

DECLÍNIO DO NÚMERO DE MANCHAS SOLARES DO CICLO SOLAR 23: REDUÇÃO DA ATIVIDADE IONOSFÉRICA E MELHORA DA PERFORMANCE DO POSICIONAMENTO COM GPS

Decline of sunspot number of the solar cycle 23: reduction of the ionospheric activity and improvement of the GPS positioning

MARCELO TOMIO MATSUOKA¹
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO²
WILLIAM RODRIGO DAL POZ¹

¹ Alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

² Departamento de Cartografia

Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
{tomio, dalpoz}@pos.prudente.unesp.br; paulo@prudente.unesp.br

RESUMO

O erro devido à ionosfera nas distâncias medidas pelo GPS (*Global Positioning System*) é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presentes na ionosfera. O TEC varia no tempo e no espaço, e é influenciado por diversas variáveis, entre elas o ciclo solar de longo período. Este ciclo, com duração de aproximadamente 11 anos, está associado às ocorrências de manchas solares, e o aumento do TEC é proporcional ao número de manchas. Atualmente, o Sol está no ciclo 23, e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001, o que ocasionou um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na ionosfera. Em 2004 o ciclo solar 23 está num período de declínio do número de manchas solares e conseqüentemente do TEC da ionosfera. Neste artigo foram realizados experimentos visando apresentar a redução do TEC e do erro devido à ionosfera na propagação dos sinais GPS e, portanto a melhora no posicionamento com GPS, com o declínio do número de manchas solares do ciclo 23.

Palavras-chaves: TEC, Posicionamento GPS, Manchas Solares

ABSTRACT

The error due to the ionosphere in the GPS observables depends on the Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer. The TEC varies in the time and space, and it is influenced by several variables, among them the solar cycle. This cycle, with approximately 11 year-old duration, is associated to the occurrences of sunspot, and the increase of TEC is proportional to the sunspot number. Nowadays, the Sun is in the cycle 23, and the period of maximum solar activity embraced the years of 2000 and 2001, what caused the increase of the sunspot number and, consequently, of the TEC in the ionosphere. In 2004 the solar cycle 23 is in a period of decline of the sunspot number and consequently of TEC. In this paper, experiments were accomplished to present the reduction of TEC and of the error due to the ionosphere in the propagation of the GPS signals, and therefore the improvement in the GPS positioning.

Keywords: TEC, GPS Positioning, Sunspots

1 INTRODUÇÃO

No posicionamento com GPS (*Global Positioning System*) diversas fontes de erros estão envolvidas, sendo que uma das principais é a ionosfera. O erro associado à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. O TEC varia no tempo e no espaço, e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros.

O principal processo de formação de elétrons livres na ionosfera é a fotoionização que consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991). Desta forma, a atividade ionosférica é extremamente influenciada pelo comportamento da atividade solar.

Além das variações diárias e sazonais da atividade solar existem também os ciclos de longo período. Estes ciclos, com duração de aproximadamente 11 anos, estão associados às ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. As manchas solares são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta. Assim, o aumento da radiação ultravioleta ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera.

Atualmente, o Sol está no ciclo denominado “ciclo 23” (KUNCHES, 2000), e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001, o que ocasionou um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na ionosfera. O valor do TEC é proporcional ao aumento da atividade solar. Em períodos de máxima atividade, o TEC máximo

diurno pode atingir valores até 50 % maiores do que em períodos de mínima atividade (FEDRIZZI, 2003).

Nos dias atuais, o ciclo solar 23 encontra-se num período de declínio do número de manchas solares e conseqüentemente do TEC da ionosfera. Neste artigo foram realizados experimentos visando apresentar a redução do TEC e do erro devido à ionosfera na propagação dos sinais GPS e, portanto a melhora no posicionamento com GPS, com o declínio do número de manchas solares do ciclo 23. O principal objetivo é apresentar para a comunidade geodésica a dependência da performance do posicionamento com GPS em função do ciclo solar.

2 IONOSFERA E O SEU IMPACTO NA PROPAGAÇÃO DOS SINAIS GPS

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (SEEBER, 1993). Com relação à propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre é dividida em troposfera e ionosfera. Nesta divisão, 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, 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 íons e elétrons é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas. Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização (KIRCHHOFF, 1991).

Mais detalhes sobre a ionosfera pode ser consultado, por exemplo, em Davies (1990), McNamara (1991) e Kirchhoff (1991).

2.1 Impacto na Propagação dos Sinais 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. Conforme já citado, 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 retardo é referido, também, como atraso de grupo e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal.

Os efeitos da troposfera são normalmente reduzidos por meio de técnicas de processamento ou determinados diretamente por meio de modelos. Uma vez que não é possível avaliar a pressão e a temperatura atmosférica ao longo do percurso do sinal, através da camada neutra, existem vários modelos disponíveis, que corrigem de 92% a 95% desse efeito. Ao contrário, o efeito da ionosfera, que depende da frequência, e, conseqüentemente, do índice de refração, é proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora. Se o valor do TEC tivesse uma variação regular, os efeitos causados pela ionosfera seriam de fácil determinação. O problema é que o TEC varia no tempo e no espaço, em razão do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite (CAMARGO, 1999).

O erro devido à ionosfera para a fase (I_{fr}^s) e código (I_{gr}^s) ao longo da direção satélite (s) e antena receptora (r) são dados em função do TEC e da frequência do sinal (f) (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 código são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado (el/m^2) e a constante 40,3 é dada em $\text{mHz}^2 \text{el}/\text{m}^2$.

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. O erro remanescente do modelo matemático representa poucos centímetros (SEEBER, 1993). A tabela 1 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as medidas advindas das portadoras L_1 , L_2 e para a combinação linear livre da ionosfera (L_0) considerando os efeitos de 1º, 2º e 3º ordem da ionosfera. Para direções inclinadas, a influência aumenta em até 3 vezes, aproximadamente.

Tabela 1 - Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera

Frequência	1ª ordem (1 / f²)	2ª ordem (1 / f³)	3ª ordem (1 / f⁴)
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

Fonte: Seeber (1993)

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 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 (WEBSTER, 1993).

3 VARIAÇÕES DO TEC

A ionosfera é um meio extremamente dinâmico, fazendo com que a densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, seja sensivelmente variável, em função das variações temporais e da radiação solar, da latitude e da longitude, do campo magnético da Terra, dentre outras anomalias e irregularidades.

As variações temporais compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos. Estas variações influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera. As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite, devido à recombinação dos elétrons e íons. A variação diurna ocorre principalmente devido à iluminação do Sol, ou seja, a radiação solar. Ao longo do dia, a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12:00 e 16:00 horas local (WEBSTER, 1993). Na região equatorial e de baixas latitudes um segundo pico ocorre nas horas que precedem a meia noite.

As estações do ano também influenciam na variação da densidade de elétrons, devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, caracterizando as variações sazonais. Nos equinócios, os efeitos da ionosfera são maiores, enquanto que, nos solstícios, os efeitos são menores. Isto pôde ser verificado em experimentos realizados por Camargo e Dal Poz (2002). Neste trabalho foi calculado o valor do TEC na região brasileira para as quatro estações do ano, bem como a produção de mapas da ionosfera, e concluiu-se que nos equinócios foram registrados os maiores valores do TEC, e nos solstícios os menores. Estas conclusões também podem ser verificadas em Fonseca Junior (2002).

A localização geográfica também influencia na variação da densidade de elétrons na ionosfera, pois a estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação, que altera, por sua vez, na densidade de elétrons na ionosfera. Por exemplo, as regiões equatoriais são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, enquanto que as regiões polares não são muito previsíveis (WEBSTER, 1993). A influência da longitude, devido à não coincidência dos pólos geográficos e magnéticos, é sensível somente nas regiões mais altas (região F₂) (PICQUENARD, 1974).

Quanto ao campo magnético da Terra, este exerce grande influência na variação da densidade de elétrons. Na ionosfera e na magnetosfera, o campo magnético da Terra controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo magnético da Terra resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. As variações mais comuns observadas no campo magnético da Terra são aquelas produzidas através das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer variações bruscas e muito intensas, provocadas pelas tempestades solares (KIRCHHOFF, 1991).

3.1 Ciclos Solares

As manchas solares foram descritas pela primeira vez por Teofrasto, por volta do ano 325 a.C. (SCHAER, 1999). Elas são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta, e assim, são constituídas de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperatura em torno de 3800 graus Kelvin, e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. As manchas solares tendem a se formar em grupos, e estão associadas a intensos campos magnéticos no Sol (OLIVEIRA FILHO E SARAIVA, 2000). A figura 1 mostra uma imagem da superfície do Sol, onde se podem notar algumas manchas, que aparecem como regiões mais escuras.

Figura 1 – Superfície do sol em luz branca. Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2000)



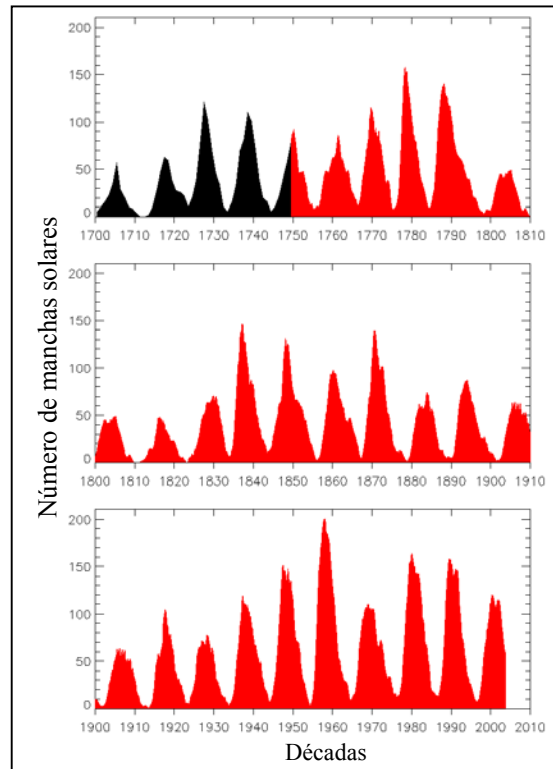
O número de manchas solares (R) pode ser calculado a partir do índice de Wolf, que é dado da seguinte forma (DAVIES, 1990):

$$R = k(10g + s) \quad (3)$$

Na equação (3) “ g ” é o número de grupos de manchas e “ s ” é o número de manchas observadas individualmente. O fator “ k ” é um fator de correção que é usado para possibilitar a comparação de resultados obtidos por diferentes observadores em locais distintos e com diferentes equipamentos. No entanto, a divisão do número de grupos de manchas (g) e manchas isoladas (s) pode ser arbitrária. Às vezes também é difícil afirmar se um grande complexo de manchas deve ser contado como um ou dois grupos (DAVIES, 1990). Assim, o número de manchas (R) definido pela equação (3) pode não ser coerente com a realidade, devido ao grau de arbitrariedade, pois o mesmo depende do observador e das características do equipamento utilizado. O número de manchas solares pode ser avaliado diariamente e como médias mensais e anuais. O índice que representa o número de manchas solares mais utilizado é o que é calculado a partir de uma suavização de um mês específico, e é conhecido por R_{12} . Detalhes sobre esse índice podem ser encontrados em Davies (1990).

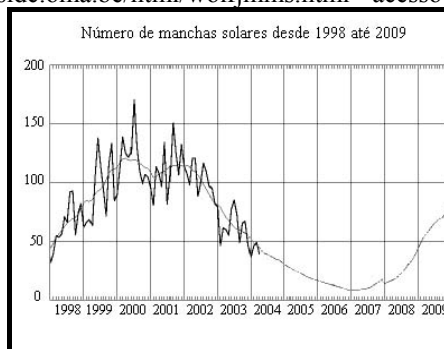
A figura 2 mostra os valores dos números de manchas solares desde 1750 até aproximadamente 2004. Vale salientar que, de 1700 até 1750, as médias do número destas são anuais, ao passo que, de 1750 até os dias atuais, a contagem do número de manchas são dadas pela média mensal. De acordo com a figura 2, verifica-se que, além dos ciclos de 11 anos, pode-se notar também ciclos mais longos, de aproximadamente 80 anos (DAVIES, 1990). Normalmente, também existe uma periodicidade de aproximadamente 27 dias, associadas com a rotação solar (DAVIES, 1990).

Figura 2 – Número de manchas solares – Ciclos solares
Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html> - acesso em maio/2004



Atualmente a ionosfera está no ciclo denominado “ciclo 23” (KUNCHES, 2000), e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001. A figura 3 mostra este ciclo isoladamente, bem como uma predição do número de manchas até aproximadamente 2009.

Figura 3 – Número de manchas solares – Ciclo 23

Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html> - acesso em maio/2004

De acordo com a figura 3, nota-se o declínio do ciclo 23, onde em 2004, o número de manchas é menor do que aproximadamente 50. No pico desse ciclo, o número de manchas foi de aproximadamente 170. Nota-se também a existência de outro pico, embora menor do que este, onde o número de manchas alcançou aproximadamente 150. A curva do gráfico mostra uma predição do número de manchas até 2009, onde se verifica que entre 2006 e 2007 terá início um novo ciclo (ciclo 24). Com o declínio do número de manchas solares, ocorre uma diminuição na ionização, pois esta é proporcional ao número de manchas. Assim, a densidade de elétrons da ionosfera é reduzida. Conseqüentemente, é esperada a diminuição do erro devido à ionosfera, pois o mesmo é diretamente proporcional ao TEC. Isto implica em melhorias na performance do posicionamento com GPS.

4. EXPERIMENTOS

Os experimentos aqui descritos tiveram como objetivo mostrar as reduções do TEC, e conseqüentemente do erro devido à ionosfera no posicionamento com GPS, após o período de máxima atividade solar do ciclo 23 consistindo no início do declínio do número de manchas solares.

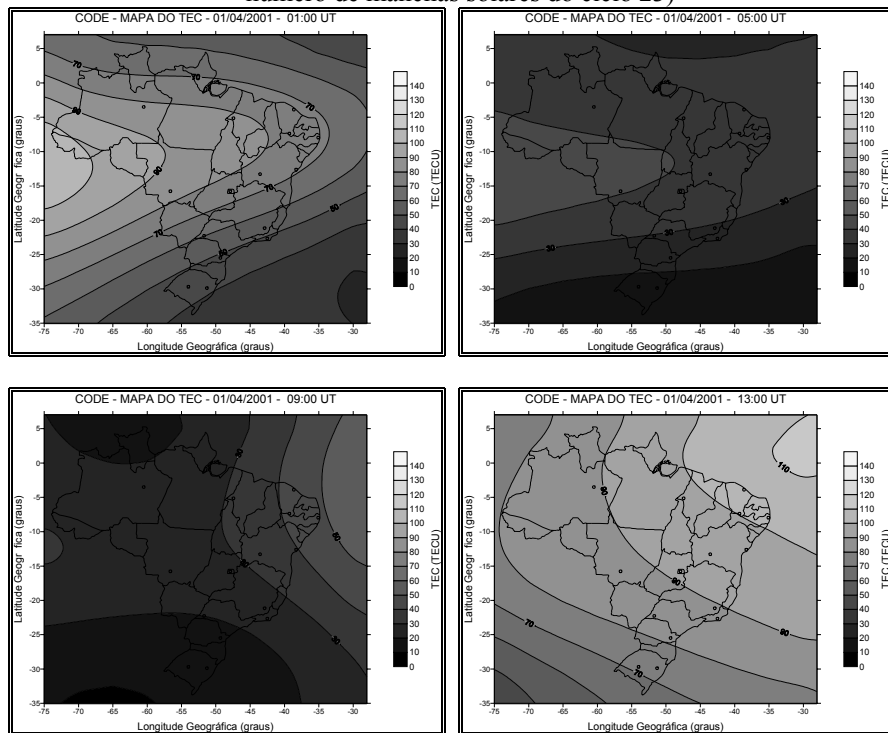
Para os experimentos foram escolhidos dois dias: o primeiro referente ao dia 1º de abril de 2001 (período de máxima atividade solar) e o segundo ao dia 1º de abril de 2004 (período de declínio da atividade solar). De acordo com a variação sazonal, o mês de abril é um dos que apresentam os maiores valores anuais do TEC, sendo este o motivo de sua escolha entre os vários meses do ano.

No primeiro experimento foram elaborados mapas do TEC da ionosfera para os dois dias selecionados. Para tanto, foram utilizados os arquivos IONEX (*IONosphere Map EXchange Format*) produzidos pelo CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Os arquivos IONEX produzidos pelo CODE são enviados ao IGS (*International GPS Service*), em face de que o CODE faz parte do grupo de trabalho da ionosfera (Iono_WG) do IGS. Os arquivos IONEX fornecem

dados do TEC na direção vertical e suas respectivas posições a cada 2 horas. Os arquivos IONEX podem ser obtidos gratuitamente nos seguintes endereços: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE> ou <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono>.

As figuras 4 e 5 mostram a variação do TEC na região brasileira durante os dias 1º de abril de 2001 e 2004, respectivamente. Os mapas produzidos, a partir dos arquivos IONEX, são apresentados a cada 4 horas UT e, para o dia de 2001 iniciam-se as 1 hora e termina às 21 horas. No dia de 2004 os arquivos são apresentados a cada 4 horas, porém iniciando-se as 0 hora e terminando às 22 horas. Isto porque nos dias atuais o CODE modificou os intervalos dos arquivos IONEX. Nos mapas o TEC é dado na direção vertical e a unidade utilizada é TECU (*TEC Unit*), sendo $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ el/m}^2$.

Figura 4 – Mapas do CODE para o dia 1º de abril de 2001 (período de máximo número de manchas solares do ciclo 23)



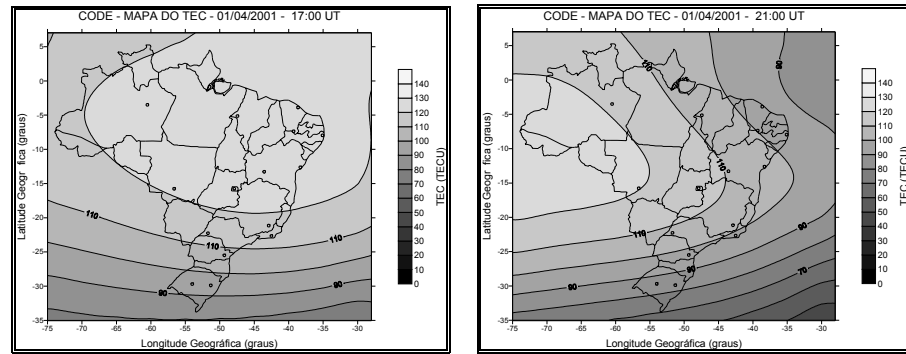
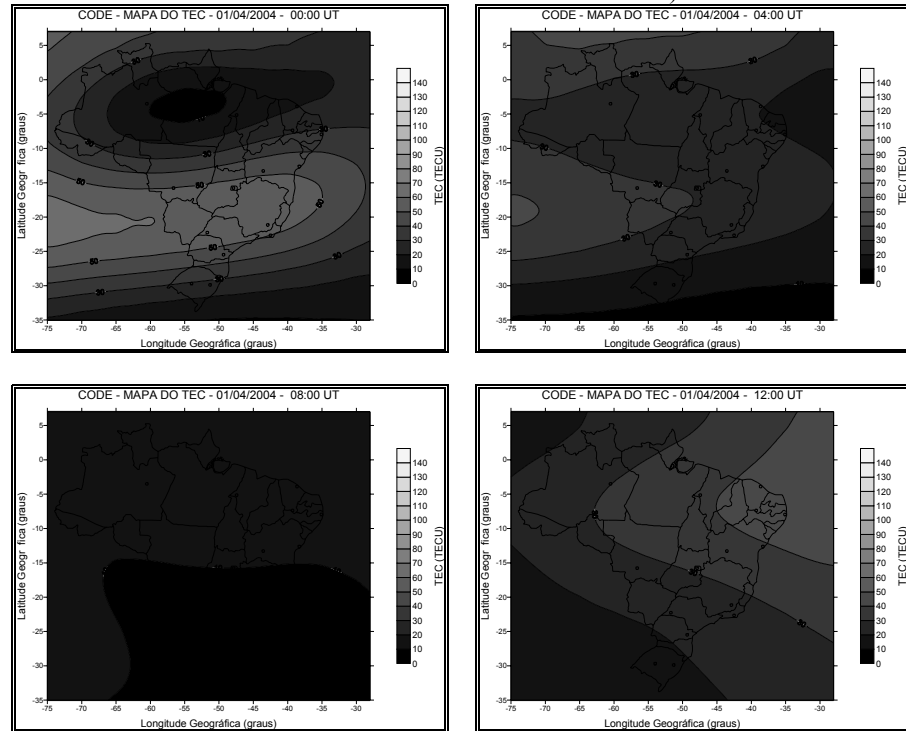
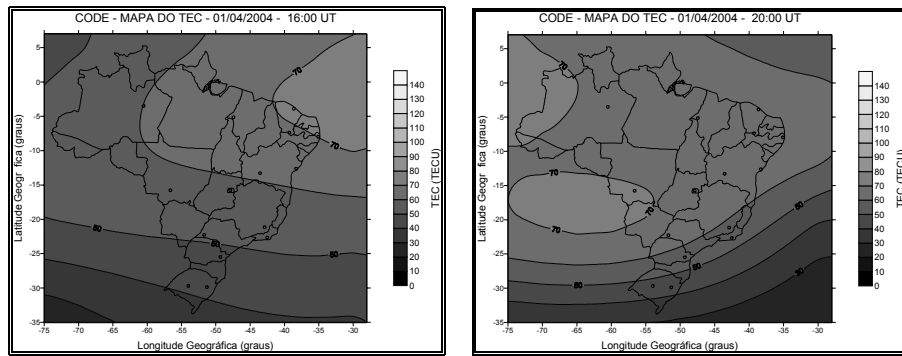


Figura 5 – Mapas do CODE para o dia 1º de abril de 2004 (período de declínio do número de manchas solares do ciclo 23)

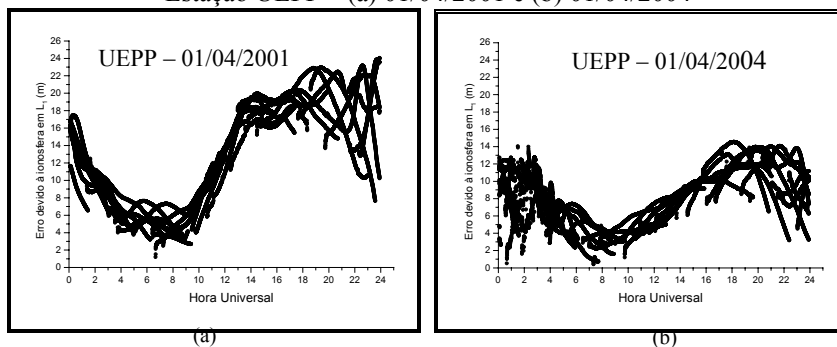




Comparando as figuras 4 e 5 pode-se verificar a diminuição dos valores do TEC no dia referente ao ano de 2004. No dia referente a 2001 obteve-se valores máximos próximos de 130 TECU, enquanto que no dia referente a 2004 os valores máximos não ultrapassaram 80 TECU, aproximadamente. Para este experimento, ou seja, de acordo com os dados do CODE, houve uma redução no valor máximo do TEC de aproximadamente 38%.

Devido à proporcionalidade existente entre o TEC e o erro devido à ionosfera na distância entre o satélite e o receptor, a diminuição do primeiro implicará diretamente o mesmo no segundo. Utilizando os dados do receptor de dupla frequência da estação UEPP da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) foi calculado o erro devido à ionosfera nas distâncias medidas em L_1 . A observável utilizada no cálculo foi a pseudodistância filtrada pela fase, coletadas com ângulo de elevação maior do que 15° . As figuras 6 (a) e (b) mostram a variação do erro devido à ionosfera (na direção vertical) nas distâncias obtidas em L_1 para todos os satélites observados na estação UEPP nos dias 1º de abril de 2001 e 2004, respectivamente.

Figura 6 – Erro devido à ionosfera em L_1 (direção vertical) – todos os satélites – Estação UEPP – (a) 01/04/2001 e (b) 01/04/2004

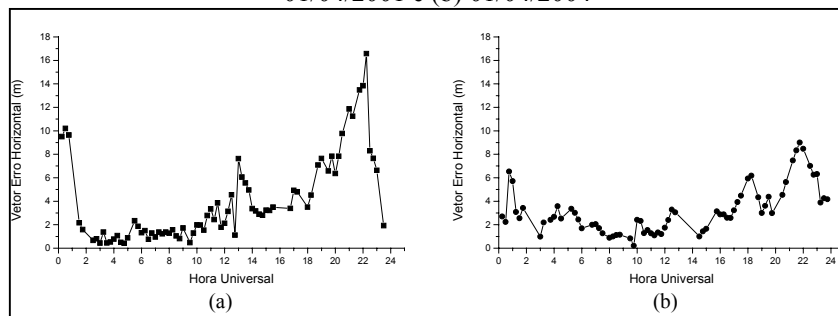


Analisando as figuras 6 (a) e (b) pode-se observar a redução do erro devido à ionosfera nas distâncias medidas em L_1 no dia referente ao ano de 2004. Para o dia de abril de 2001 o valor máximo do erro foi de 24 m e no dia de 2004 foi de 14 m, aproximadamente. As diferenças nos valores não são tão significativas entre 4 e 10 horas UT. Após este período as diferenças começam a aumentar, destacando, assim, as reduções ocorridas no dia referente a 2004.

No último experimento foi realizado o posicionamento por ponto para os dois dias selecionados. Para o posicionamento por ponto, a partir das observações de pseudodistâncias (C/A), utilizou-se os dados da estação UEPP da RBMC, e as posições foram determinadas a cada 15 minutos. No processamento foram utilizadas as efemérides precisas produzidas pelo IGS. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP), valor menor ou igual a 7. Foram consideradas apenas as pseudodistâncias coletadas com ângulo de elevação acima de 15 graus e a precisão adotada para a mesma foi de 3 m. O software utilizado foi o GPSPACE (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*) desenvolvido pelo GSD/NRCan (*Geodetic Survey Division/Natural Resources Canada*). As coordenadas obtidas nos processamentos foram comparadas com as consideradas verdadeiras da estação UEPP.

As figuras 7 (a) e (b) mostram o comportamento do erro na posição horizontal obtida no posicionamento por ponto durante o período de 24 horas (Hora Universal – UT) dos dias 1º de abril de 2001 e 2004, respectivamente.

Figura 7 – Erro horizontal – posicionamento por ponto – Estação UEPP – (a) 01/04/2001 e (b) 01/04/2004



Comparando as figuras 7 (a) e (b) pode-se verificar na maioria do período do dia a redução no erro horizontal para o dia referente a 2004. Somente no período entre 2 e 5 horas UT, aproximadamente, os erros horizontais são um pouco menores para o dia de 2001. No período entre 6 e 10 horas UT não se observa uma diferença significativa do erro horizontal entre os dias. Porém, após as 10 horas UT esta diferença começa a ser notada, com valores menores para o dia de 2004. Diferenças significativas podem ser verificadas às 13:30 horas UT e 22 horas UT,

aproximadamente, com valores elevados no dia de 2001 e valores menores para o dia de 2004. A tabela 2 apresenta os valores máximo, mínimo e médio do erro horizontal obtidos no posicionamento por ponto a partir do processamento dos dados da estação UEPP durante as 24 horas dos dias 1º de abril de 2001 e 2004.

Tabela 2 – Erro horizontal – Estação UEPP		
Erro – Posição Horizontal (metros)		
	01/Abril/2001	01/Abril/2004
Máximo	16,57	8,99
Mínimo	0,41	0,21
Médio	2,64	1,97

Os valores da tabela 2 mostram uma redução do erro horizontal nos resultados do dia 1º de abril de 2004. O erro médio para o dia referente a 2001 e 2004 foi de 2,64 m e 1,97 m, respectivamente. Neste experimento, quanto ao erro médio, a redução é de 25%, aproximadamente. Quanto aos valores máximo e mínimo também houve uma melhora no dia de 2004 com relação ao de 2001. O valor máximo e mínimo para o dia de 2001 é de 16,57 m e 0,41 m reduzindo para 8,99 m e 0,21 m para o dia de 2004, respectivamente.

Analisando os resultados a partir do desvio padrão (σ) e do erro médio quadrático (EMQ), também se verifica uma melhora no processamento do dia referente a 2004 quando comparado ao de 2001. O desvio padrão, calculado nos experimentos, indica a dispersão da posição estimada para uma época qualquer de observação com relação à posição média estimada para todo o período (24 horas), com 68,3% de probabilidade. O EMQ representa a dispersão da posição estimada para uma época qualquer de observação com relação à posição conhecida da estação UEPP, com 68,3% de probabilidade. A tabela 3 apresenta os valores do σ e EMQ para a posição horizontal.

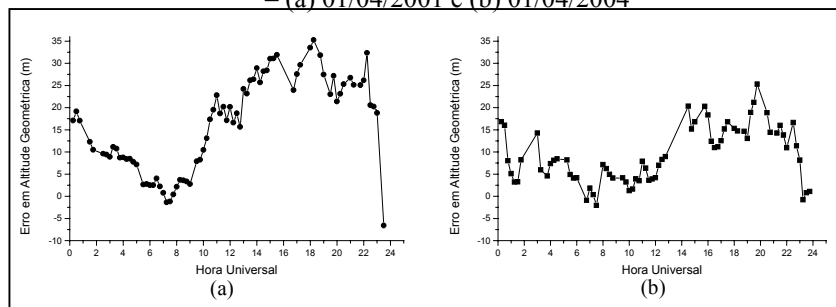
Tabela 3 – Desvio padrão e erro médio quadrático - posição horizontal – Estação UEPP

σ e EMQ – Posição Horizontal (metros)		
	01/Abril/2001	01/Abril/2004
σ	4,68	3,17
EMQ	5,41	3,77

Analisando os valores da tabela 3 verifica-se a melhora na precisão e acurácia para o dia de 2004 em comparação com o de 2001, ou seja, observa-se a redução dos valores de σ e EMQ.

Quanto à determinação altimétrica, as figuras 8 (a) e (b) mostram o comportamento do erro na altitude geométrica obtida no posicionamento por ponto durante o período de 24 horas dos dias 1º de abril de 2001 e 2004, respectivamente.

Figura 8 – Erro em altitude geométrica – posicionamento por ponto – estação UEPP – (a) 01/04/2001 e (b) 01/04/2004



Analisando as figuras 8 (a) e (b) pode-se observar a redução do erro em altitude geométrica no dia referente a abril de 2004. Esta redução é bem notada após as 10 horas UT, aproximadamente. O erro médio em altitude geométrica foi de 16,54 m para o dia 1º de abril de 2001 e de 9,37 m para 1º de abril de 2004. Isto representa uma redução média do erro de 43%, aproximadamente, para o dia referente a 2004 quando comparado ao de 2001.

A tabela 4 mostra os valores do desvio padrão e do erro médio quadrático para a altitude geométrica obtidos no posicionamento por ponto para os dias analisados.

Tabela 4 – Desvio padrão e erro médio quadrático – altitude geométrica – Estação UEPP

σ e EMQ – Altitude Geométrica (metros)		
	01/Abril/2001	01/Abril/2004
σ	10,51	6,09
EMQ	19,69	11,10

Analisando os valores da tabela 4 verifica-se também a redução dos valores de σ e EMQ para o dia referente a 2004. Para este experimento, houve uma redução do σ de 10,51 m para 6,09 m e do EMQ de 19,69 m para 11,10 m. Em outras palavras, houve uma melhora na precisão e na acurácia da determinação altimétrica para o dia referente a 2004 em comparação ao de 2001 com o declínio do número de manchas solares do ciclo 23.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Atualmente, o ciclo solar 23 encontra-se num período de declínio do número de manchas solares e conseqüentemente do TEC da ionosfera. Neste artigo foram realizados experimentos utilizando dados GPS visando apresentar a redução do erro devido à ionosfera na propagação dos sinais GPS e, portanto a melhora no posicionamento com GPS, em particular, no posicionamento por ponto, com o declínio do número de manchas solares do ciclo 23.

Os dias selecionados para a realização dos experimentos foram os dias 1º de abril de 2001 (período de máximo número de manchas solares) e 1º de abril de 2004 (período de declínio do número de manchas solares).

No primeiro experimento foram elaborados mapas do TEC para a região brasileira para os dois dias selecionados utilizando os arquivos IONEX produzidos pelo CODE. Analisando os mapas pode-se verificar uma redução no valor máximo do TEC diário de 38% para o dia referente a 2004 quando comparado aos resultados do dia 1º de abril de 2001. No dia referente a 2001 obteve-se valores máximos próximos de 130 TECU, enquanto que no dia referente a 2004 os valores máximos não ultrapassaram 80 TECU, aproximadamente.

No segundo experimento foram utilizados os dados GPS da estação UEPP para os dois dias selecionados com o objetivo de verificar o comportamento do erro devido à ionosfera nas distâncias medidas em L_1 . No dia referente a abril de 2001 o valor máximo do erro foi de 24 m e no dia de 2004 foi de 14 m, aproximadamente, verificando-se, assim, a redução do erro devido à ionosfera em 2004.

No último experimento foi realizado o posicionamento por ponto (com o código C/A) para os dois dias selecionados utilizando os dados da estação UEPP. A análise dos resultados obtidos mostrou uma redução média de aproximadamente 25% do erro horizontal para o dia 1º de abril de 2004 quando comparado ao de 2001. A redução média do erro em altitude geométrica foi de 43%, aproximadamente.

Vale salientar que 2004 não é o ano em que se espera ocorrer o período de mínima atividade solar do ciclo 23. Este período deverá ocorrer entre os anos de 2006 e 2007 de acordo com a figura 3. Desta forma, uma melhor performance do posicionamento com GPS deverá ocorrer nos próximos anos devido à contínua redução do número de manchas solares do ciclo 23.

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.; DAL POZ, W.R.. Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: primeiras experiências na FCT/UNESP. In: **Mitishita, E.A. ed. Série em**

- Ciências Geodésicas: Pesquisas em Ciências Geodésicas.** Curitiba: Imprensa Universitária. 2002. 395p. Vol.2, p.80-99.
- DAVIES, K.. **Ionospheric Radio.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- FEDRIZZI, M.. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS.** 2003. 223p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- 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.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H.. **Introdução à geofísica espacial.** São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.
- KUNCHES, J.M.; In the teeth of cycle 23. In: **13TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2000** – CD ROM, Salt Lake City, Utha, Sept. 19-22, 2000.
- LEICK, A.. **GPS satellite surveying.** 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- McNAMARA, L.F.. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding.** Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- OLIVEIRA FILHO, K.S.O; SARAIVA, M.F.O.. **Astronomia e Astrofísica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física. 2000. 708 p.
- PICQUENARD, A.. **Propagação das ondas radioelétricas nos meios naturais.** Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos S.A., 1974.
- 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, 1993. 531p.
- 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 agosto/04. Aceito em dezembro/04.)