



# Micropulsações geomagnéticas Pc3-4 em latitudes muito baixas, no Brasil

A. Zanandrea<sup>1</sup>, J. M. Da Costa<sup>1,2</sup>, S. L. G. Dutra<sup>1</sup>, N. B. Trivedi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
São José dos Campos - SP, BRASIL

<sup>2</sup> Universidade de Taubaté – UNITAU  
Taubaté – SP, BRASIL

## ABSTRACT

This study is aimed at the understanding of source mechanisms and propagation modes of Pc3-4 micropulsations at very low and equatorial latitudes. It used simultaneous data measured with a chain of 10 geomagnetic stations in Brazil using high sensitive fluxgate magnetometers. Multiple tapered spectral estimation method based on Fast Fourier Transforms (FFT) was used to obtain micropulsation power spectra, polarization parameters and phases. The dynamic spectra showed the occurrence of 81 simultaneous events of Pc3-4 pulsations with high degree of polarization, mainly during daytime. The diurnal events showed increases in the polarized power density of 3.2 times for pulsations observed at stations close to the magnetic equator in comparison to the more distant ones. The phase of the pulsation observed at stations near the magnetic equator showed a delay of 48° to 62° in relation to the most distant one. This effect is clearly related to the increase of ionospheric conductivity and equatorial electrojet intensity. The polarized power density curves for all the 10 stations showed a similar behavior, the maximum peaks occurring at same frequency. This may indicate a possible link to the plasmaspheric cavity global oscillation mode. The ellipticity was quasi-linear, with the larger axis in the north-south direction, because the poloidal mode is almost uncoupled from the oscillation of magnetic field lines. The amplitude of north-south component is much larger than the west-east one. These results could be evidence that field line resonance mechanism does not explain Pc3-5 micropulsations observed at very low and equatorial latitudes. The increase in the occurrence of Pc3-4 diurnal events is probably associated with incoming compressional waves resulted from bow shock ion cyclotron instabilities that propagate in the magnetosphere at low latitudes. The propagation of the compressional waves may excite the trapped compressional mode or the compressional global mode. The resulting phenomenon, field lines forced oscillations in the plasmasphere, may be a possible source mechanism for Pc3-4 pulsations at very low latitudes.

## INTRODUÇÃO

A ampla maioria dos estudos de micropulsações geomagnéticas tem se concentrado em dados de satélites e de estações de médias e altas latitudes, enquanto que os das latitudes muito baixas e da região equatorial têm recebido menor atenção. As características e mecanismos de geração e propagação das micropulsações nas latitudes muito baixas ainda não são bem entendidos e podem estar relacionados aos mecanismos de geração e propagação de micropulsações de altas latitudes (Feng et al., 1995). Nas latitudes muito baixas, uma fração significativa das linhas de campo magnético estão contidas dentro da ionosfera, influenciando nas propriedades dos sinais nestas latitudes e levando a diferentes características de onda em relação às altas latitudes (Yumoto, 1986; Feng et al., 1995; Matsuoka et al., 1997). A teoria de ressonância das linhas de campo tem explicado numerosas observações em altas e médias latitudes. Mas, nas latitudes muito baixas, a existência da ressonância de linhas de campo tem sido questionada (Yumoto, 1986; Feng et al., 1995). Vários tipos de micropulsações mostram significativa aumento de amplitude na região equatorial devido ao eletrojato equatorial. Sastry et al. (1983) observaram um fator de aumento de 1,4 a 3,5 na amplitude das pulsções Pi2 na região equatorial, para eventos diurnos. Recentemente, Sarma e Sastry (1995) encontraram aumento de amplitude com fator de 2,0 a 2,5 sobre uma grande faixa de período, com rápida diminuição para períodos menores que 20s, próximo ao meio dia local.

Este trabalho tem por objetivo investigar as influências do eletrojato equatorial sobre as micropulsações geomagnéticas Pc3-4 e inferir os mecanismos físicos de geração e propagação em latitudes muito baixas e equatoriais. Para realizar este estudo, fez-se uso dos dados geomagnéticos coletados na rede de 10 estações que o INPE vem operando, já há vários anos, em colaboração com a Universidade de Kyushu (Japão), Observatório Nacional ON/CNPQ, EMBRAPA, TESA e UFSM, no noroeste, norte, nordeste e sul do território brasileiro. Esta rede de estações tem distribuição geográfica bidimensional, incluindo estações com latitudes desde 29,7°S a 1,4°S e longitudes desde 38,5°W até 63,9°W, que são: Santa Maria (29,7°S, 53,9°W), Cuiabá (15,35°S, 56°W), Colibri (13,7°S, 59,8°W), Vilhena (12,7°S; 60°W), Presidente Médici (11,3°S; 61,8°W), Ariquemes (9,6°S; 63°W), Porto Velho (8,8°S; 69,9°W); Eusébio/Fortaleza (3,9°S; 38,5°W), São Luiz/Alcântara (2,3°S; 44,2°W); Belém/Tatuoca (1,4°S; 48,4°W). Cada estação é equipada com um magnetômetro do tipo "fluxgate" capaz de realizar medidas das variações geomagnéticas das componentes H (norte-sul), D (leste-oeste) e Z (vertical) com resolução em amplitude menor que 0,5 nT, num intervalo de amostragem de 3 s.

## MÉTODO DE ANÁLISE E RESULTADOS

Para investigar a variação espacial dos parâmetros de micropulsações Pc3-4 ao longo da rede de estações, escolheu-se 26 dias de dados simultâneos entre os dias 7 de outubro a 1 de novembro de 1994. Após o pré-processamento dos dados fez-se a filtragem digital dos dados através de um filtro tipo passa-banda (Stearns e Ruth, 1993), para eliminar a variação diurna do campo geomagnético. Posteriormente, fez-se a análise espectral do sinal filtrado utilizando o método de estimação espectral por múltiplas janelas (Thomson, 1982; Percival e Walden, 1993), baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT), para obter o espectro de potência e os parâmetros de polarização: grau de polarização, elipticidade, azimute e fase das micropulsações em função da frequência. Posteriormente foram calculados os espectros dinâmicos dos sinais das componentes H e D (plano H-D) para todos os dias, em todas as estações, para identificar eventos (ou intervalos) com alto grau de polarização (coerência), acompanhados de alta potência polarizada, simultaneamente nas 10 estações.

A análise espectral dinâmica das pulsações na faixa das Pc3-4 entre 07 de outubro a 01 de novembro de 1994 mostrou 81 eventos altamente polarizados, que foram submetidos a análise espectral de potência, polarização e fase. A Figura 1 mostra a estatística do número de eventos em função do período (Figura 1a) e da hora do dia (Figura 1b). A maioria dos eventos ocorreram com períodos entre 40 e 70 s (Figura 1a). Isto já era esperado, pois a frequência fundamental das oscilações das linhas de campo na plasmasfera está na faixa de frequência das Pc3-4 (Nishida, 1978) e a faixa de frequência dominante esperada para as pulsações observadas em latitudes muito baixas está entre 40 e 100 s (Menk et al., 1994).

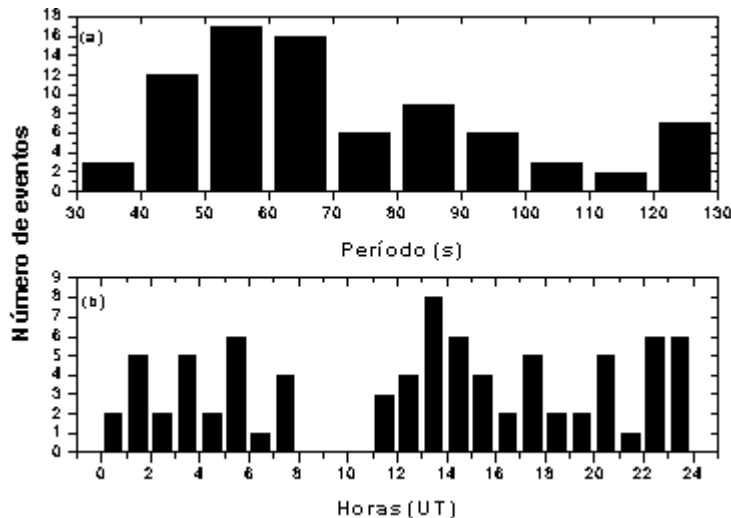


Figura 1 - Estatística dos 81 eventos de pulsações na faixa Pc3-4 altamente polarizados submetidos a análise de polarização e fase.

A variação diurna dos parâmetros das micropulsações mostraram modificações causadas pelas alterações da condutividade ionosférica, que ocorrem na região equatorial durante as horas do dia. A Figura 2 mostra a variação diurna do perfil espacial (em função do ângulo de inclinação magnética *dip*) da densidade de potência polarizada (a), dos parâmetros de polarização (b, c, d) e da fase relativa das componentes H e D (e, f), obtidos da análise dos 81 eventos na faixa de Pc3-4. Os perfis da densidade de potência polarizada, grau de polarização e fase da componente H mostram grande variação espacial nas estações próximas ao equador magnético. A densidade de potência polarizada apresenta um aumento equatorial de cerca de 3,2 durante as horas do dia (Figura 2a). A componente H mostra um atraso de fase equatorial entre 48° e 62° e a componente D mostra avanço de fase equatorial em torno de 100° durante o dia (Figuras 2e, f). Estes efeitos equatoriais aumentam durante o dia, sofrem alterações durante o anoitecer e diminuem ou desaparecem durante a noite. O aumento equatorial da densidade de potência polarizada e do grau de polarização diminuem com a frequência das pulsações, enquanto que o atraso de fase da componente H e o avanço de fase da componente D crescem com o aumento da frequência. Essas variações devem-se ao aumento da condutividade ionosférica e a intensificação do eletrojato equatorial durante as horas do dia. O atraso de fase também pode ser explicado pelo efeito de indução entre a corrente ionosférica equatorial e a corrente imagem no solo.

A variação diurna dos parâmetros das pulsações Pc3-4 mostra alterações no amanhecer e no anoitecer, chamados de efeitos do amanhecer e anoitecer. Durante as horas do anoitecer há um segundo pico na estatística de ocorrência de eventos simultâneos e no amanhecer não há eventos simultâneos de pulsações Pc3-4 (Figura 1b). As causas da ausência de pulsações no horário de amanhecer ainda são desconhecidas, mas provavelmente estão associadas a blindagem ionosférica causadas pela diminuição da condutividade ionosférica de Hall em relação a de Pedersen.

Durante o anoitecer, há um segundo pico na densidade de potência polarizada e no grau de polarização, uma diminuição no atraso da fase equatorial da componente H e uma diminuição no avanço de fase da componente D (Figuras 2a, b, e, f). As pulsações Pc3-4 ao anoitecer provavelmente são geradas pelas ondas compressivas e modificadas ou filtradas pela ionosfera devido ao aparecimento da corrente chafariz na região da Anomalia Equatorial de Appleton.

A grande maioria dos eventos de pulsações Pc3-4 mostra pequena elipticidade e azimute, indicando predominância de amplitude da componente H sobre a D (Figuras 2c, d). É provável que estas pulsações estejam associadas ao modo de oscilação poloidal (compressional) das linhas de campo, já que o modo compressional atravessa a ionosfera sem significativa rotação do eixo maior da elipse de polarização. A presença predominante do modo compressional ou de polarização linear na direção sul-norte (pequeno azimute) durante as horas do dia é incompatível com as características de polarização devido à onda superficial gerada pela instabilidade Kelvin-Helmholtz, a qual mostra inversão no sentido de polarização em torno do meio-dia local. Estas características da variação diurna de polarização das pulsações Pc3-4 em latitudes muito baixas também são incompatíveis com o modelo de ressonância das linhas de campo, que mostra presença do modo toroidal e um perfil latitudinal com pico de densidade de potência associada a uma reversão de polarização.

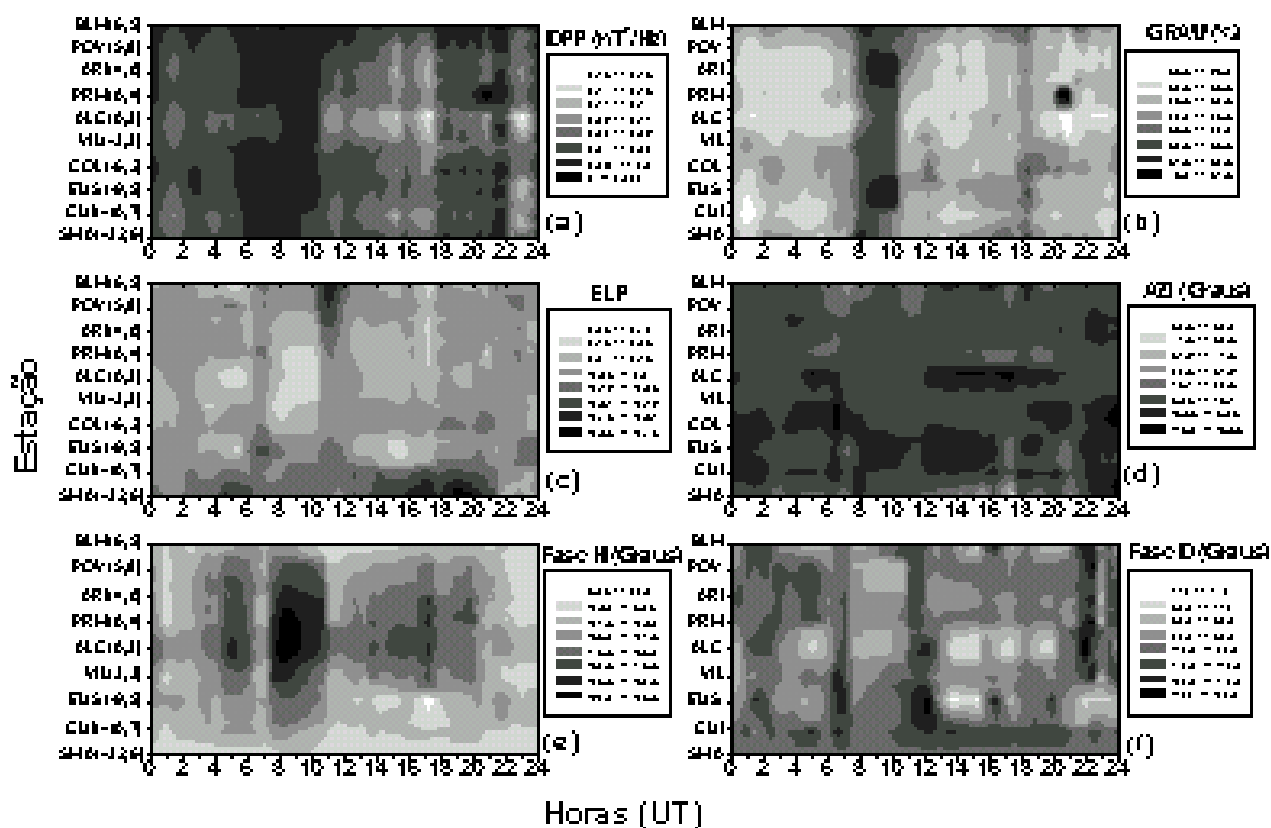


Figura 2 - Variação diurna do perfil espacial de densidade de potência, parâmetros de polarização e fase relativa das componentes H e D, obtidos da análise dos 81 eventos na faixa de Pc3-4, entre 07/10 a 01/11/1994.

O aumento da estatística de ocorrência das pulsações Pc3-4 altamente polarizadas durante o dia, com máximo próximo ao meio-dia local, na presença predominante do modo poloidal ou compressional está provavelmente associada com a propagação da onda proveniente da instabilidade íon-ciclotrônica na região da frente de choque. Estas ondas se propagam na magnetosfera em baixas latitudes como modo compressional durante as horas do dia e podem acoplar-se aos modos de oscilações estáveis das linhas de campo. Este acoplamento pode excitar a ressonância de linhas de campo localizadas, bem como a ressonância global da cavidade plasmasférica, gerando ondas do modo compressional global (Yumoto, 1986; Kuwashima a Fujita, 1989; Matsuoka et al., 1997). O modo de onda compressional parece ser consistente com os resultados dos eventos Pc3-4 estudados, já que a grande maioria mostrou um domínio da componente H sobre a componente D (baixos valores absolutos da elipticidade e azimute). Em adição, os eventos na faixa de Pc3-4 mostraram frequências independentes do ângulo de inclinação magnética, evidenciando que estão

relacionados a um fenômeno físico de dimensões espaciais maiores que as distâncias que separam as 10 estações. Estes resultados indicam uma fonte comum e um mecanismo de propagação compressional, o que reforça a hipótese de que o modo compressional de onda aprisionado, ou o modo global compressional, na plasmasfera, dirige as oscilações forçadas das linhas de campo, sendo o provável mecanismo fonte das pulsações Pc3-4 em latitudes muito baixas.

## CONCLUSÕES

As peculiaridades mostradas pelas pulsações Pc3-4 na região equatorial são atribuídas à fatores como o aumento da condutividade ionosférica e a intensificação do eletrojato equatorial durante as horas do dia, que regula a propagação das ondas compressionais geradas pela instabilidade íon-ciclotrônica na região de choque que se propaga na magnetosfera em baixas latitudes. Fatores adicionais, tal como a condutividade ionosférica, regulam a propagação das ondas Pc3-4 na região próxima ao equador magnético, enfatizando a importância do acoplamento plasmasfera-ionosfera na propagação dessas pulsações nas latitudes muito baixas e equatoriais.

## REFERÊNCIAS

- Feng, O.; Fraser, B. J.; Menk, F. W.; Ziesolleck, C. W. S. Pc3-4 geomagnetic pulsations observed at very low latitude conjugate stations. *Journal of Geophysical Research*, v.100, n.A10, p.19287-19298, 1995.
- Kuwashima, M.; Fujita, S. **Characteristics of the magnetohydrodynamic waves observed in the Earth's magnetosphere and on the ground**, Geophysical Mon. 81, Solar System Plasma Physics, editado por J. H. Waite Jr., J. L. Burch, R. L. Moore, pp. 197-219, AGU, Washington, 1989.
- Matsuoka, H.; Takahashi, S.; Kokubun, K.; Yumoto, T.; Yamamoto, S. I.; Vershinin, E. F. Phase and amplitude structure of Pc3 magnetic pulsations as determined from multipoint observations. *Journal of Geophysical Research*, v.102, n.A2, p.2391-2403, 1997.
- Menk, F. W.; Fraser, B. J.; Water, C. L.; Ziesolleck, C. W. S. Ground measurements of low latitude magnetospheric field line resonances. In: **Solar Wind Source of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves**, eds: Engebretson, M. J.; Takahashi, K.; Scholer, M., AGU Geophysical Monography, v.81, p.25-43, 1994.
- Nishida, A. **Geomagnetic Diagnostic of the Magnetosphere**, New York: Springer Verlag, 1978.
- Percival, D. B.; Walden, A. T. **Spectral Analysis for Physical Applications**, Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- Sarma, S. V. S.; Sastry, T. S. On the equatorial electrojet influence on geomagnetic pulsation amplitudes. *Journal Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.57, p.749-754, 1995.
- Sastry, T. S.; Sarma, Y. S.; Sarma, S. V. S.; Narayan, P. V. S. Day-time Pi pulsations at equatorial latitudes. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.45, p.733, 1983.
- Stearns, S. D.; Ruth, A. D. **Signal Processing Algorithms in Fortran and C**, New Jersey: Prentice Hall Signal Processing Series, 1993.
- Thomson, D.J. **Spectral estimations and harmonic analysis**, Proc. IEEE, v 70., n. 9, p. 1055-1096, 1982.
- Yumoto, K. **Generation and propagation mechanism of low-latitude magnetic pulsations - a review**. *Journal of Geophysics*, v.60, p.79-105, 1986.