

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO UTILIZANDO DADOS GPS SOB INFLUÊNCIA DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

*Assessment of PPP accuracy using GPS data under scintillation
ionospheric influence*

Heloísa Alves Silva Marques

Instituto Militar de Engenharia (IME)

Seção de Engenharia Cartográfica

Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha, Rio de Janeiro/RJ

heloh2o@gmail.com

Haroldo Antonio Marques

Universidade Federal de Pernambuco

Departamento de Engenharia Cartográfica

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - 2º andar - CDU - Recife-PE

haroldoh2o@gmail.com

João Francisco Galera Monico

Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista (FCT/UNESP)

Departamento de Engenharia Cartográfica

Rua Roberto Simonsen, 305 - Centro Educacional, Presidente Prudente/SP

galera@fct.unesp.br

Resumo:

Atualmente, o GNSS, em especial o GPS, é uma das tecnologias mais utilizadas para realizar posicionamento para fins geodésico, cadastrais, georreferenciamento de imóveis rurais entre diversas outras aplicações. No processamento de dados GPS utilizando o PPP, normalmente, utilizam-se modelos estocásticos numa forma simplificada, como o modelo padrão, o qual assume que todas observações de mesma natureza GNSS têm a mesma variância e são estatisticamente independentes. Porém, tal suposição não reflete a realidade. Desta forma, atualmente os modelos estocásticos vêm sendo pesquisados com maior profundidade, por exemplo, considerando a variação dos ângulos de elevação dos satélites e os efeitos de cintilação ionosférica, dentre outros. O Brasil, por estar numa região equatorial, sofre forte influência de cintilação ionosférica e outros efeitos relacionados à ionosfera. Tais efeitos influenciam os resultados do posicionamento geodésico em termos de acurácia posicional. Dessa forma, é apresentada nesse artigo a aplicação de diferentes estratégias de modelagem estocástica, visando a análise da acurácia posicional no método PPP, considerando dados rastreados em períodos de influência dos efeitos de cintilação ionosférica. Os resultados mostraram que ao aplicar uma modelagem estocástica adequada os resultados do posicionamento são mais confiáveis e realísticos.

Palavras-chave: PPP; cintilação ionosférica; modelagem estocástica; georreferenciamento de imóveis rurais.

Abstract

Nowadays, GNSS, in particular GPS, is one of the most used technologies to accomplish positioning, either for geodetic purposes, georeferencing of rural properties, technical cadastre among many other applications. In the GPS data processing using the PPP usually is used stochastic models in a simplified form as the standard model, which assumes that all similar GNSS observations have the same variance and are statistically independent. However, this assumption does not reflect the reality. Thus, currently the topic stochastic models for positioning have been investigated, for example, considering the satellites elevation angles variation and the ionospheric

scintillation effects, among others. The Brazil, for being in an equatorial region, is strongly influenced by ionospheric scintillation and other effects related to the ionosphere. These effects influence the geodetic positioning results in terms of accuracy. Then, it is presented in this paper the application of different strategies of stochastic modeling, aiming at the analysis of positional accuracy in the PPP method considering data tracked in periods with influence of the ionospheric scintillation effects. The results showed that when applying an adequate stochastic modeling in the positioning the results are more reliable and realistic.

Keywords: PPP; ionospheric scintillation; stochastic modelling; georeferencing of rural properties.

1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*), em especial o GPS (*Global Positioning System*), é amplamente utilizado nos dias atuais com diversas aplicações nas áreas de engenharia, podendo-se citar, por exemplo, o georrefenciamento de imóveis rurais, cadastro territorial urbano, navegação aérea, marítima e terrestre, entre outros. O GNSS engloba, além do GPS (EUA), os sistemas GLONASS (Rússia), GALILEO (Comunidade Europeia) e o BEIDOU/COMPASS (China), além dos sistemas de aumento (*Augmentation Systems*) e outras definições tal como acurácia e integridade. Em se tratando de posicionamento, especial atenção tem sido dada nos últimos anos para o Posicionamento Por Ponto Preciso (PPP) que permite alcançar acurácia posicional de ordem centimétrica.

O método PPP quando aplicado em sua forma convencional apresenta tempo de convergência de ajustamento relativamente longo para muitas aplicações práticas devido ao parâmetro ambiguidade da fase da onda portadora, a qual é fortemente correlacionada com outros parâmetros estimados. Neste caso, pesquisas têm sido conduzidas no sentido de obter a solução inteira das ambiguidades no método PPP, o que reduziria consideravelmente o tempo de convergência (BLEWITT, 2006; GENG *et al.*, 2011; ALVES, 2015). Um dos fatores mais impactantes na solução das ambiguidades no PPP está relacionado com os efeitos da ionosfera, principalmente para regiões equatoriais, no qual o Brasil está localizado (MATSUOKA, 2007).

O efeito ionosférico de primeira ordem, geralmente, é levado em consideração no PPP através da combinação linear *ion-free* (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008). Existem ainda, os efeitos ionosféricos de segunda e terceira ordem, os quais são dependentes respectivamente do campo geomagnético da Terra e da máxima densidade de elétrons através da camada da ionosfera (ODJIK, 2002, MARQUES *et al.*, 2011). Além desses efeitos, a cintilação ionosférica também afeta o resultado do posicionamento geodésico. A cintilação ionosférica é provocada pela variação na densidade de elétrons na camada ionosférica, causando assim variações de amplitude, de fase, de polarização e no ângulo do sinal GNSS e até mesmo perda do sinal, dificultando assim, a solução das ambiguidades e conseqüentemente prejudicando os resultados do posicionamento. As cintilações ionosféricas ocorrem principalmente e de forma particular em regiões equatoriais, de altas latitudes e regiões polares. (DAVIES, 1990; KLOBUCHAR, 1996; CONKER *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2010; AQUINO *et al.*, 2009).

No processamento de dados no PPP, geralmente, assume-se que as observações (pseudodistância e fase da onda portadora) para cada satélite têm a mesma precisão e são estatisticamente independentes. Desta maneira, os modelos estocásticos adotados não são realísticos, proporcionando assim, no final do processamento dos dados envolvidos, precisões muito otimistas. Uma maneira para solucionar este problema é a adoção e implementação de uma modelagem estocástica mais realística e adequada. Trabalhos vem sendo realizados

considerando na modelagem estocástica a variação dos ângulos de elevação dos satélites e também os efeitos de cintilação ionosférica (WANG, 1999; CONKER et al., 2002, SILVA, 2009; AQUINO et al., 2009; MARQUES, 2013). Como exemplo, em Silva et al. (2010) foram apresentados análises de modelagem estocástica para mitigação de cintilação ionosférica no posicionamento relativo e por ponto simples.

Sendo assim, neste artigo é apresentada uma avaliação da acurácia no PPP considerando diferentes modelos estocásticos utilizando dados GPS sob influência de cintilação ionosférica utilizando o método PPP. Para a realização de experimentos foi utilizado o software 'RT_PPP' desenvolvido por Marques et al. (2014) e os dados GPS coletados na rede CIGALA/CALIBRA. Os resultados apresentam melhorias significativas da ordem de 50% ao utilizar uma modelagem estocástica mais adequada, proporcionando assim resultados mais confiáveis e realistas.

2 Cintilação ionosférica

A variação na camada da ionosfera pode ocasionar diferentes efeitos, dentre eles a cintilação ionosférica que provoca variações em amplitude e fase no sinal GNSS. Na região equatorial os efeitos de cintilação ionosférica ocorrem devidos, principalmente, a anomalia equatorial e também da ocorrência de bolhas ionosféricas. Já nas regiões de altas latitudes são devido a tempestades geomagnéticas. A cintilação ionosférica é mais forte em períodos de máximo solar (Figura 1) (SKONE, 2000, CONKER et al., 2002; SILVA, 2009; MARQUES, 2013). A Figura 2.2 mostra a distribuição geográfica dos efeitos de cintilação ionosférica.

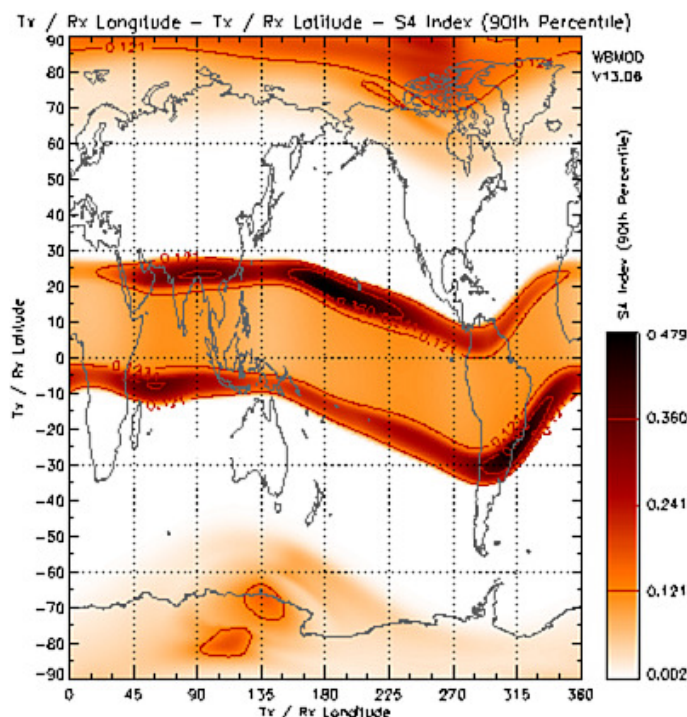


Figura 1 – Índice S4 em L1 (GPS) assumindo 23 horas local em todas as longitudes

Fonte: <http://www.ips.gov.au/Satellite/6/3>.

Os efeitos de cintilação ionosférica podem ser analisados a partir dos índices de amplitude (S_4) e de desvio-padrão de fase (σ_ϕ). Os valores de σ_ϕ são calculados a cada 60 segundos sobre intervalos de 1, 3, 10, 30 e 60 segundos, e depois é feita uma média destes cinco valores sobre um minuto, sendo denominado nesse artigo de Phi60 (VAN DIERENDONK, 2001; CONKER et al., 2002; SILVA, 2009).

A intensidade de cintilação ionosférica pode ser classificada da seguinte forma (TIWARI et al., 2011):

Tabela 1 – Classificação da intensidade da cintilação ionosférica

Classificação da cintilação	Índices
Forte	($S_4 > 1,0$ ou $\text{Phi}60 > 0,8$)
Moderada	($0,5 \leq S_4 \leq 1,0$ ou $0,4 \leq \text{Phi}60 \leq 0,8$)
Fraca	($S_4 < 0,5$ ou $\text{Phi}60 < 0,4$)

No Brasil, há uma rede de estações de monitoramento que fornece informações de cintilação ionosférica tal como S_4 e Phi60. Esta rede de estações tem sido implantada desde 2011 dentro do contexto dos projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL*). Ambos os projetos foram concebidos visando o desenvolvimento de aplicações para mitigação de efeitos de cintilação ionosférica no posicionamento GNSS e navegação (VANI; SHIMABUKURO; MONICO, 2016). A Figura 2 mostra a localização das estações da rede.

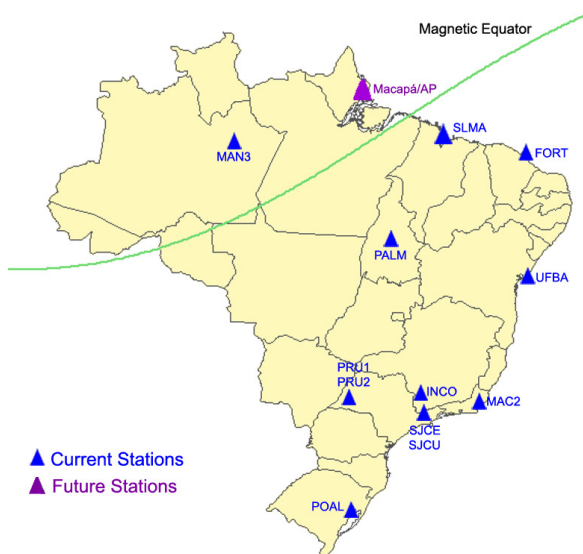


Figura 2 – Distribuição das Estações da Rede CIGALA/CALIBRA. Status em setembro de 2016.
Fonte: Universidade Estadual Paulista - Campus Presidente Prudente (2016).

3 Modelos funcionais e estocásticos no PPP

As observáveis básicas do sinal GNSS são a pseudodistância e a fase da onda portadora e são expressas, respectivamente, por (SEEBER, 2003; MONICO, 2008):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + Orb^s + dm_r^s + v_{PD_r^s}, \quad (2)$$

$$\varphi_r^s = f_i \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s L_i + T_r^s + Orb_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f_i (dt_r - dt^s) + (\varphi_t^s(t_0) - \varphi_r(t_0)) + N_r^s + v_{\varphi_r^s}, \quad (3)$$

em que, ρ_r^s é a distância geométrica entre o satélite e o receptor, a qual deve ser calculada entre o instante de transmissão e o de recepção do sinal; c é a velocidade da luz no vácuo; dt_r é o erro do relógio do receptor; dt^s é o erro do relógio do satélite; I_r^s é o efeito provocado pela ionosfera; T_r^s é o efeito provocado pela troposfera; Orb^s é o erro da órbita (posição) do satélite; dm_r^s é o efeito provocado pelo multicaminho; $v_{PD_r^s}$ são os efeitos aleatórios e não modelados da pseudodistância; f_i é a frequência da fase; $\varphi_t^s(t_0)$ é a fase inicial no satélite, correspondente à época de referência t_0 ; $\varphi_r(t_0)$ é a fase inicial no receptor, correspondente à época de referência t_0 ; N_r^s é a ambiguidade da fase no instante inicial de rastreamento; $v_{\varphi_r^s}$ são os efeitos aleatórios e não modelados da fase da portadora.

O modelo funcional mais utilizado para o PPP está relacionado como a combinação livre da ionosfera (*ion-free*), uma vez que essa permite a eliminação matemática dos efeitos ionosféricos de primeira ordem. A combinação *ion-free* para as observações de pseudodistância e da fase são dadas por (LEICK, 2004; MONICO, 2008):

$$PD_{IFr}^s = m_1 PD_{r1}^s + m_2 PD_{r2}^s \quad (4)$$

$$\varphi_{IFr}^s = n_1 \varphi_{r1}^s + n_2 \varphi_{r2}^s \quad (5)$$

em que, φ_{r1}^s e φ_{r2}^s , representam as medidas de fase relacionadas, respectivamente, com as frequências L1 e L2 e m_1 e m_2 são os coeficientes multiplicadores da combinação relacionados à pseudodistância e n_1 e n_2 relacionados à fase. Os valores dos coeficientes multiplicadores podem ser obtidos por diferentes estratégias, as quais podem ser verificadas em Seeber (2003), Monico (2008), Leick (2004), entre outros.

O modelo funcional linearizado envolvendo pseudodistância e fase no PPP utilizando o MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) é expresso, respectivamente por:

$$E\left\{\Delta PD_{IF}^{s_i}\right\} = -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{\left(\rho_r^{s_i}\right)^0} \Delta X_r - \frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{\left(\rho_r^{s_i}\right)^0} \Delta Y_r - \frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{\left(\rho_r^{s_i}\right)^0} \Delta Z_r + c(cdt_r) + M_f Zwd \quad (6)$$

$$E\left\{\Delta \lambda_{IF} \Phi_{IF}^{s_i}\right\} = -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{\left(\rho_r^{s_i}\right)^0} \Delta X_r - \frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{\left(\rho_r^{s_i}\right)^0} \Delta Y_r - \frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{\left(\rho_r^{s_i}\right)^0} \Delta Z_r + c(cdt_r) + M_f Zwd + \lambda_{IF} N_{IF} \quad (7)$$

em que: X^{s_i} , Y^{s_i} e Z^{s_i} são as coordenadas do satélite i ; X_r^0 , Y_r^0 e Z_r^0 são as coordenadas aproximadas do receptor; Zwd é atraso zenital troposférico na componente úmida; M_f é a função de mapeamento do Zwd para a direção receptor-satélite; λ_{IF} é o comprimento de onda da combinação *ion-free* e N_{IF} é a ambiguidade da *ion-free*.

Com relação à construção do modelo estocástico (representado pela MVC das observações), geralmente, considera-se todas as observações de pseudodistância e fase da onda portadora sejam iguais, sendo essa última cerca de cem vezes melhor que a primeira. Considera-se ainda que as observações sejam independentes. Para o caso da fase, a MVC será da forma (JIN; WANG; PARK, 2005):

$$\Sigma_{\Phi_r^{s_i}} = \sigma_{\Phi_i}^2 I \quad (8)$$

em que $\sigma_{\Phi_i}^2$ é a variância da pseudodistância na portadora L_i e I é a matriz identidade.

No caso do PPP em que se utiliza a combinação *ion-free* das observáveis, deve-se utilizar Lei de propagação de covariâncias. Como exemplo, para o caso da pseudodistância, tem-se que a precisão para cada satélite é dada por:

$$\sigma_{\Phi_{IF}^{s_i}} = \sqrt{m_1^2 \sigma_{\Phi_{r_1}^{s_i}}^2 + m_2^2 \sigma_{\Phi_{r_2}^{s_i}}^2} \quad (9)$$

Sendo assim, a MVC das observações *ion-free* é expressa por:

$$\Sigma_{Lb} = \text{diag} \left(\sigma_{PD_{IF}^{s_1}}^2 \quad \sigma_{PD_{IF}^{s_2}}^2 \quad \dots \quad \sigma_{PD_{IF}^{s_n}}^2 \quad \sigma_{\Phi_{IF}^{s_1}}^2 \quad \sigma_{\Phi_{IF}^{s_2}}^2 \quad \dots \quad \sigma_{\Phi_{IF}^{s_n}}^2 \right) \quad (10)$$

A modelagem estocástica das observáveis GNSS pode ser construída levando em consideração, por exemplo, a variação dos ângulos dos satélites ou a influência dos efeitos de cintilação ionosférica. Maiores detalhes podem ser encontrados em Conker et al. (2002), Silva et al. (2010). Em Marques (2013) é apresentada uma modelagem estocástica para o caso do PPP

em que realiza a combinação de variação dos ângulos de elevação dos satélites e dos efeitos de cintilação ionosférica baseadas na formulação descrita em Conker et al. (2002). Os experimentos e análises realizados são apresentados na próxima seção.

4 EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Foram realizados experimentos utilizando dados coletados das estações PALM (Figura 2) nos dias 21 de dezembro de 2011 e 08 de março de 2012. A partir dos índices de cintilação S4 e Phi60 (Figura 3) verifica-se que os dados referentes ao primeiro dia estão sob efeitos de moderada cintilação ionosférica e para o segundo dia sob fraca cintilação (ver Tabela 1).

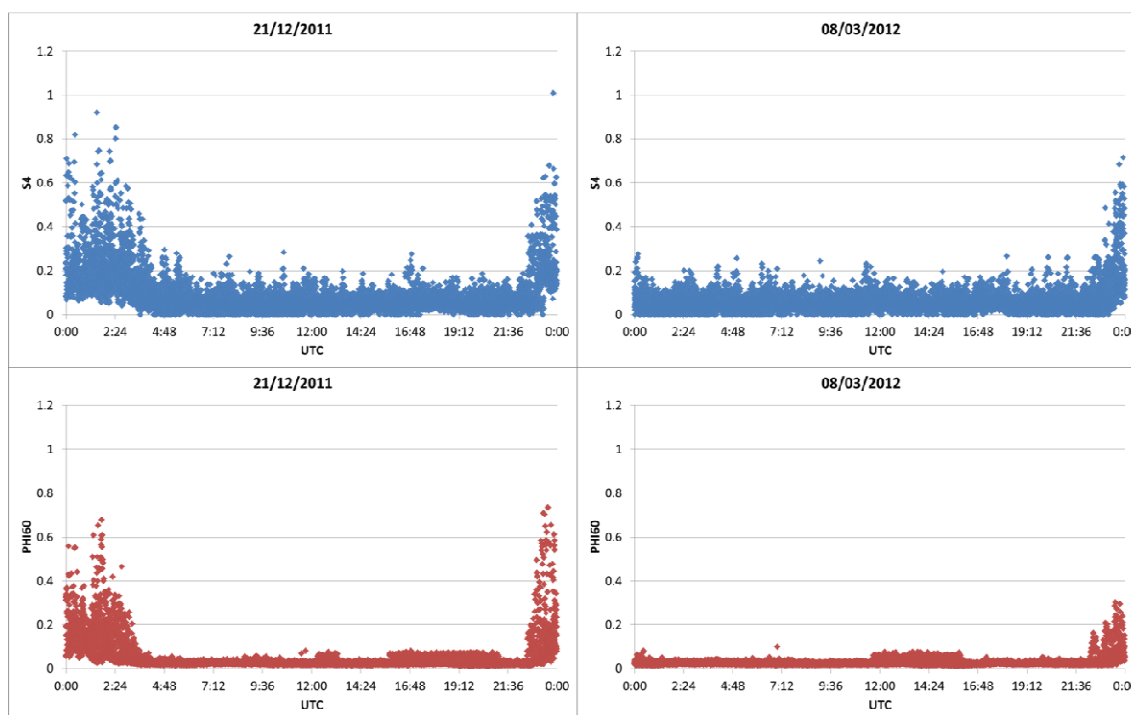


Figura 3 – Índices S4 e Phi60 para a estação PALM

Os dados GPS foram processados no software RT_PPP (MARQUES, 2014) utilizando-se o método PPP no modo cinemático. Algumas das configurações utilizadas durante os processamentos foram:

- Máscara de elevação igual a 10°;
- Precisões: $\sigma_{CA}=0,8$ m; $\sigma_{P2}=1,0$ m; $\sigma_{L1}=0,008$ m e $\sigma_{L2}=0,010$ m;
- Correção da troposfera: Hopfield;
- Correção da ionosfera: *Ion-free*.

Os experimentos foram realizados considerando três estratégias de modelagem estocástica:

- **Mod_Padrão:** em função das precisões das observações de código e fase (ver Eq. 8);
- **Mod_Elev:** em função das precisões das observações de código e fase ponderada pelo inverso do seno do ângulo de elevação dos satélites;
- **Mod_Cint:** modelagem estocástica em função da cintilação ionosférica.

O erro 3D é calculado pela resultante das discrepâncias ($\text{Erro3D} = \sqrt{DE^2 + DN^2 + DU^2}$) (Figura 4):

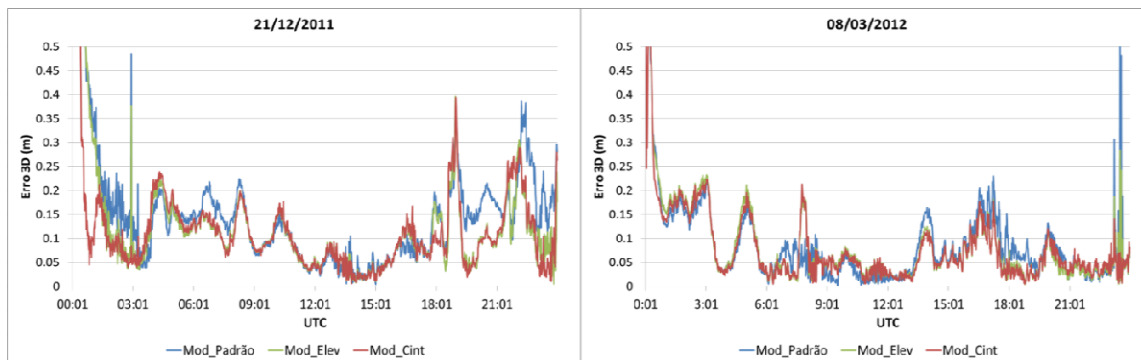


Figura 4 - Erro 3D da estação PALM

Ao analisar a Figura 4 é possível verificar que ao aplicar a modelagem em função da cintilação (Mod_Cint) os valores do erro 3D foram menores com relação ao Mod_Padrão principalmente nos períodos noturnos, coincidentes com as ocorrências de cintilações mais forte (Figura3) principalmente no início (meia noite a quatro horas) e no final da série temporal (vinte duas horas à meia noite).

A análise da acurácia pode ser realizada a partir do EMQ (Erro Médio Quadrático). A Figura 5 mostra o valor do EMQ diário para cada componente do SGL (E, N e U) para os três tipos de modelos estocásticos adotados.

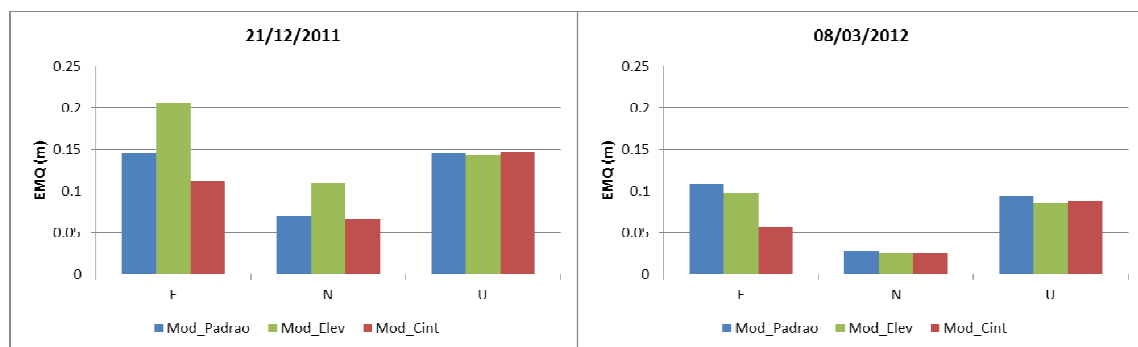


Figura 5 - EMQ diário nas componentes E, N e U para estação PALM

Analisando a Figura 5, verifica-se que, no geral, ao aplicar modelagem estocástica por cintilação ionosférica juntamente com ângulo de elevação (Mod_Cint) as melhorias em relação

ao caso padrão (Mod_Padrão) foram maiores para a componente E. É interessante observar que ao aplicar somente ponderação por elevação (Mod_Elev), os valores de EMQ diário em E e N ficaram piores que o caso padrão para o dia 21/12/2011, o qual apresentou cintilação de moderada a forte. Contudo ao aplicar a modelagem de cintilação juntamente com ângulo de elevação, as melhorias em relação ao caso padrão se concentraram principalmente na componente E.

Pode-se verificar nesses experimentos que uma modelagem estocástica mais adequada produz resultados mais realísticos e confiáveis. No entanto, deve-se sempre tomar precauções com relação à escolha dessa modelagem.

Na Figura 6 são apresentadas as precisões posicionais (resultante da precisão planimétrica) e altimétrica (U) para os dois dias:

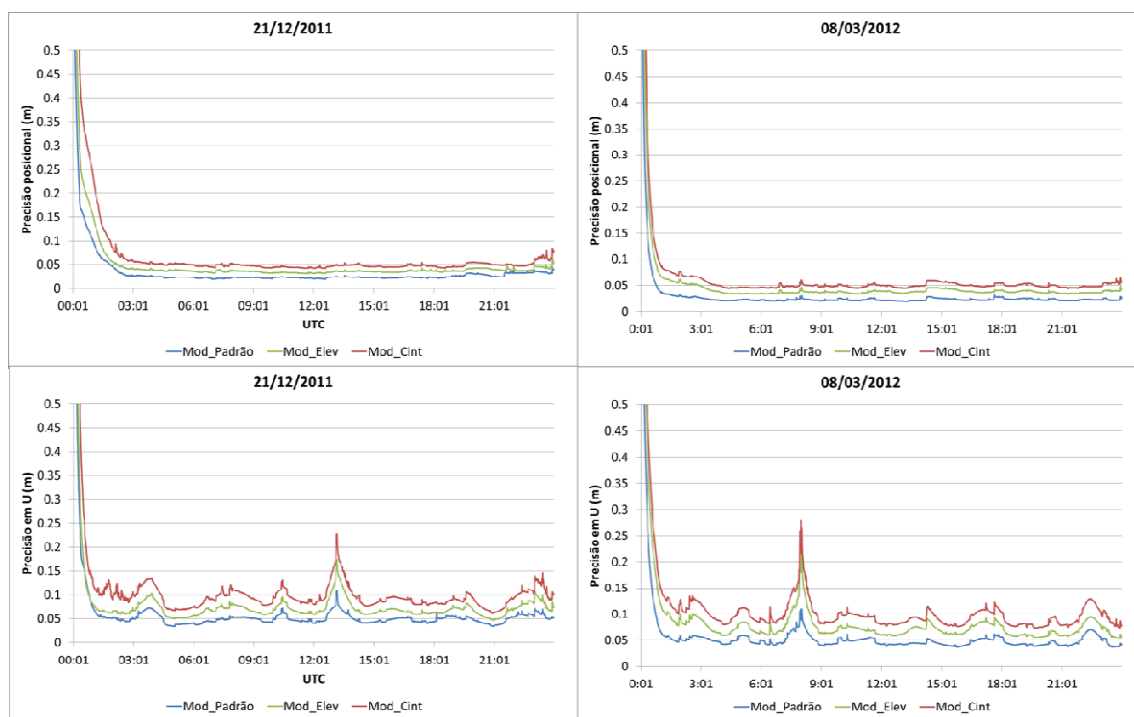


Figura 6 – Precisões posicionais e altimétricas para estação PALM

Ao analisar a Figura 6 verifica-se que há uma degradação nos valores das precisões ao modificar a modelagem estocástica, haja vista a propagação de erros.

Foi possível constatar nos dois dias de dados que o período noturno é o mais afetado pelos efeitos de cintilação ionosférica. Sendo assim, foram plotadas as séries temporais do Erro 3D (Figura 6) no PPP cinemático considerando somente os períodos mais afetados por cintilação para os dois dias. Além disso, foram calculados os valores de melhoria em porcentagem (Tabela 2) ao se utilizar a modelagem Mod_Elev e Mod_Cint em relação à Mod_Padrão e também ao utilizar a modelagem Mod_Cint em relação à Mod_Elev considerando o período mais afetado por cintilação.

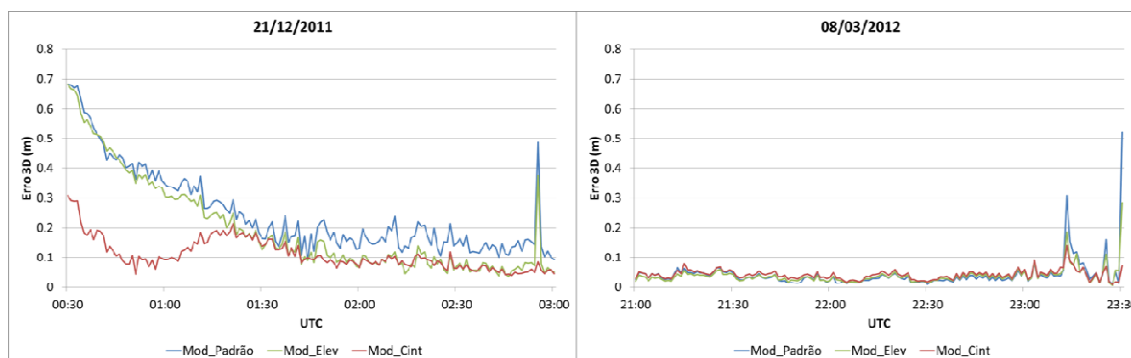


Figura 6 - Erro 3D para os períodos com maior efeito de cintilação ionosférica

Tabela 2: Melhorias em porcentagem das modelagens estocásticas

Dia	Período	Melhoria em relação ao Mod_Padrão		Melhoria em relação ao Mod_Elev
		Mod_Elev	Mod_Cint	Mod_Cint
21/12/2011	00:30 h às 03:00 h	12,02%	56,94%	51,06%
08/03/2012	21:00 h às 23:30 h	26,62%	30,33%	5,06%

Analisando a Figura 6 e a Tabela 2 verifica-se que ao aplicar a modelagem Mod_Elev obteve-se melhorias em torno de 12% e 26%, respectivamente, para os resultados dos dias 21/12/2011 e 08/03/2012 com relação à modelagem padrão. Já ao utilizar modelagem Mod_Cint os valores atingiram, respectivamente, 57% e 30% em relação ao modo padrão. As melhorias ao utilizar Mod_Cint em relação à utilização de Mod_Elev foram de 51% para o dia 21/12/2011 e de 5% para o dia 08/03/2012.

Conclui-se que a modelagem estocástica Mod_Cint, a qual foi utilizada junto com ângulo de elevação, apresentou melhorias significativas (acima de 50%) nos períodos com efeitos de cintilações mais predominantes.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada análise de acurácia no PPP considerando diferentes estratégias de modelagem estocástica, Mod_Padrão, Mode_Elev e Mod_Cint considerando dados sob influência de cintilação ionosférica.

Pode-se verificar que no processamento dos dados do dia 21/12/2011 (moderada cintilação), o nível de melhoria (Tabela 2) ao utilizar a modelagem em função da cintilação ionosférica juntamente com elevação foi de aproximadamente 57% em relação ao caso padrão. Já ao utilizar o modelo estocástico somente em função do ângulo de elevação, essa melhoria foi de aproximadamente 12%. Para o PPP do dia 08/03/2012 (fraca cintilação), o nível de melhoria, seja da ponderação por cintilação juntamente com elevação ou somente por ângulo de elevação, foi de aproximadamente 30%.

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que a adoção de uma modelagem estocástica adequada no processamento de dados GPS utilizando o método PPP permite que se obtenham resultados mais acurados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro no desenvolvimento de Projetos Universais (Processos: 448488/2014-0 e 475775/2013-9) e aos parceiros do CIGALA projetos e CALIBRA pelo acesso ao banco de dados. Ambos os projectos foram financiados pela European Comission (EC), no âmbito do FP7-GALILEO-2009-GSA e FP7-GALILEO-2011-GSA-1a, respectivamente. Os autores agradem também a FAPESP (Projeto Número 06/04008-2) e colaboradores associados.

Referências Bibliográficas

ALVES, C. M. D. **PPP Pós-Processado e em Tempo Real com Solução de Ambiguidades no Contexto de Redes GNSS**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2015.

AQUINO, M.; MONICO, J. F. G.; DODSON, A.; MARQUES, H. A.; DE FRANCESCHI, G.; ALFONSI, L., ROMANO, V.; ANDREOTTI, M., 2009. Improving the GNSS Positioning Stochastic Model in the Presence of Ionospheric Scintillation. **Journal of Geodesy**, DOI 10.1007/s00190-009-0313-6, 83(10), 953-966.

BLEWITT, G. GPS data processing methodology. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for geodesy**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1998. Cap. 6, p. 231-270.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based augmentation system availability. **Radio Science**. vol. 37, n. 0, 2002.

DAVIES, K. **Ionospheric radio**. England: Short Run Press LTd., 1990, 580p.

GENG, J.; TEFERLE, F N; MENG, X.; DODSON, A H. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. **Advances in Space Research**, 2011.v.47, p. 1664-1673.

JIN, S.; WANG J.; PARK P. An improvement of GPS height estimations: stochastic modeling. **Earth Planets Space**, 57, p. 253–259, 2005.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JUNIOR, J. J. **Global Positioning System: theory and applications**. Wahington, Dc: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996. Cap. 12, p. 485-515.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3 .ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.435 p.

MARQUES, H. A. S. **Modelo estocástico para dados GNSS e séries temporais de coordenadas GNSS**. 2013. 205 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2013.

MARQUES, H. A.; **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2012. 212f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX_HO: Second and Third Order Ionospheric Corrections for RINEX Observation Files. **GPS Solutions**, 2011.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; 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.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263 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: Unesp, 2008. 476p.

ODJIK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays**. 2002. 242 f. PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SILVA, H. A.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; DE FRANCESCHI, G.; DODSON, A., 2010. Stochastic Modelling Considering Ionospheric Scintillation Effects on GNSS Relative and Point Positioning. **Advances in Space Research: Special Issue Space Weather Advances**, 45(9), 1113-1121.

SILVA, H. A. **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS**. 2009. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2009.

SKONE, S. GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillations conditions. In: **IGS Network Workshop**, SoriaMoria, Oslo, Norway, 12-14 July, 2000. Disponível em: <<http://www.gdiv.statkart.no/igsworkshop/book/>>. Acesso em: jun. de 2008.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. 3WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region. IEEE, 2011.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - CAMPUS PRESIDENTE PRUDENTE.
CIGALA/CALIBRA/Ionospheric Scintillation. 2016. Disponível em: <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br>>. Acesso em: set 2016.

VAN DIERENDONK, A. J. Measuring ionospheric scintillation effects from GPS signals. **ION 59th Annual Meeting**. Albuquerque, New Mexico, 11-13. June 2001, p. 391-396.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR Query Tool. **Computers & Geosciences**. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.022>>. Acesso em: set. 2016.

WANG, J. **Modelling and quality control for precise GPS and GLONASS satellite positioning**. 1999. 171 p. PhD Thesis. School of Spatial Sciences, Curtin University of Technology.