



Possível influência de forçantes externos sobre a variação de temperatura máxima e mínima na latitude de $\sim 30^{\circ}\text{S}$ no estado do Rio Grande do Sul

Pedro Cruz de Moura Lima* (UNIPAMPA/Campus Caçapava do Sul), Everton Frigo (UNIPAMPA/Campus Caçapava do Sul), Igor G. Pacca (IAG/USP), Moises Razeira (UNIPAMPA/Campus Caçapava do Sul), Nivaor Rodolfo Rigozo (DGE/INPE)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015. Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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 this work we investigate the presence of signals associated with the variability of the galactic cosmic rays (GCR) and the solar activity on data of yearly average minimum and maximum temperature. The goal of this study is to evaluate the possible effects of the external forcings on climate. The climatic data were measured in three meteorological stations located in the cities of Porto Alegre (PA), Santa Maria (SM) and Uruguaiana (UR), all at the latitude of $\sim 30^{\circ}\text{S}$. These locations are heavily influenced by the region of the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA) which is a phenomenon that facilitates the entry of GCR in the Earth's atmosphere due to the low intensity of the Earth's magnetic field. Results obtained from the classical spectral analysis using the method of Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) indicate that periodicities characteristics of the external forcings are present in temperature time series.

Introdução

Sabemos, devido a dados históricos e registros geológicos, que o clima da terra esta em constante mudança, que por alguns pesquisadores são atribuídas à ação antrópica, e por outros, como resultado de fenômenos físicos naturais originados interna e externamente ao nosso planeta. As origens destas mudanças ainda não são bem compreendidas e requerem ainda muita investigação devido a sua complexidade e grande número de variáveis e condicionantes.

Nas últimas décadas, muitos estudos tem se dedicado a investigar a influência da variabilidade da atividade solar sobre o clima terrestre. Para tal, são utilizados dados oriundos de observações diretas e de indicadores do clima para o passado. Estes estudos visam a compreensão dos efeitos deste forçante climático externo sobre o clima terrestre, visando identificar o tamanho da contribuição externa e também prever sua contribuição para o clima futuro (Gray et al., 2010).

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 tem explicado estes resultados através de um mecanismo que relaciona indiretamente a atividade solar com as mudanças climáticas através do fluxo de GCR. Os GCR 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. Épocas com grande fluxo de GCR estariam associadas à maior cobertura de nuvens baixas e conseqüentemente diminuição da temperatura da superfície terrestre e quando diminuído o fluxo de GCR ocorre o efeito contrário (Dickinson, 1975; Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Svensmark, 2007).

Porém existem outros condicionantes que fazem com que tenhamos efeitos distintos em diferentes localidades e épocas. Ao trabalharmos com escalas de tempo decadal a multidecadal, os GCR estão sujeitos a variabilidade do campo magnético solar (periodicidades de 11 e 22 anos) 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 SAMA, que influencia todo o território do Rio Grande do Sul (Frigo et al., 2013).

Neste trabalho, usando dados de temperaturas médias anuais máximas (Tmax) e temperaturas médias anuais mínimas (Tmin), para o período entre 1932 e 2014, registradas em estações meteorológicas situadas no Rio Grande do Sul, localizadas numa linha de latitude de $\sim 30^{\circ}\text{S}$, 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 PA, SM e UR, 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.

As estações PA, SM e UR, que forneceram dados para este trabalho estão situadas nesta região (Figura 1).



Figura 1: Localização das estações meteorológicas (círculos vermelhos) e posições ocupadas pelo centro da SAMA entre 1905 e 2005 (estrelas brancas).

Os dados utilizados consistem de séries temporais de Tmax e Tmin, no período de 1932 a 2014, apresentados Figuras 2 e 3. 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, onde neste conjunto de dados, a transição dos ciclos solares pode ser notada com a forma triangular mais fina para a transição dos ciclos solares 19 para 20 e 21 para 22, e, um formato mais espesso e quadrado para as transições dos ciclos solares 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. Os dados de GCR são afetados pelo campo magnético solar tendo uma modulação de 11 anos relacionado à intensidade do campo e de 22 relacionado à inversão do campo magnético solar.

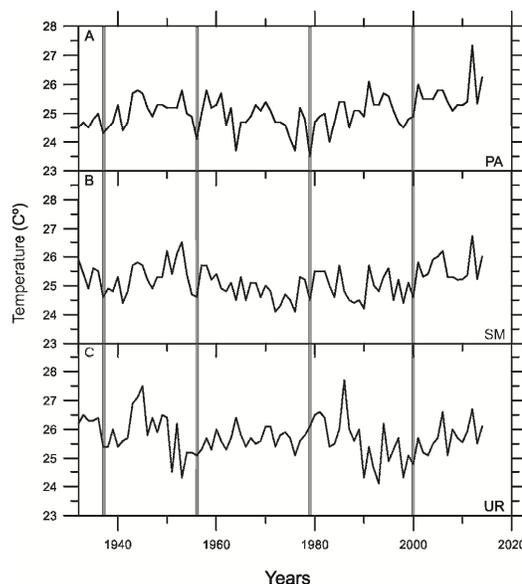


Figura 2 - Séries temporais das temperaturas máximas anuais das estações meteorológicas: PA (A), SM (B), UR (C). As bandas sombreadas indicam eventos de máxima temperatura ocorridos simultaneamente.

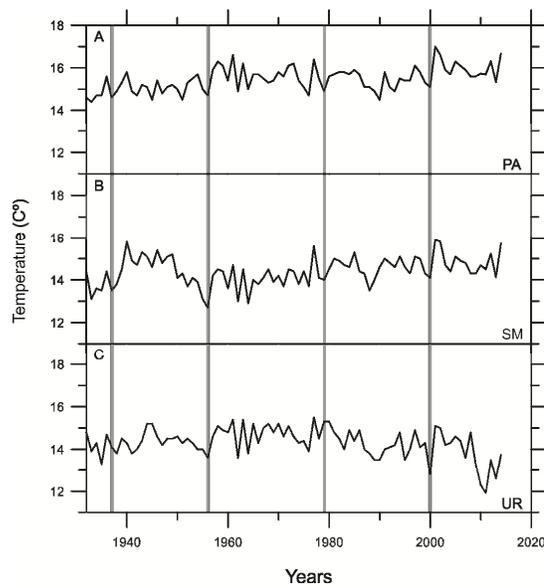


Figura 3 – Séries temporais das temperaturas mínimas anuais das estações meteorológicas: PA (A), SM (B), UR (C). As bandas sombreadas indicam eventos de máxima temperatura ocorridos simultaneamente.

Tendo em vista encontrar as periodicidades presentes nas séries temporais de Tmin e Tmax, foi utilizada a metodologia de análise espectral clássica ARIST (Rigozo & Nordemann, 1998). Este método permite determinar as periodicidades presentes nos dados, através de ajuste por mínimos quadrados fornecendo também a significância estatística dos resultados.

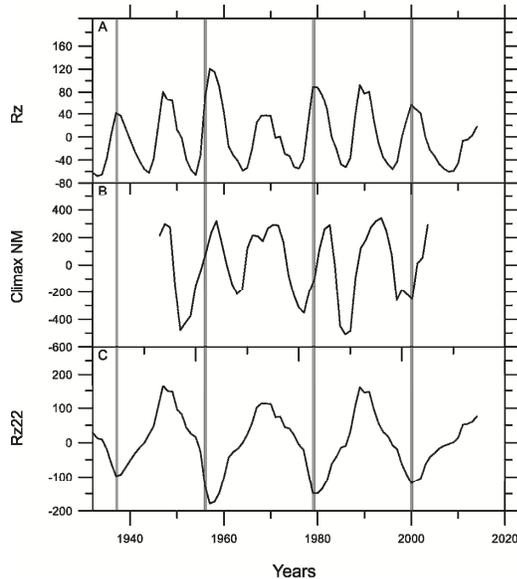


Figura 4 Série temporal Rz (A), contagem de nêutrons no Observatório Climax (B) e série temporal Rz22 (C). As bandas sombreadas indicam os máximos dos ciclos solares ímpares.

O ARIST é um método iterativo que busca três parâmetros desconhecidos (amplitude a_0 , frequência angular a_1 e fase a_2), visando minimizar o quadrado da chamada função condicional a cada iteração. A função condicional é a diferença entre os dados medidos e um ajuste de uma função senoidal a estes dados medidos em um tempo k .

$$F_k = Y_k - a_0 \sin(a_1 t_k + a_2)$$

O ARIST investiga todo o espectro de frequências, respeitando os critérios da frequência de Nyquist. Outro aspecto positivo deste método é a possibilidade de se poder determinar o desvio padrão de todos os parâmetros encontrados, fato que permite encontrar as periodicidades mais importantes dentro do sinal com uma confiança estatística de 95%, através da razão da amplitude e seu desvio padrão.

Resultados

Observamos na Figura 2 e 3, onde são apresentadas as séries temporais de Tmin e Tmax, um comportamento muito similar entre as séries temporais, esperado devido à proximidade entre as estações e por estarem em uma mesma latitude, sendo diferenciadas apenas por

aspectos regionais como a proximidade com a linha de costa. Os dados de PA parecem apresentar menor variabilidade, comportamento este atribuído a sua maritimidade, e podemos notar comportamento oposto nos dados de UR, que apresentam uma maior variação, atribuída à sua maior distância da linha de costa e grandes corpos de água. Os dados de SM aparentemente seguem um comportamento similar aos dados de Tmax de UR e similar aos dados de Tmin de PA.

Nas Figuras 1, 2 e 3, bandas sombreadas foram adicionadas para facilitar a localização dos mínimos de Rz22, que foram associadas a eventos de máxima temperatura média anual, conforme sugerido para algumas estações meteorológicas por Frigo et al. (2013). São visíveis máximos de Tmax 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 e das forçantes climáticas livres de tendências lineares de longo período, foi realizada a análise espectral através da ARIST, cujos resultados estão apresentados nas figuras 5, 6, 7 e 8.

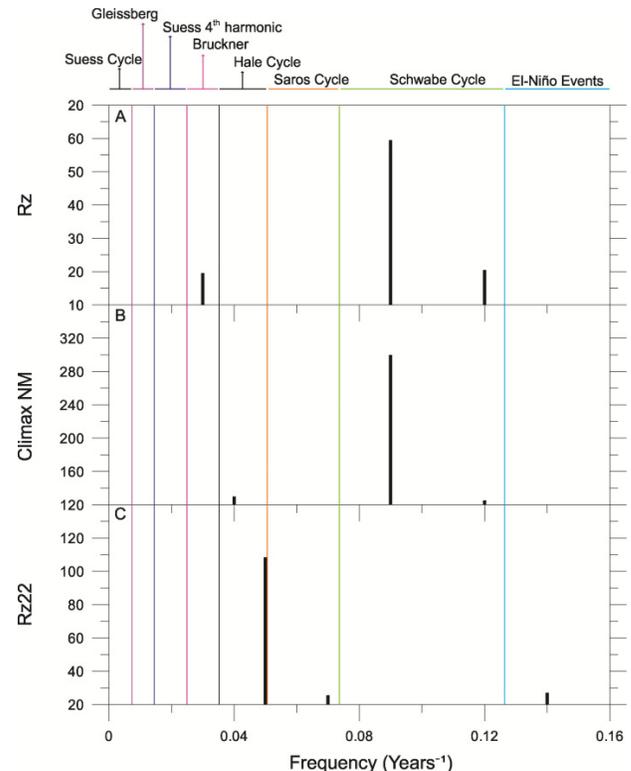


Figura 5 - Espectro de amplitude sobre uma confiança de 95%. (A) Rz, (B) Contagem de nêutrons no Observatório Climax, (C) Rz22.

Na Figura 5, estão apresentados os resultados referentes às periodicidades presentes nos dados de Rz, Rz22 e contagem de nêutrons. Verifica-se que, altas amplitudes espectrais, são associadas aos ciclos de ~11 anos tanto na série de Rz quanto da contagem de nêutrons. O sinal mais forte na série de Rz22 é o de ~22 anos, associado a variabilidade do campo magnético solar e, que aparece como a segunda periodicidade mais importante na série de contagem de nêutrons.

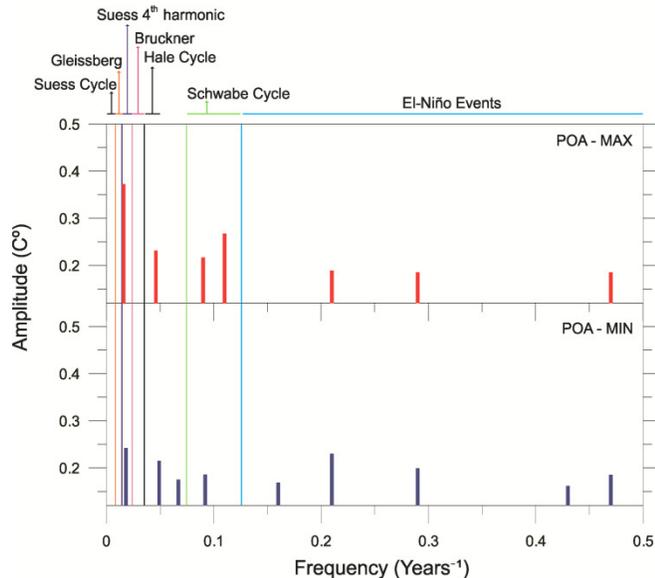


Figura 6 – Espectro de amplitude das séries temporais de temperaturas máximas e mínimas de POA, sobre uma confiança de 95%.

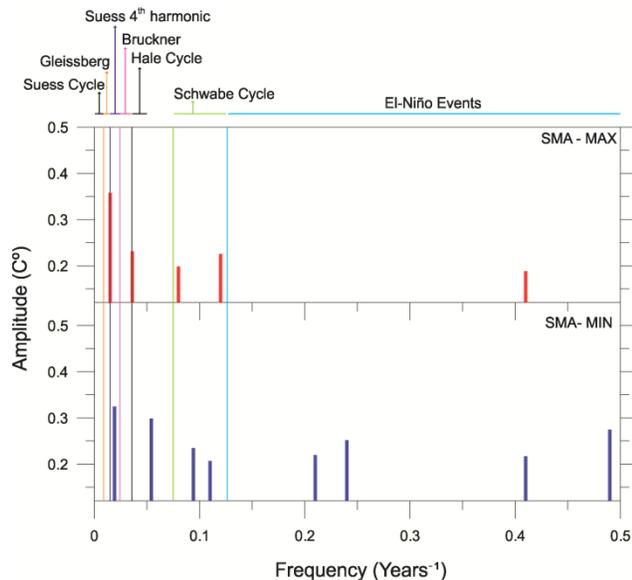


Figura 7 - Espectro de amplitude das séries temporais de temperaturas máximas e mínimas de SMA, sobre uma confiança de 95%.

A presença de periodicidades entre 2 e 7 anos são observadas em todas as séries de Tmin e Tmax de todas as estações, e em nenhum caso correspondem as amplitudes mais importantes detectadas. Variações periódicas com períodos maiores que 28 anos, normalmente associadas à forçantes oceânicas ou quase ciclos solares mais longos, aparecem como as maiores amplitudes para todas as séries temporais, com exceção da série de Tmax de UR, onde estas periodicidades são ausentes.

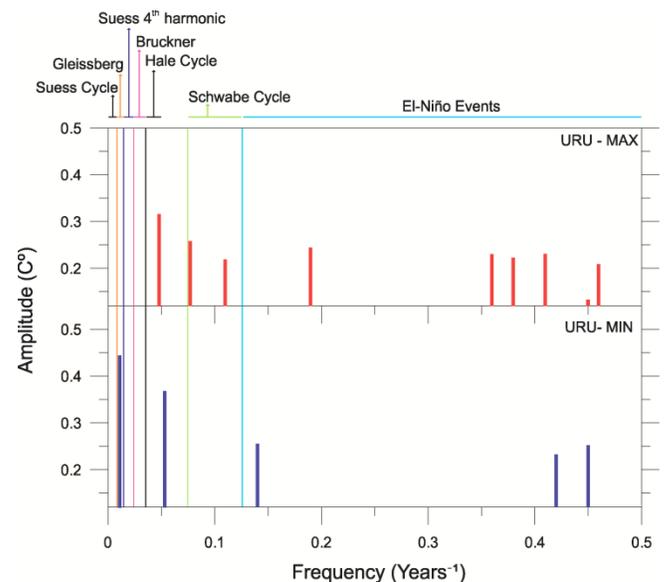


Figura 8 - Espectro de amplitude das séries temporais de temperaturas máximas e mínimas de UR, sobre uma confiança de 95%.

Periodicidades de ~11 anos são ausentes apenas na série temporal de Tmin de UR. Periodicidades próximas de 11 anos estão presentes em várias regiões da América do Sul investigadas, não mostrando uma dependência com a latitude, proximidade com o oceano ou mesmo com a trajetória do centro da SAMA (Frigo, 2013).

Periodicidades entre 18 e 26 anos, associadas ao ciclo solar de Hale, são ausentes apenas na série temporal de Tmax de SM, aparecendo nas demais séries sempre como altas amplitudes, resultado similar à aqueles obtidos em estudos realizados por outros autores como Rampelotto et al. (2012) e Frigo et al. (2013). O sinal de ~22 anos aparece de forma similar nas séries temporais de Tmax e Tmin das estações PA e UR.

Discussão e Conclusão

Periodicidades possivelmente associadas ao fenômeno ENSO estão presentes em todas as séries temporais de temperatura analisadas, apresentando maiores amplitudes nos dados de Tmin, com exceção da estação de UR. Os dados de PA apresentaram em ambas as séries temporais sinais de ~50 anos, que podem ser

relacionados à forçantes oceânicas como a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA). Este sinal também é detectado nos dados de T_{min} de SM. Para a série de T_{max} de SMA foi detectada a periodicidade característica do ciclo solar de Brückner (~33 anos) e, uma periodicidade de ~60 anos, que pode estar relacionada com o ciclo solar de Suess e/ou com a OMA. Nos dados de T_{min} de UR foi detectada uma periodicidade mais longa (~88,27), possivelmente relacionada ao ciclo solar de Gleissberg. As periodicidades características do ciclo solar de Schwabe (~11 anos), componente principal do ciclo solar em escala decadal a secular, não aparece foi detectada apenas nos dados de T_{min} de UR. Além disso, esta periodicidade aparece como aquela associada a maior amplitude na série de T_{max} de UR. Por outro lado, periodicidades características do ciclo solar de Hale (~22 anos), parecem exercer uma maior influência nos dados de T_{min}, onde estão presentes em todas as séries temporais e são associadas à amplitudes espectrais maiores do que aquelas detectadas nos dados de T_{max}. O sinal característico do ciclo de Hale não aparece nos dados de T_{max} da estação SM.

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. Outro aspecto interessante evidenciado neste trabalho, é a aparente maior influência do sinal de ~22 anos sobre os dados de T_{min}.

Para finalizar, os resultados obtidos neste trabalho são um indicativo matemático de que a variabilidade dos GCR, caracterizadas pelas periodicidades próximas de 22 anos, podem ter influência significativa sobre a variabilidade de T_{min} na região influenciada pela SAMA.

A próxima etapa deste estudo será investigar a coerência espectral baseada na transformada de ondaletas, o que permitirá entender o comportamento de determinadas periodicidades com o passar do tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por fornecer os dados de temperatura das estações meteorológicas de Porto Alegre, Santa Maria e Uruguai e também a National Science Foundation (Grant ATM-0339527) por disponibilizar os dados de contagem de nêutrons. Pedro

Cruz de Moura Lima agradece à Universidade Federal do Pampa pela concessão da Bolsa PBDA.

Referências

- 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.
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., Cubasch, U., Fleitmann, D., Harrison, G., Hood, L., Luterbacher, J., Meehl, G. A., Shindell, D., Van Geel, B., and White, W., 2010. Solar influence on climate, *Rev. Geophys.*, 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
- 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.
- 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.
- Rigozo, N. R. and Nordemann, D. J. R., 1998. Iterative Regression Analysis of Periodicities in Geophysical Record Time Series, *Rev. Bras. Geofis.*, 16, 149-158.
- 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