

CÁLCULO DO TEC USANDO DADOS DE RECEPTORES GPS DE DUPLA FREQUENCIA PARA A PRODUÇÃO DE MAPAS DA IONOSFERA PARA A REGIÃO BRASILEIRA

Determination of TEC using GPS data from dual frequency receivers for the production of ionospheric maps to Brazil

Marcelo Tomio Matsuoka¹
Paulo de Oliveira Camargo²

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

²Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305

Presidente Prudente/SP – CEP 19060-000

e-mail: tomio@pos.prudente.unesp.br; paulo@prudente.unesp.br

RESUMO

Atualmente, um dos principais fatores que limita a acurácia do posicionamento com receptores GPS é o atraso devido à ionosfera. O erro associado à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) presentes na camada ionosférica. 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 estudo da variação do TEC é importante, pois, é o principal parâmetro que descreve o comportamento da ionosfera. Devido à natureza dispersiva da ionosfera, com dados GPS de receptores de dupla frequência pode-se determinar o TEC e, por consequência, efetuar correções do erro devido à ionosfera. Diversos centros de pesquisa na Europa e na América do Norte produzem mapas do TEC em escala regional e global usando dados GPS. No Brasil pode-se utilizar os dados GPS de dupla frequência coletados com os receptores pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) para estudar o comportamento do TEC na região brasileira. O propósito deste artigo é produzir mapas do VTEC (TEC na direção vertical) da ionosfera para a região brasileira usando dados GPS de receptores de dupla frequência. A metodologia e a estratégia adotada para a obtenção dos resultados propostos são apresentadas.

Palavras chaves: GPS, ionosfera, mapa do TEC.

ABSTRACT

Nowadays, one of the main drawbacks of the GPS accuracy for L1 users is the delay due to ionosphere. The error associated to the ionosphere depends on the Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer, that is influenced by several variables, including the solar cycle, the season, the local time, the geographical location of the receiver and the Earth's magnetic field. The monitoring of the variation of TEC is important because it is the principal parameter that describes the ionospheric activity. Due to the characteristic dispersive of the ionosphere, the TEC has been computed using GPS data from double frequency receiver. In Europe and in North America, several research centers produce regional and global scale maps of the VTEC (Vertical TEC) using GPS data. In Brazil it can be used the GPS data from RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring) for studying the behavior of TEC in the Brazilian area. The purpose of this paper is to produce maps of TEC of the ionosphere for Brazilian area using GPS data from double frequency receivers. The methodology and the strategy adopted for obtaining of the proposed results are also presented.

Keywords: GPS, ionosphere, TEC map.

1. INTRODUÇÃO

A maior fonte de erros no posicionamento com GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global) era a técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva), desativada às 04 horas UT (*Universal Time* – Tempo Universal) de 02 de maio de 2000. Com a desativação da técnica SA, a ionosfera tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GPS.

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 do caminho 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. A ionosfera não só degrada a acurácia do GPS, como também reduz a sua confiabilidade, pois, existe uma alta dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas (SKONE, 2000).

O TEC é o principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS. O entendimento do comportamento do TEC na região de interesse é importante para compreender os efeitos e as limitações impostas pela ionosfera no que concerne à qualidade do posicionamento com GPS.

Com respeito à região brasileira em particular, o estudo do comportamento do TEC da ionosfera é de grande interesse, pois, nesta região estão presentes os maiores valores do TEC, bem como, uma alta variação espacial e temporal se comparados com valores referentes às outras regiões do globo terrestre (KOMJATHY et al., 2003).

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, com dados GPS de receptores de dupla frequência pode-se efetuar correções do erro devido à ionosfera, bem como, calcular o TEC.

Neste contexto, podem-se utilizar os dados GPS de dupla frequência coletados com os receptores pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) para estudar o comportamento do TEC na região brasileira. Com relação ao uso da RBMC para elaboração de modelos que visam minimizar o erro devido à ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência, vários trabalhos já foram realizados na FCT/UNESP (Faculdade de Ciências e Tecnologia/ Universidade Estadual Paulista): Camargo (1999), Camargo et al., (2000), Camargo et al. (2001), Matsuoka e Camargo (2002), Matsuoka e Camargo (2003), Aguiar et al. (2003).

Atualmente, a RBMC possui 15 estações (Figura 1) que coletam dados GPS continuamente, sendo que uma delas está localizada em Presidente Prudente. As estações de Brasília e Fortaleza também fazem parte da rede IGS (*International GPS Service*), ocorrendo assim, a integração das redes IGS e RBMC.

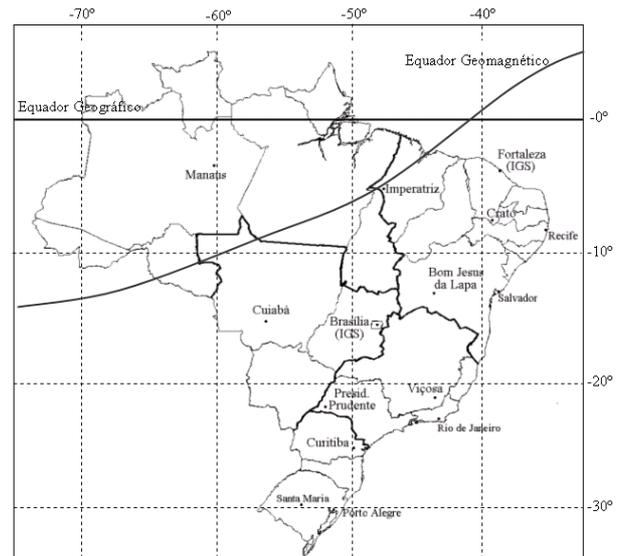


Fig. 1 – Estações da RBMC
Fonte: adaptada de IBGE (2004)

Nesse artigo, são apresentados os resultados de experimentos realizados na FCT/UNESP para a produção de mapas do TEC da ionosfera usando dados GPS, visando apresentar o comportamento da ionosfera na região brasileira para suporte a comunidade geodésica brasileira. Adicionalmente, também é apresentada uma breve revisão sobre os seguintes temas: ionosfera e seu impacto na propagação dos sinais GPS, e metodologias para a obtenção do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência. Vale comentar, que este trabalho faz parte de um projeto maior que está sendo realizado na FCT/UNESP que visa desenvolver metodologias e programas computacionais para a produção de mapas da ionosfera para o Brasil usando dados GPS (CAMARGO, 2004).

2. IONOSFERA

2.1 Considerações Iniciais

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (ou simplesmente propagação) (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, que é 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 esteja 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 livres é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas. Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização. A fotoionização ionosférica consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991).

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

2.2 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 ionosférico 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 (WELLS et al., 1986). 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 geomagnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite. Além do atraso ionosférico, essas variações podem fazer com que o receptor perca a sintonia com o satélite, pelo enfraquecimento do sinal, caso específico do fenômeno denominado cintilação (WEBSTER, 1993).

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/m²).

Na tabela 1 tem-se o efeito que a ionosfera causa na propagação para diferentes frequências e indica o erro residual na vertical para combinações entre duas frequências (SEEBER, 1993).

TABELA 1 - EFEITO DA IONOSFERA EM DISTÂNCIAS OBSERVADAS NA VERTICAL COM UMA FREQUÊNCIA E ERROS RESIDUAIS PARA COMBINAÇÕES ENTRE DUAS FREQUÊNCIAS.

Uma frequência	400 MHz	1600 MHz	2000 MHz	8000 MHz
Efeito médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% < do que	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m
Duas frequências	150/400 MHz	400/2000 MHz	1227/1572 MHz	2000/8000 MHz
Efeito médio	0,6 m	0,9 cm	0,3 cm	0,04 cm
90% < do que	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22 cm	4,5 cm	0,43 cm

Fonte: Seeber (1993)

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, calculada pelas expressões (1) e (2) representa 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 representa poucos centímetros (SEEBER, 1993). A tabela 2 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras L₁, L₂ e para a combinação linear livre da ionosfera (L₀). Para direções inclinadas, a influência aumenta em até 3 vezes, aproximadamente (SEEBER, 1993).

TABELA 2 - 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

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). Períodos de cintilação estão associados com a existência de regiões de irregularidades de pequena escala na densidade de elétrons na camada ionosférica (EL GIZAWY, 2003). Normalmente essas irregularidades que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altura (DAVIES, 1990).

Segundo Skone (2000), os efeitos mais intensos da cintilação ionosférica ocorrem nas regiões de baixa latitude geomagnética (± 10 até ± 20 graus), nas regiões onde ocorrem as auroras (65 até 75 graus de latitude geomagnética) e na região que envolve a capa polar (latitudes geomagnéticas maiores que 75 graus). Cintilações que ocorrem nas regiões de altas latitudes (região auroral) e na região equatorial, surgem de distintos fenômenos físicos. Na região auroral, a ocorrência da cintilação é devido às tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas. No caso da região equatorial, no qual o Brasil está incluído, a cintilação está relacionada mais diretamente com a anomalia equatorial (SKONE, 2000). Segundo Skone (2000) as cintilações que ocorrem na região equatorial possuem um maior impacto no desempenho de rastreamento dos sinais pelos receptores do que na região auroral e de altas latitudes.

2.3 Anomalia Equatorial

Antes de descrever a anomalia equatorial, torna-se necessário definir o efeito fonte. Na região equatorial, a densidade de elétrons da ionosfera é influenciada pelo alto nível de radiação solar e pelos campos magnético e elétrico da Terra (WEBSTER, 1993). Durante o dia o campo elétrico é direcionado para leste. Na região equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima. Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético. Este movimento ocorre devido à ação da gravidade e gradiente de pressão. Este movimento de elevação do plasma e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (RODRIGUES, 2003). Este nome foi dado devido à similaridade com o movimento de uma fonte (chafariz).

Uma conseqüência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que dois picos de ionização são formados nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10° e 20° de latitude geomagnética, aproximadamente. Em contrapartida, no equador geomagnético a ionização fica menos intensa. Tal distribuição latitudinal

de ionização é denominada de anomalia equatorial ou anomalia de Appleton. Nas faixas da anomalia equatorial que se localizam no território brasileiro as densidades da ionosfera atingem valores maiores que em outras regiões da Terra (KOMJATHY et al., 2003).

3. CÁLCULO DO TEC COM DADOS GPS

O principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS é o TEC. O TEC representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde o receptor até o satélite, e cuja área da base é unitária (1 m^2). Este parâmetro ionosférico é normalmente apresentado em unidades de TEC (TECU), onde 1 TECU corresponde a 1×10^{16} elétrons/ m^2 . Ainda, o TEC é facilmente convertido em erro na distância medida com a fase e o código nas frequências L_1 e L_2 usando a equação (1) e (2), respectivamente, onde: para L_1 , 1 TECU = 0,16 m; e para L_2 , 1 TECU = 0,27 m.

A natureza dispersiva da ionosfera permite o cálculo do TEC usando os dados coletados por receptores GPS de dupla frequência. O TEC pode ser obtido por uma combinação linear entre as observáveis de pseudodistância em L_1 e L_2 ou utilizando a observável de fase da portadora em ambas as frequências. Nestas combinações lineares, devido à diferenciação, os erros que contaminam as observáveis em ambas as frequências da mesma maneira são eliminados, tais como: a refração troposférica, o não sincronismo do relógio do satélite e do receptor e o erro das efemérides. Porém, alguns erros não são correlacionados entre as frequências e, portanto não são minimizados na combinação linear, influenciando na determinação do TEC. São eles: (1) o atraso instrumental interfrequência do satélite e do receptor; (2) os efeitos de multicaminho e (3) o ruído do receptor (RODRIGUES, 2003).

Para a minimização da influência do atraso instrumental interfrequência do satélite no cálculo do TEC podem ser utilizados os valores fornecidos nas mensagens de navegação transmitidas pelos satélites GPS. Outra opção é utilizar os valores calculados diariamente pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berna na Suíça, disponíveis em: <ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/ORB/>. O atraso instrumental interfrequência do receptor pode ser obtido por processos de calibração (SARDÓN e ZARRAOA, 1997) ou por técnicas de modelagem que utilizam dados de receptores GPS de dupla frequência (exemplos: Lanyi e Roth, 1988; Coco et al., 1991; Wilson e Mannucci, 1993; Sardón et al., 1994; Camargo, 1999). Nesta última técnica também se estima o atraso instrumental interfrequência dos satélites. O atraso instrumental de alguns receptores da rede IGS também pode ser obtido no endereço do Instituto Astronômico da Universidade de Berna. O efeito de multicaminho pode ser minimizado realizando-se uma boa instalação da antena de forma a evitar obstáculos próximos e utilizando antenas do tipo *choke ring* e o ruído do receptor pode ser minimizado utilizando-se componentes eletrônicos de baixo ruído na

fabricação do receptor.

3.1 Cálculo do TEC a partir da Pseudodistância

O TEC (em TECU) na direção do satélite (s) ao receptor (r) pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias (P_{1r}^s, P_{2r}^s), advindas dos códigos em L_1 e L_2 , a partir da seguinte combinação linear:

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} [(P_{2r}^s - P_{1r}^s) - e_{p21}], \quad (3)$$

onde f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras em L_1 e L_2 respectivamente. O termo e_{p21} representa a diferença entre L_1 e L_2 dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as pseudodistâncias e os erros aleatórios. Estão presentes neste termo o atraso instrumental interfrequência do satélite e receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor.

A desvantagem da utilização das observações de pseudodistâncias é de que as medidas do TEC são consideravelmente ruidosas (JAKOWSKI, 1996).

3.2 Cálculo do TEC a partir da Fase

O TEC (em TECU) na direção do satélite (s) ao receptor (r) também pode ser obtido a partir da combinação linear entre as medidas de fase da portadora em L_1 e L_2 ($\varphi_{1r}^s, \varphi_{2r}^s$):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3 (f_1^2 - f_2^2)} [(\lambda_2 \varphi_{2r}^s - \lambda_1 \varphi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - e_{\varphi 21}] \quad (4)$$

onde f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras em L_1 e L_2 e λ_1 e λ_2 são o comprimento de onda em L_1 e L_2 , respectivamente. O termo $e_{\varphi 21}$ representa a diferença entre L_1 e L_2 dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre as fases e os erros aleatórios. Estão presentes neste termo o atraso instrumental interfrequência do satélite e receptor, os efeitos do multicaminho e os efeitos do ruído do receptor. Note que na equação (4) o TEC calculado, tendo como observável a fase da portadora, está sendo influenciado pelas ambigüidades (N_{1r}^s e N_{2r}^s) em L_1 e L_2 , respectivamente. A ambigüidade é diferente para cada satélite, para cada passagem do mesmo satélite, e a cada vez que ocorrerem perdas de sinal implica em uma nova ambigüidade.

Esta imprecisão no cálculo do TEC devido à ambigüidade faz com que muitos trabalhos encontrados na literatura denominem o TEC advindo das observações da fase como um valor de "TEC relativo" (Skone, 1998; El Gizawy, 2003; Rodrigues, 2003; Fedrizzi, 2003). Seguindo a mesma linha de raciocínio, o TEC

advindo da pseudodistância (equação 3) é dito na literatura como sendo um valor de "TEC absoluto" devido à inexistência do termo relativo à ambigüidade. Porém, os valores de TEC calculados pela pseudodistância são aproximadamente 10 vezes ou mais ruidosos do que os obtidos pela fase da portadora (SKONE, 1998).

Uma alternativa é utilizar como observável no cálculo do TEC a pseudodistância filtrada pela fase da portadora em L_1 e L_2 , cuja formulação empregada para o seu cálculo será apresentada no próximo tópico. Com isto diminui-se consideravelmente o ruído da pseudodistância e elimina a influência da ambigüidade da fase. Vale ressaltar, que numa análise crítica, o TEC só poderia ser chamado de absoluto quando for isento também do erro devido ao atraso instrumental interfrequência dos satélites e receptores.

A combinação linear utilizada para a obtenção do TEC a partir da pseudodistância filtrada pela fase da portadora é a mesma apresentada na equação (3). Obviamente, a diferença é que ao invés de utilizar as pseudodistâncias originais se utiliza às filtradas pela fase.

3.3 Cálculo do TEC a partir da Pseudodistância Filtrada pela Fase

Como apresentado anteriormente, o TEC pode ser obtido pela combinação linear entre as observações de pseudodistância ou fase nas frequências L_1 e L_2 . As medidas de TEC obtidas a partir da pseudodistância são bastante ruidosas, e as obtidas pela fase são influenciadas pela diferença entre as ambigüidades em L_1 e L_2 . Estas afirmações podem ser observadas na figura 2 que mostram valores do TEC advindos das duas técnicas.

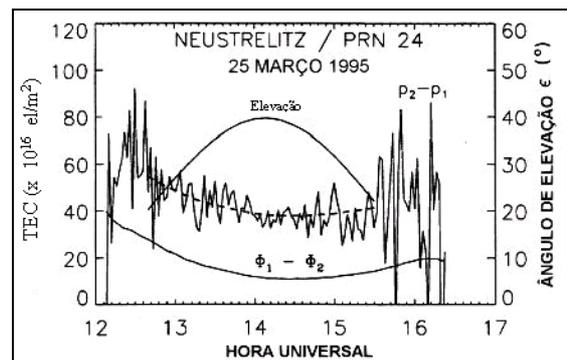


Fig. 2 - Exemplo de cálculo do TEC a partir das medidas de pseudodistância ($\rho_2 - \rho_1$) e fase ($\Phi_1 - \Phi_2$)

Fonte: Jakowski (1996)

Para obter uma estimativa mais adequada do TEC pode-se utilizar na equação (3) as pseudodistâncias filtradas pela fase da portadora em L_1 e L_2 .

3.3.1 Cálculo da pseudodistância filtrada pela fase

O princípio da combinação entre a pseudodistância e a medida da fase da onda portadora deve-se, primeiramente, à investigação de Hatch (1982). O algo-

ritmo é amplamente encontrado na literatura, como por exemplo, em Hatch (1982), Goad (1990) e Jin (1996).

A diferença da fase da portadora entre duas épocas (t_{k-1} e t_k) fornece uma distância relativa ou medida integrada Doppler, que, em inglês, é designada de *delta range*. Denotando as diferenças no intervalo (t_{k-1} e t_k), respectivamente, para L_1 e L_2 , como $D_{k-1,k}^1$ e $D_{k-1,k}^2$, tem-se que:

$$D_{k-1,k}^1 = \lambda_1 \varphi_{1r k}^s - \lambda_1 \varphi_{1r k-1}^s \quad (5)$$

e

$$D_{k-1,k}^2 = \lambda_2 \varphi_{2r k}^s - \lambda_2 \varphi_{2r k-1}^s \quad (6)$$

A partir da equação (5) e (6) uma distância relativa livre do efeito da ionosfera pode ser obtida, por meio da expressão:

$$D_{k-1,k} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} D_{k-1,k}^2 \quad (7)$$

Fazendo duas vezes a equação (7) menos a equação (5) e (6), pode-se projetar a diferença em distância da fase da portadora em equivalente diferença em distância da pseudodistância, respectivamente para L_1 e L_2 . Assim:

$$M_{k-1,k}^i = 2D_{k-1,k} - D_{k-1,k}^i, \quad (8)$$

para $i = 1, 2$.

A quantidade ($M_{k-1,k}^i$) tem uma importante propriedade, que é a de conter as mesmas informações que fazem parte da diferença ($P_{irk}^s - P_{irk-1}^s$), porém, com ruído reduzido (JIN, 1996), que corresponde a 0,7 do ruído da pseudodistância original.

Para uma época inicial (t_0), a pseudodistância filtrada pela fase da portadora é dada pela própria pseudodistância observada, isto é, $P_{ir0/0}^s = P_{ir0}^s$. A partir dela, um valor predito para pseudodistância, para uma época (t_k), pode ser obtido, pela expressão (JIN, 1996):

$$P_{irk/k-1}^s = P_{irk-1/k-1}^s + M_{k-1,k}^i, \quad (9)$$

para $i = 1, 2$ e $k = 1, 2, \dots, t_k$. Na equação (9) ($P_{irk-1/k-1}^s$) representa a pseudodistância filtrada na época t_{k-1} .

A pseudodistância filtrada pela fase da portadora para a época t_k é dada por (JIN, 1996):

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{1}{k+1} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s). \quad (10)$$

Teunissen (1991) mostra que a equação (10) não é estritamente um estimador de mínimos quadrados

recursivo, já que a suposição de que a variância da fase da portadora é zero, é implicitamente feita. A expressão teórica para a filtragem da pseudodistância é dada por:

$$P_{irk/k}^s = P_{irk/k-1}^s + \frac{\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2}{k (\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)} (P_{irk}^s - P_{irk/k-1}^s), \quad (11)$$

sendo $\sigma_{P_i}^2$ e $\sigma_{\phi_i}^2$ as variâncias da medida de pseudodistância e fase em L_i ($i = 1, 2$), respectivamente.

No processo de filtragem, quando ocorrem perdas de ciclos, o algoritmo deve ser reiniciado. A variância da pseudodistância filtrada é obtida da seguinte forma (TEUNISSEN, 1991):

$$\sigma_{P_{ir}^s k/k}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2 (\sigma_{P_i}^2 + k \sigma_{\phi_i}^2)}{k (\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\phi_i}^2)}, \quad (12)$$

para $i = 1, 2$.

A figura 3 mostra a precisão para as pseudodistâncias (C/A (P_1), P_2) filtradas pela fase, obtida com a equação (12), considerando $\sigma_{P_1} = 1$ m, $\sigma_{P_2} = 1,5$ m, $\sigma_{\phi_1} = 0,003$ m e $\sigma_{\phi_2} = 0,0039$ m, para $k_i = 1, 2, \dots, t_k$, com $i = 1, 2$.

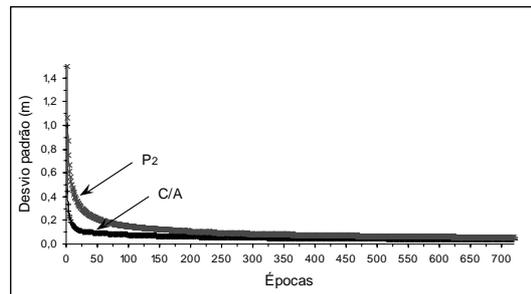


Fig. 3 - Desvio padrão da pseudodistância filtrada pela fase da portadora. Fonte: Camargo (1999)

Pode-se notar na figura 3 a melhora na precisão das pseudodistâncias ao se utilizar a técnica de filtragem pela fase, sendo que os valores do desvio padrão se estabilizam após algumas épocas. É importante salientar que a cada perda de sinal (ciclo) o algoritmo deve ser inicializado.

Para exemplificar a vantagem da técnica proposta, a figura 4 mostra um gráfico com os valores do TEC calculados usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase. Pode-se notar claramente a melhora na estimativa dos valores do TEC usando a técnica de filtragem da pseudodistância pela fase, reduzindo consideravelmente o ruído nas medidas do TEC.

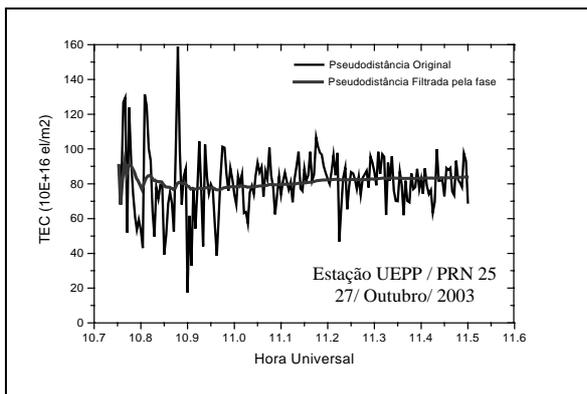


Fig. 4 - Valores do TEC usando as pseudodistâncias originais e as filtradas pela fase

Para finalizar, vale salientar que a combinação linear utilizada no cálculo do TEC usando a pseudodistância filtrada pela fase é a que foi apresentada na equação (3), ou seja, a mesma utilizada pela pseudodistância original.

3.4 Obtenção do TEC na Direção Vertical

Nas equações (3) e (4), o TEC é dado ao longo da direção entre o satélite e o receptor (TEC_r^s). O TEC na direção vertical (VTEC) pode ser obtido a partir da multiplicação entre o TEC_r^s e a função de mapeamento geométrica padrão ($\cos(z')$):

$$VTEC = \cos(z') TEC_r^s, \quad (13)$$

onde o valor de z' , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em um plano de altura média (h_m), é obtido de acordo com a seguinte expressão (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001):

$$\sin z' = \frac{r_m}{r_m + h_m} \sin z, \quad (14)$$

onde r_m é o raio médio da Terra ($r_m \cong 6371$ km), h_m representa a altura média da ionosfera, que geralmente varia entre 300 e 450 km, e z é o ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - el$, onde "el" é o ângulo de elevação do satélite). A figura 5 ilustra as quantidades envolvidas na equação (14).

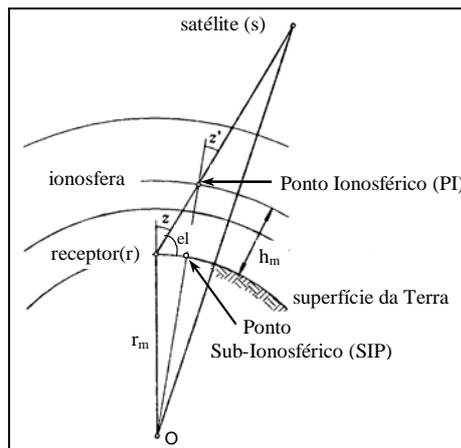


Fig. 5 - Geometria da trajetória do sinal GPS. Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2001)

3.5 Cálculo da Latitude e Longitude Geográfica do Ponto Ionosférico

Os valores do TEC calculados são obtidos para um ponto na camada ionosférica, denominado de ponto ionosférico. O ponto ionosférico é a interseção entre o vetor satélite/receptor e o plano que representa a camada ionosférica.

A localização do ponto ionosférico pode ser calculada em função da latitude e da longitude geográfica da estação (receptor), do azimute e do ângulo de elevação do satélite. Desta forma, a latitude e longitude geográfica do ponto ionosférico são calculadas da seguinte forma:

$$\phi_{PI} = \sin^{-1} [\sin \phi_r \cos \psi + \cos \phi_r \sin \psi \cos Az], \quad (15)$$

$$\lambda_{PI} = \lambda_r + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \psi \sin Az}{\cos \phi_{PI}} \right), \quad (16)$$

sendo:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - el - \sin^{-1} \left(\frac{r_e}{r_e + h_m} \cos(el) \right), \quad (17)$$

onde:

- ϕ_{PI} e λ_{PI} - latitude e longitude do ponto ionosférico;
- ϕ_r e λ_r - latitude e longitude da estação (receptor);
- el - ângulo de elevação do satélite;
- Az - azimute do satélite;
- r_e - raio médio da Terra; e
- h_m - altura média da camada ionosférica.

4. EXPERIMENTOS

Diversos centros na Europa e na América do Norte, produzem mapas do VTEC, dentre os quais se pode citar: o CODE (*Centre for Orbit Determination in*

Europe), o Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), o European Space Operations Center (ESOC), a University of New Brunswick (UNB) e o Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

No Brasil pode-se produzir mapas do VTEC utilizando as observações das estações GPS da RBMC. A FCT/UNESP já realizou suas primeiras experiências para a produção de mapas do VTEC para a região brasileira (DAL POZ, 2002) (CAMARGO e DAL POZ, 2002). Os mapas produzidos mostraram a variação diária e sazonal da ionosfera, porém, nenhuma variação latitudinal do VTEC, bem como a presença da anomalia equatorial, foi observada. Para a produção destes mapas o VTEC da ionosfera foi representado analiticamente por uma série do tipo Fourier. Os coeficientes desta série foram estimados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) utilizando as observáveis GPS das estações da RBMC coletadas durante um período de 24 horas. O fato de se utilizar apenas um conjunto de coeficientes da série para representar o dia inteiro e também para toda a região brasileira pode ter provocado uma alta suavização nos mapas produzidos e, desta forma, comprometeu qualquer variação latitudinal do VTEC. Em trabalhos futuros, pretende-se melhorar a resolução espacial e temporal do VTEC a partir da implementação de um método de estimação recursivo utilizando o algoritmo filtro de Kalman para obter os coeficientes da série (AGUIAR, 2003).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) também já produziu mapas do VTEC para a região brasileira e Sul Americana, com o objetivo de estudar os efeitos de tempestades geomagnéticas na ionosfera. Para a obtenção dos valores do VTEC utilizou-se o programa UNB-IMT (UNB *Ionospheric Modelling Technique*) desenvolvido por Komjathy (1997) na Universidade de New Brunswick. Os resultados obtidos são apresentados em Fedrizzi et al. (2001) e Fedrizzi (2003).

Outro trabalho brasileiro foi realizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, onde foi produzida uma série histórica do VTEC usando dados GPS da RBMC, bem como, a produção de mapas do VTEC para a região brasileira (FONSECA JUNIOR, 2002). O Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) também tem produzido mapas do VTEC utilizando os arquivos no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*) do IGS, o modelo de Klobuchar e dados GPS de receptores de dupla frequência localizados na América do Sul (OLIVEIRA, 2003) (OLIVEIRA et al., 2003) (MORAIS et al., 2004).

Na seqüência serão apresentados alguns experimentos que tiveram como objetivo elaborar mapas do VTEC para o Brasil utilizando as observações GPS de receptores de dupla frequência.

4.1 Programa MAPATEC

O programa MAPATEC foi desenvolvido em Fortran Lahey 95 utilizando sub-rotinas do programa Mod_Ion (CAMARGO, 1999).

O MAPATEC calcula valores do VTEC, e suas respectivas posições (latitude e longitude geográfica dos pontos ionosféricos) utilizando dados GPS de vários receptores de dupla frequência. A observável utilizada para o cálculo do TEC é a pseudodistância filtrada pela fase.

Os valores calculados são organizados em arquivos horários (abrangendo valores do VTEC calculados no período de 30 minutos antes e 30 minutos após cada hora cheia), compondo, assim, um total de 24 arquivos por dia, que podem ser usados para a geração de mapas do VTEC para uma determinada região.

4.2 Resultados – Mapas do VTEC para o Brasil

Os mapas regionais da ionosfera para o Brasil foram produzidos de modo a mostrar as variações do VTEC durante o período de 24 horas, bem como o comportamento sazonal, abrangendo as quatro estações do ano. Os mapas foram elaborados a cada duas horas UT, para os dias 01/07/2001 (inverno), 06/10/2001 (primavera), 06/01/2002 (verão) e 01/04/2002 (outono). Para a obtenção do conjunto de valores do VTEC para cada hora foram processados os dados das estações GPS da RBMC no programa MAPATEC. Também, para uma melhor representação do VTEC em regiões fora do Brasil e que aparecem nos mapas, foram utilizados no processamento os dados referentes a 4 estações da rede IGS da América do Sul: UNSA (24,7°S; 65,4°W), CORD (31,5°S; 64,5°W), AREQ (16,5°S; 71,5°W) e KOUR (5,2°N; 52,8°W). A observável utilizada foi a pseudodistância filtrada pela fase. Foram rejeitadas no cálculo do VTEC as observáveis originais coletadas com ângulo de elevação menor do que 20°, visando minimizar os efeitos de multicaminho. A altura da camada ionosférica, presente na função de mapeamento, foi adotada como sendo de 400 km, altura próxima ao pico na densidade de elétrons. A metodologia para a obtenção do VTEC a partir das observáveis GPS foi descrita na seção 3.

Os mapas foram gerados utilizando os dados disponibilizados pelo programa MAPATEC (latitude, longitude e VTEC). Os mapas obtidos para os quatro dias utilizados nos experimentos são apresentados nas figuras 6, 7, 8 e 9. Eles estão apresentados a cada duas horas, iniciando-se a 1 hora UT.

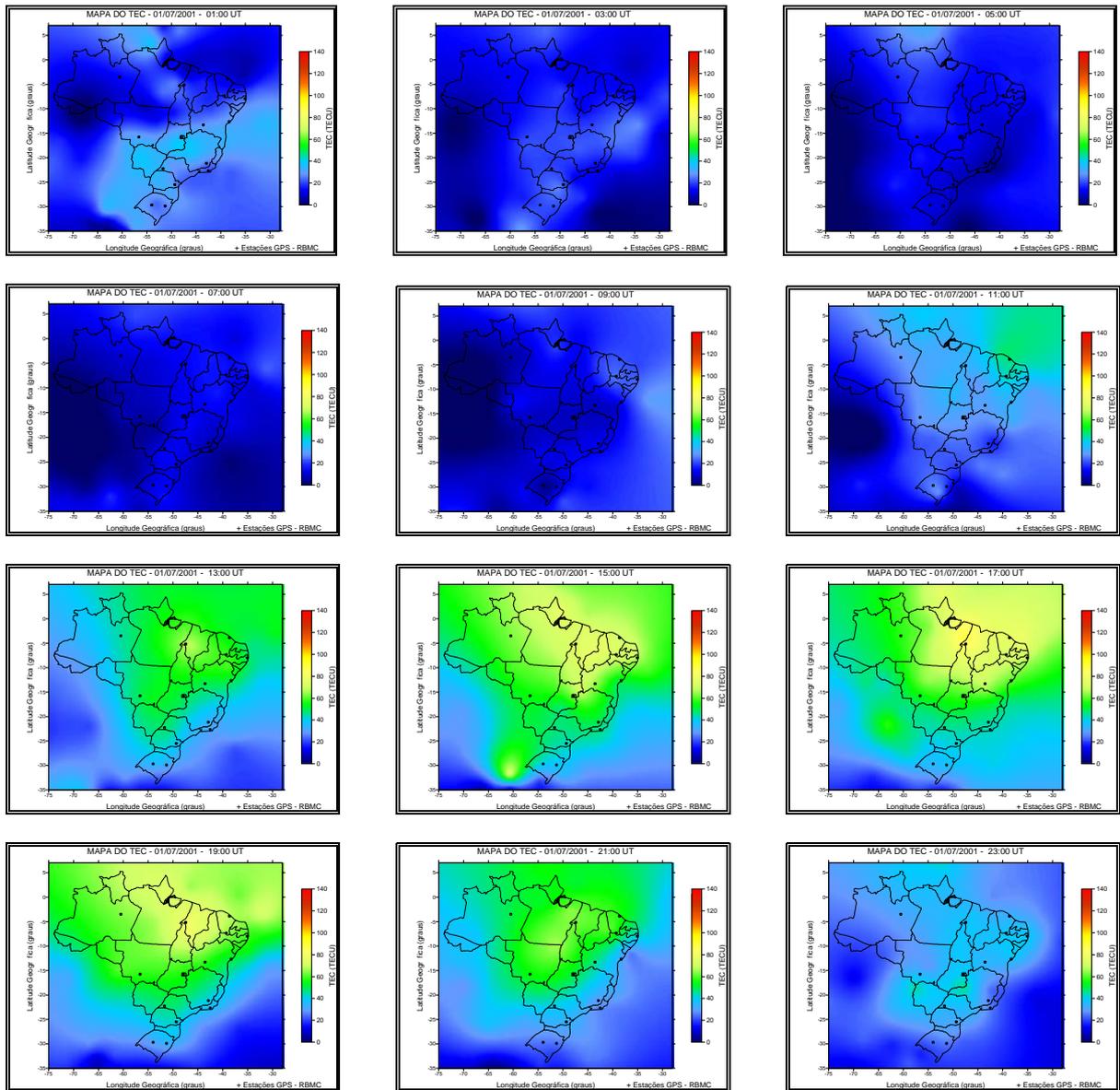
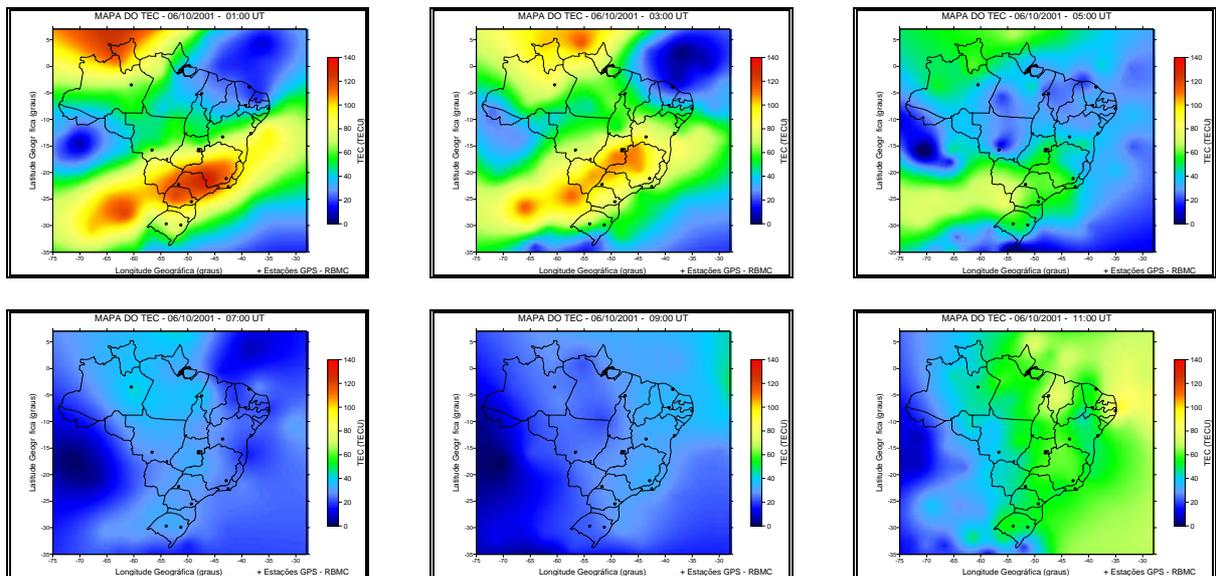


Fig. 6 – Mapas do VTEC para o Brasil – 01/07/2001 (INVERNO)



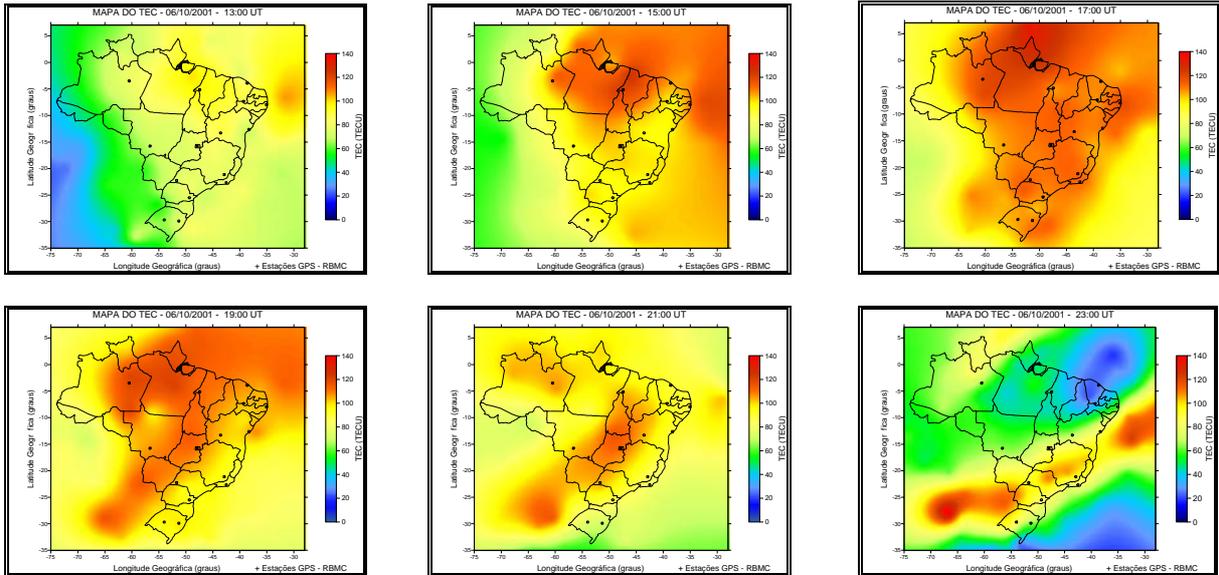


Fig. 7 – Mapas do VTEC para o Brasil – 06/10/2001 (PRIMAVERA)

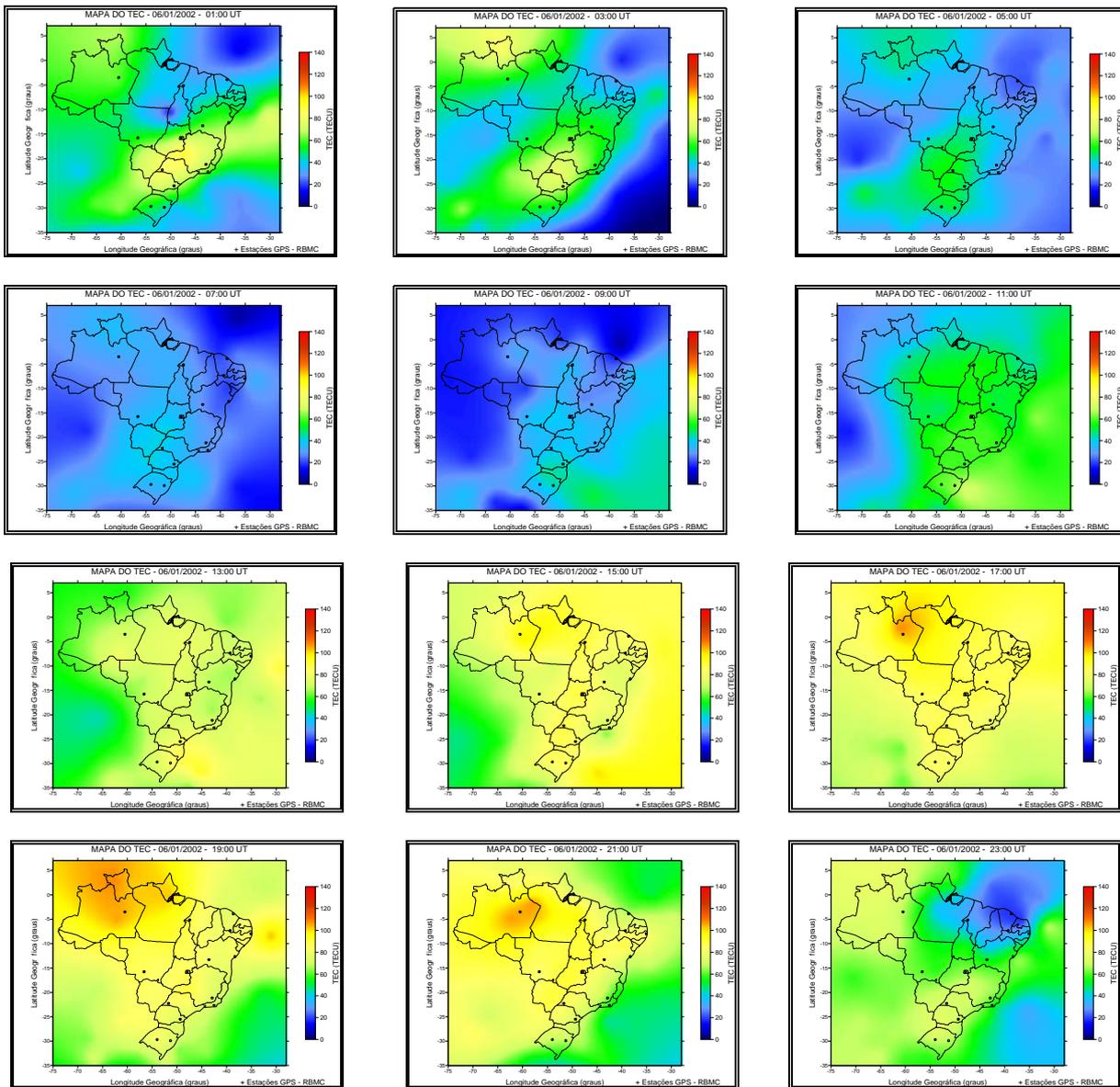


Fig. 8 – Mapas do VTEC para o Brasil – 06/01/2002 (VERÃO)

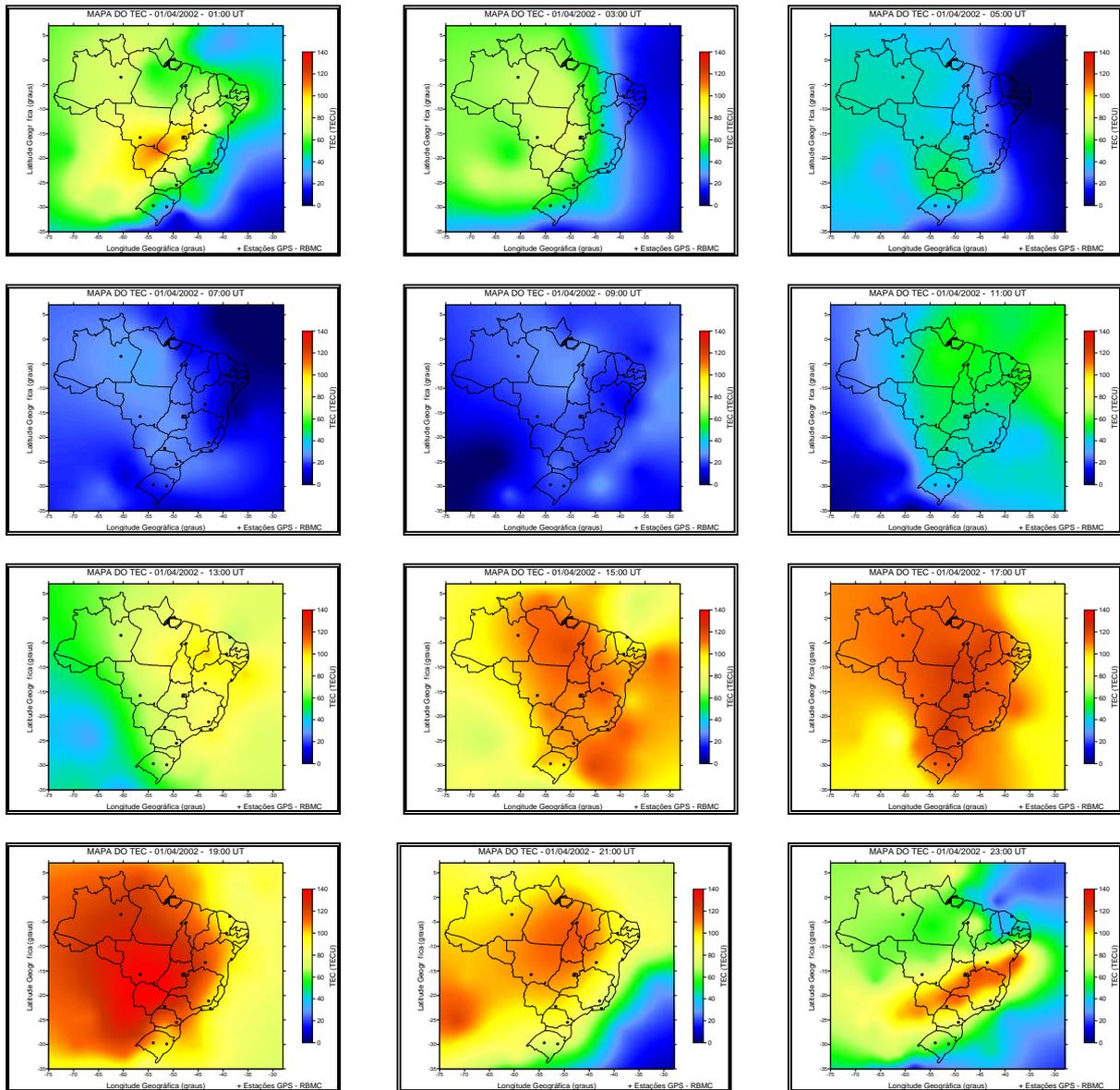


Fig. 9 – Mapas do VTEC para o Brasil – 01/04/2002 (OUTONO)

4.3 Análise dos Resultados

Analisando os mapas presentes nas figuras 6 a 9 pode-se verificar o comportamento do VTEC para a região brasileira. Para as 4 estações do ano, verifica-se que o VTEC atinge o valor mínimo próximo às 7-8 horas UT (4-5 horas local) e o seu valor máximo próximo às 17-19 horas UT (14-16 horas local).

Nos mapas do dia referente a julho (inverno) (figura 6), caracterizado por baixos valores do VTEC, observa-se durante o dia valores um pouco maiores nas regiões mais próximas ao equador.

Observa-se que os mapas do dia referente a outubro (figura 7) apresentaram as maiores variações espaciais do VTEC, principalmente na direção norte-sul, consequência da presença da anomalia equatorial. Neste dia a ocorrência da anomalia equatorial está bastante

presente nos mapas referentes às seguintes horas: 1, 3, e 23 horas UT (22, 24 e 20 horas local). A anomalia equatorial também é observada com menor intensidade nos dias referentes a abril e janeiro, sendo ainda que os valores das cristas da anomalia para o mês de abril são maiores do que janeiro.

Ainda, com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que os maiores valores do VTEC para a região brasileira ocorreram nos meses de outubro e abril (nos equinócios) e os menores nos meses de julho e janeiro (nos solstícios). Ainda, comparando os meses de maiores valores, pode-se concluir que no mês de abril ocorreram valores superiores em relação aos de outubro; em contrapartida uma maior variação espacial foi verificada no dia referente a outubro. Quanto aos meses de menores valores, pode-se verificar que em julho os valores foram bem menores do que em janeiro.

Vale salientar, que os valores do VTEC apresentados nos mapas estão com a influência do atraso instrumental interfrequência dos receptores. Porém, embora isto possa influenciar nos valores do VTEC, aparentemente não comprometeu o comportamento da variação do VTEC durante o dia e com relação às estações do ano, pois, os resultados se mostraram bastantes coerentes com a teoria sobre o assunto e, além disso, os experimentos não tinham como objetivo estimar valores altamente precisos do TEC, e sim ter uma visualização da variação do TEC para toda a extensão brasileira. Porém, uma estratégia para minimizar este efeito é estimar os atrasos instrumentais para cada receptor da RBMC utilizando o programa Mod_Ion desenvolvido na FCT/UNESP (CAMARGO, 1999). A metodologia empregada é bastante parecida com diversos trabalhos encontrados na literatura (como por ex.: Komjathy, 1997; Kee e Yun, 1998; Sardón et al., 1994) e, também, com a estratégia adotada pelo CODE.

5. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se a metodologia empregada para o cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência, visando à produção de mapas do TEC para a região brasileira. Nos experimentos realizados foram elaborados mapas do TEC para os dias 01/07/2001 (inverno), 06/10/2001 (primavera), 06/01/2002 (verão) e 01/04/2002 (outono) usando os dados GPS das estações da RBMC e do IGS. Estes dias pertencem a um período de intensa atividade solar do Ciclo Solar 23, e foram escolhidos de tal forma que abrangessem as quatro estações do ano, verificando desta forma, além da variação diária, também a variação sazonal.

Os mapas obtidos mostraram que para as quatro estações do ano o TEC atinge o valor mínimo próximo às 7-8 horas UT (4-5 horas local) e o seu valor máximo próximo às 17-19 horas UT (14-16 horas local). Além do comportamento diário, com a produção dos mapas pode-se verificar o comportamento sazonal da ionosfera, com valores maiores nos meses de equinócio (outubro e abril) e menores nos de solstícios (janeiro e julho).

Os mapas do dia referente a outubro apresentaram as maiores variações espaciais do TEC, principalmente na direção norte-sul, consequência da presença da anomalia equatorial que também pôde ser observada com menor intensidade nos meses de janeiro e abril. A presença da anomalia equatorial pode comprometer o desempenho do posicionamento relativo e DGPS devido à variação espacial do TEC, e consequentemente, do erro devido à ionosfera.

Os mapas produzidos nos experimentos utilizaram dados do TEC calculados com receptores GPS de dupla frequência. Em trabalhos futuros pretende-se, após a conclusão do projeto proposto por Camargo (2004), tornar-se rotina a produção de mapas da ionosfera, bem como disponibilizar os dados no formato IONEX. Outro trabalho a ser realizado visará analisar o

decréscimo do TEC, e conseqüentemente do erro da ionosfera nas observáveis GPS, nos dias atuais, pois, o ciclo Solar 23 está num período de redução do número de manchas solares e, portanto, da atividade solar e ionosférica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES (bolsa de Doutorado) e o IBGE pelo fornecimento dos dados GPS da RBMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): a caminho da implementação em tempo real**. Projeto de dissertação de Mestrado. 2003. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

AGUIAR, C.R.; CAMARGO, P.O.; MATSUOKA, M.T.; DAL POZ, W.R. Determinação do erro sistemático devido à ionosfera: avaliação da performance do Mod_Ion e do modelo de Klobuchar. In: **Mitshita, E.A. ed. Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba: Imprensa Universitária. 2003. 495p. Vol.3, p.119-132.

CAMARGO, P. O. **Produção de mapas da ionosfera utilizando dados GPS da RBMC**. Projeto de Pesquisa Trienal. 2004. Departamento de Cartografia, 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.; MONICO, J.F.G.; FERREIRA, L.D.D.. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. **Earth, Planets and Space**, Japão, v.52, n.11, p.1083-1089, 2000.

CAMARGO, P.O.; MONICO, J.F.G.; MATSUOKA M.T.; Analysis of the ionosphere regional model (Mod_Ion) during the period of maximum solar activity: a case study in Brazil. In: **14TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation - ION GPS-2001** – CD-ROM, Salt Lake City, Utha, 11-14 September, 2001.

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

- em Ciências Geodésicas.** Curitiba: Imprensa Universitária. 2002. 395p. Vol.2, p.80-99.
- COCO, D.S., COKER, C., DAHLKE, S.R., CLYNCH, J.R.. Variability of GPS satellite differential group delay biases. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.27, n.6, p.931-938, Nov. 1991.
- DAL POZ, W.R.. **Análise do Modelo regional da ionosfera (Mod_Ion) no período de máxima atividade solar e produção de mapa da ionosfera.** Relatório de Iniciação Científica Fapesp - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.
- DAVIES, K.. **Ionospheric Radio.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- EL GIZAWY, M.L.. **Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users.** 2003. 161p. Msc thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- FEDRIZZI, M.; LANGLEY, R.B.; KOMJATHY, A.; SANTOS, M.C.; PAULA, E.R.; KANTOR, I.J.. The low-latitude ionosphere: monitoring its behaviour with GPS. In: **14TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-2001** – CD-ROM, Salt Lake City, Utha, 11-14 September, 2001.
- 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.
- GOAD, C. C.. Optimal filtering of pseudoranges and phases from single-frequency GPS receivers. **Journal of The Institute of Navigation**, v.37, n.3, p.249-262, Fall/1990.
- HATCH, R.. The synergism of GPS code and carrier measurements. In: **Proceedings of the Third International Symposium on Satellite Doppler Positioning**, Las Cruces, New Mexico, Feb. 8-12, 1982, v.2, p.1213-1231.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. **Global Positioning System Theory and Practice.** 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística): <<http://www.ibge.gov.br/home/geografia/cartogramas/rbmc.html>>. Acesso em maio/2004.
- JAKOWSKI, N. TEC monitoring by using satellite positioning systems. In: **Kohl, H.; Ruster, R.; Schlegel, K. ed. Modern ionospheric science.** Katlenburg-Lindau, European Geophysical Society, 1996. p. 371-390.
- JIN, XX.. Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results. Delft, 1996. PhD Thesis – Delft University of Technology.
- KEE, C.; YUN, D.. Development of real-time SNUDGPS via ionospheric and tropospheric corrections. In: **Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation - ION GPS-98** - CD-ROM, Nashville, Tennessee, Sept. 15-18, 1998.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H.. **Introdução à geofísica espacial.** São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.
- KOMJATHY, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System.** 1997. 248p. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
- 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
- LANYI, G.E.; ROTH, T.. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. **Radio Science**, v.23, n.4, p.483-492, July/Aug. 1988.
- LEICK, A.. **GPS satellite surveying.** 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- 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.. Evaluation of Functions for Modelling of the Effect of the Ionospheric Refraction in the Propagation of the GPS

- Signals. In: **16TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS/GNSS-2003** – CD-ROM, Portland, Oregon, 09-12 September, 2003.
- McNAMARA, L.F.. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- MORAIS, T. N., OLIVEIRA, A. B. V., WALTER, F.: Global Behavior of the Equatorial Anomaly since 1999 and Effects on GPS Signals. In: **11th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems**, Saint Petersburg, Russia, p. 196-203, May, 2004.
- OLIVEIRA, A. B. V., MORAIS, T. N., WALTER, F.: Effects of Equatorial Anomaly in the GPS Signals. In: **16TH International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS/GNSS-2003** – CD-ROM, Portland, Oregon, 09-12 September, 2003.
- OLIVEIRA, A. B. V., MORAIS, T. N., WALTER, F.: Ferramentas para o Desenvolvimento de Mapas Globais para o Estudo do VTEC da Ionosfera. In: **IX Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação do ITA – IX ENCITA**, São José dos Campos, São Paulo, 07 a 09 de out., 2003.
- OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial**. 2003. 167p. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- 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.
- SARDÓN, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N.. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observation. **Radio Science**, v.29, p.577-586, May/June, 1994.
- SARDÓN, E.; ZARRAOA, N.. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases. **Radio Science**, v.32, p.1899-1910, Sept./Oct., 1997.
- SEEBER, Gunter. **Satellite Geodesy : Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1993. 531p.
- SKONE, S. **Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region**. 1998. 198p. Ph.D thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20123, The University of Calgary, Canada.
- SKONE, S. GPS Receiver Tracking Performance Under Ionospheric Scintillation Conditions. In: **IGS Network Workshop**, Soria Moria, Oslo, Norway, 12-14 July, 2000.
- TEUNISSEN, P.J.. The GPS phase-adjusted pseudo-range. In: **Proceedings of the Second International Workshop on High Precision Navigation**, Stuttgart, Freudenstadt, Nov., 1991, p115-125.
- 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, Canada.
- WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLOU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANICEK, P.. **Guide to GPS positioning**. Fredericton: Canadian GPS Associates, 1986.
- WILSON, B.D.; MANUCCI, A.J.. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data. **International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute de Navigation - ION GPS-1993** – Salt Lake City, Utha, 22-24 September, 1993.

Recebido em 02 de maio de 2004 – Aceito para publicação em 04 de outubro de 2004.