
ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO GLOBAL DA IONOSFERA DO IGS NO POSICIONAMENTO POR PONTO DURANTE PERÍODOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS: ESTUDO DE CASO PARA 29-30 DE OUTUBRO DE 2003 NA REGIÃO SUL DO BRASIL

MARCELO TOMIO MATSUOKA¹

CAROLINA COLLISCHONN¹

PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Instituto de Geociências – Departamento de Geodésia

Laboratório de Pesquisas em Geodésia (LAGEO), Porto Alegre, RS

²Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – Departamento de Cartografia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Presidente Prudente, SP

{tomiomatsuoka, carol.collischonn}@gmail.com ; paulo@fct.unesp.br

RESUMO - No posicionamento com receptores GPS (*Global Positioning System*) de uma frequência uma das principais fontes de erro é a ionosfera. Alguns modelos têm sido desenvolvidos para minimização desse erro, entre eles, o Modelo da Ionosfera do IGS (*International GNSS Service*). Neste artigo foi avaliado o desempenho desse modelo aplicado no posicionamento por ponto durante um período de intensa tempestade geomagnética (29-30 de outubro de 2003). No experimento foram utilizados os dados GPS da estação SMAR da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) localizada em Santa Maria/RS. Esses dados foram processados com e sem correção da ionosfera. Para análise calculou-se o erro médio quadrático (EMQ) a cada intervalo horário para ambas as estratégias de processamento. A melhora média na componente vertical foi de 66% e 60%, respectivamente, para os dias 29 e 30 de outubro de 2003. Porém, para a componente vertical em 6 intervalos horários (12,5% dos casos) a estratégia com correção da ionosfera foi pior do que a sem correção. Quanto à posição planimétrica, o desempenho foi pior em 19 intervalos horários (39,5% dos casos). Nos casos em que houve melhora, os valores médios de melhora para planimetria são de 35% e 45%, respectivamente, para os dias 29 e 30.

ABSTRACT - In the positioning with single frequency GPS receivers, one of the main sources of error is the ionosphere. Some models have been developed to minimize this error, among these, the Ionosphere Model of IGS (*International GNSS Service*). This models performance, applied to the point positioning during a period of intense geomagnetic storms (29-30, October 2003), was evaluated in this paper. The GPS data from the SMAR station, located in Santa Maria/RS and linked to the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring), was used in this experiment. This data was processed with and without the correction of the ionosphere. The Root Mean Square (RMS) was calculated at a one-hour interval for both processing strategies for analyses. The average improvement in the vertical component was 66% and 60 %, respectively, for the 29th and 30th of October of 2003. However, for the vertical component in six hourly intervals (12,5% of the cases), the strategy with the ionosphere correction was inferior to the one without correction. Regarding the planimetric position, the performance was inferior in 19 hourly intervals (39,5% of the cases). In those cases in which there was progress, the average values of improvement for planimetry were 35% and 45%, respectively, for the 29th and 30th of October of 2003.

1 INTRODUÇÃO

Receptores GPS (*Global Positioning System*) de uma frequência ainda são os mais amplamente utilizados nas atividades de navegação e

posicionamento, devido ao baixo custo em relação aos receptores de dupla frequência. Para exemplificar, em 2006, segundo Wyllie et al. (2006) estimava-se que cerca de 75% de todos os receptores usados no mundo eram de uma frequência.

Uma das desvantagens do uso de receptores de uma frequência é o erro devido à ionosfera, que é uma das maiores fontes de erro no posicionamento. O erro associado à ionosfera nas observáveis do GPS é proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presente na trajetória do sinal entre o satélite e a antena receptora. O TEC, e consequentemente o erro devido à ionosfera, varia regularmente no tempo e no espaço com relação ao ciclo de manchas solares (variação de longo período), a época do ano (variação sazonal), a hora do dia (variação diária), a localização geográfica, entre outros fatores.

Uma das alternativas de minimizar o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS para usuários de receptores de uma frequência é fazer uso de algum modelo da ionosfera. Entre os mais conhecidos está o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1987), cujos coeficientes estão contidos nas efemérides transmitidas pelos satélites GPS. Experimentos realizados na região brasileira próxima ao pico da anomalia equatorial de ionização em um período de alta atividade solar mostraram uma melhora média de 53% (por época) nos resultados de posicionamento por ponto (MATSUOKA e CAMARGO, 2002).

Um outro modelo disponível aos usuários é o providenciado pelo IGS (*International GNSS Service*), conhecido como GIM (*Global Ionospheric Maps* – Mapas Globais da Ionosfera). Estes mapas globais da ionosfera do IGS podem ser obtidos no endereço: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>. Eles são disponibilizados em arquivos textos no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*) com valores de TEC sendo fornecidos com resolução espacial de 5° x 2,5° em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas.

Um estudo realizado por Ovstedal (2002), utilizando dados de um receptor localizado na Noruega, verificou uma melhora média na acurácia (por época) vertical e horizontal do posicionamento absoluto (com código C/A) de, aproximadamente, 85% e 55%, respectivamente, quando utilizado os mapas da ionosfera do IGS.

No Brasil, Armendaris et al. (2009) conduziu um estudo sobre a eficiência dos mapas globais da ionosfera do IGS aplicado no posicionamento por ponto na região sul brasileira. O estudo envolveu dados GPS da estação POAL da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), localizada em Porto Alegre-RS, de 4 dias de cada mês do ano de 2001 (período de alta atividade solar). A melhora média na acurácia (por época) do posicionamento por ponto obtida foi de 78% e 44%, respectivamente, para a determinação vertical e horizontal, respectivamente.

Neste artigo, a eficiência do modelo global da ionosfera do IGS foi avaliada em um período de intensa tempestade geomagnética, que afeta drasticamente o posicionamento com GPS.

2 ERRO DEVIDO À IONOSFERA

Na região compreendida pela ionosfera, a densidade de elétrons livres é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas.

Neste sentido, o efeito da ionosfera, que depende da frequência do sinal que a atravessa é proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho entre o satélite (s) e a antena receptora (r). O erro na observável de fase (I_{fr}^s) e pseudodistância (I_{gr}^s) são dados por (LEICK, 1995):

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (1)$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (2)$$

De acordo com as equações (1) e (2) pode-se verificar que os erros devido à ionosfera para a fase e pseudodistância são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência da portadora. A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado (el/m²).

3 MAPAS GLOBAIS DA IONOSFERA DO IGS (ARQUIVOS IONEX)

No ano de 1998 o IGS, a partir do seu grupo de trabalho da ionosfera, iniciou a produção de Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Maps*) que disponibilizam valores de VTEC calculados usando dados GPS coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência (FELTENS e SCHAEER, 1998). Oficialmente, estes mapas são disponibilizados na sua forma final com uma latência de 11 dias (HERNANDEZ-PAJARES, 2003). Porém, desde dezembro de 2003, o IGS vem disponibilizando os mapas em uma versão preliminar com uma latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS) (KOMJATHY e HERNANDEZ-PAJARES, 2004).

Os mapas são disponibilizados pelo IGS em arquivos no formato IONEX que fornecem valores de VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical) em um *grid* com resolução espacial de 5° x 2,5° em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas (SCHAEER, 1999). Para converter valores de VTEC em TEC na direção satélite/receptor utiliza-se uma função de mapeamento (CAMARGO, 1999). Posteriormente, para obter o erro ionosférico nas observáveis GPS basta aplicar as equações 1 e 2. Além dos valores de VTEC, os arquivos IONEX fornecem valores do atraso instrumental

interfrequência dos satélites, bem como, dos receptores envolvidos no processamento.

Atualmente, o grupo de trabalho da ionosfera do IGS conta com a participação de 4 centros de análises, a saber:

- CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*), (Suíça);
- ESA (*European Space Agency*), Alemanha;
- JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), EUA;
- UPC (*Polytechnical University of Catalonia*), Espanha.

Vale ser comentado que no início o NRCan (*Natural Resources Canada*) também fazia parte deste grupo. São estes centros de análise que produzem os mapas do TEC disponibilizados pelo IGS, cada qual com suas estratégias, porém todas utilizando os dados GPS e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) das estações ativas do IGS. Desta forma, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de 4 arquivos IONEX. Desde meados de dezembro de 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos centros de análise são combinados para resultar em um único arquivo IONEX. Os arquivos IONEX de cada centro de análise, bem como, os arquivos combinados, são disponibilizados pelo IGS, com acesso livre, no seguinte endereço: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>.

Segundo IGSCB (2006), a precisão média dos valores de VTEC para os arquivos IONEX finais é de 2-8 TECU (*TEC Unit* – Unidade de TEC – $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elétrons/m}^2 = 0,16 \text{ m de erro em } L_1$) e para os arquivos rápidos de 2-9 TECU. É claro que, essa precisão pode variar de acordo com a região do globo terrestre, dependendo do número de estações que foram utilizadas em determinada região. Além disso, essa precisão média refere-se aos valores de VTEC do *grid* e, portanto, para valores interpolados espera-se uma menor precisão. Mais informações sobre as atividades do grupo de trabalho da ionosfera do IGS e dos arquivos IONEX produzidos por eles podem ser obtidas em http://gagel52.upc.es/~ionex3/igs_iono/igs_iono.html.

Uma das aplicações destes arquivos IONEX do IGS é possibilitar ao usuário de receptor de simples frequência uma forma de obter o valor do erro devido à ionosfera para realizar a correção das suas observáveis, e desta forma, melhorar a qualidade do seu posicionamento.

No hemisfério norte um estudo realizado por Ovstedal (2002) avaliou a melhora obtida no posicionamento por ponto após a correção das pseudodistâncias (C/A) do erro devido à ionosfera a partir dos valores de VTEC obtidos dos mapas da ionosfera do IGS (arquivos IONEX) do IGS produzidos pelo CODE. Ovstedal (2002) utilizou no experimento os dados da estação GPS OSLO (60°N; 10°E), localizada na Noruega, coletados no período de

17 a 23 de junho de 2001 (período de alta atividade solar do ciclo 23). Os resultados mostram uma melhora média de 85% na acurácia (por época) do posicionamento por ponto na determinação da altitude geométrica, e de 55% para a acurácia horizontal. Vale salientar que a estação OSLO está localizada na região geográfica da ionosfera entre a de latitudes médias e de altas latitudes, e desta forma, em condições ionosféricas diferentes do Brasil (localizada na região equatorial e de baixas latitudes).

No Brasil, um estudo foi realizado por Armendaris et al. (2009) utilizando a estação POAL da RBMC, localizada em Porto Alegre/RS/. Verificou-se uma melhora média na acurácia do posicionamento por ponto (C/A) quando utilizado os mapas da ionosfera do IGS de cerca de 77% e 44%, respectivamente, para a determinação da altitude geométrica e da posição planimétrica. O estudo usou dados em período de alta atividade solar, porém, somente com dias sem nenhuma influência de tempestades geomagnéticas.

4 TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS /IONOSFÉRICAS

O campo magnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera. Na ionosfera, o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado.

Além da radiação eletromagnética, o Sol também libera um fluxo de partículas carregadas chamado de vento solar (KIRCHHOFF, 1991). O vento solar ocorre continuamente, confinando e distorcendo o campo magnético da Terra em uma cavidade com uma cauda longa que se estende por centenas de raios terrestres na direção anti-solar (FEDRIZZI, 2003), fazendo com que o campo geomagnético se torne diferente do conhecido modelo teórico de Dipolo. Esta cavidade denomina-se magnetosfera.

As linhas de força do campo geomagnético são comprimidas do lado iluminado pelo Sol, formando uma espécie de cauda na direção anti-solar. Durante eventos solares intensificados, que por sua vez intensificam o vento solar, a velocidade do vento solar pode passar de 300-400 para 1000 km/s ou até mais. Dependendo da intensidade da perturbação, o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) é comprimido, podendo passar de 10 para 6 raios terrestres (FEDRIZZI, 2003). Em outras palavras, eventos solares são responsáveis pela alteração dos parâmetros do vento solar (velocidade e densidade). Conseqüentemente, ocorre uma alteração do campo geomagnético, que, por sua vez, contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas, implicando em uma tempestade ionosférica.

Um evento solar conhecido como ejeção coronal de massa (CME – *Coronal Mass Ejection*) intensifica o vento solar, podendo causar tempestades geomagnéticas.

CME é a denominação dada a grandes quantidades de plasma que são subitamente ejetadas a partir do Sol (HATHAWAY, 2007). A frequência de ocorrência de CME's está relacionada ao ciclo de manchas solares. Em épocas de baixa atividade solar (número reduzido de manchas solares), a frequência de ocorrência é de uma CME por semana; em períodos de alta atividade solar, observa-se em média 2 ou 3 CME's por dia (HATHAWAY, 2007). No entanto, é preciso considerar que nem todas as CME's ocorrem na direção da Terra; as que ocorrem são denominadas CME's Halo (HATHAWAY, 2007).

É importante salientar também que CME's podem ser geofetivas, ou seja, ter o potencial de causar perturbações geomagnéticas na Terra. Com a ocorrência de CME's, os parâmetros do vento solar são drasticamente modificados (MATSUOKA, 2007). Se essa nuvem de plasma for ejetada na direção da Terra e atingi-la, poderá causar uma tempestade geomagnética, que por sua vez, causará uma tempestade ionosférica, afetando, portanto o comportamento do TEC (McNAMARA, 1991) e, conseqüentemente, o posicionamento com GPS.

Tempestades geomagnéticas podem ser descritas por alguns índices, que informam a intensidade e a duração das mesmas. Um deles é o índice geomagnético *Disturbance Storm-Time* (Dst), que descreve as tempestades geomagnéticas de forma mais global.

O índice Dst representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999). É a partir desse parâmetro que se melhor define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. Antes do início da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por “fase inicial” ou “início súbito”. Após esse pico, desenvolve-se a “fase principal” da tempestade, que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice. Após alcançar o mínimo, o índice começa a subir de valor, cuja fase é conhecida como “fase de recuperação”, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999). Valores publicados do índice Dst podem ser encontrados no endereço eletrônico: <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>.

A classificação de uma tempestade geomagnética em função do índice Dst é dada de acordo com a Tabela 1 (FEDRIZZI, 2003).

Tabela 1 – Classificação de uma tempestade geomagnética.

Condição 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)

5 EXPERIMENTOS, RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

5.1 Eventos Solares de Outubro de 2003

Durante o mês de Outubro e início do mês de Novembro de 2003, já no período de declínio do Ciclo Solar 23, três agrupamentos de manchas solares – 10484, 10486 e 10488 – mostraram-se extremamente ativos, gerando uma série de explosões solares classificadas na Classe X, conforme medidas dos satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Entre as onze explosões solares Classe X que ocorreram entre Outubro e Novembro de 2003, três se destacaram por sua magnitude e geofetividade: as explosões de 28 de Outubro, 29 de Outubro e 4 de Novembro. Em associação com essas três explosões, ocorreram Ejeções Coronais de Massa (CME's) extremamente rápidas e intensas que alteraram drasticamente os parâmetros do vento solar.

Os primeiros efeitos desses eventos solares – o aumento da radiação eletromagnética na faixa do raio-X – foram percebidos na Terra em poucos minutos, através de Distúrbios Ionosféricos Súbitos no lado diurno da Terra. No Brasil, o efeito no posicionamento por ponto com GPS devido ao repentino aumento da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar de 28 de outubro de 2003 foi estudado e apresentado por Matsuoka et al. (2006).

No dia 29 de outubro de 2003, com a chegada das CME's à Terra do dia anterior, severas tempestades geomagnéticas e ionosféricas – que foram denominadas na comunidade científica como Tempestades de *Halloween* – foram desencadeadas, e suas características e efeitos na ionosfera e no GPS têm sido estudados e apresentados em diversos artigos. Quanto aos efeitos da tempestade geomagnética/ionosférica de 29 de outubro de 2003 no posicionamento por ponto com GPS na região brasileira estudos foram apresentados por Matsuoka et al. (2008).

Nesta pesquisa, no entanto, o estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do Modelo Global da Ionosfera do IGS (GIM-IGS) aplicado no posicionamento por ponto na região Sul do Brasil em

períodos de intensas tempestades geomagnéticas/ionosféricas, tendo como estudo de caso as ocorridas em 29 e 30 de Outubro de 2003.

5.2 Tempestade geomagnética/ionosférica de 29/30 de Outubro de 2003

Às 05:58 UT do dia 29 de Outubro de 2003, o instrumento MAG (*Magnetic Field Experiment*), à bordo do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), registrou a passagem da frente de choque da CME ocorrida em associação com a explosão solar X17.2, ambas observadas no dia anterior. Alguns minutos depois, às 06:11 UT (03:11 HL) de 29 de Outubro, registrou-se o início de uma severa tempestade geomagnética (BATISTA *et al.*, 2006), a primeira de uma série de super eventos geomagnéticos ocorridos em outubro e novembro de 2003.

A Figura 1 apresenta os valores do índice geomagnético Dst para os dias 29 e 30 de Outubro, onde as fases da tempestade ficam bem caracterizadas. Entre 06 e 07 UT de 29 de Outubro, observa-se um repentino e pequeno aumento do valor de Dst, atribuído à compressão da magnetosfera pelo vento solar intensificado pela CME; a seguir, desenvolve-se a fase principal da tempestade, com a queda brusca do índice atingindo um valor mínimo médio de -353 nT (entre 00 e 01 UT de 30 de Outubro), quando então inicia-se a fase de recuperação. O novo decréscimo do índice Dst nas horas finais do dia 30 de Outubro é atribuído à chegada à Terra de uma segunda CME, ocorrida em associação com a explosão solar do dia 29 de Outubro, desencadeando uma segunda tempestade geomagnética. Logo, duas tempestades geomagnéticas/ionosféricas classificadas como muito intensas ocorreram seguidamente: uma em 29 de outubro de 2003 e outra em 30 de Outubro.

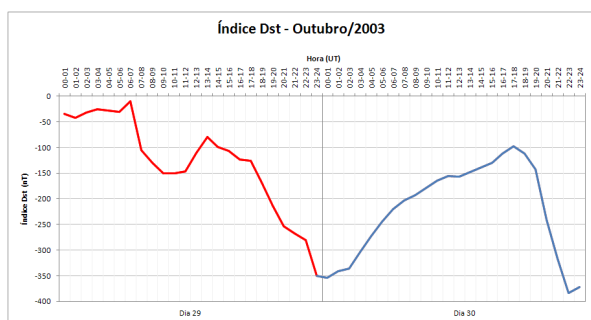


Figura 1 - Índice Dst para os dias 29 e 30 de Outubro de 2003.

5.3 Experimentos e Resultados

Para a realização dos experimentos foi utilizado um programa para a correção de observações GPS do erro devido à ionosfera utilizando arquivos IONEX. O programa foi desenvolvido em Fortran Lahey 95 e

recebeu a denominação de CORIONEX, e foi desenvolvido e apresentado por Matsuoka (2007). Os dados de entrada do programa CORIONEX são os arquivos de observação GPS (no formato RINEX), efemérides precisas (no formato SP3) e o arquivo com a grade de valores de VTEC no formato IONEX. Detalhes quanto ao programa CORIONEX podem ser obtidos em Matsuoka (2007) ou Matsuoka e Camargo (2007).

No presente estudo foram utilizados os dados da estação SMAR ($\approx 29,7^\circ\text{S}$; $53,7^\circ\text{W}$) da RBMC localizada em Santa Maria/RS para os dias da tempestade geomagnética referida anteriormente.

Utilizando o programa CORIONEX os dados da estação SMAR foram corrigidos do erro devido à ionosfera a partir dos arquivos IONEX do IGS.

Para avaliar o desempenho dos arquivos IONEX durante o período da tempestade geomagnética foram analisados os resultados do posicionamento por ponto, utilizando os dados GPS de SMAR corrigidos e os sem correção da ionosfera. As seguintes siglas foram adotadas para identificar o resultado dos processamentos:

- Sem a correção da ionosfera (SCI);
- Com a correção da ionosfera (CCI).

Para cada dia foi realizado o posicionamento por ponto com o software GPSPACE desenvolvido pelo GSD/NRCAN (*Geodetic Survey Division/Natural Resource Canada*), utilizando somente a observável de pseudodistância (C/A) em L_1 .

Para o processamento do posicionamento por ponto foram utilizadas as efemérides precisas e as correções dos relógios dos satélites geradas e fornecidas pelo GSD/NRCAN. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP) valor menor ou igual a 7. No processamento foram consideradas apenas as pseudodistâncias coletadas com ângulo de elevação acima de 15 graus. Para minimizar o efeito da troposfera o software GPSPACE utiliza o modelo de Hopfield. Todos esses procedimentos adotados visam minimizar os diversos erros envolvidos no posicionamento, deixando predominante somente o erro devido à ionosfera para verificar a melhora obtida no posicionamento utilizando os dados GPS corrigidos da ionosfera com os IONEX. As coordenadas foram estimadas a cada 30 segundos e comparadas com as coordenadas conhecidas da estação SMAR em SIRGAS2000, atualizadas para a época do posicionamento, obtendo-se o erro posicional cometido no posicionamento por ponto em cada determinação.

Para um indicador da acurácia obtida no posicionamento por ponto para cada dia e cada estratégia de processamento (SCI e CCI), foi calculado o EMQ (Erro Médio Quadrático) correspondente à

determinação vertical (altitude geométrica) e horizontal, para intervalos de 1 (uma) hora.

As Figuras 2 e 3 mostram os valores de EMQ (para cada intervalo horário – Hora Local - HL) da

altitude geométrica para as estratégias SCI e CCI, para os dias 29 e 30 de outubro de 2003.

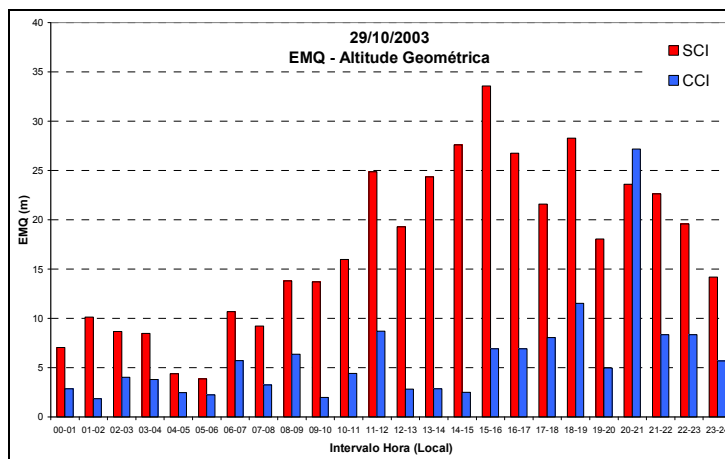


Figura 2 – EMQ – Altitude Geométrica – 29 de Outubro de 2003.

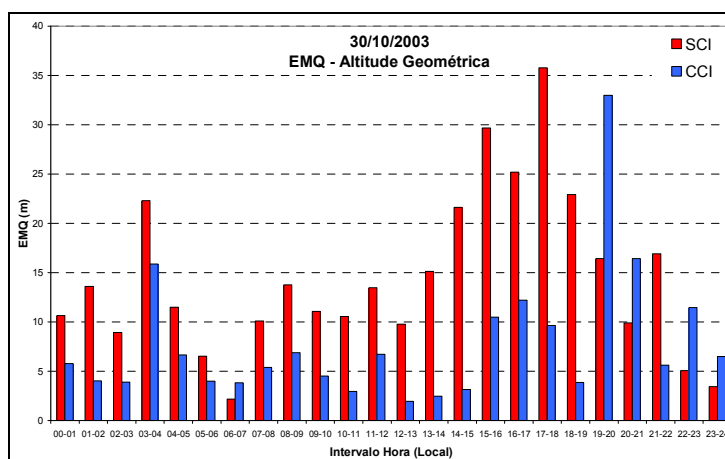


Figura 3 – EMQ – Altitude Geométrica – 30 de Outubro de 2003.

De maneira geral, pode-se verificar nas Figuras 2 e 3 a melhora na acurácia do posicionamento por ponto na determinação vertical quando comparada a estratégia CCI com a SCI. A redução é notada principalmente no período da tarde dos dois dias. No intervalo entre 19 e 24 horas local (HL) houve alguns casos em que a estratégia CCI foi pior do que a SCI. Nesse intervalo ocorre a formação do segundo pico da anomalia equatorial de ionização que, assim como foi

constatado por Armendaris et al. (2009), também foi comprometido em alguns casos o desempenho do modelo da ionosfera do IGS, não realizando uma correção adequada.

As Figuras 4 e 5 mostram os valores de EMQ (para cada intervalo horário – Hora Local - HL) para a posição planimétrica para as estratégias SCI e CCI, para os dias 29 e 30 de outubro de 2003.

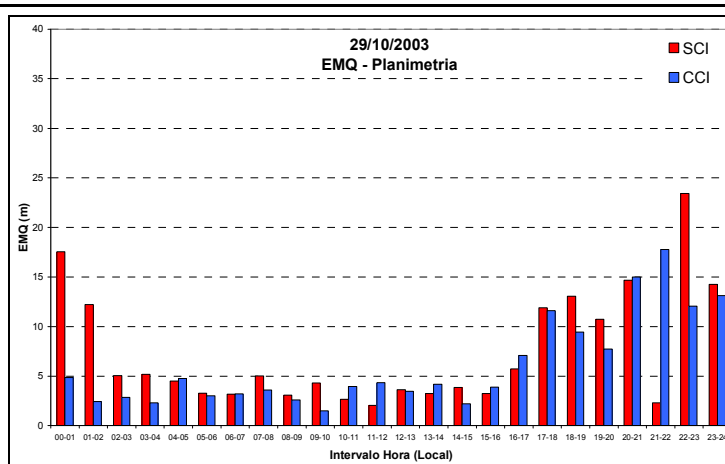


Figura 4 – EMQ – Planimetria – 29 de Outubro de 2003.

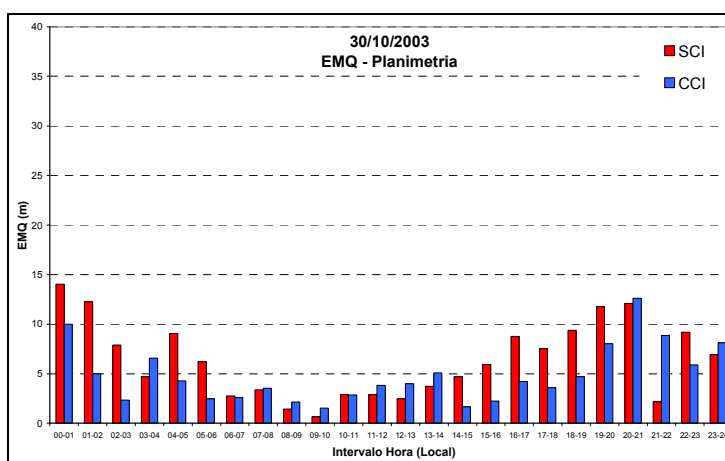


Figura 5 – EMQ – Planimetria – 30 de Outubro de 2003.

Comparando os resultados da estratégia SCI entre a planimetria (Figuras 4 e 5) e a altitude geométrica (Figuras 2 e 3) pode-se verificar que o efeito da ionosfera, que contamina as observáveis, afeta menos a determinação da componente planimétrica. Isso se deve a distribuição geométrica dos satélites que favorece no ajustamento a compensação de erros no plano horizontal.

Desta forma, como o erro devido à ionosfera afeta menos a componente planimétrica a eficiência do modelo global da ionosfera do IGS também é menor, quando comparada a proporcionada na determinação da altitude geométrica. Inclusive, em vários casos, a estratégia CCI proporcionou resultados piores em relação a SCI.

É interessante ressaltar que no período da ocorrência da anomalia equatorial noturna os erros planimétricos são maiores do que no período da tarde, principalmente no dia 29 de outubro. O efeito da anomalia equatorial noturna na componente planimétrica já foi evidenciado em outras pesquisas, como por exemplo, em Salomoni et al. (2009). No presente estudo, este fato, com a intensificação da anomalia equatorial noturna durante a tempestade

geomagnética, principalmente no dia 29 (Matsuoka et al., 2008), está muito bem caracterizada, aumentando o erro planimétrico.

As Tabelas 2 e 3 mostram os valores para a melhora obtida em altitude geométrica e planimetria, respectivamente, quando comparado o EMQ da estratégia CCI com o do SCI.

Tabela 2 – Melhora obtida (%) em altitude geométrica.

Altitude Geométrica		
Melhora Obtida (%)		
Hora Local	29/10/2003	30/10/2003
00-01	59,56	45,88
01-02	81,63	70,38
02-03	53,38	56,31
03-04	55,05	28,78
04-05	43,62	42,10
05-06	41,94	38,68
06-07	46,48	-77,01
07-08	64,48	46,65

08-09	53,79	49,86
09-10	85,56	59,22
10-11	72,22	71,85
11-12	64,98	50,12
12-13	85,29	79,90
13-14	88,29	83,52
14-15	90,87	85,44
15-16	79,33	64,59
16-17	74,13	51,51
17-18	62,70	73,06
18-19	59,24	83,12
19-20	72,44	-100,92
20-21	-15,28	-65,80
21-22	63,04	66,83
22-23	57,42	-126,18
23-24	60,02	-89,34

Tabela 3 – Melhora obtida (%) em planimetria.

Planimetria		
Melhora Obtida (%)		
Hora Local	29/10/2003	30/10/2003
00-01	72.35	28.69
01-02	80.11	59.32
02-03	43.46	70.58
03-04	55.11	-39.34
04-05	-5.50	52.87
05-06	8.08	60.48
06-07	-0.80	5.67
07-08	28.38	-5.22
08-09	16.50	-49.79
09-10	65.41	-135.94
10-11	-49.25	0.94
11-12	-110.89	-31.23
12-13	3.80	-60.70
13-14	-28.33	-36.17
14-15	42.92	64.52
15-16	-20.01	61.94
16-17	-23.30	51.95
17-18	2.49	52.37
18-19	27.58	50.06
19-20	28.05	31.77
20-21	-2.20	-4.32
21-22	-675.21	-304.74
22-23	48.60	35.87
23-24	7.95	-16.94

Analisando os valores de melhora obtida constantes na Tabela 2, que se refere à determinação em altitude geométrica, pode-se verificar que em 6 casos houve piora (valores negativos) quando aplicada a correção devido à ionosfera, com valor máximo de 126% aproximadamente, ocorrido no dia 30 no intervalo das 22-23 HL. A mesma análise realizada para a componente planimétrica (Tabela 3) chega-se ao número de 19 casos com piora, com valor máximo de até 675%, aproximadamente para o intervalo das 21-22 HL do dia 29 de outubro. Agora, considerando os valores positivos, ou seja, os casos em que se melhorou o posicionamento por ponto ao aplicar a correção ionosférica, os valores máximos para a altitude geométrica são de 90,8% para o dia 29 e de 85,4% para o dia 30 de outubro, ambos ocorridos no período da tarde. Os valores médios (considerando somente os positivos) são de 66% e 60%, respectivamente, para os dias 29 e 30 de outubro.

Quanto a melhora obtida na planimetria os valores máximos são iguais a 80,1% para o dia 29 e 70,5% para o dia 30 de outubro, ambos ocorridos nas primeiras horas da madrugada. Os valores médios (considerando somente os positivos) são de 35% e 45%, respectivamente, para os dias 29 e 30 de outubro.

6 CONCLUSÕES

Neste artigo foi realizada a análise do desempenho do modelo global da ionosfera do IGS no posicionamento por ponto (código C/A) durante a intensa tempestade geomagnética de 29-30 de outubro de 2003 utilizando os dados GPS da estação SMAR, localizada em Santa Maria/RS.

Para análise calcularam-se os valores de EMQ para cada intervalo horário dos dias 29 e 30 de outubro de 2003, considerando o posicionamento por ponto com e sem correção da ionosfera. Os resultados mostraram que de forma geral houve melhora na determinação da componente vertical quando aplicada a correção da ionosfera. A melhora média foi de 66% e 60%, respectivamente, para os dias 29 e 30 de outubro de 2003. Porém, dos 48 intervalos horários, em 6 intervalos (12,5% dos casos) a estratégia com correção da ionosfera foi pior do que a sem correção da ionosfera. Quanto à posição planimétrica, o desempenho foi inferior, sendo que em 19 intervalos horários (39,5% dos casos) não houve melhora ao se utilizar o modelo da ionosfera do IGS. Nos casos em que houve melhora, os valores médios são de 35% e 45%, respectivamente, para os dias 29 e 30 de outubro de 2003.

AGRADECIMENTOS

Ao IBGE, pelo fornecimento dos dados GPS das estações da RBMC; ao IGS, pelo fornecimento dos dados IONEX; ao NRCAN, pelo fornecimento do software GPSPACE; ao CNPq pela bolsa

produtividade de pesquisa do primeiro autor; à Propeq/UFRGS pela Bolsa de Iniciação Científica da segunda autora.

REFERÊNCIAS

- ARMENDARIS, O.C.; MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Desempenho do modelo global da ionosfera do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15, n.2, p.208-223, 2009.
- BATISTA, I. S.; ABDU, M.A.; SOUZA, J.R.; MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BAILEY, G.J.. Unusual early morning development of the Equatorial Anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n.A0530, 2006.
- CAMARGO, P.O.. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. 1999. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- FEDRIZZI, M. **Estudo do efeito de tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS. 2003**. 256 f. Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- FELTENS, J.; SCHAEER, S.. IGS Products for the Ionosphere. In: **Proceeding of the IGS Analysis Centre Workshop**, edited by J. M. Dow et al., p. 225-232, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, Februray 9-11, 1998.
- HATHAWAY, D. H. Coronal Mass Ejections. 2007. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml>>. Acesso em: Maio, 2007.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.. **Performance of IGS ionosphere TEC maps**. Disponível em: <http://maite152.upc.es/~ionex3/doc/IGS_IONO_report_April2003_7.pdf>, 2003. Acesso em outubro/2004
- IGSCB (International GPS Service Central Bureau). disponível em: <<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso: novembro de 2006.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H.. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.
- KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.AES-23, n.3, p.325-331, 1987.
- KOMJATHY, A.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.. The IGS global TEC maps: present and future. In: **National Radio Science Meeting**, Boulder, CO, USA, 2004.
- LEICK, A.. **GPS satellite surveying**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- MATSUOKA, M.T.. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 2007. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Correção ionosférica utilizando o modelo de Klobuchar e o regional da ionosfera: avaliação da performance no posicionamento por ponto. In: Mitishita, E.A. ed. **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba: Imprensa Universitária. 2002. 395p. Vol.2, p.20-40.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Correção ionosférica utilizando os mapas globais do TEC do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.13, n.2, p.253-270, 2007.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BATISTA, I.S.. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.12, n.2, p.315-334, 2006.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BATISTA, I.S.. Posicionamento por GPS na região brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. **Pesquisas em Geociências**, v.35, n.1, p.3-19, 2008.
- McNAMARA, L.F.. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- OVSTEDAL, O.. Absolute positioning with single-frequency GPS receivers. **GPS Solutions**, v.5, n.4,

p.33-34, 2002.

SALOMONI, C.S.; MATSUOKA, M.T.; SOUZA, S.F.; CAMARGO, P.O.. Análise e comparação do comportamento da ionosfera e do posicionamento por ponto em períodos de alta e baixa atividade solar. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15, n.3, p.333-351, 2009.

SCHAER, S. **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999. 205p. Ph.D. dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland.

SEEBER, Gunter. **Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

WYLLIE, S.; ZHANG, K.; TALBOT, N.. An analysis of the temporal correlation of the ionospheric bias affecting GPS Carrier Phase observations. In: **Proceedings of IGNSS Symposium Holiday Inn Surfers Paradise**, Australia, 17-21 July, 2006.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.