

EFEITOS DA IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS E NO POSICIONAMENTO POR PONTO NA REGIÃO BRASILEIRA: Revisão e Síntese das Investigações Realizadas

Marcelo Tomio Matsuoka¹, Paulo de Oliveira Camargo²

¹ Laboratório de Pesquisas em Geodésia (LAGEO), Instituto de Geociências, Departamento de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. {tomio.matsuoka@ufrgs.br}

² Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP. {paulo@fct.unesp.br}

RESUMO: Em especial na região brasileira e em períodos de alta atividade solar a ionosfera é uma das principais fontes de erro no posicionamento com GPS, afetando principalmente os usuários de receptores de uma frequência. O erro devido à ionosfera nas observáveis GPS é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons) presente na trajetória do sinal entre o satélite e a antena receptora. No Brasil estão presentes altos valores de TEC e alta variação temporal e espacial, o que faz com que o estudo de seu comportamento seja de suma importância para o entendimento de seus efeitos no posicionamento. Além disso, é comum no Brasil a ocorrência de irregularidades ionosféricas que afetam o rastreamento dos sinais GPS, podendo causar até perdas do sinal. Diversos estudos nessa linha têm sido realizados pelos autores nos últimos anos. Neste capítulo são apresentadas uma revisão sobre os efeitos da ionosfera e uma síntese dos resultados de pesquisas referentes ao estudo do comportamento do TEC na região brasileira e dos efeitos no posicionamento por ponto em um local de forte influência da ionosfera brasileira.

Palavras chaves: GPS, Ionosfera, Posicionamento.

1. INTRODUÇÃO

No posicionamento com GPS (*Global Positioning System*) diversas fontes de erros estão envolvidas, sendo que uma das principais é a ionosfera. A ionosfera é a camada da atmosfera terrestre compreendida entre 50 km e 1000 km de altitude, aproximadamente, onde existe a presença de elétrons livres em quantidade suficiente para afetar a propagação de ondas de rádios (DAVIES, 1990).

O erro devido à ionosfera nas observáveis GPS é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons livres (TEC – *Total Electron Content*) presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal (SEEBER, 2003). O TEC, e consequentemente o erro devido à ionosfera, varia no tempo e no espaço principalmente com relação à variação da radiação solar e do campo magnético da Terra (CAMARGO, 1999). Deve-se enfatizar que o Brasil é uma das regiões do globo terrestre que possuem os maiores valores e variações do TEC (KOMJATHY et al., 2003), e desta forma, a ionosfera é especialmente uma importante fonte de erro no posicionamento com GPS nesta região.

Neste capítulo são apresentados uma revisão

sobre os efeitos da ionosfera nas observáveis GPS e uma síntese dos resultados relacionados aos efeitos no posicionamento por ponto.

2. ERRO DEVIDO À IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS

2.1 Índice de Refração

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende de sua frequência. Os principais efeitos deste meio anisotrópico sobre os sinais GPS são o atraso de grupo na modulação e o avanço na fase da onda portadora.

O índice de refração da fase (n_f) na ionosfera pode ser expressa pela complexa fórmula de Appleton-Hartree (DAVIES, 1990):

$$n_f^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

onde:

$$X = n_e e^2 / \epsilon_0 m \omega^2 = f_n^2 / f^2 ;$$

$$Y_L = e B_L / m \omega = f_H \cos \theta / f ;$$

$$Y_T = e B_T / m \omega = f_H \sin \theta / f ;$$

$$Z = \nu / \omega ;$$

$$\omega = 2\pi f ;$$

f - frequência da onda;

f_H - girofrequência;

f_n - frequência de plasma;

n_e - densidade de elétrons (el/m^3);

e - carga do elétron = $-1,602 \times 10^{-19}$ Coloumb;

ϵ_0 - permissividade do espaço livre = $8,854 \times 10^{-12}$

Farads/m;

θ - ângulo entre a direção da onda e o campo magnético da Terra;

m - massa do elétron = $9,107 \times 10^{-31}$ kg;

ν - frequência de colisão; e

B - Campo geomagnético;

A equação (1) pode ser simplificada levando-se em conta somente o efeito de primeira ordem da ionosfera. Considerando que a girofrequência (f_H) tem um valor típico de 1,5 MHz e a frequência de colisão (ν) é da ordem de 10^4 Hz (KLOBUCHAR, 1996), e portanto possuem valores muito menores do que as frequências dos sinais GPS (ou seja, $f \gg f_H$ e ν), os termos Y_T , Y_L e Z da equação (1) podem ser ignorados (FEDRIZZI, 2003). Neste sentido, o índice de refração da fase (n_f) pode ser aproximado por:

$$n_f = \sqrt{1 - X} \quad (2)$$

Como visto anteriormente, o termo X pode ser reescrito na forma, $X = n_e e^2 / \epsilon_0 m \omega^2 = f_n^2 / f^2$. Considerando que a frequência de plasma na ionosfera raramente excede 20 MHz (KLOBUCHAR, 1996) e, portanto, $f \gg f_n$, é possível efetuar a seguinte expansão em série binomial (FEDRIZZI, 2003):

$$n_f = \sqrt{1 - X} = 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{n_e e^2}{2\epsilon_0 m \omega^2} = 1 - \frac{n_e e^2}{2\epsilon_0 m (2\pi)^2 f^2} \quad (3)$$

Com a substituição dos valores das constantes “e”, “m” e “ ϵ_0 ” na equação (3), o índice de refração da fase pode ser aproximado por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3 n_e}{f^2} \quad (4)$$

Desta forma, pode-se observar que o índice de refração da fase depende principalmente da densidade

de elétrons (n_e) e da frequência (f) da onda eletromagnética.

Uma expressão correspondente para o índice de refração de grupo (n_g) pode ser derivada a partir da equação de Rayleigh modificada (DAVIES, 1990; LEICK, 1995):

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} = \left(1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}\right) + \left(\frac{80,6 f n_e}{f^3}\right) \quad (5)$$

$$n_g = 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2} .$$

Pelas equações (4) e (5) pode-se notar que o índice de refração do grupo é sempre maior que o índice de refração da fase. Isto faz com que, na propagação dos sinais GPS, ocorra uma redução na velocidade de grupo e um avanço na da fase, provocando um aumento nas distâncias medidas a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade, respectivamente.

2.2 Erro devido à Ionosfera

A distância (S) entre o satélite (s) e a antena receptora (r), considerando apenas o erro devido à ionosfera, é definida por (LEICK, 1995):

$$S = \int_r^s n \, ds, \quad (6)$$

onde n representa, de forma genérica, o índice de refração da fase ou do grupo. A distância medida (S) é influenciada pelo índice de refração da ionosfera, e a integral é estendida ao longo do caminho do sinal. A distância geométrica (ρ) entre o satélite e a antena receptora é obtida quando o índice de refração (n) é unitário, logo:

$$\rho = \int_r^s ds \quad (7)$$

A diferença entre a distância medida (S), com a influência da ionosfera, e a distância geométrica (ρ), entre o satélite e a antena receptora, resulta no erro devido à ionosfera (I_r^s), que é dado por:

$$I_r^s = \int_r^s n \, ds - \int_r^s ds. \quad (8)$$

Substituindo os índices de refração da fase (4) e do grupo (5) na equação (8), obtém-se o erro devido à ionosfera para a distância medida pela fase da portadora ($I_{f_r}^s$) e pelo código ($I_{g_r}^s$), respectivamente. Desta forma, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_{f_r}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}\right) ds - \rho, \quad (9)$$

ou

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (10)$$

e, para o código, tem-se que:

$$I_{g_r}^s = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2}\right) ds - \rho \quad (11)$$

ou

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e ds, \quad (12)$$

onde a parcela variável ($\int_r^s n_e ds$) caracteriza a quantidade de elétrons ao longo do caminho do sinal, entre o satélite e a antena receptora em uma coluna de 1 m², que por sua vez representa o conteúdo total de elétrons (TEC), ou seja (LEICK, 1995):

$$TEC = \int_r^s n_e ds. \quad (13)$$

Substituindo a equação (13) nas equações (10) e (12), obtém-se o erro devido à ionosfera na distância medida pela fase da portadora e pelo código, em função do TEC e da frequência:

$$I_{f_r}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC, \quad (14)$$

$$I_{g_r}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (15)$$

O TEC é dado em elétrons por metro quadrado (el/m²), a frequência em Hertz (Hz) e a constante 40,3 é dada em Hz²(el/m²)⁻¹m, resultando no erro devido à ionosfera ($I_{f_r}^s$ e $I_{g_r}^s$) expresso em metros (m). O erro devido à ionosfera relacionado com o código ($I_{g_r}^s$) é usualmente denominado de atraso ionosférico ou atraso de grupo. De acordo com as equações (14) e (15), percebe-se que o erro devido à ionosfera, seja ele incidente sobre a fase da portadora ou para o código (pseudodistância), é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera e quanto maior o valor de TEC maior será o erro devido à ionosfera.

Devido à aproximação efetuada no índice de refração, a correção do erro devido à ionosfera, calculada pelas expressões (14) e (15), representa somente o efeito de 1º ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. O erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 2003). Aos interessados em verificar uma descrição dos efeitos de segunda e

terceira ordem da ionosfera, podem consultar Marques (2008).

A tabela 1 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as medidas de distâncias advindas das portadoras L₁, L₂ (do GPS) e para a combinação linear *ion-free* (L₀), considerando os efeitos de 1º, 2º e 3º ordem da ionosfera (SEEBER, 2003). Para direções inclinadas, ou seja, para medidas advindas de satélites deslocando-se do zênite para o horizonte, o erro devido à ionosfera aumentará em até 3 vezes, aproximadamente.

TABELA 1 – MÁXIMO ERRO DEVIDO À IONOSFERA QUE PODE SER ESPERADO PARA MEDIDAS DE DISTÂNCIAS NA DIREÇÃO VERTICAL.

Frequência	1ª ordem	2ª ordem	3ª ordem
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 (2003).

Considerando as estimativas presentes na tabela 1, pode-se verificar que a soma dos erros devido à ionosfera de 2º e 3º ordem representa apenas 0,12% e 0,15% do erro de 1º ordem para L₁ e L₂, respectivamente, e para combinação linear L₀ o erro remanescente representa 3,2 cm.

Como foi verificado nas equações (14) e (15) o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS depende diretamente do TEC. Desta forma é de suma importância o entendimento do comportamento do TEC na região de interesse. Este assunto será tratado na próxima seção com especial atenção à região brasileira.

3. COMPORTAMENTO DO TEC

As variações temporais regulares do TEC compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos. 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 de latitudes baixas um segundo pico ocorre nas horas que precedem a meia noite, principalmente, em períodos próximos aos equinócios e verão e em períodos de alta atividade solar. A figura 1 exemplifica a variação do VTEC (*Vertical TEC*) em Cachoeira Paulista (CP) (22 °S; 45°W) e São Luiz (SL) (3°S; 44°W), que estão localizadas nas regiões geográficas da ionosfera de latitude baixa e equatorial, respectivamente (MATSUOKA, 2007). A unidade é TECU (TEC *Unit*), sendo 1 TECU = 10¹⁶ el/m² = 0,16 m de erro nas observáveis em L1.

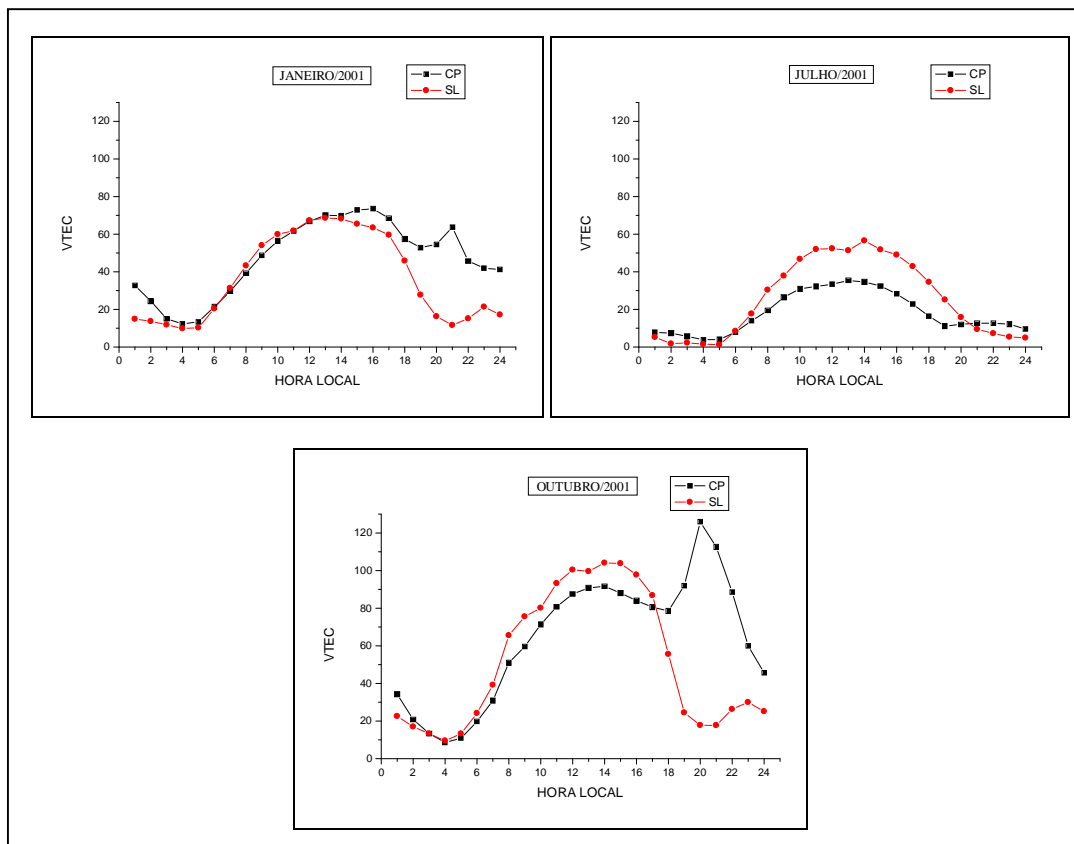


Fig. 1 – Exemplos da variação diária e sazonal do TEC na região brasileira (Cachoeira Paulista (CP) e São Luiz (SL)) em período de alta atividade solar. Fonte: Matsuoka (2007)

Pode-se observar na figura 1 a variação diária do TEC em CP e SL, com máximo no período da tarde, e um segundo máximo ocorrendo em CP no período após algumas horas do pôr do Sol (aproximadamente, às 21 Horas Local) observado nos gráficos dos meses de janeiro e outubro (Solstício de Verão e Equinócio). Esse segundo máximo corresponde ao período da formação da Anomalia Equatorial de Ionização (AEI) noturna (seção 4) sobre o território brasileiro, estando CP localizada dentro da região de altos valores de TEC dessa AEI.

As estações do ano também influenciam na variação da densidade de elétrons, devido à mudança do ângulo zenital do Sol, da intensidade do fluxo de ionização e do vento termosférico neutro, caracterizando as variações sazonais do TEC. Nos equinócios (principalmente) e solstício de verão, os valores TEC são maiores, enquanto que, no solstício de inverno, são menores (ver fig. 1). Um exemplo da variação sazonal e diária do TEC na região brasileira em período de alta atividade solar pode ser verificado em detalhes nos resultados de Matsuoka (2007, p. 136-159) e Matsuoka e Camargo (2004).

As variações de ciclos de longos períodos, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares, e o aumento de

ionização, ou seja, o aumento do TEC é proporcional ao número de manchas. A figura 2 mostra os valores dos números de manchas solares desde 1750 até os dias atuais.

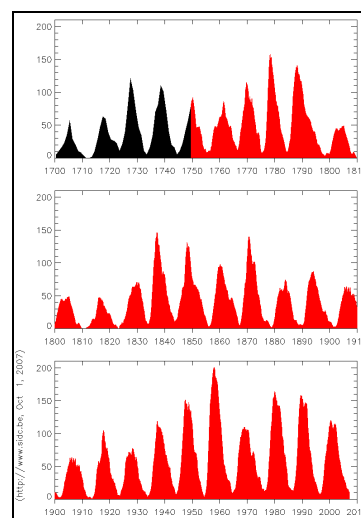


Fig. 2 – Número de manchas solares – Ciclos solares
Fonte : <http://sidc.oma.be/html/wolfam1.html> - acesso em 10/2007

Atualmente, o Sol está em um período de mínima ocorrência de manchas solares, e o último período de máxima compreendeu os anos de 2000 e 2001, durante os quais ocorreu um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na camada ionosférica. A figura 3 mostra o número de manchas solares dos últimos anos.

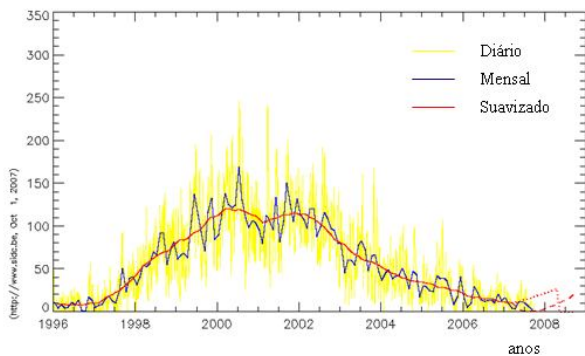


Fig. 3 – Número de manchas solares – ciclo 23

Segundo previsão de NCAR (2006) o próximo pico de ocorrência de manchas solares será de 30 a 50% maior do que o último pico. Este máximo solar deve ocorrer por volta de 2012.

Para se ter uma idéia da dependência do TEC com relação ao ciclo de manchas solares, a figura 4 apresenta uma série temporal de valores de VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical) médio global fornecidos pelo CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*).

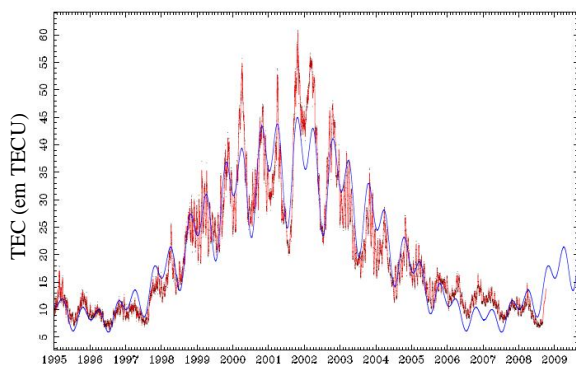


Fig. 4 – Série temporal de valores globais médios de VTEC. fonte:

<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/meantec.pdf>

Como exemplo na região brasileira a figura 4 apresenta um estudo realizado por Aguiar et al. (2007) onde se determinou os valores de VTEC para a estação UEPP/PPTE da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) localizada em Presidente Prudente, SP, para os anos 2000 e 2001 (alta atividade solar) e 2005 e 2006 (baixa atividade solar). Pode-se observar a redução do VTEC nos anos de 2005 e 2006, em concordância com o ciclo de manchas solares.

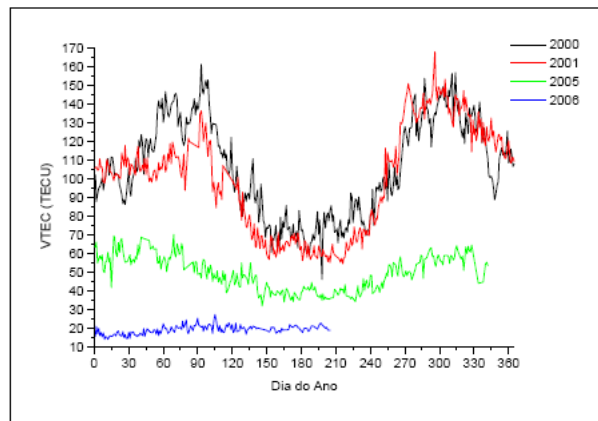


Fig. 5 – Valores de VTEC – Estação UEPP/PPTE
Fonte: Aguiar et al. (2007).

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, a densidade de elétrons na ionosfera. As regiões equatoriais e de latitudes baixas (que abrange o Brasil) são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons, bem como, apresentam uma alta variação espacial. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, apresentando um comportamento mais regular, próximo ao descrito por modelos teóricos. A ionosfera sobre os pólos sul e norte, alternativamente, denominadas de ionosfera polar ou de altas latitudes, é extremamente instável (McNAMARA, 1991).

Mais detalhes sobre as variações regulares do TEC pode ser obtido, por exemplo, em McNamara (1991), Davies (1990), Camargo (1999) e Matsuoka (2007).

4. ANOMALIA EQUATORIAL

O principal fenômeno da ionosfera equatorial e de latitudes baixas é a Anomalia Equatorial de Ionização, também conhecida por Anomalia de Appleton (APPLETON, 1946).

Antes de descrever a anomalia equatorial, torna-se necessário definir o efeito fonte, pois este dá origem a anomalia equatorial. Devido à alta radiação solar na região equatorial e aos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre sensíveis conseqüências, sendo uma delas denominada de efeito fonte, cuja origem é motivada pela movimentação dos elétrons ao longo das linhas de força horizontais do campo geomagnético para longe do equador.

Os campos elétricos do dínamo atmosférico que são gerados na região E são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a região F, devido à alta condutividade paralela (BATISTA, 2003). Durante o dia o campo elétrico (E) é direcionado para

leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético (B) que é dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por $E \times B/B^2$ (BATISTA, 2003). 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 (\vec{g}) e gradiente de pressão (∇p). Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até latitudes baixas é conhecido como Efeito Fonte (RODRIGUES, 2003). Este nome foi dado devido à similaridade com o movimento de uma fonte (chafariz) de água. Um esquema das forças agindo no plasma é mostrado na figura 6.

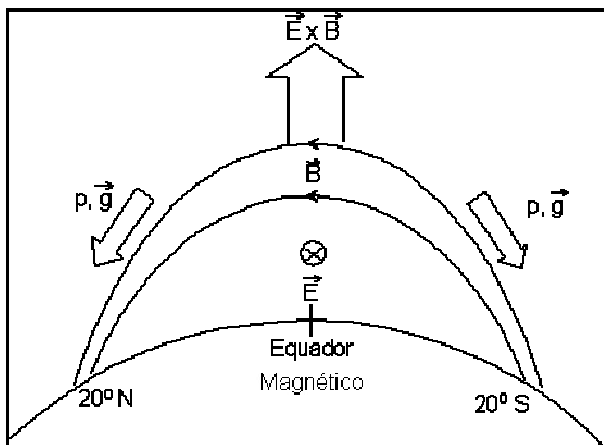


Fig. 6 – Esquema das forças agindo no plasma - efeito fonte. Fonte: Kelley (1989) apud Rodrigues (2003)

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10° e 20° de latitude geomagnética. Nas regiões próximas ao equador geomagnético a densidade de elétrons fica menos intensa (BATISTA, 2003), resultando em altos gradientes de TEC na direção norte-sul. Tal distribuição latitudinal é denominada de anomalia equatorial ou anomalia de Appleton (APPLETON, 1946). Como resultado para o posicionamento com GPS é que altos valores de TEC estão presentes nas regiões de latitudes baixas, e altos gradientes de TEC podem ocorrer na direção norte-sul, afetando a qualidade tanto do posicionamento por ponto quanto do relativo e DGPS (MATSUOKA, 2007).

A figura 7 apresenta um mapa de VTEC para outubro de 2001 no qual se pode verificar a formação da anomalia equatorial no Brasil.

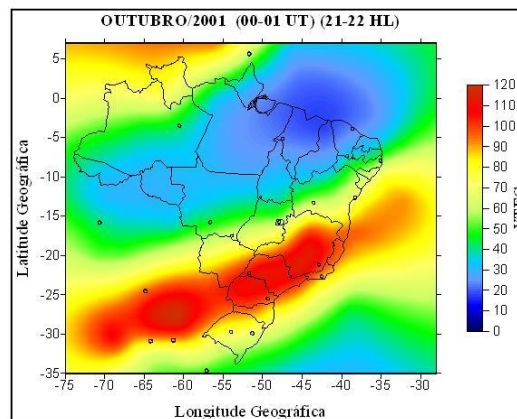


Fig. 6 – Mapa de VTEC (outubro/2001) – Anomalia Equatorial. Fonte: Matsuoka (2007).

A anomalia equatorial varia ao longo do dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta das 14 horas local, e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia noite, normalmente próximo das 21 horas local. Este segundo máximo, em geral, não ocorre durante períodos de baixa atividade solar (BATISTA, 2003).

No primeiro pico da anomalia equatorial que ocorre durante o período da tarde, a variação latitudinal do VTEC é menor do que no horário noturno, pois, embora o efeito fonte desloque elétrons das regiões próximas ao equador para as regiões das cristas norte e sul da anomalia equatorial, devido à presença da radiação solar, elétrons livres continuam sendo produzidos na região equatorial pelo processo de fotoionização. Já no segundo pico da anomalia equatorial, a variação latitudinal do VTEC é bem mais destacada, pois, com o pôr do Sol é cessado a fotoionização, e então, devido ao efeito fonte, observam-se baixos valores de VTEC próximos ao equador geomagnético e altos valores nas regiões de crista da anomalia (região de latitudes baixas). Ou seja, a região equatorial perde elétrons pelo efeito fonte e não há mais produção de elétrons por fotoionização; em contrapartida a região de crista da anomalia equatorial recebe os elétrons devido ao efeito fonte, gerando alta variação latitudinal do VTEC (fig. 6).

Este comportamento da anomalia equatorial é um reflexo da variação do campo elétrico zonal e da deriva vertical do plasma produzida por ele. Como já citado, durante o dia, na região equatorial, o campo elétrico para leste na presença de um campo geomagnético para norte provoca uma deriva para cima, elevando o plasma e produzindo o efeito fonte. A deriva vertical passa por um máximo antes do meio dia local, continuando positiva (para cima) até pouco antes do entardecer. À noite o campo elétrico é dirigido para oeste e, conseqüentemente, a deriva se inverte para baixo (negativa), cessando o efeito fonte (BATISTA, 2003).

Porém, antes da deriva vertical se inverter, nos horários próximos ao pôr do Sol, ela se intensifica devido ao desenvolvimento de campos elétricos do

dínamo da região F, provocando assim uma intensificação do efeito fonte e da anomalia equatorial, gerando o segundo pico na densidade de elétrons nas regiões das cristas da anomalia. Este comportamento da deriva vertical equatorial do plasma ionosférico pode ser verificada na figura 8, que mostra a variação média da deriva vertical medida com o radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, no Peru, durante várias estações do ano, para condições geomagnéticas calmas e durante anos de atividade solar alta e baixa.

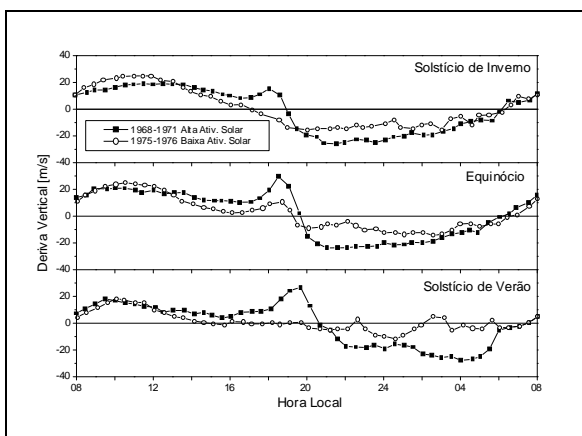


Fig. 8 - Variação sazonal da deriva vertical do plasma ionosférico medida em Jicamarca (derivadas positivas indica elevação do plasma) durante períodos de alta (1968-1971) e baixa (1975-1976) atividade solar. Fonte: adaptada de Fejer et al. (1979).

O pico que ocorre na deriva vertical próximo ao pôr do Sol, conhecido como pico pré-inversão, é fortemente dependente da atividade solar (BATISTA, 2003). Pode-se verificar na figura 8, referente ao estudo feito em Jicamarca no Peru, que durante períodos de atividade solar máxima o pico ocorre em todas as estações do ano, sendo maior no equinócio e menor no solstício de inverno. Já durante atividade solar baixa o pico pré-inversão só ocorre no equinócio, ainda tendo amplitude menor do que para alta atividade solar (FEJER et al., 1979). É importante salientar, que estudos realizados na região brasileira mostraram que o pico pré-inversão é um pouco maior nos meses próximos ao solstício de verão do que nos de equinócios, e menor nos próximos ao solstício de inverno (BATISTA et al., 1996).

A variação latitudinal do VTEC na região brasileira durante o segundo pico da anomalia equatorial é maior nos meses próximos ao equinócio (principalmente) e menores nos próximos ao solstício de inverno. A figura 9 mostra mapas de VTEC para outubro, fevereiro e julho de 2001 as 21-22 Horas Local (HL), mostrando as diferenças entre os meses do ano em relação à anomalia equatorial noturna. O ano de 2001 corresponde à um período de alta atividade solar. Em períodos de baixa atividade solar praticamente não se verifica a variação latitudinal noturna (pode-se, por exemplo, consultar resultados apresentados por Salomoni, 2008).

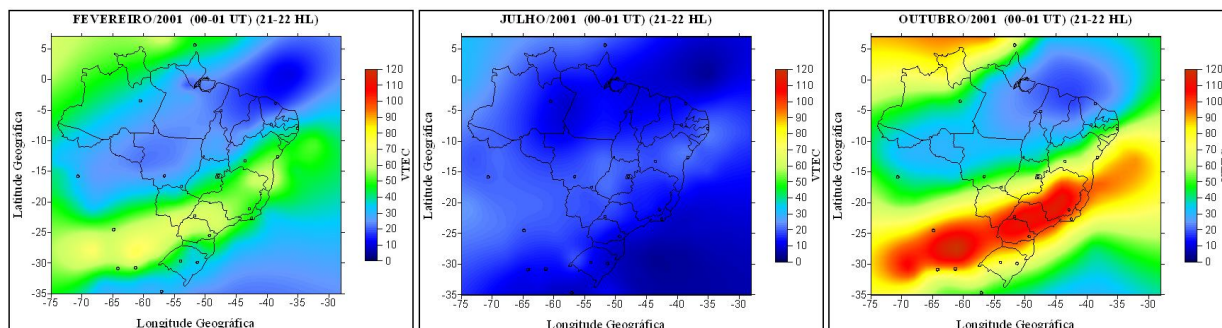


Fig. 9 – Mapas de VTEC – Fevereiro, Julho e Outubro de 2001 – 21-22 HL. Fonte: Matsuoka (2007)

5. IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS

As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico e se originam através de processos de instabilidades do plasma que ocorrem na ionosfera equatorial. A instabilidade dá origem às irregularidades na camada F da ionosfera com um amplo espectro de escalas de tamanho, variando desde alguns centímetros até centenas de quilômetros (RODRIGUES, 2003).

Irregularidades na ionosfera podem produzir variações de curtos períodos nos sinais trans-ionosféricos, provocadas por rápidas flutuações na fase e amplitude, devidas aos efeitos da difração e refração, que causam um enfraquecimento e variações da fase no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que

ocorra, em muitos casos, a perda do sinal. Essas rápidas flutuações em fase e amplitude do sinal são chamadas de cintilações (WEBSTER, 1993). Períodos de cintilação estão associados, geralmente, com a existência de regiões de irregularidades de pequena escala na densidade de elétrons na camada ionosférica (EL GIZAWY, 2003).

Cintilação ionosférica também pode ocorrer em regiões caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas. Essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação trans-ionosféricos e nos sinais GPS (SAHAI, et al., 2000).

As regiões de maior intensidade das cintilações correspondem às regiões de próximos ao pico (norte e sul) da anomalia equatorial, localizadas a aproximadamente 15° N e 15° S de latitude geomagnética, e desta forma um maior número de perdas de sinal é esperado para receptores próximos a estes locais. Na região equatorial e de latitudes baixas, o horário de maior ocorrência de cintilação ionosférica é no período de poucas horas após o pôr do Sol, até aproximadamente a meia noite local (às vezes até algumas horas da madrugada), principalmente nos meses de setembro a março. Além disso, com relação ao ciclo solar de 11 anos, a ocorrência é maior em períodos de alta atividade solar do que em de baixa (SKONE, et al., 2001).

Cintilação ionosférica também pode ocorrer em regiões caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas. Essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação trans-ionosféricos e nos sinais GPS (SAHAI, et al., 2000).

6. IONOSFERA E O POSICIONAMENTO POR PONTO

Utilizando receptor de dupla frequência pode-se eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, melhorando os resultados do posicionamento. Neste tópico será discutido apenas o posicionamento por ponto com dados GPS da portadora L1.

Resultados têm mostrado que no posicionamento por ponto o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS afeta principalmente a determinação em altitude geométrica. Desta forma, o comportamento da variação do erro cometido no posicionamento por ponto em altitude geométrica é altamente correlacionado com o comportamento do TEC na região. A figura 10 mostra valores mensais médios diários do EMQ (Erro Médio Quadrático) em altitude geométrica da estação UEPP da RBMC para o ano de 2001 (alta atividade solar), obtidos a partir da comparação entre a altitude geométrica conhecida e a estimada pelo posicionamento por ponto (somente utilizou-se como observável as pseudodistâncias-código C/A). Para fins de comparação, a figura 11 apresenta valores mensais médios diários de VTEC para a localidade da estação UEPP. Esses valores foram extraídos de mapas médios mensais de VTEC produzidos por Matsuoka (2007). É importante frisar que o posicionamento por ponto realizado utilizou efemérides precisas e correções precisas dos relógios dos satélites, modelo de Hopfield para o erro troposférico, e apenas foram consideradas determinações com GDOP maior do que 7.

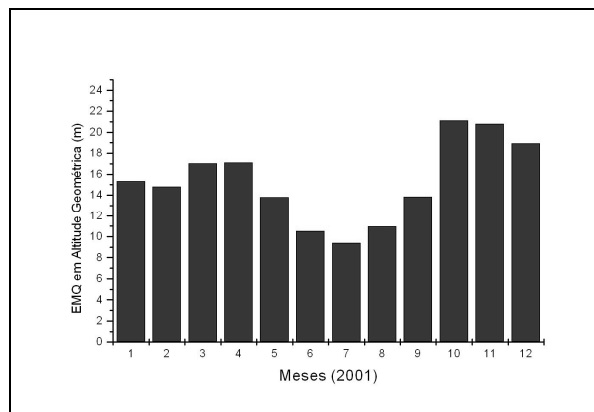


Fig. 10 – Médias mensais dos valores diários do EMQ em altitude geométrica – Posicionamento por ponto – 2001 - Estação UEPP.

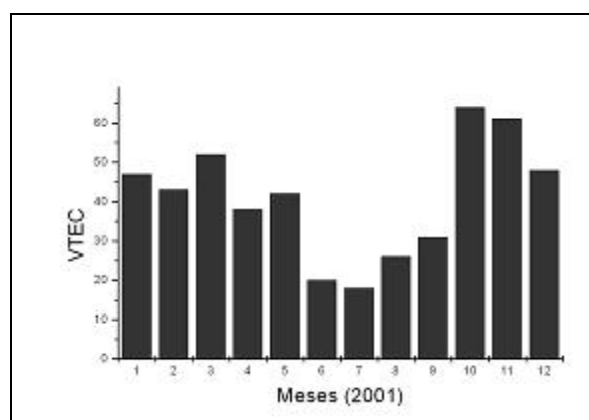


Fig. 11 – Médias mensais dos valores de VTEC para a posição da estação UEPP – ano 2001.

Menores valores de EMQ em altitude geométrica são observados nos meses de inverno, e maiores nos próximos aos equinócios e solstício de verão. A variação do EMQ em altitude geométrica mostra-se correlacionada ao comportamento do VTEC.

A figura 12 mostra os valores mensais médios do EMQ em planimetria com base nos resultados do posicionamento por ponto da estação UEPP com dados de 2001.

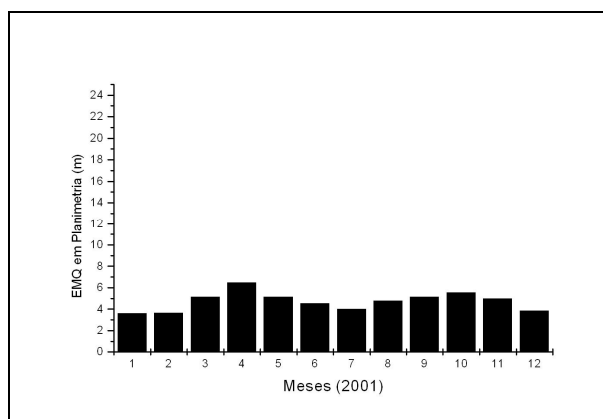


Fig. 13 – Médias mensais dos valores diários do EMQ em planimetria – Posicionamento por ponto – 2001 - Estação UEPP.

Pode-se verificar que o EMQ em planimetria apresenta valores bem menores do que para o EMQ em altitude geométrica, além de se mostrar menos correlacionado com o comportamento do VTEC. Isso se explica pelo fato de que a geometria dos satélites favorece a compensação no plano horizontal do erro devido à ionosfera que contaminam as observáveis, estando, portanto a posição planimétrica compensada de parte dos erros devido à ionosfera.

As investigações realizadas também mostraram que o posicionamento por ponto na região brasileira de latitudes baixas é muito afetado no período de ocorrência da anomalia equatorial noturna (MATSUOKA, 2007; MATSUOKA e CAMARGO, 2007). Inclusive, também se tem verificado que modelos da ionosfera aplicados na correção das observáveis GPS possuem limitações principalmente no período da anomalia equatorial noturna. Exemplificando, a figura 14 apresenta o comportamento diário para outubro de 2001 do erro em altitude geométrica para a estação UEPP (posicionamento por ponto – pseudodistância-C/A), onde dois tipos de estratégias de processamentos foram considerados: o primeiro usando dados sem correção do erro devido à ionosfera (SCI); e no segundo com dados aplicados a priori a correção da ionosfera utilizando o Modelo Global da Ionosfera do IGS (*International GNSS Service*) (CCI).

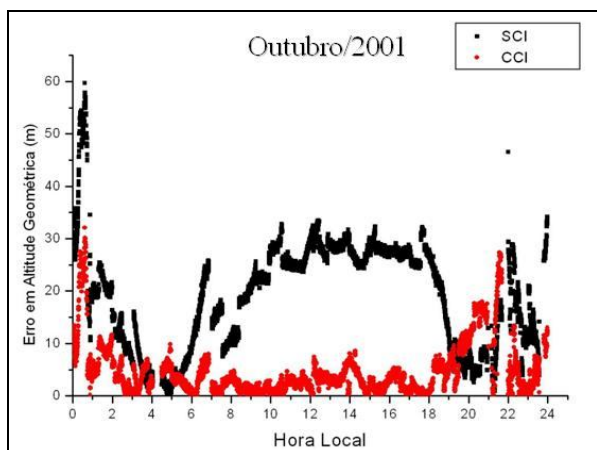


Figura 14 – Erro em altitude geométrica – Outubro/2001 Estação UEPP.

Pode-se verificar na figura 14 que o modelo da ionosfera tem uma maior eficiência durante o período do dia, quando a ionosfera se comporta de maneira mais regular, e pode-se perceber uma deficiência na correção no período após as 21 horas local, aproximadamente, persistindo até algumas horas da madrugada. Nesse mês sabe-se que nesse horário tem-se a presença da anomalia equatorial de ionização e a possível ocorrência de cintilação ionosférica.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ionosfera é uma das principais fontes de erro sistemático no posicionamento GPS, e o seu estudo é de extrema importância principalmente na região brasileira, que se encontra na região equatorial da ionosfera, onde altos valores e variações na densidade de elétrons livres são encontrados.

Neste capítulo apresentou-se uma revisão geral sobre os efeitos da ionosfera nas observáveis GPS e no posicionamento por ponto na região brasileira. Os resultados apresentados nesta oportunidade são advindos de dados coletados durante o último período de alta atividade solar, e com dias classificados como calmos, em termos de atividade geomagnética. Como destaque das análises efetuadas, evidenciou-se que um dos principais fatores limitantes no posicionamento é a Anomalia Equatorial de Ionização, principalmente em seu pico noturno, onde até mesmo a eficiência de modelos da ionosfera fica bastante limitada.

Outros estudos já foram realizados, quer seja com a participação de ambos, quer seja com a de pelo menos um dos atores desse capítulo. Citam-se, por exemplo: os efeitos de tempestades geomagnéticas e de explosões solares no posicionamento por ponto (MATSUOKA et al., 2006; MATSUOKA et al., 2008); estudo da melhora do posicionamento por ponto no período de baixa atividade solar (MATSUOKA e CAMARGO, 2007b); efeitos da ionosfera no posicionamento relativo (DAL POZ e CAMARGO, 2006; DAL POZ et al., 2008).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, C.R.; CAMARGO, P.O.; DAL POZ, W.R.. Comportamento do TEC na Região Brasileira de Baixa Latitude Usando Observáveis GPS. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007, Presidente Prudente. *Anais...*, 2007. v. 1. p. 635-639.
- APPLETON, E.V.. Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, 157, 691, 1946.
- BATISTA, I.S.. **Introdução à ionosfera e a propagação de ondas**. Notas de curso ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente/SP, 2003.
- BATISTA, I. S.; MEDEIROS, R.T.; ABDU, M.A.; SOUZA, J.R.; BAILEY, G.J.; PAULA, E.R.. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region, *Journal of Geophysical Research*, v.101, N0.A5, p.10,887-10,892, May, 1996.
- CAMARGO, P.O.. 1999. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- DAL POZ, W. R. ; CAMARGO, P. O. . Conseqüências de uma Tempestade Geomagnética no Posicionamento Relativo com Receptores GPS de Simples Freqüência. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, p. 275-294, 2006.
- DAL POZ, W.R.; CAMARGO, P.O.; AGUIAR, C.R.. Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, p. 35-54, 2008.
- DAVIES, K.. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 580p., 1990.
- EL GIZAWY, M.L.. 2003. **Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users**. 161p. Msc thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report n° 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- 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.
- FEJER, B.G.; FARLEY, D.T.; WOODMAN, R.F.; CALDERON, C.. Dependence of Equatorial F Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. **Journal of Geophysical Research**, v.84, n.A10, oct. 1979.
- KLOBUCHAR, J.A.. Ionospheric Effects on GPS (Chapter 12). In: Parkinson, B. W.; Spilker, J. J. ed. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington: AIAA, v.1, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).
- 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, 2003.
- LEICK, A.. **GPS satellite surveying**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 560p. 1995.
- MARQUES, H. A. **Influência da Ionosfera no Posicionamento GPS: Estimativa dos Resíduos no Contexto de Duplas Diferenças e Eliminação dos Efeitos de 2ª e 3ª Ordem**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla freqüência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.56/01, p.14-27, 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.. 2007. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente/SP.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Correção Ionosférica Utilizando os Mapas Globais do TEC do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, p. 253-270, 2007.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. Ciclo de Manchas Solares e o Posicionamento por Ponto com GPS. In: Souza, S.F.; Matsuoka, M.T.. (Org.). **Série em Geomática: II Seminário Anual de Pesquisas em Geodésia na UFRGS**. 1 ed. Porto Alegre/RS: Instituto de Geociências-UFRGS, v. 1, p. 01-08, 2007b.
- MATSUOKA, M T ; CAMARGO, P. O. ; BATISTA, Inez Staciariini . Posicionamento por GPS na região brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003. **Pesquisas em Geociências (UFRGS)**, 2008 (no prelo).
- McNAMARA, L.F.. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 237p., 1991.
- NCAR (National Center for Atmospheric Research) – on line – endereço eletrônico: <http://www.ucar.edu/news/releases/2006/sunspot.shtml>, acesso em outubro de 2006.
- 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.
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 15, 1337-1383, Oct. 2000.
- SEEBER, Gunter.. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 589p., 2003.
- 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.
- WEBSTER, I.. 1993. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. M.Sc.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.