

## RESPOSTA DA CAMADA F IONOSFÉRICA OBSERVADA POR GPS DURANTE A SUPERTEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA EM ABRIL DE 2000

**Alessandro José de Abreu, Yogeshwar Sahai, Paulo Roberto Fagundes, Fábio Becker Guedes, Fernando Luís Guarnieri, Alan Prestes, Valdir Gil Pillat**

Universidade do Vale do Paraíba/IP&D, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, abreu.alessandro@gmail.com

**Resumo** - Este estudo tem por objetivo investigar o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixas latitudes no setor brasileiro durante a supertempestade geomagnética que ocorreu em abril de 2000 (definido como critério o índice  $|Dst| > 250$  nT). Nesta investigação foram analisadas observações realizadas por 4 estações de GPS localizadas em Imperatriz (5,5° S; 47,5° O; lat. dip 2,9° S), Brasília (15,9° S; 47,9° O; lat. dip 11,7° S), Presidente Prudente (22,3° S; 51,4° O; lat. dip 14,9° S) e Porto Alegre (30,1° S; 51,1° O; lat. dip 20,7° S). A variação temporal do conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) e flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) inferidos através das observações de GPS é utilizada para estudar o impacto desta supertempestade na ionosfera tropical. Pode-se mencionar que os efeitos observados durante este evento incluem duas subidas da camada F na região equatorial e duas fortes flutuações de fase no período noturno.

**Palavras-chave:** Camada F, Tempestade Geomagnética, GPS

**Área do Conhecimento:** Ciências Exatas e da Terra

### Introdução

A parte ionizada da atmosfera terrestre, denominada ionosfera, é responsável por diversos fenômenos por ser altamente influenciada pelo fluxo de radiação solar na faixa do extremo ultravioleta (EUV) e raios-X. A ionosfera pode ser dividida em várias regiões ou camadas, sendo que na camada F (entre aproximadamente 130 km e 1000 km de altitude), podem ser observadas após o pôr-do-sol, irregularidades ionosféricas. Tais irregularidades ionosféricas degradam fortemente as transmissões trans-ionosféricas no território brasileiro devido à grande extensão territorial (de dimensão continental) distribuída ao norte e ao sul do equador geomagnético.

As tempestades geomagnéticas são perturbações no campo geomagnético devido à entrada de partículas do vento solar na magnetosfera terrestre e são responsáveis para a geração ou supressão de irregularidades ionosféricas equatoriais (MARTINIS et al., 2005). Tempestades geomagnéticas ocorrem devido às erupções solares (*solar flares*) possivelmente associadas às ejeções de massa coronal (*coronal mass ejection* – CMEs), intensificando a velocidade e densidade do vento solar. Normalmente, uma tempestade geomagnética caracteriza-se por um início súbito (*sudden storm commencement* – SSC), na qual sinaliza a chegada de uma estrutura interplanetária, dando início a fase inicial. O SSC não é condição prévia para que uma tempestade geomagnética ocorra e se desenvolva. Inclui também uma fase principal e

uma fase de recuperação. A fase principal é decorrente de um contínuo campo magnético interplanetário em sentido ao sul, na qual ocorre uma intensificação das partículas aprisionadas na magnetosfera que devido aos gradientes do campo geomagnético e sua curvatura, levam a deriva dessas partículas, dando origem a corrente de anel. Durante esta fase, a entrada de partículas na alta latitude da atmosfera é maximizada, enquanto que na fase de recuperação, a entrada de partículas é minimizada, ou seja, a atividade geomagnética tende a normalizar-se. (GONZALEZ et al., 1994; TSURUTANI e GONZALEZ, 1997; KAMIDE et al., 1998; SCHUNK e NAGY, 2000).

Durante os períodos de tempestades geomagnéticas podem ocorrer modificações ionosféricas nas regiões equatorial e de baixas latitudes. Estas modificações estão possivelmente relacionadas à penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos e aos ventos perturbados gerados pelo aquecimento da alta atmosfera em consequência a precipitação de partículas (ABDU, 1997).

Sendo assim, o objetivo principal deste estudo consiste em investigar o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixas latitudes no setor brasileiro durante a supertempestade geomagnética (definido como critério o índice  $|Dst| > 250$  nT) que ocorreu em abril de 2000, utilizando dados do sistema de posicionamento global (GPS).

## Metodologia

O sistema de posicionamento global (GPS) é composto por 24 satélites orbitando ao redor da Terra a uma altitude de aproximadamente 20.200 km e distribuídos em 6 órbitas com ângulo de inclinação em relação ao equador geográfico de 55°, transmitindo ondas eletromagnéticas nas frequências L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz) (KAPLAN e HEGARTY, 2006).

Para este estudo foram utilizados dados de GPS coletados pelas estações de Imperatriz (IMPZ), Brasília (BRAZ), Presidente Prudente (UEPP) e Porto Alegre (POAL), as quais compõem a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC) e disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As estações escolhidas no setor brasileiro cobrem bem a região equatorial e de baixas latitudes (Figura 1). A Tabela 1 apresenta a localização de cada estação utilizada.

Os dados de GPS foram utilizados para obter as medidas do conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) calculados em unidades de TECU ( $1 \text{ TECU} = \sim 10^{16}$  elétrons  $\text{m}^{-2}$ ) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994) e das flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) calculados em ( $\text{TECU min}^{-1}$ ) por estação (AARONS et al., 1996). Os sinais GPS para medidas do VTEC e do ROT foram obtidos sob um ângulo de elevação de 30°.



Figura 1 – Distribuição geográfica das estações de GPS.

As variações do campo geomagnético foram analisadas através dos índices AE (intensidade do eletrojato auroral), Kp (intensidade da tempestade) e Dst (intensidade da corrente de anel). O índice

AE é importante para obter informações relacionadas à ocorrência e intensidade de subtempestades (SAHAL et al., 2007). Os dados do campo magnético interplanetário total (B), da componente vertical do campo magnético interplanetário (Bz), da velocidade (Vp) e densidade de prótons (Np) do vento solar foram obtidos pelo satélite ACE e disponibilizados em (<http://www.srl.caltech.edu/ace/>).

Tabela 1 – Cidade, sigla, latitude e longitude geográfica e latitude dip para cada estação.

Cidade	Sigla	Lat.	Long.	Lat. dip
Imperatriz	IMPZ	5,5°S	47,5°O	2,9°S
Brasília	BRAZ	15,9°S	47,9°O	11,7°S
Pres. Prudente	UEPP	22,3°S	51,4°O	14,9°S
Porto Alegre	POAL	30,1°S	51,1°O	20,7°S

## Resultados

A Figura 2 apresenta os parâmetros do campo magnético interplanetário total (B), da componente vertical do campo magnético interplanetário (Bz), da velocidade (Vp) e densidade de prótons (Np) do vento solar (com resolução temporal de 64 segundos) e os índices geomagnéticos Dst (valores a cada hora), Kp (valores a cada 3 horas) e AE. A Figura 2 inclui também, dia(s) geomagneticamente calmo(s), dia(s) geomagneticamente perturbado(s) e fases da tempestade geomagnética.

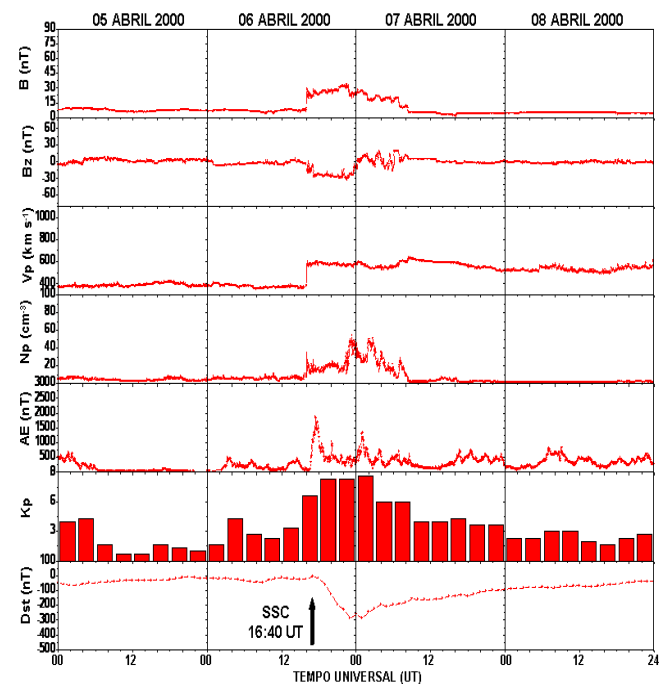


Figura 2 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 5 e 8 de abril de 2000.



A Figura 3 apresenta o conteúdo eletrônico total vertical (VTEC). Os valores do VTEC em linhas verdes referem-se ao dia escolhido como geomagneticamente calmo e são repetidos para todos os dias do evento. Os valores do VTEC em linhas vermelhas referem-se ao(s) dia(s) que incluem respectivamente o(s) dia(s) geomagneticamente perturbado(s), fase principal e fase de recuperação da tempestade geomagnética. A linha tracejada vertical indica o horário em que ocorreu o *sudden storm commencement* (SSC). A abscissa mostra o tempo universal representado por UT e o tempo local ao topo representado por LT. Cabe mencionar que  $LT = UT - 3h$ .

A Figura 4 apresenta as flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT). Como foram citadas por Wanninger (1993) e Mendillo et al. (2000), as flutuações de fase indicam a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas ionosféricas (de extensão quilométrica). A Figura 4 possui o mesmo padrão de formatação da Figura 3.

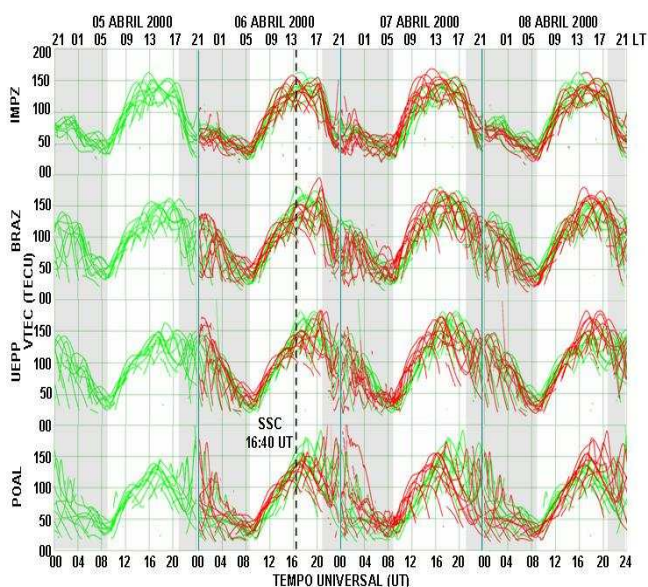


Figura 3 – Conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) entre os dias 5 e 8 de abril de 2000, para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

### Discussão

A Figura 4 mostra flutuações de fase somente na noite de 5-6 de abril (noite geomagneticamente calma), antes da ocorrência de SSC (medido pelo índice  $K_p$  as 16:40 UT) nas estações de IMPZ, BRAZ e UEPP no horário entre aproximadamente 23:00 UT e 4:00 UT e na noite de 6-7 de abril (durante a fase principal da tempestade geomagnética) em todas as estações no horário entre aproximadamente 23:00 UT e 11:00 UT. Estas flutuações de fase são devidas à presença de irregularidades ionosféricas de grande escala

ou bolhas ionosféricas. Pode-se mencionar que nas noites de 4-5, 7-8 e 8-9 (noite geomagneticamente calma ou fase de recuperação) não há presença de flutuações de fase (Figura 4). Esse fato é talvez devido às variações dia para dia na ocorrência de espalhamento na camada F (*equatorial spread F – ESF*) (MENDILLO et al., 1992). Depois da ocorrência de SSC, a Figura 2 mostra uma rápida diminuição do Dst ( $\sim 60 \text{ nT h}^{-1}$  durante 19-23 UT), que dá condição apropriada para penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude para região equatorial (BASU et al., 2005). A Figura 3 mostra que possivelmente durante o período do pôr-do-sol o campo elétrico penetrando de alta latitude se associa ao campo elétrico normal e a camada F tem forte subida na região equatorial (IMPZ). Como é discutido por Basu et al. (2001), a forte diminuição do VTEC em IMPZ no horário do pôr-do-sol indica rápida subida da camada F na região equatorial resultando em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixas latitudes (ex., BRAZ, UEPP e POAL). A Figura 4 mostra que a rápida subida da camada F na região equatorial resultou nas fortes flutuações de fase ( $\sim 00:00$  UT) durante a noite de 6-7 de abril. As flutuações mais fortes são observadas nas regiões afastadas do equador geomagnético (ex., UEPP e POAL), onde a densidade eletrônica na camada F é alta. Também na noite de 6-7 de abril ( $\sim 8:00$  UT) durante a fase de recuperação da tempestade, voltou a ocorrer flutuações de fase possivelmente devida a uma nova subida da camada F na região equatorial (FEJER e EMMERT, 2003).

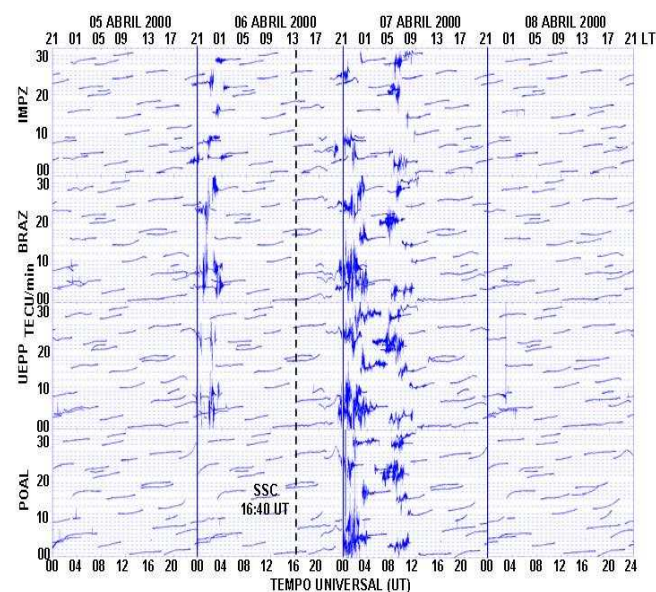


Figura 4 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 5 e 8 de abril de 2000, para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

## Conclusão

Neste estudo foi investigado o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixas latitudes no setor brasileiro durante a supertempestade geomagnética que ocorreu em abril de 2000, através de observações realizadas por 4 estações de GPS.

Pode-se concluir que as observações mostraram penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos resultando em duas rápidas subidas da camada F na região equatorial e difusão de plasma para baixas latitudes, causando duas fortes flutuações de fase ou bolhas ionosféricas. A primeira flutuação de fase ocorreu a aproximadamente 00:00 UT e a segunda durante a fase de recuperação da tempestade a aproximadamente 8:00 UT, ambas na noite de 6-7 de abril.

## Referências

- AARONS, J; MENDILLO, M; YANTOSCA, R. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. **J. Geophysical Research**, v. 101, n. A8, p. 26,851-26,862, 1996.

- ABDU, M. A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 5, n. 13, p. 1505-1519, 1997.

- BASU, SU; BASU, SA; VALLADARES, C. E; YEH, H. -C; SU, S. -Y; MACKENZIE, E; SULTAN, P. J; AARONS, J; RICH, F. J; DOHERTY, P; GROVES, K. M; BULLET, T. W. Ionospheric effects of major magnetic storms during the International Space Weather Period of September and October 1999: GPS observations, VHF/UHF scintillations, and in situ density structures at middle and equatorial latitudes. **J. Geophysical Research**, v. 106, p. 30389-30413, 2001.

- BASU, SA; BASU, SU; GROVES, K. M; MACKENZIE, E; KESKINEN, M. J; RICH, F. J. Near-simultaneous plasma structuring in the mid-latitude and equatorial ionosphere during magnetic superstorms. **Geophysical Research Lett.**, v. 32, n. L12S05, 2005.

- FEJER, B. G; EMMERT, J. T. Low-latitude ionospheric disturbance electric field effects during the recovery phase of the 19-21 October 1998 magnetic storm. **J. Geophysical Research**, 108, A12, 1454, 2003.

- GONZALEZ, W. D; JOSELYN, J. A; KAMIDE, Y; KROEHL, H. W; ROSTOKER, G; TSURUTANI, B. T; VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm?

**J. Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, 1994.

- HOFMANN-WELLENHOF, B; LICHTENEGGER, H; COLLINS, J. **Global Positioning System: Theory and Practice**. 3. ed. Wien: Springer-Verlag, 1994.

- KAMIDE, Y; BAUMJOHANN, W; DAGLIS, I. A; GONZALEZ, W. D; GRANDE, M; JOSELYN, J. A; McPHERRON, R. L; PHILLIPS, J. L; REEVES, E. G. D; ROSTOKER, G; SHARMA, A. S; SINGER, H. J; TSURUTANI, B. T; VASYLIUNAS, V. M. Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. **J. Geophysical Research**, v. 103, n. A8, p. 17,705-17,728, 1998.

- KAPLAN, E. D; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS: Principles and Applications**. 2. ed. Artech House, Inc., 2006.

- MARTINIS, C. R; MENDILLO, M. J; AARONS, J. Toward a synthesis of equatorial spread F onset and suppression during geomagnetic storms. **J. Geophysical Research**, v. 110, n. A07306, 2005.

- MENDILLO, M; BAUMGARDNER, J; PI, X; SULTAN, P. J. Onset conditions for equatorial spread F. **J. Geophysical Research**, v. 97, p. 13,865-13,876, 1992.

- MENDILLO, M; LIN, B; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. **Radio Science**, v. 35, n. 3, p. 885-904, 2000.

- SAHAI, Y; BECKER-GUEDES, F; FAGUNDES, P. R; LIMA, W. L. C; OTSUKA, Y; HUANG, C. -S; ESPINOZA, E. S; PI, X; ABREU, A. J; BOLZAN, M. J. A; PILLAT, V. G; ABALDE, J. R; PIMENTA, A. A; BITTENCOURT, J. A. Response of nighttime equatorial and low latitude F-region to the geomagnetic storm of August 18, 2003, in the Brazilian sector. **Advances in Space Research**, n. 39, p. 1325-1334, 2007.

- SCHUNK, R. W; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry**. USA: Cambridge University Press, 2000.

- TSURUTANI, B. T; GONZALEZ, W. D. **The interplanetary cause of magnetic storms: a review**. In: Tsurutani, B. T; Gonzalez, W. D; Kamide, Y; Arballo, J. K. ed. Magnetic storms. Washington, DC, v. 98, 1997.

- WANNINGER, L. Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS. **GPS World**, p. 48-54, July, 1993.