
AVALIAÇÃO DO ATRASO TROPOSFÉRICO ADVINDO DO MODELO ECMWF E FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DE VIENA NO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

WEYLLER DIOGO ALBUQUERQUE MELO

HAROLDO ANTONIO MARQUES

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG
Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE
wdiogo19@gmail.com, haroldoh2o@mail.com

RESUMO - O método de Posicionamento Por Ponto Preciso GNSS tem sido amplamente investigado pela comunidade científica e como consequência tem-se melhoramentos nos produtos necessários ao processamento dos dados e na modelagem matemática proporcionando melhorias em termo de precisão posicional e no tempo de convergência do ajustamento dos dados. A aplicação do PPP requer o uso de produtos IGS e da modelagem matemática dos diversos efeitos envolvidos. Em relação aos efeitos atmosféricos, para fins de posicionamento GNSS divide-se a camada da atmosfera em ionosfera e troposfera. Neste trabalho, apresenta-se a modelagem da troposfera no PPP, no qual foi utilizada a estratégia de estimativa da componente úmida da troposfera e também a correção a partir do modelo de Previsão Numérica do Tempo com dados advindos do modelo Europeu (ECMWF), os quais são disponibilizados juntamente com a Função de Mapeamento de Viena (VMF). As análises foram realizadas utilizando o software RT_PPP desenvolvido por Marques (2012) considerando dados de uma estação da RBMC em distintos períodos ao longo do ano. As coordenadas estimadas no PPP com solução diária foram comparadas com as coordenadas advindas da solução semanal SIRGAS-COM (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – Contínuo) com o objetivo de analisar a acurácia do posicionamento ao utilizar tais estratégias para correção da troposfera.

ABSTRACT - The GNSS Precise Point Positioning method has been widely investigated by the scientific community and consequently the user has experienced improvements in products necessary for the data processing and also in the mathematical modeling what provide improvements in terms of positional accuracy and convergence time of the data adjustment. The PPP application requires the use of IGS products and mathematical modeling for several effects involved. Concerning the atmospheric effects, for purposes of GNSS positioning the atmosphere layer is divided in ionosphere and troposphere. In this paper will be presented the modeling of the troposphere in the PPP where it was adopted the strategy of troposphere wet component estimation and also the correction from Numerical Weather Forecast model with data from European model (ECMWF) which are available along with the Vienna Mapping Function (VMF). The analyses were accomplished by using the RT_PPP software developed by Marques (2012) considering data from a RBMC station in distinct periods of a year. The estimated coordinates in the PPP with daily solution were compared with coordinates from SIRGAS-CON (*Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – Contínuo*) weekly solution aiming to analyze the positioning accuracy when applying such strategy of troposphere correction.

1 INTRODUÇÃO

Em termos de posicionamento geodésico pelo GNSS, geralmente aplica-se o método de posicionamento relativo. O processamento dos dados a partir deste método permite realizar combinações entre observações de diferentes satélites coletadas em estações distintas facilitando a minimização e ou eliminação dos diversos erros envolvidos com os sinais GNSS. No método PPP, todos os erros envolvidos com os sinais devem ser modelados para que se obtenha acurácia da ordem de poucos centímetros. Dentre os diversos erros envolvidos, destacam-se aqueles relacionados com a troposfera, os quais podem atingir valores acima de vinte metros na direção receptor-satélite considerando baixo ângulo de elevação.

O método PPP, no geral, se baseia no uso da equação de pseudodistância e fase da onda portadora onde se aplica a combinação ion-free (livre da ionosfera) para eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera. Contudo, outras estratégias de correção da ionosfera podem ser adotadas. Em relação à troposfera, geralmente divide-se seus efeitos em duas componentes, sendo uma úmida e outra hidrostática. A componente úmida (ZWD – Zenithal Wet Delay)

W. D. A. Melo; H. A. Marques

representa em torno de 10% do atraso troposférico total (ZTD – Zenithal Tropospheric Delay) enquanto que a componente hidrostática (ZHD – Zenithal Hydrostatic Delay) representa aproximadamente 90% do atraso total. O ZTD é modelado a partir da soma das duas componentes (ZHD e ZWD), na qual utiliza uma função de mapeamento para cada uma com objetivo de mapear da direção vertical para direção receptor-satélite.

Diversos estudos têm sido realizados visando melhorar a função de mapeamento para a troposfera dentre os quais se podem citar os trabalhos de Sapucci (2001 e 2005), Gouveia (2013), Niell (2001), Boehm e Schuh (2004), Nievinski (2009), entre outros.

Neste trabalho apresenta-se a análise do PPP utilizando o ZTD obtido com base em modelo de PNT (Previsão Numérica do Tempo), mais especificamente o modelo europeu ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Para o mapeamento do ZTD foi utilizada a VMF (Vienna Mapping Function), a qual foi desenvolvida por Boehm no instituto de Geodésia de Viena (BOEHM; SCHUH, 2004). Atualmente, os coeficientes desta função são disponibilizados juntamente com os valores de ZTD do modelo europeu (ZTD-ECMWF). Neste caso, os valores são disponibilizados para todo o globo terrestre em grades de 2 graus de latitude por 2,5 graus de longitude e intervalo temporal de 6 horas.

As análises foram realizadas com estimativa das coordenadas no PPP utilizando dados da estação RECF (Recife) da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) considerando dados em distintas estações climáticas do ano de 2013. Os processamentos dos dados foram realizados no software RT_PPP desenvolvido por Marques (2012), cujo código fonte da VMF foi adaptado juntamente com a implementação da interpolação dos dados de ZTD-ECMWF.

As estratégias de processamentos envolveram a estimativa da componente úmida da troposfera e a correção da troposfera a partir do ZTD- ECMWF. No caso da estimativa, a componente úmida é tratada como um processo random walk (passo aleatório) no ajustamento recursivo com uma precisão adotada em função do tempo (GELB, 1974; TEUNISSEN, 2001; MARQUES, 2012). As coordenadas estimadas no PPP utilizando as duas estratégias adotadas foram comparadas com as coordenadas advindas da solução semanal SIRGAS-CON (SIRGAS Contínuo) e estatísticas foram geradas visando avaliar a qualidade do posicionamento ao utilizar tais estratégias de correção da troposfera no posicionamento geodésico a partir do método PPP.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O método PPP em sua forma clássica consiste na utilização de receptores de dupla frequência com aplicação da combinação livre da ionosfera para eliminar os efeitos da ionosfera, juntamente com os produtos de órbitas precisas e relógios dos satélites, além da modelagem matemática para diversos efeitos/erros envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e efeitos presentes nas estações terrestres (MONICO, 2008; SEEBER, 2003; LEICK, 2004; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001). Para o caso de receptores de simples frequência, outras estratégias podem ser adotadas, como por exemplo, o uso do modelo de Klobuchar, mapas globais e regionais da ionosfera, entre outras (CAMARGO, 1999).

Considerando o caso da combinação *ion-free*, as equações de pseudodistância e fase (unidades de metro) do GPS podem ser escritas da seguinte forma:

$$PD_{IFr}^s = \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + m_{fw} ZWD + \varepsilon_{PD_r^s} \quad (1)$$

$$\lambda_{IF} \phi_{IFr}^s = \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + \lambda_1 N_{IF} + m_{fw} ZWD + \varepsilon_{\phi_{IFr}^s} \quad (2)$$

onde:

- PD_{IFr}^s - Combinação *ion-free* de pseudodistância;
- $\lambda_{IF} \phi_{IFr}^s$ - Combinação *ion-free* de fase;
- ρ_r^s - distância geométrica entre receptor r e o satélite s;
- $dt_r(t_r)$ - erro do relógio do receptor no instante de recepção t_r ;
- $dt^s(t^t)$ - erro do relógio do satélite no instante de transmissão t^t ;
- N_{IF} - Combinação *ion-free* de ambiguidade;
- ZWD - atraso troposférico úmido na direção do zênite;
- m_{fw} - função de mapeamento do Zwd para a direção receptor-satélite.

No caso do PPP pós-processado a correção precisa do relógio do satélite $dt^s(t^t)$ no tempo de transmissão t^t , geralmente, é obtida a partir de um arquivo no formato sp3, os quais são disponibilizados pelo IGS com taxas de dados

de 5 minutos (IGR) e de 30 segundos (IGS). O erro do relógio do receptor $dt_r(t_r)$ no tempo de recepção t_r deve ser estimado juntamente com os outros parâmetros no processo de ajustamento dos dados.

As equações de pseudodistância e de fase (Equações 1 e 2) requerem um processo de linearização para serem aplicadas no ajustamento dos dados (GEMAEL, 1994; MONICO, 2008). Assim, a linearização por série de Taylor é dada por:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta PD_{IF_r}^s \\ \Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s \end{bmatrix} \right\} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} & 1 & mf_w & 0 \\ -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} & 1 & mf_w & \lambda_{IF} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ ZWD \\ N_{IF}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

ΔPD_r^s - diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para pseudodistância);

$\Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s$ - diferença entre a fase observada e a calculada (vetor L para fase);

X^s, Y^s e Z^s - Coordenadas do satélite;

$(\rho_r^s)^0$ - distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados;

$E\{.\}$ - representa o operador de esperança matemática.

O ZTD é composto pelas componentes úmida e hidrostática, cada uma com sua respectiva função de mapeamento com descrito a seguir:

$$ZTD = mf_h ZHD + mf_w ZWD \quad (3)$$

No caso da estimativa como apresentado nas equações 1 e 2, somente a componente úmida é tomada como parâmetro. Desta forma, a componente hidrostática deve ser obtida a partir de algum modelo, como por exemplo, o de Hopfield, Saastamoinen ou de dados baseado em PNT.

A Função de Mapeamento de Viena envolve a utilização de coeficientes cujos valores são disponibilizados em um *grid* (grade) variando em função do tempo, da latitude e da longitude. Assim, o usuário deve realizar um procedimento de interpolação considerando a variação temporal e espacial. Os valores dos coeficientes a serem utilizados como entradas para a VMF e as sub-rotinas em Fortran para aplicação podem ser encontradas em <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/> (Acesso em: jul. 2014).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Para as análises foram utilizados dados da estação RECF (Recife) da RBMC, cujos dados foram processados no software RT_PPP. Foram escolhidos quatro dias ao longo do ano de 2013, mais especificamente, dia 44 (13 de fevereiro), dia 95 (5 de abril) dia 199 (18 de julho) e dia 296 (23 de outubro). Estas datas foram escolhidas por estarem em diferentes estações do ano. Os dados foram processados no modo PPP estático com soluções diárias e para eliminação dos efeitos da ionosfera aplicou-se a combinação *ion-free* (seção 2). Foram utilizadas órbitas e correções precisas dos relógios dos satélites advindas do IGS (*International GNSS Service*). Além disto, foram aplicadas correções devido ao centro de fase das antenas, carga de marés oceânicas, correção de marés terrestres, fase *windup*, correções relativísticas e outras (MARQUES, 2012).

As coordenadas estimadas na solução diária foram comparadas com as coordenadas advindas da solução semanal da rede SIRGAS-CON (Sirgas Contínuo), cujas coordenadas são disponibilizadas, atualmente em ITRF2008 (*International Terrestrial Reference Frame 2008*). As discrepâncias em coordenadas cartesianas (denominadas de erros) foram convertidas para o Sistema Geodésico Local (SGL) com origem no ponto e as precisões foram propagadas para tal sistema.

Ao processar os dados utilizando o modelo de Hopfield, foi escolhido um valor padrão de pressão (961 mbar), temperatura (25 C) e umidade (50%), o que proporciona um valor constante de ZTD ao longo do dia. Este fato representa um problema ao utilizar tal modelo, o que pode ser minimizado ao utilizar os valores de pressão e temperatura advindo do modelo GPT (*Global Pressure and Temperature*) (Boehm, 2004). A Figura 1 apresenta a série

temporal diária do ZTD para os dias escolhidos de 2013 ao considerar o modelo de Hopfield, o modelo ECMWF e os valores estimados no PPP.

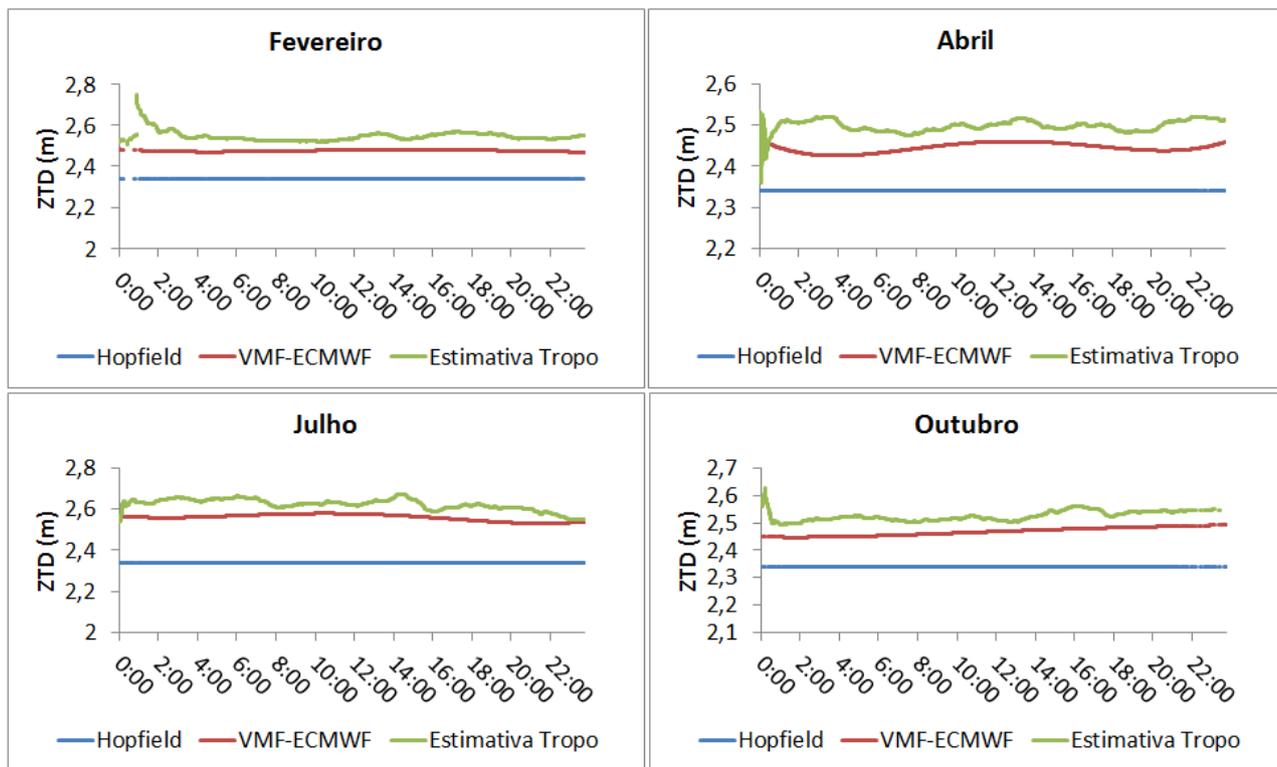


Figura 1 – Valores do ZTD para os dias escolhidos

Verifica-se na Figura 1 que o modelo de Hopfield apresenta valor de ZTD constante, o que acontece devido aos parâmetros de entrada do modelo (pressão, temperatura e umidade) serem adotados como constantes. Os valores de ZTD interpolados do modelo ECMWF se aproximam mais dos valores estimados no PPP, contudo compõem diferenças que podem ser classificadas como uma tendência. Nota-se comportamento cíclico diário nos valores de ZTD, principalmente para os meses de abril e julho.

A Figura 2 apresenta o Erro Médio Quadrático (EMQ) para as componentes E, N e Up do Sistema Geodésico Local (SGL), sendo que as diferenças encontradas em coordenadas cartesianas (adotadas como tendência), ao comparar a solução obtida com as coordenadas semanais SIRGAS-CON, foram transformadas para tal sistema. O EMQ foi calculado como a resultante das tendências e precisão de cada componente no SGL.

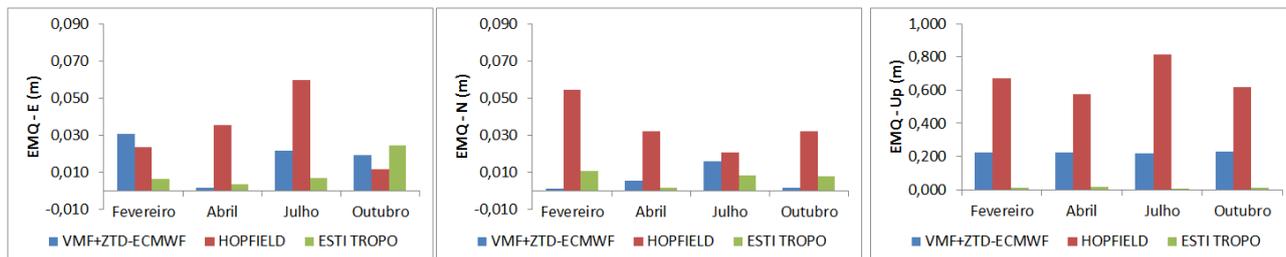


Figura 2 – EMQ para as componentes E, N e Up do SGL

A partir da Figura 2, pode-se verificar que em geral os erros na componente E e N ao utilizar o modelo ECMWF são melhores que ao utilizar o modelo de Hopfield, com exceção para o mês de Fevereiro e Outubro na componente E. As maiores diferenças são notadas na componente altimétrica, o que era de se esperar, já que os erros da troposfera afetam diretamente a estimativa dos parâmetros de altura e erro do relógio do receptor. Ao utilizar os valores de ZTD do modelo ECMWF no PPP os resultados em altimetria (Up) foram melhores que ao utilizar Hopfield para todos os casos e a melhor solução é obtida com a estimativa dos parâmetros da troposfera, cujos valores de Up quase não estão visíveis a partir do gráfico Up (mais a direita da Figura 2).

A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam os valores de EMQ nas componentes 2D e 3D, os quais são calculados considerando a resultante do EMQ em E, N e Up.

Tabela 1 – EMQ 2D (m)

	VMF+ZTD-ECMWF	HOPFIELD	ESTI TROPO
Fevereiro	0,031	0,059	0,012
Abril	0,005	0,048	0,004
Julho	0,027	0,063	0,010
Outubro	0,019	0,034	0,026

Para o EMQ em planimetria no PPP com o uso da VMF com ZTD do ECMWF apresentou valor máximo de 0,031 m e mínimo de 0,027 m. Ao usar o modelo de Hopfield, o EMQ máximo em planimetria foi de 0,063 m e o mínimo foi de 0,034 m. Os melhores resultados em EMQ é com a estimativa da troposfera com valores máximo e mínimo de 0,004 e 0,026 m, respectivamente.

Tabela 2 – EMQ – 3D (m)

	VMF+ZTD-ECMWF	HOPFIELD	ESTI TROPO
Fevereiro	0,224	0,674	0,015
Abril	0,222	0,575	0,019
Julho	0,221	0,819	0,011
Outubro	0,233	0,618	0,027

Para o EMQ 3D com o uso da VMF e ZTD do ECMWF o valor máximo foi de 0,233 m e mínimo de 0,221 m. Ao usar o modelo de Hopfield, o EMQ máximo em planimetria foi de 0,819 m e o mínimo foi de 0,575 m. O EMQ com a estimativa da troposfera apresentou valores máximo e mínimo de 0,011 e 0,015 m, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho o método PPP foi avaliado com a utilização dos valores de ZTD advindos do modelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), cujos valores são disponibilizados juntos com os coeficientes da Função de Mapeamento de Viena. As análises também envolveram a estimativa da troposfera e a utilização do modelo de Hopfield. Os dados GPS coletados na estação RECF foram processados no software RT_PPP considerando quatro dias em períodos distintos do ano de 2013 caracterizando diferentes estações do ano. Os valores interpolados do ZTD-ECMWF ficaram próximos dos valores estimados para a estação RECF. O ZTD do modelo de Hopfield é constante durante o dia devido à adoção de valores constantes de pressão, temperatura e umidade relativa do ar.

As coordenadas estimadas com diferentes estratégias de correção da troposfera foram comparadas com aquelas advindas da solução semanal da rede SIRGAS-CON. Em geral, a utilização do modelo de Hopfield no PPP apresentou bons resultados para a componente planimétrica com valores de máximo de EMQ igual 0,063 m e mínimo de 0,034 m. O EMQ em planimetria para o caso da utilização do ZTD-ECMWF e VMF foi máximo de 0,031 m e mínimo de 0,027 m. Os problemas maiores se concentram na componente altimétrica (Up), já que o atraso troposférico afeta diretamente a estimativa desta componente e também o erro do relógio do receptor. Comp pode ser visto na figura 2, os erros em altimetria para a utilização do ZTD-ECMWF e VMF apresentaram EMQ na ordem de 0,20m, enquanto que Hopfield foi de até 0,8 m. No caso da estimativa da troposfera, os valores ficam abaixo de 0,05 m.

Em termos de EMQ 3D, a utilização do modelo de Hopfield apresentou valores variando de 0,575 m até 0,819 m, enquanto que o modelo ECMWF e VMF apresentou valores da ordem de 0,20 m. A estimativa da troposfera apresentou EMQ melhor que 0,05 m. Pode-se dizer que a utilização do modelo ZTD-ECMWF com a VMF apresentou bons resultados quando comparado com a solução utilizando o modelo de Hopfield. É importante ressaltar que os experimentos apresentados neste artigo foram realizados somente para uma estação no Brasil, no caso a estação RECF. Outros experimentos serão realizados considerando mais estações com boa distribuição geográfica, além de dados em intervalões de tempo maiores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo apoio em forma de bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

- BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses. **Geophys. Res. Lett.** 2004. 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984.
- BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, **Geophys. Res. Lett.** 2006. Vol. 33, L07304, doi: 10.1029/2005GL025546
- CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em receptores de uma frequência.** 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- GELB, A.; KASPER JR., J. F.; NASH JR., R. A.; PRICE, C. F.; SUTHERLAND JR., A. A. **Applied optimal estimation.** Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press, 1974. 374p.
- GEMAEL C. **Introdução ao ajustamento de observações: Aplicações Geodésicas.** Curitiba, PR: UFPR, 1994. 319 p.
- GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem Neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e Assimilação de Dados Locais e Robusta Avaliação Utilizando Observações GNSS.** 2013. 245 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: theory and practice.** 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.
- LEICK, A. **GPS satellite surveying.** 3rd. ed.: New York: John Wiley & Sons, 2004. 435p.
- MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS.** 2012. 245 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** 2ª Ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.
- NIELL, A. E. Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models. **Phys. Chem. Earth**, v. 26, 2001.
- NIEVINSKI, F. G. Ray-tracing Options to Mitigate the Neutral Atmosphere Delay in GPS. 2009. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 262, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 232 pp. 2009.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.
- SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: Sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia.** Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.
- TEUNISSEN, P. J. **Dynamic data processing: Recursive least-squares.** Delft University Press, 2001.
- SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications.** 2ª ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.