

AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO PARA A AMÉRICA DO SUL, OBTIDAS USANDO MODELO DE PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO COM ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Evaluation of zenithal tropospheric delay predictions for South America from high spatial resolution numerical weather prediction model

LUIZ FERNANDO SAPUCCI¹
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO²
LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO¹
GUILHERME POLESZUK DOS SANTOS ROSA²

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

²Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT – P. Prudente
Departamento de Cartografia
galera@fct.unesp.br

RESUMO

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) desde 2004 tem disponibilizado à comunidade geodésica uma alternativa para a modelagem dos efeitos dos gases atmosféricos na propagação dos sinais GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Trata-se do emprego de modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) para gerar previsões do Atraso Zenital troposférico (*ZTD*). Uma primeira versão foi desenvolvida utilizando um modelo de PNT com resolução horizontal de 100x100km, substituída posteriormente pela atual que passa a empregar o modelo regional Eta com resolução de 20x20km. O presente trabalho apresenta os detalhes mais significativos da atual versão, bem como uma avaliação utilizando estimativas do *ZTD* geradas a partir dos dados GPS da RBMC. Em uma comparação com a versão

anterior, pode-se observar uma melhoria considerável na qualidade das previsões do ZTD em Brasília e Curitiba. Nessas regiões, onde a qualidade da versão anterior era comprometida, foram observadas melhorias na qualidade final de 50% e 55%, respectivamente. Nas demais estações da RBMC avaliadas observou-se que, independente das estações sazonais, o efeito sistemático é praticamente nulo e os valores do EMQ estão em torno de 4 a 5 cm.

Palavras-chave: Modelagem Troposférica; Atraso Zenital Troposférico; ZTD; Previsão Numérica de Tempo.

ABSTRACT

A Center for Weather Forecast and Climatic Studies of National Institute for Space Research (CPTEC/INPE) has provided to the Brazilian Geodetic community, since 2004, an alternative to correct the GNSS observables from the tropospheric refraction. Numerical Weather Prediction (NWP) Model is used to generate Zenital Tropospheric Delay (ZTD). For the version 1, it was developed a model with horizontal resolution of 100 km, which was updated with Eta model, with resolution of 20 km. This paper provides the most significative details of the current version, as well an evaluation of its quality, using for such ZTD estimates from GPS data collect at RBMC. Comparing to the old version, considerable improvement could be observed from the new model, mainly in Brasilia and Curitiba, reaching up to 55% improvement. When all stations were used in the quality control, almost null bias and RMS of about 4 to 5 cm could be observed.

Keywords: Tropospheric modeling; Zenithal Tropospheric Delay; ZTD; Numerical Weather Prediction.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, depois dos efeitos gerados pela ionosfera, a troposfera é a maior fonte de erros nas observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Em muitas aplicações GNSS que utilizam curtos intervalos de tempo de coleta de dados e não requerem alta precisão (metros), os modelos empíricos disponíveis para minimizar o Atraso Zenital Troposférico (ZTD - *Zenithal Tropospheric Delay*) são suficientes. No entanto, aplicações em tempo real, tal como a navegação aérea, posicionamento de plataformas de petróleo, entre outras, requerem melhor nível de precisão (decímetros) e os modelos empíricos tornam-se inapropriados para esses casos, pois são ineficientes na modelagem das oscilações temporais e espaciais do ZTD.

Atualmente, há um consenso no meio científico de que os modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) podem contribuir significativamente com a modelagem do Atraso Zenital Troposférico (IAG, 2008). Essa modelagem envolve o Modelo de Circulação Geral (MCG), o qual, de forma minuciosa, leva em consideração a interação dos fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera terrestre gerando um sistema extremamente complexo exigindo alta capacidade computacional

(RICHARDSON, 1922). Como esses modelos de previsão são constantemente alimentados por observações das variáveis atmosféricas, as quais são realizadas pelos mais variados tipos de sensores, os mesmos apresentam uma capacidade de gerar previsões do *ZTD* de qualidade superior aos valores gerados pelos modelos matemáticos disponíveis, tais como Hopfield, Saastamoinen etc. Seguindo essa tendência mundial, desde meados de 2004 o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) gera operacionalmente previsões dos valores do *ZTD* para toda a América do Sul e oceanos adjacentes (disponível no endereço eletrônico <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital>). O objetivo é disponibilizar à comunidade geodésica uma alternativa para minimizar os efeitos da troposfera nos sinais de rádio-frequência para aplicações que necessitem melhorar a precisão em tempo real. Na versão disponibilizada inicialmente foi utilizado o modelo de previsão de tempo com resolução horizontal de 100x100 km (doravante denominado de GLB100km) (Sapucci et al., 2006). No entanto, desde o início do corrente ano está sendo disponibilizada uma nova versão da modelagem do *ZTD*, a qual emprega um modelo regional de previsão de tempo Eta com resolução horizontal de 20x20 km, denominado aqui por ETA20km. Essa modificação agrega diversos benefícios à versão anterior, pois com a melhoria na resolução horizontal, os campos das previsões ficaram mais sensíveis às oscilações espaciais do *ZTD*, em especial da componente úmida que tem essa característica mais acentuada decorrente da circulação atmosférica do vapor d'água. O objetivo principal desse trabalho é divulgar a disponibilidade e a qualidade das previsões do *ZTD* geradas com uma grade horizontal de 20x20 km e em especial destacar os benefícios agregados ao produto após essa modificação.

2. MODELO REGIONAL ETA20km: PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO COM ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL.

O modelo de PNT de área limitada utilizado para gerar a atual versão das estimativas do *ZTD* é denominado Eta e foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (BLACK, 1994). Tal modelo encontra-se operacional no CPTEC desde 1996. Devido à ampliação da capacidade computacional desse Centro, ocorrida nos últimos anos, a resolução espacial desse modelo foi ampliada por diversas vezes, a qual se iniciou em 80km e hoje se encontra em 20km. A função desse modelo é complementar a previsão gerada pelo modelo global (atualmente com resolução horizontal de 60km) prevendo com maiores detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima, tempestades severas etc (CHOU, 2002). Devido ao fato que os sistemas nesta escala terem uma não-linearidade maior, a previsibilidade é menor e as previsões são de curto prazo. As previsões geradas operacionalmente se estendem até 72h e cobrem grande parte da América do Sul e oceanos adjacentes (longitudes de 25°W a 90°W e as latitudes de 12°N a 45°S.)

sendo disponibilizadas duas vezes ao dia.

Uma das diferenças mais significativas entre o modelo Eta e os demais modelos de PNT é a coordenada vertical empregada no mesmo, a qual foi definida por MESINGER (1984). A coordenada *eta*, da qual originou o nome do modelo, é baseada na normalização da pressão, com a vantagem de que nesta coordenada as superfícies constantes estão dispostas quase na horizontal, tanto nas áreas planas quanto nas montanhosas. A coordenada *eta* (η) de um ponto de pressão atmosférica P é definida pela expressão:

$$\eta = \left(\frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right) \left[\frac{P_{REF}(z) - P_T}{P_{REF}(0) - P_T} \right], \quad (1)$$

na qual tem-se P_T é a pressão no topo do modelo (25hPa); P_S é a pressão atmosférica à superfície, z é a elevação com relação a fronteira inferior do modelo e P_R é a pressão de referência. A vantagem desse sistema de coordenadas verticais é que as superfícies de mesma coordenada são aproximadamente horizontais, reduzindo desta forma os erros nos cálculos de variáveis obtidas a partir de derivadas horizontais. Estes erros são significativos em regiões de montanhas íngremes, como é o caso dos Andes na América do Sul. A versão de 20km possui 42 níveis, sendo que a resolução vertical maior nos baixos níveis diminui com a altura. A primeira camada tem 20m de espessura e um máximo secundário ocorre próximo à tropopausa (aproximadamente 8km de altitude) para melhor descrever as frentes em altos níveis.

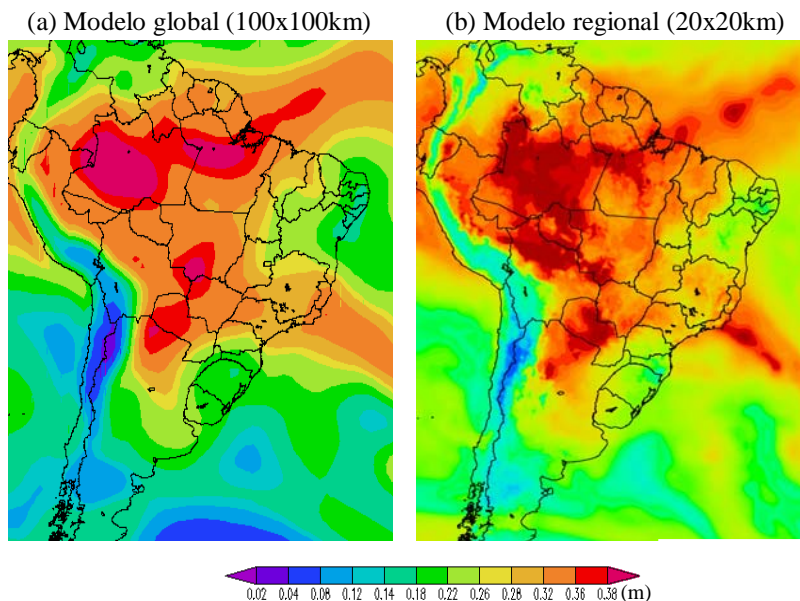
Uma outra diferença entre as versões global e a regional é que enquanto a primeira apresenta uma autonomia, a segunda apresenta uma dependência da versão global. Como o modelo regional é de área limitada e a atmosfera é única sobre todo o globo, o mesmo utiliza as informações sobre as fronteiras de seu domínio (denominada condições de contorno) provenientes do modelo global, atualizadas no processo a cada 6 horas de integração. No caso da versão do modelo Eta operacional no CPTEC, o modelo global utilizado é o que se encontra operacional nesse Centro, denominado CPTEC-COLA (KINTER et al. 1997). As tendências nas bordas são distribuídas linearmente durante estes intervalos de tempo. As variáveis prognósticas utilizadas para gerar as previsões de tempo do modelo Eta são: temperatura do ar, componentes zonal e meridional do vento, umidade específica, água líquida da nuvem, pressão à superfície e energia cinética turbulenta.

3. A NOVA VERSÃO DAS PREVISÕES DO ZTD DISPONÍVEIS NO CPTEC/INPE

A figura 1 mostra os campos das previsões da componente úmida do ZTD, válidas para o dia 22/02/2008 as 12:00h, utilizando o modelo GLB100km (figura 1a), o mesmo utilizado para gerar a versão anterior, e o modelo ETA20km (figura

1b). Essa figura deixa bastante evidente as melhorias em caracterizar espacialmente as pequenas oscilações dessa variável obtida nessa nova versão. Nessa figura é possível determinar com maior precisão onde se localizam as áreas mais propensas a uma maior influência da umidade atmosférica no posicionamento utilizando sinais de radiofrequência.

Figura 1- Campo dos valores do *ZTD* (em metros) da componente úmida para o dia 22/02/2008 as 12:00h, gerados ao utilizar: (a) o modelo global com resolução de 100x100 km; (b) o modelo regional com resolução de 20x20 km.



Com relação à versão anterior, essa nova apresenta diversas melhorias que devem ser destacadas:

- Acervo de dados históricos, no qual o usuário tem acesso direto ao BDI (Banco de Dados de Imagens) da Divisão de Satélites e Sistemas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE). Esse banco, desenvolvido em POSTGRE, contém tanto arquivos de figuras no formato gif, como arquivos binários que contém os valores das componentes do *ZTD* para os pontos da grade regular que o domínio do Eta abrange. Os produtos são disponibilizados diariamente e alimentam esse banco ficando disponíveis para acessos posteriores. Esse acesso posterior é especialmente interessante para os pesquisadores envolvidos em avaliar os benefícios desse produto para suas aplicações geodésicas.

- Acesso via banco de dados dos resultados das avaliações mensais do produto, feita periodicamente a partir de estimativas do *ZTD* proveniente do processamento dos dados de algumas estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) (IBGE, 2008). O software utilizado atualmente é o GIPSY-OASIS II (GOA-II) (GREGORIUS, 1996) em estreita colaboração com o LGE (Laboratório de Geodésia Espacial) da UNESP de Presidente Prudente.
- Disponibilidade de um pacote contendo um código fonte em Fortran de um interpolador bilinear, disponível no endereço http://pindara.cptec.inpe.br/zenital/documentos/interpZWDeta20_v1.1.tar, utilizado na determinação dos valores das componentes do *ZTD* para as coordenadas do usuário a partir de uma lista de coordenadas e dos arquivos binários disponíveis no acervo. Esses arquivos binários contêm os valores das componentes do *ZTD* para todos os pontos de grade no domínio do Eta. O objetivo da disponibilização desse pacote é facilitar a utilização dos resultados gerados nesse produto por parte dos usuários.
- O novo *layout* da página disponível nessa versão segue o padrão CPTEC/INPE, o qual, seguindo as tendências atuais do mercado tem sido desenvolvido em Java. Trata-se de uma linguagem orientada a objeto que utiliza um método eficiente de atualização temporária da página e recursos baseados em *Java Script* (recurso denominado AJAX, que permite recarregar apenas os formulários e campos necessários sem recarregar a página toda). Isso proporciona uma interface amigável quando o usuário solicita recursos e deseja visualizar os produtos via WEB. Entre essas ferramentas há uma específica para *zoom* nas imagens permitindo acessar regionalmente as pequenas oscilações do *ZTD*, suprimindo as figuras regionalizadas que eram disponíveis na antiga versão do produto. Além da versão em português, é disponibilizada também uma versão em inglês e uma outra em espanhol, sendo que a última encontra-se em fase de desenvolvimento.

4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS APÓS A ATUALIZAÇÃO DO PRODUTO

Para a avaliação dessa nova versão das estimativas do *ZTD*, o procedimento adotado foi similar ao utilizado para a avaliação da versão anterior, no qual consiste em comparar os valores previstos pelo modelo para as coordenadas das estações da RBMC com as estimativas do *ZTD* geradas a partir das observações GPS (SAPUCCI et al., 2006). Os valores previstos são calculados a partir da grade regular gerada pelo modelo Eta, aplicando uma interpolação bilinear horizontalmente e reduzindo o valor na vertical aplicando a chamada equação hipsométrica adaptada para os valores do *ZTD*, que pode ser expressa por:

$$ZTD_{ANT} = ZTD_{MOL} \cdot e^{\left(\frac{(h_{ANT} - h_{MOL})}{H} \right)}, \quad (2)$$

na qual ZTD_{ANT} e ZTD_{MOL} são os valores do ZTD que se referem à altura da antena GPS e para a grade do modelo Eta, respectivamente. Os termos h_{ANT} e h_{MOL} são os valores da altura ortométrica da antena e o valor da altura ortométrica interpolada para as coordenadas da estação. O termo H é a altura escalar da camada úmida. Essa metodologia é a mesma implementada no interpolador mencionado no item anterior. Para a determinação das estimativas do ZTD , os dados GPS coletados nas estações da RBMC foram pós processados no software GOA-II (GREGORIUS, 1996) utilizando o método de posicionamento por ponto preciso, 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). As efemérides utilizadas são as do tipo precisas, fornecidas pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) da NASA. A relação das estações utilizadas e as informações mais relevantes sobre cada uma são apresentadas na tabela 1. O período de dados utilizados nessa avaliação foram os meses de janeiro, abril, julho e outono de 2006, representando respectivamente, o verão, outono, inverno e primavera. O objetivo da escolha desses meses é acessar o comportamento da qualidade em função da sazonalidade. As medidas estatísticas utilizadas nessa avaliação foram o viés (do inglês *bias*) e o EMQ (erro médio quadrático, tradução do inglês *root mean square*), ambas calculadas ao considerar as estimativas como valores de referências.

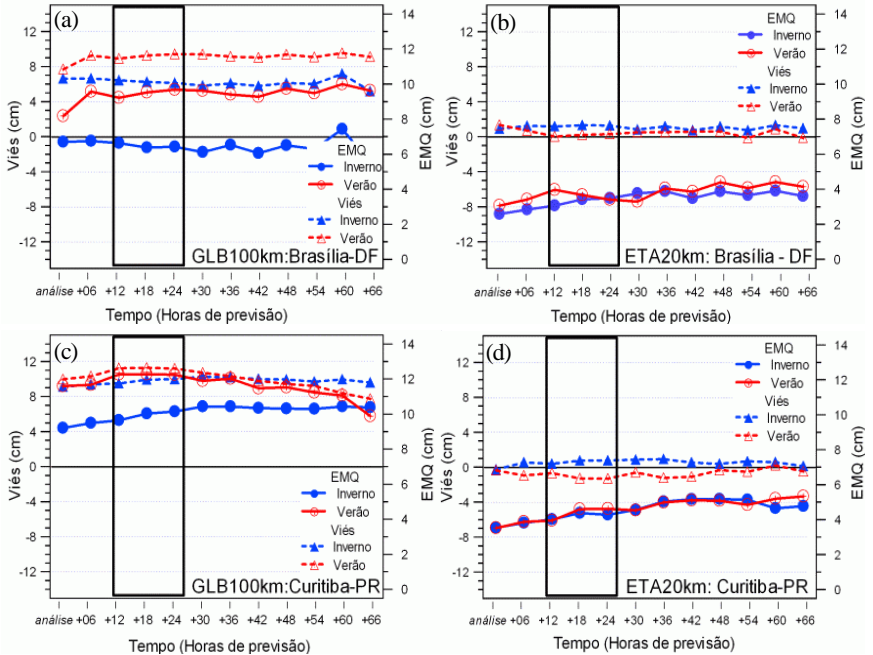
A figura 2 apresenta os valores do viés e EMQ para as estações da RBMC de Curitiba e Brasília, com o objetivo de evidenciar os benefícios obtidos com essa nova versão das previsões do ZTD , uma vez que em tais estações foram observados os maiores erros ao empregar a versão anterior (SAPUCCI et al., 2006). Nessa figura é levado em consideração apenas as estações sazonais do verão (janeiro de 2006) e inverno (julho de 2006). De forma similar à apresentada em Sapucci et al., 2006, nos gráficos da figura 2 é destacada a janela contendo as previsões que devem ser efetivamente utilizadas na prática (janela de 12 a 24 horas de previsão) na qual essa análise é concentrada. Como se pode observar na figura 2a e 2c o uso do modelo GLB100km para estas localidades gera um viés em torno de 7 e 8 cm em Brasília e 10 e 11 cm em Curitiba, para o inverno e verão, respectivamente, e em consequência disso os valores do EMQ ficam acima de 9 e 6 cm em Brasília e 9 e 12 em Curitiba, para o inverno e verão, respectivamente. Como explicado em Sapucci et al., 2006, o motivo para esses valores excessivos do viés é o fato de que as distâncias entre os pontos do modelo (100 km) não serem apropriadas para caracterizar as irregularidades do relevo nessas regiões, o que gera um erro sistemático na determinação dos valores de pressão atmosférica. Já com o uso do modelo regional ETA20km os valores do viés diminuíram consideravelmente para valores menores que 1cm em Brasília (figura 2b) em ambas estações sazonais e 1 e

2 cm em Curitiba (figura 2d) para o inverno e verão, respectivamente. Os valores do EMQ com essa nova versão ficam em torno de 3 e 4 cm em Brasília e 4 e 5 cm em Curitiba. Essa diminuição representa uma melhoria na qualidade em torno de 50% e 55%, respectivamente. Esse resultado é bastante significativo, o qual justifica todo o esforço em disponibilizar essa nova versão das previsões do *ZTD* para a América do Sul.

Tabela 1- Relação das estações da RBMC utilizadas na avaliação da qualidade das previsões do *ZTD*.

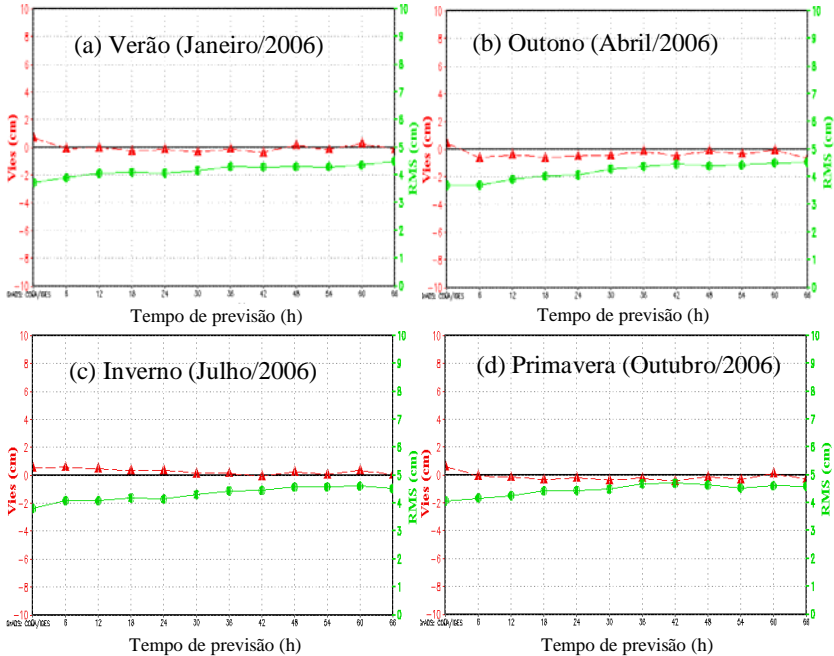
Cidade	UF	Sigla	Latitude	Longitude
Belém	PA	BELE	-01° 24'	-48°27'
Bom Jesus da Lapa	BA	BOMJ	-13°15'	-43°25'
Brasília	DF	BRAZ	-15°56'	-47°52'
Cananéia	SP	NEIA	-25°01'	-47°55'
Crato	CE	CRAT	-07°14'	-39°24'
Cuiabá	MT	CUIB	-15°33'	-56°04'
Curitiba	PR	UFPR	-25°26'	-49°13'
Fortaleza	CE	FORT	-03°52'	-38°25'
Governador Valadares	MG	GVAL	-18°51'	-41°57'
Imperatriz	MA	IMPZ	-05°29'	-47°29'
Macapá	AP	MAPA	00°03'	-51°06'
Manaus	AM	NAUS	-03°01'	-60°03'
Montes Claros	MG	MCLA	-16°43'	-43°52'
Porto Alegre	RS	POAL	-30°04'	-51°07'
Porto Velho	RO	POVE	-08°42'	-63°53'
Presidente Prudente	SP	PPTTE	-22°07'	-51°24'
Recife	PE	RECF	-08°03'	-34°57'
Rio de Janeiro	RJ	ONRJ	-22°54'	-43°13'
Salvador	BA	SAVO	-12°56'	-38°25'
Santa Maria	RS	SMAR	-29°43'	-53°42'
Ubatuba	SP	UBAT	-23°33'	-45°07'
Uberlândia	MG	UBER	-18°53'	-48°19'
Varginha	MG	VARG	-21°32'	-45°26'
Viçosa	MG	VICO	-20°45'	-42°52'

Figura 2 - Comparação dos valores do viés e do EMQ obtidos com a versão anterior (GLB100km) e com a versão atual (ETA20km) em função do tempo de previsão, para o inverno (julho de 2006) e verão (janeiro de 2006) nas estações de Curitiba - PR e Brasília - DF.



Nas demais regiões a melhoria na qualidade não foi tão significativa quanto aquelas observadas em Curitiba e Brasília. Embora tenha ocorrido uma diminuição nos valores do viés, na dispersão em torno da média não houve significativa modificação fazendo com que os valores do EMQ fiquem em torno de 4 cm. Isso pode ser observado na figura 3, onde os valores do viés e EMQ foram calculados, usando a versão ETA20km, ao considerar todas as 24 estações GPS avaliadas. O objetivo dessa análise é apresentar um indicador global de qualidade para as diferentes estações sazonais. Observa-se que os valores do viés permanecem próximos de zero, até mesmo para as previsões de 66 horas. Observa-se ainda que os valores do EMQ são mais elevados na primavera (figura 3d) onde a curva do EMQ se aproxima de 5 cm.

Figura 3 - Valores do viés (tracejado unindo triângulos) e do EMQ (traço contínuo unindo círculos), ao considerar todas as estações GPS disponíveis, em função do tempo de previsão do ETA20km, para as diferentes estações sazonais do ano: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.



As figuras 4 e 5 mostram os valores do EMQ dentro da janela útil das previsões para cada uma das estações GPS avaliadas para o verão e inverno, respectivamente. Em ambas as figuras as estações GPS estão dispostas ordenadamente, de tal forma que aquelas que apresentam os menores valores do EMQ, para a previsão de 18 horas (estação POVE no verão e VICO no inverno), encontram-se mais ao topo das figuras. Observa-se que durante o verão (figura 4) as estações nas baixas latitudes se concentram na parte superior da figura, enquanto que as estações GPS mais ao sul estão concentradas na inferior, o que indica que nessa época do ano a previsibilidade do *ZTD* está correlacionada com a variação da latitude. O fator mais preponderante nesse aspecto é a influência das frentes fria provenientes do polo sul que diminuem a previsibilidade, a qual é mais significativa nas regiões mais ao sul do Brasil. Já durante o inverno (figura 5), esse padrão não é bem definido, o que se constata ao observar que as estações GPS localizadas nos

extremos dessa figura (VICO no topo e NEIA na base) apresentam uma diferença de latitude de apenas 5°.

Dada a complexidade envolvida no modelo de previsão e como os fatores que influenciam a previsibilidade são regionalizados sobre a América do Sul, para cada uma das estações GPS avaliadas pode haver diferentes fatores dominantes, os quais são responsáveis pelas diferenças na qualidade observada em cada uma delas. Apesar de não ser apresentado aqui, observa-se que a metodologia de avaliação utilizada pode ser empregada em um estudo de caso para caracterizar a qualidade das previsões do *ZTD* explicando assim as diferenças entre as estações GPS, observadas nas figuras 4 e 5.

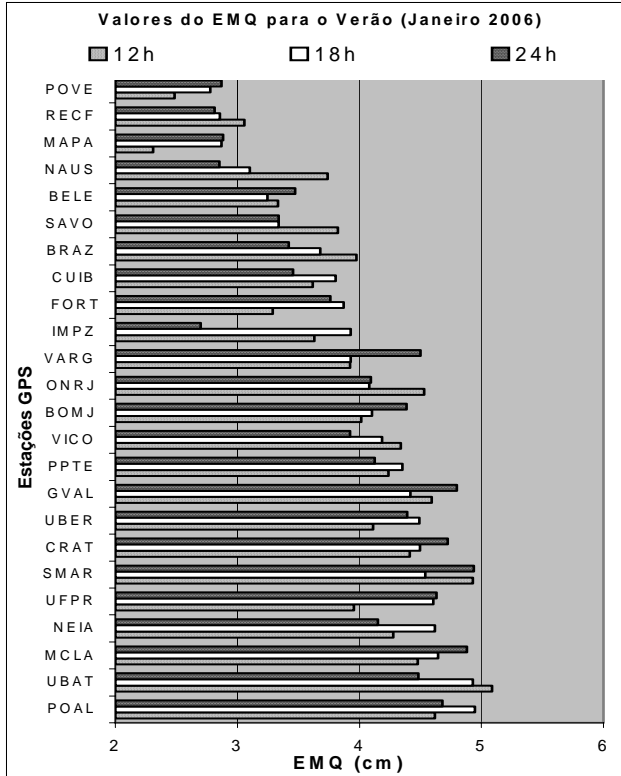
Um outro fato que merece ser destacados nos resultados apresentados nas figuras 4 e 5 está relacionado à qualidade em função do tempo em que as previsões se referem. Como as previsões de 12 horas estão mais próximas da condição inicial do que as previsões de 24, espera-se que essas sejam de melhor qualidade. No entanto, observa-se que em algumas estações isso não ocorre, como é o caso de NAUS e IMPZ no verão (figura 4) e VICO e BELE no inverno (figura 5), entre outros. Nessas estações observa-se um comportamento contrário com valores do EMQ decrescentes com relação ao tempo de previsão. Há alguns casos onde se observa não um comportamento crescente ou decrescente, mas sim uma oscilação dos valores do EMQ, como é o caso de SMAR no verão e MAPA no inverno. Esse comportamento é devido ao fenômeno conhecido na PNT como “*spinup*”, no qual se observa que em algumas regiões o modelo apresenta um baixo desempenho nas primeiras horas de previsão (6, 12 ou 18) o qual é melhorado após as 24 horas de integração. Metodologias para minimizar efeitos do *spinup* na qualidade final da previsão do tempo tem sido atualmente objeto de pesquisa nos centros de previsão.

Na análise de qualidade da versão GLB100km, apresentada por SAPUCCI et al., (2006), observou-se que as 8 estações da RBMC avaliadas podiam ser divididas em três grupos, ao considerar como critério para isso os valores do EMQ na janela válida. O primeiro grupo era composto por estações onde o EMQ era menor que 4cm (estações: CUIB, CRAT e RECF), o segundo para valores entre 4 e 7cm (UEPP, BOMJ, POAL) e o terceiro para valores maiores que 7cm (BRAZ e PARA). Como observados nas figuras 4 e 5, com a nova versão as estações pertencentes a esse primeiro grupo continuam com valores menores que 4cm, enquanto que os demais grupos há uma redução do EMQ para valores inferiores à 5cm. Uma exceção é observada nas previsões de 24h na estação POAL, onde o EMQ foi de 5,1cm. Como já discutido anteriormente a melhoria mais significativa foi observado nas estações do terceiro grupo. Esses resultados evidenciam a melhoria da qualidade obtida com a versão ETA20km ao comparar com a anterior GLB100km.

Outras avaliações estão em fase de desenvolvimento dentro do contexto das aplicações em posicionamento geodésico, como estações GNSS Virtuais (VRS) e RTK em rede. Esses estudos visam mostrar que a nova versão das previsões do *ZTD* é potencialmente capaz de gerar resultados melhores do que os apresentados em

ALVES et al., (2007) e DALBELO et al, (2007), os quais utilizaram, para esses fins, as previsões geradas com o uso do modelo GLB100km.

Figura 4 - Valores do EMQ para as previsões do ZTD de 12h, 18h e 24h em função das estações GPS utilizadas na avaliação para o verão (janeiro de 2006).

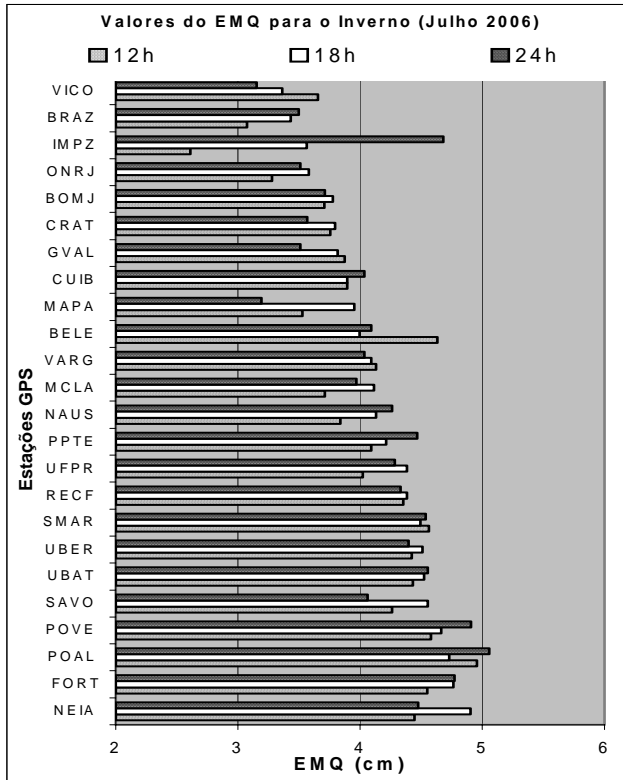


5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma avaliação das previsões do ZTD obtidas com o emprego do modelo regional de PNT do CPTEC/INPE, denominado Eta o qual tem resolução horizontal de 20km. As diferenças mais significativas com relação à versão anterior, que empregava o modelo global com resolução de 100km, são apresentadas bem como algumas facilidades disponíveis aos usuários dessa nova versão. Na comparação com as estimativas obtidas a partir dos dados GPS de 24 estações da RBMC mostrou-se que independente das estações sazonais o viés é praticamente nulo e os valores do EMQ estão em torno de 3 a 5 cm. Um resultado bastante significativo obtido nessa avaliação foi observado nas estações localizadas

em Brasília e Curitiba, nas quais os valores do viés diminuíram significativamente com relação à versão anterior que utilizava o modelo global. O motivo principal dessa diminuição é a resolução horizontal dessa nova versão disponível. Em consequência disso foi observada uma melhoria na qualidade final das previsões nessas estações GPS de 50% e 55%, respectivamente.

Figura 5 - Valores do EMQ para as previsões do ZTD de 12h, 18h e 24h em função das estações GPS utilizadas na avaliação para o inverno (julho de 2006).



Em um estudo similar a esse, JUPP et al. (2003) utilizando um modelo regional com resolução espacial de 15x15km, cujo domínio cobria parte do continente europeu, reportou valores do EMQ na ordem de 1,5 cm. Os valores aqui apresentados são maiores que os reportados por JUPP et al. (2003) devido à diferença na densidade de observações atmosféricas disponíveis nas regiões

avaliadas. Enquanto que na Europa, América do Norte e Ásia a densidade de sensores atmosféricos é alta, na América do Sul, bem como grande parte do hemisfério sul, a rede de coleta de dados atmosféricos é ainda deficitária, apesar do grande investimento do governo brasileiro nos últimos anos visando minimizar esse problema. Por outro lado, os sistemas de observação em bases espaciais têm sido uma ótima fonte de informações sobre o hemisfério sul e com os investimentos em pesquisas, ocorrida nos últimos anos, observa-se uma melhoria na qualidade de tais observações. Associado a isso, diversas pesquisas mostram que com a inclusão de valores do ZTD, provenientes de redes GNSS ativas, na PNT há uma melhoria do desempenho do modelo para as aplicações em correções dos efeitos da troposfera na propagação de sinais de radiofrequência (JENSEN, 2003; AHN et al., 2006). Está em fase de implementação uma metodologia para assimilação de estimativas do ZTD provenientes da RBMC no sistema de assimilação de dados do CPTEC, visando minimizar a deficiência de dados sobre a América do Sul. Com a efetivação desses processos e com a evolução de novos sistemas de assimilação de dados, em desenvolvimento no CPTEC/INPE, as perspectivas para obtenção de previsões do ZTD de melhor qualidade em um futuro próximo são muito boas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, YW, LACHAPPELLE, G.; SKONE, S.; GUTMAN, S.; SAHM, S. *Analysis of GPS RTK performance using external NOAA tropospheric corrections integrated with a multiple reference station approach*. *GPS Solutions* 10(3): 171-186, 2006.
- ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. *Evaluating the Performance of the CPTEC/INPE-FCT/UNESP Troposphere Dynamic Model Using the VRS Concept*. In: AGU Joint Assembly 2007, 2007, Acapulco, México. Proceedings of AGU Joint Assembly, 2007. v. 1. p. A53C-05.
- BLACK T. L. *The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples*. *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 256-278, 1994.
- CHOU, S. C.; TANAJURA, C.; XUE, Y.; NOBRE, C. *Validation of the coupled Eta/SSiB model over South America*. *Journal of Geophysical Research*, v.107, n. D20, 8088, doi: 10.1029/2000JD000270, 2002.
- DALBELO, L. F. A.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. *ZTD Dynamic Modeling Versus Hopfield Model: Evaluation in DGPS Positioning*. In: AGU Joint Assembly 2007, 2007, Acapulco, México. Proceedings of AGU Joint Assembly, 2007. v. 1. p. A53C-06.
- IAG International Association of Geomorphologists. Working Group 4.3.3. *Numerical weather models for positioning*. 2008. A Joint Working Group with IAG Sub-Commissions 4.3 and 4.5. Disponível em: <http://www.hobiger.org/wg433/tiki-index.php> (acessado em 24/04/2008).

- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC)*. www.ibge.gov.br. Acessado em 10 de abril de 2008.
- GREGORIUS, T. *How it Works... GIPSY OASIS II*, Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996.
- 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, A.; HEALY, S.; POWE, M.; OWEN, J.; BUTCHER, J. *Use of Numerical Weather Prediction Fields for the Improvement of Tropospheric Corrections in Global Positioning Applications*. In: ION GPS/GNSS 2003 -16th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Portland, Oregon. 2003.
- KINTER, J.L. *et al The COLA Atmosphere- Biosphere General Circulation Model*. Volume 1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report n.o 51. Calverton, USA, 1997.
- MESINGER, F. *A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models*. Revista Meteorologia Aeronáutica, v.44, p.195-202, 1984.
- 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.
- RICHARDSON, L. F. 1922: *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge University Press, London.
- SAPUCCI, L. F., MACHADO, L. A. T., MONICO, J. F. G. *Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade* Revista Brasileira de Cartografia No 58. V. 3, p. 279-292, 2006.

(Recebido em 05/08. Aceito em dezembro/08)