

EFEITO DIÁRIO DA REFREÇÃO IONOSFÉRICA NO POSICIONAMENTO POR PONTO DA ESTAÇÃO DA REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DO MUNICÍPIO DE MONTE CARMELO - MG

G. G. Barbosa¹, I. M. Arruda¹, L. R. Mendonça¹, M. D. Pereira¹

¹Universidade Federal de Uberlândia

Comissão II – Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

Dentre as técnicas de posicionamento utilizando sistemas de navegação por satélite globais (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*), merece destaque o Posicionamento por Ponto Simples (PPS), pois é a técnica implementada na maioria dos dispositivos móveis como celulares e sistemas de navegação automotivos. No entanto, devido à simplicidade do modelo matemático utilizado nestes casos, a precisão do posicionamento normalmente varia entre 5 m a 10 m. O que mais deteriora a qualidade do posicionamento neste caso é a refração ionosférica. Este trabalho visa avaliar preliminarmente o efeito diário da refração ionosférica no município de Monte Carmelo. Para tanto, processou-se dados do código C/A de um dia da estação MGMT no software RT_PPP on-line em duas situações: aplicando correção a partir de mapa global da ionosfera produzido pelo IGS (GIM – Global Ionospheric Map) e sem correção para a ionosfera. As coordenadas obtidas nos dois processamentos foram comparadas, o que permitiu verificar que a componente altimétrica é a mais afetada pela refração ionosférica, além de revelar o comportamento do efeito diário da refração ionosférica no posicionamento.

Palavras chave: Ionosfera, Atmosfera, Refração, GNSS.

ABSTRACT

Among the positioning techniques using Global Navigation Satellite Systems it is worth mentioning the Single Point Positioning (PPS), since it is the technique implemented in most mobile devices such as cell phones and automotive navigation. However, due to the simplicity of the mathematical model used in these cases, positioning accuracy usually ranges from 5 m to 10 m. What most deteriorates the positioning quality in this case is the ionospheric refraction. This paper aims to evaluate the daily effect of ionospheric refraction in Monte Carmelo city. For this purpose, one-day C/A code data from the MGMT station was processed in the online RT_PPP software in two situations: applying correction from the Global Ionospheric Map (GIM) produced by the International GNSS Service (IGS) and without correction to the ionospheric refraction. The coordinates obtained in the two processes were compared, which allowed to verify the altimetric component is the one most affected by the ionospheric refraction, besides revealing the behavior of the daily effect of the ionospheric refraction on the positioning systems.

Keywords: Ionosphere, Atmosphere, Refraction, GNSS.

1 - INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre pode ser dividida de várias formas. No caso do posicionamento com GNSS interessa saber se há presença de partículas eletricamente carregadas ou não. Seguindo este critério a atmosfera pode ser dividida em duas camadas: uma neutra e outra eletricamente carregada.

Próximo à superfície da Terra se encontra a camada neutra, que é composta pela troposfera, tropopausa e estratosfera, sendo comum uma

designação apenas como troposfera. Acima da camada neutra existe a camada que contém partículas eletricamente carregadas, denominada de ionosfera. Esta última é a camada da atmosfera que mais deteriora o posicionamento por satélites (KLOBUCHAR, 1996).

O efeito da ionosfera nos sinais GNSS é proporcional à densidade de elétrons presentes na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. A densidade de elétrons é expressa através do Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total*

Electron Content), que é o principal parâmetro utilizado para descrever a atividade ionosférica.

O TEC é a integral da densidade de elétrons ao longo do caminho do sinal entre o satélite e a antena receptora, e representa o número de elétrons livres numa coluna de base unitária (1m²) (LEICK, 1995).

O fato do efeito de primeira ordem da ionosfera estar relacionado com a frequência do sinal possibilita a utilização de combinação linear entre observáveis de frequências diferentes denominada ion-free para, praticamente, eliminá-lo. No entanto, usuários de receptores GNSS de uma frequência não desfrutam desta facilidade.

Os efeitos da ionosfera são mais pronunciados na região localizada nas imediações do equador geomagnético, como é o caso do Brasil. Em tal região a ionosfera apresenta gradientes espaço- temporais mais acentuados (FONSECA Jr, 2002).

A ionosfera afeta o posicionamento por ponto com mais intensidade. Ainda assim, mesmo considerando que no posicionamento relativo a dupla diferença das observáveis GNSS elimina parte dos erros devido à ionosfera, fortes efeitos ionosféricos podem ser observados nos resultados obtidos, comprometendo de forma significativa a acurácia dos resultados (DAL POZ, 2005). O posicionamento por ponto simples (PPS), depende de um único receptor utilizando as observáveis de pseudodistância advindas do código C/A e efemérides transmitidas para obtenção das coordenadas dos satélites. A simplicidade do modelo matemático empregado e a possibilidade de se obter posicionamento em tempo real sem a necessidade de utilizar alguma infraestrutura adicional fazem com que esta técnica de posicionamento seja implementada na maioria dos dispositivos móveis. Portanto, a maioria dos erros sistemáticos que degradam o posicionamento não é modelada, fazendo com que esta técnica de posicionamento proporcione precisão que normalmente varia de 5 m a 10 m.

Este trabalho tem como objetivo estudar e analisar o efeito causado pela refração ionosférica no posicionamento com GNSS ao longo de um dia. Especificamente, a análise da variação das coordenadas do posicionamento por ponto simples para a estação de monitoramento contínuo situada na Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, no dia 15 de Janeiro de 2017.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A refração é o fenômeno óptico em que ocorre alteração da velocidade da onda eletromagnética em virtude da mudança de meio de propagação. No vácuo, as ondas eletromagnéticas se propagam na velocidade da luz, mas ao penetrar em diferentes meios, a sua velocidade é alterada de acordo com as características do meio.

A refração sofrida pelo sinal GNSS ao atravessar a atmosfera pode ser decomposta em refração ionosférica e refração troposférica, conforme a expressão:

$$\delta_{Atm} = Ion + Trop = \left(\int_r^s n_{ion} dS - \int_r^s d\rho \right) + \left(\int_r^s n_{Trop} dS - \int_r^s d\rho \right) \quad (1)$$

Com *Ion* e *Trop* sendo a refração ionosférica e troposférica, respectivamente e *n_{ion}* e *n_{trop}* representando o índice de refração da ionosférica e atmosfera neutra. No intervalo de frequência dos sinais GNSS, a ionosfera se comporta como um meio dispersivo, onde ondas magnéticas com frequências diferentes se propagam com velocidades diferentes, o que não ocorre na camada neutra (SEEBER, 2003).

2.1 - Ionosfera

A ionosfera é a camada da atmosfera terrestre onde pode existir ionização suficiente para alterar a propagação de ondas de rádio. A existência de íons e elétrons livres na atmosfera se deve, principalmente, ao processo de fotoionização dos gases provocada pela incidência de radiação solar no espectro ultravioleta extremo e ao processo de recombinação dos elétrons e íons que ocorre na parte da atmosfera não iluminada pelo sol (DAVIES, 1990).

De maneira simplificada, a ionosfera é delimitada entre as altitudes de 50 km e 1000 km. Contudo, as partículas ionizadas se estendem ao espaço interplanetário. Portanto, o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é igual à combinação do efeito resultante das partículas presentes na atmosfera e no espaço interplanetário (SEEBER, 2003).

O erro provocado pela refração ionosférica varia de acordo com a observável utilizada, seja ela a fase da onda portadora ou a pseudodistância derivada do código. A primeira gera um atraso com sinal negativo (equação 02), enquanto a segunda gera um atraso com sinal positivo (equação 03).

$$I_f^S = - \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n - e \, ds \quad (2)$$

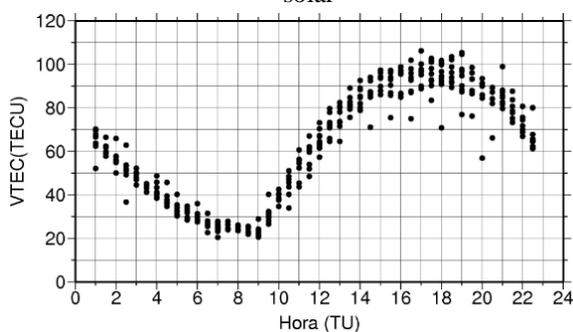
$$I_f^S = + \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n - e \, ds \quad (3)$$

Onde: *n* representa, de forma genérica, o índice de refração da fase ou do grupo e *f* representa a frequência do sinal.

A altitude, a atividade solar, a estação do ano, a hora do dia e o campo geomagnético são responsáveis pela variação da densidade de elétrons livres na ionosfera, que ainda está sujeita a uma série de distúrbios irregulares e aleatórios (DAVIES, 1990; KOMJATHY, 1997; SCHAER, 1999; CAMARGO, 1999; ODIJK, 2002; FONSECA Jr, 2002).

A variação da densidade de elétrons livres em relação à hora do dia em um determinado local está relacionada ao movimento aparente do Sol, onde a máxima produção no território brasileiro ocorre por volta das 14:00 h (horário local) (FONSECA Jr, 2002). A figura 1 mostra o comportamento do TEC na direção vertical (VTEC) de todos os satélites rastreados pela estação BRAZ, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS (RBMC), no dia 19 de março de 2001 (alta atividade solar). Observa-se que os maiores valores de VTEC ocorrem por volta das 17 h TU (Tempo Universal), o que corresponde à 14 h no horário de Brasília.

Fig. 1 - Influência do movimento aparente do Sol sobre o VTEC na estação BRAZ em um dia de alta atividade solar



Fonte: Machado, 2012

2.2 – Mapa Global da Ionosfera

Os mapas globais da ionosfera (GIM) começaram a ser produzidos pelo serviço internacional do GNSS (IGS – *International GNSS Service*) em 1998, sendo resultantes da combinação da solução de quatro centros de processamento (IAAC – *Ionosphere Associate Analysis Center*), sendo eles: CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), ESOC (*European Space Operations of Center ESA*), UPC (*Polytechnical University of Catalonia*) e JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) (HERNANDEZ-PAJAREZ et al., 2009). e fornecem valores de VTEC calculados a partir de sua rede de receptores de dupla frequência. Atualmente estes dados são disponibilizados com uma latência menor do que 24 horas.

Em um estudo realizado por Camargo e Matsuoka (2005), na região sul do Brasil, foi constatada uma melhoria média nos resultados de 68% na posição tridimensional.

3- MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados GNSS da estação da RBMC situada no município de Monte Carmelo – Minas Gerais (MGMT) obtidos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Os dados da estação MGMT foram processados no software RT_PPP Online (MARQUES et al, 2015) utilizando apenas a pseudodistância

derivada do código C/A como observável. Empegou-se duas estratégias de processamento:

- 1) sem correção da ionosfera e
- 2) com correção da ionosfera a partir do GIM do IGS.

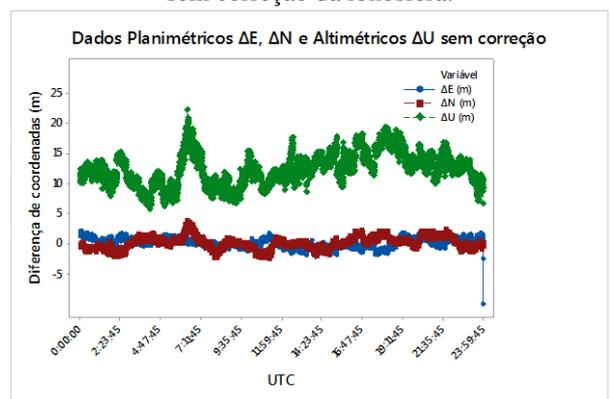
A qualidade do posicionamento avaliada a partir da análise da diferença entre as coordenadas preconizadas pelo IBGE e as obtidas dos processamentos em um sistema geodésico local (ΔE , ΔN , ΔU).

Como as diferenças de coordenadas de cada estratégia de processamento estão contaminadas com outros erros sistemáticos, calculou-se a diferença entre as diferenças de coordenadas das soluções produzidas pelas duas estratégias de processamento citadas para se obter o efeito diário da ionosfera aproximado.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

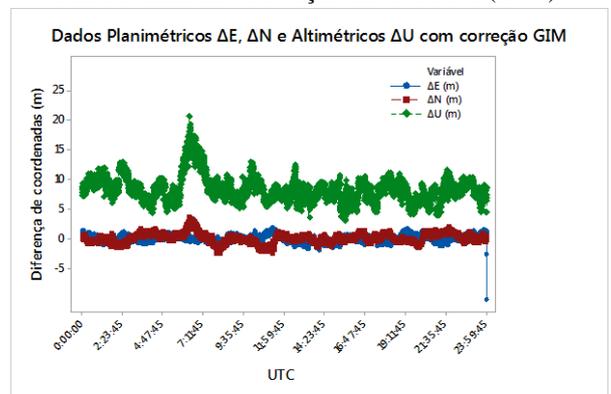
As figuras 2 e 3 apresentam a diferença de coordenadas obtidas com o processamento sem correção da ionosfera e com correção da ionosfera aplicando o GIM do IGS.

Fig. 2 – Comportamento das diferenças de coordenadas sem correção da ionosfera.



Os Autores (2017).

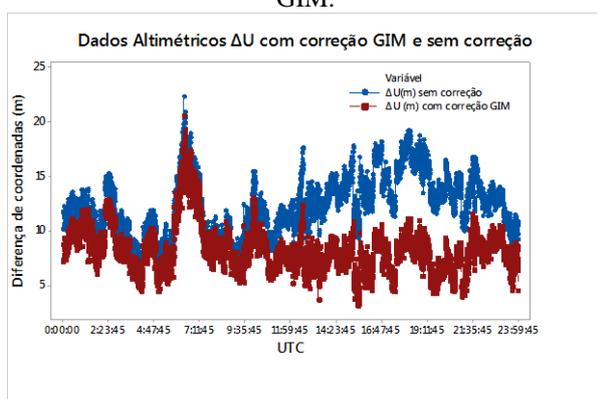
Fig. 3 – Comportamento das diferenças de coordenadas com correção da ionosfera (GIM).



Os Autores (2017).

Como pode ser observado, o comportamento das diferenças das coordenadas planimétricas apresentam praticamente o mesmo comportamento no processamento das duas estratégias, enquanto que os componentes altimétricas apresentam uma variação maior, como pode ser visto na figura 4.

Fig. 4 – Comportamento das coordenadas altimétricas após processamento sem correção e com correção GIM.



Os Autores (2017).

A figura 4 revela uma melhoria na qualidade da componente altimétrica no período que varia do começo da manhã ao início da noite, ou seja, quando a fotoionização foi mais acentuada.

O efeito diário da ionosfera pode ser visto na figura 5, que mostra a diferença de ΔU entre as duas estratégias (com e sem correção da ionosfera), da qual pode ser observada uma semelhança com relação ao gráfico da figura 1, o que era de se esperar, onde o pico do efeito da ionosfera ocorreu por volta das 19 h UTC (16 h local) provocando um erro de aproximadamente 10 m.

Fig. 5 – Diferença da ΔU sem correção e com correção a partir do GIM



Os Autores (2017).

5- CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho apresentou uma avaliação preliminar sobre o efeito diário da refração ionosférica no município de Monte Carmelo. Tal avaliação foi realizada a partir do processamento dos dados GNSS da estação da RBMC denominada MGMT sem aplicar correções e aplicando correção da ionosfera a partir do GIM do IGS obtendo-se resultado compatível com o que preconiza a literatura sobre o assunto.

Embora se tenha alcançado tal resultado, é necessário realizar uma análise considerando quantidade maior de dados para se determinar a magnitude do efeito da refração ionosférica nesta estação, visto que este é fortemente influenciado pelo ciclo solar de 11 anos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Dr Wagner Carrupt Machado pela colaboração, empenho e boa vontade em nos ajudar a criar esse artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MACHADO, W. C. **Utilização de redes neurais artificiais na previsão do VTEC visando a geração de estações de referência virtuais em tempo-real.** Tese de doutorado. São Paulo – SP.
- DAL POZ, W. R. et al., 2008 Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. Revista: boletim de ciências geodésicas, Vol. 14 N° 1, pp. 34-54.
- CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência.** 1999. 191 p. Tese (Doutorado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- DAVIES, K. **Ionospheric radio.** London: IEE (Institute of Electrical Engineer), 1990. 580 p. (Electromagnetic Waves Series v. 31).
- FONSECA Jr, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil.** 2002. 176 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. **Journal of Geodesy**, v. 83, n. 3-4, p 263-275, 2009.

KOMJATHY, A. **Global ionospheric Total Electron Content mapping using Global Positioning System.** 1997. 248 p. Tese (Doutorado) – Department of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick, Fredericton, 1997.

ODIJK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delay.** 2002, 242 p. Tese (Doutorado) – Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, 2002.

SCHAER, S. **Mapping and predicting Earth's ionosphere using Global Positioning System.** 1999, 205 p. Tese (Doutorado) – Naturwissenschaften Fakultät. Universität Bern, Berna, 1999.

KLOBUCHAR JA (1996) Ionospheric effects on GPS. In: Spilker JJ, Parkinson BW (eds) **Global positioning system: theory and applications**, vol 1. AIAA, pp 485–515

LEICK, A. (1995) **GPS Satellite Surveying.** 2.ed New York: John Wiley & Sons, p. 560

SEEBER, G. **Satellite geodesy.** 2ª ed. Berlin: Gruyter, 2003. p. 589.