

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/3: 433-445
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA E TEMPO DE CONVERGÊNCIA DO PPP COM O USO DE PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO NA MODELAGEM DO ATRASO TROPOSFÉRICO

*Accuracy and Convergence Time Evaluation in PPP using Weather Numerical
Prediction in Tropospheric Delay Modeling*

**Tayná Aparecida Ferreira Gouveia¹, Daniele Barroca Marra Alves¹ &
Luiz Fernando Sapucci²**

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305. CEP: 19060-900. Presidente Prudente/SP, Brasil
tayna.fgouveia@gmail.com, danibarroca@fct.unesp.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC / Divisão de Desenvolvimento e Modelagem,
Cachoeira Paulista – SP
Rodovia Dutra, km 39. CEP 12630-000. Cachoeira Paulista/SP, Brasil
luiz.sapucci@cpfec.inpe.br

Recebido em 18 de Novembro, 2016/ Aceito em 11 de Fevereiro, 2017
Received on November 18, 2016/ Accepted on February 11, 2017

RESUMO

O GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) proporciona a posição do usuário na superfície terrestre a partir das coordenadas dos satélites. Porém essas coordenadas são influenciadas por diferentes efeitos que causam erros na posição final. Visando obter melhor qualidade das coordenadas esses efeitos devem ser minimizados ou eliminados. O sinal GNSS ao passar pela atmosfera sofre a influência da ionosfera e troposfera, porém com processamento de dupla frequência os efeitos de primeira ordem da ionosfera são eliminados. Assim os efeitos devido a troposfera passam a ser a maior fonte de erro no posicionamento GNSS. O ZTD (*Zenital Tropospheric Delay*) é o efeito da troposfera de maior magnitude, em média 2,4 cm no zênite e até dez vezes maior para ângulos de elevação próximos ao horizonte. Por essa razão o ZTD deve ser modelado visando a correção desse erro na solução final. Para a modelagem do ZTD existem os modelos empíricos como Hopfield e os modelos que utilizam a PNT (Previsão Numérica de Tempo). A previsão do ZTD regional é disponibilizada como um produto operacional no CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em parceria com a FCT-UNESP (Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista), o ZTD/CPTEC. Nesse trabalho foi realizada uma avaliação considerando dois anos de dados (2012 e 2013) e 5 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), localizadas em diferentes regiões do Brasil, com o objetivo de avaliar o tempo de convergência da inicialização do PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) e a acurácia do posicionamento ao utilizar os modelos de Hopfield e ZTD/CPTEC. Os resultados apontam que o maior ganho quando se usa PNT se refere a acurácia das coordenadas, visto que houve uma melhoria expressiva na qualidade dos resultados. Com o modelo de Hopfield foi obtida uma acurácia média de

45 cm na primeira hora do processamento e 31 cm na solução final. Já o ZTD/CPTEC apresentou em média acurácia de 26 cm na primeira hora e 9,3 cm na solução final.

Palavras-chave: Posicionamento GNSS, Posicionamento por Ponto Preciso, Atraso Zenital Troposférico, Previsão Numérica do Tempo.

ABSTRACT

The GNSS (Global Navigation Satellite Systems) provides the user's position on the Earth's surface from the satellites coordinates. However, these coordinates are influenced by different effects which cause errors in the final position. In order to obtain better quality of coordinates these effects should be minimized or eliminated. The GNSS signal to pass through the atmosphere is influenced by ionosphere and troposphere, but using dual frequency data the ionosphere first order effects are eliminated. In this case, the effects due to troposphere become the largest error source in GNSS positioning. ZTD (Zenithal Tropospheric Delay) is the tropospheric effect of largest magnitude, on average 2.5 cm at zenith and up to ten times larger using elevation angles close to the horizon. For this reason the ZTD should be modeled with to improve the user final solution. In order to model ZTD are empirical models such as Hopfield and models using the NWP (Numerical Weather Forecast). The regional forecast of ZTD is available as an operational product at CPTEC/INPE (Weather Forecasting and Climate Studies Center of the National Institute for Space Research) in partnership with FCT-UNESP (Faculty of Science and Technology of University São Paulo state) the ZTD/CPTEC. In this research an evaluation was carried out considering two years of data (2012 and 2013) and 5 RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring) stations, located in different Brazil regions, with the aim of assess the initialization convergence time of PPP (Precise Point Positioning) and the positioning accuracy when using Hopfield and ZTD/CPTEC models. The results indicate that the highest gain when using NWP refers to coordinates accuracy, because there was a significant improvement in the quality of results. Using Hopfield model was obtained an average accuracy of 45 cm within the first hour of data and 31 cm as the final solution. ZTD/CPTEC model presented an average accuracy of 26 cm in the first hour and 9.3 cm for the final solution.

Keywords: GNSS Positioning, Precise Point Positioning, Zenithal Tropospheric Delay, Numerical Weather Prediction.

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento com o sistema de satélites artificiais tem sido a técnica mais utilizada para se obter uma posição sobre a superfície terrestre ou próxima a essa. O princípio básico se dá a partir da medida de distâncias entre o usuário e no mínimo quatro satélites GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Conhecidas as coordenadas dos satélites, em um sistema de referência, é possível obter as coordenadas do usuário, no mesmo sistema (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Porém essas coordenadas são impactadas por diferentes efeitos, advindos de várias fontes, que resultam em erros que deterioram a acurácia das coordenadas finais obtidas pelo usuário. Para melhorar a qualidade das coordenadas esses erros devem ser minimizados ou eliminados. No que concerne aos efeitos na propagação do sinal sobre a atmosfera terrestre, podem ser citados os causados pela influência da ionosfera e da troposfera, que atualmente, representam as maiores fontes de erros nas observáveis GNSS.

No processamento de dupla frequência ocorre a eliminação dos efeitos ionosféricos de

primeira ordem a partir da combinação livre de ionosfera (*ion-free*). Assim o efeito que o sinal sofre ao ultrapassar a troposfera pode ser considerado a maior fonte de erro no sinal GNSS e esse deve ser tratado de forma adequada no posicionamento. Os efeitos que a troposfera causa no sinal GNSS são dados pelas diferentes variações dos elementos que compõem essa camada, sendo eles: cintilação troposférica, atenuação troposférica e o atraso troposférico (SPILKER *et al.*, 1996). Os dois primeiros podem ser minimizados ao utilizar ângulos de elevação acima de 10°, já o último deve ser modelado devido sua magnitude.

A modelagem do atraso troposférico inicialmente se dá na determinação do atraso gerado no sinal do satélite ao se propagar através da troposfera, direção zenital (ZTD - *Zenithal Tropospheric Delay*), a partir das medidas de temperatura (T), pressão (P) e umidade (U) sobre o perfil vertical troposférico, e depois o ZTD é relacionado com o ângulo de elevação do satélite observado por meio das funções de mapeamento.

O ZTD pode ser estimado no posicionamento ou obtido por meio de modelagem. Nesse sentido

existem os modelos empíricos, sendo que os mais utilizados são: o de Hopfield e o de Saastamoinen (SEEBER, 2003), ou modelos dinâmicos que utilizam PNT (Previsão Numérica de Tempo), como o ZTD/CPTEC operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 2004, disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/zenital/>.

Os modelos empíricos utilizam valores médios globais de temperatura, pressão e umidade. Ou seja, não descrevem de forma adequada as variações temporais e espaciais, principalmente quando se trata da região da América do Sul que sofre forte influência da floresta Amazônica. Nesse sentido, os modelos de PNT são uma boa alternativa para amenizar as limitações dos modelos empíricos para a América do Sul (GOUVEIA *et al.*, 2014). Assim, para aplicações que requerem alta acurácia (poucos cm ou mm) no posicionamento GNSS, os erros advindos da troposfera devem ser modelados. Um dos métodos que vem sendo amplamente empregado é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

O PPP é uma técnica de posicionamento que fornece as coordenadas de um ponto com alta acurácia: acurácia centimétrica no modo estático e cinemático. Sendo que no modo estático pode atingir a ordem de poucos centímetros (de acordo com tempo e condições de rastreamento) (MARQUES, 2012).

Para obter tal acurácia são necessários receptores de dupla frequência, e a modelagem ou minimização dos efeitos/erros que interferem no sinal GNSS. Tais efeitos/erros ocorrem ao longo da propagação dos sinais dos satélites até o receptor. Assim, no PPP, são utilizados dados de órbitas e relógios disponibilizados pela rede global de serviços GNSS (IGS – *International GNSS Service*), além da modelagem para os erros advindos da ionosfera e troposfera e as demais fontes existentes (SEEBER, 2003).

Com a modelagem dos erros no PPP busca-se aumentar a acurácia no posicionamento com a menor quantidade possível de dados, ou seja, otimizar o tempo de convergência. A convergência do PPP é o tempo de estabilização da precisão dos parâmetros envolvidos, e sua qualidade pode ser analisada a partir da série temporal das precisões das coordenadas estimadas no PPP (SILVA *et al.*, 2016). O tempo

de convergência, ou intervalo de tempo de inicialização do PPP, para que o posicionamento atinja precisão decimétrica é, em geral, em torno de 30 minutos, podendo ser mais longo para precisão centimétrica. Em Marques *et al.* (2014) é apresentado que em aplicações em tempo real, o tempo de convergência pode atingir 1 hora com acurácia de 10 a 5 cm.

Em comparação com os modelos empíricos, espera-se que as previsões do ZTD com PNT possam diminuir o tempo de convergência da inicialização do PPP e aumentar a acurácia. Nesse artigo buscou-se investigar o impacto de cada um dos dois modelos (ZTD/CPTEC e Hopfield) no tempo de convergência, como também na acurácia dos resultados obtidos. Para tanto são considerados dados de estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) com diferentes condições troposféricas, tanto climáticas quanto regionais, e dois anos completos de dados.

2. MODELAGEM DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO

A atmosfera terrestre para o posicionamento GNSS é dividida em duas camadas, de acordo com a quantidade de elétrons que a compõe. Sendo essas camadas a ionosfera e troposfera. A camada ionizada, a ionosfera tem altitude de 50 a 1000 quilômetros, e é composta por elétrons livres. Esses elétrons afetam a propagação dos sinais dos satélites quanto à velocidade e direção do sinal. No sinal GNSS, o efeito de 1ª ordem da ionosfera (responsável por aproximadamente 99% do efeito total) é proporcional ao conteúdo total de elétrons (*TEC – Total Electron Content*) (CAMARGO, 1999). Por ser um meio dispersivo, a influência da ionosfera é dependente da frequência do sinal e, dessa maneira, com o uso de observáveis obtidas por dupla frequência, é possível minimizar esse erro a partir de uma combinação linear adequada, a combinação *ion-free*.

A camada eletricamente neutra é composta por uma alta concentração de gases como o nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, argônio e vapor d'água. Sua extensão é de 0 até 50 km, indo da superfície terrestre até o início da ionosfera. Essa camada denominada troposfera na Geodésia (na meteorologia engloba a troposfera e estratosfera) é dividida em duas componentes: seca (*dry*), constituída principalmente pelos gases secos, e úmida (*wet*),

constituída pelo vapor d'água.

A componente seca (hidrostática) é formada por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e outros gases em pequenas proporções, essa corresponde a 90% do atraso total, com pouca variação ao longo do tempo. A componente úmida é composta pelo vapor d'água, embora represente 10% do atraso total sofre variações em poucas horas (SEEBER, 2003).

O atraso troposférico total é obtido pela soma dessas duas componentes na direção satélite-receptor com dimensões significativas, podendo chegar até 24 metros próximo ao horizonte (0°) e 2,4 metros para ângulos maiores (90°). No zênite, o ZHD varia em torno de 2,3 metros e o ZWD 0,2 metros (SEEBER, 2003). Assim, esse efeito deve ser minimizado a partir de modelagem ou estimado como parâmetro no posicionamento GNSS. Os diferentes valores da componente úmida ocorrem devido à variação do vapor d'água ao longo de poucas horas do dia, que pode ser obtido através de perfis de umidade e temperatura. A soma das duas componentes na direção zenital (ZHD - *Zenital Hydrostatic Delay* - Atraso Zenital Hidrostático, e ZWD - *Zenital Wet Delay* - Atraso Zenital Úmido) resulta no ZTD. Em Spilker *et al.* (1996) são apresentadas as equações que expressam as componentes do ZTD.

Além disso, como descrito, a modelagem do atraso troposférico é realizada na direção zenital, mas a partir das funções de mapeamento é possível obter esse atraso na direção inclinada (satélite-receptor), como é apresentado na Figura 1.

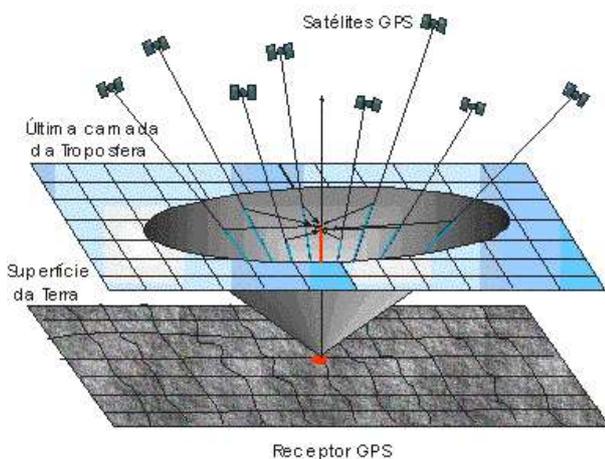


Fig. 1 - Modelagem do ZTD na direção zenital (linha vermelha) e a aplicação da função de mapeamento projetando na direção satélite-receptor (linha azul). Fonte: Adaptado de Sapucci (2001).

Em Sapucci (2001) é analisado o ZTD de acordo com o comportamento da refratividade atmosférica em relação à variação da altitude, de acordo com a altura efetiva da troposfera. Os valores do perfil vertical de umidade são maiores que os medidos em superfície, pois esses parâmetros sofrem muitas variações ao longo da atmosfera. Esses perfis podem ser obtidos a partir de radiômetro, ou de dados de radiossondas. Embora esses métodos convencionais apresentem alta precisão, eles são de alto custo, o que restringe o número de dados disponíveis (BEVIS *et al.*, 1992). Essa limitação pode ser solucionada com a PNT, que é uma boa alternativa para a modelagem do ZTD.

A PNT visa obter dados futuros da atmosfera para um instante a partir de um estado inicial. Esse estado inicial é obtido a partir de observações em superfície: altura geopotencial, componentes do vento, valores do conteúdo de água precipitável; e em altitude: perfis de altura geopotencial, componentes do vento e umidade específica.

As observações de superfície são advindas de estações meteorológicas, sensores instalados em bóias oceânicas e a bordo de navios. Já as observações de altitude são obtidas por estações de radiossondagem, balões piloto e sensores a bordo de aviões. Todas essas fontes de dados são denominadas convencionais. Como observações complementares são utilizadas as observações obtidas por satélites, fontes não convencionais, que disponibilizam dados em regiões em que as observações de superfície são escassas, como sobre oceanos (SAPUCCI, *et al.*, 2014). A partir dessas observações das diferentes fontes é possível obter as medidas de T, P e U que serão utilizados na modelagem do ZTD.

Em Gouveia *et al.* (2014) é discutido o processo de assimilação de dados na obtenção das análises (*first guess*) e o incremento que ocorre nos modelos de PNT no contexto do ZTD/CPTEC. Logo, para uma melhor modelagem do ZTD, devem ser utilizados modelos de maior qualidade, pois esse é dependente da qualidade dos modelos de PNT e os sistemas de assimilação utilizados. O CPTEC/INPE investe recursos e pesquisas no desenvolvimento de melhores modelos de previsão, visando obter melhores previsões de tempo, a partir de maiores resoluções horizontais (distância entre pontos de

grades), verticais (níveis de pressão) e temporais (menor tempo para disponibilização dos dados) dos modelos.

A modelagem matemática do ZTD a partir da PNT é descrita em Sapucci *et al.*, (2001). Nessa modelagem são necessárias duas etapas: a determinação do atraso na direção zenital, que utiliza valores de P, T e U; relacionar o atraso na direção zenital com o ângulo de elevação do satélite observado, através da função de mapeamento.

No Brasil no CPTEC/INPE o ZTD é obtido utilizando dados dos modelos de PNT operacionais, que disponibilizam valores previstos de P, T e U nos diferentes níveis disponibilizados, de acordo com cada modelo. O ZWD e ZHD são obtidos nos mesmos intervalos de tempo (resolução temporal) e na mesma grade (resolução espacial e níveis) em que os modelos numéricos geram suas previsões, na soma dessas duas componentes têm-se o ZTD. Com os valores de P, T e U, para os pontos da grade e níveis dos modelos de PNT utilizados, o ZTD pode ser determinado para qualquer ponto pertencente ao domínio espacial e temporal de cada modelo de PNT.

Desde 2004 é disponibilizado o ZTD/CPTEC de acordo com o modelo de PNT operacional no centro de pesquisa. A partir de 2012 está operacional o ZTD, que utiliza o modelo de PNT Eta com resolução espacial de 15 km em 42 níveis e temporal de 3 horas (ALVES *et al.*, 2015).

3. MÉTODO PPP

OPPP é uma das técnicas de posicionamento com satélites GNSS, em que é utilizado apenas um receptor de dados GNSS. Os erros, nesse método, são quase todos modelados, resultando em posicionamento de alta acurácia (cm e mm). Os erros são de diversas fontes, como dos satélites (relógio, órbita, etc.), na propagação do sinal (multicaminho, ionosfera, troposfera, etc.), do receptor (relógio, centro de fase, etc.), e efeitos geodinâmicos na estação (coordenadas, marés, etc.). Esses erros e efeitos se propagam para as coordenadas finais do ponto a ser posicionado. Na modelagem dos erros devem ser utilizadas as efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites. Com dados de receptores de dupla frequência, as duas observáveis de

fase de batimento da onda portadora podem ser combinadas linearmente, reduzindo os efeitos de primeira ordem da refração ionosférica. O que também pode ser realizado com as pseudodistâncias. Os erros do ZTD podem ser minimizados a partir de modelos, em conjunto com alguma técnica de parametrização. Todas essas modelagens e minimização dos erros no PPP tornam esse método de alta acurácia (MONICO, 2008; MARQUES *et al.*, 2014).

Para obter melhor acurácia no PPP, as órbitas precisas e correções dos relógios dos satélites precisam apresentar alta qualidade como as obtidas a partir da rede global IGS, que também disponibilizam dados do modelo global para erros provenientes da ionosfera IONEX (*IONosphere map Exchange format*) e modelo de troposfera SINEX (*Solution (Software/technique) INdependent Exchange format*). Além das correções dos diferentes erros também é necessária a atualização das coordenadas dos pontos a serem processados, que mudam de acordo com o tempo e velocidade do movimento da placa litosférica, ou seja, dependem da época do processamento e do campo de velocidade das estações (PEREZ *et al.*, 2003 *apud* ALVES *et al.*, 2010).

4. MATERIAIS E MÉTODO

Nessa seção é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento desse artigo. Na seção 4.1 são apresentados os dados utilizados e as justificativas do uso dos mesmos. Também é descrito brevemente sobre o *software* RT_PPP (seção 4.2). Finalizando com as métricas de avaliação dos resultados (seção 4.3).

4.1 Dados Avaliados

Os dados utilizados são referentes às estações SAGA (São Gabriel da Cachoeira-AM), RNNA (Natal-RN), CUIB (Cuiabá-MT), PPTE (Presidente Prudente-SP) e UFPR (Curitiba-PR). Essas estações (Figura 3 - símbolos amarelos) foram selecionadas devido as suas localizações geográficas, uma vez que diferentes regiões do Brasil apresentam características climáticas distintas de acordo com a localidade e época do ano, como pode ser observado na Figura 2. De acordo com a Figura 2 nota-se que as regiões em destaque (círculo rosa) apresentam características distintas entre si. Maiores detalhes

sobre a climatologia do Brasil podem ser obtidos em Alvares *et al.*, (2014). Pelo mesmo motivo foram selecionados dados anuais, anos de 2012 e 2013, visando avaliar comportamentos característicos de acordo com épocas do ano, nos dois anos, e localização das estações. Os arquivos de observações utilizados foram diários com intervalos de 15 segundos. O *software* utilizado no processamento dos dados foi o RT_PPP (*Real Time-PPP*) (MARQUES *et al.*, 2014).

4.2 Software RT_PPP

O *software* RT_PPP realiza o processamento de dados GPS em tempo real ou pós-processado (Marques *et al.*, 2014). Com ele é possível realizar o tratamento de dados GPS de dupla frequência, com os métodos de filtro de Kalman e o DIA (Detecção, Identificação e Adaptação), utilizados para garantir o controle de qualidade (TEUNISSEN, 1998). Os efeitos de primeira ordem da ionosfera são corrigidos pela combinação linear *ion-free*. As tendências diferenciais do código são corrigidas tanto na portadora L1 (P1-C1) quanto L2 (P2-C2). Na minimização dos erros da troposfera, podem ser utilizadas três maneiras: modelo de Hopfield, o ZTD/CPTEC ou estimar a componente úmida como parâmetro no posicionamento. Para o ZTD/CPTEC é necessário inserir os arquivos com as previsões do produto (1 arquivo com previsões de 3 horas, por dia) (disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/zenital/>).

O *software* também usa correções dos relógios e órbitas precisas, entre outros. As ambiguidades são estimadas como soluções *float* e reinicializadas quando há perda de ciclo. Nesse trabalho foi utilizado o modo de PPP cinemático pós-processado, onde apresenta um valor de coordenada a cada época de observação. No processamento dos dados foram utilizadas as duas modelagens da troposfera, em soluções distintas, e assim obteve-se as soluções das coordenadas época por época (épocas de 15 segundos).

4.3 Método de avaliação

Devido à grande quantidade de dados para cada uma das estações e mais dois modelos de troposfera avaliados (ZTD/CPTEC e Hopfield) foram desenvolvidos programas em C++ visando compatibilizar as épocas e padronizar os formatos dos arquivos.

Os resultados (coordenadas estimadas) foram avaliados quanto às discrepâncias dos modelos em comparação com as coordenadas de referência, determinadas a priori e atualizadas para época de processamento. Com a comparação têm-se as discrepâncias (erros) de coordenadas no SGL (Sistema Geodésico Local) (Δe , Δn e Δu) ou cartesiano geocêntrico (ΔX , ΔY e ΔZ) (MARQUES, 2012). As estatísticas utilizadas foram: viés (equação 1), desvios-padrão (DP - equação 2) e a raiz do erro quadrático médio (REQM - equação 3), que apresenta o impacto do viés e do DP nos dados, usado para quantificar a acurácia dos resultados. A acurácia refere-se à qualidade do posicionamento, onde são consideradas precisão (dispersão entre os dados medidos) e a tendência entre os valores calculados e os de referência (MONICO *et al.*, 2009).

Dado n o número de épocas, as discrepâncias para cada coordenada no SGL, obtidas pela diferença das estimativas a partir do processamento do RT_PPP e o valor verdadeiro, tem-se:

$$vies(n) = \frac{\sum_{i=1}^n [\Delta]}{n} \quad (1)$$

$$DP(n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta]^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$REQM(n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta]^2}{n}} \quad (3)$$

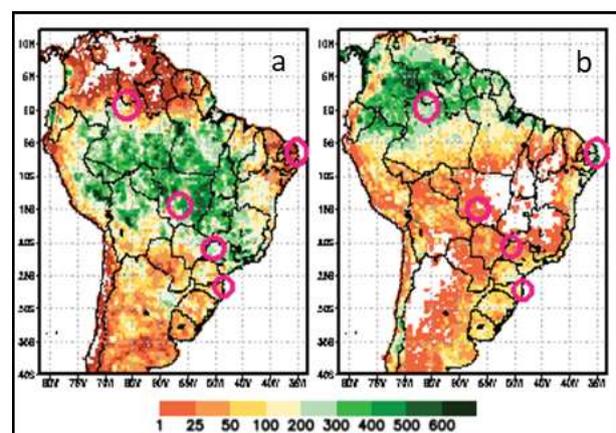


Fig. 2– Precipitação acumulada a partir do modelo Etal5km, em destaque as cinco regiões das estações SAGA, RNNA, CUIB, PPTE e UFPR. Nos meses de janeiro (figura a) e julho (figura b) no ano de 2013. Fonte: Adaptado de CPTEC (2017).



Fig. 3 - Estações, SAGA, RRNA, CUIB, PPTE e UFPR, da RBMC analisadas. Fonte: Google Earth.

5. RESULTADOS

Os resultados, discutidos nessa seção, são divididos por abordagem e detalhamento de cada análise. Iniciando com uma abordagem global (seção 5.1), visando enfatizar a qualidade dos modelos utilizados para todo o conjunto de dados, considerando estações com maiores discrepâncias (SAGA e UFPR). Na sequência (seção 5.2) são analisados os resultados de todas as estações avaliadas em relação à latitude e longitude, e também considerando a altitude, visando avaliar a qualidade dos modelos utilizados, nas diferentes regiões e períodos considerados nesse artigo (como discutido na seção 4.1).

5.1 Avaliação Global

Todas as estações foram avaliadas quanto ao viés, DP e REQM. Inicialmente são apresentadas as estações SAGA e UFPR, que se destacam por apresentarem, respectivamente, maior e menor REQM entre os modelos do ZTD. Na Figura 4 são apresentadas as estatísticas para a estação SAGA e na Figura 5 para a estação UFPR.

Como resultado global pode-se observar que o modelo de Hopfield apresenta resultados lineares (curva linear), já o ZTD/CPTEC (Eta15km) não apresenta linearidade quanto às estatísticas, viés, DP e REQM. Essa dispersão quanto ao modelo que usa PNT, Eta15km,

pode se dar devido a erros no modelo de PNT, que podem ser de diferentes fontes, dentre elas bruscas variações das variáveis atmosféricas, como o vapor d'água. Logo, um indicativo que a dispersão apresentada nos gráficos com ZTD/CPTEC pode ser devido ao vapor d'água, se dá devido a SAGA apresentar maiores dispersões que a estação UFPR. Sendo que a região norte do país tem como característica maior variação e concentração de umidade ao longo do ano (com a forte influência da Amazônia) do que a região sul (como apresentado na seção 4.1 e em Alvares *et al.* (2014)). O que não é expresso pelo modelo de Hopfield, uma vez que esse utiliza média global dos parâmetros T, P, U, ou seja, não representa as variações dos mesmos.

Na estação SAGA (Figura 4) o viés da latitude (primeira coluna e linha) varia em média de 2 cm na primeira hora de processamento com o ZTD/CPTEC, e 5 cm com o modelo de Hopfield. Porém a diferença entre os modelos é mais significativa na componente altitude, com um ganho de 50 cm (antes de convergir) a 40 cm (após convergência) com o ZTD/CPTEC. No DP também os maiores valores estão nas componentes latitude e altitude, em torno de 40 a 50 cm na primeira hora, para ambos os modelos. O REQM da componente latitude do ZTD/CPTEC é altamente influenciado pelo DP, sendo que esse apresenta grande dispersão, variando em torno de 30 cm nas primeiras horas, e não é possível observar melhoria significativa entre os modelos. Os resultados que se destacam são em relação à altitude, com uma melhoria em torno de 50 cm de REQM para o ZTD/CPTEC em relação ao modelo de Hopfield, nas primeiras horas, nas demais a melhoria é de 40 cm. Em relação à longitude ambos os modelos apresentam valores semelhantes, em torno de 2 cm de diferença.

Na Figura 5, da estação UFPR, pode-se observar uma menor variação entre os modelos, mas a magnitude das estatísticas das coordenadas se mantém como na estação SAGA. Alguns resultados apresentam destaques, como: o maior impacto se dá na componente altitude onde é possível observar que o viés para Hopfield, nas primeiras horas, está em torno de 30 cm, e do ZTD/CPTEC de 1 cm. Nas demais horas o modelo de Hopfield tem uma melhoria,

mantendo 20 cm de REQM, e o modelo ZTD/CPTEC mantêm sua qualidade inicial, de 1 cm. Nota-se que o DP em latitude do ZTD/CPTEC é maior que o de Hopfield em torno de 20 cm no início do processamento, mas a partir da convergência essa diferença vai diminuindo, e ambos os modelos apresentam valores inferior a 5cm. Em relação à longitude as diferenças entre os modelos são em torno de 1 cm.

O tempo de convergência do PPP em ambos os modelos (Hopfield e ZTD/CPTEC), ocorre em torno de 30 minutos a 1 hora. Ou seja, nesses testes, o modelo empírico ou o que utiliza a PNT não impactaram no tempo de convergência do PPP. Porém o que tem grande impacto é a acurácia obtida para a posição antes (para altitude) e após a convergência (todas as componentes) dos resultados. Ao avaliar as componentes separadamente (latitude, longitude e altitude) a componente com menor variação na acurácia é a longitude, seguida da latitude e a mais afetada é a altitude, já que essa componente sofre as maiores influências devido à variação da atmosfera e devido à geometria dos satélites.

Portanto, os resultados mais expressivos obtidos nessa análise global é que o tempo de convergência é similar em ambos os modelos para as duas estações avaliadas, e que a componente que apresenta maior ganho com o ZTD/CPTEC é a altitude com diferença média, entre o modelo de ZTD/CPTEC e Hopfield, de 40 cm, em SAGA, e de 20 cm na estação UFPR.

5.2 Avaliação 2D e 3D

Com o REQM, tem-se o viés e DP, isto é, a acurácia das coordenadas obtidas com cada um dos modelos utilizados. Sendo assim, os resultados podem ser avaliados apenas em relação ao REQM. Para uma análise mais robusta, foram avaliadas as cinco estações e os dois anos de dados (seção 4.1), em relação às coordenadas: 2D, latitude e longitude; e 3D, latitude, longitude e altitude, essa última representando a resultante da acurácia do PPP. A necessidade dessas duas avaliações se deu devido à componente 3D apresentar maiores diferenças do REQM (seção 5.1, fig.4 e 5), entre os modelos de Hopfield e ZTD/CPTEC.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos do REQM referente às coordenadas 2D das estações SAGA, RNNA, CUIB, PPTE e UFPR para os anos 2012 (esquerda) e 2013 (direita). Pode ser observado que no ano de 2013 o REQM é maior que em 2012, nas primeiras horas de processamento. Em 2012 os valores variam de 30 a 40 cm, em 2013 os valores são superiores, de 40 a 50 cm. A principal discrepância em 2012, entre os modelos, se dá nas três primeiras horas de processamento, sendo o modelo de Hopfield mais acurado, cerca de 5 cm em relação ao ZTD/CPTEC, na maioria das estações a menos de PPTE, que não apresenta discrepância significativa. No ano de 2013 as estações SAGA e CUIB apresentam discrepância entre os modelos de até 10 cm, com o REQM menor para o modelo de ZTD/CPTEC. As demais estações não apresentam variações de acurácia significativas entre os modelos, em média de 30 cm na primeira hora. Após a convergência, em torno de 1 hora, os modelos apresentam acurácia de poucos centímetros, de 1 a 3 cm, em ambos anos avaliados e na maioria das estações. A estação com resultados diferentes é SAGA com o modelo ZTD/CPTEC com acurácia de 1 a 3 cm enquanto Hopfield varia de 10 à 15 cm (valores menores quanto mais próximo das 24 horas).

A componente 3D, Figura 7, tem um aumento (deslocamento) no REQM médio, em todas as estações, de 30 cm para o modelo de Hopfield e 15 cm para o modelo ZTD/CPTEC em relação à componente 2D (fig. 7). Como resultados gerais, nos dois anos avaliados e em todas as estações, o modelo ZTD/CPTEC apresenta maior acurácia (menor REQM) em relação ao modelo de Hopfield.

Visando avaliar cada estação e o impacto dos modelos na acurácia do PPP, a seguir são apresentadas: tabela 1 que traz uma síntese do REQM das estações avaliadas considerando os dois anos de dados na primeira hora de processamento (antes do período de convergência); tabela 2 apresenta uma síntese do REQM das estações avaliadas, para os dois anos de dados, na solução final do processamento (24 horas).

Analisando as tabelas 1 e 2 pode-se destacar no ano de 2012: SAGA, na primeira

hora, tem REQM de 38,1 cm de melhoria com o ZTD/CPTEC. Na solução final (24 horas) a diferença é de 46,3 cm; RNNA com 7,2 cm de diferença entre os modelos na primeira hora com melhoria a partir do ZTD/CPTEC, e com 24 h a diferença entre os modelos é inferior a 1 cm; CUIB apresenta diferença entre o modelo de Hopfield e ZTD/CPTEC de 10,9 cm na convergência e de 38,5 na solução final; PPTE com 3,2 cm de melhoria com ZTD/CPTEC na primeira hora e em 24h de 12,5 cm; UFPR a diferença entre os modelos é de 8,2 cm na primeira hora (melhoria com PNT) e 7,2 cm nas 24 horas.

Já em 2013, pode-se observar também na tabela 1 que os resultados que apresentam maior destaque são: SAGA apresenta melhoria quanto ao modelo ZTD/CPTEC na primeira hora de processamento, gerando um ganho de 41,2 cm ao utilizar a PNT; RNNA no mesmo período tem

27,2 cm de melhoria na convergência ao utilizar o ZTD/CPTEC; CUIB apresenta diferença de 37,6 cm, essa melhoria se dá ao utilizar o ZTD/CPTEC; PPTE de 9,7 cm, e 9,4 cm na estação UFPR.

Portanto, em ambos os anos e considerando todas as estações, o modelo de Hopfield apresenta convergência média de 45,08 cm de acurácia para a componente 3D, e após esse período há uma estabilização da acurácia, com erro final médio de 30,83cm, variando de acordo com a localização (de SAGA à UFPR). Já o modelo ZTD/CPTEC tem acurácia média de 26 cm nas primeiras horas e 9,3 cm na solução final. Deve-se destacar que a qualidade do modelo com o uso de PNT se mantém, mesmo com as pequenas variações nas estações avaliadas. As melhorias obtidas com modelo de PNT, de maior destaque, ocorrem em regiões mais ao norte, mais úmidas, e há uma diminuição à medida que se aproxima das estações mais ao Sul, consideradas regiões mais secas.

Tabela 1: Síntese do REQM na convergência (1 hora) da componente 3D das 5 estações e dois anos avaliados

REQM - 3D (cm) - 1 hora						
Estações	2012			2013		
	Hop	ZTD/CPTEC	$\Delta H-C$	Hop	ZTD/CPTEC	$\Delta H-C$
SAGA	55,3	17,2	38,1	59,5	18,4	41,2
RNNA	29,8	22,6	7,2	46,1	18,8	27,2
CUIB	50,4	39,5	10,9	57,0	19,4	37,6
PPTE	40,6	37,4	3,2	51,4	41,7	9,7
UFPR	30,7	22,5	8,2	30,0	20,6	9,4

Tabela 2: Síntese do REQM na solução final (24 horas) da componente 3D das 5 estações e dois anos avaliados

REQM - 3D (cm) – 24 horas						
Estações	2012			2013		
	Hop	ZTD/CPTEC	$\Delta H-C$	Hop	ZTD/CPTEC	$\Delta H-C$
SAGA	53,2	6,9	46,3	45,7	5,4	40,3
RNNA	17,6	17,4	0,2	23,5	14,6	8,9
CUIB	42,1	3,6	38,5	40,6	8,6	32,1
PPTE	21,9	9,4	12,5	28,5	14,2	14,3
UFPR	11,6	4,4	7,2	23,6	8,6	15,0

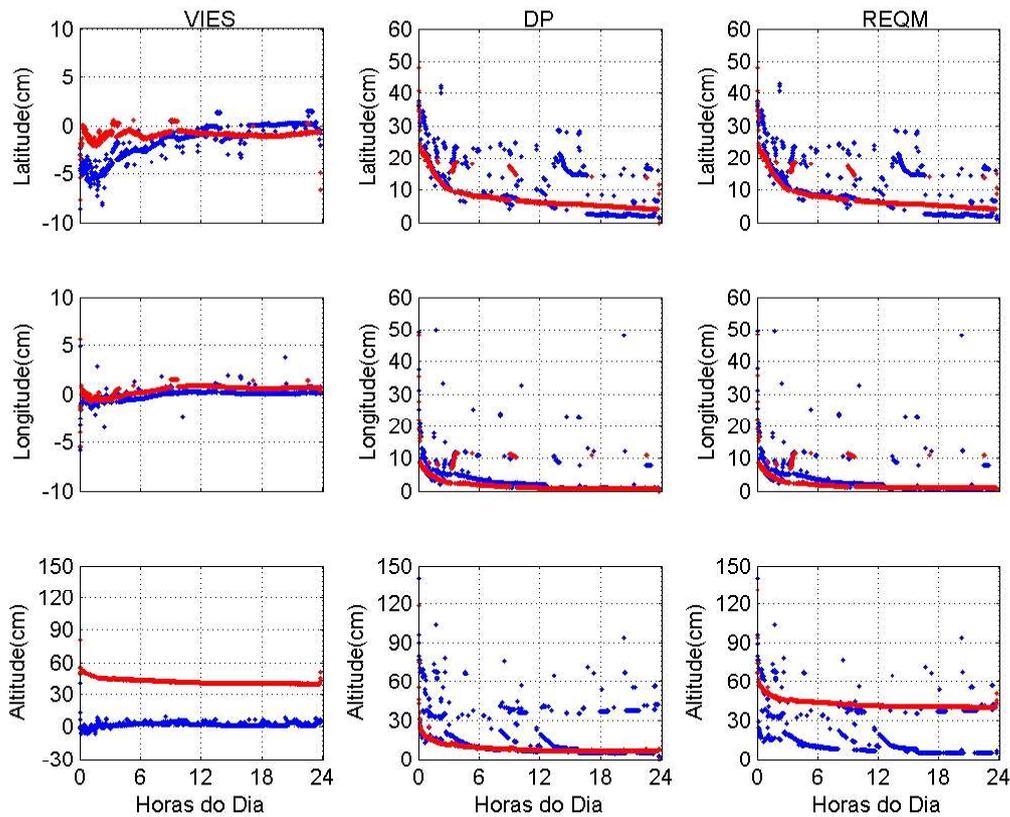


Fig. 4 - Análises estatísticas, viés, DP e REQM da estação SAGA, ano de 2012, pontos em vermelho se referem ao modelo de Hopfield, em azul modelo ZTD/CPTEC. Primeira coluna viés, segunda DP e terceira REQM. Nas linhas latitude, longitude e altitude, respectivamente.

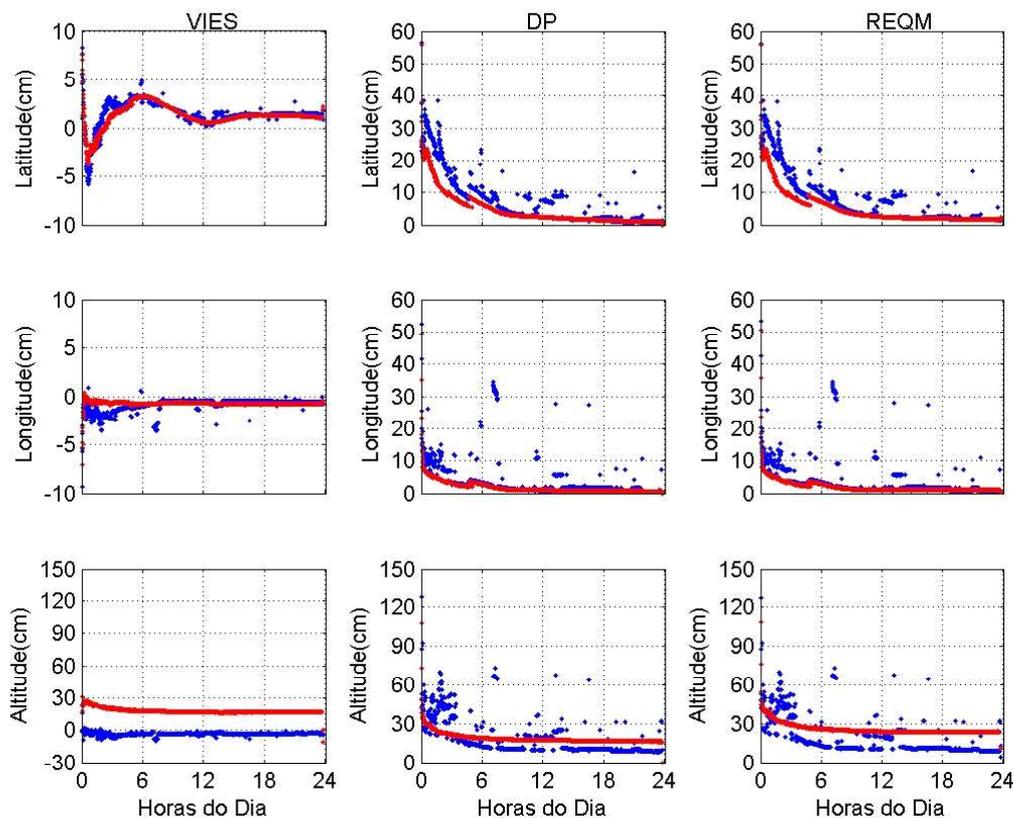


Fig. 5 - Análises estatísticas, viés, DP e REQM da estação UFPR, ano de 2012, pontos em vermelho se referem ao modelo de Hopfield, em azul modelo ZTD/CPTEC. Nas linhas latitude, longitude e altitude, respectivamente.

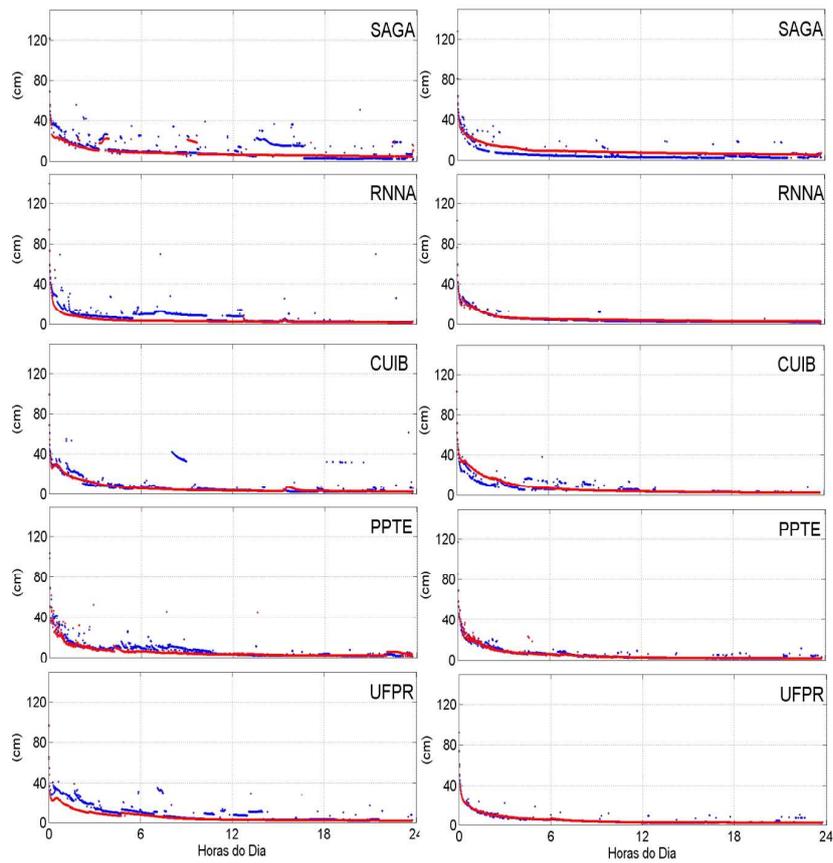


Fig. 6 – Avaliação 2D em relação REQM das 5 estações para os anos de 2012 (coluna da esquerda) e 2013 (coluna da direita), pontos em vermelho se refere ao modelo de Hopfield, em azul modelo ZTD/CPTEC.

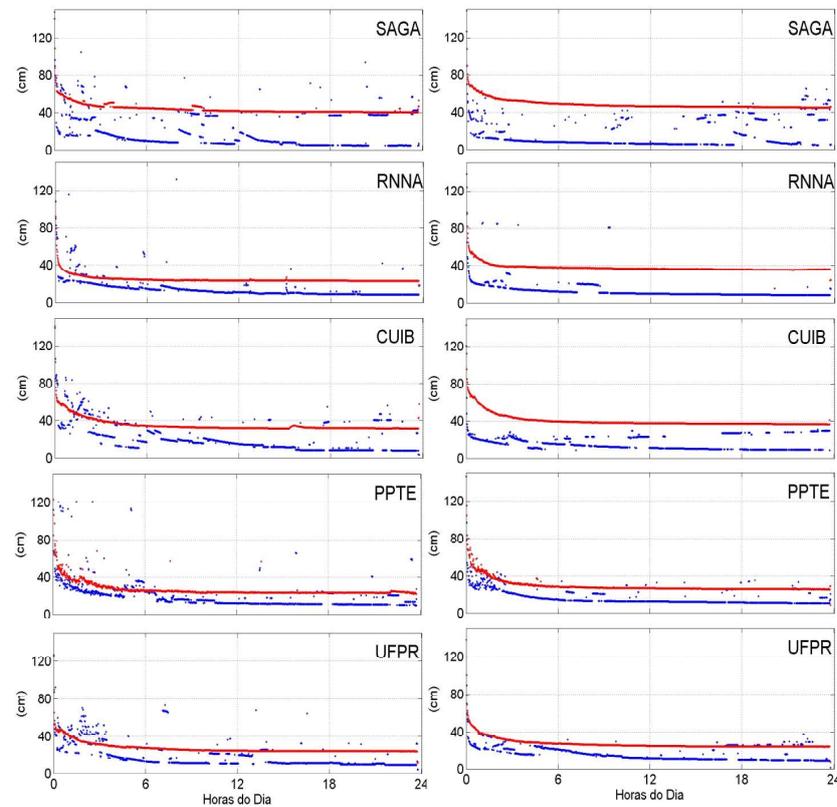


Fig. 7 -Avaliação 3D em relação REQM das 5 estações para os anos de 2012 (coluna da esquerda) e 2013 (coluna da direita), pontos em vermelho se refere ao modelo de Hopfield, em azul modelo ZTD/CPTEC.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse artigo foi discutida a importância da modelagem do ZTD com PNT na acurácia do PPP. A componente que apresentou resultados mais expressivos foi à altitude. Os resultados, a partir dos dois anos de dados e das cinco estações avaliadas, indicaram que: na primeira hora o modelo de Hopfield pode ser utilizado em aplicações que não requerem alta acurácia, pois com esse o usuário pode em média obter 45 cm de erro no PPP, de acordo com a região, e solução final de 31 cm. Já o modelo de ZTD/CPTEC tem em média 26 cm de erro no PPP na primeira hora e 9,3 cm na solução final.

Embora a convergência aconteça em épocas similares nos modelos avaliados, em média 1 hora de processamento, o maior ganho se dá ao utilizar o ZTD/CPTEC, que tem os menores valores de REQM principalmente em relação à componente 3D (impactada pela altitude). Logo, quando há necessidade de posicionamento de alta acurácia, o modelo ZTD/CPTEC com PNT é o mais indicado. Embora esse não apresente a linearidade ao longo do processamento como o modelo empírico, o ZTD/CPTEC tem acurácia superior na resultante 3D em todas as análises apresentadas. Como foi discutido, nos resultados a não linearidade da acurácia com ZTD/CPTEC pode ter ocorrido devido à variação climática regional, pois regiões mais úmidas resultam em maiores erros no modelo de PNT, consequentemente no ZTD/CPTEC.

A avaliação robusta, com 5 estações com localização e característica climáticas diferentes e 2 anos de dados, visou maior segurança ao discutir os dados, assim como buscar padrões de qualidade dos modelos. E nesse sentido o modelo ZTD/CPTEC se apresenta superior em ambos os anos. Sendo que no ano de 2013 a melhoria com ZTD/CPTEC é mais expressiva em relação ao Hopfield. Isso pode ter ocorrido devido à maior estabilização do modelo de PNT Eta15, que foi operacionalizado em 2012. Uma vez que os modelos de PNT passam por melhorias e ajustes com o passar dos anos, pode-se dizer que o modelo de PNT estava mais ajustado em 2013, e por isso apresenta maior acurácia.

Portanto, nos resultados obtidos, notou-se que ao utilizar a modelagem da PNT na

obtenção do ZTD não houve uma diminuição no tempo de convergência, mas um aumento na acurácia do posicionamento. Em média, foi obtido um ganho (diferença entre Hopfield e ZTD/CPTEC) de 19,3 cm nas primeiras horas do processamento e 20,4 cm na solução final, em relação ao modelo empírico de Hopfield. Além disso, como esperado, esse ganho foi maior em regiões mais úmidas (SAGA) e menor em regiões mais secas (PPTE e UFPR). Esse resultado destaca-se uma vez que para posicionamento em tempo real o melhor resultado no período de convergência implicará em melhor qualidade no posicionamento final.

AGRADECIMENTOS

Ao CPTEC/INPE pela disponibilização dos dados de PNT. Ao Prof. Dr. Haroldo Antônio Marques pela disponibilização e auxílio quanto ao *software* RT_PPP. Ao LGE da FCT-UNESP pelos dados meteorológicos e do GOA-II. À FAPESP pelo financiamento da bolsa de Treinamento Técnico do primeiro autor (processo 2013/02129-0 vinculado ao projeto regular processo 2012/199067).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 22, n. 6, 711–728, 2014.
- ALVES, C. M. D.; ROMÃO, V. M. C.; MONICO, J. F. G.; GARNÉS, S. J. A. Avaliação da qualidade do Posicionamento por Ponto Preciso na sua forma on-line. In: **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife - PE. p. 001-007, 2010.
- ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; MARQUES, H. A.; SOUZA, E. M.; GOUVEIA, T. A. F.; Magário, J. A. Using a regional numerical weather prediction model for GNSS positioning over Brazil. *GPSSolut*. P. 677–685, 2015.
- BEVIS, M. G.; SUSINGER, S.; HERRING, T.; ROCKEN, C.; ANTHES, R. A.; WARE, R. H. GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, V. 9, p. 15.787 - 15.801, 1992.

- CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera Para uso em Posicionamento com Receptores GPS de uma Frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CPTEC. **Avaliação dos Modelos**. Disponível em: <http://avaliacaodemodelos.cptec.inpe.br/>. Acessado em Abril 2017.
- GOUVEIA, T. A. F.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Avaliação Robusta da Modelagem Neutrosférica Sobre o Território Brasileiro Baseada em Modelos de Previsão Numérica de Tempo da América Do Sul. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.20, n.3, p.481-503, 2014.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F.; SHIMABUKURO, M.; OYAMA, R. T.; WENTZ, J. P. PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análises de resultados no modo estático e cinemático. **Revista Brasileira de Cartografia**, n° 66/6, p. 1331-1345, 2014.
- MARQUES, H. A. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. 244 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.
- MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n.3, 2009.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- SPIPKER, J. J. Tropospheric effects on GPS. In: Parkinson B. W.; SPIPKER, J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**, v.1, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics, p.517-46, 1996.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativa do Vapor D'água Atmosférico e a Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS**. 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- SAPUCCI, L. F.; BASTARZ, C. F.; CERQUEIRA, F.; AVANÇO, L. A.; HERIDES, D. L. Impacto de perfis de rádio ocultação GNSS na qualidade das previsões de tempo do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 29 n° 4, p. 551-567, 2014.
- SILVA, E. G. S.; MARQUES, H. A. PPP com integração de dados GPS/GLONASS: fundamentos envolvidos e análise de acurácia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n.2, p.217/231, 2016.