

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/3: 691-704
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS TROPOSFÉRICOS DE PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO NO POSICIONAMENTO EM REDES

*Evaluation of Different Numerical Weather Prediction Tropospheric Models for
Networks Positioning*

**Adéliton da Fonseca de Oliveira¹; Daniele Barroca Marra Alves²
& Luiz Danilo Damasceno Ferreira³**

¹Instituto Federal Baiano – IF Baiano
Campus Uruçuca / Núcleo de Agrimensura - NUGRI
R. Dr. João Firmino Nascimento S/N, CEP: 45680-000 – Uruçuca – BA
adeliton.oliveira@urucuca.ifbaiano.edu.br

²Universidade Estadual Paulista – UNESP
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, Caixa Postal 467, CEP: 19060-900, Presidente Prudente, SP
danibarroca@fct.unesp.br

³Universidade Federal do Paraná – UFPR
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Centro Politécnico, Jardim das Américas, Caixa Postal 19001, CEP: 81531-980, Curitiba, PR
luizdanilo@ufpr.br

Recebido em 28 de Janeiro, 2014/ Aceito em 10 de Maio, 2014
Received on January 28, 2014/ Accepted on May 10, 2014

RESUMO

Nos tempos atuais, os avanços tecnológicos na área de Geodésia têm possibilitado ao usuário a aplicação de novos métodos com o emprego do posicionamento por constelações de satélites artificiais, como o GPS (*Global Positioning System*) e obtenção de alta acurácia em levantamentos de campo. Um dos métodos amplamente utilizados pela comunidade científica é o posicionamento baseado em redes de estações de referência. O uso de dados de múltiplas estações de referência além de permitir ao usuário obtenção de acurácia a nível centimétrico nas coordenadas finais, viabiliza a realização de estudos sobre a modelagem atmosférica (refração troposférica e efeito ionosférico) na região da rede. Existem diversos métodos de transmissão das correções geradas pela rede ao usuário, dentre as formas de transmissão destaca-se o conceito de *Virtual Reference Station* (VRS). No conceito de VRS, dados de uma estação de referência que não existe fisicamente são gerados nas proximidades do receptor móvel (usuário). Nesse artigo é descrito uma metodologia para geração de dados da VRS com diferentes modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT). Foram realizados testes comparativos nas quatro estações do ano com o modelo troposférico regional de PNT/INPE (Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais) e modelo global de PNT/ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*). Além disso, a função de mapeamento VMF1 (*Vienna Mapping Function 1*) foi implementada e testada para os diferentes modelos citados. Na análise de qualidade dos dados da VRS, o método PPP (Posicionamento por Ponto

Preciso) proporcionou resultados satisfatórios nos modos estático e cinemático. O modelo de PNT/INPE apresentou em média melhoria de 29,7% e 31,7% em relação a PNT/ECMWF para dias secos e úmidos, respectivamente.

Palavras chaves: Modelos Troposféricos, VRS, PNT/INPE, PNT/ECMWF, VMF1.

ABSTRACT

In the past few times technological advances in geodesy area have enabled its use in a great applications positioning satellite constellations news methods, as GPS (Global Position System) and improved with the goal of obtaining high accuracy. One of the methods that has been applied by the scientific community is the network based on positioning. Using multiple reference station data it is possible to obtain centimetric positioning final coordinates, it is possible to model the atmospheric effects (troposphere refraction and ionosphere effect) in a network of region. There are several methods to the transmission of the network corrections to the users of high performance is the Virtual Reference Station (VRS) concept. Using the VRS concept data from a base station that does not physically exist are generated near to the user. In this paper it is described the methodology applied to generate VRS data, using different tropospheric models. Thus, comparative tests were conducted in the four seasons with the NWP/INPE (Numerical Weather Prediction/ National Institute for Space Research) and NWP/ECMWF tropospheric models. VMF1 mapping function was implemented and tested for the different mentioned models. In order to analyse the VRS data quality it was used the Precise Point Positioning (PPP) method, where satisfactory results were found. The NWP/INPE model showed an average improvement of 29,7% and 31,7% compared to NWP/ECMWF models for the hydrostatic and wet days, respectively.

Keywords: Tropospheric Models, VRS, PNT/INPE, PNT/ECMWF, VMF1.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, as inovações tecnológicas nos métodos de posicionamento tem proporcionado a aplicação de novas metodologias e, conseqüentemente a obtenção de alta acurácia e produtividade nos levantamentos geodésicos. Dentre os métodos de posicionamento empregados com dados GPS, destaca-se a técnica RTK (*Real Time Kinematic*) para aplicações em tempo real. Para aplicação deste método na prática são empregados dois receptores, um deles denominado base, fica posicionado em um ponto de coordenadas conhecidas enviando correções diferenciais via link de rádio, internet ou outro meio de comunicação para outro receptor, denominado estação móvel (*rover*), que determina as coordenadas geodésicas dos pontos de interesse.

Quando o receptor base encontra-se próximo ao receptor móvel, existe uma alta correlação dos erros ionosféricos, troposféricos e erro de órbita dos satélites. Porém, à medida que as estações se distanciam entre si, os efeitos sistemáticos supracitados atuam sobre a estação móvel degradando a posição da mesma (KRUEGER, 1996; LEICK, 2004; PRADO e KRUEGER, 2003; RAMOS, 2007; ALVES, 2008; MONICO, 2008).

A metodologia RTK torna-se inviável para linhas de base longas, ficando limitada em torno de 20 km ou até menos, se as condições ionosféricas não forem favoráveis (RIZOS, 2003). Neste sentido, o uso de redes de estações de referência tem sido uma alternativa para minimizar a influência dos erros sistemáticos existentes e melhorar a acurácia do posicionamento em relação ao RTK. Além disso, a área de abrangência da rede é ampliada, expandindo a área de atuação do usuário (ALVES, 2008; LACHAPELLE e ALVES, 2002).

Neste artigo, é descrito e investigado a aplicação de diferentes modelos troposféricos de previsão numérica de tempo (PNT) no posicionamento em redes, empregando o conceito de estação virtual. Além disso, consideraram-se períodos críticos (seco e úmido) ao longo das quatro estações do ano, critério adotado para escolha dos dados da rede GNSS/SP (*Global Navigation Satellite System / São Paulo*). É importante destacar que os experimentos deste artigo foram realizados no modo pós-processado, simulando uma aplicação em tempo real. Além disso, os dados gerados para as estações virtuais foram avaliados com o método de posicionamento por ponto. Os modelos troposféricos utilizados foram o regional de PNT disponibilizado pelo

CPTEC/INPE e o global de PNT disponibilizado pelo ECMWF. Aspectos teóricos, resultados e análises seguem nas próximas seções.

2. POSICIONAMENTO BASEADO EM REDE

Atualmente, com a implantação de redes de estações de referência, várias técnicas de posicionamento vêm sendo desenvolvidas ou aprimoradas. Devido à busca de informações espaciais, diversos países têm empregado dados de múltiplas estações de referência, como por exemplo, a rede SAPOS da Alemanha (SEEBER, 2003; SEJAS, 2003). A principal vantagem deste método é a possibilidade de ampliar a distância entre as estações da rede e a posição do receptor móvel, além de proporcionar alta acurácia, disponibilidade e confiabilidade no posicionamento e na navegação (ALVES, AHN e LACHAPPELLE, 2003; ALVES, 2008).

A arquitetura de uma rede RTK compreende um conjunto de estações de referência GNSS, um ou mais sistemas de comunicação (rádio, internet e etc.) para coleta e envio de correções ao usuário e um centro de controle para gerenciamento dos

dados (AFONSO, 2006). Para a aplicação deste conceito, é necessário estabelecer comunicação entre as estações que compõe a rede e o usuário.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é quanto aos conceitos de transmissão de correções ao usuário. Dentre eles, destacam-se FKP/ACP (*Flächenkorrekturparameter/ Area Correction Parameters*) (EULER et al., 2001; SEEBER, 2003 e SOARES, 2005), MAC (*Master-Auxiliary Concept*) (EULER et al., 2001), RTX (*Real-Time Extended*) (CHEN et al., 2011 e LEANDRO et al., 2011) e a VRS (*Virtual Reference Station*) (LANDAU et al., 2002; SEJAS et al., 2003, ALVES, 2008; ALVES e MONICO, 2011). Dentre os conceitos aplicados na geração de correções diferenciais ao usuário, o de VRS é abordado neste artigo.

No Brasil, tem-se disponível as redes RBMC/RIBaC e, e a rede da região oeste de São Paulo, designada GNSS/SP.

Atualmente a rede RBMC/RIBaC (Figura 1) conta com 96 estações, sendo que 8 delas fazem parte do IGS e 53 transmitem dados em tempo real via internet (IBGE, 2013).



Figura 1 - Estações GNSS da RBMC/RIBaC.

Apesar das estações da RBMC/RIBaC estarem distribuídas ao longo dos estados brasileiros, a configuração e densidade das mesmas não permite realizar posicionamento centimétrico via RTK em rede, pois mesmo nas regiões mais densas o espaçamento entre as

estações ainda não é ideal (ALVES, 2008).

A rede ativa GNSS do Estado de São Paulo (Figura 2), denominada rede GNSS/SP, possui uma geometria e densificação que ainda não é ideal (as estações distam entre si de 100 a 300 km).

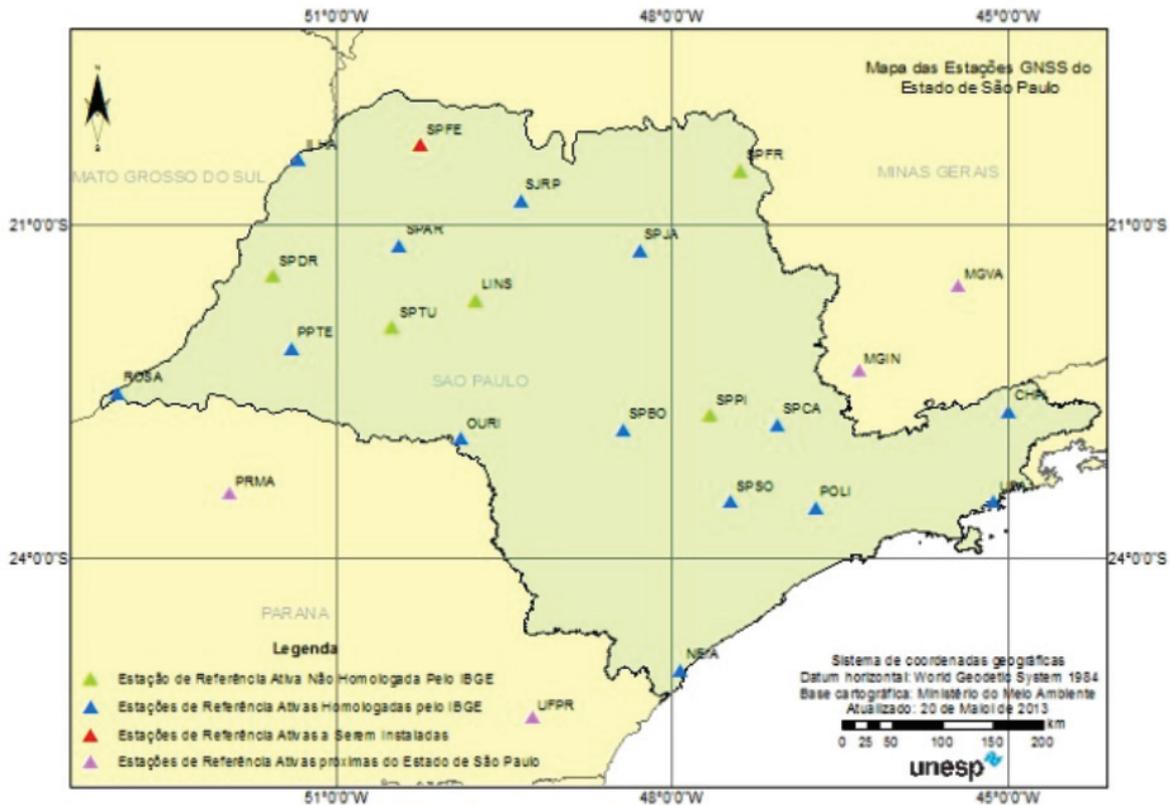


Figura 2 - Estações GNSS da rede GNSS/SP.

Dessa forma, essa rede encontra-se fora dos padrões especificados segundo Trimble (2010), para levantamentos com acurácia recomenda-se distâncias de 50 a 70 km entre as estações. Contudo, no país, essa rede é que apresenta a melhor configuração, o que possibilita a aplicação da metodologia RTK em rede.

3. VRS

Para aplicar o conceito de VRS na prática, dados GNSS da rede de referência são enviados continuamente via rede de comunicação para o computador central, no centro de controle. O computador central, munido de softwares específicos utiliza os dados coletados para modelar as principais fontes de erros sistemáticos que prejudicam a acurácia do posicionamento, além de gerar correções para esses erros (ZHANG e ROBERTS, 2003; HOFMANNWELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

É importante ressaltar que no processo de geração da VRS (Figura 3), o usuário deve enviar suas coordenadas aproximadas ao centro de controle, sendo que estas podem ser obtidas através do Posicionamento por Ponto (PP), com GPS de navegação.

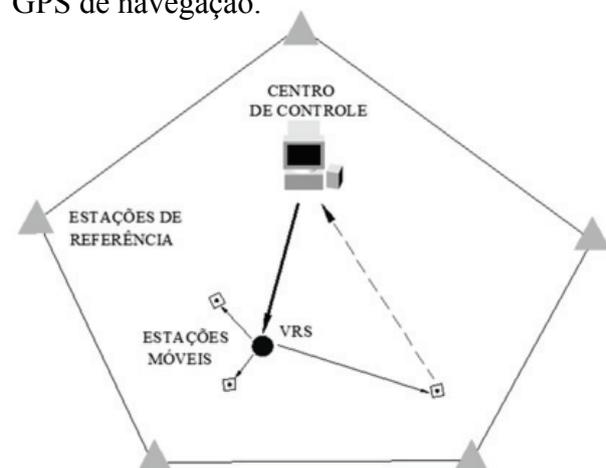


Figura 3 - Conceito de Estações Virtuais de Referência.

Dessa forma, o conceito de VRS consiste em gerar uma estação que não existe fisicamente, mas que simule uma estação de referência próxima ao receptor móvel (ZHANG e ROBERTS, 2003; ALVES, 2008). Assim o usuário utiliza os dados dessa estação como se ela fosse uma estação base real existente na sua proximidade.

4. MODELOS TROPOSFÉRICOS

Nesse artigo foram utilizados os modelos de PNT para troposfera disponibilizados pelo ECMWF (modelo global de PNT/ECMWF) e pelo CPTEC/INPE (modelo regional PNT/INPE). Sapucci et al., (2003) esclarece que o princípio de funcionamento dos modelos de PNT, denominado modelagem dinâmica, é bastante simples: conhecendo as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante t , desde que seja conhecido com precisão seu estado inicial no instante t_0 . Na modelagem dinâmica baseada em modelos de PNT, o atraso zenital total ZTD (*Zenithal Tropospheric Delay*) é dado em função da soma das componentes úmida ZWD (*Zenithal Wet Delay*), constituído basicamente pela quantidade de vapor d'água na atmosfera, e hidrostática ZHD (*Zenithal Hydrostatic Delay*), dada pela influência dos demais gases incluindo o vapor d'água.

Assim, tem-se que o atraso zenital é dado pela seguinte equação (SPILKER et al., 1996):

$$Z_{TD} = Z_{HD} + Z_{WD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k'_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh \quad (1)$$

Onde:

Z_{TD} é o atraso zenital total;

Z_{HD} é o atraso zenital na componente hidrostática;

Z_{WD} é o atraso zenital na componente úmida;

R_h é a constante específica para os gases hidrostáticos ($R_h = 287,0538$);

ρ é a densidade do ar;

h é a variação em função da altitude;

k_1 , k'_2 e k_3 são constantes da refratividade atmosférica ($k_1 = 77,60$, $k'_2 = 22,10$ e $k_3 = 373900$);

Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água.

Os arquivos binários fornecidos para previsões do ZTD (componentes ZWD e ZHD)

obtidos pelo modelo de PNT estão disponíveis na página do CPTEC/INPE (<http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>). O CPTEC disponibilizou a primeira versão do modelo dinâmico em 2004. Nesse modelo, os valores de ZWD e ZHD eram disponibilizados em uma malha de 500 por 500 km em um mapa para a América do Sul, onde cada elemento da malha possuía um arquivo binário dos dados cuja resolução era de 100 km na horizontal (denominado de GLB 100 km) e 18 níveis na vertical, com 66 horas de previsão. Posteriormente, em 2008 a versão inicial do modelo foi atualizada, e a resolução horizontal passou a ser de 20 km (denominado Eta 20 km) com 19 níveis verticais, com 72 horas de previsão do atraso zenital (SAPUCCI et al., 2008). Nesse artigo é empregado o modelo Eta 20km.

O ECMWF tem-se destacado no progresso de previsão numérica de tempo a nível global, sendo um dos principais centros no avanço da previsão meteorológica e de assimilação de dados do mundo. O modelo troposférico global determinístico ECMWF utiliza técnicas de modelagem computacional de PNT, de modo que os cálculos requerem a entrada contínua de dados meteorológicos, coletados tanto por satélites, quanto por observações em Terra, por meio de estações automáticas, aviões, navios e radiossondas.

A resolução do modelo pode ser obtida por pontos de grade, procedentes de uma malha (grid). Na versão atual do modelo, os parâmetros de PNT encontram-se na resolução de 0,25 x 0,25 grau com 21 níveis na vertical (TEKE et al., 2011).

Além disso, para obter os valores do atraso troposférico em uma determinada posição, uma interpolação bilinear deve ser realizada para a posição da estação utilizando os valores da grade.

5. FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DE VIENA

A VMF baseada em previsão numérica de tempo vem sendo amplamente utilizada pelas comunidades e tem gerado bons resultados. A VMF desenvolvida no ECMWF para as componentes úmida e hidrostática objetiva determinar os coeficientes k_1 e k_2 . Esses coeficientes possibilitam determinar o atraso troposférico para uma elevação inicial de 3,3 graus (BOEHM e SCHUM, 2004; KOUBA, 2007). Os coeficientes

e são determinados empiricamente a partir da IMF (*Isobaric Mapping Function*) com base em dados de radiossondas, enquanto o coeficiente é determinado pela técnica *ray-tracing*, em função da latitude e dia do ano usando o PNT. Os parâmetros de entrada do *ray-tracing* são o ângulo de elevação inicial, valores para altura, temperatura e pressão do vapor d'água em diferentes níveis da atmosfera neutra.

A VMF só depende do ângulo de elevação do satélite e não do azimute, ou seja, a troposfera é considerada simétrica ao redor das estações. Porém, os coeficientes *b* e *c* desenvolvidos para a VMF no ECMWF apresentaram certas deficiências para as regiões próximas ao Equador e latitudes elevadas. Devido a falhas no algoritmo, a VMF foi atualizada para a VMF1, com o desenvolvimento de novos coeficientes *b* e *c*, ajustados por mínimos quadrados (BOEHM *et al.*, 2006). Os valores da VMF1 e, são fornecidos em uma grade global de 2,5 x 2,0 graus, e em algumas regiões com resolução de 0,25 grau. Para cada parâmetro existem 4 arquivos por dia, o de 0, 6, 12 e 24 horas, armazenados em listas anuais (disponível em: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/>).

6. METODOLOGIA

Os experimentos apresentados nesse artigo estão baseados na metodologia desenvolvida por ALVES (2008), que consiste em gerar dados de VRS sem solucionar as ambiguidades da rede. A etapa de geração da VRS sem solucionar as ambiguidades é uma metodologia diferenciada que apresentou resultados satisfatórios, conforme publicado em Alves e Monico (2011).

A estação de referência mais próxima à VRS é escolhida como estação base. Posteriormente, com os dados da estação base são gerados os dados da VRS, por meio do deslocamento geométrico (DG).

Inicialmente é necessário estabelecer a estação base da rede, para isso são determinadas as distâncias entre a VRS e todas as estações que compõe a rede. Dentre as estações da rede utilizadas na geração dos dados da VRS, a estação SPAR (Araçatuba) foi designada estação base nesse artigo. Em contrapartida, os dados da VRS foram gerados na posição da estação PPTE (Presidente Prudente).

A Tabela 1 mostra as distâncias entre as estações da rede GNSS/SP empregados nos experimentos e a posição da VRS.

Tabela 1: Distâncias entre as estações da rede GNSS/SP e a posição da VRS (PPTE)

ESTAÇÕES	DISTÂNCIA (km)
SPAR	144
OURI	181
ROSA	165
ILHA	187
SJRP	258

Um software científico desenvolvido em ambiente C++, denominado VRS UNESP, capaz de gerenciar dados da rede de estações de referência e gerar dados de VRS no modo pós-processado utilizando modelos atmosféricos foi utilizado para geração dos dados das VRSs nesse artigo.

No software VRS-UNESP encontrava-se implementado o modelo dinâmico de PNT/INPE. Testes iniciais foram realizados com os modelos para troposfera, que podem ser vistos mais detalhadamente em Alves (2008) e Alves et al., (2009). Assim, foi incorporada no software uma rotina com o modelo de PNT/ECMWF e a função de mapeamento VMF1. A implementação da VMF1 e o modelo PNT/ECMWF (Figura 4) foi introduzida no sistema desenvolvido por Alves (2008).

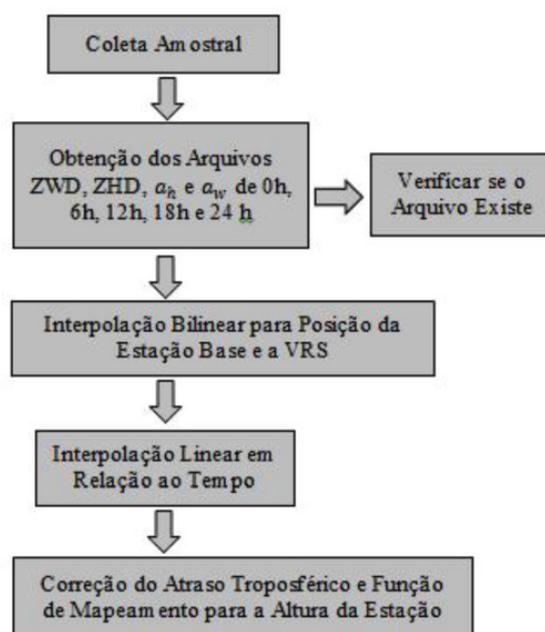


Figura 4 - Etapas de implementação da VMF1 e o modelo de PNT/ECMWF em ambiente C++.

Posteriormente, são geradas correções atmosféricas para a posição da estação base e para a posição da VRS, assim são calculadas a diferença do efeito troposférico e a diferença do efeito ionosférico entre as posições. O foco desse artigo são as correções troposféricas, as quais foram determinadas a partir dos modelos de PNT/INPE e PNT/ECMWF.

No final do processo, após aplicar todas as correções da estação base, um arquivo RINEX é gerado, para que o usuário efetue posicionamento relativo no modo pós-processado, utilizando a VRS como estação de referência no apoio a levantamentos geodésicos.

Para usar os dados da VMF1 e PNT/ECMWF é necessário adquirir os arquivos contendo os coeficientes *ah* e *aw* e os atrasos ZHD e ZWD dispostos em 5 arquivos diários de 0h, 6h, 12h, 18h e 24h. A figura 5 mostra o formato do arquivo utilizado na interpolação dos coeficientes *ah* e *aw* e os atrasos ZHD e ZWD.

```
! Version: 1.0
! Source: J. Boehm, TU Vienna (created:
! Data_types: VMF1 (lat lon ah aw zhd zwd)
! Epoch: 2011 01 08 00 00 0.0
! Scale_factor: 1.e+00
! Range/resolution: -90 90 0 360 2 2.5
! Comment: http://gqosatm.hq.tuwien.ac.at
90.0 0.0 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 2.5 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 5.0 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 7.5 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 10.0 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 12.5 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 15.0 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 17.5 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 20.0 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
90.0 22.5 0.00116781 0.00052867 2.3500 0.0208
```

Figura 5 - Formato do arquivo contendo os coeficientes e o atraso troposférico.

Os dados amostrais (arquivos RINEX, com 24 horas de observação) selecionados em períodos úmidos foram referentes aos dias do ano 08, 33, 45, 58, 77, 105, 106, 116, 117, 146, 199, 200, 202, 204, 222, 252, 254, 258, 259 e 315. Já em períodos secos os dados RINEX foram para os dias do ano 14, 15, 43, 71, 73, 122, 123, 138, 152, 157, 195, 196, 244, 245, 248, 256, 306, 307, 308 e 314. Posteriormente, foi verificada a qualidade da VRS gerada utilizando os métodos de Posicionamento Absoluto, especificamente

o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) estático e cinemático.

Para isso, foi utilizado o software CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System*) disponibilizado online pelo NRCan (*Natural Resources Canada*). Na Tabela 2 são mostradas as siglas empregadas para caracterizar os diferentes modos das VRSs.

Tabela 2: Significado das siglas para os diferentes modos de VRS

Siglas	Modo de Processamento
ARQUIVO REAL	Dados reais da estação PPTE
PNT/INPE + VMF1	VRS gerada com o modelo de PNT/INPE e a função de mapeamento VMF1
PNT/ECMWF + VMF1	VRS gerada com o modelo de PNT/ECMWF e a função de mapeamento VMF1

Os dados das VRSs foram gerados na posição da estação PPTE. Deste modo, espere-se que os dados gerados para as VRSs sejam semelhantes aos dados da estação PPTE (arquivo real). Os resultados são apresentados em termos de EMQ (Erro Médio Quadrático), onde foi comparada a coordenada de referência da estação com a coordenada obtida.

7. RESULTADOS E ANÁLISES

Para verificar a qualidade dos dados das VRSs geradas, conforme descrito na seção 6, foi realizado o PPP no modo estático e cinemático para os dados amostrais representando as quatro estações do ano.

7.1 Estação Verão

As Figuras 6 e 7 apresentam o EMQ da resultante 3D obtido com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas em dias úmidos e secos na estação verão, respectivamente.

Analisando a Figura 6 é possível observar a melhoria alcançada pela VRS gerada com o modo PNT/INPE+VMF1 em comparação com o modo PNT/ECMWF+VMF1 para dias úmidos. O EMQ que em média era 3,22 cm passou para 2,42 cm (em média melhoria de 24,8%) com aplicação de PNT/INPE.

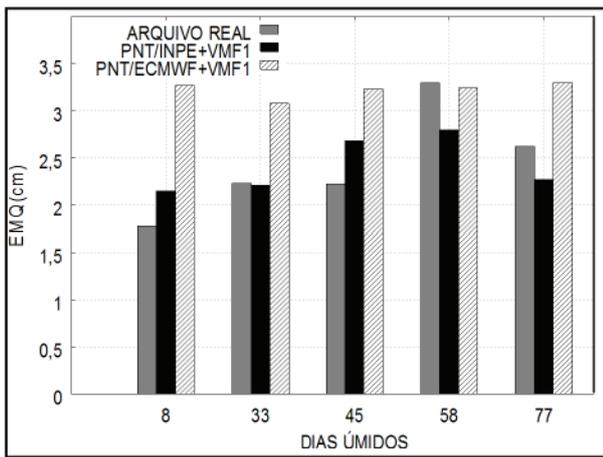


Figura 6 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias úmidos no período de verão.

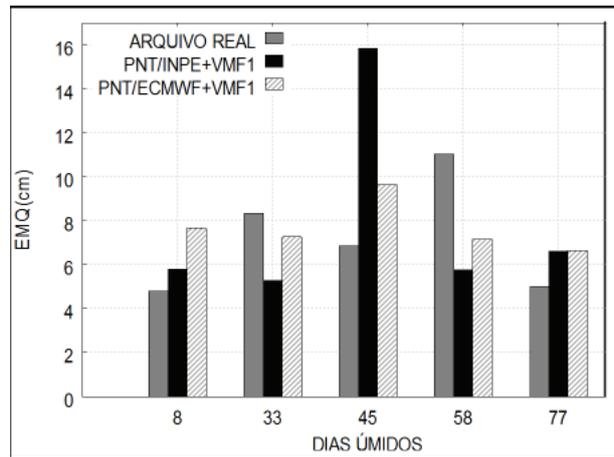


Figura 8 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias úmidos no período de verão.

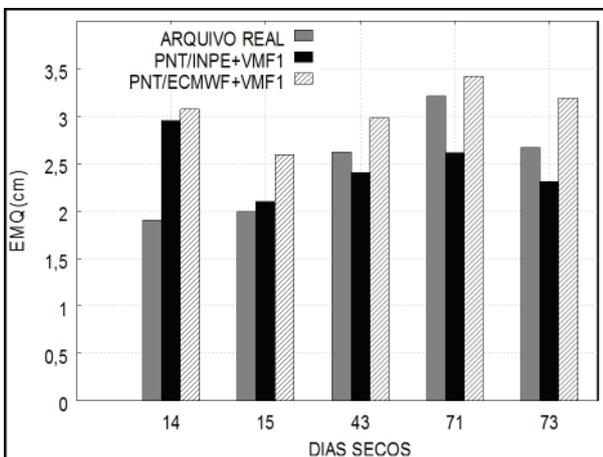


Figura 7 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias secos no período de verão.

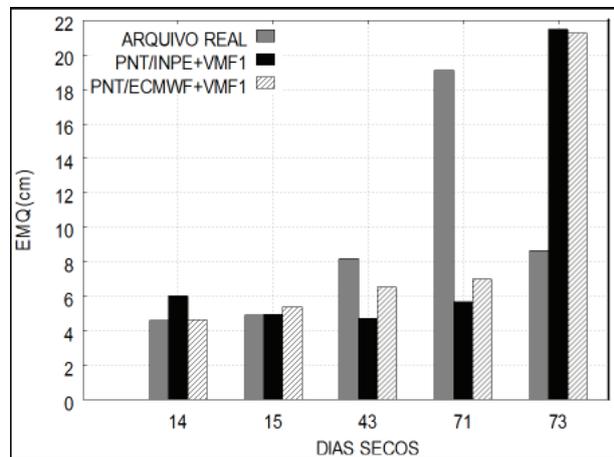


Figura 9 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias secos no período de verão.

Já para dias secos na Figura 7, percebe-se que os melhores resultados também foram obtidos com PNT/INPE+VMF1. O EMQ médio obtido foi de 2,47 cm, o que representa uma melhoria de 19% com uso de PNT/INPE ao invés de do modelo global PNT/ECMWF.

As Figuras 8 e 9 apresentam o EMQ da resultante 3D para o PPP no modo cinemático.

Observando a Figura 8 pode-se notar que da mesma forma que no modo estático, a VRS gerada pelo modo PNT/INPE+VMF1 em média apresentou melhores resultados. As diferenças encontradas são da ordem 0,1 cm (melhoria de 1,3%) em relação a PNT/ECMWF+VMF1.

Com base nos dados da Figura 9, para os dias secos o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou em média melhoria da ordem de 0,4 cm (melhoria

de 4,4%) em relação a PNT/ECMWF+VMF1. É possível notar que para o dia 73 as discrepâncias entre os modelos foi maior (aproximadamente 21,4 cm) que os demais dias amostrais.

Nota-se que os valores obtidos pelos modelos estão compatíveis com os obtidos pelo arquivo real.

7.2 Estação Outono

As Figuras 10 e 11 apresentam o EMQ da resultante 3D obtido com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas para a estação outono em dias úmidos e secos, respectivamente.

De acordo com a Figura 10, é possível observar que a VRS gerada com o modelo PNT/INPE apresentou melhor desempenho que o modo PNT/ECMWF. A melhoria alcançada com

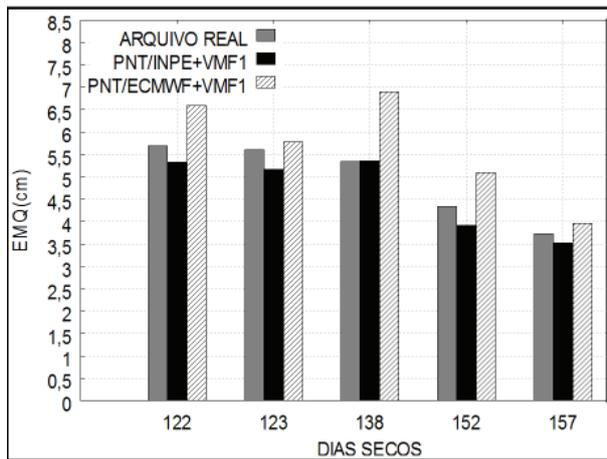


Figura 10 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias úmidos no período de outono.

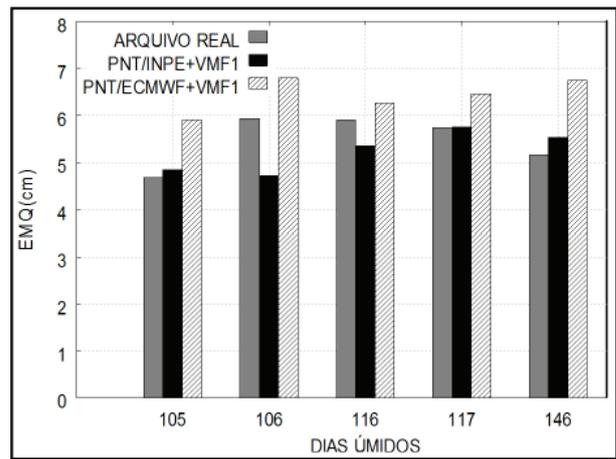


Figura 12 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias úmidos no outono.

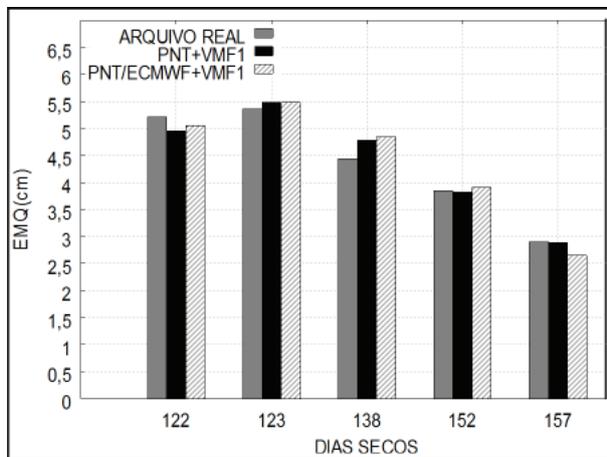


Figura 11 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias secos no período de outono.

uso do modelo regional de PNT/INPE é de 6,8% em comparação com PNT/ECMWF.

Avaliando os dados da Figura 11, é possível notar que para dias secos os resultados obtidos pelas VRSs são similares entre si, o EMQ médio obtido é de 4,4 cm para ambos os modos.

As Figuras 12 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas para a estação outono em dias úmidos.

Já a Figura 13 apresenta o EMQ médio da resultante 3D obtido com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas em períodos secos.

Com base nos dados da Figura 12 é possível observar que da mesma forma que no modo estático, a VRS gerada pelo modo PNT/

INPE+VMF1 para dias úmidos apresentou melhorias em todas as amostras avaliadas. As melhorias encontradas com PNT/INPE+VMF1 foram de 18,1% em comparação com PNT/ECMWF+VMF1. É possível notar que para o dia 117, as discrepâncias para os modos foram similares entre si, discrepâncias de 5,76cm foram encontradas.

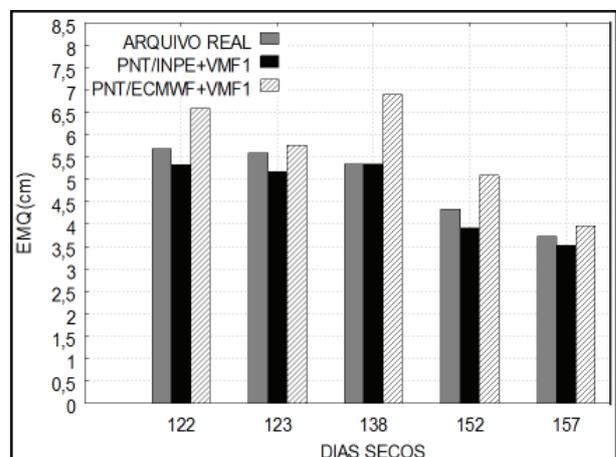


Figura 13 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias secos no período de outono.

Analisando os dados da Figura 13, para dias secos o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou em média melhoria da ordem de 1 cm (melhoria de 17,5%) em relação a PNT/ECMWF+VMF1. Verificou-se que para o dia 138 o modo PNT/ECMWF+VMF1 apresentou discrepâncias de 6,90 cm.

7.3 Estação Inverno

As Figuras 14 e 15 apresentam o EMQ da resultante 3D obtido com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas para a estação inverno em dias úmidos e secos, respectivamente.

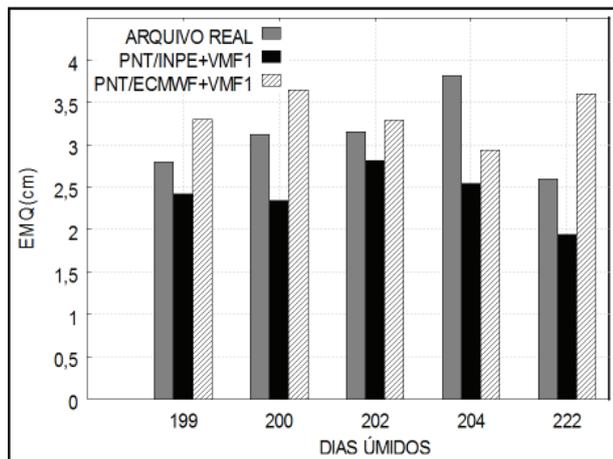


Figura 14 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias úmidos no período de inverno.

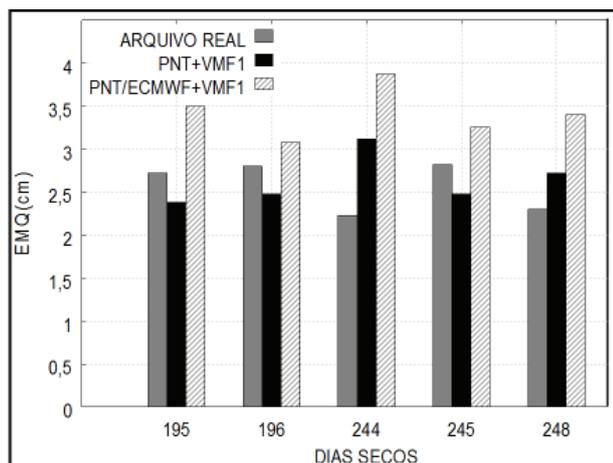


Figura 15 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias secos no período de inverno.

Avaliando a Figura 14 pode-se observar que em dias úmidos o EMQ médio das VRSs geradas no modo PNT/INPE+VMF1 apresentaram melhor desempenho. O EMQ médio que era de 3,4 cm passou para 2,41 cm com PNT/INPE+VMF1, o que representa uma melhoria de 29,1% com aplicação de PNT/INPE.

Para dias secos verifica-se na Figura 15 que o modo PNT/INPE+VMF1 também apresentou melhores resultados. O modo PNT/INPE+VMF1 mostrou melhor desempenho (EMQ médio de

2,60 cm), o que representou uma melhoria de 23,5% em relação ao modelo de PNTECMWF.

As Figuras 16 e 17 apresentam o EMQ da resultante 3D obtido para estação inverno em dias úmidos e secos, respectivamente.

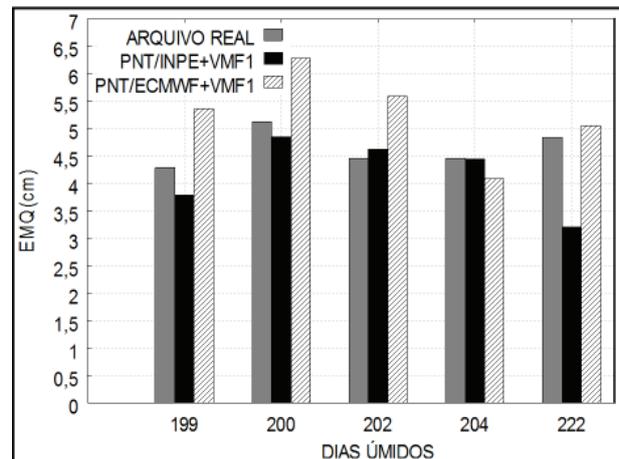


Figura 16 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias úmidos no inverno.

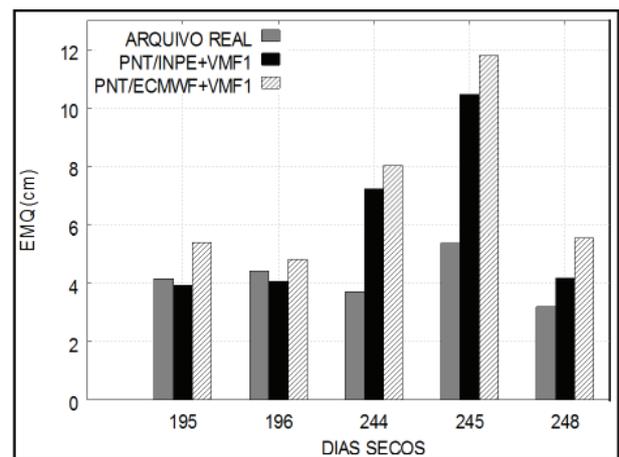


Figura 17 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias secos no inverno.

Observando a Figura 16 pode-se perceber que a magnitude do erro no modo PNT/ECMWF+VMF1 é maior se comparado ao modo PNT/INPE+VMF1. Além disso, pode-se perceber que com a aplicação da VRS gerada no modo PNT/INPE+VMF1 melhoria alcançada é de 20,7% (melhoria de 1,1 cm) em relação ao modo PNT/ECMWF+VMF1.

Em períodos secos na Figura 17, pode-se perceber que, como esperado, a magnitude do EMQ é maior para o modo cinemático. No entanto, com respeito a qualidade da VRS

gerada, as mesmas conclusões tomadas para o modo estático podem ser observadas para o cinemático.

O EMQ que em média era de 7,1 cm passou para 5,9 cm (melhoria de 16,9%) com a aplicação de PNT/INPE+VMF1.

7.4 Estação Primavera

As Figuras 18 e 19 apresentam o EMQ da resultante 3D para o arquivo real (Estação PPTE) e as VRSs geradas para a estação primavera.

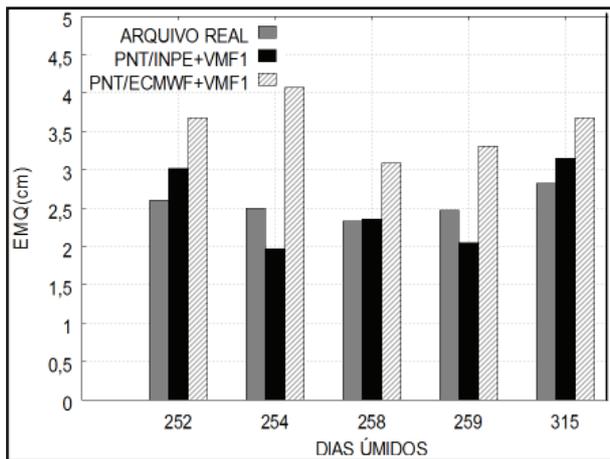


Figura 18 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias úmidos na primavera.

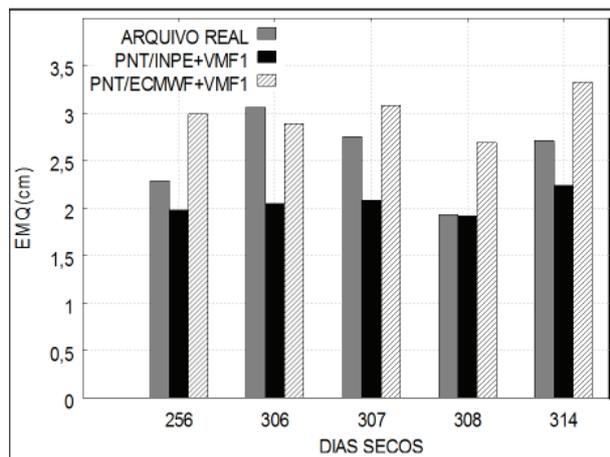


Figura 19 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo estático em dias secos na primavera.

Analisando a Figura 18 percebe-se que em dias úmidos, os modos PNT/INPE+VMF1 e PNT/ECMWF+VMF1 são similares para o dia

308. No entanto, com a aplicação do modo PNT/INPE+NIELL o EMQ que em média era 3,57 cm passou para 2,51 cm. Além disso, melhorias de 29,7% são obtidas com emprego de PNT/INPE+VMF1 ao invés do modelo global PNT/ECMWF.

Já em relação a períodos secos de acordo com os dados da Figura 07, na resultante 3D também é possível notar que o modo PNT/INPE+VMF1 é melhor nas ocasiões observadas. A melhoria com emprego de PNT/INPE+VMF1 é de 31,7% (em média melhoria de 0,95 cm) com relação ao modelo PNT/ECMWF.

As Figuras 20 e 21 apresentam o EMQ da resultante 3D no modo cinemático para o arquivo real e as VRSs geradas para a estação primavera.

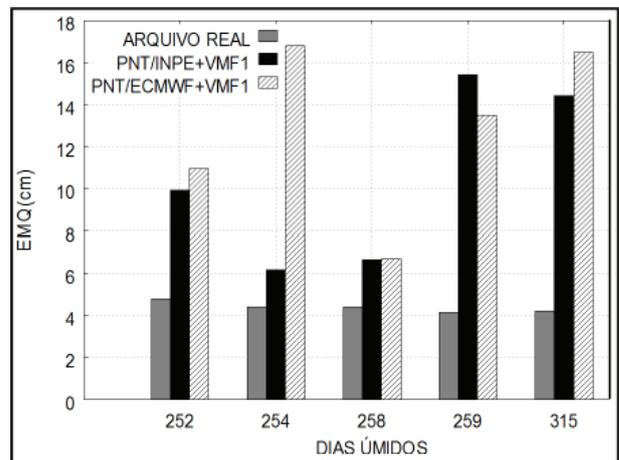


Figura 20 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias úmidos na primavera.

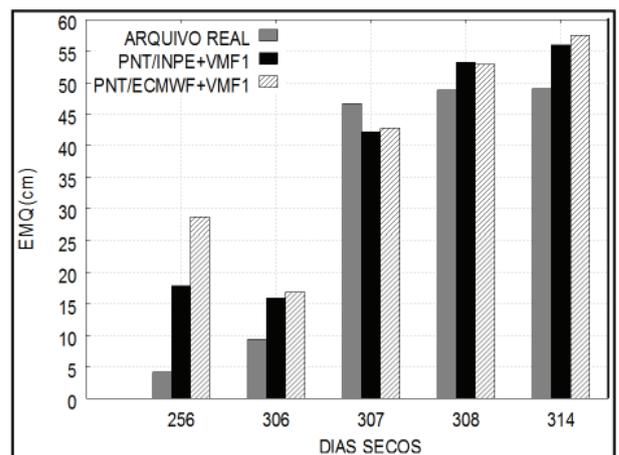


Figura 21 - EMQ obtido para a resultante 3D com o PPP no modo cinemático em dias úmidos na primavera.

Observando a Figura 20 pode-se perceber que, como esperado, a magnitude do EMQ é maior para o modo cinemático. Nota-se que em média o modo PNT/INPE+VMF1 é 20,3% melhor que PNT/ECMWF.

Além disso, percebe-se que de acordo com a Figura 21, o modo PNT/INPE apresentou-se discretamente melhor que PNT/ECMWF. A melhoria obtida foi de 6,8% com uso de PNT/INPE.

7.5 Algumas Considerações

Nesta seção, o objetivo é sumarizar os modelos de PNT/INPE e PNT/ECMWF na geração de dados da VRS entre as estações do ano. A Tabela 3 mostra as discrepâncias encontradas entre os modelos PNT/INPE em relação ao modelo global de PNT/ECMWF. Nessa tabela estão representadas as diferenças dos valores médios de EMQ obtidos com PNT/INPE e PNT/EMWF.

Tabela 3: Variações entre os modelos de PNT/ECMEF e PNT/INPE em dias úmidos e secos

MÉTODO DE POSICIONAMENTO	MODO	ESTAÇÃO DO ANO	PNT/ECMWF em relação a PNT/INPE (Dias Úmidos)	PNT/ECMWF em relação a PNT/INPE (Dias Secos)
PPP	ESTÁTICO	VERÃO	Melhoria de 24,8% (0,8 cm)	Melhoria de 19% (0,6 cm)
	CINEMÁTICO	VERÃO	Piora de 1,3% (-0,1 cm)	Melhoria de 4,4% (0,4 cm)
PPP	ESTÁTICO	OUTONO	Melhoria de 6,8% (0,3 cm)	similares
	CINEMÁTICO	OUTONO	Melhoria de 18,1% (1,2 cm)	Melhoria de 17,5% (1 cm)
PPP	ESTÁTICO	INVERNO	Melhoria de 29,1% (1 cm)	Melhoria de 23,5% (0,8 cm)
	CINEMÁTICO	INVERNO	Melhoria de 20,7% (1,1 cm)	Melhoria de 16,9% (1,2 cm)
PPP	ESTÁTICO	PRIMAVERA	Melhoria de 29,7% (1,1 cm)	Melhoria de 31,7% (0,9 cm)
	CINEMÁTICO	PRIMAVERA	Melhoria de 20,3% (2,4 cm)	Melhoria de 6,8% (2,7 cm)

Na avaliação dos modelos troposféricos em períodos úmidos verifica-se que o modelo de PNT/INPE foi melhor que o de PNT/ECMWF em 7 ocasiões das 8 avaliadas. Na estação verão a melhoria alcançada com PNT/INPE foi de 24,8%, e na estação primavera de 29,7%. Nas estações outono e inverno, as melhorias alcançadas com PNT/INPE foram de 6,8% e 29,1%, respectivamente. No posicionamento cinemático pode-se perceber que o EMQ é maior, onde as coordenadas são obtidas época por época. Entretanto, mesmo nesse tipo de posicionamento a VRS gerada apresentou resultados satisfatórios.

Em períodos secos, o modelo de PNT/INPE mostrou-se eficiente em todas as estações do ano, exceto para a estação outono, onde os modelos apresentaram resultados similares. Nas estações verão e inverno as diferenças alcançadas com PNT/INPE em relação a PNT/ECMWF são

de 19% e 23,5%, respectivamente.

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para geração de dados de VRS utilizando modelos para correção do atraso troposférico. A aplicação dessa metodologia pode propiciar resultados com acuracidade na ordem centimétrica para diversas aplicações, como por exemplo, posicionamento em locais com obstáculos naturais (árvores e terrenos montanhosos), navegação terrestre, agricultura de precisão e aplicação em georreferenciamento de imóveis rurais.

Ademais, os resultados encontrados foram promissores, os EMQs calculados atingiram discrepâncias centimétricas. Uma descrição detalhada sobre os experimentos realizados podem ser encontrados em Oliveira (2013).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com recursos financeiros da CAPES mediante atribuição da bolsa de mestrado ao primeiro autor. Ademais, agradecemos ao PPGCG (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) e o LGE (Laboratório de Geodésia Espacial) da FCT/UNESP pelo fornecimento dos dados e assistência no desenvolvimento desta pesquisa. A segunda autora também agradece ao CNPq (bolsa PQ e projeto universal - processo 470112/2012-3) e à FAPESP (projeto regular - processo 2012/19906-7) pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, A. J.G. **Implementação de uma Rede de Estações de Referência GPS para Posicionamento em Tempo Real**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática), Departamento de Matemática, Universidade de Lisboa, Lisboa, p. 151, 2006.
- ALVES, D. B. M. **Posicionamento GPS Utilizando o Conceito de Estação Virtual**. 2008. 165f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. Análise do Modelo Troposférico Empregado na Geração de uma Estação de Referência Virtual Utilizando o Posicionamento por Ponto Preciso. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n. 3. p. 373-387, 2009.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS Positioning Using Atmospheric Modeling. **GPS Solutions**, v.15, n. 3, p. 253-261, 2011.
- ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data. In: **ION GPS 2003**, Oregon Convention Center, Portland. Proceedings..., 2003.
- BOEHM, J.; SCHUH, H. **Vienna mapping functions in VLBI analyses**. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi: 10.1029/2003GL018984. 2004.
- BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. **Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data**. *Geophys. Res. Lett.*, 111, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629. 2006.
- CHEN, X.; ALLISON, T.; CAO, W.; FERGUSON, K.; GRUNIG, S.; GOMEZ, V.; KIPKA, A.; KOEHLER, J.; LANDAU, H.; LEANDRO, R.; LU, G.; STOLZ, R.; TALBOT, N. Trimble RTX, an Innovative New Approach for Network RTK. In: **ION GNSS 2011**, Portland, Oregon, EUA. Proceedings... 2011, p.2214- 2219.
- EULER, H.-J.; KEENAN, C. R.; ZEBHAUSER, B. E.; WÜBBENA, G. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. In: **ION GPS 2001**, Salt Lake City, UT, Proceedings... 2001, p.379- 391.
- HOFMANN - WELLENHOF, B. ; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo and more**. Springer-Verlage Wien, 2008. 501p.
- IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 04/10/2013.
- KOUBA, J. Implementation and testing of the gridded Vienna mapping function 1 (VMF1). **Journal of Geodesy**, v. 82, p. 193-205, 2007.
- KRUEGER, C. P. **Investigações sobre Aplicações de Alta Precisão do GPS no Âmbito Marinho**. 1996. 267f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, PR.
- LACHAPELLE, G. e ALVES, P. Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.133- 136, 2002.
- LANDAU, H.; VOLLATH, U.; CHEN, X. Virtual Reference Station Systems. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.137-143, 2002.
- LEANDRO, R.; LANDAU, H.; NITSCHKE, M.; GLOCKER, M.; SEEGER, S.; CHEN, X.; DEKING, A.; TAHAR, M.B.; ZHANG, F.; STOLZ, R.; TALBOT, N.; LU, G.; FERGUSON,

- K.; BRANDL, M.; GOMEZ, V.; KIPKA, A. RTX Positioning: The Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning. In: **ION GNSS 2011**, Portland, Oregon, EUA. *Proceedings...* 2011. p.1460- 1475.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004, p. 435.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo, 2008. Editora UNESP, 2ª ed, p. 480.
- OLIVEIRA, A. F. **Análise Comparativa de Diferentes Modelos Troposféricos para RTK em Rede Usando o Conceito de Estação de Referência Virtual**. 2013. 177p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, PR.
- PRADO, A.; KRUEGER, C. P. Análise da Acurácia nos Posicionamentos Diferenciais Aplicando as Técnicas DGPS e RTK. **Revista Brasileira de Cartografia**. Nº 55/01, p. 29-38, Julho 2003.
- RAMOS, A. M. **Aplicação, Investigação e Análise da Metodologia de Reduções Batimétricas através do Método GPS Diferencial Preciso**. 2007. p. 227. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, PR.
- RIZOS, C.; HAN, S. Reference Station Network Based RTK Systems - Concepts and Progress. **Wahun University Journal of Nature Sciences**, v.8, n.2B, p.566-574, 2003.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. 2003. 13f. Predição do Atraso Zenital Troposférico na América do Sul para Posicionamento GNSS em Tempo Real. **Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (III) – UFPR – Curitiba, PR**.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; ROSA, G. P. S. Avaliação das Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul obtidas usando Modelo de Previsão Numérica de Tempo com Alta Resolução Espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v.14, n.4, p.591-605, 2008.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003.
- SEJAS, M. I., KRUEGER, C. P., HECK, B., SEITZ, K. (2003). Análise da Qualidade de um Posicionamento Empregando Estações de Referência Virtuais. p. 1-7. **Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (III) – UFPR – Curitiba PR**.
- SOARES, W. A. **Investigação de uma Modelagem Matemática como Alternativa para Aumento da Área de Cobertura de Estações de Referência DGPS**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, PR.
- SPIPKER Jr., J. J. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER Jr., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.517-546.
- TEKE, K. BOEHM, J. NILSSON, T. SCHUH, H. STEIGENBERGER, P. DACH, R. HEINKELMANN, R. WILLIS, P. HAAS, R. GARCIA-ESPADA, S. HOBIGER, T. ICHIKAWA, R. SHIMIZU, S. Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during CONT08. **Journal of Geodesy**, v. 85, nº7, p. 395 - 413, 2011.
- Trimble® GPS, guidance and precision agriculture solutions for all seasons, all crops, all terrains, all vehicles**. Portfolio 2010. 28f. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-376567/022503078CUK_Ag_Portfolio_BRO_0108_lr.pdf>. Acesso em: 28 Jan. 2013.
- ZHANG, K.; ROBERTS C. Network-Based Real-Time Kinematic Positioning System: Current Development in Australia. In: Geoinformatics and Surveying Conference, 2003, The Institute of Surveyor, Malasia. **Proceedings...**, p. 1-14, 2003.