

DESEMPENHO DO MODELO GLOBAL DA IONOSFERA DO IGS: AVALIAÇÃO NO POSICIONAMENTO POR PONTO NA REGIÃO SUL DO BRASIL EM PERÍODO DE ALTA ATIVIDADE SOLAR¹

Perfomance of the IGS-Global Ionospheric Model (GIM): Evaluation at the point positioning in southern area of Brazil in a period of high solar activity.

OSVALDO DA COSTA ARMENDARIS¹
MARCELO TOMIO MATSUOKA¹
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO²

¹Instituto de Geociências- UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970,
Cx. Postal 15001, Porto Alegre, RS, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas –UNESP
Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900,
Presidente Prudente, SP, Brasil

osvaldo.armendaris@ufrgs.br; tomiomatsuoka@gmail.com ; paulo@fct.unesp.br;

RESUMO

Um dos principais fatores que limita a acurácia do posicionamento com receptores GPS de uma frequência é o erro devido à ionosfera. Este erro é proporcional ao conteúdo total de elétrons presente na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. Alguns modelos têm sido desenvolvidos para a correção das observáveis GPS do erro sistemático devido à ionosfera. O exemplo mais conhecido e utilizado é o modelo de Klobuchar que corrige algo em torno de 50-60% do erro ionosférico. Alternativamente, o IGS (*International GNSS Service*) também possui um modelo conhecido como Mapa Global da Ionosfera (GIM – *Global Ionospheric Map*). Estes mapas são disponibilizados gratuitamente pelo IGS na internet a partir de arquivos no formato IONEX e, uma das aplicações, é utilizá-los para realizar a correção das observáveis GPS do erro devido à ionosfera. Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do posicionamento por ponto

¹ Uma versão prévia deste trabalho foi apresentada no II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas.

utilizando as pseudodistâncias corrigidas do efeito da ionosfera, a partir dos arquivos IONEX do IGS, para a região sul do Brasil. Os experimentos realizados mostraram uma melhora média na determinação planimétrica de 44% e na altitude geométrica de 77%, aproximadamente, quando utilizado o modelo da ionosfera do IGS.

Palavras-chave: Posicionamento com GPS; Ionosfera; TEC; GIM; IGS.

ABSTRACT

One of the main drawbacks of the GPS accuracy for L1 users is the error due to ionosphere. This error depends on the total electron content presents in the ionosphere, as well as of the carrier frequency. Some models have been developed to correct GPS observables of the systematic error due to the ionosphere. The model more known and used is the Klobuchar model, which corrected 50-60% of the ionospheric error approximately. Alternatively, IGS (International GNSS Service) also has developed a model called Global Ionospheric Map (GIM). These maps, in format IONEX, are available in the site of the IGS, and one of the applications of them is to correct the GPS observables of the error due to ionosphere. This work aims at evaluating the quality of GPS point positioning using the IGS ionospheric model in the southern region of Brazil. Tests carried out had shown an average improvement in the horizontal and vertical determination of 44% and 77%, respectively, when GIM is used in the point positioning.

Keywords: GPS Positioning; Ionosphere; TEC; GIM; IGS

1. INTRODUÇÃO

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. Quanto à variação geográfica, deve-se enfatizar que o Brasil é uma das regiões do globo terrestre que possuem os maiores valores e variações espaciais e temporais do TEC (KOMJATHY et al., 2003), e desta forma, a ionosfera é uma importante fonte de erro no posicionamento com GPS nesta região. Vários estudos sobre a variação do TEC na região brasileira, bem como do impacto da ionosfera no posicionamento com GPS, têm sido realizados nos últimos anos pela comunidade geodésica brasileira (FONSECA JUNIOR, 2002; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA et al., 2004; DAL POZ, 2005; DAL POZ e CAMARGO, 2006; MATSUOKA et al., 2006; SILVA et al., 2006).

Uma das formas de minimizar o erro devido à ionosfera é utilizar nos levantamentos receptores GPS de dupla frequência, que permitem eliminar o erro de primeira ordem da ionosfera nas observáveis GPS. Isto é possível devido ao fato do

erro ser dependente da frequência do sinal, o que possibilita realizar a combinação linear ion-free (MONICO, 2000; SEEBER, 2003). Por outro lado, os usuários de receptores de uma frequência têm seus resultados bastante afetados pelo erro devido à ionosfera principalmente no posicionamento por ponto e no relativo de linhas de base médias e longas.

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 se tem 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*). No ano de 1998 o IGS iniciou a distribuição de Mapas Globais da Ionosfera (GIM) que fornecem valores do TEC calculados usando dados coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência (FELTENS e SCHAER, 1998). Oficialmente, estes mapas são distribuídos com uma latência de 11 dias e são produzidos por 4 centros de análise do IGS (HERNANDEZ-PAJARES, 2003). Porém, atualmente já vem sendo disponibilizados mapas com latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS) (KOMJATHY e HERNANDEZ-PAJARES, 2004). 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 $5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ 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 (arquivos IONEX) produzidos pelo centro de análise CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) para a correção do erro devido à ionosfera. O período da análise foi relativo a uma semana do mês de julho de 2001.

No Brasil, onde as condições da ionosfera são bem diferentes da região investigada por Ovstedal (2002), tem-se o estudo realizado por Camargo e Matsuoka (2005). Nos experimentos foram utilizados os dados da estação UEPP da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) localizada em Presidente Prudente/SP. A amostra dos dados correspondeu a uma semana dos meses de julho/2001, outubro/2001, janeiro/2002 e abril/2002. Os resultados dos experimentos mostraram uma melhora média de 68% (por época) na determinação

da posição tridimensional após o uso do arquivo IONEX do IGS produzido pelo CODE. Vale salientar que a estação UEPP está localizada em uma região com alta influência da ionosfera, principalmente devido ao pico sul da anomalia equatorial de ionização (MATSUOKA e CAMARGO, 2004). Sobre a anomalia equatorial de ionização, bem como a teoria sobre a ionosfera e as variações do TEC, pode-se consultar, por exemplo, Davies (1990), McNamara (1991) e Kirchoff (1991).

Dentro deste aspecto de diferentes condições da ionosfera existentes no território brasileiro, um estudo do desempenho do modelo da ionosfera do IGS deve ser conduzido em diferentes locais do Brasil. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo da ionosfera do IGS (arquivos IONEX) aplicado no posicionamento por ponto na região do Rio Grande do Sul, utilizando os dados GPS da estação POAL da RBMC localizada em Porto Alegre/RS. Os arquivos IONEX utilizados foram os produzidos pelo CODE.

2. ERRO DEVIDO À IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (SEEBER, 2003). Com relação à propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre é dividida em troposfera e ionosfera. Na literatura relacionada ao GPS, a troposfera é a camada compreendida entre a superfície terrestre até aproximadamente 50 km de altura. Ela é formada por partículas neutras, e a maior concentração de gases encontra-se até uma altura de 12 km, composta por nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, argônio, vapor d'água, entre outros. A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura, e a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995).

A ionosfera, ao contrário da troposfera, é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. Caracteriza-se, principalmente, pela formação de íons e elétrons livres, e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura. Na região compreendida pela ionosfera, a densidade de elétrons livres é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas.

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) é dado 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 (e/m^2). É importante salientar que as equações 1 e 2 representam os erros de primeira ordem da ionosfera, que é bem maior que a soma dos erros de ordem superiores. Isto pode ser verificado na Tabela 1 que apresenta o erro ionosférico máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras L_1 , L_2 e para a combinação linear ion-free (L_0). Para direções inclinadas, a influência aumenta em até 3 vezes, aproximadamente (SEEBER, 2003).

Tabela 1 – Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.

Frequência	1ª ordem ($1/f^2$)	2ª ordem ($1/f^3$)	3ª ordem ($1/f^4$)
L_1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L_2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L_0	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Além do efeito da refração, a ionosfera pode causar um efeito denominado de cintilação ionosférica. Cintilações ionosféricas são flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons, e, conseqüentemente, do índice de refração. A cintilação causa um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda do sinal.

3. MAPAS GLOBAIS DA IONOSFERA DO IGS

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 SCHAER, 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 uma grade com resolução espacial de $5^\circ \times 2,5^\circ$ em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas (SCHAER, 1999). Para converter valores de VTEC

em TEC na direção satélite/receptor utiliza-se uma função de mapeamento (CAMARGO, 1999 e MATSUOKA, 2003). 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 interferência (DCB – *Differential Code Biases*) dos satélites, bem como, dos receptores envolvidos no processamento.

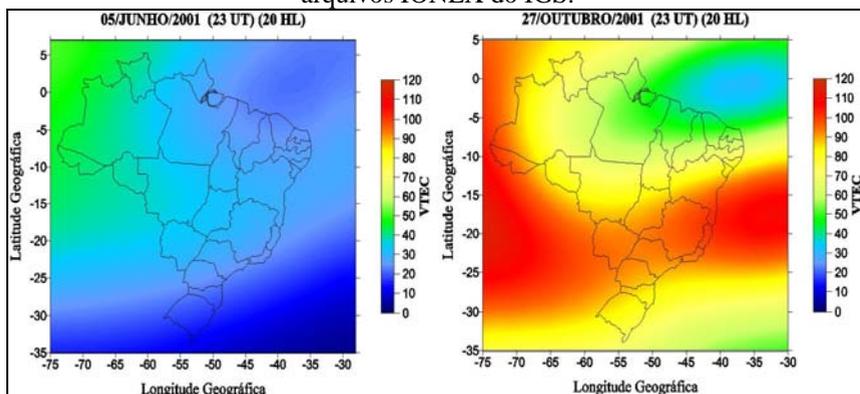
Atualmente, o grupo de trabalho da ionosfera do IGS conta com a participação de 4 centros de análises, a saber:

- 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/>.

Como exemplo, a figura 1 apresenta mapas de VTEC para o Brasil gerados a partir dos valores de VTEC contidos nos arquivos IONEX do IGS do dia 05 de junho e 27 de outubro de 2001 para as 23 horas UT.

Figura 1 – Mapas de VTEC para o Brasil produzidos usando valores dados nos arquivos IONEX do IGS.



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 TECU = 10^{16} elétrons/m² = 0,16 m de erro em L_1) e para os arquivos rápidos de 2-9 TECU. 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 grade 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://gage152.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 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).

4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Para o experimento foram utilizados os dados GPS da estação POAL da RBMC, localizada em Porto Alegre/RS, referentes a quatro dias de cada mês de 2001, contemplando, assim, toda a variação sazonal. O período também foi escolhido de tal forma que a avaliação correspondesse a um período de alta atividade ionosférica dentro da variação do ciclo solar de longo período, pois, o ano 2001 está dentro do período de alta atividade do ciclo solar 23.

Visando uma homogeneização, os quatro dias de cada mês de 2001 foram escolhidos de tal forma que não houvesse a influência de tempestades geomagnéticas/ionosféricas, e desta forma, escolheu-se dias classificados como sendo de atividade geomagnética calma analisando o índice geomagnético A_p .

Em cada dia, para a correção do erro devido à ionosfera, foram utilizados os arquivos IONEX do IGS produzidos pelo CODE.

Para cada dia foi realizado o posicionamento por ponto com o software GPSPACE (NRCan, 1997) desenvolvido pelo GSD/NRCan (*Geodetic Survey Division/Natural Resource Canada*), utilizando somente a observável de pseudodistância (C/A), considerando dois casos:

- Sem a correção da ionosfera (SCI);
- Com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do CODE (CCI).

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 do CODE. O GPSPACE possibilita a inclusão de arquivo IONEX para realizar o posicionamento por ponto com correção do erro devido à ionosfera. Além dessa correção, os erros relacionados ao DCB dos satélites também são corrigidos no processamento a partir dos valores que são fornecidos no arquivo IONEX, e grande parte do erro relacionado ao DCB do receptor acaba sendo absorvido pelo erro do relógio do receptor, que é estimado no processamento. As coordenadas foram estimadas a cada 30 segundos e comparadas com as coordenadas conhecidas da estação POAL em SIRGAS2000 (SIRGAS, 2009), atualizadas para a época do posicionamento, obtendo-se o erro posicional cometido no posicionamento por ponto em cada época.

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. O EMQ é obtido a partir da raiz quadrada da média do quadrado dos erros cometidos em cada época considerando um período de 24 horas, representando o erro posicional médio relativo a uma época de observação.

Para cada mês calculou-se um valor médio do EMQ com base nos valores obtidos dos quatro dias de cada mês. A tabela 2 apresenta o valor médio do EMQ para a altitude geométrica para cada mês do ano de 2001 referentes às estratégias de processamento SCI e CCI, bem como, a melhora obtida ao se comparar os resultados CCI com os SCI.

Na tabela 2 os valores do EMQ da estratégia de processamento sem correção da ionosfera (SCI) mostra a variação mensal do erro em altitude geométrica. Pode-se verificar que a variação desse erro está em concordância com a variação sazonal do TEC (MATSUOKA e CAMARGO, 2004); os maiores valores de EMQ em altitude geométrica ocorreram nos meses próximos aos equinócios e solstício de verão e os menores nos próximos ao solstício de inverno. Por exemplo, o valor

médio do EMQ para a estratégia SCI no mês de outubro (21,98 m) é aproximadamente 3 vezes maior do que o referente ao mês de junho (7,14 m).

Tabela 2 – EMQ - Altitude geométrica – meses de 2001.

EMQ – Altitude Geométrica (m)			
	SCI	CCI	Melhora(%)
Janeiro	18,83	3,10	83,5
Fevereiro	15,07	3,14	79,2
Março	16,22	3,16	80,5
Abril	16,71	3,34	80,0
Mai	8,10	4,43	45,3
Junho	7,14	1,97	72,4
Julho	7,91	1,80	77,2
Agosto	8,17	1,76	78,4
Setembro	13,61	2,82	79,3
Outubro	21,98	3,40	84,5
Novembro	21,27	3,00	85,9
Dezembro	18,04	2,44	86,5
Média nual	14,42 ± 5,4	2,86 ± 0,77	77,7 ± 10,9

Quanto à estratégia CCI pode-se observar a redução do EMQ quando comparada a SCI. A melhora mensal obtida na acurácia altimétrica após o uso dos arquivos IONEX foi acima de 75%, com exceção dos meses de maio e junho, com melhora de 45,3% e 72,4%. No total, 6 meses tiveram uma melhora média acima de 80%.

O valor médio das melhoras mensais obtidas foi de $77,7 \pm 10,9$ %. Este valor representa então um indicador da melhora média obtida na acurácia (relativa a uma época) da determinação altimétrica do posicionamento por ponto na região sul brasileira, utilizando os arquivos IONEX do IGS produzidos pelo CODE para a correção do erro devido à ionosfera, referente a um período de alta atividade solar (2001) e sem influência de dias com tempestades geomagnéticas.

Dando seqüência à apresentação dos resultados, assim como para a altitude geométrica, a tabela 3 mostra os valores médios mensais de EMQ (em metros) e de melhora obtida (em %) para a determinação planimétrica.

Analisando na Tabela 3 os resultados de EMQ planimétrico da estratégia SCI e comparando com os valores SCI referentes à altitude geométrica (tabela 2) pode-se

verificar que o EMQ em planimetria é menor do que em altitude geométrica. A média anual de EMQ da estratégia SCI para a altitude geométrica foi de 14,42 m e para a planimétrica foi de 4,43 m. Ou seja, o valor médio anual referente à planimetria foi aproximadamente 3,2 vezes menor do que o referente à altitude geométrica. Isto evidencia, como era esperado, que a maior influência da ionosfera é na determinação altimétrica, mostrando-se pouco correlacionada com a determinação da posição planimétrica.

Tabela 3 – EMQ - Planimetria – meses de 2001.

EMQ – Planimetria (m)			
	SCI	CCI	Melhora (%)
Janeiro	5,04	2,23	55,7
Fevereiro	5,05	3,18	36,9
Março	4,62	3,19	30,9
Abril	6,64	3,73	43,8
Mai	3,40	2,09	38,6
Junho	2,63	1,42	46,1
Julho	3,12	1,45	53,4
Agosto	2,59	1,39	46,3
Setembro	4,68	2,35	49,7
Outubro	6,44	3,92	39,2
Novembro	4,94	2,79	43,5
Dezembro	4,03	2,08	48,3
Média nual	4,43 ± 1,3	2,49 ± 0,8	44,4 ± 7,1

Como a posição planimétrica é pouco afetada pela ionosfera, naturalmente isto implica que a melhora obtida no posicionamento por ponto usando os arquivos IONEX é menor do que a melhora para a altitude geométrica. Na Tabela 3 pode-se verificar um valor médio das melhoras obtidas de $44,4 \pm 7,1\%$.

A variação diária do erro em altitude geométrica e planimétrica para meses com alta e baixa influência da ionosfera são apresentadas nas Figuras 2 a 5, para o dia 300 do ano de 2001 (outubro) e 156 de 2001 (junho). Estes meses foram escolhidos com base nos resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, onde se obteve maiores valores de EMQ para outubro e menores para junho.

Figura 2 – Erro em Altitude Geométrica – Outubro (dia 300 de 2001).

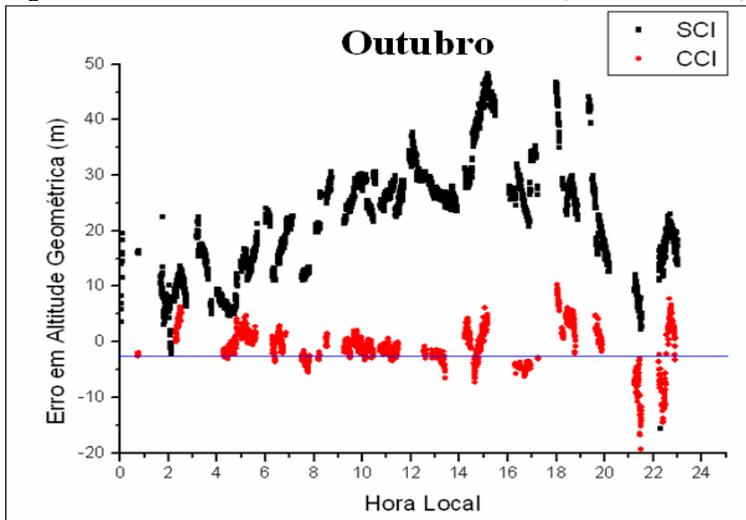


Figura 3 – Erro em Altitude Geométrica – Junho (dia 156 de 2001).

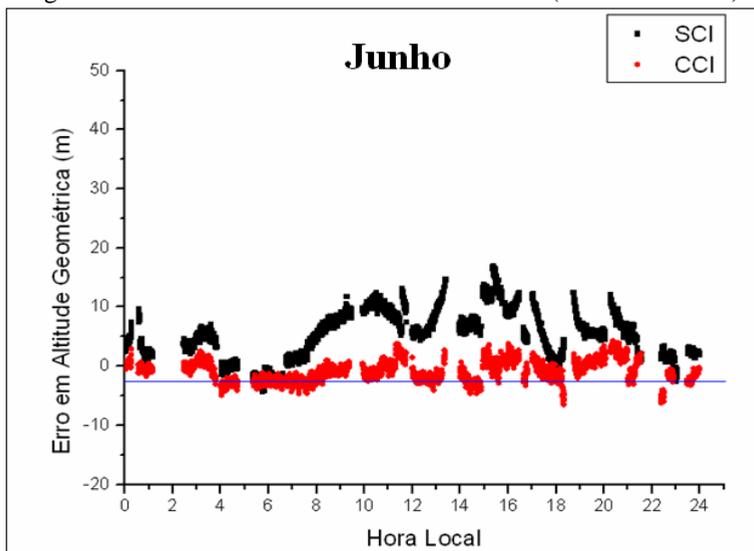


Figura 4 – Erro em Planimetria – Outubro (dia 300 de 2001).

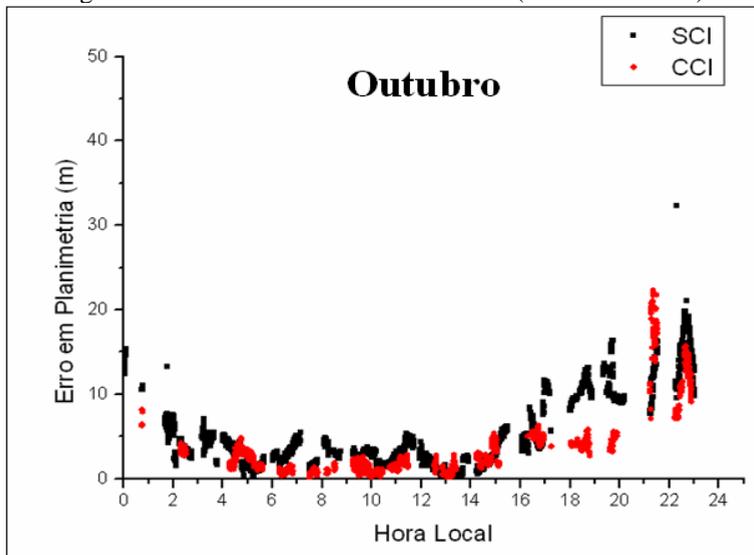
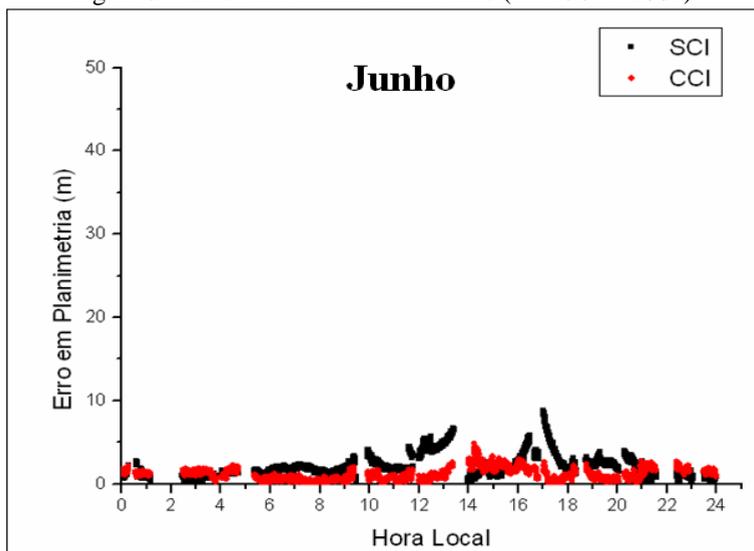


Figura 5 – Erro em Planimetria – Junho (dia 156 de 2001).



Nos resultados SCI, figuras 2 a 5, pode-se verificar novamente que o erro em

altitude geométrica é maior do que o erro em planimetria. Além disso, verificam-se valores maiores no dia referente a outubro do que no referente a junho. A variação diária do erro em altitude geométrica mostra-se mais correlacionada com o comportamento diário da ionosfera do que o erro em planimetria, com valores maiores nos períodos da tarde onde, se sabe, também ocorre os máximos valores de TEC (MATSUOKA e CAMARGO, 2004).

Analisando os resultados CCI pode-se verificar que o modelo do IGS é mais eficiente no período da tarde, principalmente para a determinação altimétrica e para o mês de outubro. Isso era esperado, pois, uma vez que se pretende corrigir o erro devido à ionosfera, espera-se que a melhora obtida seja maior quanto maior for a influência da ionosfera. Realmente, para a determinação planimétrica, pouco influenciada pela ionosfera, praticamente não se observa diferenças entre os resultados SCI e CCI.

Um fato que chama a atenção é referente ao período após as 20 horas local, aproximadamente, para o dia referente ao mês de outubro. Uma menor eficiência do modelo do IGS é verificada neste período. Além disso, um aumento do erro em planimetria também é observado. Sabe-se de estudos anteriores (SKONE et al., 2001; MATSUOKA e CAMARGO, 2004) que neste período existe a formação do segundo pico da anomalia equatorial na região brasileira (que ocorre principalmente nos meses de equinócio e verão) e forte efeito de cintilação ionosférica, que pode estar afetando o posicionamento, inclusive na determinação da posição planimétrica. Isto mostra que possivelmente a estação POAL recebe observações de alguns satélites que passaram na região de crista da anomalia equatorial noturna. Mostra também que estudos detalhados sobre a variação do erro planimétrico e altimétrico no período após o pôr do Sol é necessário para verificar a possível correlação com a anomalia equatorial e cintilação ionosférica.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para avaliar o desempenho do modelo global da ionosfera do IGS produzido pelo CODE (arquivos IONEX) foram utilizados os dados da estação POAL da RBMC correspondente a um período de alta atividade solar (2001). Os resultados dos experimentos mostraram que o erro devido à ionosfera afeta principalmente a determinação altimétrica, e é pouco correlacionada com o posicionamento planimétrico. Os maiores valores de erro em altitude geométrica e planimétrico ocorreram durante os meses próximos aos equinócios e solstício de verão; os menores nos meses próximos ao solstício de inverno. Isso já era esperado e está em concordância com estudos anteriores relacionados à variação do TEC na região brasileira. É importante lembrar que, embora o receptor POAL seja de dupla frequência, só foram utilizadas no posicionamento por ponto as pseudodistâncias advindas do código C/A.

Analisando o EMQ pôde-se observar a sua redução quando é corrigido o erro devido à ionosfera com os arquivos IONEX do IGS produzidos pelo CODE. O

valor médio das melhoras mensais obtidas foi de $77,7 \pm 10,9\%$ e $44,4 \pm 7,1\%$ para a determinação altimétrica e planimétrica, respectivamente. Estes valores representam um indicador da melhora obtida na acurácia da determinação altimétrica e planimétrica do posicionamento por ponto na Região Sul do Brasil.

Futuramente, pretende-se avaliar o desempenho dos mapas globais da ionosfera do IGS (arquivos IONEX) para períodos ionosféricos perturbados. Outra atividade futura consiste em avaliar a performance do posicionamento relativo ao se utilizar dados GPS corrigidos do erro devido à ionosfera com o uso dos mapas globais da ionosfera do IGS.

É importante enfatizar que uma das vantagens dos mapas globais da ionosfera do IGS é que eles são disponibilizados na internet gratuitamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) pelo fornecimento dos dados GPS da estação POAL, ao GSD/NRCan pelos dados de efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, bem como, pelo software GPSPACE, e ao IGS pelos arquivos IONEX produzidos pelo CODE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- CAMARGO, P.O.; MATSUOKA, M.T.. Desempenho dos arquivos IONEX produzidos pelo CODE (IGS) na correção do erro devido à ionosfera: Avaliação no posicionamento por ponto. In: Krueger, C.P.; Ribeiro, S.R.A.. ed.. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: Imprensa Universitária. 2005. 343p. Vol.5, p.159-171.
- DAVIES, K.. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- DAL POZ, W.R.. *Posicionamento Relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas*. 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- DAL POZ, W.R.; CAMARGO, P.O.. Conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.12, n.2, p.275-294, 2006.
- FELTENS, J.; SCHAER, 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.
- FONSECA JUNIOR, E.S.. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176f. Tese (Doutorado) – Departamento

- de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 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://igs.cb.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.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A.J.; XIAOQING, P.. An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south American region. *Journal of the Institute of Navigation*, v.50, n.3, p.193-218, Fall/2003.
- 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.. *Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS*. 2003. 164p. Dissertação (Mestrado 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.. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, n.56/01, p.14-27, julho/2004.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; DAL POZ, W.R.. Declínio do número de manchas solares do ciclo solar 23: redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.10, n.2, p.141-157, 2004.
- 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.
- McNAMARA, L.F.. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- MONICO, J.F.G.. *Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. da Unesp, 2000. 287p.
- NRCan: *User's Guide – GPSPACE: Manual de Operação – GSD/NRCan*, Canadá, 1997 – http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace_e.php
- OVSTEDAL, O.. Absolute positioning with single-frequency GPS receivers. *GPS Solutions*, v.5, n.4, p.33-34, 2002.
- 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, G. *Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications*. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- SILVA, M.M.S.; KRUEGER, C.P.; VEIGA, L.A.K.. Avaliação dos requisitos específicos da norma brasileira NBR.14166/1998 com ênfase ao posicionamento com NAVSTAR-GPS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.12, n.2, p.235-247, 2006.
- SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico das Américas), disponível em: < <http://www.sirgas.org> > . Acesso: Abril de 2009.
- SKONE, S.; KNUDSEN, K.; DE JONG, M.. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions. *Phys. Chem. Earth (A)*, v. 26, n. 6-8, p. 613-621, 2001.

(Recebido em outubro / 2008. Aceito em abril / 2009).