



## Periodicidades de ~11 e ~22 anos em séries temporais de temperatura média anual provenientes de diferentes latitudes do Estado do Rio Grande do Sul: resultados preliminares

Djeniffer Smariotto Souza da Silva, Everton Frigo, Moises Razeira, Universidade Federal do Pampa

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

Periodic variations of ~ 11 and ~ 22 years are characteristic signs of Solar Activity (SA) and Galactic Cosmic Rays (GCR) and have been suggested as climate forcings. In this work we investigated the presence of these periodic variations in mean annual temperature data recorded at weather stations located at different latitudes of the State of Rio Grande do Sul (RS). The results suggest that SA/RCG may have modulated the average annual temperature in RS in specific times and locations during the last century.

### Introdução

A SA vem sendo associada às variações climáticas há muito tempo. Sinais típicos da SA, principalmente periodicidades de ~11 anos, têm sido detectadas em séries temporais de diferentes variáveis meteorológicas (Wilcox, 1975; Lassen & Friis-Christensen, 1995). No entanto, alguns mecanismos que relacionam indiretamente a variabilidade da SA com as variações climáticas, através do fluxo dos GCR, foram sugeridos nos últimos anos (Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Svensmark, 2007). De acordo com Svensmark (2007), épocas com maior fluxo de GCR estariam associadas a épocas com maior cobertura de nuvens baixas e, conseqüentemente, com épocas de menor temperatura na superfície terrestre. Por outro lado, os períodos com menor fluxo de GCR estariam associados a períodos de temperatura mais elevada. No entanto, vários fatores controlam as variações espaciais e temporais do fluxo de GCR, o que proporcionaria diferentes efeitos climáticos em diferentes localidades e épocas na superfície terrestre (Voiculescu & Usoskin, 2012). Em escala temporal decadal a multidecadal, a variação dos GCR é controlada basicamente pela atividade solar. Especialmente, as variações do fluxo de GCR são conseqüência da intensidade e direção do Campo Magnético Terrestre (CMT), uma vez que o fluxo de GCR é maior nas regiões polares onde o CMT é predominantemente vertical e menor na região equatorial, onde o CMT é predominantemente horizontal. No entanto, em regiões onde o CMT é pouco intenso, o fluxo de GCR também é aumentado e os seus possíveis efeitos climáticos podem ser amplificados. Este é o caso da região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (*South Atlantic Magnetic*

*Anomaly* – SAMA), que influencia quase toda a América do Sul, principalmente as regiões sul e sudeste do Brasil, onde está inserido o RS.

Trabalhos anteriores investigando a possível modulação climática por fenômenos geofísicos (SA/GCR) para localidades do RS foram realizados por Gusev et al. (2004), Souza Echer et al. (2008), Rampelotto et al. (2012), Frigo (2013) e Frigo et al. (2013). Gusev et al. (2004) e Souza Echer et al. (2008) analisaram dados de cem anos do total anual de precipitação pluviométrica registrada na estação meteorológica de Pelotas e, verificaram que periodicidades de 22 anos estiveram presentes durante praticamente todo o intervalo investigado. Rampelotto et al. (2012) investigaram dados de temperatura média mensal e do total mensal de precipitação entre 1912 e 2008, registrados na estação meteorológica de Santa Maria. Os resultados destes autores mostraram que periodicidades de 11 e 22 anos aparecem em dados de temperatura e precipitação, porém as periodicidades de 22 anos são evidentes por mais tempo em relação às de 11 anos. Frigo (2013) investigou dados de temperatura média anual, e do total anual de precipitação das estações Porto Alegre, Santa Maria e Uruguaiana e verificou que sinais de 11 e 22 anos são mais significativos nos dados de temperatura. Frigo et al. (2013) analisaram dados de temperatura média anual, registrados em estações meteorológicas localizadas em diferentes latitudes em relação a latitude de ~26°S, na qual o centro da AMAS atravessou o Brasil entre ~1955 e ~1995. Os resultados mostraram que as periodicidades de ~22 anos foram mais significativas nos dados das estações meteorológicas mais próximas a latitude de ~26°S. Todos estes trabalhos anteriores que analisaram dados de temperatura média, foram baseados nos dados da chamada temperatura média compensada, calculada a partir das temperaturas máxima, mínima e de medidas das 9 e 21 horas e, que dá mais peso aos valores noturnos.

Neste trabalho, são investigados os possíveis efeitos da SA/GCR sobre dados de temperatura média anual, calculada a partir da média entre temperatura máxima e temperatura mínima, registrados em estações meteorológicas localizadas em diferentes latitudes do RS durante o último século.

### Dados e Metodologia

Os dados meteorológicos utilizados para análise foram fornecidos pelo Instituto de Meteorologia, coletados nas Estações Meteorológicas de Iraí - IR (27,18° S; 53,25° W), Passo Fundo - PFU (28,26° S; 52,40° W), Santa Maria - SMA (29,69° S; 53,80° W) e Bagé - BAG (31,32°

S; 54,10° W), todas localizadas no RS. Os dados consistem em séries temporais de valores médios mensais de temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin). A partir dos valores médios mensais foram calculados os valores médios anuais de Tmax e Tmin, permitindo calcular a temperatura média anual (Tmed) através da equação  $(Tmax + Tmin) / 2$ . As séries temporais de Tmed para cada estação estão apresentadas na Figura 1.

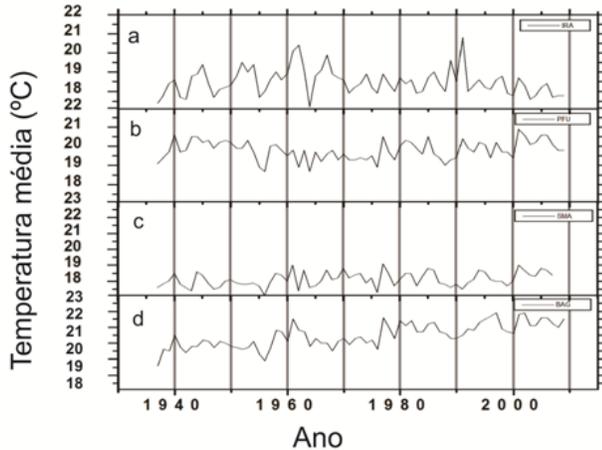


Figura 1 – Série temporal relativa entre 1937 e 2009 para IRA (a), PFU (b), SMA (c) e BAG (d).

As séries temporais de indicadores da SA e dos GCR estão apresentadas na Figura 2. A série do número de manchas solares, Rz, construída a partir dos dados disponibilizados pelo *Solar Influences Data Analysis Center* (<http://sidc.oma.be/>), está apresentada na Figura 2a. A Figura 2b está apresenta dados de contagem horária média anual de nêutrons, indicador do fluxo de GCR, realizada no Observatório Climax e disponibilizada pela *University of New Hampshire*. O ciclo magnético solar de Hale, representado como Rz22 na Figura 2c, corresponde ao número de manchas solares multiplicado por -1 em ciclos ímpares. Considerando que existe uma anticorrelação entre Rz e GCR, os dados de Rz podem ser utilizados como indicadores da variabilidade dos GCR para o período anterior a 1953, quando os GCR começaram a ser medidos. Além disso, verifica-se que os GCR são modulados pela polaridade magnética do Sol, que inverte-se a cada ~22 anos. Assim, os GCR apresentam duas componentes de variabilidade: uma principal de ~11 anos e outra secundária de ~22 anos. Para esta segunda, a série de Rz22 pode ser utilizada como indicador para o período anterior a 1953.

A análise dos dados de Tmed, Rz e Rz22 é realizada a partir da comparação direta entre as séries temporais e também através de duas metodologias de análise espectral, a Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) e a análise de coerência espectral baseada na transformada de ondaletas (*Wavelet Coherence – WTC*).

O método ARIST (Rigozo & Nordeman, 1998) consiste em um ajuste de mínimos quadrados iterativo que propicia a determinação de periodicidades em séries temporais, sem a necessidade de linearização prévia e com alto nível de confiança do ponto de vista estatístico. A procura por periodicidades se dá a partir do ajuste de uma função senoidal com três parâmetros desconhecidos (amplitude, frequência angular e fase), aos dados observados. Como resultado são fornecidas as periodicidades presentes em determinada série temporal dentro do nível de confiança de 95%.

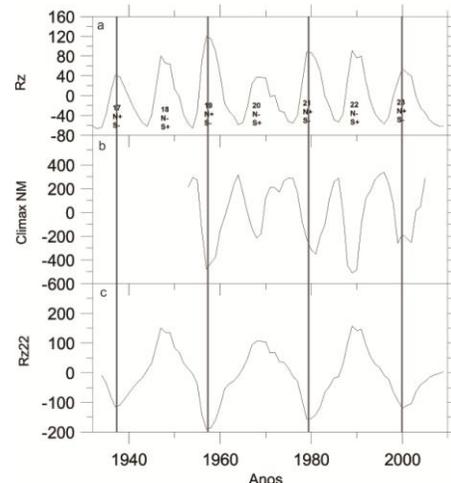


Figura 2 – Série temporal de Rz (a), contagens de nêutrons registradas no Observatório Climax (b), e uma série temporal de Rz22 (c).

A WTC fornece uma medida da correlação cruzada entre duas séries temporais como função da frequência, e é calculada a partir das transformadas de ondaletas na forma contínua (*Continuous Wavelet Transform – CWT*) e cruzada (*Cross Wavelet Transform – XWT*), baseadas na ondaleta complexa de Morlet, conforme descrito em Torrence & Compo, (1998). Neste trabalho é utilizado o algoritmo computacional desenvolvido por Grinsted et al. (2004) e disponibilizado livremente pelo *National Oceanography Centre* da Inglaterra. O resultado desta metodologia é figura apresentando os valores de coerência, entre 0 e 1, para as diferentes frequências, e os correspondentes ângulos de fase entre as séries temporais analisadas.

## Resultados

As séries temporais de Tmed apresentadas na Figura 2 mostram uma tendência de longo período de aumento de temperatura para três das quatro estações meteorológicas: aproximadamente 2°C para PFU, 2,15°C para SMA e 2,86°C para BAG. Para IRA, não se observa uma tendência significativa. Observa-se uma forte variabilidade nas quatro estações nos anos de 1940, 1962-1963, 1977 e 2005. Verifica-se também que para IRA, os picos máximos de temperatura estão presentes nos anos de 1960 e 1990, e as menores temperaturas no ano de e 1965. Para PFU, encontramos os máximos em

1940, 1978, 1985 e 2000. Os mínimos são encontrados nas proximidades de 1955 e 1965. Para SMA, os valores máximos de temperatura são observados em 1960, 1978 e 2002, tendo seus mínimos concentrados em 1955. No entanto, para BAG, encontramos os picos máximos em 1978, 1998 e 2002. O intervalo médio entre os picos de  $T_{med}$  é de aproximadamente 20 anos, que está muito próximo do ciclo de Hale (ciclo de 22 anos). Além disso, os máximos de  $T_{med}$  ocorrem perto dos mínimos de  $Rz_{22}$  observados em 1937, 1957, 1979 e 2000 (Fig. 2).

Depois de eliminada a tendência linear dos dados de  $T_{med}$  foi realizada a análise ARIST, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1. Foram detectadas periodicidades próximas de 11 anos, características do ciclo solar de Schwabe, nas séries temporais das quatro estações. Periodicidades de ~22 anos foram detectadas nos dados de IRA e SMA. Além destas, periodicidades entre 2 e 7 anos estão presentes em todas as estações. Estas devem estar possivelmente associadas a fenômenos como El Niño Oscilação Sul (El Niño Southern Oscillation – ENSO), fenômeno este que não é linha de investigação deste trabalho. Os dados das estações de BAG, PFU e SMA apresentam também periodicidades ~33 anos, possivelmente relacionada ao ciclo solar de Brückner. Além disso, encontramos nos dados de BAG e SM periodicidades características do ciclo de Gleissberg (70 – 100 anos). Posteriormente, com o objetivo de investigar como as variações periódicas se comportam no decorrer do tempo, foi realizada a análise de coerência espectral.

ESTAÇÃO	Períodos (amplitudes em °C)	
	8 – 15 anos	18 – 25 anos
IRA	8,84 (0,17); 11,08 (0,19)	18,34 (0,33)
PFU	8,55 (0,20); 11,15 (0,15)	
SMA	8,61 (0,17)	19,17 (0,21)
BAG	7,67 (0,29)	

Tabela 1 - Períodos estatisticamente significativos nos dados de temperatura para cada estação

A coerência entre  $T_{med}$  e  $Rz$  está apresentada na Figura 3. Verifica-se que a coerência é alta após 1945 para IRA, sendo maior, com valores da ordem de 0,8, entre 1950 e 1965. Próximo de 1990, temos novamente alta coerência, com valores máximos perto de 2000, sendo alcançados valores 0,9. No entanto, após meados dos anos 1990 os resultados apresentam-se abaixo do COI, embora dentro do limite de confiança de 95%. Os ângulos de fase indicam para uma relação não linear entre  $Rz$  e  $T_{med}$  para periodicidades próximas de 11 anos. Para PFU, a coerência é próxima de 0,7 perto de 1960. No entanto, fora do COI encontram-se também dados com coerência superior a 0,8 e fase de fase. Já para SMA, a coerência para períodos próximos de ~11 anos não é superior a 0,6 nas proximidades de 1960. Porém, a coerência aumenta significativamente após 1990, atingindo valores superiores a 0,8 perto de 2000. No entanto, os ângulos

de fase indicam para uma relação não-linear. Para BAG, a coerência passa a ser forte após 1990, com valores superiores a 0,7 e com ângulos de fase indicando para uma relação linear e em fase.

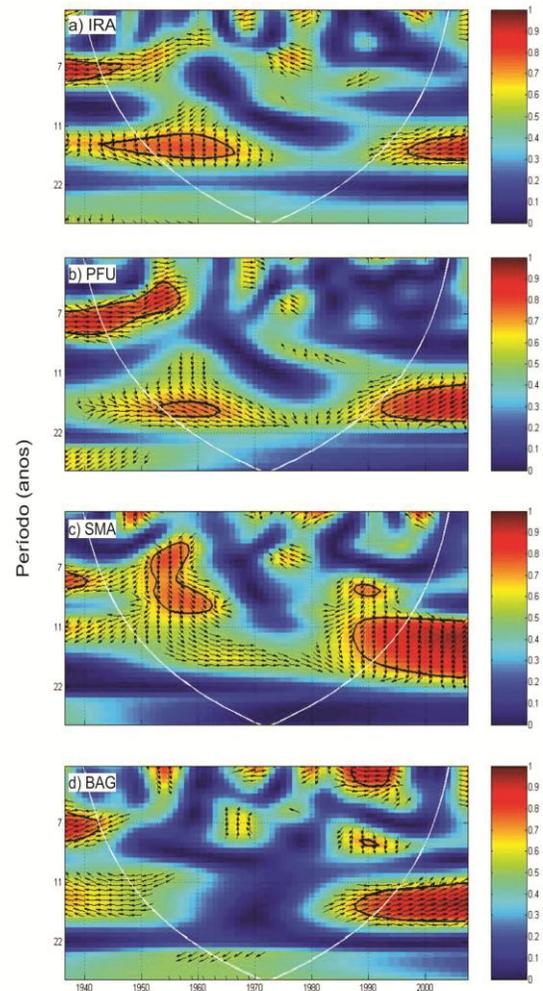


Figura 3 – Espectro de coerência de Wavelet entre as séries de  $Rz$  e  $T_{med}$  para os dados das estações IRA (a), PFU (b), SMA (c) e BAG (d). Os valores de coerência estão indicados na legenda de cores. A curva branca indica o cone de influência (COI). A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicavam os ângulos de fase.

A coerência entre os dados de  $T_{med}$  e  $Rz_{22}$  é apresentada na Figura 4. Para os dados de IRA, a coerência para periodicidades próximas de 22 anos é alta durante todo o período investigado, com ângulos de fase indicando para um comportamento linear de antifase entre  $T_{med}$  e  $Rz_{22}$ . É interessante destacar que esta estação é a mais próxima da latitude de ~26° S, na qual o centro da SAMA atravessou o Brasil de leste para oeste. Para PFU, a coerência é similar àquela observada nos dados de IRA, no entanto, no caso de IRA os ângulos de fase indicam uma relação não linear. Para os dados da estação de SMA, os valores de coerência são altos até

~1950, com ângulos de fase indicando uma relação não linear entre Tmed e Rz22. Para BAG, os maiores valores de coerência estão próximos ao ano de 1940, chegando a 0,7. Este comportamento segue durante todo o período de anos, mas com intensidade menor, valores não chegando a 0,7, com ângulos de fase indicando uma relação não linear.

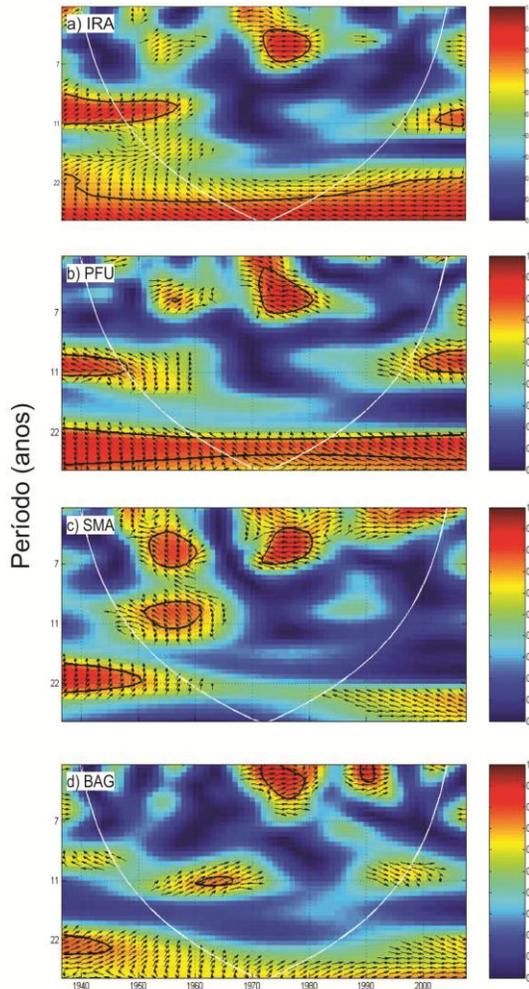


Figura 4 – Espectro de coerência de Wavelet entre a Rz22 e Tmed para os dados das estações IRA (a), PFU (b), SMA (c), BAG (d).

### Discussão e Conclusão

A análise espectral clássica realizada através do método ARIST revelou periodicidades próximas de 11 e de 22 anos nos dados de Tmed das estações IRA, PFU, SMA e BAG. Estes resultados corroboram os resultados obtidos anteriormente por Rampelotto et al. (2012) e Frigo et al. (2013), que utilizaram como Tmed os valores de temperatura média compesanda.

A coerência entre Rz e Tmed indicam que a possível modulação da temperatura através da SA/GCR durante o

o último século foi intermitente e através de mecanismos não lineares.

A coerência entre Rz22 e Tmed mostrou-se continua ao longo do último século para os dados das estações IRA e PFU. Para a primeira, os ângulos de fase indicaram uma relação linear de fase e, para a segunda os ângulos de fase indicaram para uma relação não linear. A coerência entre Rz22 e Tmed é intermitente para os dados das estações SMA e BAG.

Os resultados deste trabalho são um indicativo indireto de que a presença da SAMA pode ter influenciado o clima do RS no último século. Esta conclusão é feita com base no fato de que SAMA cruzou o território brasileiro de leste para oeste, na latitude de  $\sim 26^\circ$  S, passando muito próximo da estação IRA, ao longo do último século. O mecanismo que explicaria esta relação entre o campo geomagnético e o clima é a modulação climática através do fluxo de GCR, pois estes apresentam uma componente característica de variabilidade de  $\sim 22$  anos.

O sinal contínuo em duas das três estações e os valores de máximos de temperatura média, que ocorreram em datas próximas a eventos de mínimos de Rz22 se assimilam a trabalhos de outros autores como Rampelotto et al. (2012) e Frigo et al. (2013), que nos apontam os GCR como possíveis mecanismos indicadores na criação de nuvens baixas e, por consequência nos valores de temperatura na região do SAMA. Futuramente, serão investigados dados de outras variáveis e de outras estações meteorológicas do RS, visando o entendimento mais detalhado dessa possível relação entre campo geomagnético, SA/GCR e clima.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por fornecer os dados de temperatura das estações meteorológicas de Iraí, Passo Fundo, Santa Maria e Bagé, e, a National Science Foundation (Grant ATM-0339527) por disponibilizar os dados de contagem de nêutrons.

### Referências

- Frigo, E. Variações geomagnéticas, heliomagnéticas e do fluxo de raios cósmicos galácticos: possíveis consequências climáticas na região da América do Sul. Tese de Doutorado, 142p., Universidade de São Paulo, 2013.
- Frigo, E., Pacca, I.G., Pereira Filho, A. J., Rampelotto, P. H., Rigozo, N. R. Evidence for cosmic ray modulation in temperature records from the South Atlantic Magnetic Anomaly region. *Ann. Geophys.*, 31, 1833–1841, 2013.

Gusev, A. A., Martin, I. M., Mello, M. G. S., Pankov, V., Pugacheva, G., Schuch, N. J., and Spjeldvik, W. N. Bidecadal cycles in liquid precipitations in Brazil, *Adv. Space Res.*, 34, 370–375, 2004.

Lassen, K., Friis-Christensen, E. Variability of solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, v. 57, p. 835-845, 1995.

Rampelotto, P. H., Rigozo, N. R., da Rosa, M. B., Prestes, A., Frigo, E., Souza Echer, M. P., and Nordemann, D. J. R.: 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, 2012.

Souza Echer, M. P., Echer, E., Nordemann, D. J. R., Rigozo, N. R., and Prestes, A.: Wavelet analysis of a centennial (1895–1994) southern Brazil rainfall series (Pelotas, 31\_46'19" S 52\_20'33" W), *Clim. Change*, 87, 489–497, 2008.

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

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.

Voiculescu, M., and Usoskin, I.: Persistent solar signatures in cloud cover: spatial and temporal analysis. *Environ. Res. Lett.*, 7, 044004, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044004, 2012.

Wilcox, J.M. Solar activity and the weather. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, v. 37, p.237-256, 1975.