

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO POSICIONAMENTO RELATIVO A PARTIR DO AUSPOS

R. R. V. Menezes¹, W. R. Dal Poz¹

¹Universidade Federal de Viçosa - UFV, Brasil

Comissão II - Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

A ionosfera terrestre é um meio dispersivo e altamente dinâmico, contribuindo com muitos erros presentes nas observações GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Este estudo consiste em analisar a influência de tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo em rede, por meio do serviço AUSPOS (*AUSPOS – Online GPS Processing Service*), das estações BELE e POAL, pertencentes a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). Os dados GNSS foram editados em intervalos de 6h e 3h, determinados a partir dos menores valores do índice Dst (*Disturbance Storm – Time*) correspondendo as tempestades de 17/03/2015 e 28/05/2017. A discrepância posicional foi calculada entre as coordenadas de referência e as coordenadas processadas. As coordenadas de referência (SIRGAS2000 época 2000,4), foram transformadas e atualizadas para a época de coleta dos dados, em ITRF2008 (IGb08). Os maiores valores de discrepâncias não foram observados durante a fase principal da tempestade geomagnética. Conclui-se que o serviço de posicionamento AUSPOS não foi sensível aos efeitos das tempestades geomagnéticas analisadas.

Palavras chave: AUSPOS, Discrepância, Tempestade Geomagnética.

ABSTRACT

Terrestrial ionosphere is a dispersive and highly dynamic environment, contributing with many errors present in GNSS (*Global Navigation Satellite System*) observations. This study aims to analyze the influence of geomagnetic storms on the relative positioning, was carried out using the positioning service AUSPOS (*AUSPOS - Online GPS Processing Service*), using two stations of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems (RBMC), BELE and POAL. The GNSS data were cut into intervals of 6h and 3h, and the lowest values indicated by the Disturbance Storm Time (Dst) index correspond to the storms (03/17/2015 and 05/28/2017). The positional discrepancy was calculated considering the reference coordinates and the processed coordinates. The reference coordinates (SIRGAS2000 epoch 2000,4) were transformed and updated for the time of data acquisition, in ITRF2008(IGb08). The highest values of discrepancies were not observed during the main stage of the geomagnetic storm. Therefore, AUSPOS was not sensitive to the effects of the geomagnetic storms analyzed.

Keywords: AUSPOS, Discrepancie, Geomagnetic Storm.

1- INTRODUÇÃO

A ionosfera, inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura. É um meio dispersivo, caracterizando-se principalmente pela formação de íons. Desta forma, afeta a propagação de ondas eletromagnéticas, fazendo com que a modulação e a fase da onda portadora sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (Leick, 1995), provocando assim um erro na distância medida entre o satélite e o receptor. Esse erro é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Contents*), ou seja, ao conteúdo total de elétrons presentes ao longo do caminho entre o satélite e o receptor. De acordo com Leick (1995) o TEC varia em razão do ciclo de manchas

solares, época do ano, hora local e localização geográfica. Além dessas variações, outros parâmetros podem causar mudanças no comportamento do TEC e exercer grande influência no posicionamento GPS, como por exemplo as tempestades geomagnéticas, que podem ser causadas pelas explosões solares (*Solar Flares*) e ejeções coronais de massa (*Coronal Mass Ejection*). Com isso, o posicionamento GNSS pode ser afetado pelas tempestades.

AUSPOS é um serviço *on-line* gratuito de posicionamento relativo estático em rede. Aceita estritamente submissão de arquivos de observação GPS de dupla frequência em modo estático no formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*). O AUSPOS

utiliza a nomenclatura de antenas adotadas pelo IGS (*International GNSS Service*) e parâmetros de calibração NGS (*National Geodetic Survey*), desta forma, para melhores resultados pode-se inserir o tipo e a altura da antena utilizada. Como resultado gera-se um relatório que é enviado para o e-mail do usuário contendo as coordenadas referenciadas ao GDA94 (*Geocentric Datum of Australia 1994*) e ao ITRF2008, época da coleta dos dados.

A investigação da influência de tempestades geomagnéticas no posicionamento GPS, tem sido um assunto recorrente no campo da Geodésia, visto que seu comportamento varia significativamente, dependendo da região da Terra que se observa. Por exemplo, Dal Poz e Camargo (2006) avaliaram os impactos da tempestade ocorrida no dia 31/03/2001 no posicionamento relativo com receptores de uma frequência, sendo esta tempestade classificada como muito intensa. Matsuoka et al. (2013) analisaram o impacto da tempestade que ocorreu no dia 20/11/2003, no posicionamento por ponto com GPS, com dados da pseudodistância C/A. Em ambos os casos o posicionamento com GPS foi afetado pelas tempestades geomagnéticas.

O objetivo deste trabalho consiste em realizar uma análise dos efeitos ocasionados por tempestades geomagnéticas no posicionamento com GPS. Para isso, foi realizado uma avaliação da discrepância planimétrica e altimétrica do posicionamento relativo estático em rede, por meio do serviço de posicionamento AUSPOS. Os dados GNSS utilizados, são das estações BELE e POAL, representando respectivamente ao Norte e Sul do Brasil, abrangendo um período de 9 dias (DOY 73 até 81) de março de 2015 e 8 dias (DOY 143 até 150) de maio de 2017.

2- TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA

Tempestades geomagnéticas são distúrbios no campo geomagnético causados por fontes externas que duram desde algumas horas até vários dias, tempo no qual, vários componentes do campo magnético terrestre sofrem flutuações em grande escala quando comparadas a períodos sem distúrbios (Davies, 1990).

Índices geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2017). A intensidade da variação do campo magnético nas tempestades pode ser medida por diversos índices, dentre eles o índice global Kp (*Planetarische Kennziffer*), o equatorial Dst (*Disturbance Storm – Time*) e o índice AE (*Aurora Electrojet*) (Fedrizzi, 2003 apud Dal Poz, 2006).

Para estudos de tempestades geomagnéticas, normalmente utiliza o índice Dst. Este índice (dado em nanoTesla – nT) representa as medidas obtidas por uma série de magnetômetros distribuídos por toda região equatorial magnética do globo terrestre (Yamashita, 1999). Com o auxílio desse parâmetro que melhor se

observa a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst apresenta um comportamento padrão. Quanto menor esse índice, maior a quantidade de partículas energizadas que estão entrando na Terra. A Tabela 1 apresenta a classificação de tempestades geomagnéticas.

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA EM FUNÇÃO DE DST

| Condições da Tempestade Geomagnética | Valor do índice Dst (nT) |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Fraca | -30 nT a -50 nT |
| Moderada | -50 nT a -100 nT |
| Intensa | -100 nT a -250 nT |
| Muito Intensa | < -250 nT |

Fonte: Fedrizzi (2003) apud Dal Poz (2006)

Uma tempestade geomagnética é representada, conforme Figura 1, pelas fases: início abrupto, representado por um pico de intensidade; fase inicial; fase principal, que é caracterizada pela brusca queda de intensidade e a fase de recuperação, que é iniciada logo após alcançar o seu valor mínimo, indicando assim o aumento da intensidade, até atingir aproximadamente o valor calmo, quando não há tempestade (Yamashita, 1999).

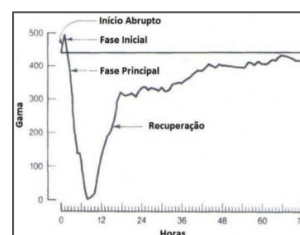


Fig. 1 – Fases de uma Tempestade Geomagnética
Fonte: (Davies, 1990)

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados utilizada foram observáveis GPS (arquivos RINEX) das estações BELE e POAL ativas da RBMC, para os períodos:

- 14 a 22 de março de 2015, considerou-se o intervalo das 17h até às 23h TU (6 horas de rastreo);
- 23 a 30 de maio de 2017, considerou-se o intervalo das 5h até às 8h TU (3 horas de rastreo).

Os arquivos foram editados no *software* livre TEQC (*Translate Edit Quality Check*), disponibilizado pela UNAVCO (2017). Utilizou-se o descritivo das estações, onde contém informações dos equipamentos e coordenadas. Os arquivos mencionados são disponibilizados pelo IBGE.

Apesar do sistema de referência atual é o ITRF2014, o AUSPOS, no momento de processamento dos dados, forneceu os resultados em ITRF08. Desta forma todos os resultados se encontram referenciados em ITRF08, na época dos dados.

As coordenadas contidas no descritivo das estações da RBMC se encontram no sistema de referência oficial do Brasil, que é o SIRGAS2000, época 2000,4, no qual é uma densificação regional do ITRF2000 na época 2000,4 (SIRGAS, 2017). Assim, torna-se necessária a realização da transformação de referencial do SIRGAS2000(ITRF2000), para IGB08(ITRF2008) e atualização de coordenadas para compatibilizar a época de referência (2000,4) para época de coleta dos dados (2015,21 e 2017,40).

A Figura 2 apresenta um resumo dos principais passos para transformação e atualização das coordenadas de referência.

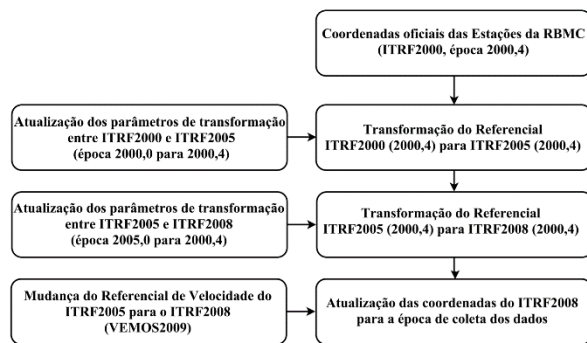


Fig. 2 – Esquema de atualização e transformação das coordenadas de referência

Na atualização de coordenadas de uma época para outra é necessário considerar o deslocamento da placa tectônica que se encontra a estação GPS. Para isso utiliza-se modelos de velocidade das placas litosféricas da região de interesse, a fim de estimar as componentes da velocidade da estação (Monico, 2008). O Modelo de Velocidade para a América do Sul e Caribe (VEMOS2009), o qual deverá ser utilizado na área de abrangência do SIRGAS, está vinculado ao ITRF2005 (Drewes e Heidbach, 2012), desta forma é necessário modificar o referencial de velocidade do ITRF2005 para o ITRF2008, através da Equação 1:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{t_0} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{S} & -\dot{\epsilon}_Z & \dot{\epsilon}_y \\ \epsilon_Z & \dot{S} & -\dot{\epsilon}_x \\ -\dot{\epsilon}_y & -\dot{\epsilon}_x & \dot{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_0} \quad (1)$$

Foi realizada a transformação das coordenadas de referência cartesianas para coordenadas geodésicas (φ , λ), através do *software* XYZWin, disponibilizado gratuitamente pelo NGS (*National Geodetic Survey*), considerando o elipsoide GRS80 como referencial.

No cálculo da discrepância da resultante planimétrica, foram utilizadas as coordenadas geodésicas (φ , λ). As Equações 2 a 6 demonstram como foram obtidas as discrepâncias da resultante planimétrica em unidades métricas.

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi(graus) \\ \Delta\lambda(graus) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(estimada) - \varphi(referência) \\ \lambda(estimada) - \lambda(referência) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi(metros) \\ \Delta\lambda(metros) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M * \Delta\varphi(rad) \\ N * \cos\varphi * \Delta\lambda(rad) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sendo M o raio de curvatura da seção meridiana e N o raio de curvatura da seção primeiro vertical.

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2\varphi)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$N = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2\varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (6)$$

Onde:

e^2 : Segunda excentricidade;

a: 6.378.137,000 m (semi-eixo maior do GRS80);

b: 6.356.752,314 m (semi-eixo menor do GRS80);

φ : latitude média das coordenadas estimadas;

A discrepância planimétrica em metros é dada pela Equação 7:

$$T = \sqrt{\Delta\varphi^2(metros) + \Delta\lambda^2(metros)} \quad (7)$$

Para a altimetria não é necessário a transformação de coordenadas, pois essa não sofre influência significativa, logo a discrepância altimétrica em metros é calculada pela Equação 8:

$$\Delta h(metros) = h_{(estimado)} - h_{(referência)} \quad (8)$$

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tempestade geomagnética de 17 de março de 2015, alcançou o valor de -222 nT ($K_p=8$). Essa tempestade ocorreu em função dos efeitos combinados de CMEs (Ejeção de Massa Coronal) que entraram em erupção em 15/03/2015 na região da Mancha Solar 2297. A Figura 3 mostra a ocorrência da fase principal da tempestade, classificada como intensa, de acordo com a Tabela 1.

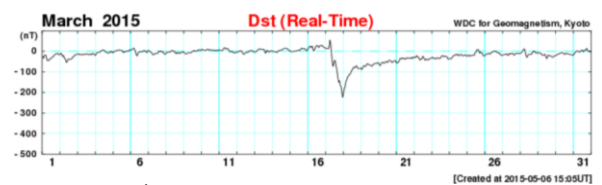


Fig. 3 – Índice Dst para o mês de março de 2015

Outra CME que deixou o Sol no dia 23/05/2017, na região 2659 do Sol, provocou outra tempestade geomagnética intensa, com índice Dst de -222 nT. Conforme observa-se na Figura 4 a tempestade alcançou a Terra 4 dias depois, ou seja, em 27 de maio.

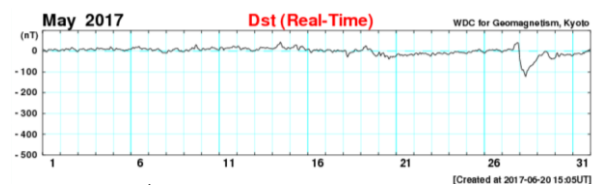


Fig. 4 – Índice Dst para o mês de maio de 2017.

No caso da explosão solar ocorrida no dia 23/05/2017 o intervalo de tempo foi maior que dois dias. Obviamente este intervalo de tempo é variável, em função de muitos fatores, tais como: nível de atividade solar, direção da ejeção de massa coronal, categoria da explosão solar, entre outros fatores.

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados obtidos das componentes planimétricas (ϕ , λ) e altimétrica (h) para o processamento realizado em março de 2015.

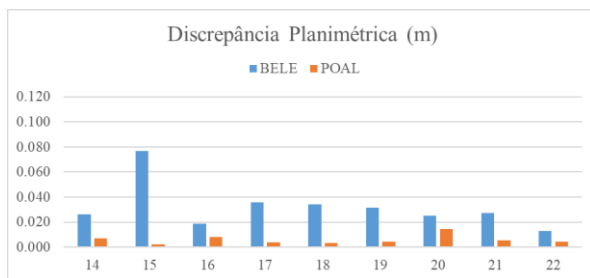


Fig. 5 – Discrepância Planimétrica março de 2015

Conforme observa-se na Figura 5, exatamente em 15/03/2015, dia em que ocorreu a explosão solar, ocorreu o maior valor de discrepância planimétrica da estação BELE. Vale salientar que no relatório do processamento do AUSPOS, foi observado a seguinte mensagem: “As coordenadas estimadas têm precisão fora do limite de 0,085 m, use esta solução com cuidado”, logo não se pode garantir uma confiabilidade para os valores desse dia. Porém, destaca-se que esse dia não se refere a fase principal da tempestade, que corresponde ao dia 17/03/2015. É importante destacar que a estação POAL está localizada sob uma região da ionosfera menos intensa. Nessa região, normalmente os efeitos de irregularidades são menos intensos. Isso pode ser verificado em Jerez et al. (2017).

Desconsiderando os valores obtidos para o dia 15/03/2017, as maiores discrepâncias ocorreram nos dias: 17 com 31 mm e 18 com 30 mm. Observando um aumento de 18 mm do dia 16 para o dia 17, além de uma tendência decrescente até o último dia analisado, o que pode ter relação com a fase de recuperação da tempestade. Com relação a estação POAL o mesmo não ocorre, pois a maior discrepância foi obtida no dia 20/03/2015 com 13 mm. Porém, como já destacado, esta estação está localizada em uma região com baixa intensidade ionosférica.

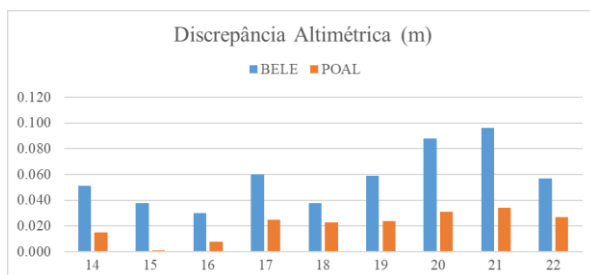


Fig. 6 – Discrepância Altimétrica março de 2015

A Figura 6 ilustra a discrepância altimétrica, onde BELE apresentou seus maiores valores para os dias 21 e 20 de março com 96 mm e 88 mm respectivamente. Para POAL, os maiores valores também ocorreram nos mesmos dias, com 34 mm e 31 mm, respectivamente. Salienta-se que ocorreu uma tendência contrária ao normal, sendo um aumento na fase de recuperação e não uma diminuição da discrepância.

As Figuras 7 e 8 mostram os resultados obtidos das componentes planimétricas (ϕ , λ) e altimétrica (h) para o processamento realizado em maio de 2017.

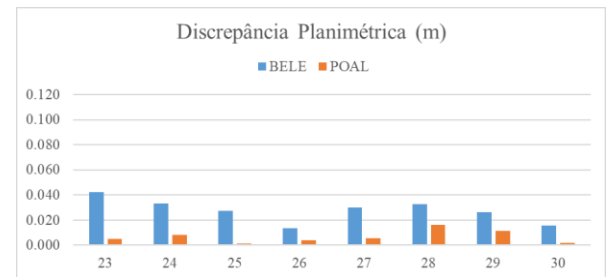


Fig. 7 – Discrepância Planimétrica maio de 2017.

Ao avaliar as discrepâncias, nota-se que a estação BELE apresentou 42 mm no dia 23/05/2017, seguido de 33 mm no dia 24. Já POAL, observou-se 16 mm no dia 28 e 11 mm para o dia 29.

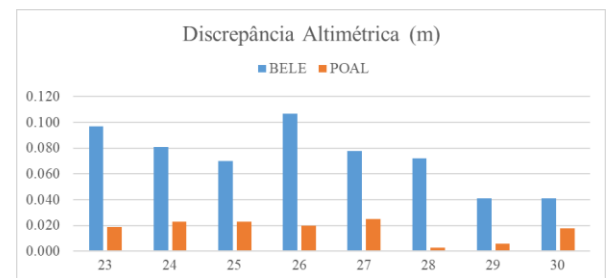


Fig. 8 – Discrepância Altimétrica maio de 2017.

Segundo a Figura 8, os maiores valores foram 107 mm, no dia 26, e 25 mm no dia 27, representando respectivamente as estações BELE e POAL.

5- CONCLUSÕES

Considerando todos os processamentos, tanto para a planimetria quanto para a altimetria, foi possível observar que em todas as análises a estação POAL sofreu menos interferência nas resultantes de seus processamentos do que a estação BELE. Isto se deve ao fato da estação estar localizada em uma região de baixa atividade ionosférica.

De acordo com as discrepâncias calculadas, não foi possível verificar a correlação com as fases características das tempestades geomagnéticas. Em outras palavras, os maiores valores de discrepâncias não foram observados durante a fase principal da tempestade geomagnética. Além disso, na fase de recuperação, na qual a ionosfera fica menos intensa, seus valores não

diminuíram. Desta forma, pode-se concluir que o AUSPOS não foi sensível aos efeitos das tempestades geomagnéticas analisadas.

Isto pode ter ocorrido em função de vários motivos, tais como: as tempestades analisadas, apesar de intensas, ocorreram em período de mínima atividade solar do ciclo 24. Ressalta-se que este ciclo é significativamente menos intenso com relação ao ciclo 23; os dados utilizados neste trabalho são oriundos de receptores de duas frequências, ao contrário dos dados utilizados nos trabalhos já realizados no Brasil (citados na introdução – dados da portadora L1); por fim, destaca-se que o AUSPOS utiliza o programa de processamento de dados científico Bernese para o processamento dos dados, que utiliza processos rigorosos no ajustamento de observações, bem como no controle de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Este estudo contou com o incentivo da Universidade Federal de Viçosa através do Departamento de Engenharia Civil (DEC), curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que disponibilizaram seus equipamentos, instalações e aplicativos computacionais.

Ao apoio financeiro concedido pela CAPES através do consentimento da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altamimi, Z.; X. Collilieux; J. Legrand; B. Garayt e C. Boucher, 2007. *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters*, em *Journal of Geophysical Research*, V. 112, 19 páginas.
- AUSPOS (2007). *AUSPOS-Online GPS Processing Service*. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>>. Acesso em: junho de 2017.
- Dal Poz, W. R. e P.O. Camargo, 2006. Conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência, em *Boletim de Ciências Geodésicas*. Curitiba, Vol. 12, N° 2, pp.275-294.
- Davies, K., 1990. *Ionospheric Radio*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 580 páginas.
- Drewes, H. e O. Heidbach, 2012. *The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean*, em *Geodesy for Planet Earth* (eds) S. Kenyon, M.C. Pacino e U. Marti, *Proceedings of the Symposium in Buenos Aires*, Argentina, pp. 657-664.
- IBGE (2017). *RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm?c=71>>. Acesso em Junho de 2017.
- IERS Conventions (2010). *IERS Technical Note 36*. Frankfurt, Alemanha, 179 páginas. Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>>. Acesso em: maio de 2017.
- IERS Conventions (2012). *IERS Technical Note 37*. Frankfurt, Alemanha, 54 páginas. Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn37.html>>. Acesso em: maio de 2017.
- ISGI (2017). *Iaga Endorsed Geomagnetic Indices/Events*. Disponível em: <http://isgi.unistra.fr/about_indices.php>, Acesso em: Jun. 2017.
- ITRF (2017). *International Terrestrial Reference Frame*. Disponível em: <http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ITRF2008.php> Acesso em: Junho de 2017.
- Jerez, G.O.; V.A.S. Pereira e D.B.M. Alves, 2017. Relação entre índices de irregularidades e de cintilação ionosférica para a região brasileira, em *IV Simpósio Brasileiro de Geomática e II Jornadas Lusófonas - Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica*, Presidente Prudente - SP, pp.589-596.
- Leick, A., 1995. *GPS satellite surveying*. 3º.ed. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 560 páginas.
- Matsuoka, M.T.; C. Collischonn; I. Klein; P.O. Camargo; V. A. S. Pereira, 2013 Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira, em *Boletim de Ciências Geodésicas*, V.19, N° 1, pp.14-33.
- Monico, J.F.G., 2008. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*, Editora Unesp, São Paulo, 476 páginas.
- SIRGAS (2017). Modelo de Velocidades de para a América do Sul e Caribe (VEMOS2009.) Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/velocity-model/>> Acesso em: maio de 2017
- UNAVCO (2017). *TEQC - The Toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS/Beidou/QZSS/IRNSS Data*. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>>. Acesso em: Maio de 2017.
- Yamashita, C.S., 1999. *Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude*. Dissertação de mestrado, INPE, São José dos Campos, 75 páginas.