

Revista Brasileira de Cartografia (2013) N^o 65/1: 211-226
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE GLOBAL DOS EFEITOS PROVOCADOS PELA EXPLOSÃO SOLAR DE 28 DE OUTUBRO DE 2003 NO TEC E NO POSICIONAMENTO POR PONTO

*Global Analysis of the Effects Caused by the October 28, 2003 Solar Flare in
TEC and Point Positioning*

**Johny Sartori Ruviaro¹; Marcelo Tomio Matsuoka¹
& Paulo de Oliveira Camargo²**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Laboratório de Pesquisas em Geodésia - LAGEO

Av. Bento Gonçalves, 9.500 – Caixa Postal 15.001

CEP 91.501-970 – Porto Alegre/RS

johny.ruviaro@yahoo.com

tomiomatsuoka@gmail.com

²Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia - Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305 – Bairro: Centro Educacional

CEP 19.060-140 – Presidente Prudente/SP

paulo@fct.unesp.br

Recebido em 30 de abril, 2012/ Aceito em 21 de julho, 2012

Received on april 30, 2012/ Accepted on july 21, 2012

RESUMO

A ionosfera é a principal fonte de erro das observáveis GNSS. Esse erro é diretamente proporcional ao TEC presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal transmitido. O TEC, em geral, varia regularmente no tempo e no espaço. No entanto, ele pode sofrer abruptas modificações em seu comportamento devido, por exemplo, a ocorrência de intensas explosões solares, ejeções de massa da coroa, entre outros eventos. Este artigo tem por objetivo analisar a influência, em um contexto global, da intensa explosão solar do dia 28 de outubro de 2003 no comportamento do TEC e na performance do posicionamento por ponto utilizando dados de 28 estações da rede mundial do IGS.

Palavras chaves: Posicionamento Por Ponto, GPS, Ionosfera, TEC, Explosão Solar.

ABSTRACT

The ionosphere is the main source of error in GNSS observables. This error is directly proportional to the TEC along the path traveled by the signal in the ionosphere and inversely proportional to the square of the frequency of the transmitted signal. In general, the TEC varies regularly in time and space. However, it can undergo abrupt changes in their behavior due to, for example, the occurrence of intense solar flares, coronal mass ejections, and other events. This article aims to analyze the influence, in a global context, of the intense solar flare on October 28, 2003 in TEC behavior and performance

of the point positioning using data from 28 stations of the IGS global network.

Keywords: Point Positioning, GPS, Ionosphere, TEC, Solar Flare.

1. INTRODUÇÃO

A ionosfera é uma das principais fontes de erro das observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Ela afeta a propagação de ondas eletromagnéticas por ser um meio dispersivo, fazendo com que a modulação e a fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites GNSS sofram, respectivamente, um retardo e um avanço, o que, por sua vez, provoca um erro na distância medida entre o satélite e o receptor. Esse erro é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons livres (TEC – *Total Electron Content*) presente ao longo do caminho da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal transmitido.

O TEC, em geral, varia regularmente no tempo e no espaço. No entanto, ele pode sofrer abruptas modificações em seu comportamento devido, por exemplo, a ocorrência de intensas explosões solares, ejeções de massa da coroa, entre outros eventos. Na ocorrência de uma explosão solar ocorre um rápido aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética, especialmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta (EUV), que se direcionada para a Terra, pode provocar uma série de fenômenos na ionosfera genericamente chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS – *Sudden Ionospheric Disturbances*). Durante eventos de DIS podem ocorrer rápidas variações na amplitude e na fase (cintilação ionosférica) dos sinais GNSS, um súbito aumento na densidade de elétrons no lado iluminado da Terra, entre outros.

Este artigo tem por objetivo apresentar a análise da influência, em um contexto global, da intensa explosão solar do dia 28 de outubro de 2003, que ocorreu entre 11:00 e 11:30 UT (*Universal Time*), no comportamento do TEC e na performance do posicionamento por ponto. Esta intensa explosão solar ocorreu durante o último pico de atividade solar e de ocorrência de explosões, referente ao chamado ciclo 23. Atualmente, após ultrapassar um período de mínimo se está iniciando um novo período de alta atividade solar, agora no ciclo 24. Foram utilizados dados de vinte e oito estações da rede mundial do IGS (*International GNSS Service*). Para análise foram produzidos

mapas médios do VTEC (*Vertical TEC* – TEC na direção vertical). Também foram feitos gráficos do VTEC para cada uma das estações. E, além disso, foram produzidos gráficos dos erros em planimetria e altitude geométrica no posicionamento por ponto para todas as estações GPS (*Global Positioning System*). Estudos anteriores, realizados no Brasil sobre eventos solares e os efeitos causados no posicionamento por GPS e na variação do TEC podem ser encontrados em Dal Poz (2005), Matsuoka (2007), Fedrizzi (2003) e Salomoni (2008).

2. IONOSFERA

Segundo Seeber (2003) a atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético, propagação de ondas eletromagnéticas e segundo um parâmetro técnico. Considerando a propagação de ondas eletromagnéticas temos que a atmosfera é dividida em troposfera e ionosfera.

A troposfera é a camada inferior indo até aproximadamente 50 km de altura. Ela é formada por partículas neutras e a propagação das ondas eletromagnéticas depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura. Segundo Leick (1995) a refração neste meio independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma esteja abaixo de 30 GHz. Então a troposfera se comporta de forma não dispersiva para os sinais GPS, já que eles são transmitidos na banda L que vai 1 a 2 GHz ($L_1 = 1575,42$ MHz; $L_2 = 1227,60$ MHz e $L_5 = 1176,45$ MHz).

Já a ionosfera estende-se de 50 km até aproximadamente 1000 km de altura, e seu limite superior não é bem definido uma vez que pode ser interpretado como uma zona de transição com a plasmasfera. É um meio constituído por partículas ionizadas, ou seja, elétrons livres e íons positivos. A ionosfera é formada principalmente pela ação da radiação solar eletromagnética na atmosfera terrestre e, em menor escala, pela ação da radiação cósmica que, embora exercendo um papel secundário, é importante na manutenção da ionosfera noturna (KIRCHHOFF, 1991). A propagação de ondas eletromagnéticas neste meio depende da frequência do sinal transmitido, tornando-se assim um meio

dispersivo, e da densidade de elétrons livres. São os elétrons livres que afetam a propagação das ondas de rádio, não os íons positivos, pois os íons possuem uma massa cerca de 20 mil vezes maior do que a dos elétrons e, portanto, são muito pesados para responder às rápidas oscilações de uma onda de rádio.

2.1. Processo de Fotoionização

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 (EUV) e raios X, por elementos atmosféricos neutros (KIRCHHOFF, 1991). Quando a energia dos fótons incidentes sobre o elemento atmosférico neutro é maior do que o seu potencial de fotoionização, ocorre a perda desse elemento, tornando-o um íon positivo e dando origem a elétrons livres.

A fotoionização é um dos principais processos produtores de íons e elétrons livres na ionosfera, mas a ionização também pode ser produzida por colisão com partículas energéticas carregadas (ionização secundária ou corpuscular), de origem solar ou galáctica, que penetram na atmosfera, mais facilmente em regiões de altas latitudes e em regiões de anomalia geomagnética.

Na troposfera, devido à alta densidade deste meio, os íons e elétrons livres que são criados pelo processo de fotoionização se reconectam rapidamente impedindo que se forme um meio ionizado. Já na ionosfera a densidade é menor então demora mais para eles se reconectarem formando assim uma camada ionizada na atmosfera terrestre.

2.2. Anomalia de Ionização Equatorial

Antes de descrever a Anomalia de Ionização Equatorial (AIE) é necessário entender o fenômeno que origina ela. A interação entre os campos elétrico e magnético da Terra com a grande quantidade de íons positivos e elétrons livres na região equatorial, criados pelo processo de fotoionização no lado diurno, gera uma movimentação do plasma ao longo das linhas de força horizontais do campo geomagnético para longe do equador.

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

para leste. Na camada F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético (\vec{B}) que é dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por $\vec{E} \times \vec{B} / B^2$. Assim o plasma é lançado até elevadas altitudes na região equatorial, e após isso ele desce ao longo das linhas de campo geomagnético para o norte e para o sul devido à ação da gravidade (\vec{g}) e do gradiente de pressão (∇p). Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (APPLETON, 1946).

Como consequência da subida e posterior descida do plasma se formam duas cristas onde os picos de densidade de elétrons nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético encontram-se, aproximadamente, em 15° de latitude geomagnética, além disso, no equador geomagnético a ionização fica menos intensa. Essa distribuição latitudinal do plasma é denominada de Anomalia Equatorial de Ionização (AEI).

2.3. Variações do TEC

O TEC varia regularmente no tempo e no espaço com relação: ao ciclo de manchas solares (ciclos de 11 anos), à época do ano (variação sazonal), à hora do dia (variação diurna), à localização geográfica, à atividade geomagnética, entre outros parâmetros.

Além disso, o TEC pode sofrer também abruptas modificações em seu comportamento devido a eventos solares, tais como: explosões solares (*solar flares*), ejeções coronais de massa (CME – *Coronal Mass Ejections*), correntes de vento solar de alta velocidade (HSSWS – *High Speed Solar Wind Streams*) e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDF – *Sudden Disappearing Filaments*) (KOMJATHY, 1997). Se esses eventos forem direcionados para a Terra podem ocorrer tempestades geomagnéticas e ionosféricas.

2.4. Explosões Solares

Explosões solares ocorrem em regiões ativas do Sol, onde se encontram as manchas solares e os campos magnéticos intensos (McNAMARA, 1991). Elas são caracterizadas por um aumento súbito da emissão de radiação, em todos os comprimentos de onda do espectro

eletromagnético, e a duração varia entre 3 minutos e várias horas, sendo o tempo médio de aproximadamente 30 minutos (DAVIES, 1966).

Tabela 1 - Classificação das explosões solares.

Classes	Energia Raio X (Watt/m ²)
X	$E > 10^{-4}$
M	$10^{-5} < E < 10^{-4}$
C	$10^{-6} < E < 10^{-5}$
B	$E < 10^{-6}$

Fonte: Adaptada de Goodman (2005).

Goodman (2005) dividiu as explosões solares em classes, podendo cada classe ter nove subdivisões (exceto a classe X, já que pode aumentar indefinidamente), de acordo com a intensidade do pico da explosão no comprimento de onda de raios X de 1 a 8 Angstroms.

Na ocorrência de uma explosão solar acontece um rápido aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética, especialmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta (EUV), que, se direcionado para a Terra, pode desencadear uma série de fenômenos na ionosfera genericamente chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos.

Durante eventos de DIS podem ocorrer rápidas variações na amplitude e/ou na fase (cintilação ionosférica) e perda de potência do sinal, resultados da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons e, consequentemente do índice de refração do meio. Isso prejudica a performance de rastreamento do receptor, que pode ocasionar em perdas de sinal (ou seja, o não registro das observáveis GNSS). Entre os DIS que podem ocorrer está também um rápido aumento na densidade de elétrons, através do processo de fotoionização, em alturas da ionosfera em torno de 80 km (camada D), no lado iluminado da Terra. Segundo McNamara (1991) uma intensa explosão pode aumentar até 10 vezes o TEC na camada D. Esse aumento de elétrons na camada D ocorre apenas alguns minutos após a ocorrência da explosão solar, dura em média 1,5 horas e causa a absorção de ondas de rádio HF (*short wave* – ondas curtas) que passam pela região, num fenômeno conhecido como

“enfraquecimento de ondas curtas” (*short-wave fadeout*) (McNAMARA, 1991).

2.5. Erro Devido à Ionosfera

A ionosfera afeta a propagação de ondas eletromagnéticas por ser um meio dispersivo, fazendo com que a modulação (código) e a fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites GPS sofram, respectivamente, um atraso e um avanço, o que, por sua vez, provoca um erro na distância medida entre o satélite e o receptor.

O erro de primeira ordem devido à ionosfera para a observável de fase (I_{fr}^S) e pseudodistância (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), como (LEICK, 1995):

$$I_{fr}^S = - \left(\frac{40,3}{f^2} \right) TEC \quad (1)$$

$$I_{gr}^S = \left(\frac{40,3}{f^2} \right) TEC . \quad (2)$$

O erro devido à ionosfera (I_{fr}^S e I_{gr}^S) é expresso em metros (m), pois 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)⁻¹.

Analisando as equações (1) e (2), percebe-se que tanto para a fase da portadora quanto para o código o erro devido à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal transmitido e diretamente proporcional ao TEC. Então, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera e quanto maior o TEC maior será o erro.

A ionosfera não só degrada a acurácia e a precisão do GNSS, como também reduz a sua confiabilidade, pois estudos têm mostrado uma alta dependência entre perdas de sinal e irregularidades ionosféricas (SKONE, 2000).

Os primeiros estudos que mostram que as medidas GPS na região brasileira são afetadas por diferentes condições ionosféricas, podem ser verificados em Wanninger et al. (1991; 1993) e Campos et al. (1993).

3. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISE

No dia 28 de outubro de 2003, entre às 11:00 e 11:30 UT, aproximadamente, ocorreu uma intensa explosão solar classe X17 na direção da Terra,

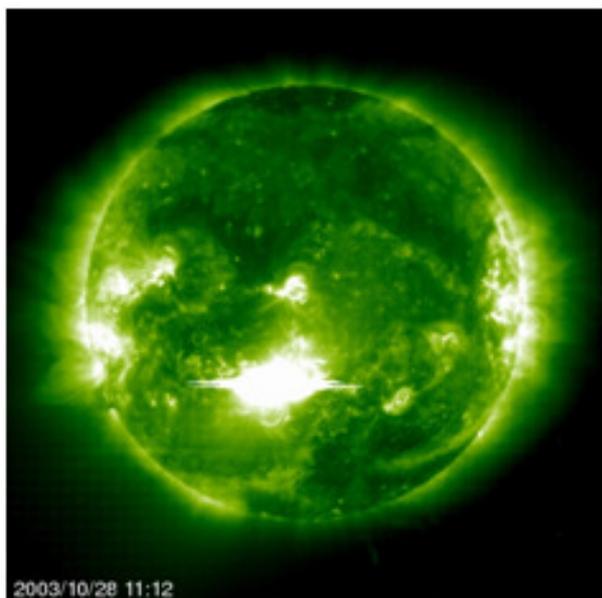


Fig. 1 - Imagem do Sol (extremo ultravioleta) no dia 28 de outubro de 2003 às 11:12 UT. Fonte: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_movies/2003/10/28/

causando um grande aumento no fluxo de radiação eletromagnética emitida pelo Sol. A Figura 1 apresenta uma imagem do Sol (na faixa do extremo ultravioleta) onde se pode ver a explosão. Mais informações sobre esse evento podem ser encontradas em: Batista *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2006; Matsuoka *et al.*, 2006; Mannucci *et al.*, 2005; Tsurutani *et al.*, 2005; Salomoni *et al.*, 2011.

Medidas do fluxo da radiação eletromagnética na faixa dos raios X associado à explosão indicaram que havia ocorrido uma das 3 maiores explosões solares das últimas 3 décadas (SKOUG *et al.*, 2004).

Um primeiro fenômeno que ocorreu associado à explosão solar foi o abrupto aumento do fluxo de radiação eletromagnética proveniente do Sol. Já que o comportamento do TEC é influenciado pela quantidade de radiação que atinge a Terra, especialmente na faixa dos raios X e EUV, com o aumento do fluxo desta radiação mudanças no comportamento do TEC são esperadas. Como a radiação eletromagnética viaja aproximadamente na velocidade da luz, os efeitos na ionosfera decorrentes do aumento do fluxo dessa radiação serão percebidos após poucos minutos do início da explosão solar.

O aumento da radiação eletromagnética solar, na faixa dos raios X, pode provocar um aumento na densidade de elétrons na camada D da ionosfera.

Um aumento súbito da densidade de elétrons na camada F também pode ser esperado. Os efeitos resultantes deste rápido aumento da densidade de elétrons na ionosfera associados ao aumento da radiação eletromagnética devido às explosões solares são denominados genericamente na literatura de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS). Entre os DIS que podem ocorrer em consequência do aumento da densidade de elétrons da ionosfera está o rápido aumento do TEC (*Sudden Increase of TEC*) em determinadas regiões do globo terrestre (ZHANG *et al.*, 2005).

Os experimentos realizados têm como objetivo verificar se houve a ocorrência de um súbito aumento do TEC, no lado iluminado da Terra, devido ao aumento do fluxo de radiação eletromagnética associado à intensa explosão solar em questão. Um

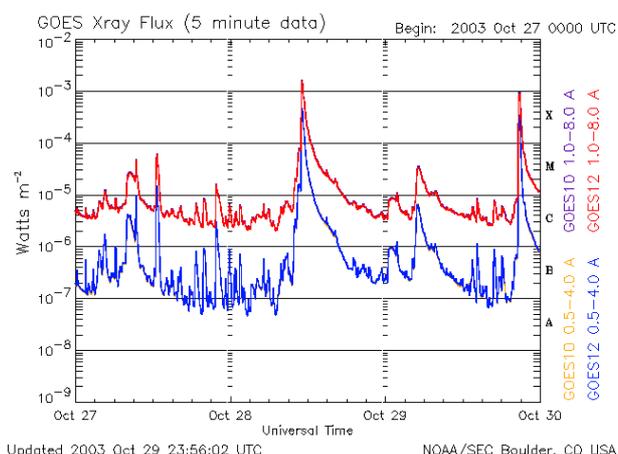


Fig. 2 - Fluxo de raios X de 27 a 30 de outubro de 2003. Fonte: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse/2003/>

estudo do impacto do posicionamento por ponto em diferentes locais da Terra também foi realizado.

A Figura 2 mostra o fluxo de raios X registrado pelo satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) no período de 27 a 30 de outubro de 2003.

Analisando a Figura 2 pode-se observar que, devido à explosão solar, um abrupto aumento do fluxo de raios X ocorreu após as 11:00 UT do dia 28 de outubro de 2003. O pico do fluxo de raios X ocorreu por volta das 11:15 UT. No entanto, pode-se verificar que mesmo antes do abrupto aumento, o fluxo já estava alto e com alta variação temporal, mostrando que o Sol encontrava-se bastante ativo mesmo antes da intensa explosão. Em Matsuoka

(2007) é mostrada uma comparação entre o período apresentado na Figura 2 e um período calmo do mesmo mês, concluindo que fato os últimos dias de outubro de 2003 apresentaram altos valores e variações do fluxo de raios X do Sol. Embora não será analisado neste artigo, para encerrar a análise da Figura 2, convém destacar que no final do dia 29 de outubro de 2003 um novo abrupto aumento é verificado.

De forma a verificar o aumento da densidade de elétrons livres da ionosfera, que ocorre devido ao aumento do fluxo de radiação eletromagnética incidente no lado diurno da Terra, foram analisados os mapas médios do VTEC (em TECU – *TEC Unit*, sendo $1 \text{ TECU} = 10^6 \text{ elétrons/m}^2$) feitos com os arquivos IONEX (*IONosphere map Exchange format*) do IGS utilizando o software Leica SpiderQC. Os mapas foram produzidos para o dia 28 de outubro de 2003 entre 10:00 e 20:00 UT com resolução temporal de 2 horas.

Analisando a Figura 3 pode-se verificar o aumento ocorrido no VTEC em uma ampla região ao entorno de onde se encontrava o ponto subsolar (localizado aproximadamente em 15°S ; 15°E – continente africano) no momento da explosão. É possível observar um aumento abrupto no mapa das 12:00 UT, estando em concordância com o rápido aumento do fluxo de radiação eletromagnética decorrente da explosão solar mostrado na Figura 2. Este aumento não condiz com as variações regulares do TEC, como pode ser observado pela alteração na variação espacial das cristas norte e sul da AEI. A Figura 3 mostra que a incidência da radiação provocou um grande aumento na produção de elétrons livres no lado diurno na região próxima ao equador geomagnético até as cristas da AEI, tornando toda esta região homogênea (com altos valores de TEC) fazendo assim com que as cristas desaparecessem. Na verdade, essa região que se formou é uma grande quantidade de plasma que ainda não foi totalmente direcionado para as cristas da anomalia, pois a taxa de produção de elétrons livres foi maior do que a taxa com que o plasma era dissipado, resultando assim no acúmulo do plasma entre as cristas da anomalia, fato que em condições normais não acontece. Em condições normais plasma se acumula nas cristas e não no equador geomagnético.

Para verificar mais detalhadamente o aumento do TEC foram utilizados os dados das estações GPS da rede IGS (DOW et al., 2009) para obter

valores observados de VTEC. A metodologia empregada para a obtenção do VTEC a partir de dados GPS pode ser encontrada em Matsuoka e Camargo (2004). A Figura 4 mostra a localização das vinte e oito estações selecionadas segundo a situação da rede IGS em 2003.

Devido à grande quantidade de gráficos gerados serão apresentados somente os resultados para algumas estações do IGS, que sumarizam de forma adequada o que ocorreu. As Figuras 4, 6 e 7 mostram o comportamento do VTEC no período entre 10:00 e 13:00 UT do dia 28 de outubro de 2003 para as estações que foram selecionadas.

Analisando as Figuras 5 e 6 pode-se verificar um fenômeno de DIS, estando em concordância com o aumento do fluxo da radiação eletromagnética decorrente da explosão solar mostrado na Figura 2. Os valores do VTEC aumentaram repentinamente logo após as 11:04 UT, aproximadamente, em todas as estações GPS das Figuras 5 e 6, as quais estavam localizadas no lado diurno da Terra ou no limite dia/noite no momento da explosão solar, mostrando a característica abrangente do fenômeno observado, uma vez que essas estações estão distribuídas por várias regiões do planeta Terra.

Por outro lado, na Figura 7 os gráficos não mostram nenhum aumento significativo do VTEC para as estações no lado noturno da Terra no momento em que ocorreu o fenômeno em questão, já que a radiação proveniente do Sol só atinge o lado diurno.

Visando verificar o impacto causado devido ao repentino aumento do TEC decorrente da intensa explosão solar foi realizado o posicionamento por ponto para as mesmas estações GPS utilizando o software GPSPACE (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*) desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*). No processamento utilizou-se, como observáveis, somente as pseudodistâncias advindas do código C/A em L_1 coletadas de satélites com ângulo de elevação superior a 10 graus. Para garantir boa geometria dos satélites foi adotado para o GDOP, valor menor ou igual a 7. Foram utilizadas as efemérides precisas e correções precisas do relógio dos satélites produzidas pelo GSD/NRCan, e o modelo padrão de Hopfield foi utilizado para minimizar o erro da troposfera. Nenhum modelo da ionosfera foi utilizado, justamente para verificar o

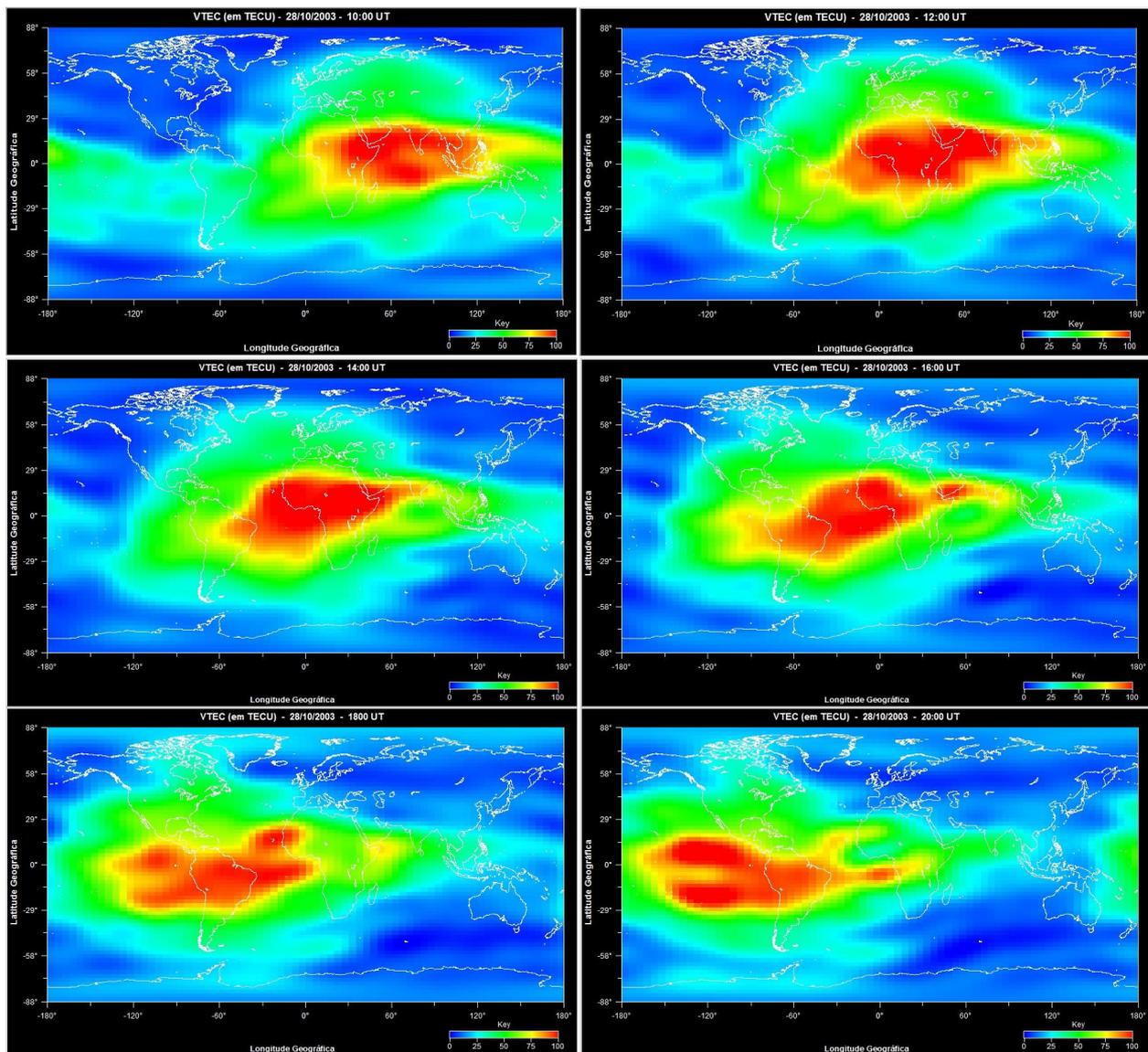


Fig. 3 - Mapas médios do VTEC para o dia 28 de outubro de 2003 entre 10:00 e 20:00 UT.

efeito da ionosfera, intensificada pela explosão, nos resultados do posicionamento por ponto. As posições foram estimadas a cada 30 segundos e comparadas com os valores conhecidos de cada estação, obtendo-se os erros em planimetria e altitude geométrica.

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam o comportamento dos erros em planimetria e altitude geométrica, entre 10:00 e 13:00 UT do dia em que ocorreu o fenômeno em estudo, para as estações GPS consideradas neste artigo.

O erro da ionosfera que contamina as observáveis GPS é propagado em maior quantidade para a componente vertical devido à geometria dos satélites que favorece a compensação nas componentes horizontais. Dessa forma, no posicionamento por ponto, um erro maior na

componente vertical é esperado e, portanto, tem maior relação com a atividade ionosférica e solar como comprovado nos resultados.

Focando a análise dos resultados após o início da intensa explosão solar (11:00 UT, aproximadamente), alguns fatos interessantes foram verificados. Primeiramente, várias características semelhantes podem ser observadas nos gráficos dos erros e de VTEC. Pode-se verificar que as estações do lado iluminado e no limite dia/noite tiveram um aumento do erro em altitude geométrica após as 11:00 UT, aproximadamente.

Também, pode-se verificar nos gráficos dos erros do posicionamento das figuras 8 e 9, que logo após a intensa explosão solar existe ausência de posições estimadas para as estações SIMO, SEY1, NKLG, FORT, localizadas no lado diurno, e também

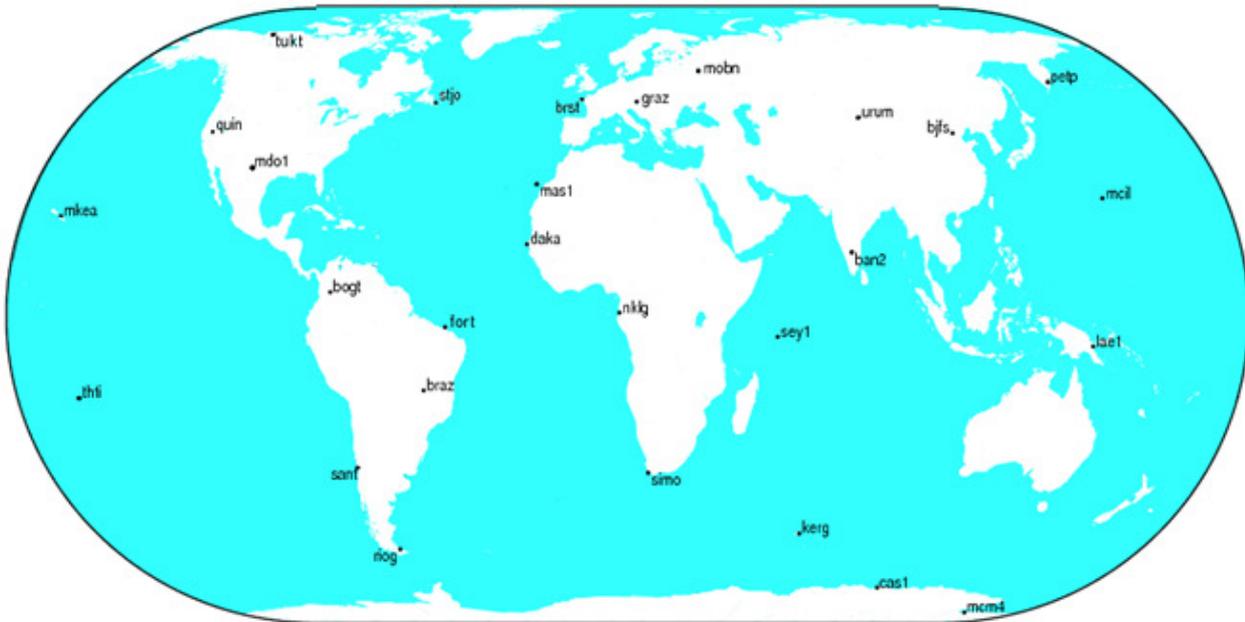


Fig. 4 - Estações do IGS selecionadas com base na disponibilidade da rede em 2003.

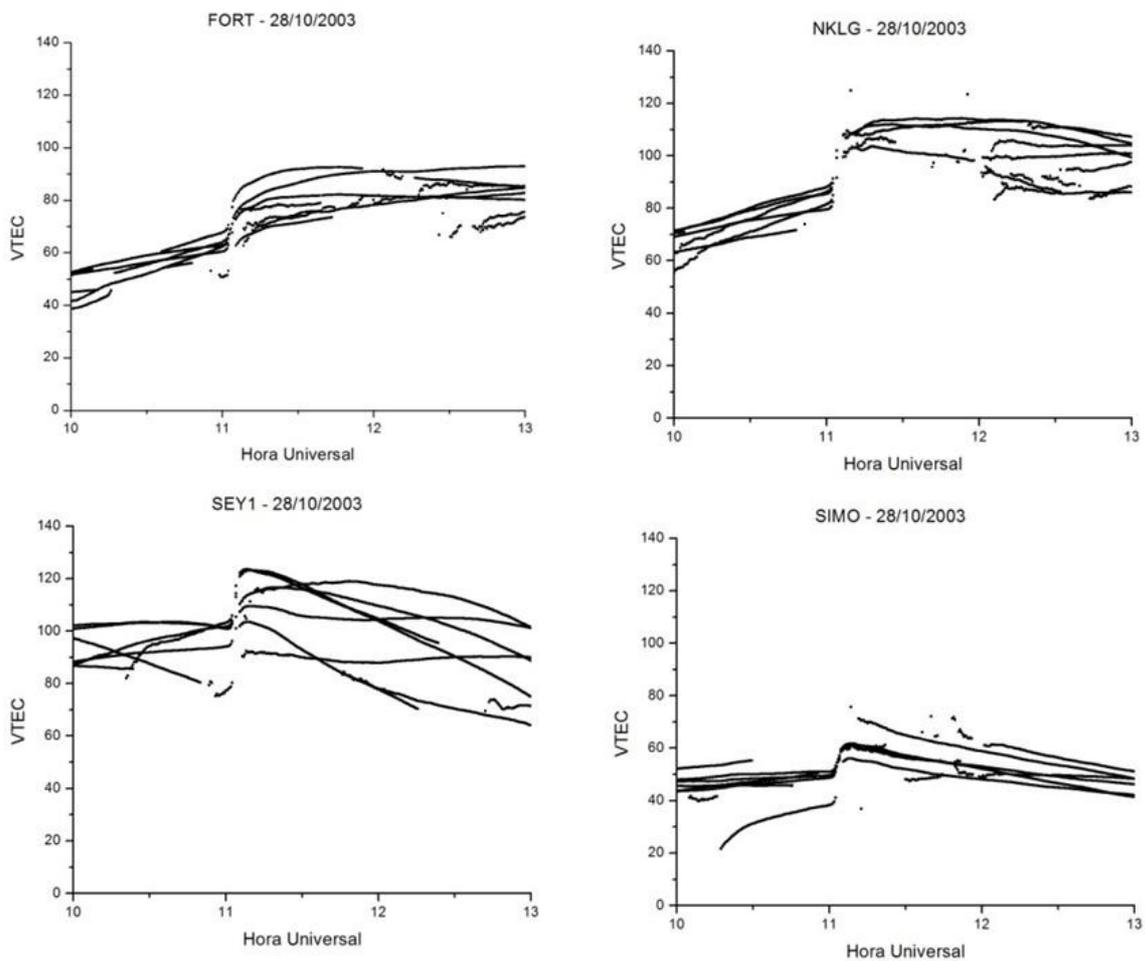


Fig. 5 – Valores de VTEC calculados com os dados das estações GPS localizadas no lado diurno.

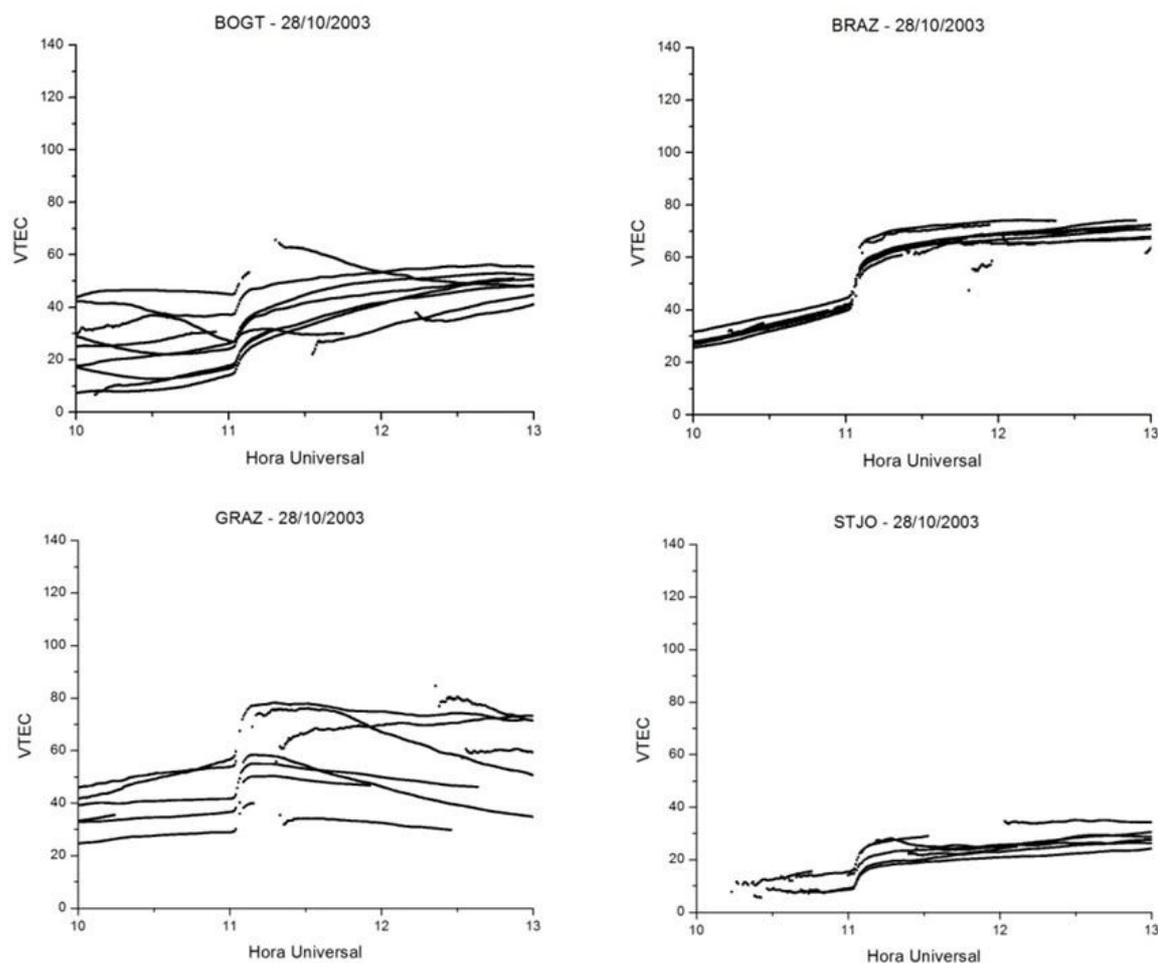


Fig. 6 – Valores de VTEC calculados com os dados das estações GPS localizadas próximas ao limite dia/noite.

para as estações localizadas no limite dia/noite, GRAZ, BRAZ e BOGT. Este período de ausência de estimação de posições pelo software GPSPACE ocorreu em geral para estas estações supracitadas entre 11:04 e 11:15 UT. Devido à correlação com o período de início da intensa explosão (figura 2) e também do aumento repentino do VTEC, pode-se concluir que possivelmente este período de ausência de estimação está correlacionado com o fenômeno solar ocorrido. Também, pelo fato de que essa ausência de estimação no período citado não foi verificada nas estações localizadas no lado noturno.

Verificando os relatórios de processamento disponibilizados pelo software GPSPACE concluiu-se que a não estimação no período citado se deu devido ao fato de que consta no relatório que algumas observações foram rejeitadas do processamento, suspeitas de estarem contaminadas com erro grosseiro (classificadas como *outliers*). Isto possivelmente se deve ao fato do erro devido

à ionosfera que contamina as observações ter aumentado de forma repentina e com magnitude suficiente, fazendo com que o procedimento de controle de qualidade do GPSPACE entendesse essas observações após o aumento repentino do TEC como *outliers*. Além disso, vale salientar que não há nenhum problema no fato de que as estações localizadas no limite dia/noite tenham sido influenciadas por esse fenômeno, uma vez recebem também sinais de satélites que atravessaram a região diurna.

Embora no processamento tenha sido utilizada apenas pseudodistância do código C/A na portadora L_1 , vale ser comentado que analisando os arquivos de observação das estações, observa-se a ocorrência de perdas do sinal em L_2 durante o período citado (entre 11:04 UT até 11:15 UT, aproximadamente) para as estações localizadas no lado diurno e no limite dia/noite, resultado provavelmente do impacto da explosão solar na

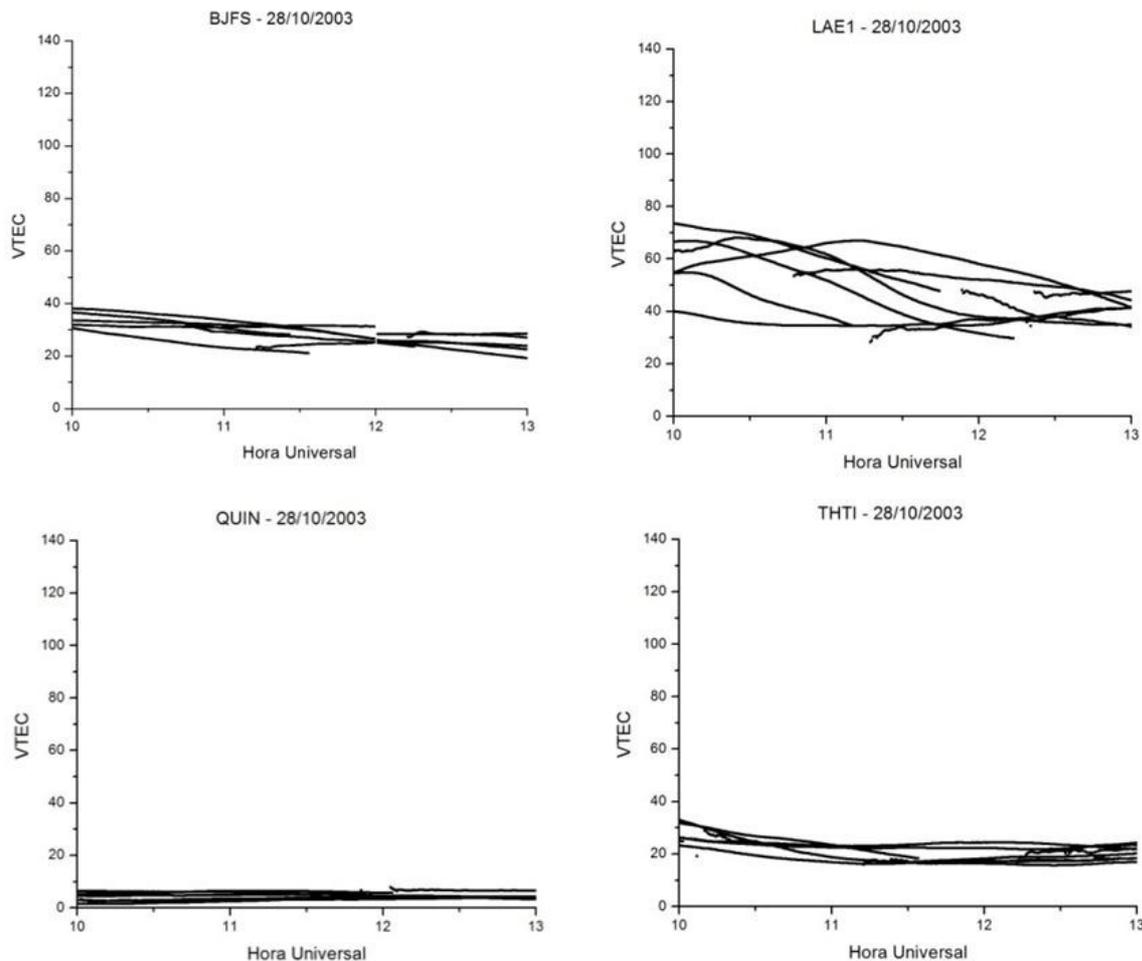


Fig. 7 – Valores de VTEC calculados com os dados das estações GPS localizadas no lado noturno.

ionosfera, gerando maior ruído nas observáveis e impossibilitando a medição por parte dos receptores das observações em L_2 . As observações da portadora L_2 são mais suscetíveis a perdas de sinal do que as da portadora L_1 (SKONE et al., 2001). Isso se deve ao fato da técnica especial de processamento do sinal L_2 devido à necessidade de retirar a criptografia do código P, que já gera ruído. Somado ao ruído extra advindo provavelmente do impacto da ionosfera devido à explosão solar, provocou as perdas de sinal.

Verificando o período antes da intensa explosão solar (antes de 11:00 UT, aproximadamente) pode-se verificar uma alta variação do erro com características semelhantes para as estações FORT, BRAZ, BOGT, THTI. Na figura 2, pode-se perceber que mesmo antes da intensa explosão solar o fluxo de raio-X já estava aumentado e com alta variação. Isso poderia ser uma possível explicação para a alta variação do erro observada nessas estações durante o período

anterior a intensa explosão. Por outro lado, o fato de ter sido observado essas características semelhantes em estações localizadas em diferentes situações de iluminação solar (THTI, estava no lado noturno, por exemplo) torna a análise mais complexa. Pode se tratar também de algum procedimento relacionado à modelagem matemática empregada pelo GPSPACE. Este fato merece investigações futuras.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados experimentos utilizando dados GPS da rede IGS visando apresentar um estudo do impacto da intensa explosão solar ocorrida em 28 de outubro de 2003 na ionosfera e no posicionamento com GPS num contexto global.

Os mapas médios do VTEC mostraram uma variação não regular de TEC, e a chegada da radiação provocou um aumento na produção de elétrons livres alterando a variação espacial das cristas da Anomalia Equatorial, as quais deram lugar

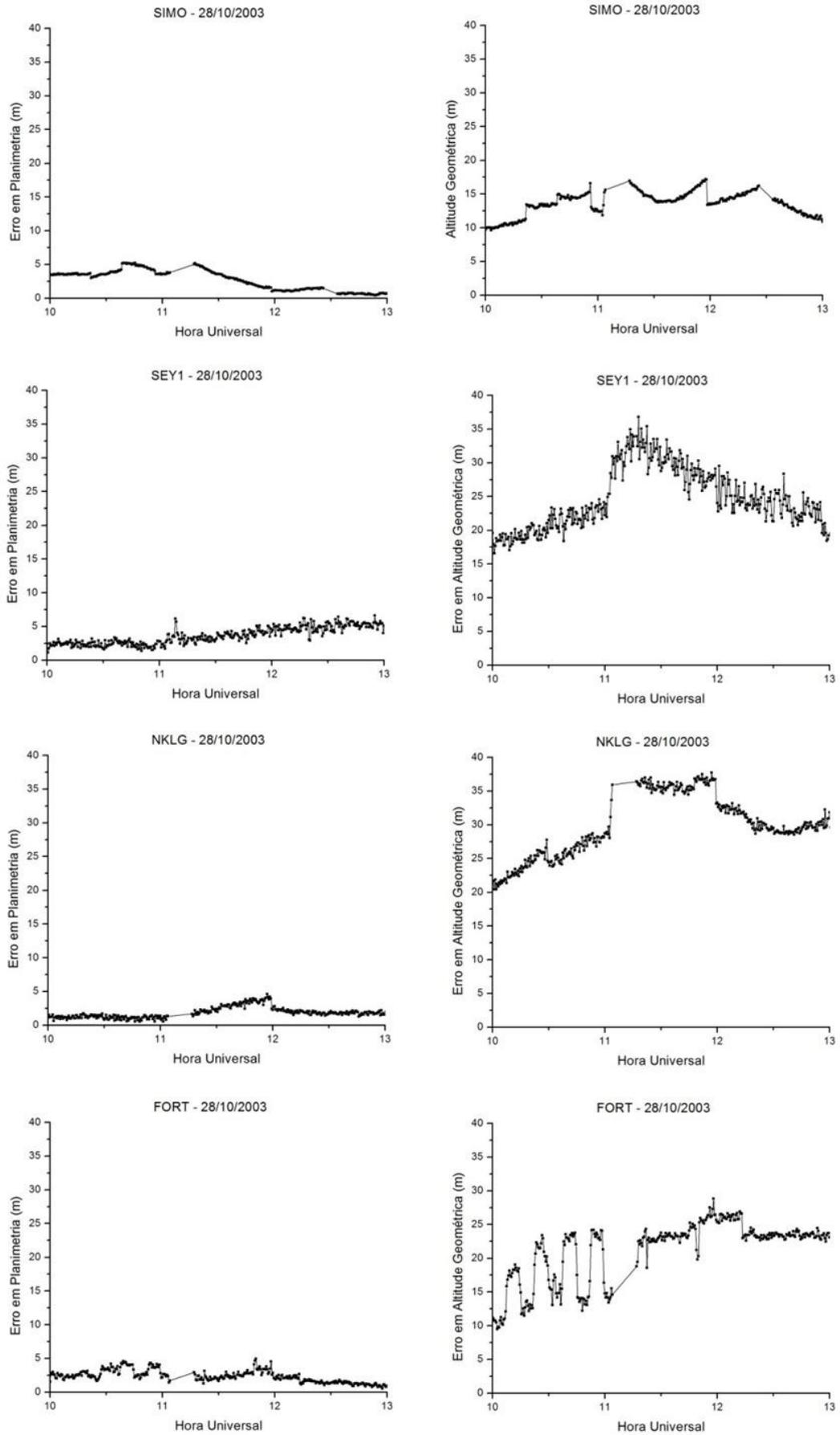


Fig.8 - Erros em planimetria e altitude geométrica das estações SIMO, SEY1, NKLG e FORT para 28/10/2003 (lado diurno).

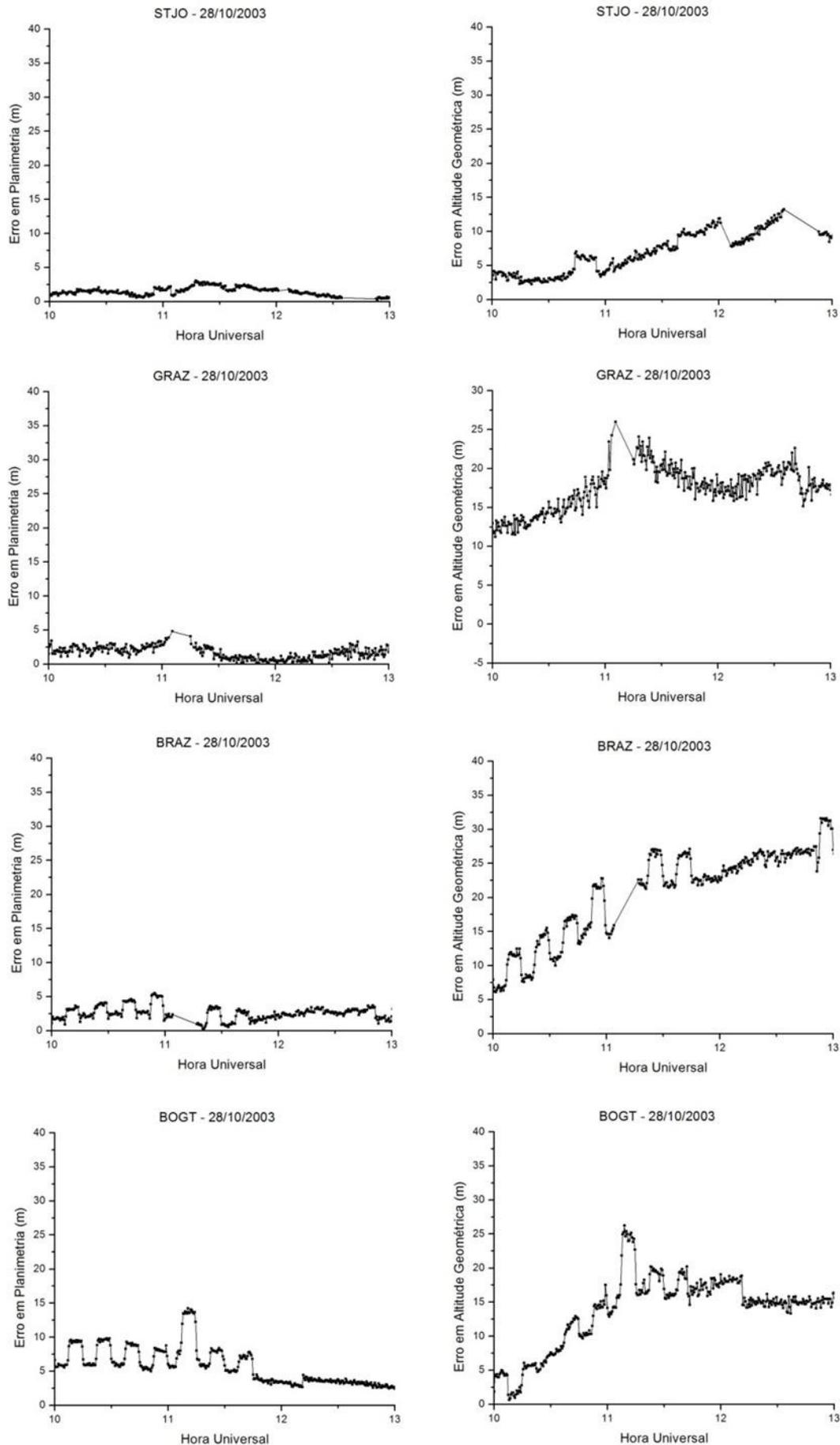


Fig. 9 - Erros em planimetria e altitude geométrica das estações STJO, GRAZ, BRAZ e BOGT para 28/10/2003 (próximo ao limite dia/noite)

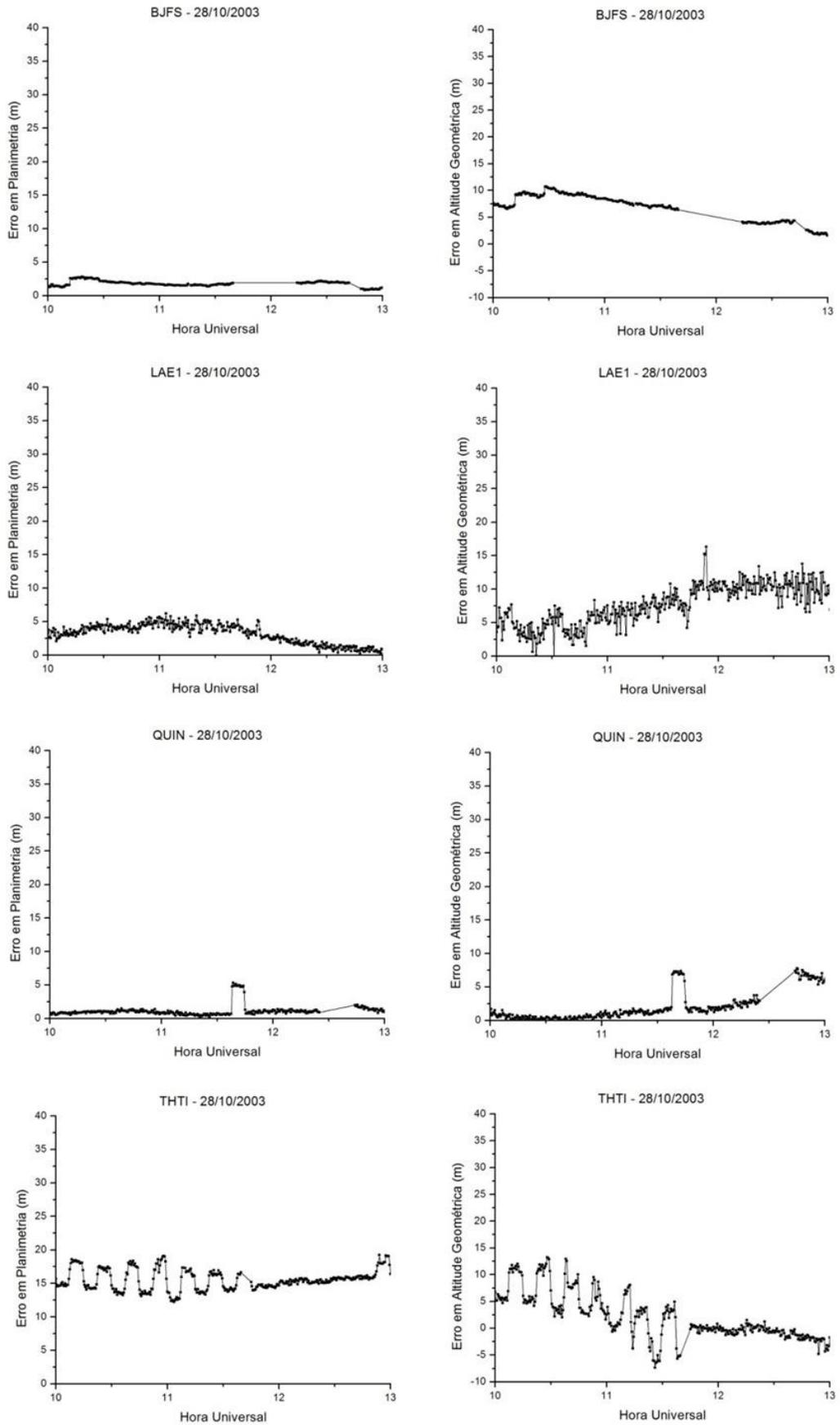


Fig. 10 - Erros em planimetria e altitude geométrica das estações BJFS, LAE1, QUIN e THTI para 28/10/2003 (lado noturno).

a uma grande quantidade de elétrons livres no equador até as cristas norte e sul.

Os gráficos de VTEC, concordando com os mapas médios do VTEC, mostraram um grande aumento na quantidade de elétrons livres na ionosfera para as estações próximas do ponto subsolar por volta das 11:00 UT, e um aumento cada vez menor conforme a estação está mais afastada do ponto subsolar; ao passo que no lado não iluminado da Terra no momento da explosão os gráficos de VTEC mostraram que a quantidade de elétrons livres não variou significativamente.

Nos resultados do posicionamento, pode-se notar que para a maioria das estações no lado iluminado da Terra e próximo dele os dados GPS não foram processados pelo software, que rejeitou algumas observações. Isso deve ser em decorrência do aumento repentino do erro nas observáveis. E para aquelas estações que foram processadas os erros aumentaram bastante, principalmente na componente vertical. Enquanto isso para as estações do lado não iluminado pelo Sol os erros em planimetria e altitude geométrica não foram influenciados pela explosão. Perdas do sinal da portadora L_2 também foram observadas durante o período. Assim, os resultados mostram uma relação direta entre a chegada da radiação eletromagnética intensificada proveniente da explosão solar com o aumento do erro no posicionamento, do valor de VTEC no lado diurno da Terra e da ocorrência de perdas do sinal.

Assim, conclui-se, com a análise dos resultados obtidos, que o posicionamento por ponto com GPS está diretamente ligado com o comportamento da ionosfera e a atividade solar, podendo o GPS auxiliar em estudos dos impactos de fenômenos solares.

A explosão solar analisada é da classe X (uma intensa explosão solar), e este estudo pode auxiliar no entendimento dos impactos de futuras explosões solares desta mesma classe. Explosões solares de menor intensidade podem vir a não causar os efeitos observados neste estudo, sendo assunto a ser investigado futuramente.

Também como investigação futura, pretende-se entender melhor a possível causa para a alta variação do erro ocorrida em diferentes estações (inclusive do lado noturno) no período anterior à intensa explosão solar.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro (Edital Universal/Proc.481339/2010-8), pela Bolsa de Iniciação Científica do primeiro autor (Proc.507594/2010-0), pela Bolsa Produtividade em Pesquisa do segundo autor (Proc. 307472/2009-4) e do terceiro autor (Proc. 306719/2010-0). Ao IBGE pelos dados da RBMC e ao IGS pelos dados de sua rede GNSS usados nesta pesquisa. Ao GSD/NRCan pelo software GPSPACE e pelos arquivos de efemérides precisas e correções precisas dos relógios dos satélites.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPLETON, E.V. Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, v.157, 691, 1946.

BATISTA, I. S. *et al.* Unusual early morning development of the Equatorial Anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, A05307, doi: 10.1029/2005JA011428, 2006.

CAMPOS, M.A.; WANNINGER, L.; SEEBER, G. Condições ionosféricas perturbadas e os sinais GPS. In: **III Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica** – Resumos Expandidos, Rio de Janeiro/RJ, p.601-604, 7 a 11 de novembro, 1993.

DAL POZ, W. R. **Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas**. 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

DAVIES, K. **Ionospheric radio propagation**. New York: Dover, 1966. 470p.

DOW, J.M.; NEILAN, R.E.; RIZOS, C.. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy*, v. 83, n. 3-4, pp. 191-198, 2009.

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.

- GOODMAN, J. M. **Space weather & telecommunications**. Alexandria: Springer, 2005. 393p.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. 1. ed. São Paulo: Nova Stella, 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.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2. ed. New York & Sons, 1995. 560p.
- LIU, Y.; HAYASHI, K. The 2003 October-November fast Halo Coronal Mass Ejections and the large-scale magnetic field structures. **The Astrophysical Journal**, n. 640, p. 1135-1141, 2006.
- MANNUCCI, A. J. *et al.* Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October-29-30, 2003 “Halloween Storms”. **Geophysical Research Letters**, v.32, 2005.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 56/01, 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, p. 315-334, 2006.
- MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. 2007. 264 p. Tese (Doutorado em ciências cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.
- McNAMARA, L. F. **The Ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- SALOMONI, C. S. **GPS e Ionosfera: Estudo do comportamento do TEC e de sua influência no posicionamento com GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar**. 2008. 166 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SALOMONI, C. S.; MATSUOKA, M.T.; SOUZA, S.F.. Efeitos de tempestades geomagnéticas no posicionamento relativo com GPS na região brasileira: estudo de caso par 29 de Outubro de 2003. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/Ed.Esp., 2011.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2. ed. New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- SKONE, S.. **GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions**. In: IGS Network Workshop, p.1-4, Oslo, 2000.
- SKONE, S.; KNUDSEN, K.; DE JONG, M.. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions. **Phys. Chem. Earth (A)**, v.26, issues 6-8, p.613-621, 2001.
- SKOUG, R. *et al.* Extremely high speed solar wind: October 29-30, 2003. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, 2004.
- TSURUTANI, B.T. *et al.* The October 28, 2003 extreme ionospheric effects: comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. **Geophysical Research Letters**, v.32, p.L03S09, 2005.
- TSURUTANI, B.T.; MANNUCCI, A. J.; IJIMA, B.; GUARNIERI, F. L.; GONZALEZ, W. D.; JUDGE, D. L.; GANGOPADHYAY, P; PAP, J. The extreme Halloween 2003 solar flares (and Bastille Day, 2000 Flare), ICMs, and result extreme ionospheric effects: A review. **Advances in Space Research**, v.37, Issue 8, p.1583-1588, 2006.
- WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A.. Use of GPS in the south of Brazil under severe

conditions. In: **IAG Symposium III**, Heidelberg, p.1-10, 1991.

WANNINGER, L.; SEEBER, G.; CAMPOS, M.A.. Limitations of GPS in equatorial regions due to the ionosphere. In: **VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, 1993.

ZHANG, H.; WANG, J.; ZHU, W. Y.; HUANG, C. Gaussian random process and its application for detecting the ionospheric disturbance using GPS. **Journal of Global Positioning System**, v.4, n.1-2, p.76-81,2005.