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (CPTEC, 2006). Operacionalmente, a previsão numérica de tempo iniciou-se no CPTEC em 1994, tendo implementado uma versão desse modelo modificada pelo *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA) com adaptações as necessidades operacionais do CPTEC, denominada CPTEC/COLA. Tal modelo é rodado com as resoluções T62L28, T126L28 e T213L42, sendo L o número de camadas na vertical e T um parâmetro que se refere à resolução horizontal; T62, T126 e T213 equivalem as resoluções, próximo à linha do Equador, de 200x200 Km, 100x100 Km e 63x63 Km, respectivamente. Ele é rodado para previsão de quinze dias nos horários 00 e 12 UTC, para ambas as resoluções com previsões sendo geradas nos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 h UTC). Como resultado dessa modelagem são gerados campos das principais quantidades meteorológicas em todos os pontos da grade, e em todos os níveis considerados pelo modelo. A partir das previsões geradas pelo modelo de PNT do CPTEC as informações necessárias para produzir as previsões do Z_{TD} podem ser obtidas.

2.2 Valores do atraso zenital troposférico a partir de modelos de PNT

A influência dos gases presentes na troposfera causa mudanças na direção e diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas que por ela se propagam. Esse efeito faz com que o caminho efetivamente percorrido seja diferente da distância geométrica entre o satélite e o receptor. Para facilitar a modelagem das variações do atraso troposférico, são empregadas as funções de mapeamento (DAVIS, *et al.*, 1985; NIEL, 1996). Por intermédio delas, as variações desse atraso em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. Nos últimos anos tem sido verificado um bom avanço na qualidade dos valores obtidos pelas funções de mapeamento, em especial com o desenvolvimento de novas versões ao empregar a PNT. Um exemplo é a função de mapeamento de Vienna (BOEHM e SCHUH, 2004) e um outro é a função de mapeamento isobárica (NIELL, 2001).

Devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera, Z_{TD} é dividido em duas componentes: úmida (Z_{WD} - *Zenithal Wet Delay*), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (Z_{HD} - *Zenithal Hydrostatic Delay*), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. O atraso zenital troposférico da componente hidrostática

depende apenas da densidade do ar atmosférico. A partir da suposição do 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. A expressão para a determinação do Z_{HD} é dada pela equação (DAVIS *et al.*, 1985):

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

Quanto aos valores do Z_{WD} podem ser obtidos a partir da seguinte equação (SPILKER, 1994):

$$Z_{WD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh, \quad (2)$$

onde e é a pressão parcial do vapor d'água e T é a temperatura, ambos variando em função da altitude (h), Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água, $k_2' = 22,10 K hPa^{-1}$ e $k_3 = 373900 K^2 hPa^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica. Os valores de e estão totalmente relacionados com a razão de mistura entre o vapor d'água e os gases hidrostáticos em toda a coluna atmosférica, o que torna difícil sua determinação a partir de medidas à superfície. Apesar de ter influência menor do que a componente hidrostática, representando cerca de 10% do atraso zenital troposférico, sua variação temporal e espacial é muito maior, chegando a 20% em poucas horas (SPILKER, 1994).

As previsões dos valores do Z_{WD} podem ser obtidas ao aplicar os perfis de temperatura e razão de mistura previstos pelo modelo de PNT (para um ponto "A" qualquer da grade desse modelo), em uma integração numérica na equação 2. De forma similar, as previsões do Z_{HD} são obtidas ao aplicar os valores da pressão atmosférica na superfície também previstos pelo modelo e as coordenadas desse mesmo ponto na equação 1. Somando os valores de ambas as componentes obtêm-se as previsões do atraso zenital troposférico (Z_{TD}) para esse ponto "A". Fazendo isso para todos os pontos da grade do modelo obtêm-se uma malha de informações sobre a distribuição espacial dessa variável. A partir de interpolação é possível obter previsões do Z_{TD} para qualquer outro ponto interno à grade, as quais tornam possível analisar a variabilidade sazonal dessa quantidade na América do Sul.

3 VARIABILIDADE DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NA AMÉRICA DO SUL

Com os campos do Z_{WD} e do Z_{HD} gerados diariamente pela modelagem dinâmica é possível verificar as características mais importantes da variabilidade do Z_{TD} sobre a América do Sul. Para isso, os campos das condições iniciais geradas no período de um ano (junho de 2004 a maio de 2005) foram divididos

de acordo com as estações sazonais e um campo de valores médios das componentes do Z_{TD} foi calculado para cada uma delas. Como nas ciências atmosféricas essa condição inicial é denominada por *análise*, essa mesma denominação será utilizada aqui. As *análises* geradas para os meses de julho, agosto e setembro de 2004 foram utilizadas para compor um campo dos valores médios para o inverno. O mesmo foi feito para a primavera ao utilizar as *análises* geradas para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2004. Para o verão foram utilizadas as *análises* geradas para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2005, enquanto que para o outono foram utilizadas as *análises* dos meses de junho de 2004, abril e maio de 2005. Como no processo de obtenção dos campos das *análises* as observações participam fortemente ponderadas, tais campos se aproximam da realidade física e representam bem a variabilidade das componentes do Z_{TD} .

Na fig. 1 são apresentados campos médios do Z_{WD} por meio de esquemas de cores, considerando as diferentes estações do ano. Numa primeira análise da fig. 1 observa-se a grande variabilidade sazonal dos valores do Z_{WD} sobre a América do Sul. A diferença mais acentuada é entre o inverno e o verão. Essa variabilidade está relacionada com os perfis de temperatura e umidade. Há diversos fatores que influenciam tais quantidades entre os quais está o relevo da superfície da Terra, pois nas regiões de altitudes elevadas há baixa concentração de vapor d'água atmosférico, e, por consequência, valores reduzidos do Z_{WD} . Essa baixa concentração está associada com as baixas temperaturas predominante nessas regiões. Isso é o que ocorre sobre a região dos Andes onde, constantemente, os valores do Z_{WD} são bastante reduzidos.

Um outro fator é o aumento da capacidade do ar em armazenar vapor d'água nas áreas de alta temperatura da região tropical, principalmente na Amazônica, gerando uma grande concentração de umidade na atmosfera e, por consequência, valores do Z_{WD} bastante elevados, principalmente durante o verão e outono (figuras 1c e 1d). Uma outra região com forte variabilidade do Z_{WD} é a região do semi-árido nordestino (área central da região Nordeste do Brasil). Nessa região, a concentração de vapor é pequena, sendo maior durante o período de chuvas, que se concentra principalmente durante o verão (fig. 1c).

Um fator importante associado à variabilidade dos valores do Z_{WD} é a passagem de sistemas de ar frio, conhecidos como frentes frias, provenientes da Antártida. Esses sistemas geram quedas da temperatura e aumento da pressão, ocasionando diminuição da concentração de vapor d'água atmosférico devido à baixa temperatura e a condição de subsidência (ar de altos níveis mais seco que descende na atmosfera em regiões de alta pressão), gerando uma secagem da atmosfera. O deslocamento desses sistemas é um fenômeno periódico e ocorre durante todo o ano. No entanto, durante o verão, de uma forma geral, tais sistemas não têm força suficiente para empurrar as

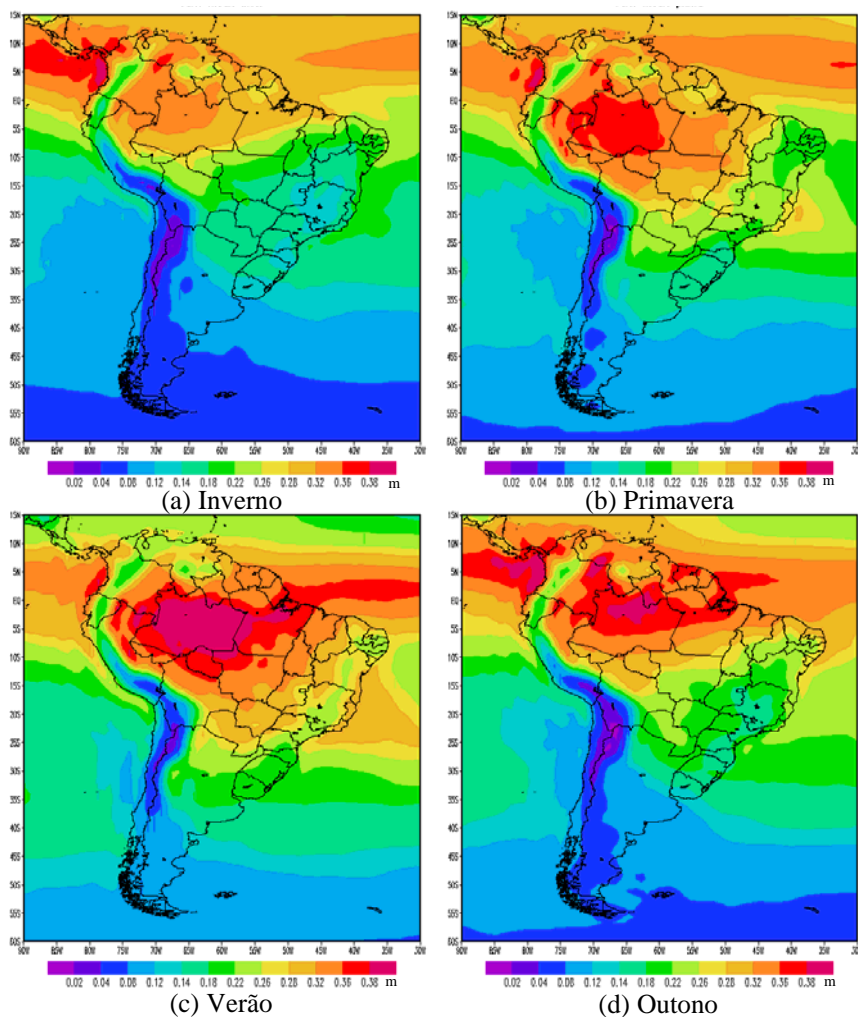


Fig. 1 - Campos sazonais dos valores médios do Z_{WD} sobre a América do Sul.

massas de ar quente formadas pela alta incidência de radiação solar e são por elas desviadas para o oceano Atlântico. Isso já não ocorre durante o inverno, pois ao contrário do que ocorre no verão, o sistema não encontra tanta resistência sobre a América do Sul, podendo chegar até a influenciar o clima na região Nordeste do Brasil.

Um outro fator associado com a variabilidade do Z_{WD} é a ocorrência durante o verão de um fenômeno que os meteorologistas chamam de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SILVA DIAS, 1995). Esse fenômeno está associado com uma zona de convergência de umidade provenientes da região Amazônica e do Atlântico Sul e é caracterizado por uma extensa banda de precipitação e forte nebulosidade quase estacionária. A ZCAS é o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas no Brasil durante o verão, o qual apresenta grande persistência e pode, por influência dos sistemas de ar frio provenientes da região antártica, permanecer atuando por diversos dias, provocando precipitação generalizada. Na área em que a ZCAS atua, que vai desde a região Amazônica até o oceano Atlântico Sul, os processos físicos associados à sua ocorrência são de

forte impacto nos valores do Z_{WD} , principalmente pelo fluxo de umidade gerado nessa região.

Quanto à circulação geral atmosférica, existem regiões subtropicais de alta pressão atmosférica localizadas no oeste do oceano Pacífico Sul e no oceano Atlântico Sul e outras de baixa pressão que exercem influência sobre os valores de pressão na América do Sul em todas as estações do ano (SATYAMURTY *et al.*, 1998). A alta pressão do Pacífico é mais forte no verão e a alta do Atlântico é mais forte no inverno, e são de mesma intensidade nas estações de transição. Como efeito, sobre a América do Sul observa-se a instalação de uma alta pressão durante o inverno e baixa pressão no verão. Como os valores de temperatura e umidade estão altamente correlacionados com os valores de pressão, essa variação anual da pressão tem um forte impacto nos valores das componentes do Z_{TD} , principalmente na componente hidrostática.

Esses fenômenos apontados acima têm um efeito bastante significativo nos valores Z_{TD} , sendo os maiores responsáveis pela variabilidade sazonal dessa variável. Tal efeito pode ser claramente verificado ao comparar a fig. 1a (inverno) com a fig. 1c (verão) onde os efeitos de

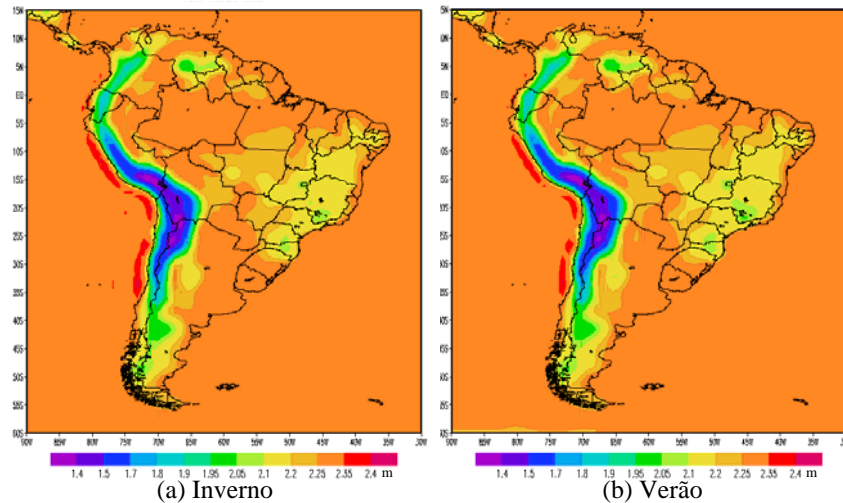


Fig. 2 - Campos dos valores médios do Z_{HD} sobre a América do Sul durante o inverno (a) e o verão (b).

tais fenômenos influenciaram consideravelmente os valores médios do Z_{WD} em praticamente todo o território brasileiro.

Espacialmente, a variabilidade dos valores do Z_{HD} está muito correlacionada com a altura da superfície terrestre, enquanto que a variabilidade temporal dessa componente está associada com as variações da pressão atmosférica. As oscilações dos valores do Z_{HD} são maiores com relação à posição geográfica do que sazonalmente. Espacialmente verifica-se que a variabilidade dos valores do Z_{HD} está bastante correlacionada com a altitude da superfície da Terra, pois os menores valores encontram-se sobre a cordilheira dos Andes e outras regiões serranas. Sazonalmente, o fator mais relevante para as oscilações dos valores da componente hidrostática são as variações dos valores de pressão sobre a América do Sul. Na fig. 2 são apresentados os valores médios do Z_{HD} para o inverno e o verão. Como a escala utilizada nessa figura foi calculada considerando as oscilações em função da

posição geográfica, não privilegia as oscilações geradas pela variação sazonal dos valores de pressão. Observa-se nessa figura que, espacialmente, apesar dessas estações serem as mais extremas do ponto de vista climatológico, os valores médios do Z_{HD} são bastante semelhantes, pois em escala continental a variação temporal da pressão é menos significativa que a influência do relevo para os valores dessa variável.

Na fig. 3 são apresentados os campos dos valores médios do ZTD para o inverno e para o verão, com o objetivo de verificar a variabilidade resultante da soma das componentes hidrostática e úmida. Ao comparar esses campos com os apresentados nas figuras 1 e 2, nota-se que os valores da componente úmida são os principais responsáveis pela variabilidade do ZTD. Esse resultado torna evidente dois pontos principais nesse estudo. O primeiro é a necessidade de uma modelagem adequada da componente úmida para se obter melhores resultados no posicionamento geodésico.

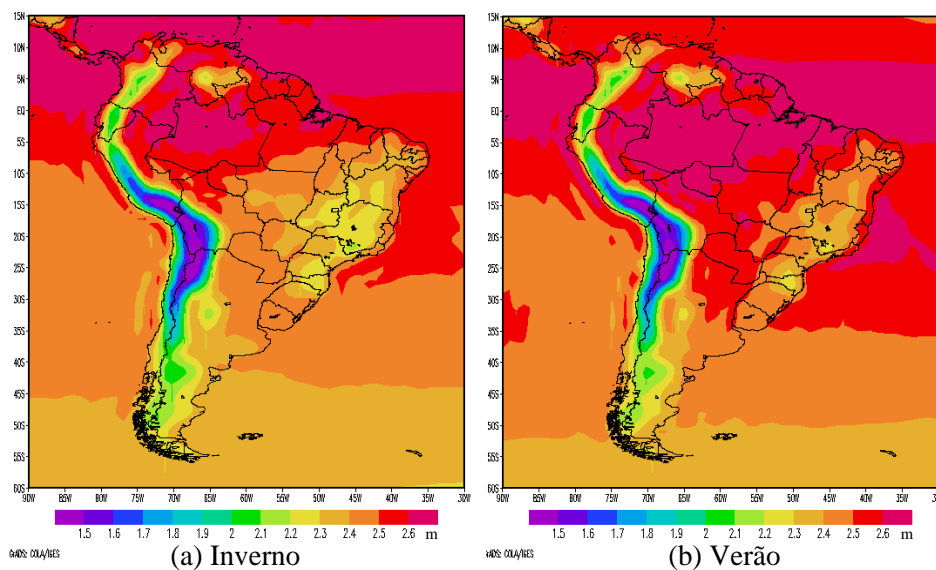


Fig. 3 – Campos dos valores médios do Z_{TD} sobre a América do Sul durante o inverno (a) e o verão (b).

O segundo é que a modelagem Dinâmica, aqui proposta, é sensível a essas flutuações e, portanto, uma boa alternativa para a modelagem do Z_{TD} .

4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA MODELAGEM DINÂMICA DO Z_{TD}

Se comparada com as demais opções disponíveis para obter o Z_{TD} , a modelagem dinâmica apresenta as seguintes vantagens:

- Com o uso do modelo de PNT, a modelagem resultante considera todas as variações temporais e espaciais do Z_{TD} empregando operacionalmente um complexo processo dinâmico de coleta, processamento e de distribuição de informações;
- Disponibilidade em todas as regiões da América do Sul e oceanos adjacentes;
- Valores do Z_{TD} de boa qualidade em tempo real sem precisar medir valores de quantidades meteorológicas durante a coleta dos dados;
- Modelagem sensível às variações diárias e sazonais dos fatores que influenciam os valores do Z_{TD} ;
- Os valores obtidos não são contaminados com os erros provenientes da parametrização do perfil atmosférico em função dos valores medidos na superfície, como é freqüente nos modelos de Z_{TD} convencionais.

Por outro lado, no emprego dessa modelagem algumas desvantagens devem ser consideradas:

- A necessidade de um *link* à Internet ou um sistema de informação adicional, para a obtenção das previsões do Z_{TD} , pelo menos uma vez ao dia;
- Como atualmente os valores das previsões são disponíveis em intervalos de tempo de 6 horas, essa modelagem não é sensível às oscilações de alta freqüência dos fatores que influenciam os valores do Z_{TD} .

Com o aumento dos usuários desse tipo de modelagem troposférica as vantagens tendem a aumentar e as desvantagens poderão ser minimizadas, pois a demanda por melhores resultados pode justificar

procedimentos específicos, portanto mais eficientes para a geração e disponibilização das previsões do Z_{TD} .

5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS PREVISÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO

A qualidade das previsões do Z_{TD} foi avaliada utilizando como valores de referência os obtidos pelo pós-processamento dos dados GPS coletados em 8 estações da RBMC (FORTES, 1997). Os indicadores de qualidade foram calculados para as estações sazonais com o objetivo de analisar a influência dos fatores responsáveis pela variabilidade do Z_{TD} em diferentes épocas do ano. O período considerado nessa avaliação foi o mesmo utilizado na seção anterior, bem como a divisão sazonal dos dados considerados. O critério utilizado para a escolha das estações da RBMC foi a disponibilidade dos dados GPS, sendo excluídas aquelas que apresentavam ausência de dados para pelo menos uma estação sazonal. A relação das estações GPS utilizadas nessa avaliação e informações adicionais sobre as mesmas são apresentadas na tabela 1.

Para a determinação do Z_{TD} , os dados GPS foram processados no software Gipsy-Oasis II (GOA II) (GREGORIUS, 1996), utilizando o método de posicionamento por ponto preciso (PPP) (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 das componentes hidrostática e úmida para as coordenadas das estações da RBMC foram obtidos utilizando uma interpolação bi-linear dos pontos da grade regular do modelo, envolvendo os campos do Z_{TD} , tanto da análise como os previstos. Os valores obtidos pelo processamento dos dados GPS são tomados como referência ao avaliar a qualidade das previsões do Z_{TD} em cada uma das 8 estações GPS envolvidas. Nessa avaliação, o viés é utilizado como medida de tendência e o EMQ como medida de

TABELA 1 - RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES GPS DA RBMC UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DO Z_{TD} .

Localidade	Identificação	Latitude	Longitude	Altitude ortométrica
Bom Jesus da Lapa - BA	BOMJ	-13° 15'	-43° 25'	434,21
Brasília - DF	BRAZ	-15° 56'	-47° 52'	1118,73
Crato - CE	CRAT	-07° 14'	-39° 24'	446,58
Cuiabá - MT	CUIB	-15° 33'	-56° 04'	236,32
Curitiba - PR	PARA	-25° 26'	-49° 13'	924,32
Porto Alegre - RS	POAL	-30° 04'	-51° 07'	72,58
Presidente Prudente - SP	UEPP	-22° 07'	-51° 24'	436,43
Recife - PE	RECF	-08° 03'	-34° 57'	26,07

Observação: Coordenadas geográficas referenciadas no SIRGAS 2000 e altitude ortométrica proveniente da combinação GPS e MAPGEO2004.

Fonte: IBGE (disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/>)

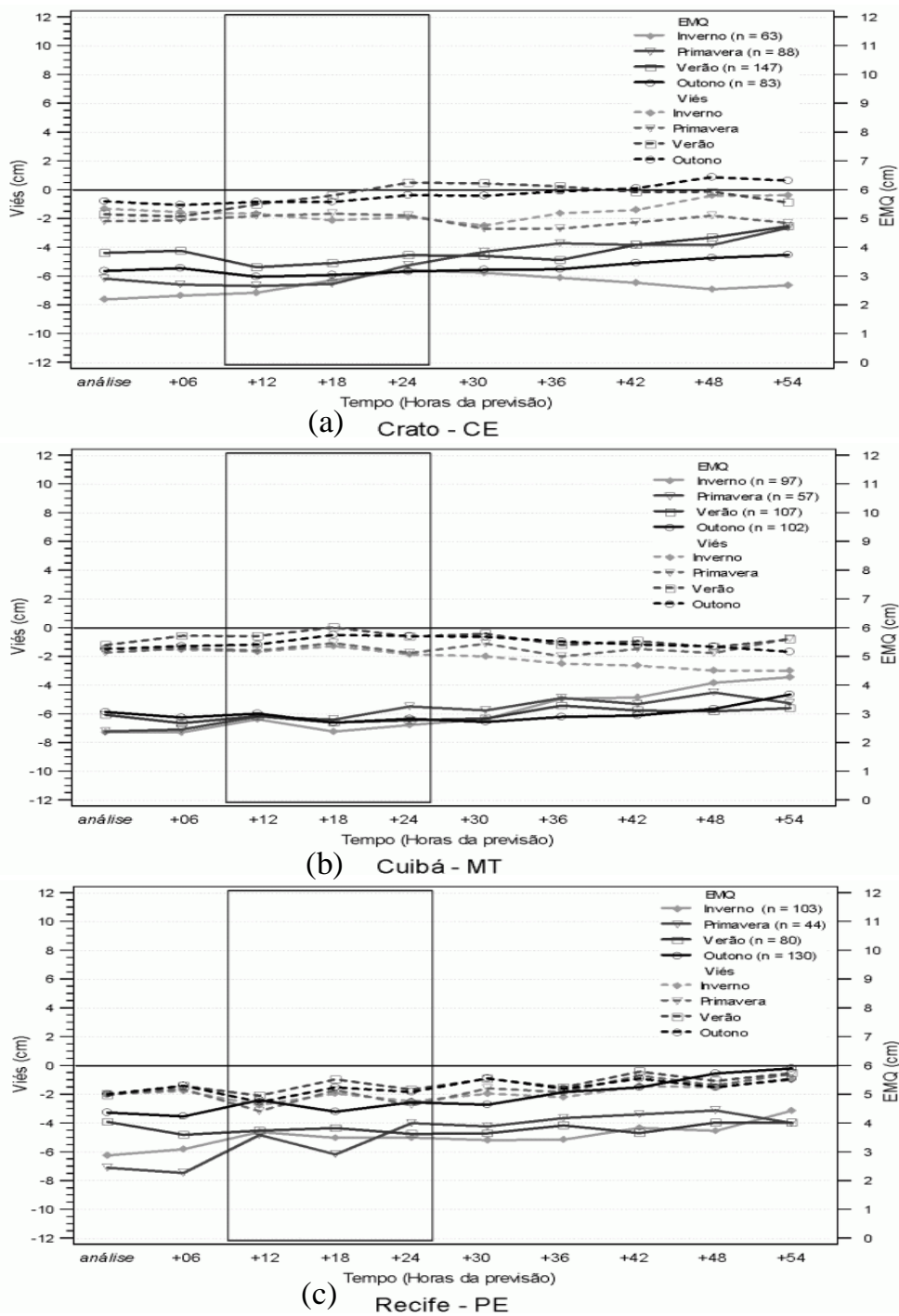


Fig. 4 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) CRAT, (b) CUIB e (c) RECF.

dispersão, os quais foram calculados para as diferentes estações sazonais. A fig. 4 apresenta os valores do viés e do EMQ para as estações CRAT, CUIB e RECF. A fig. 5 apresenta os valores desses mesmos indicadores para os dados coletados na UEPP, BOMJ e POAL, enquanto que a fig. 6 apresenta tais indicadores para as estações BRAZ e PARA.

Como a latência das previsões do Z_{TD} disponibilizadas pelo CPTEC-INPE é de 7,5 a 8,5 horas, as previsões para +12, +18 e +24 serão, entre as disponíveis, as mais apropriadas para os usuários, pois a

anterior a essas estará atrasada e as posteriores já poderão ser substituídas pelos resultados provenientes da próxima rodada do modelo. Essas saídas da previsão compõem a aqui denominada janela válida de previsões. Nas figuras 4, 5 e 6 essa janela é destacada através de um quadro negro inserido nos gráficos, pois é onde deve ser enfocada a avaliação da qualidade das previsões do Z_{TD} . A qualidade dos valores disponíveis nas horas próximas a essa janela também é avaliada, pois os mesmos podem ser utilizados na eventual ausência de valores mais adequados.

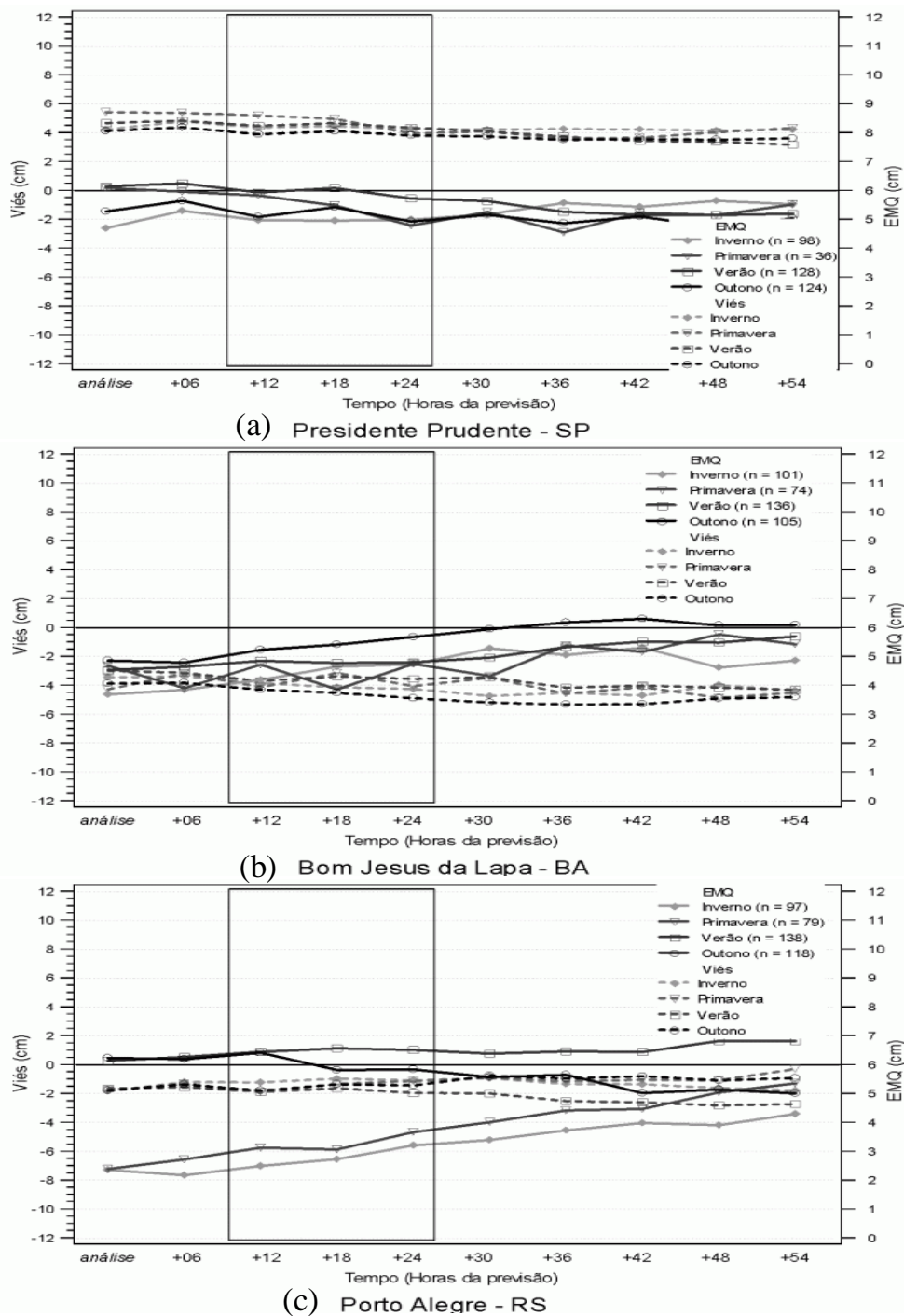


Fig. 5 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) UEPP, (b) BOMJ e (c) POAL.

Os valores apresentados nas figuras 4, 5 e 6 indicam que a qualidade das previsões apresenta-se melhor quanto mais próxima da *análise*. Isso é um resultado esperado devido ao aumento das incertezas do modelo de PNT ao ser integrado no tempo. Esses valores destacam também que a qualidade das previsões do Z_{TD} , nas diferentes estações GPS avaliadas, apresenta uma diferença bastante significativa. As estações GPS foram agrupadas nas figuras 4, 5 e 6 seguindo como critério a semelhança entre os valores EMQ na janela válida. Na fig. 4, os valores do EMQ nas três estações

GPS foram menores de 4 cm, enquanto que na fig. 5 esses valores ficaram entre 4 e 7 cm e na fig. 6 estão as estações GPS onde tais valores ficaram acima de 7 cm.

Dentre as estações GPS avaliadas que comparecem na fig. 4, a estação CUIB (fig. 4b) foi a que gerou os melhores resultados. O EMQ dentro da janela válida para essa estação GPS foi de 3 cm e o viés foi da ordem de -2 cm. Além disso, sazonalmente as variações dessas medidas estatísticas foram muito pequenas dentro da janela válida, o que mostra que

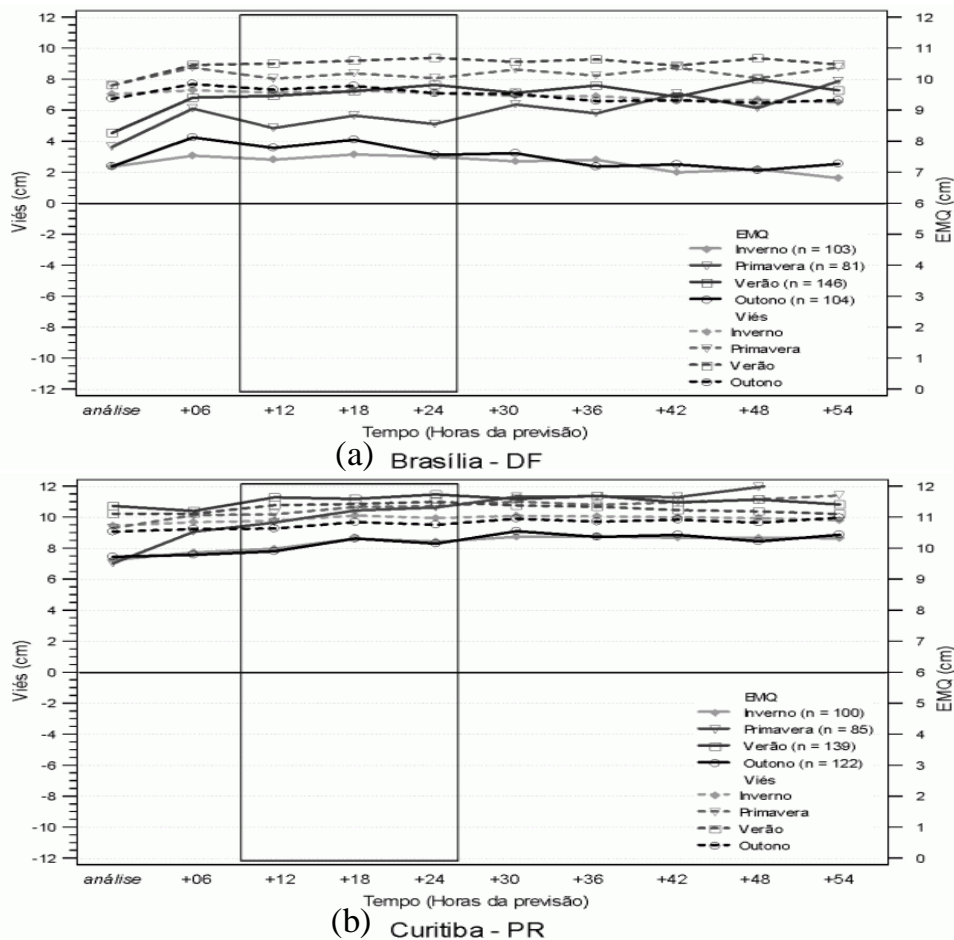


Fig. 6 – Valores sazonais do viés e EMQ em função das horas da previsão para as estações (a) BRAZ e (b) PARA.

previsões com boa qualidade são obtidas independentemente da época do ano. Com uma análise mais rigorosa verifica-se que os valores do viés apresentados nos gráficos dessa figura são menores durante o outono e o verão. Quanto aos valores do EMQ, apenas durante o outono na estação de RECF, a sazonalidade foi significativa, pois os valores dessa medida foram em média um centímetro maior que os gerados nas outras estações sazonais.

Na fig. 5 os valores do viés, apesar de serem praticamente constantes, mostram diferentes padrões para os diferentes locais considerados. Enquanto que em Presidente Prudente o viés é positivo, nas estações de Bom Jesus da Lapa e Porto Alegre os valores são negativos. Com relação à dispersão, destaque deve ser dado para os valores do EMQ gerados em Porto Alegre durante o inverno e primavera (entre 2,5 a 3,5 cm), pois os mesmos foram praticamente a metade dos valores observados durante o verão e outono (5,5 a 6,5 cm). Isso deve ser devido ao fato dos efeitos gerados pela passagem dos sistemas de ar frio ser mais previsíveis durante o inverno e primavera do que durante o verão e outono.

Os resultados contidos na fig. 6 mostram que nos dois locais considerados a qualidade das previsões do Z_{TD} é baixa, pois tanto os valores do viés quanto do

EMQ foram elevados. Os valores do viés foram positivos, variando de +7,0 à +10,0 cm dentro da janela válida de previsões em Brasília e de +9,0 à +11,0 cm em Curitiba. O EMQ também foi maior em Curitiba, variando de 8,0 a 11,0 cm, enquanto que em Brasília a variação foi entre 7,5 a 10,0 cm. Sazonalmente verifica-se que durante o outono e o inverno, tanto a tendência como a dispersão é menor do que durante a primavera e verão. Pode-se observar que essa diferença sazonal é mais acentuada nos valores do EMQ em Brasília.

Na estação de Curitiba foram utilizados também na análise de qualidade das previsões do Z_{TD} valores obtidos a partir de radiossondas lançadas nessa cidade. Os valores do Z_{TD} das radiossondas foram obtidos ao aplicar o perfil vertical de umidade e temperatura em uma integração numérica na equação 2 e os valores de pressão na equação 1. Na fig. 7 são apresentados os valores previstos pelo modelo de PNT em função dos valores gerados pelas radiossondas. Nessa figura também foram plotadas as estimativas do Z_{TD} obtidas a partir das observações GPS para avaliar a qualidade dessas estimativas que foram utilizadas como referência na avaliação da qualidade das previsões do Z_{TD} .

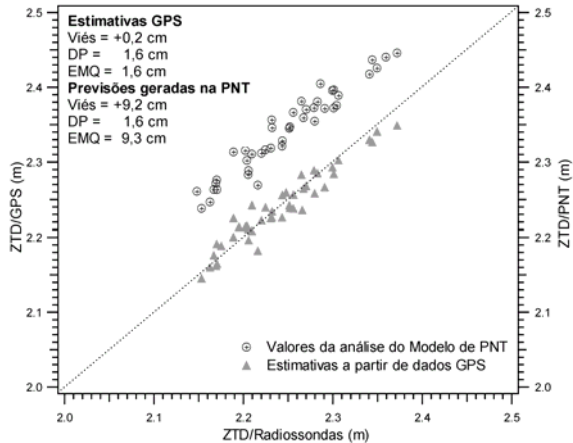


Fig. 7 - Comparação dos valores do Z_{TD} previstos pelo modelo de PNT e os gerados pelo processamento dos dados GPS com os obtidos a partir de radiossondas.

Os resultados mostrados na fig. 7 indicam que os valores obtidos via GPS apresentam boa concordância com os gerados a partir das radiossondas (EMQ de 1,6 cm). Além disso, eles tornam evidente a presença de um efeito sistemático nas previsões do Z_{TD} , pois apesar dos valores do desvio padrão (DP) das previsões do Z_{TD} e das estimativas GPS, com relação às radiossondas, serem iguais (1,6 cm), os valores do viés são bastante discrepantes (9,3 e 0,2 cm, respectivamente).

A provável causa do efeito sistemático verificado na estação GPS de Curitiba, está associada ao fato dela situar em uma região de relevo acidentado. Como a resolução do modelo global utilizado é de 100 km, os pontos da grade regular, utilizados para interpolar valores do modelo para as coordenadas dessa estação, não são capazes de modelar adequadamente as irregularidades do relevo. Isso está relacionado com os valores de pressão na superfície, cuja imprecisão tem um significativo impacto nos valores finais do Z_{TD} . A resolução horizontal do modelo também pode ser a

causa do viés encontrado em Brasília. Apesar do relevo em Brasília não ser acidentado, alguns dos pontos da grade do modelo, utilizados para interpolar valores para essa estação, localizam-se fora do planalto central brasileiro. Isso gera erros nos valores de pressão atmosférica, e por consequência um viés nos valores do Z_{TD} . O uso de modelos de PNT com melhor resolução horizontal pode minimizar essas imprecisões, pois os pontos da grade ficam mais próximos dos valores interpolados. A utilização do modelo regional ETA (BLACK, 1994) para esse fim é uma boa opção. A versão desse modelo, atualmente operacional no CPTEC, possui resolução horizontal de 40 km. Provavelmente, essa versão, além de minimizar o efeito sistemático verificado nas regiões montanhosas, permitirá uma melhor modelagem espacial das pequenas oscilações do Z_{TD} , principalmente da componente úmida, pois é nela que tais oscilações são mais significativas. Na fig. 8 são comparados os campos das análises geradas pelo emprego do modelo global (fig. 8a) e do modelo regional ETA (fig. 8b) para uma mesma época (0h00min UTC do dia 1° de junho de 2005).

Na fig. 8 são claramente destacados os benefícios que o uso de um modelo de melhor resolução pode trazer para a modelagem dinâmica do Z_{TD} . O gradiente espacial do Z_{WD} é bastante suavizado com o uso do modelo global, devido à sua baixa resolução horizontal. No entanto, com a resolução do modelo ETA, esse gradiente, em termos espaciais, torna-se mais sensível, representando melhor as variações do Z_{WD} . Com a nova versão desse modelo, com resolução horizontal de 20 km ainda em fase de teste no CPTEC, poderá compor a metodologia ideal para gerar as previsões do Z_{TD} . Esperasse que com o uso dessas versões do modelo as imprecisões encontradas nessa versão atualmente disponível, como os valores do viés encontrados em Brasília e Curitiba, possam ser minimizadas.

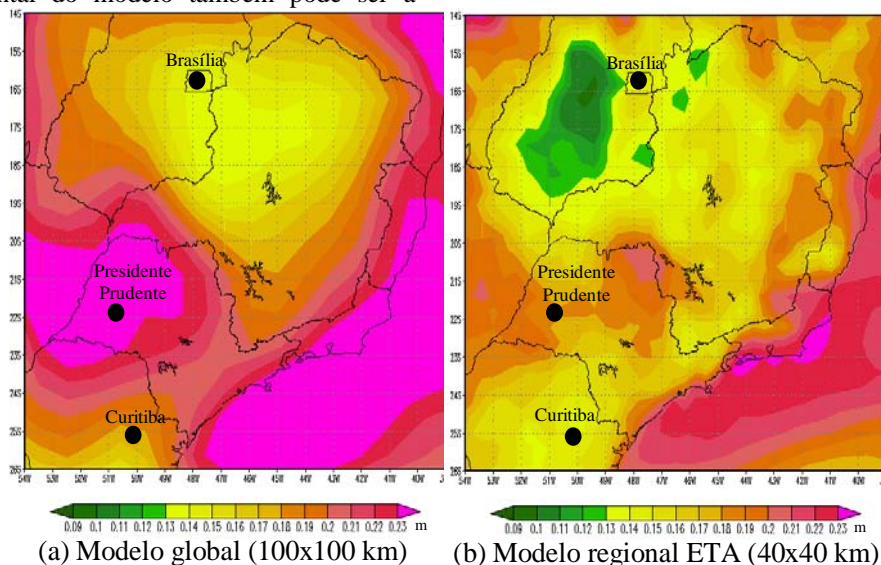


Fig. 8 – Campos do Z_{WD} sobre a região sudeste do Brasil provenientes das análises geradas com o emprego do modelo global do CPTEC(a) e do modelo regional ETA (b) para o dia 1° de junho de 2004 às 0h00min UTC.

Um outro ponto bastante relevante no que se refere à avaliação da qualidade da modelagem dinâmica é a comparação com os resultados dos modelos teóricos disponíveis, como o de Saastamoinem (SAASTAMOINEM, 1972) e o de Hopfield (SEEBER, 1993). Para isso, a fig. 9 apresenta os valores máximos do EMQ dentro da janela válida de previsões em comparação com o EMQ dos valores do Z_{TD} provenientes dos modelos de Saastamoinem e Hopfield ao considerar as estimativas obtidas a partir das observações GPS como referência. Os modelos de Hopfield e Saastamoinem foram avaliados ao considerar um total de 350 pares de dados para cada uma das estações do ano.

A fig. 9 mostra que os dois modelos teóricos avaliados apresentam valores do Z_{TD} bastante similares, sendo que o modelo de Saastamoinem é sutilmente mais próximo das estimativas GPS. Nessa figura é claramente visto que a modelagem dinâmica apresenta qualidade superior aos demais modelos, apresentando valores do EMQ menores que a metade dos valores apresentados pelos demais modelos na maioria das estações GPS avaliadas. Nota-se que no verão a diferença é mais significativa que nas demais estações do ano. Como esses modelos teóricos são baseados em uma atmosfera padrão, eles não são capazes de modelagem adequadamente as oscilações do Z_{TD} , pois na sua concepção foram utilizadas observações atmosféricas em sua grande maioria realizadas em regiões subtropicais como a Europa e América do Norte. Já a modelagem dinâmica é mais sensível às oscilações dessa variável, pois as observações atmosféricas, das mais variadas fontes, participam do processo de previsão dos valores do Z_{TD} .

Devido ao efeito sistemático nas previsões do Z_{TD} verificado nas proximidades das estações GPS

localizadas em Curitiba (PARA) e Brasília (BRAZ), durante o inverno os valores do EMQ indicam que os demais modelos apresentam qualidade semelhante à obtida na modelagem dinâmica. Porém, em nenhuma das circunstâncias avaliadas a modelagem dinâmica apresentou qualidade inferior aos demais modelos, o que torna evidente os benefícios obtidos no uso dessa modelagem na correção do atraso troposférico.

6 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

É consenso que a latência da disponibilidade das saídas do modelo de PNT do CPTEC, que atualmente é de 8 horas em média, é muito maior do que poderia ser considerada a ideal. Esforços para minimizar essa latência estão sendo realizados pelos responsáveis por esse produto. Pretende-se, no futuro, que rodadas de integração curta sejam inicializadas mais cedo do que as convencionais, privilegiando as previsões de curto prazo. Resultados positivos nesse sentido poderão trazer benefícios para a qualidade dos valores do Z_{TD} disponíveis, pois previsões mais próximas da condição inicial do modelo poderiam ser utilizadas, as quais, como já discutido anteriormente, são de melhor qualidade.

Sabe-se que a baixa precisão e a falta de continuidade das informações do vapor d'água atmosférico são algumas das maiores fontes de erros na previsão da precipitação pluviométrica gerada pelos modelos de PNT (KUO *et al.*, 1993). Esse é o motivo pelo qual tem sido observado nos últimos anos um aumento considerável da assimilação dos valores do IWV obtidos a partir de satélites sondadores de umidade bem como pelo pós-processamento dos dados GPS coletados por estações terrestres nos modelos de PNT

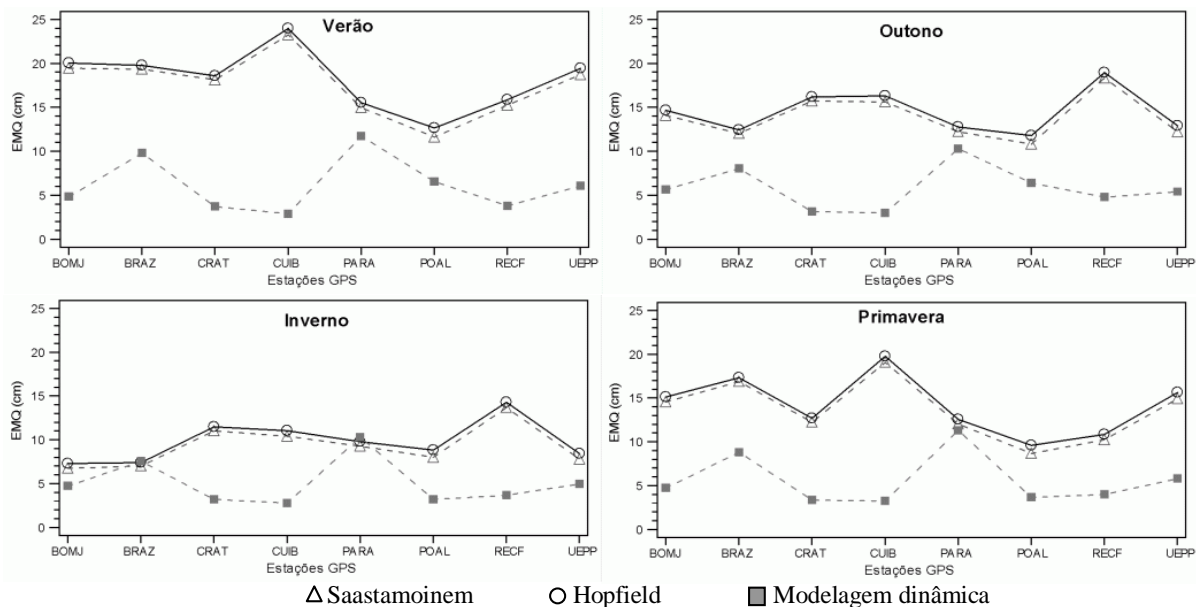


Fig. 9 – Análise da qualidade dos valores do Z_{TD} provenientes da modelagem dinâmica e dos modelos de Saastamoinem e Hopfield em comparação com estimativas GPS.

(KUO *et al.*, 1993, 1996; CUCURULL *et al.*, 2001; MAREL, 2001). Nesse sentido, os primeiros testes de assimilação dos valores do IWV obtidos através dessas fontes estão sendo realizados no CPTEC. Pretende-se verificar o impacto que essa assimilação pode gerar nas previsões atmosféricas bem como na previsão do atraso zenital troposférico.

Além de aplicações em sistemas convencionais de posicionamento as previsões do Z_{TD} podem também beneficiar outros que também empregam sinais de radiofrequência. Um exemplo disso vem sendo desenvolvido pela Divisão de Sistemas Espaciais (DSE) do INPE. A DSE tem utilizado as previsões para minimizar os efeitos da troposfera nas observações doppler em sinais imitados por Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) e recebidos em antenas receptoras, depois de refletidos pelo Satélite de Coleta de Dados (SCD). Tais observações são utilizadas para a determinação da posição das PCDs móveis.

6.1 Conclusões

Na Modelagem Dinâmica obtêm-se previsões das componentes do Z_{TD} empregando os campos de temperatura, pressão e umidade gerados por um modelo de PNT a partir de uma condição inicial onde as observações são consideradas. Previsões do Z_{TD} são geradas operacionalmente pelo CPTEC-INPE com o objetivo de oferecer a comunidade usuária das técnicas de posicionamento por satélites uma alternativa para minimizar os efeitos dos gases atmosféricos nos sinais de radiofrequência.

Uma análise da variabilidade das componentes hidrostática e úmida do Z_{TD} foi apresentada, bem como uma discussão dos principais fatores que exercem influência nessa variação sobre a América do Sul. O presente trabalho apresentou uma avaliação da modelagem dinâmica do Z_{TD} empregando estimativas obtidas com o pós-processamento dos dados GPS coletados por algumas estações da RBMC em um período de um ano.

Na análise da variabilidade das componentes do Z_{TD} observou-se que há diversos fatores que exercem influência significativa na oscilação temporal e espacial dessas variáveis. A componente úmida é influenciada significativamente pelas oscilações dos valores de temperatura e umidade, os quais são influenciados pelo relevo, pelos sistemas de ar frio provenientes da Antártida e a ocorrência das ZCAS. A componente hidrostática é influenciada pela variação dos valores de pressão atmosférica, a qual está relacionada com o relevo e a ocorrência de zonas de alta pressão sobre a América do Sul.

Os resultados obtidos na avaliação da qualidade das previsões do Z_{TD} nas diferentes estações do ano mostraram que a modelagem é adequada durante todo o ano, apresentando-se sensível as oscilações sazonais dessa variável. Os valores do EMQ obtidos nessa avaliação, dentro da janela válida de previsões, foram em torno de 1,5% a 4,2% (de 4 a 11 cm). Em

comparação com os modelos teóricos de Saastamoinen e Hopfield verifica-se que a modelagem dinâmica apresenta melhores resultados, principalmente durante o verão.

Em algumas estações localizadas em regiões com relevo irregular verificou-se que a qualidade das previsões do Z_{TD} não é a mesma que a observada em outras regiões. Suspeita-se que esse efeito seja devido à baixa resolução horizontal do modelo global. Estudos preliminares sugerem que o emprego o modelo de PNT de maior resolução horizontal (como o modelo regional ETA) para a modelagem do Z_{TD} tais imperfeições podem ser minimizadas.

Considerando a complexidade matemática envolvida no modelo de circulação geral presente na PNT, a tecnologia computacional empregada, a qualidade obtida das previsões do Z_{TD} e as possíveis melhorias futuras verifica-se que a modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico é a mais promissora para as aplicações que requerem boa precisão em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem: Ao Msc. Wagner Flauber Araújo pelo apoio técnico na implementação das previsões do Z_{TD} ; À Cláudia Maria M. R. L. Martins pela implementação da página; E à FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (processo N°. 01/12761-9), pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLACK T. L. **The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples.** *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 256-278, 1994.
- BOEHM, J.; SCHUH, H. **Vienna mapping functions in VLBI analyses.** *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi: 10.1029/2003GL018984. 2004.
- CAMARGO, P.O.; MONICO, J.F.G.; FERREIRA, L.D.D. **Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users.** *Earth, Planets and Space*, Japão, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.
- CHARNEY, J. G.; FJORTOFT, R.; VON NEUMANN, J. 1950: **Numerical intention of the barotropic vorticity equation.** *Tellus*, n. 2, p. 237-254.
- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto de Pesquisas Espaciais. **Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC.** Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_global.html> Acesso: 10 março 2006.
- CUCURULL, L.; RIUS, A.; VANDENBERGHE, F.; PONDECA, M. 4D – **VAR assimilation of GPS-**

- derived ZTD: a case study. In: ION GPS 2001 - 14th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Salt Lake City, Utah. 2001.
- DAVIS, JL.; HERRING, TA.; SHAPIRO, I.; ROGERS, AE.; ELGENED, G. **Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length.** Radio Sci., vol. 20, 1593-1607, 1985.
- FORTES, LPS. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC).** Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 152 pp, 1997.
- GREGORIUS, T. **How it Works... GIPSY OASIS II,** Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996.
- ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: **World wide CNS ATM Systems Implementation Conference.** Rio de Janeiro,. Disponível em <<http://www.icao.int/icao/en/ro/rio/>>. Acesso: 24 outubro 2005.
- JENSEN, A. B. O.; TSCHERNING, C. C.; MADSEN, F. **Integrating Numerical Weather Predictions in GPS Positioning.** In: ION GPS 2003 -16th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Portland, Oregon. 2003.
- JUPP, SM.; POWE, J.; OWEN, J.; BUTCHER. **Use of Numerical Weather Prediction Fields for the Improvement of Tropospheric Corrections in Global Positioning Applications.** Defense Science and Technology Laboratory, UK, 2003.
- KINTER, J.L. *et al* **The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model.** Volume1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report n.o 51. Calverton, USA, 1997.
- KUO, Y. H.; GUO, Y. R.; WESTWATER, E. R. **Assimilation of Precipitable Water Into Mesoscale Numerical Model.** Mon. Wea. Rev., 121, 1215-1238,0. 1993.
- _____, ZUO, X.; GUO, YR. **Variational Assimilation of Precipitable Water Using Nonhydrostatic Mesoscale adjoin Model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments.** Mon. Wea. Rev., 124, 122-147, 1996.
- MAREL, H. **Exploitation of Ground Based GPS for Numerical Weather Prediction and climate applications in Europe.** Delft University of Technology, Department of Geodesy, Thijsseweg 11, 2629 JA Delft, The Netherlands, 2001.
- MONICO, JFG. **Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e aplicações.** Editora UNESP, 291 p., 2000.
- NIELL, AE. **Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths.** Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No.B2, Pages 3227-3246, 1996.
- _____. **Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models.** Phys. Chem. Earth, v. 26, p.475-480, 2001.
- RICHARDSON, L. F. 1922: **Weather Prediction by Numerical Process,** Cambridge University Press, London.
- SAASTAMOINEM, J. **Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction.** Bulletin Geodésique, Vol. 105, Sept 1972, Vol. 106, Dec 1972, Vol. 107, March, 1973.
- SAPUCCI, L. F., MACHADO, L. A. T., MONICO, J. F. G. **Modelagem Dinâmica do Atraso Zenital Troposférico para América do Sul Empregando Previsão Numérica de Tempo.** In: I SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2004, Recife. Anais do evento, 2004.
- SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A., SILVA DIAS, P. L. **Meteorology of the Tropics: South America.** In: Meteorology of the Southern Hemisphere, Edited by David J. Koroly and Dayton G. Vicent. American Meteorological Society, Vol. 27. No. 49, 1998.
- SEEBER, G. 1993. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods & Applications.** Walter de Gruyter, Berlin New York, 531pp.
- SILVA DIAS, P. L., **A Zona de Convergência do Atlântico Sul.** Universidade de São Paulo. 1995.
- SPLIKER, J.; J. JR. **Tropospheric Effects on GPS.** American Institute of Aeronautics and Astronautics. Vol. 1 Capitol 13, pg. 517 – 546, 1994.
- SCHÜLER, T.; CHÜLER HEIN, T.G.W.; EISSFELLER, B. **Improved Tropospheric Delay Modeling Using an Integrated Approach of Numerical Weather Models and GPS Troposphere.** In: ION GPS 2000 -13th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Salt Lake City. 2000.