

## **INFLUÊNCIA DO CLIMA ESPACIAL SOBRE A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NA LATITUDE DE ~30°S**

Pedro Cruz de Moura Lima<sup>1\*</sup>, Éverton Frigo<sup>2</sup>, Mauro Angelo Alves<sup>2</sup>, Inácio Malmonge Martin<sup>3</sup>

1. Estudante de Mestrado no Instituto de Aeronáutica e Espaço IAE

2. Professor adjunto II na Universidade Federal do Pampa

2. Pós Doutorado no Departamento de Física ITA

3. ITA - Departamento de Física/Orientador

### **Resumo:**

Neste trabalho investigamos a presença de sinais associados à variabilidade do fluxo de raios cósmicos galácticos em dados de temperatura média anual visando avaliar os possíveis efeitos destas partículas espaciais sobre o clima. Os dados são provenientes de três estações meteorológicas localizadas a ~30°S nas cidades de Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana, região fortemente afetada pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul, fenômeno que atua facilitando a entrada de raios cósmicos galácticos devido à menor intensidade do campo magnético terrestre. Resultados obtidos através de análises espectrais e a observação da ocorrência de eventos quase simultâneos de máximas temperaturas médias, máximas e mínimas, com valores mínimos de raios cósmicos galácticos, indicam uma possível relação entre mudanças climáticas regionais e clima espacial.

**Palavras-chave:** variações geomagnéticas, atividade solar, raios cósmicos galácticos, ciclos solares, Anomalia Magnética do Atlântico Sul, variações climáticas

**Apoio financeiro:** Bolsa CAPES

### **Introdução:**

Sabemos, devido a dados históricos e registros geológicos, que o clima da terra está em constante mudança. Alterações estas com origens ainda não bem compreendidas e que protagonizam diferentes estudos e teorias. Utilizando dados de observações diretas e indicadores paleoclimáticos cada vez mais estudos vêm sendo realizados para a melhor compreensão dos efeitos do clima espacial sobre o clima terrestre. Estudos relacionados à atividade solar, em escala decadal a multidecadal, mostram que esta apresenta um comportamento quase cíclico de variação, com periodicidade principal de aproximadamente 11 anos e periodicidade secundária, atribuída à inversão de polaridade magnética do Sol, de cerca de 22 anos (Kudela, 2009). Estas periodicidades características têm sido detectadas em séries temporais de variáveis meteorológicas e, alguns autores têm explicado estes resultados através de um mecanismo que relaciona indiretamente a atividade solar com as mudanças climáticas através do fluxo de raios cósmicos galácticos (Galactic Cosmic Rays - GCR). Estes são modulados pelos campos magnéticos do Sol e da Terra, que em determinados períodos e ou regiões favorecem a entrada destas partículas de alta energia em nossa atmosfera, podendo influenciar na cobertura de nuvens baixas, que tem um papel muito importante no sistema climático terrestre. Períodos com grande fluxo de GCR estariam associados à maior cobertura de nuvens baixas e conseqüentemente diminuição da temperatura da superfície terrestre (Dickinson, 1975; Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Svensmark, 2007). Ao trabalharmos com escalas de tempo decadal a multidecadal, os GCR estão sujeitos à variabilidade do campo magnético solar e do campo magnético terrestre. A direção predominantemente vertical nas regiões polares permite uma maior entrada de GCR enquanto a direção predominantemente horizontal torna o fluxo de GCR menor na região equatorial. Além disso, regiões com baixa intensidade do campo geomagnético favorecem a entrada dos GCR, como é o caso da região influenciada pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul (South Atlantic Anomaly SAMA), que influencia todo o território do Rio Grande do Sul (Frigo et al., 2013). Neste trabalho, usando dados de temperaturas médias anuais máximas (T<sub>max</sub>) e temperaturas médias anuais mínimas (T<sub>min</sub>), para o período entre 1932 e 2014, registradas em estações meteorológicas situadas no Rio Grande do Sul, localizadas numa linha de latitude de ~30°S, foram investigados os possíveis efeitos climáticos associados com a variabilidade solar e os GCR.

### **Área de Estudo, Dados e Método de Análise:**

A área de estudo compreende a região onde estão situadas as estações meteorológicas: Porto Alegre (POA), Santa Maria (SMA) e Uruguaiana (URU), todas próximas a trajetória do centro da SAMA e fortemente influenciadas por este fenômeno desde o início do século XX. A SAMA ocupa atualmente parte do oceano

Atlântico Sul e do continente Sul-Americano, com valores de intensidade total do campo geomagnético inferiores a 25.000 nT. Os valores de menor intensidade da SAMA, determinada como o seu centro, têm diminuído ao decorrer dos anos e migrado a sua posição com direção predominante para oeste.

Estudos publicados por autores como König et al. (1978) e Smart & Shea (2009) mostram que os valores de rigidez magnética de corte vertical, que indica a energia mínima que uma partícula eletricamente carregada deve possuir para penetrar a barreira imposta pelo campo geomagnético, vem diminuindo ao longo do último século como efeito das variações geomagnéticas associadas a SAMA. Neste contexto, na região influenciada pela SAMA os efeitos da atividade solar e/ou GCR sobre o clima pode ser maximizado, tornando-se uma área muito interessante para tais estudos.

Os dados utilizados consistem de séries temporais de Tmax e Tmin, no período de 1932 a 2014. Os dados sugeridos como forçantes climáticas relacionados com a atividade solar e fluxo de GCR são apresentados na Figura 4A-C. A série temporal do número de manchas solares (Fig. 4A), apresentada em termos de Rz (Hoyt e Schatten, 1997), foi obtida no site (<http://sidc.oma.be/>). A série temporal de contagem de nêutrons (Fig. 2B), indicador de GCR, esta disponível para o período de 1953 a 2006 no site da Universidade de New Hampshire (<https://www.unh.edu>), onde neste conjunto de dados, a transição dos ciclos solares pode ser notada com um pico bem definido para a transição dos ciclos solares 19 para 20 e 21 para 22, e, uma crista mais plana e cobrindo um período de tempo maior de 20 para 21 e 22 para 23 anos. O ciclo de Hale (Fig. 2C) trata-se do número de manchas solares multiplicado por -1 em ciclos ímpares, representado como Rz22.

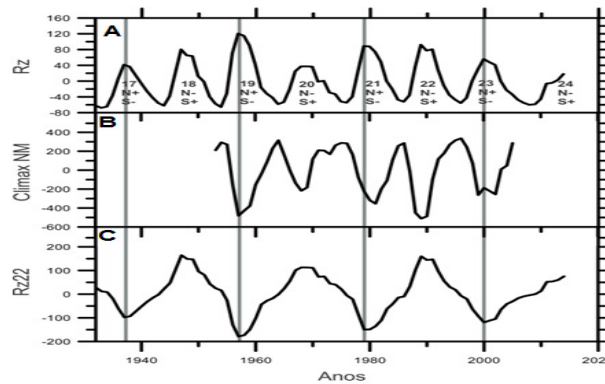


Figura 1 - Série temporal Rz (A), contagem de nêutrons no Observatório Climax (B) e série temporal Rz22 (C). As bandas sombreadas indicam os máximos dos ciclos solares ímpares.

Utilizando o algoritmo implementado por Caminha-Maciel & Ernesto, (2013), buscamos sinais coerentes no conjunto de séries temporais e também periodicidades que fossem comuns a todas estas séries. O ponto de partida é a análise espectral das séries temporais através do periodograma de Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982), que pode ser representado pela norma quadrática da Transformada Discreta de Fourier.

$$P_x(\omega) = \frac{1}{N_0} |FT_x(\omega)|^2 = \frac{1}{N_0} \left| \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) e^{-i\omega t_j} \right|^2 = \frac{1}{N_0} \left[ \left( \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cos(\omega t_j) \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \sin(\omega t_j) \right)^2 \right]$$

Posteriormente, combinando as informações das funções amostrais através das operações 'OR' e 'AND' de Tarantola & Mosegaard (2000) obtemos dois pacotes dentro do espaço paramétrico, representando respectivamente a união e interseção das funções de estado de informação amostral (Tarantola e Valette, 1982), que destacam regiões de alta correlação entre o conteúdo espectral das séries.

## Resultados:

Nos dados brutos, eventos de máxima temperatura em média anual, assim como indicado por Frigo et al. (2013), são associados a valores mínimos de fluxo de RCG. Máximos de Tmax foram encontrados em 1944-1945, 1957-1958-1964, 1985-1986-1991 e 2006-2012, e, de Tmin em 1936-1940, 1961, 1977-1979-1985 e 2001. Estas datas são próximas dos mínimos de Rz22 e ocorrendo muito próximo dos picos de máximo dos ciclos solares ímpares dos anos de 1937, 1957, 1979 e 2000, sugerindo a modulação climática pelos GCR/atividade solar para periodicidades de ~22 anos.

Com os dados de temperatura livres de tendências lineares de longo período, foi realizada a análise espectral, cujos resultados são apresentados nas figuras 2 e 3. A presença de periodicidades entre 2 e 7 anos são observadas em todas as séries de Tmin e Tmax de todas as estações e apesar do ruído não se apresentam como as principais amplitudes. Periodicidades de ~11 anos são pouco expressivas para a série temporal de Tmin de SMA e Tmax de POA. Periodicidades entre 18 e 26 anos, associadas ao ciclo solar de Hale, são encontrados em todas as séries sempre como amplitudes importantes.

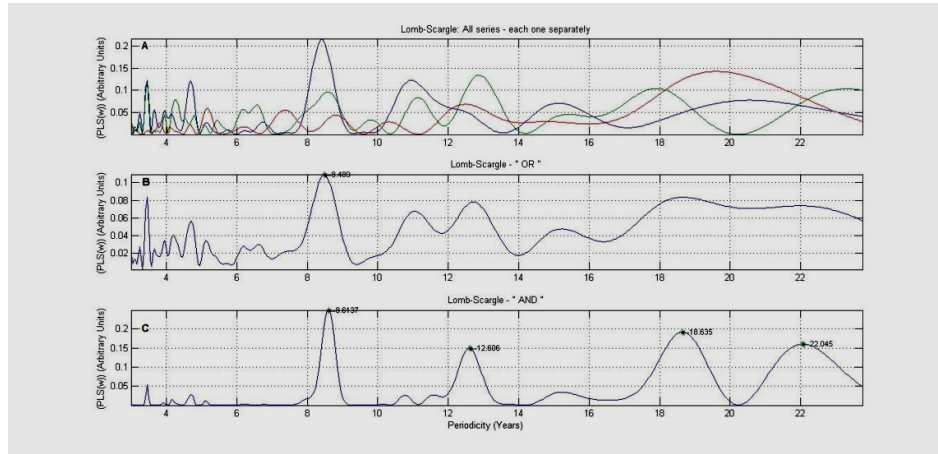


Figura 2 – Espectros de Lomb-Scargle para as séries de Tmax de POA(vermelho), SMA(verde) e URU(azul) em A. Operadores OR e AND, combinando os espectros em B e C.

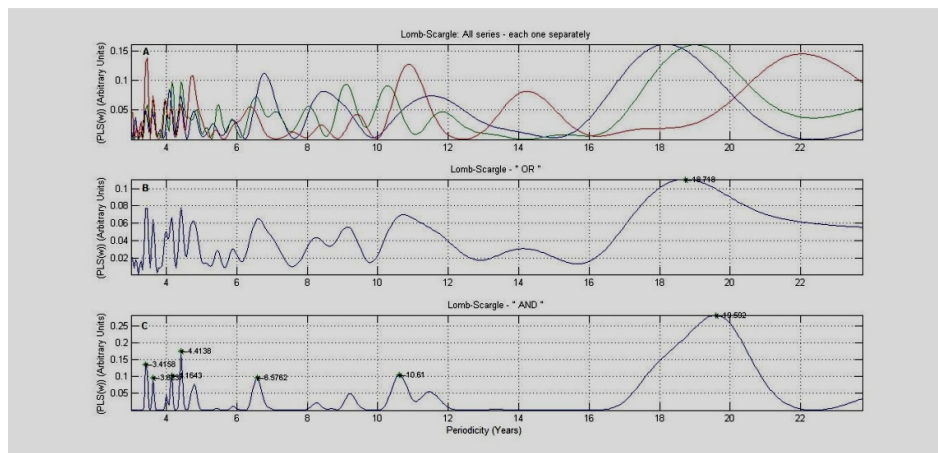


Figura 3 - Espectros de Lomb-Scargle para as séries de Tmin de POA(vermelho), SMA(verde) e URU(azul) em A. Operadores OR e AND, combinando os espectros em B e C.

Os espectros combinados 'AND', uma melhor estimativa do conteúdo espectral, apresentam picos melhor definidos em relação aos espectros 'OR'. Que apresentam espectros mais atenuados e menos definidos, devido provavelmente à defasagem existente entre os sinais, que diminui a área comum entre os picos.

Os espectros AND filtraram boa parte do ruído de baixa e média frequência. Entretanto isso ainda pode ser visto claramente nos resultados de Tmin, que apresentam picos com característica de ruído em torno de 4 e picos melhores definidos em 6.57, 10.61 e 19.59. Para os dados de Tmax os picos resultantes foram, 8.61, 12.06, 18.64 e 22.04.

Estes resultados são sinais característicos dos fenômenos como ENSO, ciclo Solar de Schwabe e ciclo solar de Hale. Vemos que mesmo com ruído as periodicidades de ~11 e ~22 anos aparecem com grande relevância dentro dos espectros combinados

## Discussão e Conclusão:

Os resultados aqui encontrados para as periodicidades principais da atividade solar/GCR (de ~11 e ~22 anos) em escala temporal decadal a multidecadal, corroboram com estudos realizados por outros autores como Frigo (2013) e Frigo et al. (2013). De acordo com estes autores, a presença do sinal de ~11 anos nos dados de temperatura não parece ter uma relação com a proximidade da estação em relação ao centro da SAMA, nem com sua distância ao oceano. Por outro lado, as periodicidades de ~22 anos, parecem ter uma forte relação com a proximidade do centro da SAMA e tempo de permanência deste na região próxima as estações. Além disso, resultados similares são obtidos para estações localizadas em regiões próximas.

Para finalizar, os resultados obtidos neste trabalho sugerem que a variabilidade dos GCR, caracterizadas pelas periodicidades próximas de 22 anos, podem ter influência significativa sobre a variabilidade de temperatura na região influenciada pela SAMA.

### Referências bibliográficas:

Caminha-Maciel, G. & Ernesto, M. 2013. Characteristic wavelengths in VGP trajectories from magnetostratigraphic data of the Early Cretaceous Serra Geral lava piles, southern Brazil. In: Jovane, L., HerreroBervera, E., Hinnov, L. A. & Housen, B. A. (eds) *Magnetic Methods and the Timing of Geological Processes*. Geological Society, London, Special Publications, 373, first published on March 25, 2013, doi: 10.1144/SP373.15.

Dickinson, R.E., 1975. Solar variability and the lower atmosphere. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 1240-1248.

Frigo, E., 2013. Variações geomagnéticas, heliomagnéticas e do fluxo de raios cósmicos galácticos: possíveis consequências climáticas na região da América do Sul. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 142 p..

Frigo, E., Pacca, I. G., Pereira-Filho, A. J., Rampelotto, P. H., Rigozo, N. R., 2013. Evidence for cosmic ray modulation in temperature records from the South Atlantic Magnetic Anomaly region. *Ann. Geophys.*, 31, 1833-1841.

Hoyt, D. V. and Schatten, K. H., 1997. *The role of the sun in climate change*, Oxford University Press, New York.

König, P. J., Walt, A. J. V. D., Stoker, P. H., Raubenheimer, B. C., Shea, M. A., and Smart, D. F., 1978. Vertical cutoff rigidity and the intensity distribution of cosmic rays near Cape Town, in: *International Cosmic Ray Conference, 15th, Plovdiv, Bulgaria, 13– 26 August 1977, Conference Papers, Vol. 4, A79-37301 15–93*, Sofia, Bulgarian Academy of Sciences, 173–177.

Kudela, K., 2009. On energetic particles in space, *Acta Phys. Slovaca*, 59, 537-652.

Lomb N.R., 1976. Least-squares frequency-analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science* 39: 447.

Rampelotto, P. H., Rigozo, N. R., da Rosa, M. B., Prestes, A., Frigo, E., Souza Echer, M. P., and Nordemann, D. J. R., 2012. Variability of Rainfall and Temperature (1912–2008) from Santa Maria (29\_41' S, 53\_48' W) and its Connection with Natural Influences, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 77, 152-160.

Scargle J.D., 1982. Studies in astronomical time-series analysis, 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal* 263: 835.

Smart, D. F. and Shea M. A., 2009. Fifty years of progress in geomagnetic cutoff rigidity determinations, *Adv. Space Res.*, 44, 1107–1123.

Svensmark, H., 2007. Cosmoclimatology: a new theory emerges. *News Rev. Astron. Geophys.*, 48, 1.18-1.24.

Svensmark, H., and Friis-Christensen, E., 1997. Variation of Cosmic Ray Flux and Global Cloud Coverage - a Missing Link in Solar-Climate relationships. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59, 1225-1232.P

Tarantola, A. & Mosegaard, K., 2000. Mathematical basis for physical inference.

Tarantola, A., Valette, B., 1982. Inverse problems = Quest for information. *J. Geophysics*, 50: 159-170.