

CORREÇÃO IONOSFÉRICA UTILIZANDO OS MAPAS GLOBAIS DO TEC DO IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira

Ionospheric correction using IGS Global TEC Maps: Evaluation at the GPS point positioning in the Brazilian region.

MARCELO TOMIO MATSUOKA¹
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO²

¹ Departamento de Geodésia/Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Cx. Postal 15001, Porto Alegre, RS, Brasil

² Departamento de Cartografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista– Programa de Graduação em Ciências Cartográficas - Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil
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 a 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 utilizando as pseudodistâncias corrigidas do efeito da ionosfera, a partir dos arquivos IONEX do IGS, para a região brasileira. Os experimentos realizados mostraram uma melhora média na determinação planimétrica de 26% e na altitude geométrica de 72%, quando utilizado o modelo da ionosfera do IGS.

Palavras-chaves: Posicionamento com GPS; Ionosfera; Modelo da Ionosfera do 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 Brazilian region. Tests carried out had shown an average improvement in the horizontal and vertical determination of 72% and 26%, respectively, when GIM is used in the point positioning.

Keywords: GPS Positioning; Ionosphere; IGS Ionospheric Model.

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 no tempo e no espaço com relação ao ciclo de manchas solares (variação de longo período), a época do ano (variação sazonal), a hora (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 especialmente 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 (CAMARGO, 1999; FONSECA JUNIOR, 2002; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA et al., 2004; 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 máxima 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 de VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical) 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), em arquivos textos no formato IONEX (IONosphere map Exchange format) com valores de VTEC 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 (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 preliminar realizado por Camargo e Matsuoka (2005) utilizando somente os arquivos IONEX do IGS produzidos pelo CODE. Nos experimentos foram utilizados os dados da estação UEPP, atualmente denominada PPTE, 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.

O principal objetivo deste artigo é avaliar a performance dos arquivos IONEX do IGS produzidos por todos os Centros de Análise que compõem o seu Grupo de

Trabalho da Ionosfera, aplicados na correção do erro devido à ionosfera na região brasileira. A avaliação da performance foi realizada a partir do posicionamento por ponto utilizando os dados GPS da estação UEPP da RBMC, onde comparou-se os resultados advindos de dados sem e com a correção do erro devido à ionosfera. A estação UEPP está localizada na região geográfica da ionosfera de baixas latitudes, onde se observa a presença do segundo pico da anomalia equatorial de ionização e a forte presença de cintilação ionosférica (SKONE et al., 2001; RODRIGUES, 2003; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA, 2007). A amostra de dados abrangeu 4 dias de todos os meses de 2001, período de máxima atividade solar do ciclo solar 23.

2. ERRO DEVIDO À IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS

Os sinais GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena receptora, propagam-se na atmosfera dinâmica, atravessando diferentes camadas, que possuem características bem distintas. A troposfera, para frequências abaixo de 30 GHz, comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995).

O efeito da ionosfera, que depende da frequência do sinal que a atravessa, é proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons livres 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 para a 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/m^2) e a constante 40,3 é dada em $[\text{m Hz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}]$.

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, o erro devido à ionosfera, representado pelas expressões (1) e (2) constitui somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. Os erros remanescentes representam poucos centímetros (SEEBER, 2003).

A ionosfera também pode causar um efeito denominado de cintilação ionosférica. Cintilações 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. Este efeito causa um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda do sinal (WEBSTER, 1993). Segundo Skone et al. (2001) os efeitos de cintilação ionosférica na região brasileira são maiores nas regiões de pico da anomalia equatorial de ionização. Um resumo a respeito da anomalia equatorial pode ser encontrado em Matsuoka e Camargo (2004). Mais informações à respeito da descrição do efeito da ionosfera, bem como, das variações do TEC, podem ser encontradas em McNamara (1991), Davies (1990), Matsuoka e Camargo (2004), Matsuoka et al. (2004) e Matsuoka (2007).

3. MAPAS GLOBAIS DO TEC 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 (*IONosphere map Exchange format*) que fornecem valores de VTEC 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). 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 (o NRCan - *Natural Resources Canada*, também já fez parte desse grupo), 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);

São estes centros de análise que produzem os mapas de VTEC 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. Detalhes sobre as estratégias de modelagem adotadas por cada centro de análise podem ser obtidos em CODE (2006), ESA (2006), JPL (2006) e UPC (2006). 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, ou seja, em um único mapa global do VTEC. Estes arquivos de cada centro de análise são disponibilizados pelo IGS, com acesso livre, no seguinte endereço eletrônico: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>.

Segundo IGSCB (2006), a precisão média dos valores de VTEC para os arquivos IONEX finais (11 dias de latência) é de 2-8 TECU (TEC *Unit* – Unidade de TEC, sendo 1 TECU = 10^{16} el/m²) e para os arquivos rápidos (latência menor do que 24 horas) de 2-9 TECU. É claro que, essa precisão pode variar de acordo com a região do globo terrestre, dependendo do número de estações GPS que foram utilizadas em determinada região. Além disso, essa precisão média refere-se aos valores de VTEC da 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 máxima atividade solar do ciclo 23). Os resultados mostram uma melhora média de 85% na acurácia (por época) da 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 as latitudes médias e altas, e desta forma, em condições ionosféricas bem diferentes do Brasil (localizada na região equatorial e de baixas latitudes).

4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

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

Os dados de entrada do programa CORIONEX são os arquivos de observação GPS (no formato RINEX), efeméride precisa (no formato SP3) e o arquivo com a grade de valores de VTEC no formato IONEX. O usuário deve informar também um valor aproximado para a latitude, longitude e altitude do receptor GPS, no sistema de referência da efeméride precisa, bem como, o intervalo que se deseja realizar a correção. As principais etapas realizadas pelo CORIONEX para a correção de uma observação GPS num dado instante se dá a partir da seguinte seqüência:

- Cálculo da latitude e longitude geográfica do ponto ionosférico correspondente à observação a ser corrigida;
- Busca dos valores de VTEC dos 4 pontos da grade dos dois mapas horários mais próximos do ponto ionosférico calculado;
- Interpolação espacial (Bilinear) dos valores de VTEC para a obtenção deste valor correspondente à posição do ponto ionosférico em questão nos dois mapas horários mais próximos;
- Interpolação temporal simples para a obtenção do valor de VTEC no ponto ionosférico no instante em questão;
- Determinação do valor do TEC na direção satélite/receptor a partir do uso da função de mapeamento geométrica padrão;
- Conversão do TEC obtido para atraso ionosférico em L1 (em metros);
- Correção das observações GPS (para a pseudodistância subtrai-se o valor do atraso ionosférico e para a fase soma-se, em unidades de ciclos);
- Geração de um novo arquivo RINEX de observação com as observáveis corrigidas do erro devido à ionosfera a partir do arquivo IONEX de entrada;

A formulação matemática envolvida no cálculo da latitude e longitude geográfica do ponto ionosférico, bem como, da função de mapeamento geométrica padrão encontram-se, por exemplo, em Matsuoka e Camargo (2004).

4.1 Correção dos dados GPS utilizando os arquivos IONEX do IGS

Para o experimento foram utilizados os dados GPS da estação UEPP ($\cong 22,1^{\circ}\text{S}$; $51,4^{\circ}\text{W}$) 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 de longo período, pois, o ano 2001 está dentro do período de máximo número de manchas solares do ciclo 23. A estação UEPP foi escolhida, pois está localizada na região de baixas latitudes, onde existe uma alta atividade da ionosfera, estando, por exemplo, numa localização onde normalmente sofre o efeito do pico da anomalia equatorial de ionização. Com isso, avaliou-se a performance dos IONEX do IGS em um local no Brasil com alta influência da ionosfera.

Visando uma homogeneização, os quatro dias de cada mês de 2001 foram escolhidos de tal forma que não houvesse a influência de tempestades

geomagnéticas, e desta forma, foram escolhidos dias classificados como sendo de atividade geomagnética calma (índice geomagnético $A_p \leq 8$).

Utilizando o programa CORIONEX, os dados GPS da estação UEPP para cada dia foram corrigidos do erro devido à ionosfera utilizando os arquivos IONEX do IGS produzidos pelos 5 centros de análise que faziam parte em 2001 (CODE, ESA, JPL, NRCan, UPC). Em 2001 o arquivo IONEX combinado ainda não era produzido. Logo, para cada dia obteve-se cinco arquivos RINEX da estação UEPP corrigidos do erro devido à ionosfera a partir dos arquivos IONEX do CODE, do ESA, do JPL, do NRCan e do UPC.

4.2 Avaliação no posicionamento por ponto

Para avaliar e comparar a performance dos arquivos IONEX foram analisados os resultados do posicionamento por ponto, com a pseudodistância advinda do código C/A, processado utilizando os dados GPS da estação UEPP corrigidos do efeito da ionosfera com cada um dos 5 arquivos IONEX. Para verificar a melhora obtida, também foram processados os dados da UEPP sem a correção do erro devido à ionosfera. Em suma, para cada dia, um total de 6 arquivos GPS da estação UEPP foram processados para realizar o posicionamento por ponto. As seguintes siglas foram adotadas para identificar o resultado dos processamentos:

- sem a correção da ionosfera (**SCI**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do CODE (**CCI-COD**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do ESA (**CCI-ESA**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do JPL (**CCI-JPL**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do NRCan (**CCI-NRC**);
- com a correção da ionosfera utilizando o IONEX do UPC (**CCI-UPC**).

No processamento dos dados GPS foram utilizadas as efemérides precisas e as correções dos relógios dos satélites geradas e fornecidas pelo GSD/NRCan (*Geodetic Survey Division/Natural Research Canada*). O software utilizado foi o GPSPACE desenvolvido pelo GSD/NRCan. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão da geometria (GDOP) valor menor ou igual a 7. Ainda, foram consideradas apenas as pseudodistâncias coletadas com ângulo de elevação acima de 15 graus. O GPSPACE utiliza também para minimização do erro troposférico o modelo de Hopfield.

Todos esses procedimentos adotados visam minimizar os diversos erros envolvidos no posicionamento por ponto, 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 UEPP em SIRGAS, obtendo-se o erro posicional cometido no posicionamento por ponto em cada época.

Para cada mês calculou-se o valor médio do EMQ (Erro Médio Quadrático) com base nos valores dos quatro dias. O EMQ foi obtido a partir da raiz quadrada da média do quadrado dos erros cometidos em cada época (30 seg) em uma amostra de 24 horas. Ou seja, é o erro médio posicional que pode ser esperado em uma época de observação.

A Tabela 1 apresenta o valor médio do EMQ para altitude geométrica para cada mês do ano de 2001, referente a cada estratégia de processamento.

Tabela 1 – Posicionamento por ponto: EMQ para altitude geométrica - 2001.

EMQ – Altitude Geométrica (m)							
	SCI	CCI-COD	CCI-ESA	CCI-JPL	CCI-NRC	CCI-UPC	Média (CCI)*
Janeiro	15,33	3,37	3,47	3,45	3,53	3,27	3,41 ± 0,10
Fevereiro	14,80	4,13	4,10	4,17	4,28	4,15	4,16 ± 0,06
Março	17,02	4,26	4,38	4,65	4,68	4,51	4,49 ± 0,17
Abril	17,11	4,09	4,78	4,08	4,91	4,67	4,50 ± 0,39
Mai	13,79	3,43	3,78	3,26	3,92	3,89	3,65 ± 0,29
Junho	10,50	2,74	2,89	2,72	2,83	3,39	2,91 ± 0,27
Julho	9,40	2,15	2,40	2,31	2,42	2,75	2,40 ± 0,22
Agosto	10,95	2,99	3,25	2,81	3,48	3,32	3,17 ± 0,27
Setembro	13,84	3,78	4,04	3,27	4,51	4,05	3,93 ± 0,45
Outubro	21,09	6,92	7,31	6,69	7,20	8,03	7,23 ± 0,50
Novembro	20,78	6,04	6,71	7,62	7,21	6,42	6,80 ± 0,62
Dezembro	18,95	4,14	4,01	4,80	5,28	4,15	4,47 ± 0,54
Média Anual	15,29 ± 3,87	4,00 ± 1,33	4,26 ± 1,44	4,15 ± 1,61	4,52 ± 1,50	4,38 ± 1,84	4,26 ± 1,44**

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC, ou seja, é um valor médio anual conjunto para as estratégias CCI.

Com base nos valores da Tabela 1, os valores da melhora média obtida (em %) na acurácia (relativa a uma época) da determinação da altitude geométrica após a correção do erro devido à ionosfera para cada resultado CCI são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Posicionamento por ponto: percentagem de melhora na acurácia da altitude geométrica (relativa a uma época) – 2001.

Melhora Média na Acurácia (em %) com base na redução do EMQ da Altitude Geométrica após a Correção do Erro devido à Ionosfera						
	CCI- COD	CCI- ESA	CCI- JPL	CCI- NRC	CCI- UPC	Média (CCI)*
Janeiro	78,0	77,4	77,5	77,0	78,7	77,7 ± 0,6
Fevereiro	72,1	72,3	71,8	71,1	71,9	71,8 ± 0,4
Março	75,0	74,3	72,7	72,5	73,5	73,6 ± 1,0
Abril	76,1	72,1	76,1	71,3	72,7	73,6 ± 2,3
Mai	75,1	72,6	76,3	71,6	71,8	73,5 ± 2,1
Junho	73,9	72,5	74,1	73,0	67,7	72,2 ± 2,6
Julho	77,1	74,4	75,4	74,2	70,7	74,4 ± 2,3
Agosto	72,7	70,3	74,3	68,2	69,6	71,0 ± 2,4
Setembro	72,3	70,8	76,4	67,4	70,7	71,6 ± 3,3
Outubro	67,2	65,3	68,3	65,9	61,9	65,7 ± 2,4
Novembro	70,9	67,7	63,3	65,3	69,1	67,3 ± 3,0
Dezembro	78,1	78,8	74,7	72,1	78,1	76,4 ± 2,9
Média Anual	74,0 ± 3,2	72,4 ± 3,7	73,4 ± 4,0	70,8 ± 3,5	71,4 ± 4,4	72,4 ± 3,9**

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores de melhora obtida

Analisando os valores mensais do EMQ, somente da estratégia de processamento SCI (Tabela 1), pode-se verificar a concordância da variação do erro com a variação sazonal do VTEC (MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA, 2007), ou seja, observa-se a alta influência do erro devido à ionosfera na determinação altimétrica. Verifica-se que os maiores valores de EMQ em altitude geométrica ocorreram nos meses próximos aos equinócios e os menores nos próximos ao solstício de inverno. Por exemplo, o valor médio do EMQ para a estratégia SCI no mês de outubro (21,09 m) é aproximadamente 124 % maior do que o referente ao mês de julho (9,40 m).

Os valores médios de EMQ (Tabela 1), após as correções do erro devido à ionosfera com os arquivos IONEX (CCI), reduziram quando comparada aos SCI. Pode-se verificar, nas Tabelas 1 e 2, que os melhores resultados foram obtidos a partir das estratégias CCI-JPL e CCI-COD, embora se deva salientar que essas duas estratégias não apresentaram resultados tão diferentes das demais. De fato, analisando a última coluna das Tabelas 1 e 2 pode-se verificar que o valor máximo

de desvio padrão calculado a partir de todos os valores CCI foi de 0,62 m e de 3%, respectivamente, para o valor médio do EMQ e para a melhora média obtida.

A melhora média mensal obtida na acurácia altimétrica (relativa a uma época) após o uso dos arquivos IONEX foi acima de 70%, com exceção dos meses de outubro e novembro, com melhora média de 65,7% e 67,3%. A média de todos os valores (Tabela 2) indicam uma melhora na acurácia altimétrica de 72,4±3,9%. Este valor representa então um indicador da melhora obtida na acurácia (relativa a uma época) da determinação altimétrica no posicionamento por ponto, utilizando os arquivos IONEX para a correção do erro devido à ionosfera, referente a um período de máximo solar (2001) na região brasileira de baixas latitudes e sem a influência de tempestades geomagnéticas.

Quanto ao EMQ e a melhora na determinação planimétrica, os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4:

Tabela 3 – Posicionamento por ponto: EMQ para planimetria – 2001.

EMQ – Planimetria (m)							
	SCI	CCI-COD	CCI-ESA	CCI-JPL	CCI-NRC	CCI-UPC	Média (CCI)*
Janeiro	3,60	3,00	3,27	2,97	3,23	2,79	3,05 ± 0,19
Fevereiro	3,65	3,00	3,42	2,90	3,20	3,26	3,16 ± 0,21
Março	5,16	3,94	4,92	4,13	5,16	4,82	4,59 ± 0,53
Abril	6,48	4,17	4,74	4,13	5,18	5,04	4,65 ± 0,48
Mai	5,16	2,60	3,43	2,83	3,67	3,60	3,23 ± 0,48
Junho	4,53	2,13	2,49	2,19	3,21	3,04	2,61 ± 0,49
Julho	3,99	3,46	2,25	2,03	2,62	2,53	2,58 ± 0,54
Agosto	4,78	2,51	2,68	2,44	3,24	2,77	2,73 ± 0,31
Setembro	5,16	3,55	4,18	3,35	4,62	4,32	4,00 ± 0,53
Outubro	5,56	3,72	4,90	3,82	4,99	5,03	4,49 ± 0,66
Novembro	4,98	3,21	4,52	3,69	4,49	3,78	3,94 ± 0,56
Dezembro	3,86	2,72	3,12	2,66	3,41	2,94	2,97 ± 0,31
Média Anual	4,74 ± 0,86	3,17 ± 0,62	3,66 ± 0,96	3,09 ± 0,72	3,92 ± 0,91	3,66 ± 0,93	3,50 ± 0,87**

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC, ou seja, é um valor médio anual conjunto para as estratégias CCI.

Tabela 4 – Posicionamento por ponto: percentagem de melhora na acurácia da posição planimétrica (relativa a uma época) – 2001.

Melhora Média na Acurácia (em %) com base na redução do EMQ em Planimetria após a Correção do Erro devido à Ionosfera						
	CCI-COD	CCI-ESA	CCI-JPL	CCI-NRC	CCI-UPC	Média (CCI)*
Janeiro	16,6	9,2	17,5	10,3	22,5	15,2 ± 5,5
Fevereiro	17,8	6,3	20,5	12,3	10,7	13,5 ± 5,7
Março	23,6	4,6	19,9	0,0	6,6	10,9 ± 10,3
Abril	35,6	26,8	36,2	20,1	22,2	28,2 ± 7,5
Mai	49,6	33,5	45,1	28,8	30,2	37,5 ± 9,3
Junho	53,0	45,0	51,6	29,1	32,9	42,3 ± 10,8
Julho	13,3	43,6	49,1	34,3	36,6	35,4 ± 13,6
Agosto	47,5	43,9	48,9	32,2	42,0	42,9 ± 6,5
Setembro	31,2	19,0	35,1	10,4	16,3	22,4 ± 10,4
Outubro	33,1	11,9	31,3	10,2	9,5	19,2 ± 0,6
Novembro	35,5	9,2	25,9	9,8	24,1	20,9 ± 11,2
Dezembro	29,5	19,2	31,1	11,6	23,8	23,0 ± 7,9
Média Anual	32,2 ± 13,1	22,7 ± 15,4	34,3 ± 12,1	17,4 ± 11,0	23,1 ± 11,1	26,0 ± 13,8**

* é a média calculada a partir dos valores mensais de CCI-COD, CCI-ESA, CCI-JPL, CCI-NRC e CCI-UPC

** é a média calculada a partir de todos os valores de melhora obtida

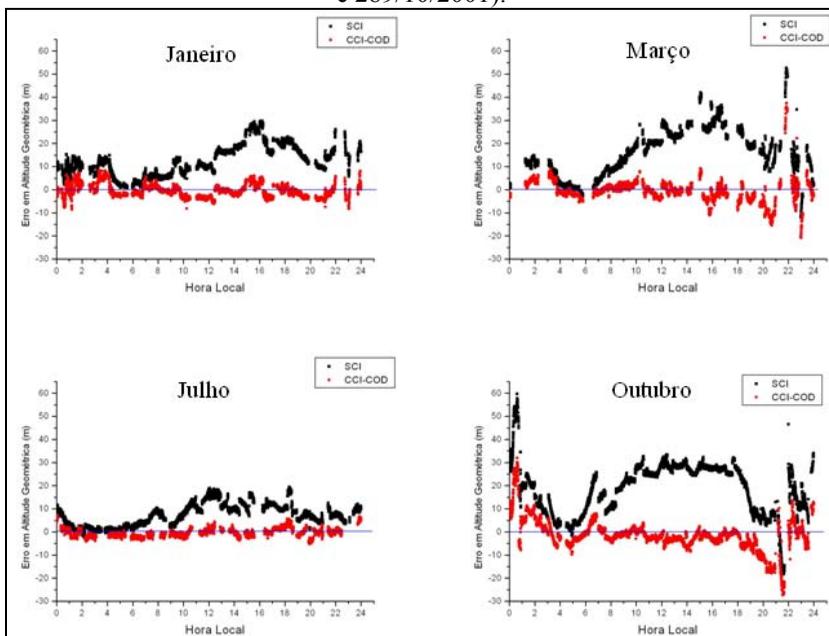
Analisando na Tabela 3 os resultados do EMQ planimétrico da estratégia SCI e comparando com os valores SCI referentes à altitude geométrica (Tabela 1) pode-se verificar que o erro em planimetria é menor do que em altitude. A média anual de EMQ da estratégia SCI para a altitude geométrica foi de 15,29 m e para a planimétrica foi de 4,74 m que significa que o erro em planimetria foi 69% menor do que o relacionado à altitude. Isto evidencia, novamente, que a maior influência da ionosfera é na determinação altimétrica, mostrando-se pouco correlacionada com a determinação da posição planimétrica. Realmente, ainda analisando o EMQ planimétrico dos resultados SCI (Tabela 3) não se verifica uma variação mensal da mesma forma que nos resultados da altitude geométrica, onde se verificou de maneira evidente menores valores para meses próximos ao solstício de inverno e maiores para os próximos aos equinócios e solstício de verão. Para os resultados SCI planimétrico pode-se verificar maiores valores para os meses próximos aos equinócios, porém, a diferença com relação a outros meses não é tão significativa quanto nos resultados SCI da altitude geométrica. O maior valor de EMQ (SCI)

para a planimetria (6,48 m – Abril – Tabela 3) é menor do que o menor valor de EMQ (SCI) para a altitude geométrica (9,40 m – Julho – Tabela 1).

Na Tabela 4, pode-se verificar uma melhora geral de $26 \pm 13,8\%$. O mesmo valor referente à altitude geométrica foi de $72,4 \pm 3,9\%$ (Tabela 2). Note que, comparando a média anual da melhora obtida em planimetria para cada estratégia CCI (Tabela 4) pode-se verificar em termos de porcentagem uma maior eficiência para a CCI-JPL e CCI-COD, embora, ao analisar os valores médios anuais do erro planimétrico na Tabela 3 percebe-se que todos os resultados CCI ficaram entre 3 e 4 m, aproximadamente, ou seja, próximos. O valor médio SCI foi de 4,74 m.

Para se ter uma idéia da variação diária do erro em altitude foi elaborada a Figura 1, que mostra o comportamento diário para um dia do mês de janeiro, março, julho e outubro do ano de 2001 considerando as estratégias de processamento SCI e CCI-COD, uma vez que se verificou uma performance bastante similar entre as estratégias CCI. Os gráficos para os outros meses podem ser verificados em Matsuoka (2007).

Figura 1 - Erro em Altitude Geométrica – SCI e CCI-COD (001/01, 070/03, 201/07 e 289/10/2001).



Analisando os resultados SCI dos gráficos da Figura 1, pode-se verificar a variação diária e sazonal do erro em altitude. Assim, como verificado na variação

do TEC (MATSUOKA e CAMARGO, 2004), o erro em altitude começa a aumentar diariamente por volta das 6-7 HL (horal local), ou seja, com o início da atividade solar diária, e chega a valores máximos no período da tarde. De uma forma geral, os menores valores de erro ocorreram por volta das 4-5 HL.

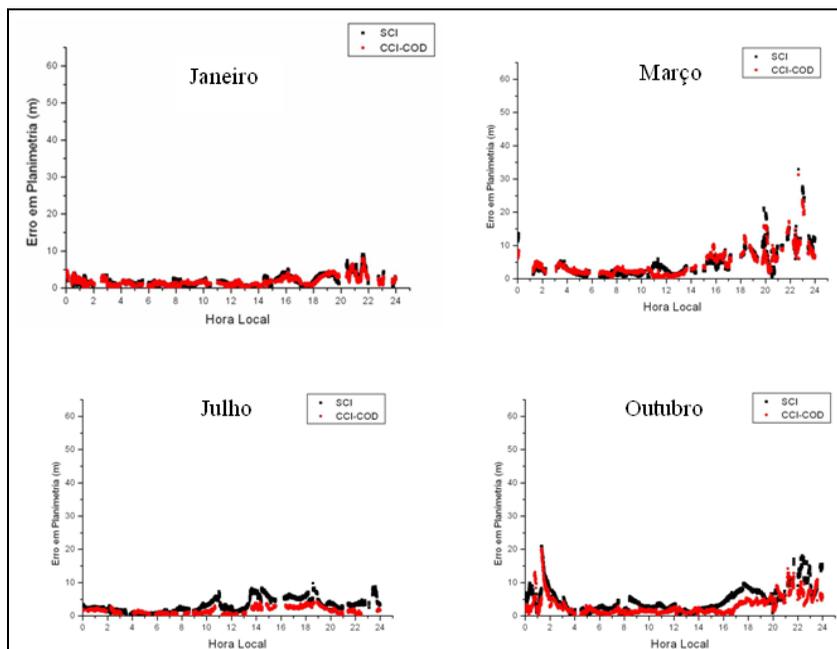
Quanto à variação mensal, pode-se verificar que os menores valores ocorreram nos meses próximos ao solstício de inverno e maiores nos meses próximos aos equinócios. Principalmente, nesses meses de maiores valores um fato que chama bastante a atenção é que, após o pôr do Sol, um comportamento bastante irregular do erro em altitude geométrica é verificado. Em alguns dias, como o de outubro, por exemplo, este comportamento persiste até as primeiras horas da madrugada. Este período pós pôr do Sol coincide ao período de ocorrência da anomalia equatorial de ionização (MATSUOKA e CAMARGO, 2004) e de forte influência de cintilação ionosférica (SKONE et al., 2001).

Quanto aos resultados CCI-COD, pode-se verificar nos gráficos da Figura 1 que a melhor performance ocorre no período diurno, ou seja, a maior redução do erro ocorre no período entre 6 e 18 HL, aproximadamente. A performance da correção é reduzida no período pós pôr do Sol, em alguns casos até com resultados piores do que os advindos da estratégia SCI, principalmente nos meses próximos aos equinócios e verão, ou seja, nos meses em que ocorre de forma significativa a anomalia equatorial de ionização. Esses experimentos vêm confirmar mais uma vez a dificuldade em obter uma boa performance na modelagem do erro devido à ionosfera no período pós pôr do Sol. Experimentos realizados por Matsuoka (2003) e Aguiar (2005) também mostraram uma redução na performance do modelo Mod-Ion (CAMARGO, 1999) e do Mod-Ion-FK (AGUIAR, 2005), respectivamente, durante meses de forte influência da anomalia equatorial noturna.

Como visto anteriormente, a influência da ionosfera na determinação planimétrica é bem menor do que na altimétrica e, desta forma, a melhora da acurácia após a correção com os arquivos IONEX do IGS também é menor. Estas observações podem ser verificadas na Figura 2, que mostra o comportamento diário do erro planimétrico para um dia do mês de janeiro, março, julho e outubro do ano de 2001 considerando as estratégias de processamento SCI e CCI-COD.

Comparando os gráficos da Figura 2 com os da Figura 1, fica mais uma vez evidente o menor efeito do erro da ionosfera na determinação planimétrica. Na Figura 2 pode-se verificar que os resultados CCI-COD são bem próximos aos SCI. Isto é esperado pelo fato do erro da ionosfera afetar muito pouco a determinação planimétrica. Um fato interessante que se observa é que, durante os meses próximos aos equinócios se tem um comportamento irregular do erro em planimetria após o pôr do Sol, da mesma forma ocorreu com a altitude. Isto está indicando que, embora o efeito da ionosfera tenha pouca correlação com o erro planimétrico, justamente no período da anomalia equatorial noturna existe um aumento do erro na determinação planimétrica.

Figura 2 - Erro em Planimetria – SCI e CCI-COD (001/01, 070/03, 201/07 e 289/10/2001).



5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Os experimentos realizados para avaliar os arquivos IONEX do IGS na região brasileira referem-se a um período de máxima atividade solar do ciclo 23, englobando 4 dias, classificados como geomagneticamente calmo, de todos os meses do ano de 2001. Considerando que a estação UEPP da RBMC está localizada em uma região crítica em termos de atividade ionosférica, os seus dados foram utilizados nos experimentos. Com base nos resultados verificou-se uma melhora na acurácia da altitude obtida no posicionamento por ponto em torno de 72% e de 26% na acurácia horizontal. Ainda, verificou-se que a maior eficácia da correção ocorre para a altitude geométrica durante o período diurno. Os períodos diários mais complicados, tanto para a determinação altimétrica quanto para a planimétrica, coincide com o período noturno de ocorrência da anomalia equatorial de ionização. Uma variação irregular de ambos os erros ocorre neste período, principalmente, em meses próximos aos equinócios e solstícios de verão, e uma limitação no desempenho dos arquivos IONEX do IGS também é observado neste período.

Futuramente, pretende-se avaliar a performance dos mapas globais da ionosfera do IGS (arquivos IONEX) para períodos ionosféricos perturbados, como por exemplo, em períodos de intensas tempestades geomagnéticas que afetam drasticamente a ionosfera. Uma outra atividade consistirá 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. Também, seria interessante um estudo sobre a variação do erro, tanto no posicionamento por ponto quanto no relativo, no período pós pôr do Sol na região brasileira.

É importante enfatizar que uma das vantagens dos mapas globais da ionosfera do IGS é que eles são disponibilizados na internet com acesso livre. Fazendo-se uma analogia, nos softwares comerciais de processamento de dados GPS é comum a opção fornecida ao usuário de utilizar efemérides precisas em substituição às efemérides transmitidas. Uma vez que os arquivos IONEX do IGS são disponibilizados gratuitamente e em caráter oficial, assim como as efemérides precisas, fica como sugestão aos fabricantes dos softwares que coloquem à disposição do usuário a possibilidade de aplicar no processamento os arquivos IONEX.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, C. R.. *Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): implementação em tempo real*. 2005. 159p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- 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.
- CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) – online – endereço eletrônico: <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>. Acesso em agosto de 2006
- DAVIES, K.. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- 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.
- ESA (European Space Agency) – on line – endereço eletrônico: <http://nng.esoc.esa.de/gps/ionmon.html>. Acesso em agosto de 2006.

- FELTENS, J.; SCHAER, S.. IGS Products for the Ionosphere. In: *Proceeding of the IGS Analysis Centre Workshop*, 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://maitel52.upc.es/~ionex3/doc/IGS_IONO_report_April2003_7.pdf, 2003. Acesso em outubro/2004
- IGSCB (International GPS Service Central Bureau) – online – endereço eletrônico: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>. Acesso em agosto de 2006.
- JPL (Jet Propulsion Laboratory) – on line – endereço eletrônico: <http://iono.jpl.nasa.gov/>. Acesso em agosto de 2006.
- 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.; HERNÁNDES-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.
- 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.
- 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.
- OVSTEDAL, O.. Absolute positioning with single-frequency GPS receivers. *GPS Solutions*, v.5, n.4, p.33-34, 2002.
- RODRIGUES, F.S.R.. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- 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.
- 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.
- 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.
- UPC (Polytechnical University of Catalonia) – on line – endereço eletrônico: <http://gagel.upc.es/>. Acesso em agosto de 2006.
- WEBSTER, I.. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. 1993. M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

(Recebido em maio/2007. Aceito em setembro/2007)