

Estudo da Variação do Ângulo de Inclinação Magnética em São Luís (MA): Modelo IGRF vs Magnetômetro

Almeida P. D. S. C.^{1,2}, Denardini C.M.¹, Resende, L. C. A.^{1,2}, Aveiro H.C.¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, P.O. Box 515 - S. J. Campos, SP, Brasil

² ETEP Faculdades - Av. Br. do Rio Branco, 882 - 12242-800 - S. J. Campos - SP, Brasil

Copyright 2007, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 November 2007.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In the present paper we show some new results related to a comparative study on variation of the dip angle at São Luís (2°31' S, 44°16' W), on the equatorial region, calculated from magnetometers data and from IGRF simulations. We have investigated the secular variation of the Earth magnetic field using both magnetometers and IGRF method. The altitudinal dependence of the dip equator location was investigated from IGRF simulations alone. Short time scale (less than a day) magnetic variations of the dip angle were also investigated from magnetometers measurements using a spectral analysis. Among the conclusion, we have obtained an evidence of a coupling processes between the neutral atmosphere (thought the Sq system) and its effects on the induced magnetic field at the ground level. The analysis have revealed a significance order for the atmospheric tides. The diurnal, semidiurnal and terdiurnal tides driven by solar heating appeared to dominate. And the semidiurnal, diurnal and terdiurnal lunar gravitational tides appeared next in strength.

Introdução

A Terra é envolvida por um campo magnético, o qual apresenta importantes características, como por exemplo, uma geometria aproximadamente dipolar não centrada nos eixos geográficos. Deste campo, 99% do seu total é conhecido com Campo Principal do Campo Geomagnético e supostamente é originado por correntes elétricas que circulam na parte líquida do núcleo da Terra (Hargreaves, 1992). O 1% restante é creditado à fontes externas, tais como correntes elétricas ionosféricas e magnetosféricas. O Campo Geomagnético não é estável, apresentando variações temporais e espaciais com amplitudes muito inferiores à do campo magnético gerado no núcleo, em várias ordens de grandeza. Algumas das variações mais conhecidas e estudadas são classificadas em variações seculares e variações diurnas solares e lunares. Variação secular é a mudança lenta e contínua no campo principal do Campo Geomagnético. Ela é associada com as correntes elétricas que fluem no núcleo externo da Terra e tem uma escala temporal que chega a mil anos. As variações diárias são causadas principalmente pelas correntes fluindo na atmosfera superior, onde o movimento devido aos ventos e marés na atmosfera resulta na ação do dínamo, gerando campos e correntes ionosféricas. Estas variações apresentam dependência com a latitude, estação e com o ciclo de manchas solares (período de 11 anos). Em dias

de pouca atividade solar ela é chamada de Variação diurna do campo geomagnético ou variação *Solar Quiet*, Sq, apresentando uma magnitude para o campo magnético na faixa desde algumas dezenas até centenas de nano teslas. Essa variação diária pode ser causada também devido as interações da magnetosfera terrestre com compressões causadas por atividade solar (Nair, 1970). Vários estudos têm sido feito sobre a variação do campo magnético e sobre as suas variações temporais (Campbell, 1966; Pushkov e Chenova, 1979; Knecht e Shuman, 1985; Duhau e Martinez, 1995; Arora e Bhardwaj, 2003). Neste trabalho apresentaremos a análise quantitativa da eficiência do modelo IGRF na determinação do ângulo de declinação na região de São Luís (MA) em comparação aos dados obtidos do magnetômetro de São Luís, no Maranhão. Também estudamos a evolução do ângulo DIP com uma análise espectral simplificada onde algumas das oscilações conhecidas do campo magnético terrestre foram identificadas.

Instrumentação e Ferramentas Matemáticas

Para este estudo foram utilizados dados obtidos do magnetômetro instalado no Observatório Espacial de São Luís (OESLZ-INPE/MCT), no Maranhão (2,3° S, 44,2° O), e também simulações utilizando o modelo global IGRF. No OESLZ estão instalados dois magnetômetros do tipo *fluxgate* os quais monitoram o campo magnético e suas flutuações nos sistemas mais utilizados: coordenadas geográficas (X, Y, Z) e coordenadas magnéticas (H, D, Z). A Figura 1 mostra o vetor total do Campo Geomagnético que é representado pela letra F . A componente magnética norte representa o elemento linear X , a componente magnética leste representa Y , Z a componente vertical para baixo, H a componente horizontal perpendicular a superfície da Terra. O elemento angular D representa a declinação magnética, e é o ângulo entre o norte geográfico (X) e a componente horizontal do campo magnético (H). O elemento angular I representa a inclinação magnética, e é o ângulo entre a componente magnética horizontal (H) e o vetor intensidade total do campo magnético (F).

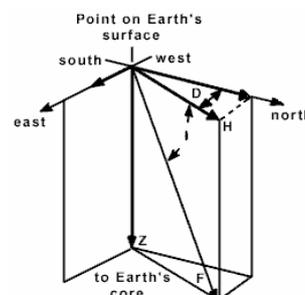


Fig.1 - Elementos do vetor magnético.

Magnetômetro

O magnetômetro instalado em São Luís tem o objetivo principal de registrar as variações diurnas geomagnéticas relacionadas ao eletrojato equatorial na região brasileira e do ângulo de inclinação magnética, possibilitando investigações experimentais sobre as variações temporais do campo magnético terrestre. Para o presente estudo foi utilizado o instrumento consiste de um sensor tipo *fluxgate* enterrado a 1 m de profundidade numa distância de 60 m do computador de processamento. Este magnetômetro mede as componentes **X**, **Y** e **Z**. A fórmula usada para o cálculo do ângulo DIP (Eq. 1) é baseada nas componentes medidas do magnetômetro. (Chapman e Bartels, 1940)

$$\arccos I = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (1)$$

Os dados são armazenados em intervalos de 1 segundo. Contudo, a resolução temporal adotada para este estudo foi de 1 minuto. Esse decremento na resolução foi obtido através da média do minuto de aquisição.

Modelo Global IGRF

O modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Fields*) é uma representação matemática do campo magnético principal da terra usado em estudos do interior terrestre, da crosta, da ionosfera e da magnetosfera. O IGRF é oriundo de uma colaboração internacional baseada na cooperação entre institutos e agências responsáveis pela coleta e publicação dos dados do campo magnético. O modelo incorpora dados dos observatórios permanentes e se baseia na expansão de harmônicos esféricos (Cain et al., 1968). A versão a mais recente do modelo é a 10ª geração IGRF que foi finalizada pela modificação do 5º grupo de trabalho da IAGA em abril de 2005. Ele inclui modelos do campo principal em intervalos de cinco anos de 1900 a 2005, e um modelo secular da variação para 2000-2005 (McLean, 2007).

Transformada de Fourier

O método da transformada de Fourier tem importantes aplicações em análises de dados. A Eq. 2 apresenta o método pelo qual são obtidos os coeficientes da transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*, DFT). Contudo, há um método computacional mais eficiente para o cálculo da DFT, conhecido como transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT), o que é baseado na otimização dos somatórios.

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-i.2\pi.j.k/N} \quad (2)$$

O cálculo direto dos coeficientes de uma série de N amostras requer cerca de N^2 operações aritméticas contra $2.N.\log_2(N)$ operações efetuadas na FFT. Essa ferramenta é utilizada para converter uma série de dados no domínio do tempo para o domínio das frequências. No nosso caso, a FFT é usada para estimar o espectro de densidade de amplitudes da variação do ângulo DIP do

campo magnético em função da frequência. A eficiência da FFT torna mais acessível o tratamento de alguns problemas, como por exemplo, no caso de um extenso número de dados (Denardini, 1999).

Resultados e Discussões

Modelo IGRF vs Magnetômetro

Para o presente estudo foi selecionado o período de 14 de dezembro de 2002 até 10 de junho de 2004. Neste período os dados foram coletados e processados conforme descrito na seção anterior. Contudo, para a esta comparação específica entre os dados de magnetômetro e os dados simulados no modelo IGRF optou-se por um decremento maior na resolução temporal. Para esta análise específica a resolução adotada foi de uma amostra por dia para o magnetômetro e uma amostra por mês para o IGRF. Isso foi feito porque o objetivo desta comparação é uma análise da tendência de longo prazo, não necessitando de alta resolução. Outro fato que nos levou a optar pela resolução de um dia é para minimizar o efeito das variações diurnas e de período inferior, sem comprometer a análise de dados. O horário escolhido para a amostra para os dados de magnetômetro foi de meia-noite local. Este horário foi escolhido porque neste horário o campo magnético no solo está menos susceptível as variações diárias, como por exemplo, de origem magnetosférica devido a compressão ser mais eficiente no lado dia e de origem ionosféricas devido as suas correntes (região E). Tomada as devidas providências a respeito da resolução temporal, esta análise consiste da comparação entre os resultados do ajuste linear aplicado aos dados de magnetômetro e os do ajuste linear aplicado às simulações do IGRF. Observe que no mês de março de 2003 há uma descontinuidade nas informações obtidas dos dados de magnetômetros. Neste período o magnetômetro não operou. Os gráficos da figura 2 mostram a variação do ângulo de inclinação magnética I calculada a partir dos dados de magnetômetros e simulados usando o modelo IGRF. Sobreposto às variações temporais estão as respectivas retas obtidas pelos ajustes lineares.

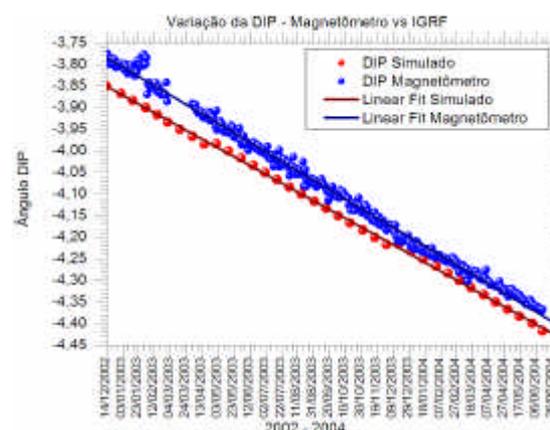


Fig.2 – Variação do ângulo DIP (graus) medido e simulado para os dias 14 de dezembro de 2002 até 10 de junho de 2004 no OESLZ.

O gráfico acima apresenta a variação do ângulo DIP (em graus) dos dados simulados (bolas vermelhas) e a variação dos dados medidos por magnetômetro (bolas azuis) em função do tempo. Nesse gráfico foram feitos ajustes lineares dos dados simulados (reta vinho) e dos dados medidos (reta azul marinho) para definir a tendência de longo prazo. Uma rápida visualização do gráfico mostra que ambos apresentam uma tendência decrescente que indica que aumentando do módulo ângulo DIP, o que evidencia que o equador magnético está se afastando da latitude de São Luís. Isso já era esperado devido à variação secular do campo magnético (Chapman e Bartels, 1940). A tendência do aumento do ângulo DIP observada nas simulações do IGRF é de 0,4453°/ano. A mesma tendência verificada nos dados obtidos pelo magnetômetro não passa de 0,3979°/ano. O que parece indicar que o modelo IGRF superestima a variação do ângulo DIP, ou seja, ele superestima a taxa de variação secular em São Luís. A diferença entre as taxas obtidas dos dados de magnetômetro e das simulações do IGRF é de 0,0474°/ano. Contudo as retas apresentam uma tendência de aproximação, fazendo com que o erro diminua com o passar do tempo. Para ilustrar essa redução no erro sistemático, tome como exemplo o ângulo DIP para as coordenadas de OESLZ obtido pelo magnetômetro e das simulações do IGRF nos dias 14/12/2002 e 06/06/2004. Em 2002 a medida do IGRF mostrava 3,85°S e o magnetômetro registrava 3,79°S, perfazendo a diferença de 0,06°. Ao longo dos anos essa diferença cai chegando à 0,02° em 2004, quando o magnetômetro mostrava 4,40°S enquanto o IGRF mostrava 4,42°S. Ao final, é importante ressaltar que a diferença observada em 2002 representa 1,58% do ângulo DIP ao passo que a diferença observada em 2004 é de 0,48%. Parte desta diferença pode ser creditada as correções sucessivas que são aplicadas aos fatores dos polinômios de Legendre (Cain et. al, 1968). Isto pode ser verificado observando-se a evolução da taxa de variação anual do ângulo DIP. A figura 3 mostra esta evolução da taxa em graus por ano entre os anos de 1990 e 2010.



Fig.3 - Evolução da taxa de variação anual do ângulo DIP simulado entre os anos de 1990 a 2009.

Esta figura revela que, a princípio, os efeitos da variação secular tendem se intensificar a julgar pela curva visualizada nesta figura entre os anos de 1990 e 1995. Esta tendência foi corrigida em 1995, quando a taxa que

estava crescendo de -0,383°/ano para -0,388°/ano foi rebaixada para -0,367°/ano. A evolução continuou a se mostrar crescente, mas menos expressiva, a julgar pela inclinação da curva 1995 e 2005. Neste ano a taxa registrava - 0,373°/ano e foi corrigida para -0,362°/ano. Em resumo, apesar dos coeficientes dos harmônicos esféricos ajustados aos polinômios tenderem a produzir uma característica crescente na taxa de variação secular do ângulo DIP, as correções aplicadas pelo grupo de trabalho da IAGA são superiores a essa tendência. Com isso, uma análise de longo prazo, como a efetuada por nós, deve mostrar que a taxa diminui com o passar dos anos.

Análise das Simulações do Modelo IGRF

A previsão do ângulo DIP feita por um modelo empírico como o Modelo IGRF é muito importante, pois pode influenciar estudos futuros usando os radares instalados em São Luís que trabalham sob o equador magnético observando o eletrojato equatorial. A figura 4 mostra a variação anual do ângulo DIP de 1990 até 2010 para diferentes altitudes.

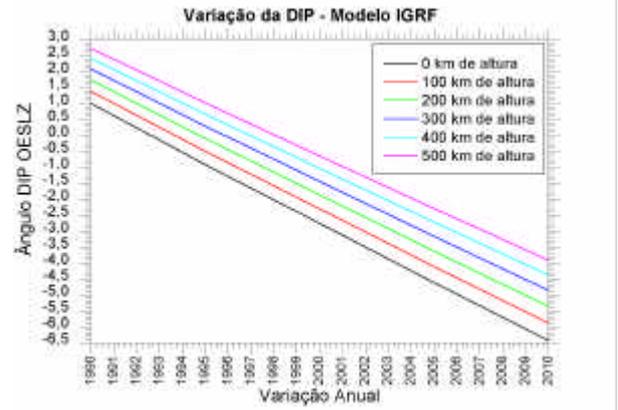


Fig.4 - Variação anual de 1990 a 2009 do ângulo DIP simulado para 0 km, 100 km, 200km, 300 km, 400km e 500 km de altitude para a localidade de São Luís, no Maranhão.

Esta figura revela uma característica importante sobre a evolução do ângulo DIP. Verificamos que este ângulo na localização do observatório apresenta uma variação distinta com altura. A diferença máxima entre o ângulo DIP para cada faixa de altura (a cada 100 km) deve chegar a, aproximadamente, 0,03° em 2010. Como consequência, o local onde as linhas do campo magnético terrestre são horizontais (equador magnético) também apresenta uma variação com o aumento da altitude. No solo o equador magnético está localizado mais ao norte do que em altitudes maiores. Tomemos, por exemplo, o ano de 1996, lembrando que a relação entre o ângulo DIP e a latitude magnética é dada por:

$$tg(I) = 2.tg(q) , \tag{3}$$

a qual pode ser aproximada para:

$$I = 2q \tag{4}$$

em baixas latitudes. Neste ano, o ângulo DIP para a coordenada de OESLZ no solo era de 1,3°S, isto é, o equador magnético estava localizado a 2,6° de latitude magnética ao norte do observatório. Neste mesmo ano, na altura de 300 km o equador magnético estava localizado praticamente sobre o OESLZ. Já na altitude de 500 km o ângulo DIP era de 0,7°N. Isso mostra que nessa altitude o equador magnético estava localizado a 1,4° de latitude magnética ao sul do observatório. A diferença máxima observada na localização do equador magnético entre altura do solo e 500 km de altitude chega a, aproximadamente, 5,4° magnéticos em 2010. É importante lembrar que essa seção trata das simulações do IGRF. Contudo, na seção anterior afirmamos que há uma discrepância entre ângulo DIP calculado através das simulações e ângulo obtido através do magnetômetro. Essa discrepância não foi considerada nesta seção porque não dispomos de dados do campo magnético medidos a bordo de satélites, os quais poderiam prover informações numa faixa de altitude limitada, porém satisfatória para efeitos de comparação deste trabalho.

Análise da Variação do DIP do Magnetômetro

Uma terceira análise realizada neste estudo é sobre as variações de pequena escala que foram desconsideradas na primeira seção. Para isto, foi selecionado o mesmo período de 14/12/2002 a 06/06/2004, mas diferentemente da primeira seção de resultados foram tomados dados a cada minuto. Com base nas discussões anteriores sobre a tendência do equador magnético afastar-se gradativamente do sítio onde está localizado o observatório e de posse do ajuste linear aos dados de magnetômetro, a tendência de longo prazo foi removida matematicamente. Com isso, restaram tendências de longo período não incluídas na variação secular, variações diárias e oscilações de pequena escala como as micro-pulsações. A partir daí, todos os valores resultantes foram subtraídos do valor médio da série no período considerado. Finalmente, procedemos à análise espectral desta série temporal conforme discutido na seção de ferramentas matemáticas, cujo resultado é mostrado no gráfico da figura 5. A frequência de corte neste gráfico é de $8,333 \cdot 10^{-3}$ Hz uma vez que a resolução temporal é de 60 s, pois esta frequência é obtida pela sua relação com o inverso do dobro da resolução temporal (teorema de Nyquist). E, como dispusemos de ~770.000 pontos, a resolução de frequência possível de ser obtida foi de $2,176 \cdot 10^{-8}$ Hz. Neste gráfico, foi possível identificar picos de amplitudes os quais estão correlacionados com os períodos das oscilações da atmosfera neutra causados por marés atmosféricas. Esta característica mostra o acoplamento da dinâmica da atmosfera neutra com o campo magnético terrestre, através das influências do sistema de correntes Sq nos dados de magnetômetro. As setas apontam àquelas que cremos ser as oscilações relacionadas às marés atmosféricas. Essas marés são divididas, basicamente, em marés solares com período submúltiplo de 24 h (setas laranja) e marés lunares com período submúltiplo de 24,84 h (setas cinza).

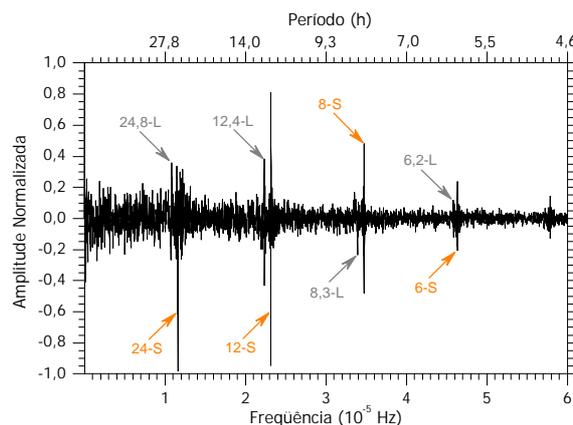


Fig.5 - Análise espectral dos dados de magnetômetro no domínio das frequências por amplitude.

Podemos observar no gráfico as marés solares presentes com os seguintes períodos: maré diurna ~24 h (23,15); maré semidiurna ~12h (11,57); maré ter-diurna ~8 h (7,93) e maré quadri-diurna ~6 h (5,97). Já as marés lunares foram observadas no gráfico com períodos de: maré diurna ~24,84 h (24,79); maré semidiurna ~12,42 h (12,39); maré ter-diurna ~8,28 h (8,33) e quadri-diurna ~6,20 h (6,12). Kelley (1989) afirma que as marés que mais se destacam são: a maré diurna solar, a maré semidiurna solar e a maré semidiurna lunar. Contudo, no nosso caso a ordem não foi àquela defendida por Kelley (1989). Como pode ser constatado da figura 5, a amplitude dos efeitos das marés revelou que a sua importância respeita a seguinte ordem: diurna solar, semidiurna solar, ter-diurna solar, semidiurna lunar, diurna lunar e ter-diurna lunar. Observe que estes picos de amplitude são obtidos pela análise espectral da variação temporal do ângulo DIP. Mas, devido à localização do observatório tencionamos a crer que estas variações na componente DIP do campo magnético são, de fato, principalmente devido às oscilações na componente H. Pois, sabemos que as compressões do campo magnético causada pelo vento solar, as quais podem provocar influência na componente Z, são quase desprezíveis na latitude magnética do observatório. Numa tentativa de identificar características das fontes das oscilações evidenciadas no gráfico da figura 5, procedemos uma análise considerando que estas variações do ângulo DIP se comportam como uma onda. Neste caso, a formulação matemática da Eq. 5 foi utilizada.

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow \frac{2\pi}{k} = \frac{v}{f} \rightarrow k \cdot v = 2\pi \cdot f \quad (5)$$

Esta equação transporta o gráfico apresentado na figura 5 no domínio das frequências para o domínio do número de onda, resultando na figura 6. No eixo das ordenadas está a amplitude em escala logarítmica. No eixo das abscissas está o número de onda para uma determinada velocidade de propagação, também apresentado em escala logarítmica. Sobrepostos a este gráfico estão os ajustes lineares efetuados ao módulo de número de onda para duas regiões distintas.

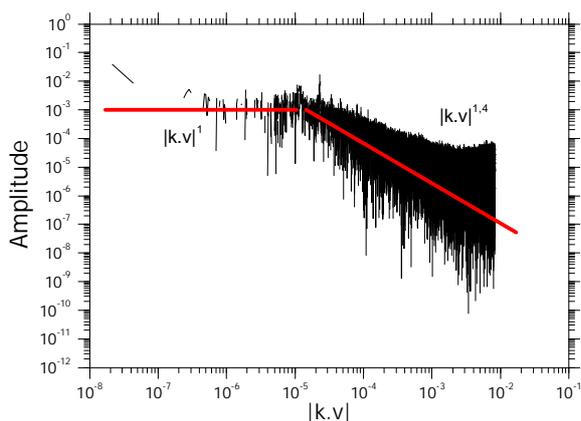


Fig.6 - Análise espectral dos dados de magnetômetro no domínio das frequências por amplitude em gráfico log-log.

Para os números de ondas inferiores a 10^{-5} , o qual resulta ser paralelo ao eixo do número de onda. A segunda região é para o número de onda acima de 10^{-5} , o qual resultou no módulo de número de onda elevado à potência 1,4. Com isso, identificamos que a maior parte da energia parece estar concentrada nas baixas frequências. Além disso, esse espectro apresenta uma característica típica de regime turbulento quando há interação não-linear.

Conclusões

Na comparação do ângulo DIP obtido por dados de magnetômetro e por simulações do modelo IGRF mostra que ambos os gráficos apresentam uma tendência crescente no módulo do ângulo DIP, confirmando que o equador magnético está se afastando gradativamente da localidade do observatório. Contudo, as simulações do IGRF parecem superestimar a velocidade deste afastamento em São Luís. Mas esta superestimativa vem decrescendo com o tempo. Em 2002 o ela representava 1,58% do dado medido. Já em 2004, estava em 0,48%. Esta melhora do IGRF é causa dos ajustes feitos nos coeficientes dos harmônicos esféricos pelo grupo de trabalho da IAGA, pois nosso estudo específico nos períodos entre os ajustes mostra que taxa de variação do DIP tem uma curva crescente nestes intervalos. As simulações para várias alturas mostraram que o equador magnético apresenta uma variação com o aumento da altitude. No solo ele está localizado mais ao norte que em altitudes maiores. A análise espectral dos dados de magnetômetros mostrou evidências do acoplamento da dinâmica da atmosfera neutra com o campo magnético terrestre, através das influências do sistema de correntes Sq nos dados de magnetômetro. Foram observadas indicação da presença das marés solares e lunares nos dados de magnetômetro. A amplitude dos efeitos das marés revelou que a importância das marés respeita a seguinte ordem: diurna solar, semidiurna solar, ter-diurna solar, semidiurna lunar, diurna lunar e ter-diurna lunar, contrariando a literatura. E, há indícios de que a maior parte da energia parece estar concentrada nas baixas frequências.

Agradecimentos

P. D. S. C. Almeida gostaria de agradecer ao CNPq pela bolsa (PIBIC 105374/2005-9). L. C. A. Resende gostaria de agradecer ao CNPq pela bolsa (PIBIC 101536/2006-2). H. C. Aveiro gostaria de agradecer ao CNPq pelo fomento de seu projeto de mestrado (131326/2007-4).

Referências

- Arora, B. R. e S. K. Bhardwaj. *Spatial and frequency characteristics of equatorial enhancement of geomagnetic field variations*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v.65, n.14-15, SEP-OCT, p.1283-1292. 2003.
- Cain, J.C., S. Hendricks, W.E. Daniels, and Jensen, D.C. *Computation of the Main Geomagnetic Field from Spherical Harmonic Expansions*, pp. 1-7, National Aeronautics and Space Administration, Greenbelt, MD, 1968.
- Campbell, W. H. *A Review of Equatorial Studies of Rapid Fluctuations in Earth's Magnetic Field*. Annales de Geophysique, v.22, n.3, p.492-501. 1966.
- Chapman, S. e Bartels, J. *Geomagnetism*. vol. 1, Clarendon Press, Oxford, 1940.
- Denardini C. M. Dissertação de Mestrado. *Desenvolvimento de um Sistema de Correção de Fase para o Radar Ionosférico de São Luís do Maranhão*. São José dos Campos, 1999. INPE – 7174 – TDI/676.
- Duhau, S. and Martinez, E. A. *On the origin of the fluctuations in the length of day and in the geomagnetic field on a decadal time scale*. Geophysical Research Letters, v.22, n.23, p. 3283-3286, DEC 1995.
- Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge; Cambridge University Press, 1992
- Kelley, M. C. *The Earth's Ionosphere – Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press Inc., 1989.
- Knecht, D. J. e B. M. Shuman. *The Geomagnetic Field*. In: A. S. Jursa (Ed.). Handbook of Geophysics and the Space Environment. Springfield, VA: National Technical Information Service, v.4, 1985. The Geomagnetic Field, p.4.1-4.37
- McLean, S. And Macmillan, S. *International Geomagnetic Reference Field*. On-line. Disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>> Acesso em: Fevereiro de 2007.
- Nair, K. N. *Daily Variation of the Geomagnetic Field at the Dip Equator*. Nature 1970, volume 226, pag 740-741, maio de 1970.
- Pushkov A. N, Chernova T.A. *Space Spectrum of the Main Geomagnetic-Field and the Spectrum of its Time Variations*. Geomagnetizm i Aeronomiya, v. 19 n.4, p.593-605, 1979.