

Posicionamento por GPS na Região Brasileira Durante a Intensa Tempestade Geomagnética de 29 de Outubro de 2003

MARCELO TOMIO MATSUOKA¹; PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO²
& INEZ STACIARINI BATISTA³

1. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Cx. Postal 15001, CEP 91501-970. Porto Alegre/RS, Brasil.
2. Universidade Estadual Paulista, CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil
3. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, CEP 12201-970, São José dos Campos, SP, Brasil
tomio.matsuoka@ufrgs.br

(Recebido em 02/08. Aceito para publicação em 07/08)

Abstract - The error due to the ionosphere in the GPS observables depends on the Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer. The TEC varies regularly in time and space in relation to the sunspot number, the season, the local time, the geographic position, and others. However, the TEC can suffer abrupt modifications in its behavior due to the occurrence of intense magnetic storm. On 28 October 2003, at 1110 UT, a major solar flare took place from a sunspot directly in line with the Earth. A coronal mass ejection was observed to leave the Sun in the direction of the Earth, causing an intense magnetic storm that started at 0611 UT of the following day. In this paper, GPS data from RBMC and IGS network and Digisonde data were used, to analyze the influence of the intense magnetic storm that occurred on October 29, 2003 in the behavior of TEC and in the performance of the point positioning in the Brazilian region.

Keywords - Global Positioning System, TEC, Geomagnetic Storm

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 principal processo de formação de elétrons livres na ionosfera é a fotoionização, que consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na

faixa do extremo ultravioleta e raios X, por elementos atmosféricos neutros (Kirchhoff, 1991). Desta forma, o comportamento da ionosfera é extremamente influenciado pela atividade solar.

O erro devido à ionosfera nas observáveis transmitidas pelos satélites 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.

Além das variações regulares, o TEC pode sofrer abruptas modificações em seu comportamento devido, por exemplo, à ocorrência de intensas explosões solares (*solar flares*). Na ocorrência destes eventos, entre outros fenômenos, ocorre um rápido aumento do fluxo solar de radiação eletromagnética, especialmente na faixa dos raios X e extremo ultravioleta, que, se direcionado para a Terra, pode provocar uma série de fenômenos na ionosfera que genericamente são chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS) (Davies, 1990). Entre os DIS que podem ocorrer, está o rápido aumento da densidade de elétrons na ionosfera, ou seja, do TEC. Matsuoka *et al.* (2006) investigou os efeitos da explosão solar de 28 de outubro de 2003 no posicionamento por ponto com GPS na região brasileira, onde se verificou um fenômeno de DIS, que fez com que um aumento abrupto do erro posicional, bem como perdas do sinal, fossem verificados.

Um segundo fenômeno que pode ocorrer quando da ocorrência de explosões solares é a ejeção de massa coronal (CME - *Coronal Mass Ejection*) (Mcnamara, 1991). Este tipo de evento pode ocasionar perturbações no campo geomagnético, que se forem muito intensas, são denominadas tempestades geomagnéticas. Durante estes eventos os campos elétricos podem ser drasticamente alterados, produzindo também modificações na ionosfera, e conseqüentemente, podem-se esperar modificações na performance do posicionamento com GPS.

Neste artigo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos de experimentos realizados, com o objetivo de verificar a influência da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 no comportamento do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS (a partir do estudo do TEC) e no

posicionamento absoluto, usualmente chamado de posicionamento por ponto, em 4 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Por se tratar de um assunto que envolve áreas do conhecimento não tão usuais à Geodésia brasileira, uma breve revisão sobre variações da ionosfera e tempestades geomagnéticas é apresentada.

É importante destacar que os efeitos na ionosfera brasileira, decorrentes da tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003, já têm sido amplamente estudados por pesquisadores da área da Geofísica Espacial/Aeronomia (exemplos: Sahai *et al.*, 2005; Batista *et al.*, 2006; Abdu *et al.*, 2007; Rezende *et al.*, 2007).

ERRO DEVIDO À IONOSFERA NAS OBSERVÁVEIS GPS

Nesta seção uma breve descrição do erro devido à ionosfera nas observáveis GPS será apresentada. Para obter mais detalhes consultar, por exemplo, Camargo (1999), Seeber (2003), Leick (1995) e Matsuoka (2007).

Os erros 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) (Leick, 1995):

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

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (2)$$

O desenvolvimento teórico da obtenção das equações 1 e 2 pode ser consultado em Matsuoka (2007, p.85). De acordo com as equações (1) e (2) pode-se verificar que os erros devido à ionosfera

para a fase e pseudodistância são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência da portadora (L_1 ou L_2). A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado (el/m^2) e a constante 40,3 é dada em $[\text{m Hz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}]$. O erro devido à ionosfera, representado pelas expressões (1) e (2) constitui somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. Os erros remanescentes representam poucos centímetros (Seeber, 2003).

VARIAÇÕES REGULARES DO TEC

As variações temporais regulares do TEC compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos (Camargo, 1999). A variação diurna ocorre principalmente devido à iluminação do Sol, ou seja, a variação diária da 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 de baixas latitudes 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.

As estações do ano também influenciam na variação da densidade de elétrons, devido à mudança do ângulo zenital do Sol e da intensidade do fluxo de ionização, caracterizando as variações sazonais. Nos equinócios, os efeitos da ionosfera são maiores, enquanto que, nos solstícios, os efeitos são menores. Isto pode ser verificado em experimentos realizados por Matsuoka & Camargo (2004) e Matsuoka (2007). Neste trabalho foi calculado o valor do TEC com dados GPS na região brasileira para as quatro estações climáticas do ano, bem como a produção de mapas da ionosfera, e concluiu-se que nos equinócios foram registrados os maiores valores do TEC, e nos solstícios os menores. Estas conclusões também podem ser verificadas em Fonseca Junior (2002).

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. Atualmente, se está em um período de mínima ocorrência de manchas solares. Como exemplo, em Matsuoka *et al.* (2004) pode-se verificar resultados que mostram a melhora da acurácia do posicionamento absoluto com GPS na fase de declínio do número de manchas solares do ciclo 23.

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 (Camargo, 1999). As regiões equatoriais 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).

TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS/IONOSFÉRICAS

O campo magnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons na ionosfera. Na ionosfera o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado.

Além da radiação eletromagnética, o Sol

também libera um fluxo de partículas carregadas chamado de vento solar (Kirchhoff, 1991). O vento solar ocorre continuamente, confinando e distorcendo o campo magnético da Terra em uma cavidade com uma cauda longa que se estende por centenas de raios terrestres na direção anti-solar (Fedrizzi, 2003), fazendo com que o campo geomagnético se torne diferente do conhecido modelo teórico de Dipolo. Esta cavidade denomina-se magnetosfera.

As linhas de força do campo geomagnético são comprimidas do lado iluminado pelo Sol, formando uma espécie de cauda na direção anti-solar. Durante eventos solares intensificados, que por sua vez intensificam o vento solar, a velocidade do vento solar pode passar de 400-300 para 1000 km/s ou até mais. Dependendo da intensidade da perturbação, o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) é comprimido, podendo passar de 10 para 6 raios terrestres (Fedrizzi, 2003). Em outras palavras, eventos solares são responsáveis pela alteração dos parâmetros do vento solar (velocidade e densidade). Conseqüentemente, ocorre uma alteração do campo geomagnético, que, por sua vez, contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas, implicando em uma tempestade ionosférica.

Tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas solares: explosões solares (*solar flares*), corrente de vento solar de alta velocidade (HSSWS - *High Speed Solar Wind Stream*) provenientes de buracos na coroa (coronal holes) e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDFs - *Sudden Disappearing Filaments*) (Mcnamara, 1991). Um exemplo das taxas de ocorrência de cada um desses eventos solares para o período de 1970 a 1983 é mostrado na figura 1, bem como o número de manchas solares para fins de comparação. Nela verifica-se que as explosões solares e os SDFs ocorrem mais freqüentemente durante períodos de alta atividade solar e os buracos na coroa, que são as fontes das HSSWS, ocorrem principalmente durante a fase de declínio do número de manchas solares.

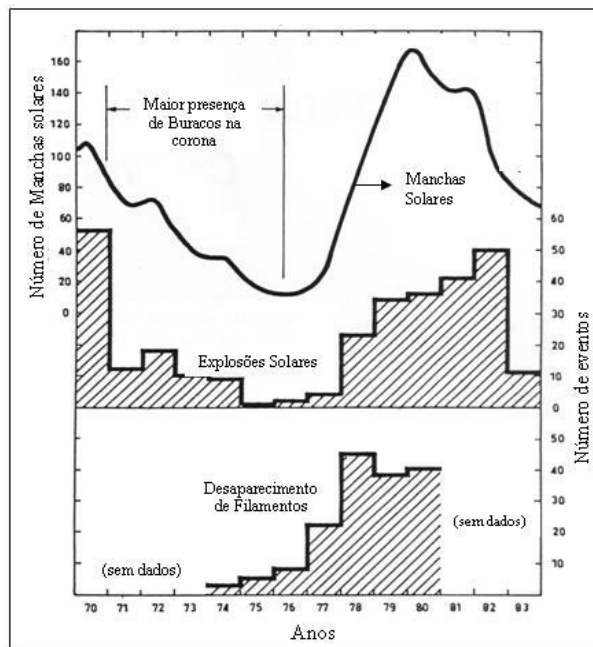


Figura 1 - Taxas de ocorrência dos três eventos solares que provocam alterações na ionosfera, entre 1970 e 1983. Fonte: adaptada de McNamara (1991).

As tempestades geomagnéticas mais intensas são ocasionadas devido ao evento de explosão solar, o qual será descrito neste artigo. Detalhes dos outros eventos solares (HSSWS e SDF) podem ser obtidos, por exemplo, em McNamara (1991) e Matsuoka (2007).

As explosões solares ocorrem em regiões do Sol denominadas ativas onde se concentram as manchas solares (Mcnamara, 1991). Vale salientar, que a predição de qual região ativa gerará intensas explosões solares que afetarão a ionosfera ainda não é uma ciência exata (Mcnamara, 1991). Inclusive, NASA (2006) salienta que uma predição confiável sobre quando ocorrerá uma explosão solar faz parte dos mistérios a respeito do Sol. A duração de uma explosão solar pode durar de 3 minutos até várias horas, sendo o tempo médio de aproximadamente 30 minutos (Davies, 1990).

Durante as explosões solares um primeiro fenômeno que ocorre é o aumento da radiação solar eletromagnética na faixa do comprimento de onda dos raios X (Mcnamara, 1991). Isto provoca, em poucos minutos após a ocorrência do fenômeno, um aumento muito rápido na ionização (pelo processo de fotoionização) em alturas da ionosfera em torno

de 80 km, no lado iluminado da Terra. Uma intensa explosão solar pode aumentar a densidade de elétrons da camada D em 10 vezes (Mcnamara, 1991). Este aumento de ionização dá origem a uma série de fenômenos denominados genericamente de “Distúrbios Ionosféricos Súbitos”, no qual afetam a propagação de ondas eletromagnéticas que podem ser muito atenuadas. McNamara (1991) denomina um dos efeitos causados por esse rápido aumento de ionização na camada D de “enfraquecimento de ondas curtas” (*short-wave fadeout*). O aumento da densidade de elétrons na região D ocorre apenas alguns minutos após a ocorrência da explosão solar, e dura da ordem de 1,5 horas. Segundo Leonovich *et al.* (2001), um aumento súbito da densidade de elétrons na camada F também pode ser esperado. Sandford (1999) enfatiza que durante eventos de DIS podem ocorrer rápidas variações na amplitude e fase (cintilação ionosférica) dos sinais GPS, prejudicando a performance de rastreamento do receptor, que podem ocasionar, inclusive, em perdas de sinal. Vale salientar, que um estudo dos efeitos no posicionamento com GPS na região brasileira devido ao repentino aumento da radiação eletromagnética associada à explosão solar de 28 de outubro de 2003 foi apresentado pelos autores em Matsuoka *et al.* (2006).

Se a explosão solar for muito intensa, tem-se um segundo fenômeno: a ejeção de uma “nuvem” de plasma, também conhecido como ejeção de massa coronal (CME - Coronal Mass Ejection) (Davies, 1990; McNamara, 1991; Komjathy, 1997). Os parâmetros do vento solar são drasticamente intensificados durante tal fenômeno. Sua densidade pode passar de 10^6 para 10^7 partículas/m³, e sua velocidade de 400-300 km/s pode chegar a 1000 km/s ou até mais. Se essa nuvem de plasma proveniente da explosão solar atingir a Terra, poderá causar uma tempestade geomagnética que afetará drasticamente o comportamento do TEC (Mcnamara, 1991). O início da tempestade geomagnética se dará várias horas após a ocorrência da CME, dependendo de quanto foi a intensificação da velocidade do vento solar. Os deslocamentos mais rápidos de CME que se têm registrado ocorreram em 4 de agosto de 1972 (14,6 horas), 2 de setembro de 1859 (17,5 horas) e 28 de outubro de 2003 (19 horas) (Skoug *et al.*, 2004). Felizmente, poucas intensas explosões solares afetam a Terra. Para se ter uma idéia, de 2000 a 2006

apenas 19 dias estiveram sobre a influência de tempestades geomagnéticas classificadas como muito intensas (Matsuoka, 2007).

Durante eventos de tempestades geomagnéticas, o comportamento da anomalia equatorial de ionização pode ser drasticamente afetado. O desenvolvimento da anomalia equatorial depende diretamente da intensidade e direção do campo elétrico zonal sobre o equador geomagnético que em combinação com o campo geomagnético gera o efeito fonte (Abdu *et al.*, 1991). Aos interessados, comentários gerais sobre a anomalia equatorial de ionização e efeito fonte são apresentados, por exemplo, em Davies (1990), McNamara (1991), Matsuoka (2007).

Informações a respeito das condições atuais da atividade solar e de previsões de possíveis explosões solares e tempestades geomagnéticas podem ser obtidas no endereço eletrônico: <http://www.spaceweather.com/>.

Índices Geomagnéticos

Índices Geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2007). Os índices geomagnéticos mais frequentemente utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas são os índices: “*Disturbance Storm-Time*” (Dst), “*Planetarische Kennziffer*” ou índice planetário (Kp) e “*Auroral Electrojet*” (AE) (Fedrizzi, 2003).

Antes de definir o índice Kp, é necessário definir o índice K, pois, a partir deste obtém-se o índice Kp. O K é um índice local que consiste em um único dígito de 0 a 9 para cada intervalo de 3 horas e é gerado com medidas de um único local de observação geomagnética. O índice planetário Kp é obtido a partir da média aritmética dos índices K medidos em 13 observatórios entre as latitudes de 46° e 63° N e 46° e 63° S em relação ao equador geomagnético (Oliveira, 2003). O índice Kp possui intervalos de 3 horas (8 valores diários) e está distribuído em 28 níveis que variam de 0 a 9 e é expresso em terços de uma unidade (Fedrizzi, 2003).

Para estudos de longo período é conveniente definir um único índice médio por dia. Em função da natureza logarítmica dos índices Kp, é mais difícil trabalhar com médias dos mesmos. Por isso, foram criados índices lineares, como o índice ap, composto de oito valores diários. O índice Ap é a média dos oito valores diários de ap. Valores publicados de Kp e Ap podem ser obtidos nos seguintes endereços eletrônicos:

<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>;
<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap>.

A atividade geomagnética é classificada de acordo com Kp e Ap como mostrada na tabela 1 (Batista, 2003).

Tabela 1 - Classificação da atividade geomagnética em função de Kp e Ap.

<i>Atividade Geomagnética</i>	<i>Índice e Kp</i>	<i>Índice Ap</i>
Calma	0-2	< 8
Transição	3	8-15
Ativo	4	16-29
Tempestade Fraca	5	30-49
Tempestade Intensa	6	50-99
Tempestade muito intensa	7-9	100-400

Fonte: Batista (2003)

O índice Dst (dado em nanoTesla - nT) representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (Yamashita, 1999). É a partir desse parâmetro que se melhor define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. Antes do início da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por “fase inicial” ou “início súbito”. Após esse pico, desenvolve-se a “fase principal” da tempestade, que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice. Após alcançar o mínimo, o índice começa a subir de valor, cuja fase é conhecida como “fase de recuperação”, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade

(Yamashita, 1999). Valores publicados do índice Dst podem ser encontrados no endereço eletrônico:

<http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>.

A classificação de uma tempestade geomagnética em função do índice Dst é dada de acordo com a tabela 2 (Fedrizzi, 2003).

Tabela 2 - Classificação de uma tempestade geomagnética

<i>Condição da Tempestade Geomagnética</i>	<i>Valor do índice Dst (nT)</i>
Fraca	-30 nT a -50 nT
Moderada	-50 nT a -100 nT
Intensa	-100 nT a -250 nT
Muito Intensa	< -250 nT

Fonte: Fedrizzi (2003)

EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

No dia 28 de outubro de 2003, entre 11:00 e 11:30 UT (*Universal Time* – Hora Universal) (08:00 - 08:30 HL - Hora Local no meridiano de 45° W), aproximadamente, uma intensa explosão solar (*solar flare*) ocorreu diretamente na direção da Terra, aumentando instantaneamente o fluxo solar de radiação eletromagnética. 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), e a maior do Ciclo Solar 23. Subseqüentemente, além do aumento da radiação eletromagnética, observou-se a ocorrência de uma ejeção de massa coronal (CME), lançando um fluxo de vento solar intensificado em direção à Terra. Medidas realizadas pela espaçonave ACE (*Advanced Composition Explorer*) indicaram uma velocidade do vento solar intensificado de aproximadamente 1850 km/s, bem acima da velocidade padrão (400-300 km/s). Como consequência, com a chegada da CME, às 06:11 UT (03:11 HL) do dia seguinte (29/10/2003), iniciou-se

uma intensa tempestade geomagnética, aproximadamente 19 horas após a ocorrência da CME (Skoug *et al.*, 2004). Vale comentar que estudos do efeito do aumento repentino do fluxo solar de radiação eletromagnética associada à explosão de 28 de outubro de 2003, no comportamento da ionosfera e no posicionamento por ponto com GPS na região brasileira, já foram realizados por Matsuoka *et al.* (2006). Também, experimentos relacionados ao impacto da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro no comportamento da ionosfera na região brasileira no período da manhã podem ser verificados em Batista *et al.* (2006). Neste artigo os experimentos estarão focados no período da tarde/noite referente à intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003.

A figura 2 mostra os valores dos índices geomagnéticos Kp e Dst para o dia 29 de outubro de 2003.

Na figura 2 pode-se verificar a partir dos índices Kp e Dst a ocorrência de uma tempestade geomagnética muito intensa no dia 29 de outubro, iniciando-se por volta das 6 UT o aumento do índice Kp e o decréscimo do índice Dst. O índice Kp atingiu o valor máximo em sua escala (9) e o Dst obteve um valor mínimo de -345 nT. O valor do índice Ap para o dia 29 de outubro foi de 204, o que também o classifica como sendo um dia com

“tempestade geomagnética muito intensa”.

Os experimentos que foram realizados utilizaram dados GPS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e da rede IGS (*International GNSS Service*) da América do Sul, e dados de Digissondas (Ionossondas Digitais) localizadas em São Luís ($\cong 3^{\circ}\text{S}$; 44°W) e Cachoeira Paulista ($\cong 22^{\circ}\text{S}$; 45°W).

A figura 3 mostra os valores dos parâmetros ionosféricos, altura de pico da camada F2 (hmF2) e frequência crítica de F2 (foF2), para o dia 29 de outubro de 2003 e, também, mostra valores médios advindos de dias geomagneticamente calmos para o mesmo mês, visando à comparação. Esses valores são advindos de ionogramas (15 minutos de resolução temporal) registrados pelas Digissondas localizadas em São Luís (SL) e Cachoeira Paulista (CP) que são regiões próximas do equador geomagnético e do pico (crista) da anomalia equatorial, respectivamente. Sabendo-se que este artigo trata de alguns temas não usuais da Geodésia, aos que desconhecem o assunto Digissonda e os parâmetros ionosféricos dela derivados, sugere-se consultar Matsuoka (2007) que apresenta um resumo sobre o tema. Aos que desejarem um maior aprofundamento pode-se consultar McNamara (1991) e Davies (1990).

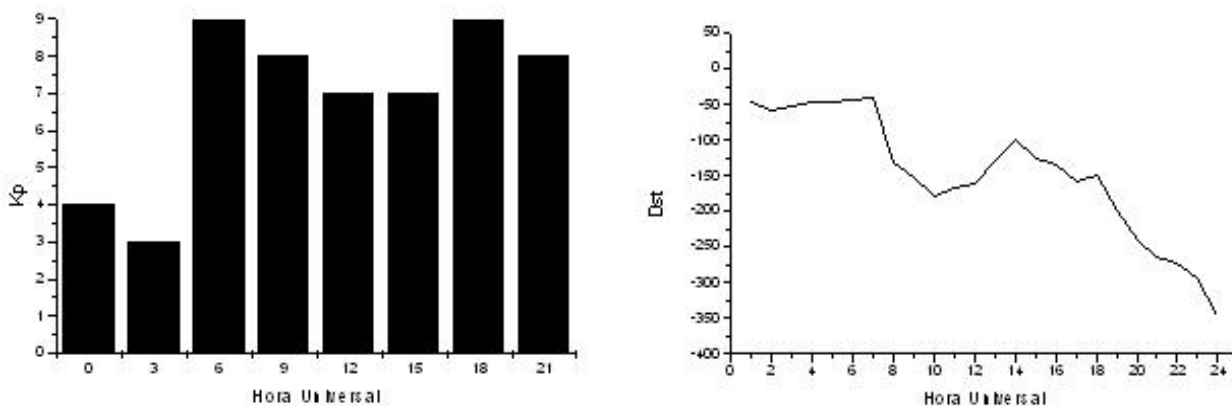


Figura 2 - Índices geomagnéticos Kp e Dst para 29 de outubro de 2003.

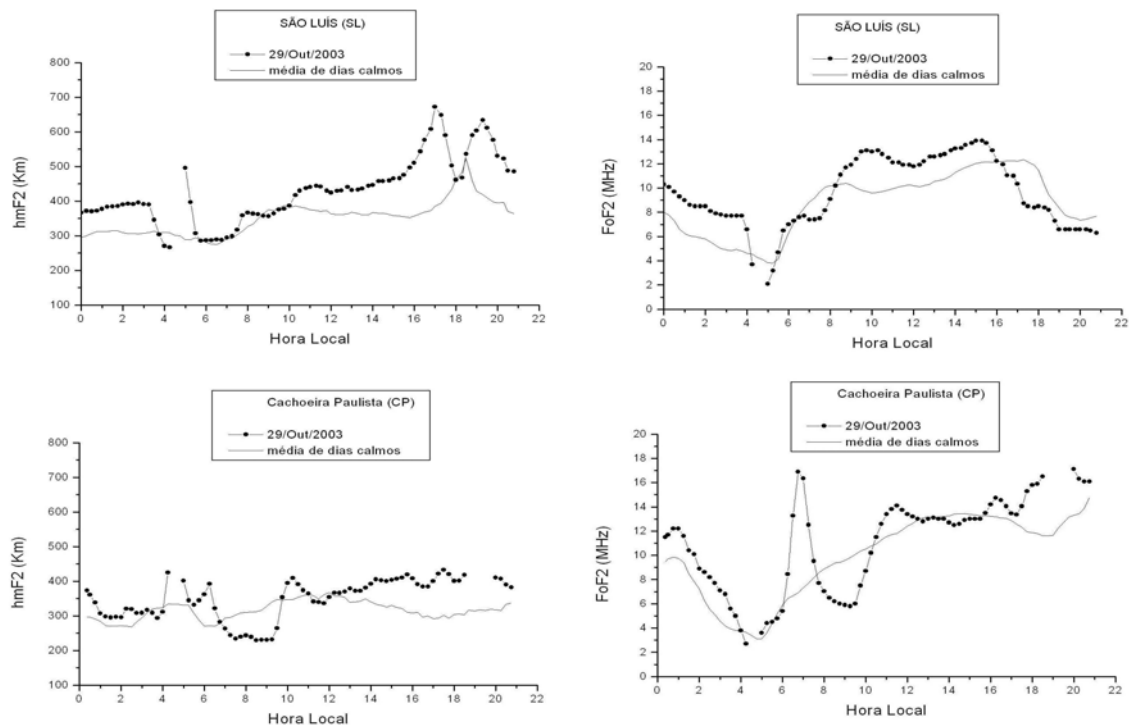


Figura 3 - Altura de pico (hmF2) e frequência crítica (foF2) para SL e CP para o dia 29 de outubro de 2003 e valores médios de dias geomagneticamente calmos para o mesmo mês.

Os fenômenos ocorridos no período da manhã de 29 de outubro já foram discutidos e analisados em Batista et al. (2006), limitando-se este presente artigo a analisar o período da tarde/noite. Dessa forma, analisando a figura 3, concentrando a atenção para o período após as 12 HL, verifica-se que no período entre 12 e 16 HL, aproximadamente, os valores de foF2 em SL são maiores no dia da tempestade quando comparados aos valores médios de dias calmos. Já para CP neste período os valores de foF2 para CP são praticamente iguais aos de dias geomagneticamente calmos. Após esse horário, observa-se no dia da tempestade um rápido aumento e uma posterior diminuição na altura hmF2 na estação equatorial de SL. Novamente, às 18 HL, aproximadamente, esse mesmo acontecimento é observado. Já os valores da frequência crítica foF2 para SL, que até então eram maiores do que para dias calmos, após as 16 HL tornaram-se menores, permanecendo assim até o final do dia. Em CP, os valores de foF2 para o dia da tempestade, que até então estavam praticamente iguais aos de dias

calmos, ficaram maiores e permaneceram assim até o final do dia. Entre 18:45-19:45 HL, aproximadamente, tem-se a ausência de registros para CP devido a possíveis problemas técnicos.

A análise realizada anteriormente aponta alguns fatos interessantes. Primeiramente, verifica-se que possivelmente houve um aumento da densidade de elétrons nas regiões próximas do equador geomagnético durante o período da tarde do dia que ocorreu a tempestade (foF2 de SL – fig. 3). Às 19:30 HL, aproximadamente, um pico em hmF2 em SL é observado, mostrando que possivelmente houve uma intensificação da deriva vertical do plasma ionosférico na região equatorial quando comparada a dias calmos e, em consequência do efeito fonte intensificado, ocorreu um deslocamento dos elétrons para regiões ainda mais afastadas do equador geomagnético. Essa possível intensificação da elevação do plasma ionosférico na região do equador geomagnético, faz com que as cristas norte e sul da anomalia equatorial desloquem-se para regiões com latitudes mais afastadas do equador do

que em dias geomagneticamente calmos.

Outro fato é que, como houve um aumento na densidade de elétrons na região equatorial durante o período da tarde, espera-se também, devido ao efeito fonte, um aumento na densidade de elétrons nas regiões das cristas da anomalia equatorial após as 16 HL quando comparada a de dias geomagneticamente calmos. Essas observações foram possíveis de ser verificadas também nos experimentos realizados com dados GPS que se mostraram em concordância com os resultados advindos das Digissondas, e que serão vistos na seqüência. Observa-se também na figura 3 que por volta das 17 HL ocorreu um aumento dos valores de hmF2 para SL. Porém, vale ser comentado que, embora hmF2 tenha aumentado por volta das 17 HL em SL, a base inferior da camada F2, ao contrário, não se elevou. Isto mostra que houve uma elevação do plasma ionosférico somente na região de altura de pico da densidade de elétrons da camada F2. Por outro lado, o pico de hmF2 ocorrido por volta das 19:30 HL em SL, que foi comentado anteriormente,

também foi acompanhado da elevação da base inferior da camada F2, mostrando a elevação do plasma ionosférico da camada F2 na região próxima ao equador geomagnético, caracterizando o efeito de um campo elétrico dirigido para leste e a conseqüente intensificação do efeito fonte. Estas conclusões foram obtidas a partir da verificação do comportamento do parâmetro h'F (altura virtual da base da camada F) derivado também de ionogramas da Digissonda de SL para 29 de outubro. Aos interessados, o gráfico de h'F para SL pode ser verificado em Batista *et al.* (2006).

Para verificar o comportamento do TEC na região brasileira foram utilizados os dados das estações GPS da RBMC e algumas estações da rede IGS da América do Sul. A metodologia que foi empregada para obtenção do TEC a partir de dados GPS é a mesma apresentada em Matsuoka & Camargo (2004). A figura 4 mostra a localização das estações GPS da RBMC e da rede IGS da América do Sul cujos dados GPS foram utilizados no experimento.



Figura 4 - Estações da RBMC e IGS (América do Sul).

A figura 5 apresenta mapas de VTEC (*Vertical TEC* - TEC na direção vertical) do período da tarde/noite para os dias 29 e 28 de outubro de 2003, visando comparar a modificação no comportamento do VTEC no dia da tempestade geomagnética em comparação ao dia anterior. A unidade de VTEC apresentada nos mapas é TECU (*TEC Unit* - Unidade de TEC), sendo 1 TECU =

1016 elétrons/m² = 0,16 m de erro nas distâncias medidas em L1 e 0,27 m em L2. Vale salientar que o TEC é facilmente convertido em erro na distância medida pela fase e/ou código, usando as equações (1) e (2), respectivamente. O dia 28 de outubro foi classificado, segundo a atividade do campo geomagnético, como “Ativo”, mas sem tempestade geomagnética, apresentando índice Ap igual a 25.

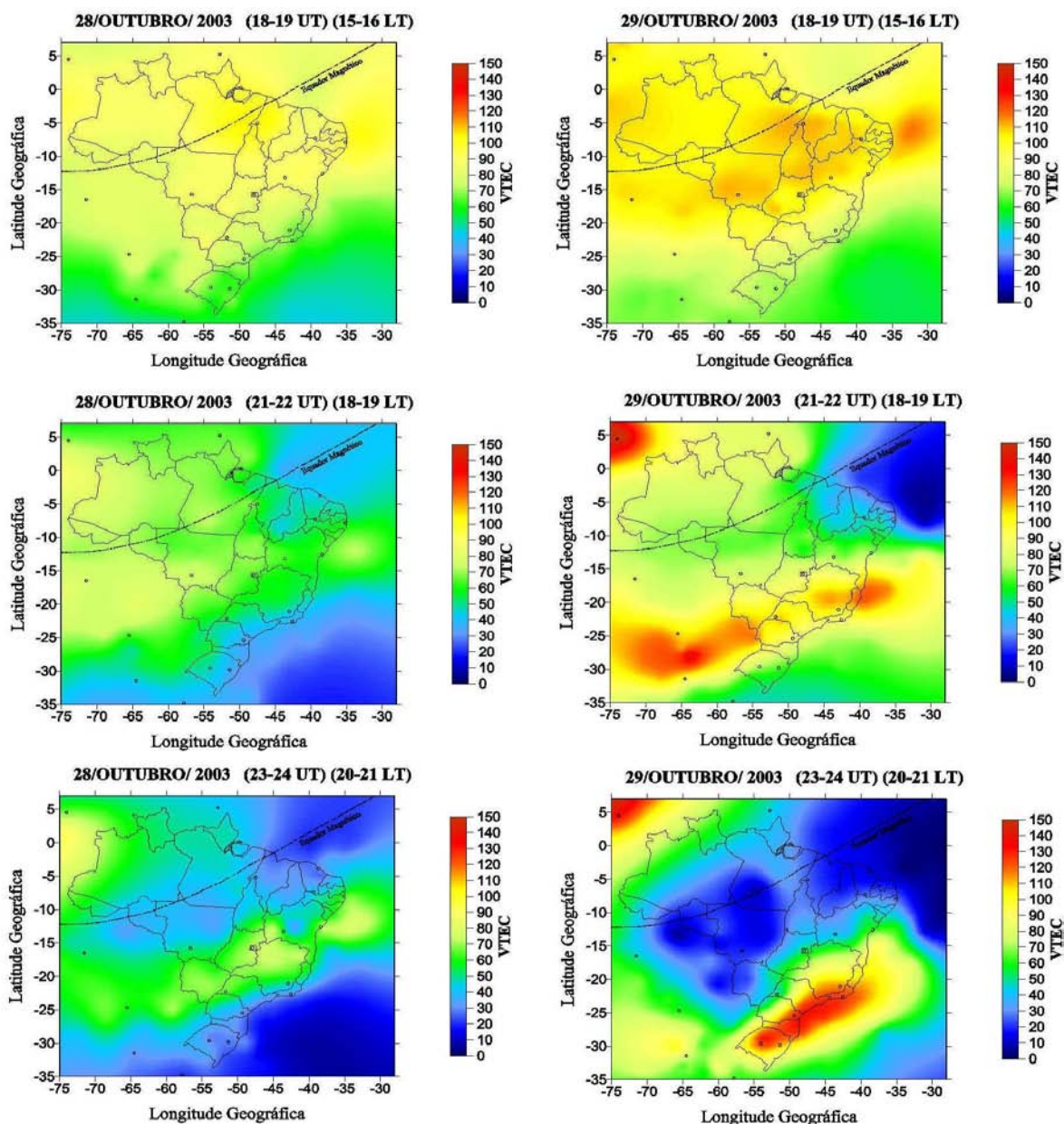


Figura 5 - Mapas do VTEC para 28 e 29 de outubro de 2003 - período da tarde/noite.

Verificando a figura 5 podem-se analisar as modificações no comportamento do TEC ocorridas no dia da tempestade para o período da tarde e para o do segundo pico da anomalia equatorial noturna que normalmente ocorre no mês de outubro. Primeiramente, comparando os mapas do período das 15-16 HL pode-se notar que, no dia da tempestade, ocorreu um aumento do VTEC, principalmente nos locais mais ao norte do país, ou seja, mais próximos ao equador. Comparando os mapas das 18-19 HL nota-se o aumento do VTEC nas regiões mais ao sul e o início da diminuição do VTEC na região equatorial, em outras palavras, observa-se a formação da anomalia equatorial de ionização, comum no mês de outubro. A partir de então dois fatos se destacam: 1) Comparando-se o mapa seguinte (20-21 HL) percebe-se um deslocamento da crista da anomalia equatorial para latitudes mais afastadas da região equatorial. Como exemplo, basta comparar nos mapas os valores do VTEC na região do Estado do Rio Grande do Sul entre os dias 28 e 29 de outubro; 2) Outro acontecimento, que é possível de se observar comparando-se os mapas, é o aumento do VTEC na região de crista da anomalia equatorial, bem como a diminuição do VTEC nas regiões mais próximas ao equador que ocorreu no dia da tempestade em comparação ao dia anterior, aumentando ainda mais a variação espacial do VTEC na direção norte-sul no dia da tempestade. É importante salientar que, a partir dos mapas, pode-se analisar somente a crista sul da anomalia equatorial. Na seqüência é apresentada a figura 6 que visa mostrar a comparação entre os mapas de VTEC do dia 29 de outubro de 2003 com um dia geomagneticamente calmo do mesmo mês (dia 11, $A_p=2$).

Analisando a figura 6, comparando-se o dia 29 de outubro de 2003 com um dia geomagneticamente calmo do mesmo mês (dia 11) as diferenças verificadas anteriormente no comportamento do VTEC pela análise da figura 6 ficam ainda mais evidentes.

O aumento do VTEC e o deslocamento da crista sul da anomalia equatorial para regiões mais afastadas do equador, que foram observados no dia 29 de outubro de 2003 na região brasileira, também já foram verificados em outros dias de tempestade geomagnética do ciclo solar 23. Pode-se consultar o trabalho realizado por Fedrizzi (2003) que estudou

as tempestades ocorridas nos dias 15 de julho de 2000 e 31 de março de 2001.

Como exemplo de outros trabalhos que estudaram os efeitos da tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 com dados GPS em outras regiões do globo terrestre, pode-se citar os experimentos realizados por Skone *et al.* (2004). Os experimentos realizados mostraram o aumento do VTEC em algumas regiões dos Estados Unidos no período do segundo pico da anomalia equatorial, principalmente na parte mais ao sul dos Estados Unidos. Isso se deve principalmente ao deslocamento da crista norte da anomalia equatorial (mais detalhes em Skone *et al.* (2004).

Dando continuidade aos resultados, foram realizados alguns experimentos para verificar o comportamento do erro do posicionamento por ponto (absoluto) com GPS no período da tarde/noite do dia 29 de outubro de 2003, período em que, como visto, mudanças no comportamento do TEC foram verificadas. Para fins de comparação, também foi realizado o posicionamento por ponto para o dia 11 do mesmo mês (dia geomagneticamente calmo). Utilizaram-se os dados GPS das estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT (ver localização na figura 4).

Para realizar o posicionamento por ponto (absoluto), os dados das quatro estações foram processados no programa GPSPACE (*GPS Positioning from ACS Clocks and Ephemerides*) desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*). Este programa possibilita realizar o posicionamento por ponto preciso utilizando pseudodistâncias (detalhes em NRCan, 1997). No processamento utilizaram-se, como observáveis, as pseudodistâncias advindas do código C/A em L1 coletadas de satélites com ângulo de elevação superior a 15 graus. As efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, geradas pelo GSD/NRCan, foram incluídas no processamento. Para garantir uma boa geometria dos satélites, foi adotado para a diluição de precisão (GDOP), valor menor ou igual a 7. Para correção do erro troposférico adotou-se o modelo de Hopfield. As posições foram estimadas a cada 30 segundos. As coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas conhecidas das estações, obtendo-se as discrepâncias em planimetria e em altitude geométrica.

As figuras 7 e 8 mostram o comportamento

da discrepância das coordenadas planimétricas e altimétricas, respectivamente, para as estações

POAL, UEPP, BRAZ e CRAT para o período da tarde/noite dos dias 11 e 29 de outubro de 2003.

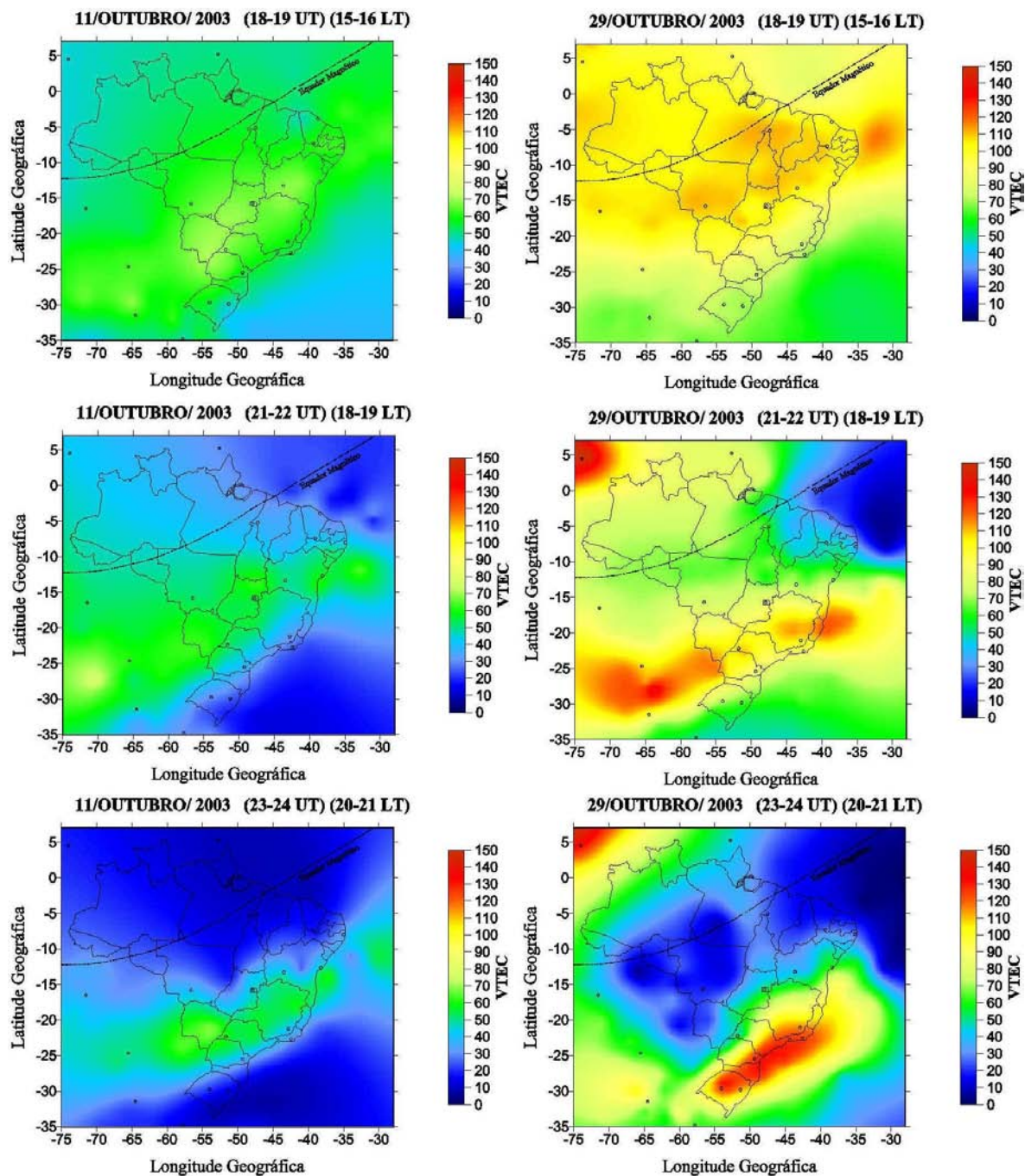


Figura 6 - Mapas do VTEC para 11 e 29 de outubro de 2003 - período da tarde/noite.

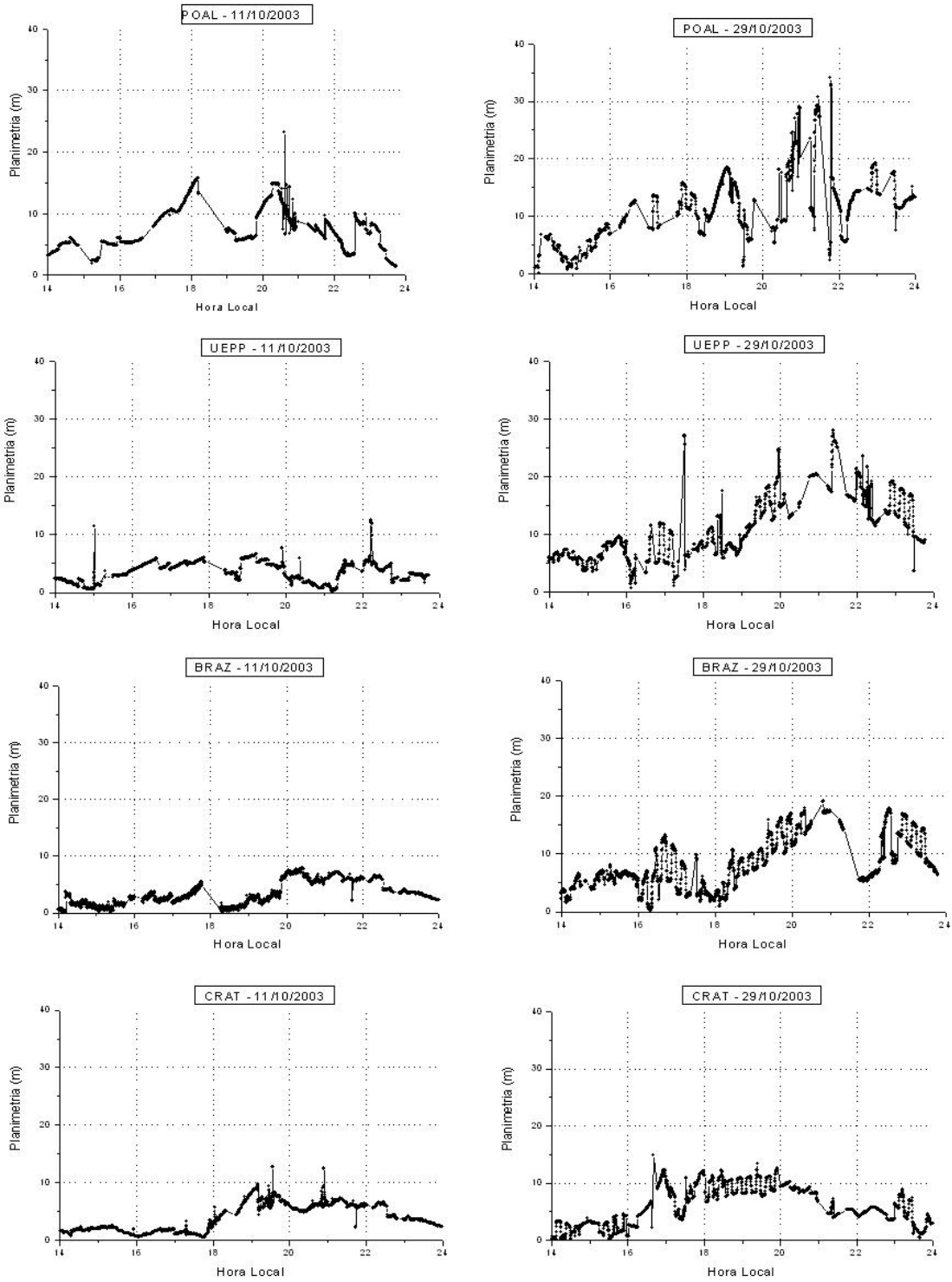


Figura 7 - Discrepâncias planimétricas – Posicionamento por Ponto (absoluto) - 14 - 24 HL - 11 e 29 de outubro de 2003 - POAL, UEPP, BRAZ e CRAT.

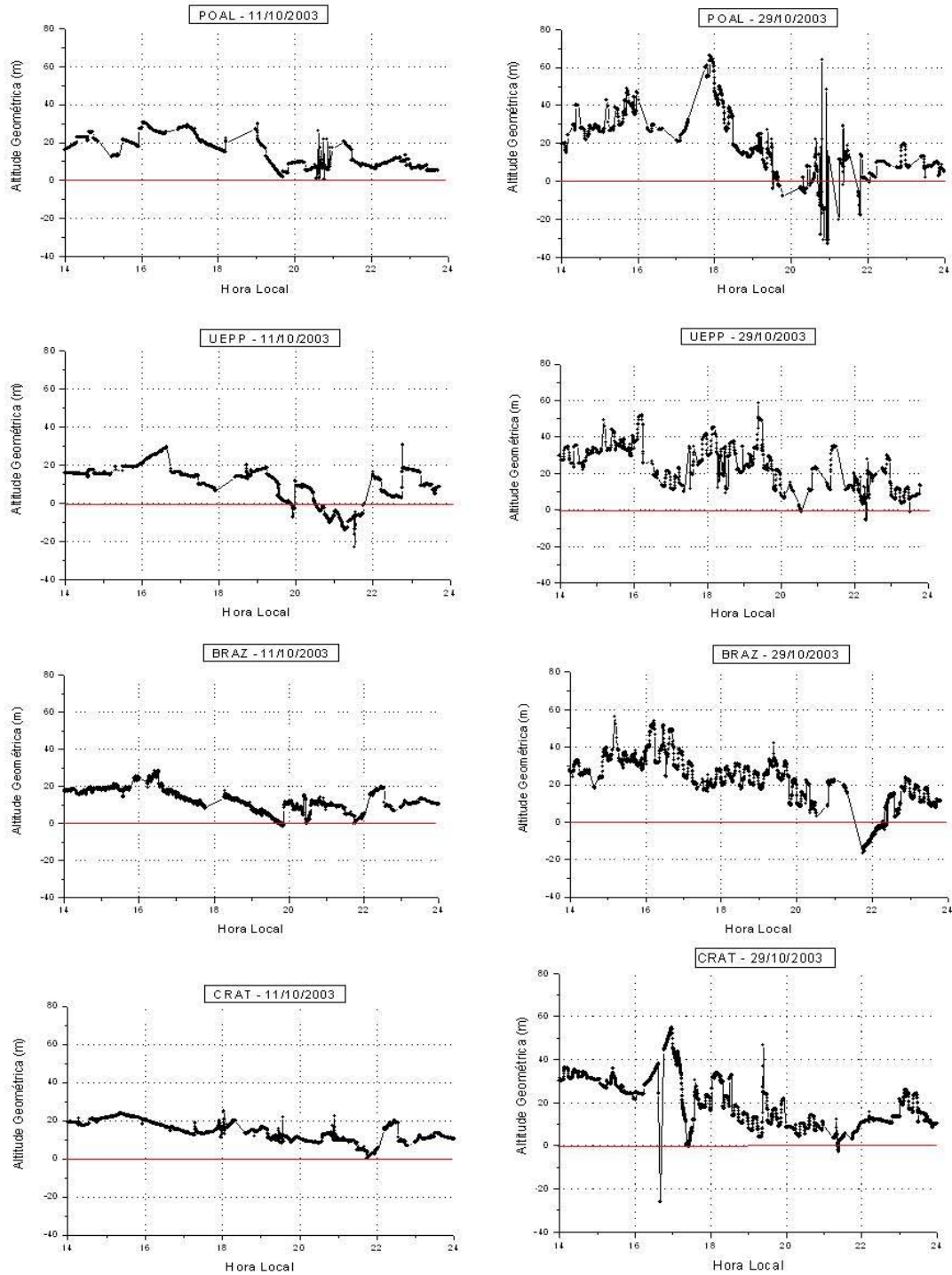


Figura 8 - Discrepâncias em altitude geométrica - Posicionamento por Ponto (absoluto) - 14 - 24 HL - 11 e 29 de outubro de 2003 - POAL, UEPP, BRAZ e CRAT.

Analisando os gráficos das figuras 7 e 8 verifica-se que o erro devido à ionosfera, que contamina as pseudodistâncias, influencia mais a determinação em altitude geométrica do que a

posição planimétrica. Isso já era esperado e já foi observado em outros trabalhos (ex: El Gizawy, 2003; Matsuoka & Camargo, 2003), e tem relação com a geometria dos satélites, que favorece a determinação planimétrica.

Quanto às modificações ocorridas decorrentes das perturbações da ionosfera devidas à tempestade geomagnética, pode-se verificar claramente que, no dia 29, houve um aumento da variação temporal da discrepância planimétrica e altimétrica para as quatro estações GPS. Em outras palavras, no dia da tempestade observa-se uma variação temporal irregular das discrepâncias altimétrica e planimétrica quando comparada ao dia geomagneticamente calmo. Além disso, de uma maneira geral, observam-se discrepâncias maiores no dia da tempestade.

Em uma análise mais detalhada, concentrando primeiramente na discrepância planimétrica (fig. 7), pode-se verificar que as maiores variações e magnitudes, decorrente da tempestade geomagnética, ocorreram para a estação POAL, com destaque para o período entre 20 e 22 HL. Para as estações UEPP, BRAZ e CRAT também se observa uma variação temporal irregular do erro quando comparadas a do dia calmo, além de discrepâncias maiores em quase todo o período.

Quanto à discrepância em altitude geométrica (Fig. 8) pode-se verificar que, para todas as estações GPS uma alta variação temporal da discrepância erro ocorreu no dia da tempestade, além de valores maiores na maior parte do tempo, quando comparada ao dia de atividade geomagnética calma. Como períodos de grande destaque, podem-se citar: o próximo às 18 e 21 HL, aproximadamente, para a estação POAL; o próximo às 19:30 HL para UEPP e CRAT; e o próximo às 17 HL para CRAT. O aumento da discrepância no período da tarde evidencia a influência do aumento do VTEC que ocorreu no dia da tempestade neste mesmo período, como foi verificado nas figuras 5 e 6. A significativa variação temporal da discrepância verificada em destaque para POAL às 21 HL, aproximadamente, mostra o possível efeito decorrente do deslocamento, para regiões mais

afastadas do equador, do segundo pico intensificado da anomalia equatorial noturna, ocorrido no dia da tempestade. Porém, de fato, um comportamento temporal irregular da discrepância em altitude geométrica é verificado em todas as estações GPS no dia da tempestade em praticamente todo o período analisado, mostrando a influência da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 no posicionamento por ponto com GPS.

Como já foi informado, nos endereços eletrônicos <http://www.spaceweather.com/> ou <http://www.sidc.be/index.php>, pode-se obter informações a respeito das condições atuais e previsões da atividade geomagnética, bem como, da ocorrência de explosões solares. Neste sentido, se o usuário tiver conhecimento que ocorreu uma intensa explosão solar e que ela afetará drasticamente o campo geomagnético, ele saberá que uma tempestade geomagnética muito intensa deverá ocorrer após algumas horas, e que possivelmente afetará o posicionamento com GPS.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Neste artigo foi estudado o impacto da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003 (período da tarde/noite) no comportamento do VTEC e a influência na performance do posicionamento por ponto (absoluto) na região brasileira. Foram utilizados valores de VTEC advindos do processamento dos dados GPS das estações da RBMC e IGS. Também, dados de Digisondas (foF2 e hmF2) foram incluídos nas análises. Os resultados mostraram um aumento do VTEC na região brasileira no período da tarde, principalmente em regiões próximas ao equador, e um deslocamento e aumento de VTEC da crista da anomalia equatorial para latitudes mais afastadas do equador no período pós pôr do Sol. As análises realizadas com os dados de Digisondas estão também de acordo com as conclusões citadas anteriormente, mostrando a concordância entre a análise advinda de dados GPS e de Digisonda.

Uma análise do impacto dessas

modificações do VTEC no posicionamento por ponto com GPS foi realizada. Foram processados os dados GPS do dia 29 de outubro de 2003 das estações POAL, UEPP, BRAZ e CRAT. Para fins de comparação foram processados os dados para um dia geomagneticamente calmo do mesmo mês. Primeiramente, verificou-se que a discrepância em altitude geométrica foi mais influenciada pela ionosfera do que a planimétrica, embora esta última também tenha sido prejudicado pelos efeitos da tempestade. Pôde-se verificar claramente que houve um aumento da variação temporal da discrepância planimétrica e altimétrica para as quatro estações, comportando-se de forma altamente irregular.

Concentrando-se na discrepância planimétrica, pôde-se verificar que as maiores variações e magnitudes, decorrentes da tempestade geomagnética, ocorreram para a estação POAL, com destaque para o período entre 20 e 22 HL, possível reflexo do deslocamento da crista da anomalia equatorial para regiões mais ao sul. Para as estações UEPP, BRAZ e CRAT, também se observou uma variação temporal irregular da discrepância planimétrica quando comparada ao dia calmo, além de valores mais altos em quase todo o período.

Quanto à discrepância em altitude geométrica verificou-se que, para todas as estações GPS, uma variação temporal altamente irregular ocorreu no dia da tempestade, além de valores maiores na maior parte do tempo, quando comparada ao dia de atividade geomagnética calma. Como períodos de grande destaque, podem-se citar: o próximo às 18 e 21 HL, aproximadamente, para a estação POAL; o próximo às 19:30 HL para UEPP e CRAT; e o próximo às 17 HL para CRAT.

O aumento da discrepância no período da tarde evidencia o aumento do VTEC que ocorreu no dia da tempestade neste mesmo período. A alta variação irregular da discrepância verificada em destaque para POAL às 21 HL, aproximadamente, mostra o possível efeito decorrente do deslocamento para regiões mais afastadas do equador do segundo pico intensificado da anomalia equatorial, ou seja, chegando até o Rio Grande do Sul. Porém, de uma forma geral, um comportamento bastante irregular

da discrepância em altitude geométrica foi verificado em todas as estações GPS no dia da tempestade em praticamente todo o período analisado, mostrando a influência da intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003.

REFERÊNCIAS

- Abdu, M.A.; Sobral, J.H.A.; Paula, R.E. & Batista, I.S. 1991. Magnetospheric disturbance effects on the equatorial ionization anomaly (EIA): an overview. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, **53**: 757-771.
- Abdu, M.A.; Maruyama, T.; Batista, I.S.; Saito, S. & Nakamura, M. 2007. Ionospheric responses to the October 2003 superstorm: Longitude/local time effects over equatorial low and middle latitudes. **Journal of Geophysical Research**, **112**: A10306.
- Batista, I.S. 2003. **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.
- Batista, I.S.; Abdu, M.A.; Souza, J.R.; Bertoni, F.; Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O. & Bailey, G.J. 2006. Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, **111**: A05307.
- Camargo, P.O. 1999. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. Curitiba. 191p. Tese de Doutorado em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- Davies, K. 1990. **Ionospheric radio**. London, Peter Peregrinus Ltd., 580p.
- El Gizawy, M.L. 2003. **Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users**. Alberta, Canada. 161p. Msc thesis, Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20171, The University of Calgary.
- Fedrizzi, M. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS**. 2003. São José dos Campos. 223p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Fonseca Junior, E.S.. 2002. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. São Paulo. 176f. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da

- Universidade de São Paulo.
- ISGI. 2007. **International Service of Geomagnetic Indices**. Disponível em: <<http://isgi.cetp.ipsl.fr/>>. Acesso em: 12 out. 2007.
- Kirchhoff, V.W.J.H. 1991. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo, Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 149p.
- Komjathy, A. 1997. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System**. New Brunswick, Canada. 248p. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick.
- Komjathy, A.; Sparks, L.; Mannucci, A.J. & Xiaoqing, P. 2003. An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south american region. **Journal of the Institute of Navigation**, **50**(3): 193-218.
- Leick, A. 1995. **GPS satellite surveying**. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 560p.
- Leonovich, L.A.; Altynsev, A.T.; Grechnev, V.V. & Afraimovich, E.L. 2001. Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data. **LANL e-print archive**. Disponível em: <http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0110/0110063v1.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2007.
- Matsuoka, M.T. & Camargo, P.O. 2003. Evaluation of functions for modelling of the effect of the ionospheric refraction in the propagation of the GPS signals. In: ION GPS/GNSS-2003, Portland, Oregon, USA. **Proceedings...**Portland, Oregon, USA, p. 1736-1741.
- Matsuoka, M.T. & Camargo, P.O. 2004. 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**, **56** (1): 14-27.
- Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O. & Dal Poz, W.R. 2004. 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**, **10** (2): 141-157.
- Matsuoka, M.T.; Camargo, P.O. & Batista, I.S. 2006. 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**, **12** (2): 315-334.
- Matsuoka, M.T.. 2007. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. Presidente Prudente. 263p. Tese de Doutorado em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.
- NASA. 2006. **National Aeronautics and Space Administration**. Disponível em: <<http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/quests.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2006.
- McNamara, L.F. 1991. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida, Krieger Publishing Company, 237p.
- NRCAN. 1997. **User's Guide - GPSPACE: Manual de Operação - GSD/NRCAN**. Disponível em: <http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace_e.php>. Acesso em: 23 set. 1998.
- Oliveira, A.B.V. 2003. **Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial**. São José dos Campos. 167p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Rezende, L.F.C.; Paula, E.R.; Batista, I.S.; Kantor, I.J. & Muella, M.T.A.H. 2007. **Revista Brasileira de Geofísica**, **25**(2): 151-158.
- Sahai, Y.; Fagundes, P.R.; Becker-Guedes, F.; Bolzan, M.J.A.; Abalde, J.R.; Pillat, V.G.; Jesus, R. de.; Lima, W.L.C.; Crowley, G.; Shiokawa, K.; Macdougall, J.W.; Lan, H.T.; Igarashi, K. & Bittencourt, J.A. 2005. Effects of the major geomagnetic storms of October 2003 on the equatorial and low-latitude F region in two longitudinal sectors. **Journal of Geophysical Research**, **110**: A12S91:1-15.
- Sandford, W.H. 1999. The impact of solar winds on navigation aids. **Journal of Navigation**, **52** (1): 42-46.
- Seeber, G. 2003. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York, Walter de Gruyter, 589p.
- Skone, S.; Yousuf, R. & Coster, A. 2004. Performance evaluation of the Wide Area Augmentation System for ionospheric storm events. In: THE 2004 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GNSS/GPS, 2004, Sydney, Australia. **Proceedings...**Sydney, Australia. CD-ROM.
- Skoug, R.M.; Gosling, J.T.; Steinberg, J.T.; McComas, D.M.; Smith, C.W.; Ness, N.F.; Hu, Q. & Burlaga, L.F. 2004. Extremely high solar wind: 29-30 October 2003, **Journal of Geophysical Research**, **109**:A09102, doi: 10.1029/2004JA010494.
- Webster, I. 1993. **A regional model for prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System**. New Brunswick, Canada. M.Sc.E Thesis, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick.
- Yamashita, C.S. 1999. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. São José dos Campos. 75p. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Editor responsável pelo artigo: Dejanira L. Saldanha