



POSSÍVEL MODULAÇÃO DA VARIABILIDADE DA TEMPERATURA MÉDIA ANUAL PELO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

E. Frigo^{1*}, I. G. Pacca², A. J. Pereira-Filho³

¹ Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, Brasil.

² Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

³ Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

*e-mail: evertonfrigo@unipampa.edu.br.

ABSTRACT

Possible climatic modulation by the galactic cosmic rays has been focus of several scientific works in the last years. In this work these possible effects are investigated for the Brazilian subtropical region, which has been influenced by de South Atlantic Magnetic anomaly from more than a century. As a consequence of low geomagnetic intensity in this region, the cosmic ray flux is high, and this can result in more significant climatic effects. Results of spectral analysis indicate that the variability of the annual average temperature were intermittently modulated by El Niño – Southern oscillation phenomena and the ~11 year solar cycle. Furthermore, the modulation by a ~22 year periodicity was persistent between 1933 and 2009, which is an indirect statistic indication for the continuous RCG modulation over temperature data in a bidecadal time scale.

Keywords: Climatic change, galactic cosmic rays, temperature, South Atlantic magnetic anomaly

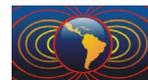
RESUMO

A possível modulação climática pelos raios cósmicos galácticos (RCG) vem sendo tema de diversos trabalhos científicos nos últimos anos. Neste trabalho, estes possíveis efeitos são investigados para a região subtropical brasileira, que vem sendo influenciada pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) a mais de um século. Em razão da baixa intensidade do campo magnético terrestre (CMT) nesta região, o fluxo de RCG é maior, e isso pode acarretar em efeitos climáticos mais significativos. Os resultados de análise espectral obtidos indicam que a variabilidade de temperatura média anual (Tmed) foram modulados de forma intermitente pelo fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS) e pelo ciclo solar de 11 anos. Além disso, a modulação por uma periodicidade de aproximadamente 22 anos foi persistente entre 1933 e 2009, indicando estatisticamente de forma indireta, uma modulação contínua dos RCG sobre os dados de Tmed em escala bidecadal.

Palavras Chave: Mudanças climáticas, raios cósmicos galácticos, temperatura, anomalia magnética do Atlântico Sul

1. Introdução

A atividade solar vem sendo associada a variações climáticas há muito tempo. Séries temporais de diferentes variáveis meteorológicas, como temperatura e precipitação, apresentam periodicidades em torno de 11 anos, que correspondem à principal assinatura da variabilidade da atividade solar. No entanto, diversos autores argumentam que a variação na quantidade de energia fornecida pelo Sol durante o ciclo de 11 anos é muito pequena e insuficiente para explicar as variações climáticas observadas nesta escala de tempo (ex: Dickinson, 1975). Porém, um mecanismo que relaciona indiretamente a variabilidade da atividade solar com as variações climáticas, através do fluxo dos RCG, foi sugerido por Svensmark & Friis-Christensen (1997) e Svensmark (2007). Neste mecanismo, os RCG são modulados pelos campos magnéticos do Sol e



da Terra e servem como gatilho de um processo que altera a cobertura de nuvens baixas, que por sua vez têm um papel importantíssimo no sistema climático terrestre. Em regiões de campo geomagnético relativamente baixo, como a região da AMAS, o fluxo de RCG é mais alto em relação a regiões caracterizadas por campo geomagnético mais alto.

Na área influenciada pela AMAS, encontra-se parte significativa do território brasileiro, principalmente a s região sul e parte da região sudeste, caracterizadas pelo clima subtropical. Para esta região, trabalhos anteriores sugerem que as variações de temperatura e precipitação pluviométrica são controladas pelo fenômeno El-Niño – Oscilação Sul (ENOS; Grimm *et al.*, 2000; Barros *et al.*, 2002) e pela variabilidade solar e/ou dos RCG (Gusev *et al.*, 2004; Souza Echer *et al.*, 2008; Prestes *et al.*, 2011).

Neste trabalho é investigada a possível contribuição da variabilidade dos RCG, para as variações de temperatura média anual (Tmed), registradas em estações meteorológicas localizadas na região subtropical do Brasil, no período entre 1933 e 2009. Neste estudo é considerado o afastamento de cada uma das localidades investigadas em relação ao centro da AMAS e, são utilizadas técnicas de análise espectral clássica e de coerência espectral baseada na transformada de ondaletas.

2. Dados utilizados e métodos de análise

Os dados meteorológicos utilizados consistem de médias anuais de temperatura, calculadas a partir dos valores médios mensais, registrados nas estações meteorológicas São Paulo (SPO), Curitiba (CUR), Florianópolis (FLO) e Porto Alegre (POA). Estas estações estão localizadas nas proximidades do litoral brasileiro, sendo afastadas latitudinalmente por aproximadamente 2°, sendo SPO localizada na latitude 23.5° S e POA em 30° S.

Como indicadores da componente principal do fluxo de RCG foi utilizada a série temporal do número de manchas solares, Rz (Hoyt & Schatten, 1997). Como indicador da componente de 22 anos do fluxo de RCG foi utilizada a série temporal do ciclo solar duplo, Rz22, obtida multiplicando-se o valor de Rz por -1 nos ciclos solares ímpares. Como indicador do ENOS, foram utilizados dados do Índice de Oscilação Sul (do inglês, Southern Oscillation Index – SOI).

A metodologia de análise dos foi dividida em três passos: (1) realização da análise espectral clássica dos dados meteorológicos; (2) realização da análise de coerência espectral entre os dados meteorológicos e de forçantes climáticos; (3) análise dos resultados obtidos considerando a posição relativa de cada estação em relação ao centro da AMAS. O método de análise espectral clássica utilizado foi a Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST), que permite a identificação de variações periódicas em séries temporais, com significância estatística, através do ajuste dos dados observacionais por uma função senoidal (Rigozo & Nordemann, 1998). A análise de coerência espectral, que permite identificar as épocas de alta covariância entre os dados meteorológicos e os forçantes climáticos, foi realizada através do método de coerência espectral baseada na transformada de ondaletas, utilizando o algoritmo computacional desenvolvido por Grinsted *et al.* (2004).

3. Resultados

A análise espectral utilizando o método ARIST identificou diversas periodicidades nas séries temporais de temperatura média anual de SPO, CUR, FLO e POA, conforme apresentado na Tabela 1. As periodicidades foram agrupadas de acordo com faixas de periodicidades características de determinado possível forçante sendo: periodicidades entre 2 e 7 anos, geralmente associadas ao ENOS; periodicidades entre 9 e 13 anos, geralmente associadas ao ciclo solar de ~11 anos ou aos RCG; periodicidades entre 19 e 25 anos, geralmente associada ao ciclo magnético solar ou aos RCG. Além destes, foi identificada uma periodicidade próxima de 33 anos nos dados da estação FLO, que pode ser associado com o ciclo solar de Brückner.

Posteriormente, foi utilizada a ferramenta de coerência espectral baseada na transformada de ondaletas com o objetivo de investigar a evolução temporal das relações entre a variabilidade climática e dos forçantes de

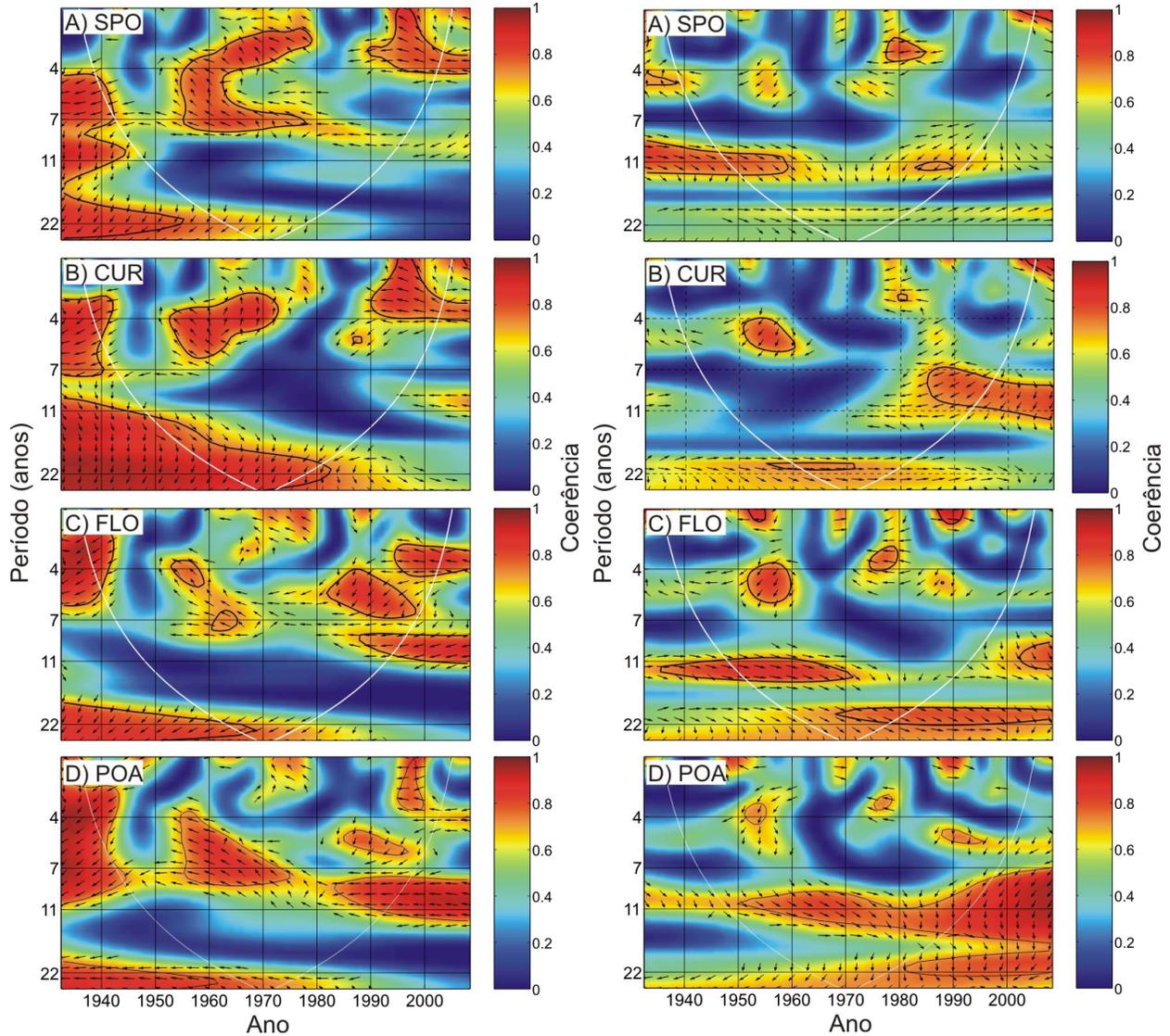
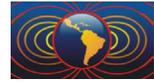


Figura 1. Espectro de coerência entre SOI e Tmed baseado na transformada de ondaletas. A linha branca define o limite abaixo do qual efeitos de borda não podem ser desprezados. As linhas pretas delimitam a região espectral para a qual os valores de coerência são estimados com 95% de confiança. As flechas pretas indicam os ângulos de fase entre as duas séries temporais investigadas.

Figura 2. Similar a Figura 1, mas para Rz e Tmed.

origem externa à Terra (ciclos solares e RCG) e interna (ENOS). Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras de 1 a 3 nas quais as cores indicam os valores de coerência espectral variando entre 0 (ausência de coerência) e 1 (coerência máxima) e as flechas pretas indicam os ângulos de fase, para cada faixa de periodicidades, sendo que quando estes apontam para a direita indicam que as séries estão em fase, e quando apontam para a esquerda indicam séries em antifase. Estes dois casos indicam estatisticamente uma relação linear entre as séries temporais investigadas. Ângulos de fase apontando em qualquer outra direção indicam para uma relação de não linearidade entre as séries investigadas.

Na Figura 1, está apresentada a coerência espectral entre a série temporal do índice SOI e das séries temporais de Tmed das quatro estações meteorológicas. São observadas feições espectrais muito similares

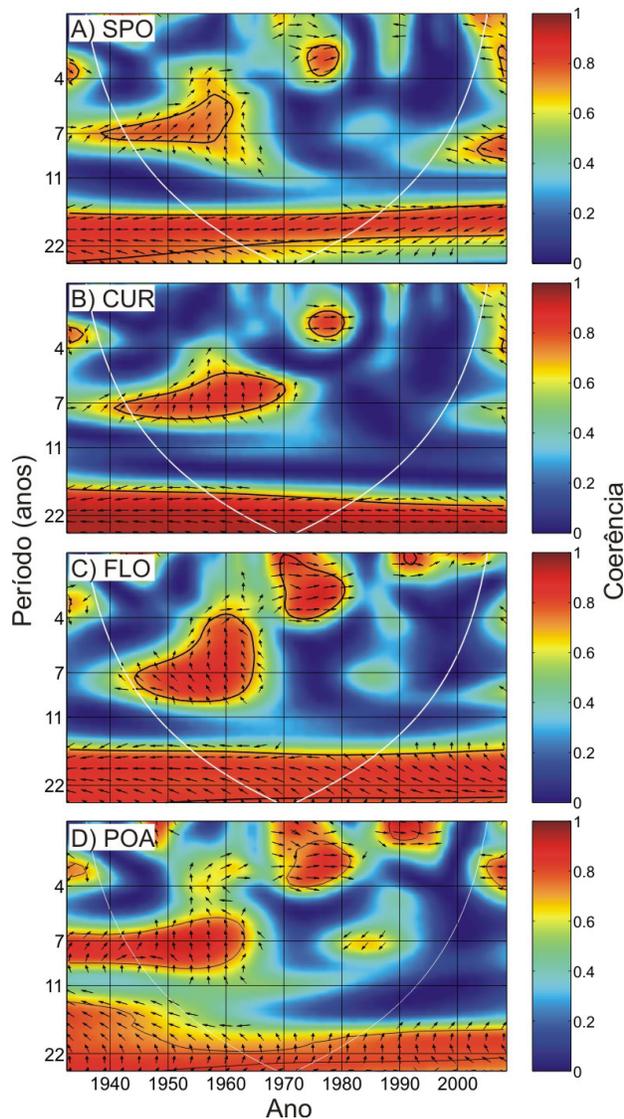
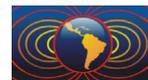


Figura 3. Similar a Figura 1, mas para Rz22 e Tmed.

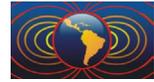
em periodicidades entre 4 e 8 anos, para as quatro estações, com ângulos de fase apontando predominantemente para a esquerda e sinal estatisticamente significativo intermitente. Estes resultam reforçam a importância do ENOS como forçante climático no sul do Brasil e, indicam que a influência deste forçante se dá de forma similar nas quatro localidades investigadas.

Os resultados de coerência espectral entre as séries temporais de Rz e de Tmed estão apresentados na Figura 2. É possível verificar que existe coerência estatisticamente significativa entre Rz e Tmed para periodicidades ao redor 11 anos, porém, esta se manifesta de forma intermitente e em épocas distintas quando se comparam os resultados para diferentes estações. Além disso, se observa que até por volta de 1970 os ângulos de fase apontando predominantemente para a esquerda e, após esta data, tendem a apontar para baixo.

Na Figura 3 estão apresentados os resultados de coerência espectral entre Rz22 e Tmed. Diferente do observado nos resultados de coerência de SOI e Rz com Tmed, verifica-se coerência espectral alta e contínua para periodicidades ao redor de 22 anos. Também, os ângulos de fase apontam predominantemente para a esquerda nas séries de SPO e CUR. Para FLO, os ângulos de fase deixam de apontar predominantemente para a esquerda após ~1970. Por outro lado, para POA, os ângulos de fase apontam predominantemente para cima. Coincidentemente, as estações SPO e CUR são as que foram mais influenciadas pela AMAS no último século, sendo que para estas, o efeito associado aos RCG pode ter sido mais significativo em razão da baixa intensidade do CMT.

Tabela 1. Periodicidades estatisticamente significativas detectadas nos dados de temperatura média anual de cada estação meteorológica, a partir da análise ARIST.

Estação	Períodos (amplitude em °C)		
	2-7 anos	9-13 anos	19-25 anos
SPO	2.3 (0.14), 2.9 (0.14), 4 (0.16), 4.4 (0.17), 6.1 (0.19)	9 (0.15), 10.9 (0.14)	19.8 (0.15)
CUR	2.1 (0.22), 4.1 (0.17), 4.7 (0.22), 5.2 (0.15)	9.1 (0.21)	21.2 (0.18)
FLO	4.1 (0.16), 4.5 (0.14), 5.2 (0.18), 6.3 (0.18)	11 (0.14)	21.7 (0.22)
POA	2 (0.16), 3.4 (0.14), 4.1 (0.19), 4.7 (0.22), 6.5 (0.18)	10.7 (0.19)	21.2 (0.16)



4. Conclusão

A comparação entre os possíveis efeitos de forçantes climáticos de origem externa (variabilidade solar e RCG) e interna (ENOS) à Terra, foi realizada utilizando dados de temperatura média anual da região subtropical brasileira. Periodicidades características destes três forçantes climáticos naturais foram detectadas nas séries temporais de Tmed das quatro estações meteorológicas investigadas. A possível modulação pelo ENOS e pelo ciclo solar de 11 anos parece se manifestar de forma diferente nas diferentes localidades estudadas. O sinal característico do ciclo magnético solar foi persistente nas quatro estações meteorológicas durante todo o período investigado, sendo que os ângulos de fase apontam predominantemente para a esquerda nos dados das duas estações meteorológicas localizadas mais ao norte.

Os resultados obtidos neste trabalho são um indício estatístico indireto da possível modulação de Tmed pelos RCG na região subtropical brasileira durante o período investigado. Esta conclusão é suportada pela influência da AMAS, conforme indicado pelo comportamento dos ângulos de fase nos resultados de coerência espectral entre Rz22 e Tmed (Frigo *et al.*, 2013). As pesquisas nesta linha de investigação terão continuidade utilizando dados de outras variáveis meteorológicas e provenientes de outras localidades.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia pelos dados meteorológicos das estações CUR, FLO e POA e ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo pelos dados meteorológicos de SPO. E. Frigo agradece à CAPES pela concessão de Bolsa de Doutorado.

7. Referências

- Barros V.R., Grimm A.M., Doyle M. E., 2002. Relationship between temperature and circulation in Southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events, *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 80-1, 33–44.
- Dickinson R.E., 1975. Solar variability and the lower atmosphere, *B. Am. Meteor. Soc.* 56, 1240-1248,
- Frigo E., Pacca I. G., Pereira-Filho A. J., Rampelloto 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.
- Grimm A., Barros V., Doyle M., 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño La Niña events, *J. Climate* 13, 35-58.
- Grinsted A., Moore J. C., Jevrejeva S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, *Nonlinear Proc. Geoph. II*, 561-566.
- Gusev A. A., Martin I. M., Mello M. G. S., Pankov V., Pugacheva G., Schuch N. J., Spjeldvik W. N., 2004. Bidecadal cycles in liquid precipitations in Brazil, *Adv. Space Res.* 34, 370–375.
- Hoyt D. V., Schatten K. H. The role of the sun in climate change, *Oxford University Press*, New York, 1997.
- Prestes A., Rigozo N. R., Nordemann D. J. R., Wrasse C. M., Souza Echer M. P., Echer E., da Rosa M. B., Rampelotto P. H. , 2011. Sun–earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano De Almeida, Southern Brazil, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 73, 1587-1593, doi:10.1016/j.jastp.2010.12.014.
- Rigozo N. R., Nordemann D. J. R., 1998. Iterative Regression Analysis of Periodicities in Geophysical Record Time Series, *Rev. Bras. Geofis.* 16, 149-158.
- Souza Echer M. P., Echer E., Nordemann D. J. R., Rigozo N. R., Prestes A., 2008. 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.
- Svensmark H., 2007. Cosmoclimatology: a new theory emerges, *News Rev. Astron. Geophys.* 48, 1.18-1.24.
- Svensmark H., 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.