

CONSEQÜÊNCIAS DE UMA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA NO POSICIONAMENTO RELATIVO COM RECEPTORES GPS DE SIMPLES FREQÜÊNCIA

Consequences of a Geomagnetic Storm in the Relative Positioning with Single-Frequency GPS Receivers

WILLIAM RODRIGO DAL POZ¹
PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
Universidade Estadual Paulista

Faculdade de Ciências e Tecnologia – Depto de Cartografia
¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP
dalpoz@gmail.com; paulo@fct.unesp.br

RESUMO

O erro associado com a ionosfera depende do Conteúdo Total de Elétrons (TEC) presente na ionosfera. O campo geomagnético exerce forte influencia na variação do TEC, pois ele controla o movimento das partículas ionizadas. Após eventos solares, como por exemplo, explosões solares, as linhas de força do campo geomagnético podem ser comprimidas de forma significativa, caracterizando as tempestades geomagnéticas. O principal objetivo deste trabalho é apresentar para a comunidade geodésica as conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo. O processamento dos dados foi realizado com um intervalo de duas horas e o comprimento da linha de base formada é 430 km. A análise dos resultados foi realizada a partir das discrepâncias das coordenadas consideradas verdadeiras com as obtidas no processamento da linha de base. Os dados utilizados neste trabalho abrangem o período de 30/03/2001 até 02/04/2001. No dia 31/03/2001 ocorreu uma forte tempestade geomagnética. Após a ocorrência da tempestade, ocorre a fase principal ou negativa da tempestade. Nesse período os valores das discrepâncias diminuíram significativamente. Por exemplo, no período da 01:00 até 03:00 TU, o valor da discrepância planimétrica atingiu aproximadamente 21 metros no dia da tempestade. No entanto, na fase principal, a discrepância planimétrica diminuiu para aproximadamente 0,1 m.

Palavras chaves: Ionosfera, GPS, TEC, Tempestade Geomagnética.

ABSTRACT

The error associated with the ionosphere depends on Total Electron Content (TEC) of the ionosphere. The geomagnetic field exerts strong influence in the TEC variation, because it controls the movement of the electrons. After solar events the magnetic lines of force can be compressed, characterizing the geomagnetic storm. The aim of this paper is to present to geodesic community the effects of a geomagnetic storm in the relative positioning. The processing of the data was accomplished with an interval of two hours, with a 430 km baseline. The analyze of the obtained results have been carried out from the discrepancies between the “true” coordinates and corresponding ones obtained in the processing of the baseline. The used data in this paper include the period of 30/03/2001 up to 02/04/2001. In March 31 a strong geomagnetic storm happened. One day after, that it corresponds to main phase of the storm, the values of the discrepancies decreased significantly. For instance, in 01:00-03:00 UT period, the value of the planimetric discrepancy reached 20 m in the storm day. However, in the main phase of the storm, the planimetric discrepancy decreased to 0.1 m.

Keywords: Ionosphere, GPS, TEC, Geomagnetic Storm.

1. INTRODUÇÃO

Diversas fontes de erros estão envolvidas no posicionamento com GPS (*Global Positioning System*), sendo que, atualmente, uma das maiores é a ionosfera. O erro decorrente dessa fonte é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal GPS e diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*), presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. O TEC varia no tempo e no espaço, e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, campo geomagnético, entre outros. O campo geomagnético exerce grande influência na variação da densidade de elétrons, pois, 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 (Kirchhoff, 1991).

No posicionamento por ponto, os efeitos da ionosfera são mais previsíveis, ou seja, se o valor do TEC for alto, os resultados serão mais afetados, e, em contrapartida, se o valor for baixo, os resultados serão menos afetados pela ionosfera, em consequência da redução do erro devido à ionosfera na propagação dos sinais GPS. Isto foi verificado em Matsuoka et al. (2004), no qual foram realizados experimentos com dados GPS coletados em períodos de máxima e mínima atividade solar. Enquanto no período de máxima atividade solar se obteve valores próximos à 130 unidades de TEC, no período de mínima atividade os valores não ultrapassaram 80 unidades. No período de máxima atividade solar o erro máximo devido à ionosfera em L_1 foi de 24 m, enquanto que no período de

declínio o erro máximo não ultrapassou 14 m. Com isso, ocorreu uma melhora no desempenho do posicionamento por ponto com GPS. Estes erros foram calculados com dados de receptores de dupla frequência da estação UEPP da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), a partir de observações de pseudodistâncias filtradas pela fase da onda portadora. Em contrapartida, no caso do posicionamento relativo, o principal fator que influencia nos resultados é o gradiente espacial do TEC. Nestas condições, é de fundamental importância entender como o TEC varia no tempo e no espaço, para ser possível interpretar os resultados obtidos no posicionamento relativo.

Neste trabalho foram realizados experimentos com dados GPS coletados pelos receptores da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), nas estações UEPP (Presidente Prudente) e PARA (Curitiba), durante uma tempestade geomagnética, que ocorreu no dia 31 de março de 2001. O método de posicionamento relativo adotado neste trabalho é o estático, sendo que os receptores envolvidos no posicionamento permanecem estáticos durante o rastreamento, e o período de rastreamento é sempre superior a pelo menos 20 minutos (Monico, 2000). Assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar à comunidade geodésica as consequências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo estático com receptores de uma frequência, visto que receptores de dupla frequência são extremamente caros, fazendo com que os receptores de uma frequência sejam amplamente utilizados nas mais variadas aplicações.

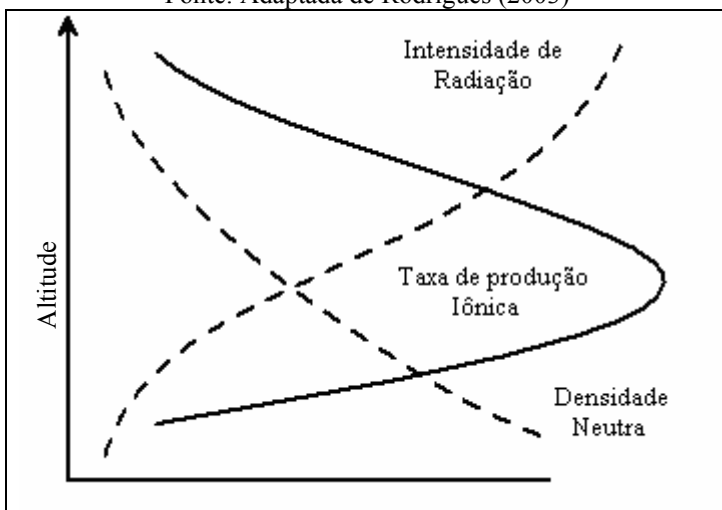
2. IONOSFERA

A ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. É definida como a parte superior da atmosfera onde existe ionização suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (Davies, 1990). Assim, caracteriza-se pela formação de íons e elétrons, e inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1000 km de altura. Os íons e elétrons livres na ionosfera são criados principalmente pelo processo de fotoionização, que consiste na absorção de radiação solar, predominantemente na faixa do extremo ultravioleta e raios-X, por elementos atmosféricos neutros (Kirchhoff, 1991).

Na medida em que a radiação solar penetra na atmosfera mais densa a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade deles de elétrons é máxima. Abaixo deste nível, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons (Fedrizzi, 2003). A figura 01 ilustra a formação da ionosfera e a presença de um pico de ionização (Rodrigues, 2003).

Figura 01 – Ilustração da formação da ionosfera.

Fonte: Adaptada de Rodrigues (2003)



Os sinais GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena receptora, propagam-se na atmosfera dinâmica, atravessando diferentes camadas, que possuem características bem distintas. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (Leick, 1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal. Mais detalhes sobre a ionosfera pode ser consultado, por exemplo, em Davies (1990), McNamara (1991) e Kirchoff (1991).

3. VARIAÇÕES DO TEC

A densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, é afetada pelas variações temporais, variações da radiação solar, influências da latitude, longitude e campo geomagnético, dentre outras anomalias e irregularidades, como por exemplo, a anomalia equatorial e a cintilação ionosférica.

As variações temporais compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos. Estas variações influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera. As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite, devido à recombinação dos elétrons e íons. A variação diurna ocorre principalmente devido à iluminação do Sol, ou seja, a radiação solar. Ao longo do dia, a densidade de elétrons depende da hora local, sendo que seu valor máximo (no Brasil) ocorre entre as 15:00 e 19:00 TU (Tempo Universal) (Webster, 1993).

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 pôde ser verificado em experimentos realizados por Camargo e Dal Poz (2002). Neste trabalho foi calculado o valor do TEC na região brasileira para as quatro estações 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) e Oliveira (2003).

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 é proporcional ao número de manchas. Atualmente (2006) o Sol está no período de declínio do denominado “ciclo 23”, e o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2001 (Kunches, 2000), o que ocasionou um aumento do número de manchas solares e, conseqüentemente, do número de elétrons presentes na ionosfera.

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, na densidade de elétrons na ionosfera. Por exemplo, as regiões equatoriais são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons. Já as regiões de latitudes médias são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, enquanto que as regiões polares não são muito previsíveis (Webster, 1993). A influência da longitude, devido à não coincidência dos pólos geográficos e magnéticos, é sensível somente nas regiões mais altas (região F₂) (Picquenard, 1974). A região F₂ compreende o intervalo da ionosfera entre as alturas de 200 km até aproximadamente 1000 km, e o pico da densidade de elétrons ocorre entre as alturas de 300 a 450 km. Este pico de ionização é ilustrado na figura 01.

Na ionosfera ocorre também o denominado efeito fonte, o qual consiste de um movimento de elevação do plasma e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes (Rodrigues, 2003). Uma conseqüência da combinação dos movimentos de subida e subseqüente descida do plasma é que dois picos de ionização são formados nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador geomagnético, entre 10° e 20° de latitude. No equador geomagnético a ionização fica menos intensa. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial ou anomalia de Appleton (Appleton, 1946).

A maior intensidade desta anomalia, conforme já mencionado, ocorre nas latitudes geomagnéticas entre ± 10 e ± 20 graus, causando alta concentração de elétrons nos dois lados do equador geomagnético. No entanto, os valores máximos do TEC ocorrem nas latitudes aproximadas de $\pm 15^\circ$ em relação ao equador

geomagnético, que correspondem à região das cristas da anomalia equatorial (Fedrizzi, 2003). A anomalia equatorial varia ao longo do dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta das 14 horas local, e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia noite. No entanto, o segundo máximo em geral não ocorre durante períodos de baixa atividade solar (Batista, 2003).

Além dos erros devido ao avanço da fase da onda portadora e retardo do código, a ionosfera também pode causar um efeito denominado de cintilação ionosférica, que pode ser definida como flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons, e, conseqüentemente, do índice de refração. Normalmente essas irregularidades que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altura (Davies, 1990). A cintilação causa um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GPS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda do sinal (Webster, 1993). Irregularidades do *spread f* equatorial são caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas. Essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação trans-ionosféricos e nos sinais de navegação, tais como GPS (Sahai et al. 2000). As bolhas ionosféricas ocorrem sempre após o por do Sol e principalmente no período noturno até a meia noite, não obstante durante algumas fases do ano aparecem durante a noite toda até o amanhecer (Santana et al. 1999 apud Soares, 2001).

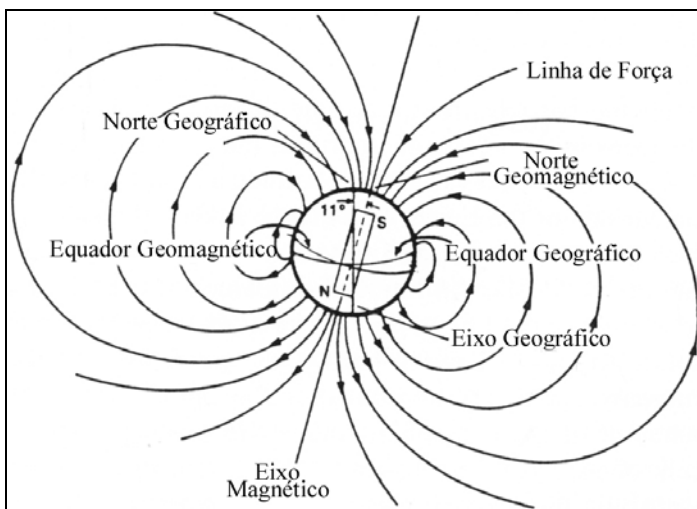
Quanto ao campo geomagnético, este exerce grande influência na variação da densidade de elétrons. Na ionosfera e na magnetosfera, o campo geomagnético controla o movimento das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo magnético da Terra resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado (Kirchhoff, 1991).

3.1 Campo Geomagnético

Próximo à superfície da Terra, o campo magnético terrestre ou campo geomagnético, pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação (Fonseca Junior, 2002). A figura 02 ilustra as linhas de força do campo geomagnético e a não coincidência do eixo do dipolo com o eixo de rotação da Terra (McNamara, 1991).

Figura 02 – Modelo do campo geomagnético

Fonte: Adaptada de McNamara (1991)



O campo geomagnético tem a forma aproximada de uma barra magnética, como um ímã, e tem dois pólos magnéticos, um na região ártica do Canadá, denominado de Pólo Norte Magnético, e um na região costeira da antártica, sul da Austrália, denominado de Pólo Sul Magnético (NRCAN, 2005). Acredita-se que o campo geomagnético origina-se no centro da Terra e as linhas de força geomagnéticas estendem-se a grandes distâncias da Terra, atingindo 10 raios terrestres no lado de frente ao Sol (Kirchhoff, 1991). O campo magnético da Terra exerce grande influência na variação da densidade de elétrons. Na ionosfera e na magnetosfera, 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.

Vale salientar que o modelo do campo geomagnético mais simples é ilustrado na figura 02, onde o campo geomagnético é aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra. No entanto, além da radiação eletromagnética, o Sol também libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas: o vento solar que, como a radiação eletromagnética, traz energia para a Terra e, conseqüentemente, contribuiu para a formação da ionosfera (Kirchhoff, 1991). Desta forma, devido à ação do vento solar, as linhas de força do campo geomagnético ilustradas na figura 02 são comprimidas. O vento solar origina-se nas regiões da coroa onde as linhas do campo magnético são abertas fazendo com que o plasma coronal se expanda para o meio interplanetário formando o vento

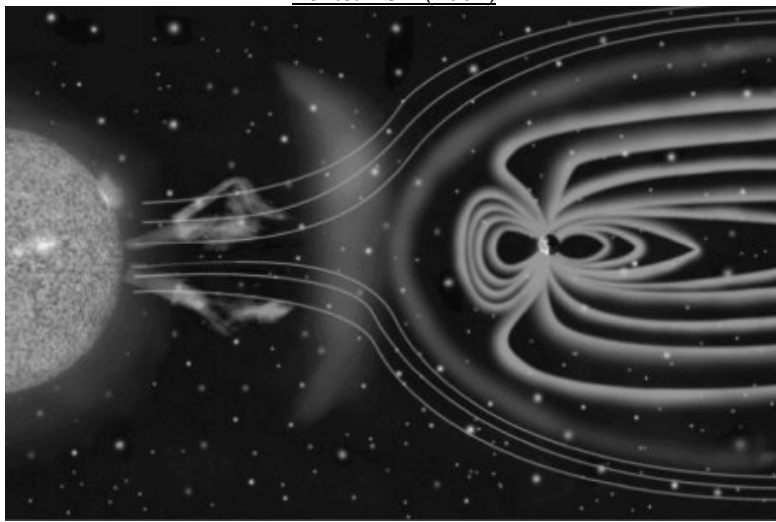
solar propriamente dito (Davies, 1990). Devido à eventos solares, como por exemplo, uma explosão solar, as linhas de força do campo geomagnético são comprimidas de forma mais acentuada, fazendo com que ocorram as tempestades geomagnéticas.

3.1.1 Tempestades Geomagnéticas

As emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar ocorrem continuamente, confinando e distorcendo as linhas de força do campo geomagnético em uma cavidade com uma cauda longa que se estende por centenas de raios terrestres na direção oposta ao Sol (Fedrizzi, 2003). Esta cavidade denomina-se magnetosfera. A figura 03 mostra a influência do vento solar no campo geomagnético. A linha de contorno entre o meio interplanetário e a magnetosfera é denominado de magnetopausa.

Figura 03 – Influência do vento solar no campo geomagnético

Fonte: ESA (2004)



De acordo com a figura 03, pode-se notar que as linhas de força do campo geomagnético são comprimidas no lado iluminado pelo Sol, formando uma espécie de cauda na direção oposta ao Sol. Durante eventos solares intensificados a velocidade do vento solar pode passar de 400 para 1000 km/s ou mais, e a densidade do vento solar pode passar de 10^6 a 10^7 partículas/m³ (Kirchhoff, 1991). Com isso, o limite da magnetopausa pode se comprimir de forma significativa.

Em outras palavras, eventos solares (como por exemplo, explosões 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. Estas por sua vez, implicam numa tempestade ionosférica, que é uma resposta à tempestade geomagnética. Tempestades geomagnéticas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas, como por exemplo, as explosões solares (McNamara, 1991). Após uma explosão solar ocorre ejeção de massa coronal, que é a parte mais externa do Sol. As tempestades geomagnéticas mais intensas são freqüentemente relacionadas a essas ejeções (Oulu, 2003 apud Fedrizzi, 2003). Os distúrbios geomagnéticos provocados por eventos solares são monitorados a partir de estações em Terra, instaladas em observatórios magnéticos (Komjathy, 1997).

3.1.1.1 Índices Geomagnéticos

Índices geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2005). Os índices geomagnéticos mais freqüentemente 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 desse índice é derivado o índice Kp.

O índice K é um índice local quase logarítmico que contém as variações ocorridas na atividade geomagnética, em intervalos de três horas, relativas à curva do dia quieto para um determinado observatório magnético (Fedrizzi, 2003). Tais medidas são convertidas em uma escala quase logarítmica cujos valores variam de acordo com a tabela 01 (Wrenn et al., 1987 apud Fedrizzi, 2003).

Tabela 01 – Valores dos índices Kp e condições da atividade geomagnética

Atividade Geomagnética	Valor do índice Kp
Muito Calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2 ⁻
Normal	2 ⁻ a 3 ⁺
Perturbado	3 ⁺ a 4 ⁺
Muito Perturbado	4 ⁺ a 9

Fonte: Wrenn et al. (1987) apud Fedrizzi (2003)

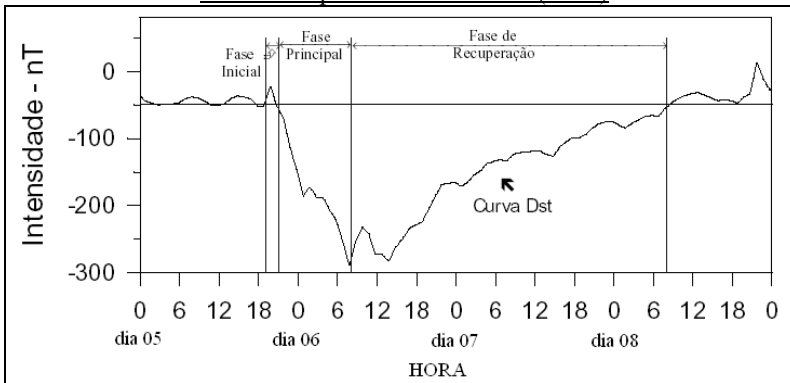
O índice interplanetário Kp foi introduzido por J. Bartels em 1949, e é derivado do índice K padronizado (Ks) de 13 observatórios magnéticos (GFZ,

2005). O índice K_p é a média aritmética dos valores de K_s padronizados de 13 observatórios padrão, por todo o globo terrestre. Este índice representa uma média de valores obtidos no espaço de tempo de três horas, começando a zero hora. Portanto, cada dia tem oito valores de K_p (Yamashita, 1999).

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 define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. Logo 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. Esta fase também é conhecida como fase negativa da tempestade, e pode ter uma duração de meia até varias horas. Nesse período o TEC normalmente é reduzido abaixo do seu valor médio (anterior à tempestade) (Fedrizzi, 2003). 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). A figura 04 mostra a curva do índice Dst obtida entre os dias 5-8 de setembro de 1982, quando ocorreu uma intensa tempestade geomagnética, com suas fases características.

Figura 04 – Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982

Fonte: Adaptada de Yamashita (1999)



A classificação de uma tempestade geomagnética é dada de acordo com a tabela 02 (Fedrizzi, 2003).

Tabela 02 – Classificação de uma tempestade geomagnética

Condição da Tempestade Geomagnética	Valor do índice Dst (nT)
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)

O estudo da atividade geomagnética na região auroral requer a utilização de um índice magnético que maximize a contribuição do eletrojato auroral. Neste caso, utiliza-se o índice AE, obtido a partir de medidas das variações da componente horizontal do campo geomagnético, coletadas em observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (Yamashita, 1999).

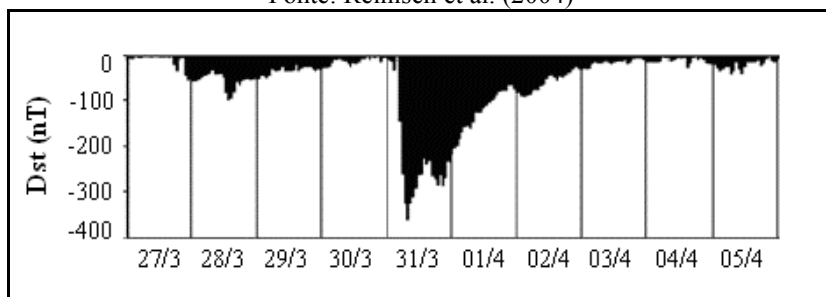
4 EXPERIMENTOS

4.1 Considerações Iniciais

Os dados utilizados no processamento abrangem o período de 30/03/2001 até 02/04/2001. No dia 30/03/2001 ocorreu uma explosão solar próxima a maior mancha solar registrada na superfície do Sol no ciclo 23, denominada de 9393 (SpaceWeather, 2005). Para se ter idéia da dimensão da mancha solar ela correspondeu a uma área equivalente a 14 vezes a área da Terra, sendo classificada como “X – class”. Essa categoria de explosão é a mais intensa, e pode causar longas tempestades geomagnéticas, que afetam consideravelmente as condições ionosféricas (SpaceWeather, 2005). Esta explosão solar foi responsável por duas ejeções de massa coronal, que por sua vez lançaram um fluxo de gás magnético eletrificado que atingiu a magnetosfera terrestre em 31/03/2001, ocasionando uma intensa compressão do campo geomagnético do lado diurno da Terra (Fedrizzi, 2003).

Como já mencionado, uma forma de monitorar os distúrbios geomagnéticos é a partir dos índices geomagnéticos. O índice Dst é adequado para ser utilizado em estudos de tempestades geomagnéticas, pois, sempre antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. A figura 05 mostra os valores deste índice desde o dia 27/03/2001 até 05/04/2001 (Reinisch et al. 2004).

Figura 05 – Índice Dst para os dias 27/03/2001 até o dia 05/04/2001
Fonte: Reinisch et al. (2004)



De acordo com a figura 05 se pode notar que no dia 31/03/2001 o índice Dst cai de forma significativa, chegando a atingir aproximadamente -350 nT. De acordo com a classificação deste índice (tabela 02), valores menores do que -250 nT classificam a tempestade como muito intensa.

4.2 Estratégia de Processamento

Neste trabalho foram utilizados dados GPS de duas estações da RBMC, sendo uma de Curitiba (PARA) e outra de Presidente Prudente (UEPP), formando uma linha de base de 430 km. No processamento a estação UEPP foi fixada com as coordenadas consideradas verdadeiras referenciadas ao SIRGAS 2000.

O processamento dos dados foi realizado a partir da dupla diferença do código (DDC) e da dupla diferença da fase (DDF), somente com dados da portadora L_1 . Como as coordenadas estimadas são da estação PARA, pertencente à RBMC, os resultados considerados verdadeiros foram as coordenadas oficiais referenciadas ao SIRGAS 2000. Como os arquivos da RBMC compreendem um período de 24 horas, os dados foram processados com um intervalo de duas em duas horas. Com isso, foi possível realizar uma análise diária dos efeitos da tempestade geomagnética. A análise dos resultados foi realizada a partir das discrepâncias entre as coordenadas estimadas da estação móvel, de duas em duas horas, a partir da DDC e DDF, com as consideradas verdadeiras.

Vale salientar que os receptores instalados em Presidente Prudente (UEPP) e em Curitiba (PARA) são do mesmo modelo (Trimble 4000 SSI). Sendo assim, os erros residuais de caráter local são minimizados. Como as estações da RBMC são instaladas em locais não propícios à ocorrência de multicaminho, pode-se considerar que os erros residuais devido ao multicaminho também são minimizados. Desta forma, o erro residual ionosférico da dupla diferença se torna dominante. Com isso, é possível realizar uma análise mais realística dos efeitos da ionosfera. O software utilizado no processamento das linhas de base foi o GPSurvey versão

2.35a. No processamento foram utilizados as efemérides transmitidas nas mensagens de navegação.

4.2.1 Resultados e Análises

As figuras 06, 07, 08 e 09 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias planimétricas obtidas entre os valores estimados e “verdadeiros”, para os dias 30 e 31 de março e 01 e 02 de abril de 2001, obtidas nos processamentos realizados a partir da DDC e da DDF.

Figura 06 – Discrepâncias em planimetria (UTM) – Dia da explosão (30/03/2001)

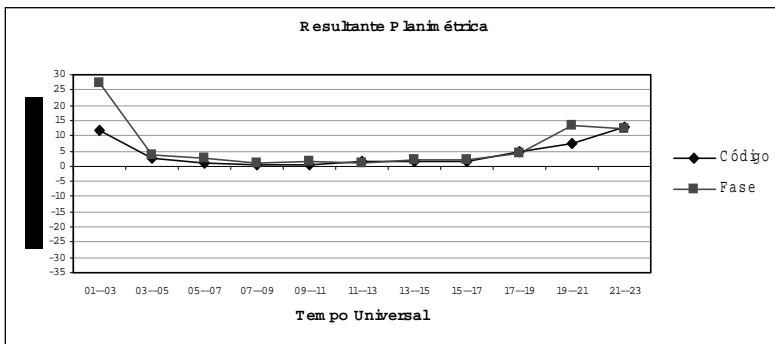


Figura 07 – Discrepâncias em planimetria (UTM) – Dia da tempestade (31/03/2001)

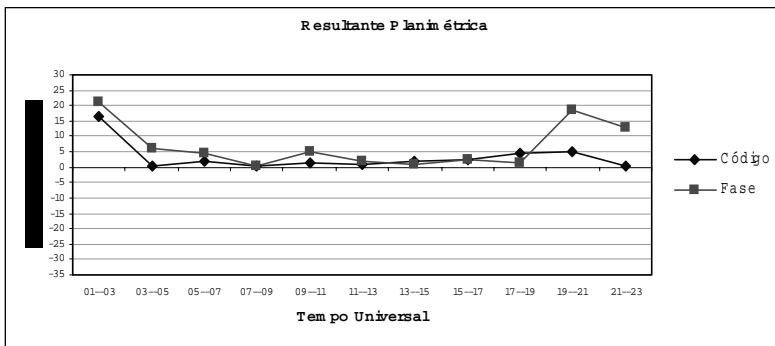


Figura 08 – Discrepâncias em planimetria (UTM) – Um dia após a ocorrência da tempestade (01/04/2001)

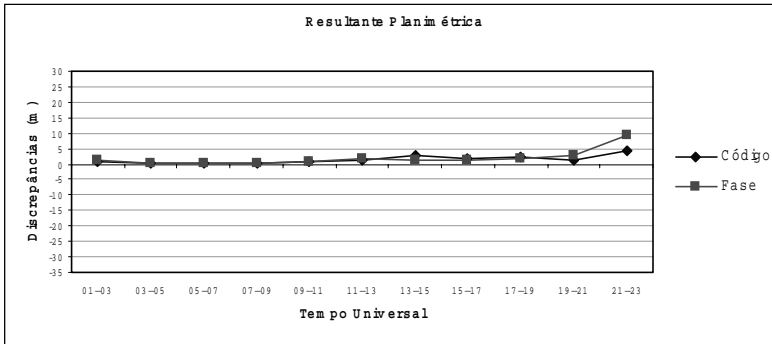
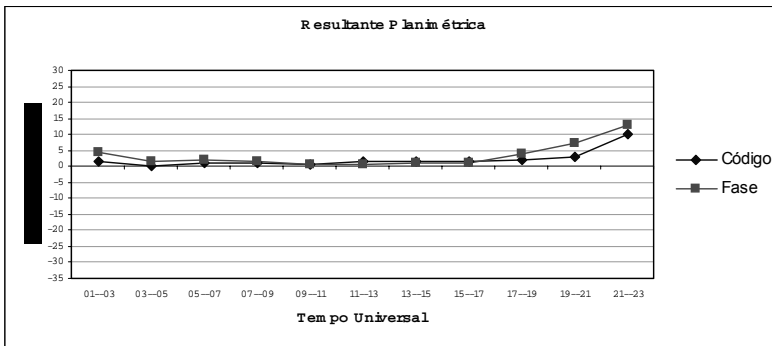


Figura 09 – Discrepâncias em planimetria (UTM) – Dois dias após a ocorrência da tempestade (02/04/2001)



De acordo com os resultados apresentados nas figuras 06, 07, 08 e 09, verifica-se o efeito da tempestade geomagnética na componente planimétrica, mas não de forma acentuada. Vale destacar que a ionosfera já estava altamente ativa no dia tempestade geomagnética, como pode ser verificado na figura 06, pois os dados processados são referentes ao período de máxima atividade solar do ciclo 23, coletados próximos ao equinócio de primavera. No dia explosão, no período da 01:00 até 03:00 TU o valor da discrepância atingiu aproximadamente 28 m. Verifica-se também que os efeitos da tempestade, de uma forma geral, são mais intensificados nos resultados obtidos a partir da DDF. Por exemplo, no dia da tempestade geomagnética, no período das 21:00 até 23:00 TU, a discrepância planimétrica obtida a partir da DDF foi de aproximadamente 13 m, enquanto que a discrepância obtida a partir da DDC foi de aproximadamente 0,5 m. Desta forma, verifica-se uma melhor performance da DDC no processamento dos dados no dia da

tempestade. Somente em três períodos (07 – 09 TU, 13 – 15 TU e 17 – 19 TU) o processamento realizado a partir da DDF proporcionou melhores resultados do que os obtidos a partir da DDC. No entanto, nesses casos, a diferença não é significativa.

Um dia após a ocorrência da tempestade geomagnética baixos valores de discrepâncias foram obtidos, ambos com os processamentos realizados a partir da DDF e DDC. Esta fase corresponde à fase negativa da tempestade, na qual a densidade do TEC fica abaixo de seu valor médio. Com isso, devido ao baixo gradiente espacial do TEC, a dupla diferença minimiza consideravelmente os efeitos da ionosfera, fazendo com que os resíduos ionosféricos das duplas diferenças sejam minimizados consideravelmente, proporcionando baixos valores de discrepâncias.

Como os efeitos da ionosfera são mais intensos na componente altimétrica, uma análise mais detalhada da influência da tempestade geomagnética será realizada nesta componente. As figuras 10, 11, 12 e 13 mostram, respectivamente, os valores das discrepâncias das componentes altimétricas estimadas a partir da DDC e da DDF com as coordenadas consideradas verdadeiras, para os dias 30 e 31 de março e 01 e 02 de abril de 2001.

Figura 10 – Discrepâncias em altimetria – Dia da explosão (30/03/2001).

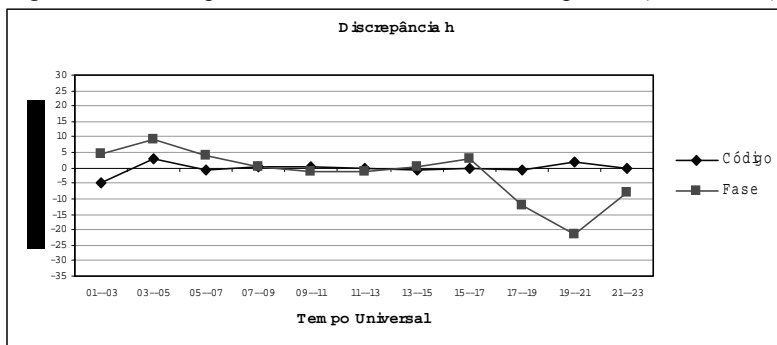


Figura 11 – Discrepâncias em altimetria – Dia da tempestade (31/03/2001).

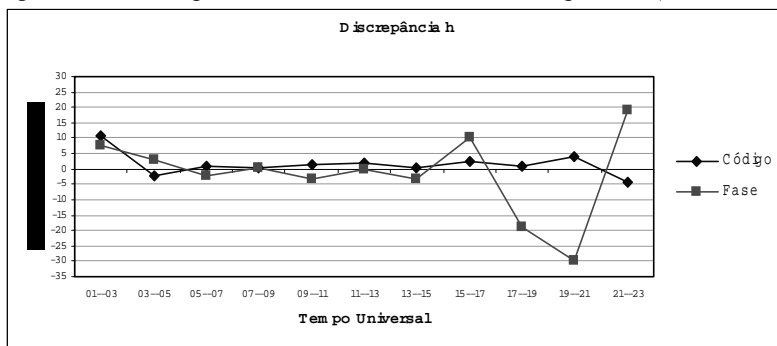


Figura 12 – Discrepâncias em altimetria – Um dia após a ocorrência da tempestade (01/04/2001).

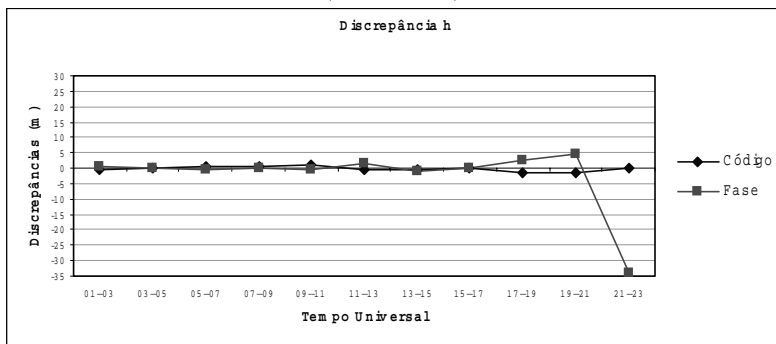
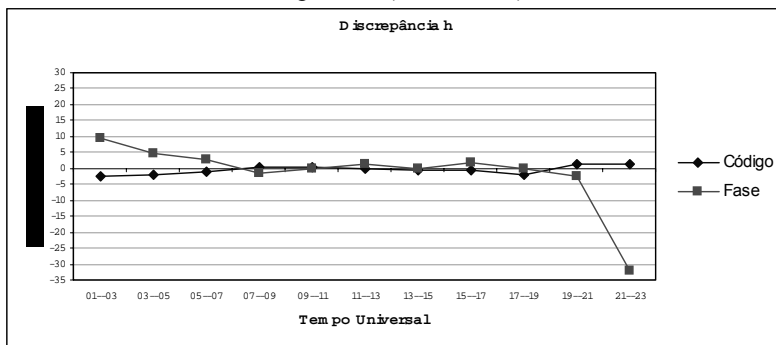


Figura 13 – Discrepâncias em altimetria – Dois dias após a ocorrência da tempestade (02/04/2001).



De acordo com os resultados apresentados nas figuras 10, 11, 12 e 13, pode-se notar que altos valores das discrepâncias são obtidos a partir da DDF no dia da tempestade geomagnética. Verifica-se mais uma vez que, em períodos de irregularidades, o processamento realizado a partir da DDC proporciona melhores resultados do que os obtidos a partir da DDF, como pode ser verificado nas figuras 10 e 11. Com isso, a análise dos efeitos da tempestade será realizada a partir dos resultados obtidos com a DDF, pois esta combinação linear é mais sensível aos efeitos da tempestade. Pode-se verificar claramente a influência da tempestade geomagnética nos resultados obtidos a partir da DDF. No dia da tempestade, principalmente após 17:00 TU, altos valores de discrepâncias foram obtidas, chegando a atingir, aproximadamente, -30 m, no período da 19:00 as 21:00 TU. No dia anterior à tempestade este valor era de aproximadamente -20 m.

Em suma, verifica-se que as discrepâncias obtidas a partir da DDF estão bem correlacionadas com as fases características de uma tempestade geomagnética. De acordo com o índice Dst, que define uma tempestade geomagnética, após o início súbito da tempestade, ocorre a fase principal da tempestade, também conhecida como fase negativa da tempestade. Nesse período o TEC normalmente é reduzido abaixo do seu valor médio (Fedrizzi, 2003). Com isso, também diminui o gradiente espacial do TEC da ionosfera. Isto pode ser verificado de forma acentuada nos resultados obtidos a partir da DDF. Um dia após a ocorrência da tempestade geomagnética se verifica os menores valores das discrepâncias, no período das 01:00 até 17:00 TU. Neste período fica evidenciada a fase negativa da tempestade. Vale destacar que os dados foram coletados num período de alta atividade ionosférica, no qual ocorrem muitas irregularidades. Além disso, o comprimento da linha de base é de 430 km. Mesmo assim, durante o período da fase negativa da tempestade foram obtidas discrepâncias da ordem de 15 cm.

Após a ocorrência da fase negativa da tempestade tem início a fase de recuperação da mesma. Isto pode ser verificado na figura 12, no qual a partir das 17:00 TU verifica-se que as discrepâncias aumentam de forma significativa. Dois dias após a ocorrência da tempestade verifica-se que os valores das discrepâncias, de uma forma geral, continuam a aumentar (figura 13). Isto evidencia a continuação da fase de recuperação da tempestade. De acordo com as figuras 12 e 13, no período das 21:00 até 23:00 TU, altos valores das discrepâncias foram obtidas. Isto pode ter ocorrido devido ao aumento do segundo pico da anomalia equatorial, bem como de ocorrência de irregularidades que podem ocorrer no período noturno, tais como efeitos de cintilação e bolhas ionosféricas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram apresentadas as conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relativo estático. Vale salientar que os dados utilizados no processamento já estavam fortemente influenciados pelos efeitos da ionosfera, visto que os dados foram coletados no período de máxima atividade solar do ciclo 23 próximo ao equinócio de primavera. Com isso, provavelmente não ocorreram altos gradientes espaciais do TEC, no dia da tempestade, contudo, mesmo assim, foi possível verificar a forte influencia que uma tempestade geomagnética pode causar no posicionamento relativo, principalmente na componente altimétrica.

De uma forma geral, foi verificado que os resultados obtidos a partir da DDF são mais sensíveis aos efeitos da ionosfera, principalmente em períodos de irregularidades, que ocorrem após a tempestade. No entanto, em períodos em que a ionosfera está mais calma, os resultados obtidos a partir da DDF são compatíveis com os resultados obtidos a partir da DDC, como pode ser observado no período negativo da tempestade (figuras 08 e 12). Foi possível notar as fases característica de uma tempestade geomagnética, principalmente a fase negativa da tempestade. Nesse período, foram obtidos os menores valores para as discrepâncias

planimétricas e altimétrica, caracterizando a fase negativa da tempestade, onde a densidade do TEC normalmente torna-se menor do que a sua média, bem como de seu gradiente espacial.

Em suma, foi verificado que a tempestade geomagnética pode proporcionar consequências favoráveis ou desfavoráveis. Pois foi verificado que valores de discrepância variaram de poucos centímetros até aproximadamente 30 metros. Assim, recomenda-se estar atento à ocorrência de tempestades geomagnéticas, bem como suas fases características, pois resultados satisfatórios podem ser obtidos, mesmo numa linha de base de 430 km, em períodos de máxima atividade solar, próximos aos equinócios e com receptores de simples frequência. Recomenda-se também estar atento com o tipo de observação utilizada no processamento dos dados, pois, em períodos de irregularidades, os resultados obtidos a partir da DDC proporcionam melhores resultados.

Vale salientar que no processamento dos dados foram utilizadas as efemérides transmitidas nas mensagens de navegação. Assim, pretende-se realizar novos experimentos com as efemérides precisas, com o objetivo de analisar se as mesmas influenciam nos resultados.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLETON, E.V. Two anomalies in the ionosphere. *Nature*, 157, 691.1946.
- 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.
- CAMARGO, P.O. & Dal Poz, W.R. Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: primeiras experiências na FCT/UNESP. In: Mitishita, E.A. (ed.). *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba, Imprensa Universitária. 2002. vol.2, p. 80-99.
- DAVIES, K. *Ionospheric Radio*. London, Peter Peregrinus Ltd, 1990. 580p.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Solar Wind*. Disponível em: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=2569>. Acesso em: 7 ago. 2004.
- 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, *Divisão de Geofísica Espacial*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

FONSECA JUNIOR, E.S. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. São Paulo. 176p. 2002. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GEOFORSCHUNGSZENTRUM (GFZ). *Indices of global geomagnetic activity*. Disponível em: http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/ Acesso em: 9 set.2005.

INTERNATIONAL SERVICE OF GEOMAGNETIC INDICES (ISGI). *Information on indices derivation and availability*. Disponível em: <http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/indicgeo.htm> Acesso em: 13 mar.2005.

KIRCHHOFF, V.W.J.H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo, USP/FAPESP, 1991. 149p.

KOMJATHY, A. *Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System*. New Brunswick. 248p.1997. PhD. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

KUNCHES, J.M. In the teeth of cycle 23. In: *13TH international technical meeting of the satellite division of the institute de navigation*, 2000. Salt Lake City. ION GPS.2000.

LEICK, A. *GPS satellite surveying*. New York, John Wiley & Sons, 1995. 560p.

MATSUOKA, M.T.; Camargo, P.O. & Dal Poz, W.R. Declínio do número de manchas solares do ciclo 23: Redução da atividade ionosférica e melhora da performance do posicionamento com GPS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2004. 10, vol.2, 141-157.

MCNAMARA, L.F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida, Krieger Publishing Company, 1991. 237p.1

MONICO, J.F.G. *Posicionamento pelo NAVSTAR - GPS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo, Unesp, 2000. 287p.

NATURAL Resources Canadá (NRCAN). *Geomagnetism*. Disponível em: http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/index_e.php Acesso em: 26 out.2005.

OLIVEIRA, A.B.V. *Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial*. São José dos Campos. 144p. 2003. Dissertação de Mestrado em Telecomunicações, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico da Aeronáutica.

PICQUENARD, A. *Propagação das ondas radioelétricas nos meios naturais*. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos S.A.1974.

REINISCH, B.W.; Huang, X.; Song, P.; Green, J.L.; Fung, S.F.; Vasyliunas, V.M.; Gallagher, D.L. & Sandel, B.R. Plasmaspheric mass loss and refilling as a result of a magnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, 2004.109(1).

RODRIGUES, F.S.R. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS*. São José dos Campos. 151p. 2003. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, [Divisão de Geofísica Espacial](#), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

SAHAI, Y.; Fagundes, P.R.; Bittencourt, J.A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 62, n. 15, 1337-1383, Oct. 2000.

SOARES, A.P. *Monitoração de anomalias em comunicações via satélite*. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, Brasil, 21 a 26 de outubro, 2001.

SPACEWEATHER. *News and information about the Sun-Earth environment*. Disponível em: www.spaceweather.com/index.cgi Acesso em: 12 set.2005.

WEBSTER, I.. *A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System*. New Brunswick. 1993. Thesis, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick.

YAMASHITA, C.S. *Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude*. São José dos Campos. 175p. 1999. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, [Divisão de Geofísica Espacial](#), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

(Recebido em agosto de 2006. Aceito em novembro de 2006)