

Resposta Termosférica-Ionosférica a Tempestades Magnéticas no Setor Sul-Americano

X.T. Pincheira^{*,**}
I.S. Batista^{*}
M.A. Abdu^{*}
P.G. Richards^{***}

^{*}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos-SP, Brasil

^{**}Facultad de Ciencias, Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile

³Center of Atmospheric and Space Sciences, Utah State University, Logan, USA

Apresenta-se um estudo caso a caso de vários eventos de tempestade ocorridos nos anos 86 (mínimo solar) e 89 (máximo solar) para uma rede de estações no setor sul-americano que cobre latitudes baixas, médias e altas: Cachoeira Paulista, CP, (23° S, 45°W, -12.6° lat.mag.) e Fortaleza, FZ, (4°S, 38°W, 4,8° lat .mag.) no Brasil e Concepción, CON, (37°S, 73°W, -25.6° lat. mag) e Ilha Rei Jorge, IRJ, (62° S, 59°W, -50.7° lat. mag.) no Chile.

A dinâmica ionosférica-termosférica é modelada usando o modelo FLIP (Field Line Interhemispheric Plasma) para estudar a propagação de padrões perturbados de ventos termosféricos e as mudanças na atmosfera neutra que originam as fases negativas em altas latitudes.

As tempestades desenvolvidas no mínimo solar tem efeitos maiores sobre a ionosfera que aquelas desenvolvidas no máximo solar. Os efeitos sazonais prevaescem sobre os de ciclo solar em altas latitudes. Na região de CON, os ventos perturbados prevaescem por vários dias, mantendo a altura do pico de ionoização da camada F2, hmax, alta. Em CP, hmax é afetada por um efeito local, o vento zonal geográfico.

Os padrões modelados de ventos acompanham as mudanças de hmax e são de magnitude maior em médias latitudes. Observa-se claramente a propagação de perturbações nos ventos associada ao início de sub-tempestades. As mudanças introduzidas nas concentrações da atmosfera neutra explicam as fases negativas sobre IRJ, mas não sobre CON.

INTRODUÇÃO

O acoplamento dinâmico do sistema ionosfera-termosfera durante tempestades magnéticas é um problema científico de vigência na atualidade pelas profundas modificações que este sofre. Particularmente, existe pouco estudo feito no setor sul-americano, que apresenta configurações magnéticas especiais, como a presença de Anomalia Magnética do Atlantico Sul, AMAS, e grande inclinação magnética, o qual faz este estudo necessário.

O FLIP [Torr et al., 1990; Richards et al., 1994] é um modelo plasmaférico-ionosférico unidimensional e inter-hemisférico que tem sido amplamente usado em cálculos de ventos termosféricos através do método de Miller et. al. [1986] o qual supõe uma relação linear entre hmax e a velocidade dos ventos, desprezando a ação dos ventos sobre a deriva vertical ionosférica, o qual é efetivo fora de baixas latitudes, onde deve ser subtraída a contribuição de campos elétricos na mudança de hmax.

DADOS EXPERIMENTAIS E MODELAGENS

Foram selecionados 10 períodos de tempestade a serem analisados, para os quais existiam dados simultâneos nas quatro estações; foi feita também uma seleção de cinco dias calmos próximos ao evento perturbado para serem usados como referência.

Valores de hmax são obtidos dos parâmetros foF2, foE e M3000(F2) reduzidos de ionogramas, usando a fórmula de Bradley e Dudeney [Dudeney,1983]:

$$h_{max} = \frac{1490}{M3000 + \frac{0.18}{\frac{foF2}{foE} - 1.4}} - 176$$

Os parâmetros foF2 e hmax são usados para analisar a dinâmica ionosférica e a velocidade dos ventos meridionais magnéticos para descrever a dinâmica termosférica.

Para executar o FLIP precisa-se ingressar para cada dia a modelar, valores de hmax, do índice Ap, do fluxo solar EUV, os parâmetros da atmosfera neutra, que são fornecidos pelo modelo MSIS-86 (Mass Spectrometer and Incoherent Scatter) [Hedin et al., 1986]. Foram obtidos os ventos meridionais magnéticos perturbados para todos os dias das tempestades. Mudando as concentrações de O e N₂ fornecidas pelo MSIS-86, estuda-se as mudanças em foF2 causadas para reconstruir as fases negativas observadas sobre IRJ e CON.

Como na região equatorial a deriva vertical dos íons deve-se exclusivamente a campo elétrico, são usados dados de deriva medidos sobre FZ (a 650 km) para inferir derivas verticais sobre CP na região do pico por mapeamento do campo elétrico ao longo da linha de campo magnético.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se variabilidade dia-noite maior no inverno que no verão em IRJ e CON, já em latitudes

menores acontece o contrário. Em IRJ e CON, os efeitos de mudanças na concentração, especificamente na razão entre as concentrações de espécies moleculares e atômicas ($[N_2]/[O]$), afeta fortemente a ionosfera, inclusive durante períodos calmos, quando é observada a Anomalia Sazonal, ou seja, variações dia-noite no inverno mais marcantes que no verão.

Observam-se fases negativas com muita frequência em IRJ, com menos frequência em CON e muito esporadicamente em CP. Estas fases são mais intensas no verão.

Em geral, os efeitos sobre a camada ionosférica parecem ser mais notáveis durante períodos perturbados em anos de atividade solar baixa, durante meses de verão e equinócio e durante o inverno em anos de atividade solar alta.

Em latitudes equatoriais e baixas, são frequentemente observados campos elétricos do dínamo perturbado por ação de ventos ou de penetração direta, que inibem ou reforçam a formação da Anomalia Equatorial.

Nas tempestades de setembro e outubro de 86 e de agosto, setembro e outubro de 89 observaram-se propagações do pólo para equador de perturbações nos ventos termosféricos que elevam h_{max} , associadas a subtempestades magnéticas. Tal perturbação pode estar associada à propagação de TIDs (Travelling Ionospheric Disturbances) que são oscilações ionosféricas comunicadas por ondas de gravidade através do arrasto iônico.

Na fig. 1 apresentam-se as tempestades de outubro 86 e setembro 89. A linha tracejada vertical mostra o tempo de início da perturbação e a flecha inclinada esquematiza a propagação latitudinal. Note-se que existem diferenças latitudinais e longitudinais entre as estações, não representadas na figura.

Os padrões de ventos são mais perturbados durante mínimo solar, quando as magnitudes são maiores. Geralmente a propagação da perturbação é para o equador, mas observa-se também ventos soprando para o pólo sobre CP durante alguns eventos. Variações sazonais na circulação global, assimetria na distância dos pólos magnéticos, variação temporal de penetração energética podem causar tal observação (Abdu et al., 1995). Na fig. 2 mostram-se, como exemplo, os ventos termosféricos obtidos do FLIP para as tempestades de outubro 86 e setembro 89.

No dia 16 de outubro de 86 observa-se um vento para o equador de magnitude muito maior sobre CP que sobre CON, junto com isso, não é observada uma subida em h_{max} sobre FZ que possa fazer pensar na ação de um campo elétrico. Isto pode indicar ação do vento zonal geográfico, cuja componente meridional magnética é importante devido à grande declinação magnética. Uma intensificação do vento para o oeste, vai intensificar o vento meridional magnético para o equador e elevar a camada ionosférica.

Nas duas tempestades mostradas na fig. 1, observam-se fortes fases negativas sobre IRJ e no dia 20 de setembro de 89 sobre CON. A fig. 3 mostra as variações sofridas por foF2 quando são mudadas as concentrações de $[O]/[N_2]$ na modelagem.

Em geral, obtém-se que as mudanças sobre foF2 são proporcionais diretamente a mudanças em $[O]$ e inversamente a mudanças em $[N_2]$, sendo mais efetiva uma mudança em $[O]$. Se $[O]$ aumenta/diminui, foF2 aumenta/diminui, h_{max} sobe/desce e os ventos termosféricos são mais para o pólo/ equador. Se $[N_2]$ aumenta/diminui, foF2 decresce/crece, h_{max} sobe/desce e os ventos são mais para o pólo/ equador. As mudanças em h_{max} e ventos são desprezíveis, para mudanças realistas das concentrações.

Na fig. 3 mostram-se os resultados das simulações das mudanças na atmosfera neutra para os dias 15 de outubro de 86 e 19 de setembro de 89, onde simula-se a fase negativa sobre IRJ. Para isso, diminui-se a concentração de $[O]$ a saída do MSIS multiplicando por algum fator menor que um. Vemos como no caso do dia 15 de outubro, que uma diminuição entre 40 e 30 % em $[O]$ podem reproduzir a fase negativa; observa-se durante as horas da madrugada uma diminuição de 30% em $[O]$; a modelagem reproduz muito bem o comportamento dos dados. Durante a manhã, a concordância é melhor com a curva que modela uma diminuição de 40%. Em torno do meio-dia, a fase negativa diminui, sendo modelada melhor por uma diminuição de 30% mas volta a aumentar. Nas horas da tarde, a fase negativa começa a decrescer, sendo modelada por uma diminuição de 20% às 1600 UT e continua recuperando. No caso da tempestade de setembro de 89, a falta de dados dificulta a análise, mas podemos ver que a fase negativa foi intensa nas horas da tarde, sendo modelada por uma diminuição de $[O]$ entre 70 e 80%.

CONCLUSÕES

Durante a propagação latitudinal e longitudinal das perturbações produzidas numa tempestade magnética vão acontecendo uma série de efeitos locais que modificam a ionosfera de diversas maneiras. Da análise destes eventos de tempestade observamos que em IRJ (veja fig. 1) predominam as fases negativas, causadas por mudanças na composição da atmosfera neutra, diminuições em $[O]$ podem ser de até 80%. Sobre CON, as fases negativas não resultam completamente explicadas por efeitos de composição, nesta estação de médias latitudes a ação dos ventos é mais efetiva e é a que determina o comportamento de h_{max} . Em CP, campos elétricos e ventos zonais também influenciam em forma importante h_{max} .

As modelagens do FLIP dos ventos termosféricos meridionais magnéticos mostra a formação de padrões perturbados para o equador seguindo a ocorrência de uma perturbação nos índices magnéticos aurorais (uma sub-tempestade).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdu M.A., Batista L.S., Walker G.O., Sobral J.H.A., Trivedi N.B., de Paula E.R. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 57:1065-1083, 1995. Dudeney J.G. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 45: 629-640, 1983.

Hedin A.E., Salah J.E., Evans J.V., Reber C.A, Newton G.P., Spencer N.W., Kayser D.C., Alcayde D., Bauer P, Cogger L., McClude J.P. Journal of Geophysical Research, 82(16):2139-2147, 1977.

Miller K.L., Torr D.G., Richards P.G. Journal of Geophysical Research, 91(A4): 4531-4535, 1986.

Richards P.G., Torr D.G., Buonsanto M.J., Sipler D.P. Journal of Geophysical Research, 99:23359-23365, 1994.

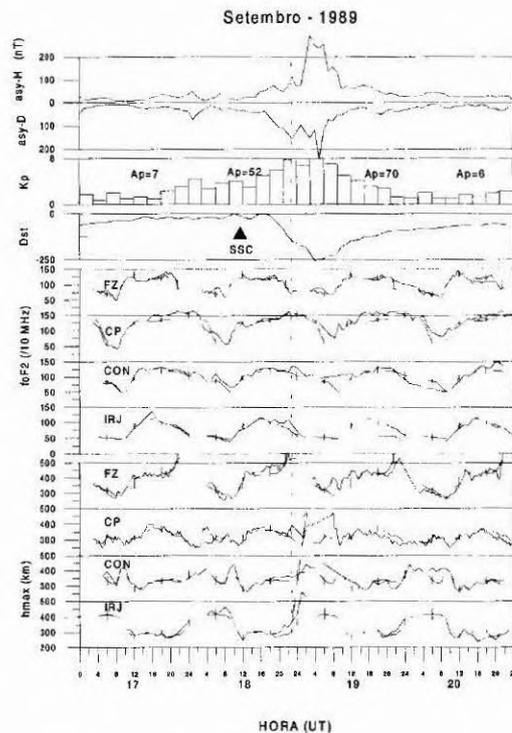
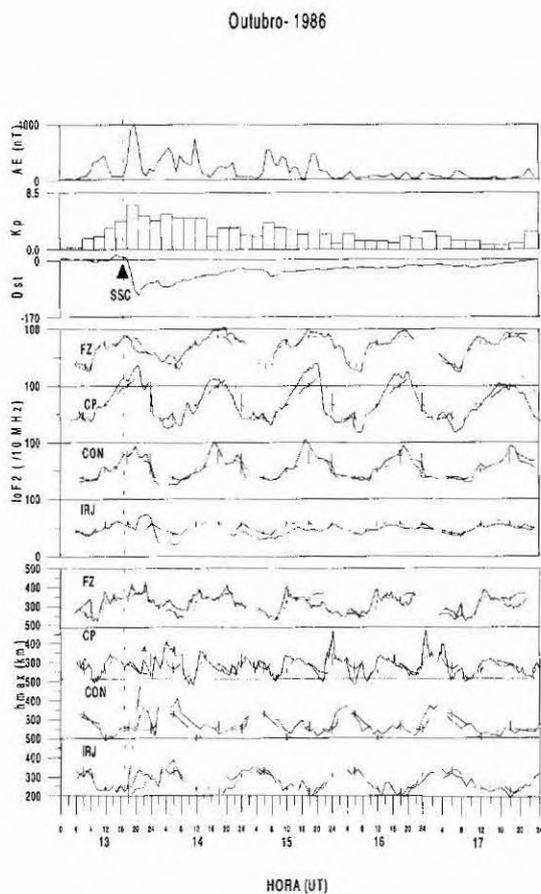


Fig. 1.- Eventos de tempestade. Linha tracejada indica média dos dias calmos do mês, linha contínua, dias de tempestade.

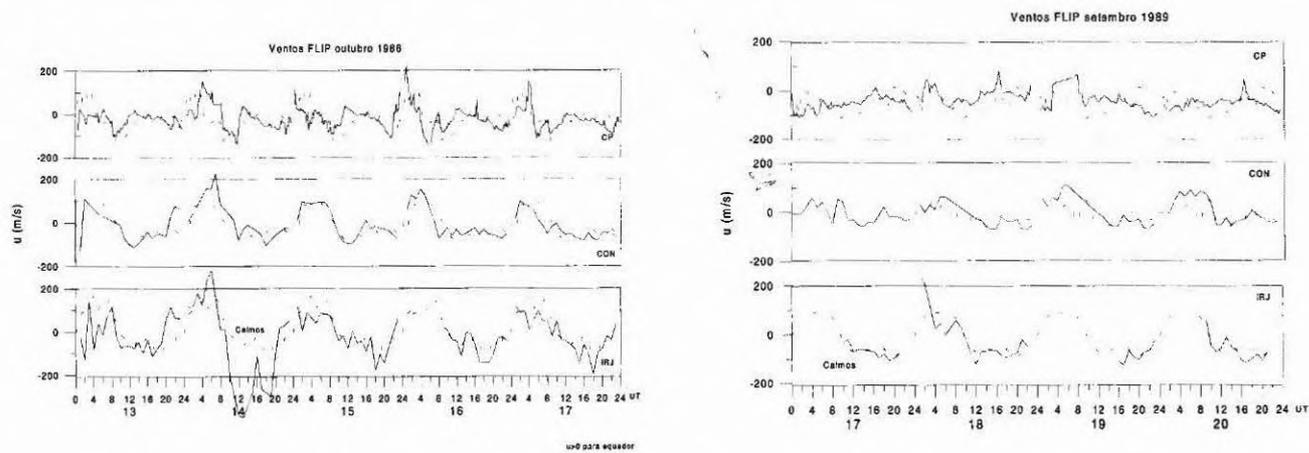


Fig. 2.- Ventos termosféricos meridionais magnéticos obtidos com FLIP usando método de Miller. Linhas tracejadas são cálculos médios para dias calmos e linha contínua, cálculos para cada dia de tempestade.

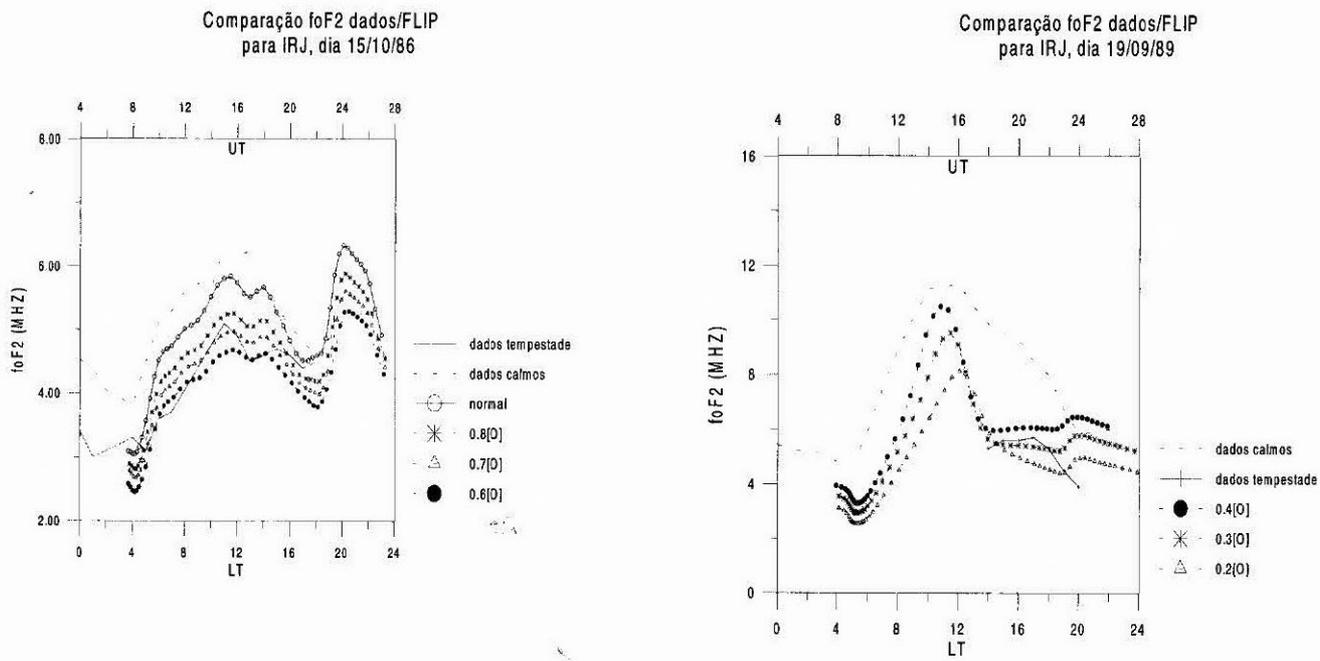


Fig. 3.- Resposta de foF2 a mudanças na concentração de O para dois dias de tempestade.