

ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS FOURIER E WAVELET NA VARIABILIDADE DIURNA DO CAMPO GEOMAGNÉTICO

Gabriela de Almeida Santos Moraes, Virgínia Klausner de Oliveira.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, gabrielamoraes.univap@gmail.com
viklausner@gmail.com.

Resumo

O presente artigo tem como objetivo revisar bibliograficamente dois trabalhos relevantes na área de Física Espacial, com foco em geomagnetismo: "Estudo da variabilidade geomagnética diurna global por meio de dados observacionais e modelagem", do Dr. Sony Su Chein, e "Estudo das variações geomagnéticas usando Técnicas Wavelet", da Dra. Virgínia Klausner de Oliveira. Além de revisar esses estudos, este artigo oferece uma análise inovadora ao discutir metodologias alternativas de análise do campo geomagnético, como a comparação entre as técnicas Fourier e Wavelet, e a expansão em harmônicos esféricos, todas de grande importância para a geofísica espacial. A aplicação dessas metodologias em dados observacionais de alta qualidade, obtidos de redes globais de magnetômetros, proporciona novos insights sobre as variações geomagnéticas diurnas, com implicações práticas para a previsão de tempestades geomagnéticas e a interação Sol-Terra. Como resultado, foi possível identificar e analisar características da variabilidade com períodos de 24 horas e seus harmônicos, conhecidos como Sq (*Solar quiet*), no campo magnético, aprofundando a compreensão da variação diurna no contexto brasileiro.

Palavras-chave: Campo geomagnético. Técnica Fourier. Técnica Wavelet. Variações diurnas.

Área do Conhecimento: Física da relação Sol-Terra (clima espacial)

Introdução

O interesse no estudo e monitoramento do campo geomagnético aumentou significativamente nos últimos séculos e as medições contínuas fornecem informações importantes a respeito da variabilidade do campo geomagnético. Entre as descobertas científicas, verificou-se que o campo geomagnético possui origens internas e externas. Os principais contribuintes do campo interno são o geodínamo, o crustal e o campo induzido e no campo externo são correntes elétricas presentes na ionosfera, magnetosfera e magnetopausa.

A corrente ionosférica (região E, entre 80 e 150 km de altitude) é a principal responsável por uma das variações mais estudadas em geofísica espacial, denominada a variação diária solar calma (Sq, *solar quiet daily variation*), associada principalmente à ação da radiação solar e à força gravitacional do Sol na atmosfera terrestre. Essas variações possuem um período fundamental de 24 horas, assim como outros períodos (harmônicos) de 12, 8 e 6 horas. Em baixas e médias latitudes, o sistema de correntes Sq, é caracterizado por dois vórtices de correntes elétricas, um no hemisfério norte com sentido de circulação anti-horário, e outro no hemisfério sul com sentido de circulação horário.

Nesse contexto, o estudo da variabilidade geomagnética diurna global por meio de dados observacionais e modelagem, explorado em Chen (2023), tem como um de seus objetivos principais determinar a variação diurna através de medidas da variação no campo geomagnético fornecida por redes de magnetômetros utilizando a técnica clássica de Fourier para analisar a variabilidade temporal em diferentes setores longitudinais. De maneira semelhante, as variações geomagnéticas globais utilizando técnicas de Wavelet, discutidas em Klausner (2012), consiste, entre outras coisas, na análise global dos comportamentos dos registros magnéticos correspondentes às variações diurnas de diversas estações e a análise comparativa entre essas estações e a estação magnética brasileira de Vassouras- RJ, utilizando técnicas de Wavelet.

Metodologia

Trata-se da revisão de dois trabalhos, portanto a metodologia será descrita separadamente.

- **"Estudo da variabilidade geomagnética diurna global por meio de dados observacionais e modelagem"**

Conjunto de dados: Janeiro de 2008 a dezembro de 2021; Dias calmos determinados pelo índice K_p ; 96 estações da Embrace MagNet e INTERMAGNET, distribuídas em setores longitudinais conforme a Tabela 1; Valor médio do fluxo solar ($F_{10.7}$) mensal de 93 sfu (*solar flux unit*) maior que isso considerado HSA (*high solar activity*) e menor que isso LSA (*low solar activity*).

Tabela 1- Número de estações magnéticas em cada região.

REGIÃO	AMÉRICA	EUROPA-ÁFRICA	ÁSIA-OCEANIA	TOTAL
EQUATORIAL	2	2	0	4
BAIXA LATITUDE	12	4	12	28
MÉDIA LATITUDE	18	28	18	64
TOTAL	32	34	30	96

Fonte: Chen (2023).

Para analisar a variação diurna devemos calcular a curva do dia calmo geomagneticamente (QDC) através cinco dias geomagneticamente mais calmos e depois determinar a amplitude da variação diurna (ΔQDC) para as componentes X, Y e Z do campo geomagnético para todas as estações magnéticas.

$$\Delta QDC(t) = QDC(t) - \langle QDC(00:00LT) \rangle \quad (1)$$

A expansão em série de Fourier permite representar sinais periódicos por meio de uma soma de funções harmônicas (funções trigonométricas seno e cosseno). Portanto, temos:

$$\Delta QDC(t) = a_0 + \sum_{k=1}^4 [a_k \cos\left(2\pi \frac{kt}{24}\right) + b_k \sin\left(2\pi \frac{kt}{24}\right)] \quad (2)$$

onde t indica a hora em intervalos de 1 minuto, a frequência fundamental é o período de $24h$, os coeficientes de Fourier são denotados por a_0, a_k, b_k , sendo que $k = 1, 2, 3$ e 4 correspondem às componentes harmônicas de $24, 12, 8$ e 6 horas, respectivamente. O método dos mínimos quadrados é utilizado para obter a_0, a_k, b_k , minimizando a diferença entre a ΔQDC e as medidas observadas.

A magnitude das componentes harmônicas da série de Fourier é calculada conforme a seguinte expressão: $c_k = \sqrt{(a_k)^2 + (b_k)^2}$

Para avaliar a variabilidade temporal e espacial das componentes harmônicas variação diurna das componentes X, Y e Z foram usados os dados da ΔQDC e agrupados em função da atividade solar e dos meses, para cada estação magnética.

- **"Estudo das variações geomagnéticas usando Técnicas Wavelet"**

Conjunto de dados: Aplicação das wavelets para correlação de Vassouras (VSS, Brasil) e outros 12 observatórios magnéticos, localizados em sua maioria em médias e baixas latitudes. Escolha de dias calmos de acordo com os valores do índice K_p , sendo considerados assim os dias cuja soma $K_p \leq 24$ e o valor obtido a cada 3 horas menor ou igual a 3. Dias perturbados foram excluídos e considerados como falhas. Período de 1999 e 2007 (quase todo ciclo solar 23). Uso somente da componente horizontal dos magnetogramas obtidos a cada hora, componente X (sistema XYZ) convertida para componente H (sistema HDZ), através da equação $X = H \cos(D)$. Interesse em estudar as variações diurnas, em particular, as componentes espectrais relacionadas aos períodos de 24 e 12 horas.

A Transformada Wavelet Contínua (TWC) foi desenvolvida a partir de modificações na Transformada de Fourier Janelada, permitindo decompor e descrever funções no domínio tempo-frequência de maneira mais flexível, possibilitando a análise dessas funções em diferentes escalas de tempo e frequência. Existem várias funções analisadoras wavelets e nesse estudo estamos interessados na wavelet de Morlet, logo:

$$W(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,\tau}^*(t) dt \quad (3)$$

Com a wavelet analisadora de Morlet: $\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) \exp(i\omega_0 t) \quad (4)$

onde $i = \sqrt{-1}$, ω_0 é o parâmetro da frequência e σ é o parâmetro de resolução temporal.

No entanto, a TWC não é capaz de analisar dados que possuam falhas. Para lidar com esses problemas será utilizada a Transformada Wavelet Gapped (TWG). Na TWG, a wavelet de Morlet é separada em duas partes e pode ser escrita introduzindo o parâmetro K , que garante a eficácia em casos de dados com lacunas:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \left[\beta \left(\frac{t-\tau}{a} \right) - K(a, \tau) \right] \varphi \left(\frac{t-\tau}{a} \right) \quad (5)$$

A correlação wavelet $C(a)$ é capaz de verificar a correlação de dois sinais numa determinada escala:

$$C(a) = \frac{\int W_1(a,t) W_2^*(a,t) dt}{\left(\int W_1(a,t)^2 dt \int W_2(a,t)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

A partir da correlação podemos calcular o coeficiente de determinação, $D(a)$ que indica quanto às séries temporais dos observatórios magnéticos conseguem explicar da série temporal de VSS para as variações Sq de 24 e 12 horas. Sendo então $D(a) = C(a)^2$.

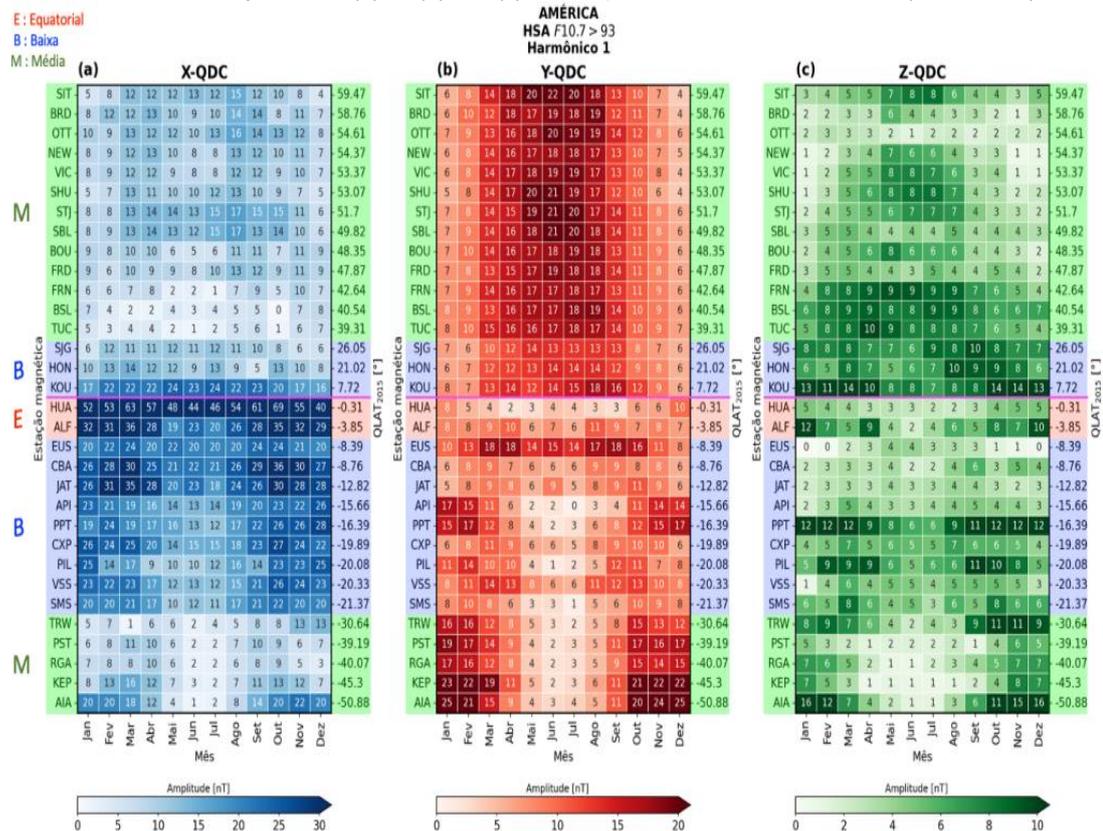
Resultados e discussões

Nesta seção, serão apresentados resultados inéditos relacionados à análise da dependência latitudinal da variação geomagnética diurna no território brasileiro. Esse estudo é particularmente relevante para a comunidade científica, pois oferece novas perspectivas sobre a modelagem ionosférica e a compreensão das variações geomagnéticas globais. A identificação de padrões latitudinais nessa variabilidade é essencial para aprimorar as previsões de tempestades geomagnéticas e as interações Sol-Terra, impactando diretamente estudos relacionados ao clima espacial e suas implicações tecnológicas, especialmente em regiões de baixa e média latitude, como o Brasil.

- "Estudo da variabilidade geomagnética diurna global por meio de dados observacionais e modelagem"

Os resultados são exibidos em mapas de calor, um para cada componente do campo geomagnético. As componentes harmônicas analisadas compreendem a estacionária (harmônico 0, constante), diurna (harmônico 1, 24 h), semidiurna (harmônico 2, 12 h), terdiurna (harmônico 3, 8 h) e quarterdiurna (harmônico 4, 6 h) em cada setor longitudinal (América, Europa-África e Ásia-Oceania). Discutiremos apenas a componente diurna no setor longitudinal da América para alta e baixa atividade solar, conforme mostrado na Figura 1 e na Tabela 2.

Figura 1- Mapa de calor da amplitude média mensal da componente diurna (harmônico 1, 24 h) da série de Fourier das componentes (a) X, (b) Y e (c) Z da ΔQDC durante alto fluxo solar ($F10.7 > 93$).



Os resultados mostram que as amplitudes médias tem maior intensidade no verão do hemisfério correspondente, como esperado. Na componente X , observa-se que as magnitudes das amplitudes nas estações do hemisfério sul são maiores, por exemplo, na região de médias latitudes do hemisfério norte, máximo de 17 nT em no hemisfério sul foi de 22 nT. Os valores maiores de amplitude ocorreram entre os meses dos solstícios de março e setembro, indicando uma variação semianual. Em relação à componente Y , as magnitudes são menores durante os meses dos solstícios de dezembro no hemisfério norte e durante os meses dos solstícios de junho no hemisfério sul. Nas regiões de baixas e médias latitudes do hemisfério norte, os picos de amplitude são observados nos meses do solstício de junho. Já no hemisfério sul, esses picos ocorrem nos meses do solstício de dezembro nas regiões de médias latitudes. Em relação à componente Z , as magnitudes das amplitudes apresentam comportamentos semelhantes à componente Y . Os picos de amplitude observados nas estações magnéticas de baixas e médias latitudes no hemisfério norte sugerem uma variação anual com picos nos meses do solstício de junho.

Os resultados das amplitudes médias da componente diurna para os períodos de baixo fluxo solar ($F_{10.7} \leq 93$) exibem um padrão de comportamento semelhante aos resultados para alto fluxo solar. Para uma melhor análise, essas diferenças latitudinais em relação ao fluxo solar são sumarizadas na Tabela 2 que exibe a magnitude máxima da componente harmônica diurna das componentes X, Y e Z .

Tabela 2- Magnitude máxima do coeficiente da componente harmônica diurna das componentes X, Y e Z da variação diurna do campo geomagnético durante os meses de alto e baixo fluxo solar.

Fluxo solar	Setor longitudinal	Latitude (QLAT)	X		Y		Z	
			H. Norte	H. Sul	H. Norte	H. Sul	H. Norte	H. Sul
Alto	América	Média	17 (S)	22 (S)	22 (A)	25 (A)	10 (A)	16 (A)
		Baixa	24 (A)	36 (S)	18 (A)	18 (S)	14 (A)	12 (S)
		Equatorial	ND	69 (S)	ND	11 (A)	ND	12 (A)
	Europa- África	Média	19 (A)	15 (S)	22 (A)	21 (S)	11 (A)	12 (S)
		Baixa	24 (S)	22 (S)	16 (A)	16 (S)	9 (S)	9 (S)
		Equatorial	52 (S)	ND	14 (S)	ND	19 (S)	ND
	Ásia-Oceania	Média	22 (A)	16 (S)	23 (A)	22 (A)	9 (A)	16 (S)
		Baixa	28 (S)	28 (S)	18 (A)	20 (A)	12 (S)	12 (S)
		Equatorial	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Baixo	América	Média	15 (S)	16 (S)	19 (A)	20 (A)	8 (A)	12 (A)
		Baixa	18 (A)	23 (S)	16 (A)	13 (S)	9 (S)	10 (S)
		Equatorial	ND	48 (S)	ND	11 (S)	ND	10 (A)
	Europa- África	Média	16 (A)	12 (S)	17 (A)	16 (A)	8 (A)	9 (S)
		Baixa	17 (S)	14 (S)	15 (A)	13 (A)	8 (A)	6 (S)
		Equatorial	32 (S)	ND	12 (A)	ND	14 (S)	ND
	Ásia-Oceania	Média	17 (A)	13 (S)	20 (A)	17 (A)	7 (A)	14 (S)
		Baixa	22 (S)	21 (S)	15 (A)	16 (A)	9 (S)	6 (S)
		Equatorial	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Fonte: Chen (2023).

A maior variabilidade em relação ao fluxo solar é observada no hemisfério sul da região da América para a componente X , principalmente nas regiões de baixas latitudes e na região equatorial. A diferença de amplitude máxima do fluxo solar alto para baixo na região equatorial da América foi de 21 nT.

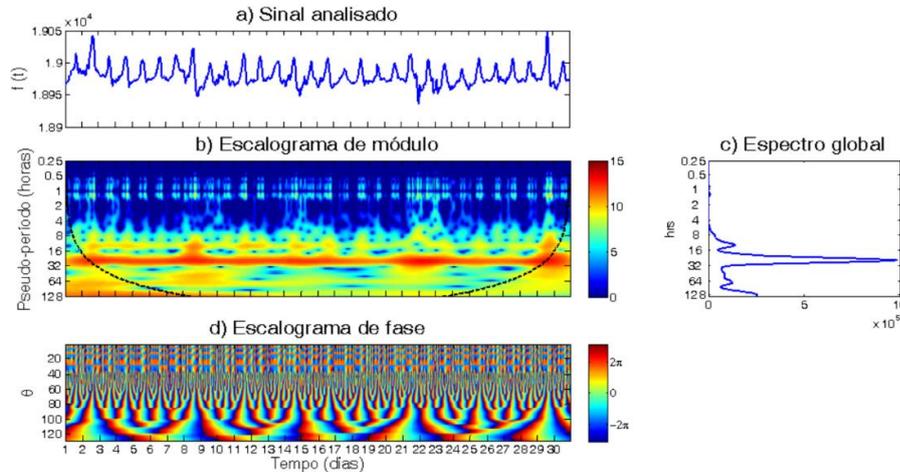
- "Estudo das variações geomagnéticas usando Técnicas Wavelet"

A Figura 2 mostra um exemplo da TWG (com $\omega_0 = 6$ e $\sigma = 1$) aplicada a um registro magnético de VSS para junho de 2007. Nesta figura, temos (a) variação da componente H , (b) escalograma de módulo, (c) espectro global e (d) escalograma de fase.

No escalograma de módulo, as áreas na cor vermelho escuro aparentes no período de 24 horas demonstram as escalas e a distribuição temporal onde a série possui maior energia. Verifica-se que o espectro global apresenta um pico de energia acentuado referente também ao período de 24 horas e um pico menos pronunciado referente ao período de 12 horas.

Como este estudo tem interesse em analisar apenas dias calmos, foram introduzidos “gaps” na série de dados referentes aos dias perturbados. Mesmo com os gaps, os períodos de 24 e 12 horas continuaram dominantes no escalograma de módulo e no espectro global, ou seja, não afetou a análise das variações diurnas. A aplicação da TWG foi realizada para todo o conjunto de registros magnéticos e depois de obtidos os coeficientes wavelet válidos (isto é, excluindo as regiões de gaps), foi calculado as funções de correlação wavelet $C(a)$.

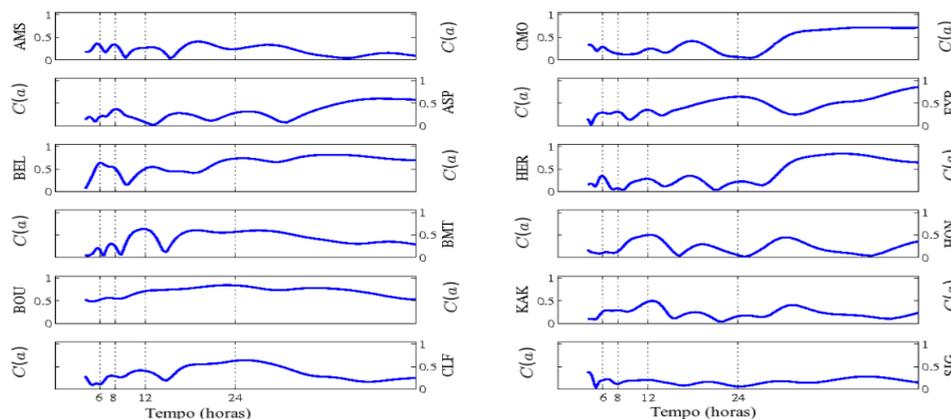
Figura 2 - Aplicação da TWG nos dados geomagnéticos de VSS para junho de 2007.



Fonte: Klausner, 2012.

A Figura 3 mostra a correlação wavelet entre os 12 observatórios selecionados e VSS. Pode-se dividir esses observatórios por latitudes geomagnéticas como: baixas (ASP, BMT, HER, HON, KAK e SJG), médias (AMS, BEL, BOU, CLF e EYR) e alta (CMO).

Figura 3- Módulo da função de correlação wavelet.



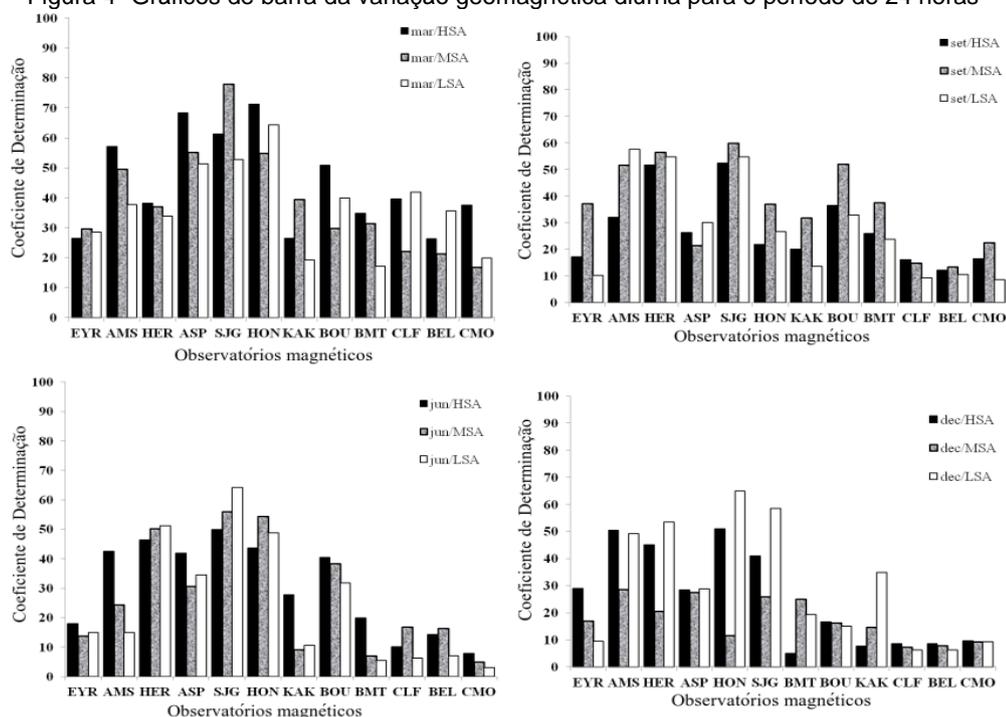
Fonte: Klausner, 2012.

Com o uso dos valores obtidos de correlação para o período de 24 horas foi calculado o coeficiente de determinação, $D(a) = C(a)^2$ e apresentado em um gráfico de barras na Figura 4.

No eixo horizontal, os 12 observatórios magnéticos da menor latitude do hemisfério sul até a maior latitude do hemisfério norte. Foi feita uma análise o intuito de verificar a dependência da variação S_q com a atividade solar e separados em HSA, 1999 a 2001 (preto), MSA 2002 a 2004 (cinza) e LSA 2005 a 2007 (branco) representando os equinócios (parte superior) e solstícios (parte inferior). São esperados valores baixos do coeficiente de determinação entre VSS e CMO, devido a CMO estar localizada em altas latitudes e VSS em baixas. Durante os equinócios, foram encontradas diferenças no coeficiente de determinação em observatórios magnéticos em latitudes próximas, mas diferentes longitudes. A variação longitudinal S_q indica que esses observatórios são afetados diferentemente pelo dínamo da região E. O coeficiente de determinação foi maior durante a HSA nos equinócios e durante

LSA nos solstícios e pode ser explicado pela variação na condutividade da região E da ionosfera, influenciada pela densidade de ionização e pela intensidade do campo geomagnético.

Figura 4- Gráficos de barra da variação geomagnética diurna para o período de 24 horas



Fonte: Klausner, 2012.

Conclusão

Este artigo revisou dois estudos essenciais sobre a variabilidade geomagnética diurna, destacando o uso das técnicas de Fourier e Wavelet na análise do campo geomagnético. No primeiro estudo, a técnica de Fourier se mostrou eficaz em identificar as componentes harmônicas da variação diurna, oferecendo um panorama detalhado da influência da atividade solar em diferentes longitudes e latitudes. No segundo estudo, a técnica Wavelet foi demonstrada como uma ferramenta robusta para analisar a correlação entre observatórios magnéticos, sendo particularmente útil para investigar variações diurnas mesmo na presença de falhas ou lacunas nos dados.

Esses resultados evidenciam a complexidade do sistema geomagnético e a relevância das metodologias aplicadas para aprofundar o entendimento das variações Sq, contribuindo de maneira significativa para o avanço do conhecimento sobre os processos dinâmicos que regulam essas variações. Além de proporcionarem uma compreensão científica mais aprofundada, as técnicas analisadas apresentam importantes aplicações práticas em diversos setores tecnológicos. Entre elas, destaca-se o aprimoramento das previsões de clima espacial, mitigando os impactos em satélites e sistemas de comunicação; a melhoria da precisão de sistemas de navegação e posicionamento global (GPS), minimizando interferências; e o monitoramento de redes de energia elétrica, permitindo a antecipação de falhas causadas por correntes induzidas geomagneticamente.

Referências

Klausner, V. O. **Estudo das variações geomagnéticas usando técnicas wavelet**. 2012. 203f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2012.

CHEN, S. S. **Estudo da variabilidade geomagnética diurna global por meio de dados observacionais e modelagem**. 2023. 214f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.