

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA IONOSFERA E DO POSICIONAMENTO POR PONTO EM PERÍODOS DE ALTA E BAIXA ATIVIDADE SOLAR

Analysis and comparison of ionosphere behavior and point positioning in periods of high and low solar activity

CHRISTIANE SILVA SALOMONI¹
MARCELO TOMIO MATSUOKA¹
SÉRGIO FLORÊNCIO DE SOUZA¹
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO²

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

²Departamento de Cartografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista – Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil

christiane.silva.salomoni@gmail.com; tomiomatsuoka@gmail.com;
sergio.florencio@ufrgs.br; paulo@fct.unesp.br.

RESUMO

A ionosfera é uma das principais fontes de erro sistemático nas observáveis GPS. Como esse erro é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), a qualidade do posicionamento GPS, principalmente com receptores de uma frequência, pode ser significativamente afetada pelas variações regulares do TEC. O fator ionosfera é ainda mais relevante na região brasileira, onde fenômenos ionosféricos especiais, como a Anomalia Equatorial, intensificam essas variações. Considerando isso, neste trabalho foram realizados estudos para avaliar o comportamento diário e sazonal do TEC e do posicionamento por ponto com GPS (uma frequência) em períodos de alta e baixa atividade solar na região brasileira. Os resultados demonstraram uma relação direta entre a diminuição da densidade de elétrons na ionosfera (período de baixa atividade solar) e a melhora na qualidade do posicionamento, bem como uma grande influência da Anomalia Equatorial sobre os resultados do posicionamento por ponto.

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

ABSTRACT

The ionosphere is a major source of systematic error in the GPS observables. As this error is directly proportional to the TEC (Total Electron Content), the quality of GPS positioning (especially with single frequency receivers) can be significantly affected by regular changes of TEC. The ionosphere factor is even more relevant in the Brazilian region, where ionospheric phenomena, such as the Equatorial Anomaly, intensify these variations. Taking the above mentioned factors into account, experiments were conducted in this research to evaluate the daily and seasonal behavior of the TEC and the point positioning with GPS (single frequency) in periods of high and low solar activity in the Brazilian region. The results showed a direct correlation between the decrease in electrons density in the ionosphere (period of low solar activity) and improvement in positioning accuracy, as well as a large influence of Equatorial Anomaly on the results of point positioning.

Keywords: GPS Positioning; Ionosphere; TEC.

1. INTRODUÇÃO

A ionosfera é uma das principais fontes de erro sistemático nas observáveis GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global). Por ser um meio dispersivo, a ionosfera afeta a propagação de ondas eletromagnéticas fazendo com que a modulação e a fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites GPS sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995), o que, por sua vez, provoca um erro na distância medida entre o satélite e o receptor. Esse erro é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal e diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), ou seja, à densidade de elétrons livres presentes na ionosfera ao longo do caminho entre o satélite e a antena receptora. 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). Dessa forma, a atividade ionosférica é extremamente influenciada pelo comportamento da atividade solar.

O estudo da ionosfera é tradicionalmente realizado através de equipamentos como a ionossonda/digissonda, entre outros (KIRCHHOFF, 1991). No entanto, nos últimos dez anos, tem crescido o uso da tecnologia GPS como uma maneira alternativa de estudar a ionosfera, pois, aliando a propriedade dispersiva da ionosfera aos sinais GPS, transmitidos em duas frequências distintas, é possível determinar a integral da densidade de elétrons, ou seja, o parâmetro TEC. Ainda aproveitando a dependência do erro devido à ionosfera em relação à frequência do sinal, torna-se possível, utilizando receptores GPS de dupla frequência, eliminar os efeitos de primeira ordem do erro devido à ionosfera no posicionamento com GPS, a partir do uso da conhecida combinação linear *ion-free* (MONICO, 2007).

Contudo, quando são utilizados receptores GPS de uma frequência, não é possível utilizar essa estratégia, e os resultados obtidos sofrem a influência da ionosfera, principalmente no posicionamento por ponto e no posicionamento relativo de linhas-base médias e longas.

Essa alta influência da ionosfera torna o estudo do comportamento do TEC de especial interesse para quem faz uso do GPS para realizar posicionamento, especialmente na região brasileira, que é considerada uma das regiões com os maiores valores e variações espaciais do TEC do globo terrestre (KOMJATHY *et al.*, 2003). O comportamento dessas variações do TEC pode ser verificado regularmente ao longo do dia, ao longo das estações do ano e também ao longo do ciclo solar de aproximadamente onze anos. Diversos estudos sobre a variação do TEC na região brasileira, bem como do impacto da ionosfera no posicionamento com GPS, têm sido realizados nos últimos anos pela comunidade geodésica brasileira (FONSECA JUNIOR, 2002; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA *et al.*, 2004; DAL POZ e CAMARGO, 2006; MATSUOKA *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2006; MATSUOKA *et al.*, 2008; DAL POZ *et al.*, 2008).

O enfoque deste artigo é o estudo e a comparação do comportamento do TEC e do posicionamento por ponto com GPS em períodos de alta e baixa atividade solar, sendo uma continuidade dos estudos iniciados por Matsuoka *et al.* (2004). Em Dal Poz *et al.* (2008) um estudo similar foi realizado com relação ao posicionamento relativo.

2. O TEC E SUAS VARIAÇÕES

Durante o dia, devido ao aumento da taxa de fotoionização (principal processo de formação de íons e elétrons livres) com o aumento da radiação solar, máximos de TEC são observados na ionosfera. Um primeiro máximo ocorre geralmente entre 12 e 16 HL (WEBSTER, 1993) e, em regiões de baixas latitudes, um segundo máximo ocorre entre 21 e 22 HL (MATSUOKA, 2007). Esse segundo máximo deve-se principalmente à formação noturna da Anomalia Equatorial de Ionização (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991).

Ao longo do ano, devido principalmente à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, também são observadas variações sazonais na densidade de elétrons na ionosfera. Estudos realizados na região brasileira com dados GPS indicam que maiores valores e maiores variações espaciais do TEC são encontrados nos meses próximos aos equinócios (FONSECA JUNIOR, 2002; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; RODRIGUES, 2003), concordando com a teoria sobre o assunto (DAVIES, 1990; McNAMARA, 1991). Esses estudos também indicam que valores menores de TEC são encontrados nos meses próximos aos solstícios, principalmente solstício de inverno.

Por sua vez, as variações ao longo do ciclo solar de aproximadamente 11 anos estão associadas ao número de manchas solares, que são regiões mais escuras e frias

da fotosfera solar (HATHAWAY, 2008) com campos magnéticos extremamente fortes; essas regiões são rodeadas por áreas mais brilhantes, que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta desencadeando, com isso, uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (MATSUOKA, 2007). Assim, o aumento do TEC é proporcional ao aumento do número de manchas solares. Observações permitiram constatar que o aumento e a diminuição do número de manchas solares obedecem a um ciclo de aproximadamente 11 anos, e os registros informam que o último ciclo solar – Ciclo 23 – teve início no ano de 1996 (WILSON e HATHAWAY, 2008), atingindo seu máximo de número de manchas entre os anos 2000 e 2002 (PHILLIPS, 2008). Segundo previsão do NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), o próximo pico de ocorrência de manchas solares, que deverá ocorrer por volta de 2012, será de 30 a 50% maior do que o último pico (NCAR, 2006). Atualmente, o Sol encontra-se em um período de baixa ocorrência de manchas solares. Mais detalhes sobre as variações do TEC, principalmente com relação às variações ao longo do ciclo solar de aproximadamente onze anos, podem ser consultadas em, por exemplo, Matsuoka *et al.* (2004) e Matsuoka (2007).

Na seqüência é descrito o principal fenômeno da ionosfera equatorial e de latitudes baixas: a Anomalia Equatorial de Ionização (APPLETON, 1946), que exerce grande influência nas variações temporais e espaciais do TEC na região brasileira.

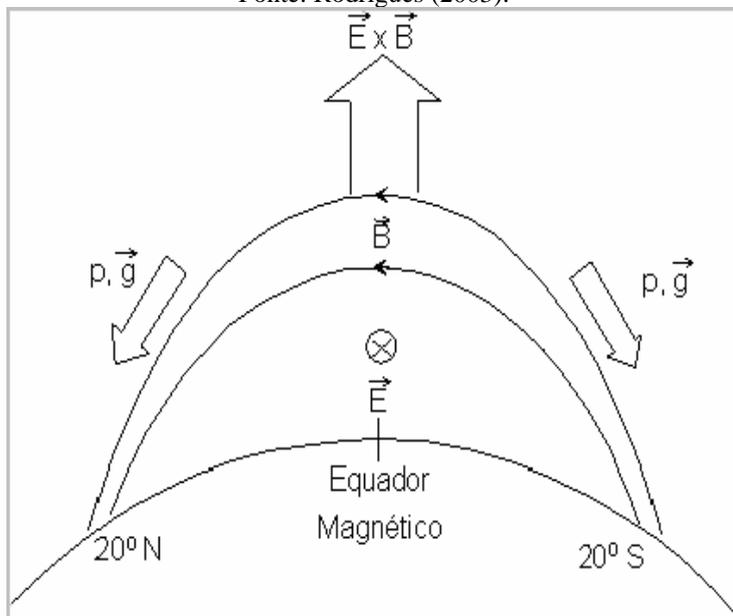
2.1 Anomalia Equatorial de Ionização

A anomalia equatorial de ionização tem sua origem em um fenômeno denominado efeito fonte, que ocorre na região equatorial devido à alta radiação solar e aos campos magnético e elétrico da Terra, e que é descrito em maiores detalhes a seguir.

Os campos elétricos do dínamo atmosférico, 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 ExB/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, em decorrência da ação da gravidade (\vec{g}) e do gradiente de pressão (∇p). Esse 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). Esse 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 1.

Figura 1 – Esquema das forças agindo no plasma - efeito fonte.

Fonte: 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), enquanto que 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 do TEC é denominada de anomalia equatorial de ionização ou anomalia de Appleton (APPLETON, 1946).

A anomalia equatorial varia ao longo do dia, passando por um primeiro máximo 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 às 21 horas local. Esse 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 TEC é menor do que no horário noturno, pois, enquanto o efeito fonte desloca elétrons das regiões próximas ao equador para as regiões das cristas norte e sul da anomalia equatorial, elétrons livres continuam

sendo produzidos na região equatorial pelo processo de fotoionização, devido à presença da radiação solar. Já no segundo pico da anomalia equatorial, o efeito fonte desloca os elétrons da região do equador para as cristas da anomalia, mas, com o pôr-do-sol, não há mais o processo de fotoionização, ou seja, observa-se um aumento da variação latitudinal do TEC, com valores mais baixos de TEC próximos ao equador geomagnético e altos valores nas regiões de crista da anomalia (região de latitudes baixas).

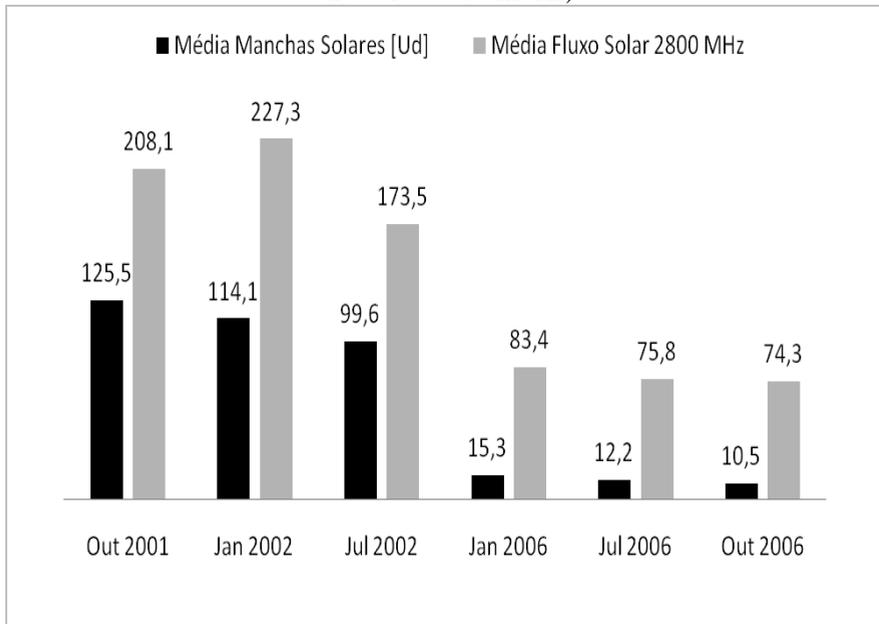
Esse comportamento da anomalia equatorial é um reflexo da variação do campo elétrico zonal e da deriva vertical do plasma produzida por ele. Como já citado, durante o dia, na região equatorial, o campo elétrico para leste na presença de um campo magnético para norte provoca uma deriva para cima, elevando 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, 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. 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). Durante períodos de alta atividade solar o pico ocorre em todas as estações do ano, sendo maior no equinócio e solstício de verão e menor no solstício de inverno (FEJER *et al.*, 1979; BATISTA *et al.*, 1996). Por outro lado, durante períodos de baixa atividade solar o pico pré-inversão só ocorre no equinócio, ainda tendo amplitude bem menor do que para alta atividade solar (FEJER *et al.*, 1979).

3. CONJUNTO DE DADOS, PROCESSAMENTOS E RESULTADOS

Para o estudo do TEC foram utilizadas as grades de valores de VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical) dos Mapas Globais da Ionosfera (arquivos no formato IONEX), disponibilizados gratuitamente pelo IGS (*International GNSS Service*) (IGSCB, 2008). Para o estudo do posicionamento com GPS utilizaram-se os dados da estação RIOD ($\cong 22,8^{\circ}\text{S}$; $43,3^{\circ}\text{W}$) da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), disponibilizados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Todos os dados se referem a uma amostra de 20 dias de cada mês analisado, a saber: Janeiro de 2002 e 2006 (próximos ao solstício de verão), Julho de 2002 e 2006 (próximos ao solstício de inverno), e Outubro de 2001 e 2006 (próximo ao equinócio de primavera). A amostra abrange, portanto, dados em período de alta atividade solar (anos 2001 e 2002) e em baixa atividade solar (2006). A figura 2 apresenta o número médio mensal de manchas solares e o valor médio mensal de medidas de fluxo solar em 2800MHz observados nos meses em questão, permitindo caracterizar assim o período de alta (ano 2001 e 2002) e baixa

(ano 2006) atividade solar (fonte dos dados: <http://sidc.oma.be/sunspot-data/> e ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/sola_data/solar_radio/flux/monthly.obs).

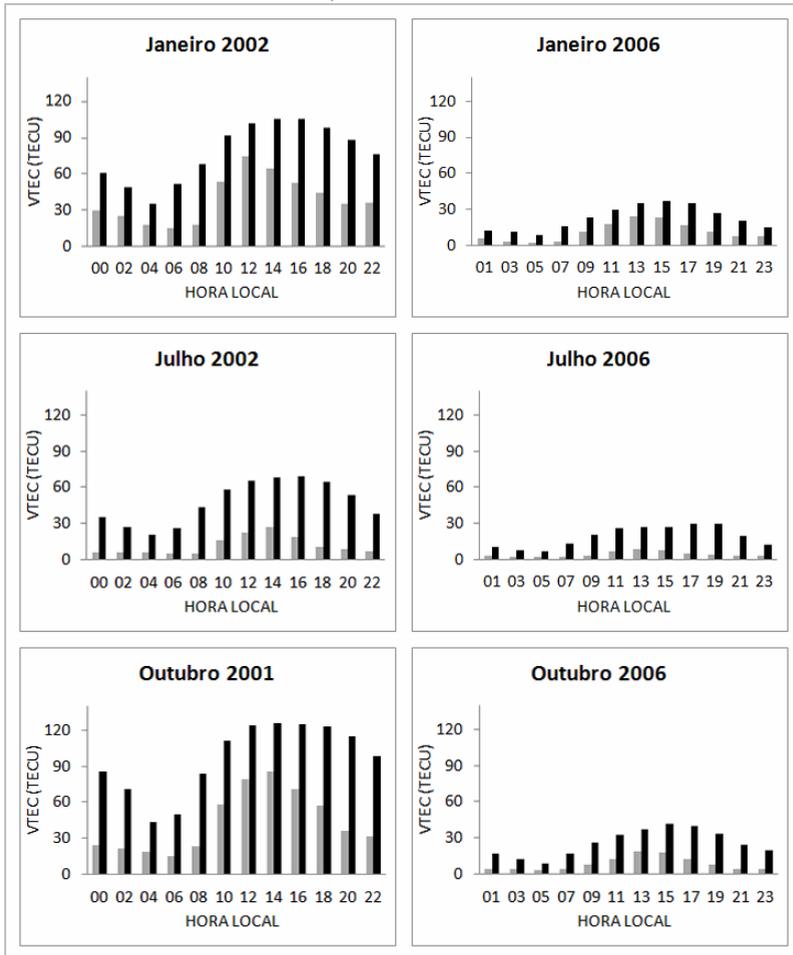
Figura 2 – Número médio de manchas solares (em unidades – Ud) e de média mensal de fluxo solar em 2800 MHz (em unidades de fluxo solar – u.f.s – sendo $1 \text{ u.f.s} = 10^{-22} \text{ watt/m}^2/\text{Hz}$).



3.1 Dados de TEC

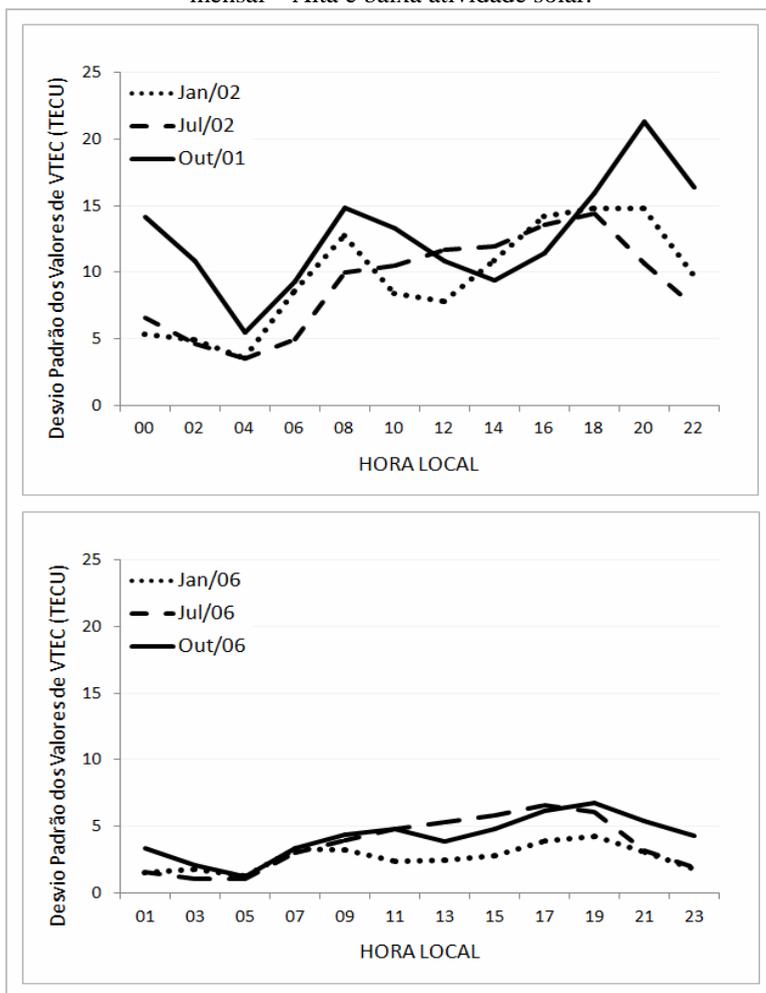
Os arquivos IONEX fornecem valores de VTEC para todo o globo terrestre em uma grade diária com resolução espacial de 5° em longitude por $2,5^\circ$ em latitude, e com resolução temporal de 2 horas (SCHAER, 1999). Assim, a partir das grades diárias de VTEC, calculou-se uma grade média de VTEC (com resolução temporal de 2 horas) para cada mês citado anteriormente, utilizando-se, no entanto, apenas os dados de VTEC da região brasileira. A figura 3 apresenta os valores mínimos e máximos de VTEC para o Brasil (variação diurna), obtidos de cada grade média mensal. A unidade é TECU (TEC *Unit*, sendo $1 \text{ TECU} = 10^{16}$ elétrons/m², correspondendo a 0,16m de erro nas distâncias medidas em L_1 e 0,27m de erro nas distâncias medidas em L_2).

Figura 3 – Variação diurna dos valores máximos e mínimos de VTEC extraídos de cada grade média mensal da região brasileira – Janeiro de 2002 e 2006; Julho de 2002 e 2006; Outubro de 2001 e 2006.



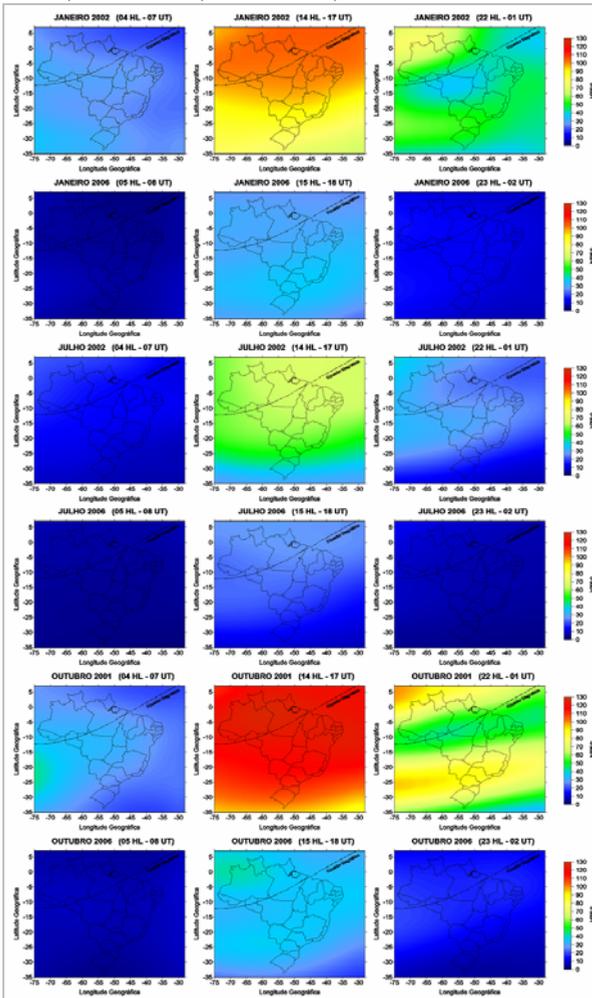
A figura 4 apresenta o desvio-padrão dos valores de VTEC para cada grade média mensal. Sendo o desvio-padrão uma medida de dispersão que leva em consideração a totalidade dos valores da variável em estudo (valores de VTEC em cada grade), ele pode ser considerado como um indicativo da variação espacial média do VTEC na região brasileira para os meses envolvidos no experimento. Assim, quanto maior o desvio-padrão, maior a variação espacial naquele mês e hora.

Figura 4 – Desvio-padrão com base nos valores de VTEC de cada grade média mensal – Alta e baixa atividade solar.



Ainda, a partir da grade média de cada mês, geraram-se mapas médios mensais de VTEC para a região brasileira. A figura 5 apresenta esses mapas médios mensais para alguns horários.

Figura 5 – Mapas horários médios mensais de VTEC para Janeiro/2002, Janeiro/2006, Julho/2002, Julho/2006, Outubro/2001 e Outubro/2006.



Cabe ressaltar que a resolução temporal dos mapas é de 2 horas e que os horários dos mapas de 2001 e 2002 possuem 1 hora de diferença em relação aos de 2006, pois, após meados de 2003, o IGS mudou a hora diária de início da grade de VTEC de 1:00 UT para 0:00 UT.

3.2 Posicionamento por ponto

Os dados GPS da estação RIOD da RBMC foram processados no *software* GPSPACE 3.3 (GPS *Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*), desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resource Canada*). No processamento foram utilizadas as pseudodistâncias advindas do código C/A em L_1 , coletadas com ângulo de elevação superior a 15 graus, e efemérides precisas. Para evitar diferenças significativas entre os dias, em termos de geometria dos satélites, só foram consideradas as posições estimadas com GDOP (*Geometric Dilution of Precision – Diluição da Precisão Geométrica*) menor que 7. Para correções do erro troposférico utilizou-se o modelo de Hopfield; nenhum modelo para correção do erro devido à ionosfera foi utilizado. Com esses procedimentos procurou-se minimizar os diversos erros envolvidos no posicionamento, deixando predominante a influência da ionosfera sobre os resultados.

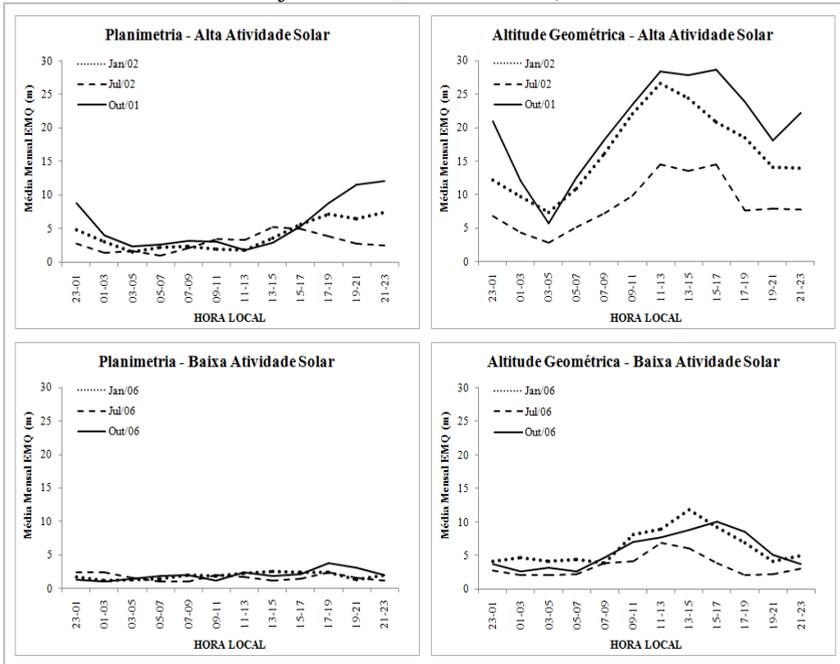
Com base nos valores das discrepâncias (coordenadas calculadas comparadas com as coordenadas conhecidas da estação) em cada época, para uma amostra de 24 horas (um dia), calculou-se o Erro Médio Quadrático (EMQ) para cada dia. O EMQ corresponde à raiz quadrada da média do quadrado dos erros cometidos em cada época, ou seja, representa a discrepância média esperada para uma única época em relação à coordenada conhecida da estação, com 68,3% de probabilidade. Sendo assim, para cada dia do experimento, foi obtido o EMQ planimétrico (Plan) e o EMQ em altitude geométrica (Alt). A partir desses valores, calculou-se a média mensal do EMQ e a redução média mensal do EMQ para o ano de 2006 (baixa atividade solar), em relação a 2001 e 2002 (alta atividade solar) (tabela 1).

Tabela 1 – Média mensal do EMQ e Redução do EMQ em 2006 com relação a 2001 e 2002.

Média Mensal do EMQ e Redução		
	Plan (m)	Alt (m)
Janeiro/2002	4,57	17,90
Janeiro/2006	1,91	6,39
Redução	58%	64%
Julho/2002	3,43	9,29
Julho/2006	1,66	3,97
Redução	52%	57%
Outubro/2001	6,58	22,58
Outubro/2006	2,14	6,36
Redução	68%	72%

Os valores de EMQ da tabela 1 foram obtidos com base em amostras diárias de discrepâncias de todo o dia e, portanto, representam um EMQ médio mensal. Para uma análise mais detalhada, visando também verificar a variação durante as horas do dia em cada mês, calculou-se o EMQ a cada amostra de 2 horas de discrepâncias, cujos valores podem ser verificados na figura 6.

Figura 6 - EMQ médio mensal a cada intervalo de 2 horas para o período de alta (janeiro/2002, julho/2002, outubro/2001) e baixa atividade solar (janeiro/2006, julho/2006, outubro/2006).



4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

O conjunto de resultados exposto anteriormente permite avaliar e comparar o comportamento médio do VTEC e dos erros no posicionamento por ponto com GPS nos meses de Janeiro e Julho (próximo aos solstícios) e no mês de Outubro (próximo ao equinócio de primavera), durante períodos de alta e baixa atividade solar. É necessário ressaltar, no entanto, as particularidades dessa pesquisa, a saber: a baixa resolução espacial e temporal dos arquivos IONEX, que limita o estudo do TEC a uma análise mais geral; e a localização da estação RIOD em uma área sob a influência da crista sul da anomalia equatorial, que permite o estudo do impacto da ionosfera em um local com alta influência da ionosfera na região brasileira.

Iniciando a discussão pelos resultados do VTEC, uma primeira análise dos gráficos das figuras 3 e 4 e dos mapas da figura 5, permite verificar que os maiores valores, bem como a maior variação diurna e espacial do VTEC, são encontrados para o período de alta atividade solar (2001 e 2002). Esse resultado encontra correspondência na teoria, pois, quanto maior o número de manchas solares (o que caracteriza os anos com alta atividade solar), maior também é a produção de elétrons livres na ionosfera. Em termos numéricos, a redução média geral do VTEC na região brasileira em 2006, em relação a 2001 e 2002, com base nos meses que participaram do estudo, foi de aproximadamente 70%.

De forma mais detalhada, os gráficos da figura 3 permitem constatar, tanto para o período de alta, quanto para o de baixa atividade solar, que os menores valores médios de VTEC são encontrados entre 05 e 06 HL, e os maiores valores médios de VTEC são encontrados entre 14 e 17 HL (horário do primeiro pico da anomalia equatorial e também de alto fluxo de radiação eletromagnética solar). No período de alta atividade solar, principalmente no mês de Outubro de 2001, e com menor intensidade no mês de Janeiro de 2002, observa-se que os valores máximos de VTEC continuam bem altos (aproximadamente 100 TECU) até por volta das 22 HL, o que, sem dúvida, se deve ao segundo pico da anomalia equatorial, como também pode ser verificado nos mapas do VTEC para o mês em questão (figura 5). Valores altos de VTEC (70-80 TECU) são observados até mesmo nas primeiras horas da madrugada, no mês de Outubro de 2001. Esse comportamento noturno do VTEC, no entanto, não é observado durante o ano de baixa atividade solar (2006), ocorrendo uma queda gradual dos valores de VTEC após as 17 HL em todos os meses do período de baixa, inclusive Outubro.

Analisando os dados apresentados na figura 4 percebe-se que, além dos valores de VTEC serem menores em 2006, a variação espacial média (que pode ser analisada através do desvio padrão de VTEC no horário) também é bem menor e apresenta um comportamento semelhante entre os meses, alcançado seu mínimo por volta das 05 HL em todos os meses, horário no qual, como visto anteriormente, também são encontrados os menores valores de VTEC. Enquanto isso, altos valores de variação espacial são encontrados para os meses sob influência da alta atividade solar, aumentando a partir do início da tarde e chegando a um máximo por volta das 20 HL, novamente caracterizando a formação da anomalia equatorial noturna sobre o território brasileiro, que gera principalmente uma variação espacial do TEC na direção latitudinal.

A apreciação dos resultados também ressalta, como pode ser visto nos mapas da figura 5, que o mês com maiores valores, maior variação diurna e maior variação espacial (principalmente na direção norte-sul – latitudinal) do VTEC, em período de alta atividade solar, é o mês de Outubro, próximo ao equinócio de primavera. Já os menores valores e menores variações são encontrados no mês de Julho, próximo ao solstício de inverno. Esses resultados concordam com experimentos anteriores realizados na região brasileira em períodos de alta atividade solar (MATSUOKA E

CAMARGO, 2004; MATSUOKA, 2007) e com a variação sazonal do VTEC citada na literatura. Já para o período de baixa atividade solar, uma menor diferença nos valores e variações espaciais de VTEC é observada entre os meses, ou seja, em períodos de baixa atividade solar a variação sazonal do VTEC é significativamente menor, quando comparada aos períodos de alta atividade.

Partindo para a análise dos resultados do posicionamento por ponto com GPS, a avaliação dos dados expostos na tabela 1 permite verificar, inicialmente, uma redução significativa da média mensal do EMQ no ano de 2006 (baixa atividade solar), em relação a 2001 e 2002 (alta atividade solar). Considerando que no processamento dos dados todas as outras fontes de erros foram modeladas, à exceção do erro devido à ionosfera, é possível estabelecer uma correlação direta entre a diminuição do número de manchas solares – e conseqüente diminuição da radiação eletromagnética e do TEC – e a redução significativa dos erros nas posições estimadas para o ano de 2006, período de baixa atividade solar. De maneira geral, para o ano de 2006, essa redução do EMQ foi de 59% em planimetria e de 64% em altitude geométrica, aproximadamente.

Em termos de variação diurna do EMQ, a figura 6 permite observar que, em 2006, além dos erros serem menores, eles também variam muito pouco ao longo do dia e apresentam comportamento semelhante em todos os meses, principalmente na componente planimétrica, onde a curva do EMQ médio é quase uniforme ao longo do dia e nunca ultrapassa 5 m. Ainda em 2006, verifica-se um pequeno aumento dos erros na componente altimétrica durante a tarde, caracterizando a influência da ionosfera, pois, em períodos de baixa atividade solar, é nesse horário que são encontrados os maiores valores de TEC no território brasileiro.

Na análise dos gráficos de EMQ da figura 6, referentes ao período de alta atividade solar, é possível observar inicialmente que, para todos os meses, os menores valores de erros são encontrados entre 03 e 05 HL, que também é o período aproximado onde são encontrados os menores valores e variações de TEC. De maneira geral, ainda é possível verificar um aumento dos erros com o aumento diário da radiação solar (e conseqüente aumento do TEC) e uma diminuição dos mesmos com o anoitecer (diminuição do TEC). Particularizando a análise para a componente altimétrica verifica-se que o mês de Outubro de 2001 (principalmente) e o mês de Janeiro de 2002 apresentam um comportamento diferenciado do início da noite até as primeiras horas da madrugada, quando é possível observar um novo aumento dos erros. Esse período coincide com a formação da anomalia equatorial noturna no território brasileiro que, em períodos próximos aos equinócios e solstício de verão, e em ano de alta atividade solar, apresenta-se de forma bastante intensificada.

Essa possível relação com a formação da anomalia equatorial noturna surge novamente, de forma bastante destacada, na análise do EMQ na componente planimétrica para os meses de Outubro de 2001 e Janeiro de 2002 (alta atividade solar). Embora se espere uma menor correlação entre o erro da componente

planimétrica e o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS, percebe-se claramente, nos gráficos da figura 6, um aumento significativo do EMQ planimétrico entre o início da noite e as primeiras horas da madrugada, enquanto no restante do dia são encontrados erros bem menores e praticamente constantes. Esse comportamento ocorre de forma mais intensa no mês de Outubro de 2001, mas também é perceptível no mês de Janeiro 2002. Considerando a teoria e os resultados obtidos com a análise do TEC, sabe-se que é nesse período, entre o início da noite e primeiras horas da madrugada, e em meses próximos aos equinócios e solstício de verão, que, em períodos de alta atividade solar, são encontradas as maiores variações espaciais de TEC sobre o território brasileiro, justamente por causa da formação da anomalia equatorial noturna. Sabendo que a compensação dos erros que contaminam as observáveis GPS no plano horizontal (favorecendo a componente planimétrica) está relacionada à geometria (distribuição) dos satélites, é possível associar esse aumento dos erros planimétricos à alta variação espacial do TEC no período, variação essa que faz com que possam ocorrer erros ionosféricos muito diferentes entre as pseudodistâncias obtidas para cada satélite observado em um mesmo instante, diminuindo assim a compensação no plano horizontal. Exemplificando: em um mesmo instante, a estação RIOD pode estar coletando dados de um satélite localizado na direção do equador geomagnético, onde baixos valores de TEC são encontrados (baixo erro ionosférico), e de outro satélite, cujo sinal pode ter atravessado a região da crista sul da anomalia equatorial (alto erro ionosférico). Em decorrência disso, espera-se uma menor compensação nesse período, no plano horizontal, dos erros devidos à ionosfera que contaminam as observáveis, o que, conseqüentemente, acaba por aumentar o EMQ da componente planimétrica.

Esse comportamento do EMQ planimétrico não é observado durante o período da tarde, o que pode ser explicado pelo fato de, durante a tarde, mesmo com a formação do primeiro pico da anomalia equatorial, a variação espacial do TEC é bem mais baixa no território brasileiro, ou seja, as pseudodistâncias obtidas para cada satélite observado em um mesmo instante possuem erros (devidos à ionosfera) mais correlacionados, favorecendo a compensação dos erros no plano horizontal e melhorando os resultados. Sabe-se também que, nos meses do período de baixa atividade solar e mesmo no período de alta atividade solar, nos meses próximos ao solstício de inverno, praticamente não é possível observar de forma destacada a anomalia equatorial noturna. Isso pode ser uma possível explicação para o fato do comportamento noturno do EMQ planimétrico, observado em Outubro de 2001 e Janeiro de 2002, não ser observado em Julho de 2002 e em todos os meses do ano de 2006.

A análise dos dados da figura 6 e da tabela 1 permite ainda estabelecer uma relação entre as variações sazonais do TEC e o comportamento do EMQ nos meses do experimento. Com efeito, especialmente para o período de alta atividade solar, os maiores erros são encontrados no mês de Outubro, próximo ao equinócio de

primavera, e os menores erros são encontrados no mês de Julho, próximo ao solstício de inverno, acompanhando a variação sazonal do TEC para o mesmo período. No ano de baixa atividade solar a variação sazonal não é tão evidente, gerando menores diferenças de erros entre os meses, acompanhando as menores diferenças que também ficaram caracterizadas na análise do TEC. O mês de Outubro, que apresenta os maiores erros no período de alta atividade solar, também é o que apresenta a maior redução desses erros no período de baixa atividade solar. Retomando o que foi discutido anteriormente, verifica-se que também foi nesse mês que foram encontradas as maiores reduções de TEC (tanto em valores quanto em variações) entre o período de alta e baixa atividade solar, estabelecendo, mais uma vez, a relação entre a redução do TEC e a redução do erro no posicionamento com GPS.

No período de baixa atividade solar praticamente não se observa a formação da anomalia equatorial noturna, fazendo com que os resultados do posicionamento nesse período melhorassem em todos os meses (figura 6). Correlacionando com a teoria, esse comportamento se deve tanto ao fato de que o pico pré-inversão da deriva vertical do plasma ionosférico praticamente não ocorre em períodos de baixa atividade solar, quanto à drástica redução do TEC, que diminui ainda mais a possibilidade da formação da anomalia equatorial noturna com alta variação espacial.

Ainda é possível observar que os maiores erros ocorrem para a componente altimétrica, em todos os meses do experimento, tanto em período de alta, quanto de baixa atividade solar, concordando com os resultados apresentados por Matsuoka (2007) e El Gizawy (2003), que referem que esse comportamento tem relação com a geometria dos satélites, que favorece a compensação dos erros que contaminam as observáveis no plano horizontal, e não no plano vertical (se a distribuição dos satélites fosse na direção nadir-zenital – o que evidentemente é impossível – favoreceria a componente vertical). Por essa razão, uma menor correlação com o TEC é esperada para os erros encontrados na componente altimétrica.

5. CONCLUSÕES

A avaliação do comportamento do TEC demonstrou uma relação direta entre o número de manchas solares e a densidade de elétrons na ionosfera: enquanto nos anos de alta atividade solar (maior número de manchas solares) a ionosfera apresentou altos valores de VTEC, com a diminuição do número de manchas solares (redução de aproximadamente 89% em 2006) – e conseqüente diminuição da radiação solar – foi observada uma redução média geral de aproximadamente 70% nos valores de VTEC na região brasileira. Também se analisou o comportamento diário e sazonal do TEC verificando-se, no período de alta atividade solar, que os horários (tarde e noite) e meses (Janeiro e Outubro) onde são encontrados os maiores valores e variações espaciais do TEC correspondem a períodos de pico da anomalia equatorial. Já no período de baixa atividade solar,

com a redução considerável dos valores de VTEC, a presença da anomalia equatorial não ficou tão caracterizada, observando-se, além de um comportamento mais regular do TEC durante o dia, uma variação sazonal menos acentuada entre os meses do experimento.

As expectativas geradas pelos resultados da avaliação do comportamento do TEC foram refletidas nos resultados do posicionamento por ponto com GPS, verificando-se uma diminuição considerável da média mensal do EMQ no período de baixa atividade solar (59% em planimetria e 64% em altitude geométrica), bem como uma maior influência da ionosfera sobre a componente altimétrica, justificada pelo fato que a geometria dos satélites favorece a compensação dos erros que contaminam as observáveis GPS no plano horizontal, mas o mesmo não ocorre no plano vertical.

No período de alta atividade solar, a análise da variação diária e sazonal do EMQ mostrou, de maneira geral, que o comportamento do erro seguiu o comportamento do TEC, sendo possível observar a influência da anomalia equatorial noturna piorando os resultados entre o início da noite e as primeiras horas da madrugada, principalmente nos meses de Janeiro e Outubro, esse último, com maior intensidade. Para o período de baixa atividade solar, além da diminuição dos erros, também se constatou uma menor variação dos mesmos, tanto ao longo dos dias, quanto ao longo dos meses envolvidos no experimento.

Em períodos que ocorrem irregularidades ionosféricas, sabe-se que o posicionamento também é bastante afetado. Em trabalhos futuros pretende-se estudar as irregularidades ionosféricas e os seus efeitos no posicionamento com GPS.

AGRADECIMENTOS

Ao IBGE, pelo fornecimento dos dados GPS das estações da RBMC; ao IGS, pelo fornecimento dos Mapas Globais da Ionosfera e pelos dados de efemérides precisas; e ao NRCan, pelo fornecimento do software GPSPACE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLETON, E.V.. *Two anomalies in the ionosphere*. Nature, v.157, n. 3995, p.691, 1946.
- 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, n.A5, p.10887-10892, 1996.
- BATISTA, I.S.. *Notas de aula do curso "Introdução à ionosfera e a propagação de ondas"* ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003.
- DAVIES, K.. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

- 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, n.1, p.35-54, 2008.
- DAL POZ, W.R.; CAMARGO, P.O.. *Consequências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência*. Boletim de Ciências Geodésicas, v.12, n.2, p.275-294, 2006.
- 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 nº 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- 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, p.5792-5796, 1979.
- FONSECA JUNIOR, E.S.. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. 2002. 176p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- HATHAWAY, D. H.. *The Sunspot Cycle*. 2008. Disponível em: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/sunspotcycle.shtml>. Acesso em: Junho, 2008.
- IGSCB (International GPS Service Central Bureau). *IGS Products*. Disponível em: <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>. Acesso em: Julho, 2008.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H.. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 149p.
- 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, 1995. 560p.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.. *Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira*. Revista Brasileira de Cartografia, n.56/01, p.14-27, jul. 2004.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; DAL POZ, W.R.. *Declínio do número de manchas solares do ciclo solar 23: redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS*. Boletim de Ciências Geodésicas, v.10, n.2, p.141-157, 2004.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BATISTA, I.S.. *Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003*. Boletim de Ciências Geodésicas, v.12, n.2, p.315-334, 2006.
- MATSUOKA, M.T.. *Influência de diferentes condições da ionosfera no*

- posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira*. 2007. 263p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BATISTA, I.S.. *Posicionamento por GPS na região Brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003*. Pesquisas em Geociências, v.35, n.1, p.3-19, 2008.
- McNAMARA, L.F.. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- MONICO, J.F.G.. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. da UNESP, 2007. 476p.
- NCAR (National Center for Atmospheric Research). *Scientists Issue Unprecedented Forecast of Next Sunspot Cycle*. 2006. Disponível em: <http://www.ucar.edu/news/releases/2006/sunspot.shtml>. Acesso em: Outubro, 2008.
- PHILLIPS, T. *Solar Cycle 24 Begins*. 2008. Disponível em: http://science.nasa.gov/headlines/y2008/10jan_solarcycle24.htm. Acesso em: Junho, 2008.
- RODRIGUES, F.S.R.. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. 2003. 151p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- SCHAER, S. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System*. 1999. 205p. Ph.D. dissertation – University of Bern, Bern, Switzerland.
- SILVA, M.M.S.; KRUEGER, C.P.; VEIGA, L.A.K.. *Avaliação dos requisitos específicos da norma brasileira NBR.14166/1998 com ênfase ao posicionamento com NAVSTAR-GPS*. Boletim de Ciências Geodésicas, v.12, n.2, p.235-247, 2006.
- 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.
- WILSON, R. M.; HATHAWAY, D. H.. *On the relationship between solar wind speed, geomagnetic activity, and the solar cycle using annual values*. Nasa, Marshall Space Flight Center, Alabama, 2008.

(Recebido em Janeiro / 2009. Aceito em maio / 2009).