

# INVESTIGAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE MULTICAMINHO DOS SINAIS GNSS E OS EFEITOS IONOSFÉRICOS

G. O. Jerez<sup>1</sup>, D. B. M. Alves<sup>2</sup>, V. A. S. Pereira<sup>1</sup>, A. L. C. Souza<sup>1</sup>

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT, Presidente Prudente - SP, Brasil

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

<sup>2</sup> Departamento de Cartografia

Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

## RESUMO

Os sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*) estão sujeitos a diversas fontes de erro, entre essas a ionosfera, que apresenta variações regionais e sazonais. Outra fonte de erro relacionado ao sinal GNSS é o multicaminho, que ocorre quando o sinal chega ao receptor por um caminho direto e outro indireto, em decorrência de reflexão por alguma superfície. Para controle de qualidade dos dados diversos índices podem ser obtidos, tanto de irregularidades ionosféricas quanto de intensidade do multicaminho. Porém, no cálculo dos índices de multicaminho MP1 e MP2 é considerada a variável fase da onda portadora, portanto, perdas de ciclo e interferências podem afetar diretamente a determinação dos índices. Isso faz com que a atividade ionosférica, que tem capacidade de afetar o sinal, possa interferir na obtenção desses índices. Assim, o presente trabalho propõe uma análise de índices de multicaminho, considerando os efeitos da ionosfera e a sua influência na determinação dos mesmos. Os resultados obtidos indicaram influência regional e sazonal da atividade ionosférica na regularidade e intensidade dos índices de multicaminho.

**Palavras chave:** GNSS, multicaminho, ionosfera

## ABSTRACT

GNSS (Global Navigation Satellite System) signals can be affected by several errors sources, among these the ionosphere, which presents regional and seasonal variations. Other error source related to GNSS signal is the multipath, which occurs when the signal arrives to the receiver by a direct and an indirect path, due to a reflection in some surface. In order to control the utilized data several indexes can be obtained, either for ionospheric irregularities or for multipath intensity. However, the multipath indexes MP1 and MP2 consider the observable carrier phase, therefore, cycle slips and other interferences may directly affect the determination of the indexes. This means that the ionospheric activity, which is able to affect the signal, can influence in the multipath indexes obtainment. Thus, the present work proposes an analysis of multipath indexes, considering the effects of the ionosphere and its influence on the determination of these. The results obtained indicated regional and seasonal influence of ionospheric activity on the regularity and intensity of multipath indexes.

**Keywords:** GNSS, multipath, ionosphere

### 1- INTRODUÇÃO

O posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é atualmente empregado nas mais diversas áreas, tanto científicas quanto comerciais. O sinal transmitido pelo satélite está sujeito a diversas fontes de erro na trajetória até o receptor, desde os relacionados à região de interesse e à propagação do sinal até os relacionados ao satélite e ao receptor (Monico, 2008). A atmosfera tem grande influência no sinal propagado, sendo a ionosfera uma das principais

fontes de degradação e erro. A ionosfera tem efeitos proporcionais ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC - *Total Electron Content*), que consiste no número de elétrons presentes na atmosfera. Esses valores variam no tempo e no espaço tendo relação, por exemplo, com o fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, estação do ano, ciclos de manchas solares e localização no globo (Seeber, 2003; Camargo, 1999). Além disso, a ionosfera possui ainda irregularidades, como as bolhas ionosféricas, que também podem afetar o sinal

GNSS. As irregularidades na densidade de elétrons podem causar mudanças na fase e na amplitude do sinal de rádio recebido, ocasionando muitas vezes a degradação ou até mesmo a perda do sinal. Esse efeito recebe o nome de cintilação ionosférica e tem comportamento específico e regional (Conker et al., 2003). Seus efeitos têm relação com a atividade geomagnética, estação do ano, localização no globo e ciclos solares, assim como ocorre com o TEC. As regiões com maior ocorrência de cintilação são as dos picos da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), próximo às latitudes geomagnéticas de  $\pm 15^\circ$  (Seeber, 2003; Monico, 2008).

Outro efeito relacionado à propagação do sinal GNSS e que tem influência direta na precisão final do posicionamento é o multicaminho. O multicaminho ocorre quando o sinal chega ao receptor por dois caminhos, um direto e outro indireto. O caminho indireto é decorrente da reflexão do sinal em superfícies vizinhas ao receptor, ou mesmo de reflexões no próprio satélite, o que pode causar distorções nas observáveis coletadas pelo receptor (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Para verificar o nível de multicaminho em uma estação podem ser utilizadas as combinações lineares MP1 e MP2, que correspondem aos índices nas portadoras L1 e L2, respectivamente (Monico, 2008). Porém, como para o cálculo dos índices é considerada a observável fase da onda portadora, interferências na mesma e perdas de ciclo têm influência direta nos valores obtidos. Com isso, períodos de alta atividade ionosférica, que interferem no sinal transmitido, também podem interferir na determinação dos índices de multicaminho.

Neste sentido, o presente trabalho buscou avaliar a influência da atividade ionosférica na determinação dos índices de multicaminho, por meio da comparação dos índices MP1 e MP2 com índices de irregularidade ionosférica. Para isso foram utilizados dados de duas estações situadas em regiões com diferentes intensidades de atividades ionosféricas, considerando períodos abrangendo variações das estações do ano e também em relação aos ciclos solares, levando em conta o pico do último ciclo que aconteceu entre 2013 e 2014.

## 2- MUTICAMINHO

O multicaminho ocorre quando o sinal GNSS chega ao receptor por outro caminho além do direto. Isso acontece devido à reflexão do sinal por alguma superfície como carros, construções e árvores (Seeber, 2003; Souza, 2008). O efeito causa distorções nas observáveis e não possui uma modelagem simples definida devido à particularidade do mesmo. Os métodos de modelagem, em geral, envolvem coletas em dias consecutivos ou uso de robôs para a calibração das antenas, sendo modelagens específicas para cada

estação (Monico, 2008). Apesar da difícil modelagem algumas combinações lineares podem fornecer indicadores do multicaminho. As combinações para as portadoras L1 e L2 podem ser apresentadas, respectivamente, como (Fortes, 1997):

$$MP1 = PD_{L1} - \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right) \phi_{L1} + \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right) \phi_{L2}, \quad (1)$$

$$MP2 = PD_{L2} - \left(1 + \frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) \phi_{L1} + \left(1 + \frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) \phi_{L2}, \quad (2)$$

com  $\alpha = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$ , PD: pseudodistância e  $\phi$ : fase da onda portadora. Como pode ser observado nas equações (1) e (2), os índices são obtidos por combinações das variáveis fase da onda portadora e pseudodistância. Por isso é esperado que eventos que levem a perdas de ciclo ou interferências nas observáveis tenham influência nos valores obtidos para os índices.

Existem formas de amenizar o efeito do multicaminho, como o uso de antenas construídas com base na polarização do sinal, mas esse método não é completamente garantido pois o sinal pode sofrer mais de uma reflexão. Outra possibilidade é o uso de antenas do tipo *choke ring*, o que também não garante a eliminação por completo do efeito. Em geral, o mais recomendado em relação ao multicaminho ainda é que se evite a ocorrência do mesmo (Seeber, 2003; Monico, 2008).

## 3- IONOSFERA

Considerando-se a propagação de ondas eletromagnéticas a atmosfera pode ser dividida em duas camadas, a troposfera e a ionosfera. A troposfera corresponde à camada mais próxima da superfície, até aproximadamente 50 km de altura, e a ionosfera a camada posterior, de 50 km até aproximadamente 1000 km (Seeber, 2003). Como citado anteriormente, os efeitos da ionosfera são relacionados com o TEC, que corresponde à quantidade de elétrons contida em uma coluna que vai do satélite ao receptor, com base circular de um metro quadrado. O TEC pode variar no tempo e no espaço tendo relação com o fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, estação do ano, ciclos de manchas solares e localização no globo (Camargo, 1999).

As variações temporais podem ser diurnas, sazonais e em ciclos de longo período. Variações sazonais se relacionam às variações na densidade de elétrons causadas pela mudança do ângulo zenital do Sol e pelo fluxo de ionização, que mudam devido às estações do ano. A radiação incidente na Terra mais direta ocorre no verão, causando aumento da ionização. Os ciclos de longo período correspondem aos ciclos solares, associados às manchas solares, tendo ocorrência em intervalos de aproximadamente 11 anos (McNamara, 1991; Camargo, 1999).

Quanto à localização geográfica, os níveis de densidade de elétrons são mais intensos nas regiões equatoriais, menos intensos nas latitudes médias e seguem comportamento bastante variável espacialmente e temporalmente nas altas latitudes (McNamara, 1991). Nas regiões equatoriais os efeitos da ionosfera são relacionados, entre outros, à Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), com maior intensidade no pico local da anomalia, de latitudes geomagnéticas aproximadas de  $\pm 15^\circ$  (Seeber, 2003; Monico, 2008).

A ionosfera possui irregularidades que podem afetar o sinal GNSS, como as bolhas ionosféricas. As irregularidades podem causar mudanças na fase e amplitude do sinal de rádio recebido, ocasionando muitas vezes a degradação ou até mesmo perda do sinal, efeito denominado cintilação ionosférica (Conker et al., 2003; Matsuoka, 2007).

Para avaliar a influência da ionosfera podem ser levados em conta diversos índices, entre estes os de irregularidades, que classificam o comportamento da ionosfera. Entre os índices de irregularidades podem-se citar o  $f_p$  e o  $F_p$  (Mendillo et al., 2000), o  $I_{ROT}$  (Wanniger, 1993) e o ROTI (Pi et al., 1997), todos baseados na taxa de variação do TEC (*Rate of change Of TEC* – ROT), ou seja, a variação do TEC em duas épocas dividida pelo intervalo de tempo entre as determinações.

Pi et al. (1997) definiram o índice ROTI (*ROT Index*), determinado a partir do desvio padrão da taxa de variação do TEC (ROT) em um intervalo de cinco minutos. Segundo os autores, isso permite uma resolução temporal relativamente alta. A classificação a partir deste índice pode ser dada por: baixos níveis de irregularidades ( $ROTI \leq 0,05$ ), irregularidades moderadas ( $0,05 < ROTI \leq 0,2$ ) e fortes níveis de irregularidades ( $ROTI \geq 0,2$ ) (Pereira e Camargo, 2014).

#### 4- METODOLOGIA

Para realizar a comparação dos índices de multicaminho com o comportamento ionosférico foram consideradas variações regionais e sazonais, em relação à localização das estações, às estações do ano e aos ciclos solares. Para isso foram selecionadas duas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), uma localizada em região com intensa atividade ionosférica, PPTE (22,12°S; 51,41°O), em Presidente Prudente-SP, e outra com menor atividade, POAL (30,07°S; 51,12°O), localizada em Porto Alegre (Fig. 1). O período considerado foi de três anos, 2014 a 2016, que compreende o fim do último pico do ciclo solar 24, ocorrido entre 2013 e 2014.



Fig. 1 – Localização das estações PPTE e POAL.

Os índices MPI e MP2 foram calculados com o *software* TEQC (*Translation, Editing and Quality Checking*) da UNAVCO, utilizando arquivos de 24 horas de dados GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*GLObal Navigation Satellite System*) e máscara de elevação de  $10^\circ$ .

Para o mesmo período e com dados das mesmas estações foi gerado o índice ROTI a partir do *software* Ion\_Index (Pereira e Camargo, 2016a; 2016b). Para isso também foram utilizados arquivos de 24 horas de dados GPS e GLONASS, com máscara de elevação  $10^\circ$ . Os resultados são apresentados na Seção 5.

#### 5- RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos são apresentados por estação e ano dos dados utilizados. Os índices de irregularidades ROTI das estações PPTE e POAL são apresentados na Fig. 2 e na Fig. 3, respectivamente, para os anos 2014 (a), 2015 (b) e 2016 (c).

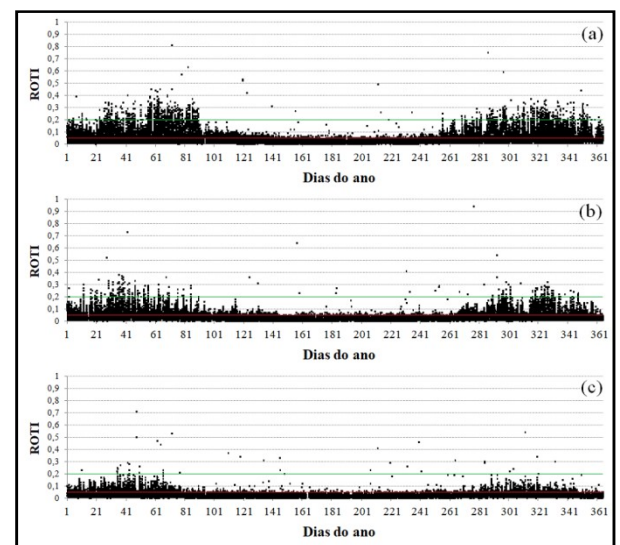


Fig. 2 – Índices ROTI para dados da estação PPTE dos anos 2014 (a), 2015 (b) e 2016 (c).

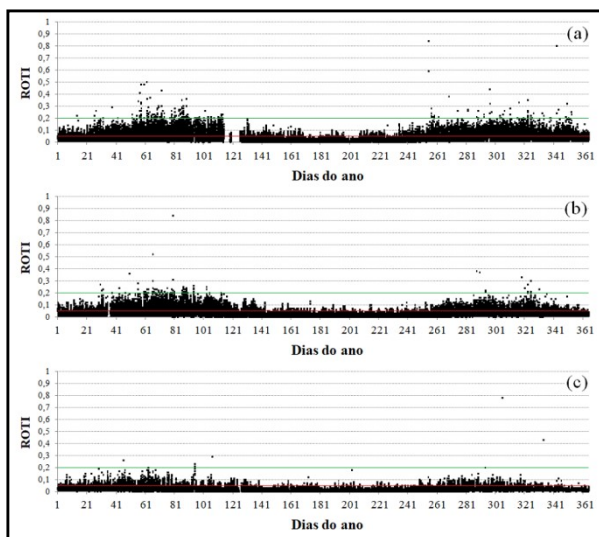


Fig. 3 – Índices ROTI para dados da estação POAL dos anos 2014 (a), 2015 (b) e 2016 (c).

As linhas inseridas nos gráficos indicam a classificação sugerida por Pereira e Camargo (2014), sendo a linha vermelha correspondente ao limite para baixos níveis de irregularidades e verde o limite para irregularidades moderadas. Como pode ser observado, existe diferença entre os dados das estações, sendo mais intensas as irregularidades ionosféricas da estação PPTe (Fig. 2). Além disso, verifica-se também a variação sazonal do comportamento ionosférico, sendo mais intensa a época compreendida entre os meses de outubro e março. Quanto a variações de longo período, é possível levar em consideração o último ciclo solar, que teve pico entre os anos 2013 e 2014. Verifica-se, em ambas as estações, que os maiores índices ocorreram no ano 2014 com diminuição a cada ano. Os índices de multicaminho MP1 e MP2 são apresentados na Fig. 4 e na Fig. 5, respectivamente, para dados dos anos 2014 (a), 2015 (b) e 2016 (c).

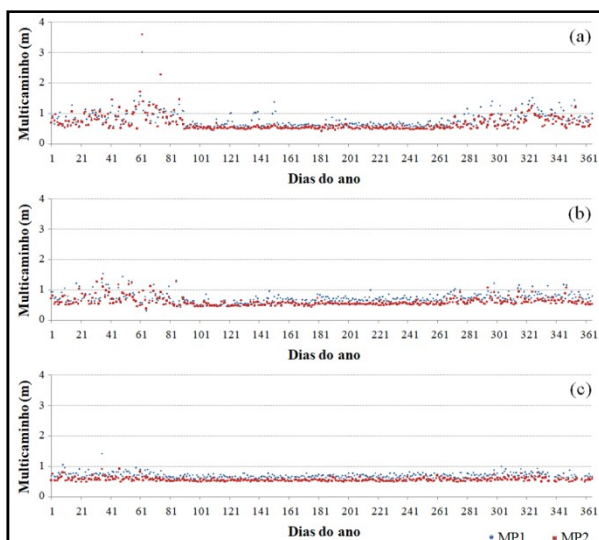


Fig. 4 – Índices MP1 e MP2 para dados da estação PPTe dos anos 2014 (a), 2015 (b) e 2016 (c).

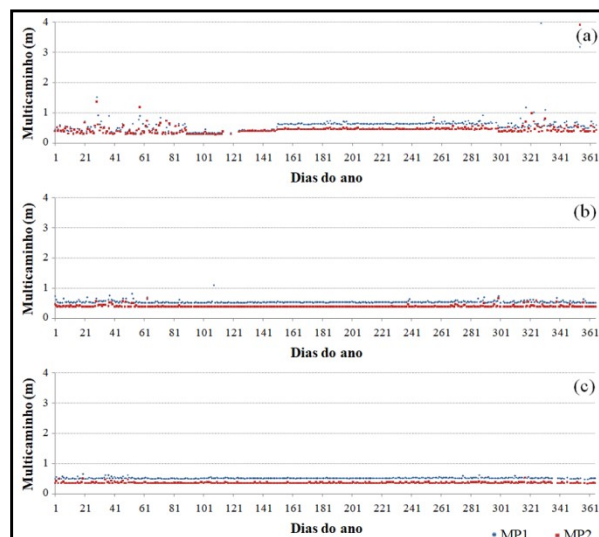


Fig. 5 – Índices MP1 e MP2 para dados da estação POAL dos anos 2014 (a), 2015 (b) e 2016 (c).

Na Fig. 4 e Fig. 5 ficou evidente a maior variabilidade nos índices provenientes da estação PPTe, localizada em região mais afetada pela ionosfera. O ano de 2014 foi o que apresentou maior instabilidade dos índices MP1 e MP2, principalmente para valores obtidos de outubro a março, em ambas as regiões. Este período é caracterizado por ter maior atividade ionosférica, conforme apresentado anteriormente com os índices ROTI (Fig. 2 e Fig. 3). Além disso, também é possível observar o aumento da regularidade do índices obtidos para dados de períodos que se distanciam do ano de 2014. Vale ressaltar que, salvo exceções, o multicaminho é um fenômeno constante na estação de ocorrência. Portanto, variações esporádicas podem ser decorrentes de outras fontes de erros ou falha de coleta de dados. Para as estações utilizadas foram verificados os casos de troca de antena ou receptor, bem como atualizações de *firmware*. Nenhuma das ocorrências observadas coincidiu com algum comportamento adverso dos índices. Os resultados apresentados confirmam o esperado em relação aos índices MP1 e MP2, no que diz respeito à influência que sua determinação pode sofrer, em especial às interferências causadas pela ionosfera no sinal GNSS.

## 6- CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo verificar a relação entre a determinação de índices de multicaminho dos sinais GNSS, MP1 e MP2, e os efeitos ionosféricos. Para isso, foram considerados dados de regiões e períodos com diferentes comportamentos na atividade ionosférica.

Os resultados indicaram significativa relação entre os efeitos ionosféricos e a determinação dos índices de multicaminho, sendo estes mais irregulares para dados da estação localizada em região mais afetada e em períodos de maior atividade ionosférica. Para verificação da atividade ionosférica foi utilizado o

índice de irregularidade ROTI que apresentou comportamento semelhante ao observado com os índices MP1 e MP2.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à FAPESP (processo 2015/20522-7) pelo fomento à pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMARGO, P. O., 1999. Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência, Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 191 páginas.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T., 2003. Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability. Radio Science, V. 38 (1), pp. 1-23.

FORTES, L. P. S., 1997. Operacionalização da rede brasileira de monitoramento contínuo do sistema GPS (RBMC), Dissertação (Mestrado em Ciências em Sistemas e Computação) – Instituto Militar de Engenharia, 152 páginas.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E., 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more, Springer-Verlag, New York, 516 páginas.

McNAMARA, L. F., 1991. The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding, Krieger Publishing Company, Florida, 237 páginas.

MATSUOKA, M. T., 2007. Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região brasileira, Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente, 263 páginas.

MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J., 2000. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. Radio Science, Vol. 35 (3), pp. 885-904.

MONICO, J. F. G., 2008. Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação, Editora UNESP, São Paulo, 476 páginas.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O., 2014. Padrões para classificação dos índices de irregularidades da ionosfera:  $I_{ROT}$  e ROTI. In: Anais do V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Universidade Federal do Paraná, Recife, pp. 12-14.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O., 2016a. Programa científico para o monitoramento em tempo real ou pós-processado das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. Boletim de Ciências Geodésicas, Vol. 22 (2), pp. 282-302.

PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O., 2016b. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. GPS Solutions, Vol. 21 (3), pp. 1013-1025.

PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M., 2007. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. Geophysical Research Letters, Vol. 24 (18), pp.2283-2286.

SEEBER, G., 2003. Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications, Walter de Gruyter, Berlin, 589 páginas.

SOUZA, E. M., 2008. Análise de wavelets para detecção e correção do multicaminho no posicionamento relativo GNSS estático e cinemático, Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente, 165 páginas.

WANNINGER, L. Ionospheric monitoring using IGS data. In: 1993 IGS WORKSHOP, 1993, Berne. Proceedings... Berne: Beuther, G.; Brockmann, E. pp. 351-360, 1993.