



ANALISE DA INFLUÊNCIA DE FORÇANTES GEOFISICOS SOBRE O CAMPO DE PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Giulia Ribeiro Herdies - Universidade Federal do Pampa (UNIPAMP),
Bolsista PIBIC/CNPq
E-mail: giuliaherdies@gmail.com

Simone Marilene da Costa Coelho - DSA/CPTEC/INPE, orientador
E-mail: simone.sievert@cptec.inpe.br

Éverton Frigo – Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), orientador
E-mail: evertonfrigo@unipampa.edu.br

Julho de 2019



ANALISE DA INFLUÊNCIA DE FORÇANTES GEOFÍSICOS SOBRE O CAMPO DE PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Giulia Ribeiro Herdies - Universidade Federal do Pampa (UNIPAMP),
Bolsista PIBIC/CNPq
E-mail: giuliaherdies@gmail.com

Simone Marilene da Costa Coelho - DSA/CPTEC/INPE, orientador
E-mail: simone.sievert@cptec.inpe.br

Éverton Frigo – Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), orientador
E-mail: evertonfrigo@unipampa.edu.br

Julho de 2019



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) pelo apoio Institucional, ao Instituto Nacional de Meteorologia pela disponibilização dos dados observacionais e aos professores Éverton Frigo e Simone M. da Costa Coelho por toda dedicação e orientação durante a execução do presente trabalho.



LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 - Número de manchas solares (Rz) entre 1700 AD e 2000 AD.....	11
Figura 2 - Representação esquemática das correntes elétricas no núcleo que são capazes de produzir o campo geomagnético	13
Figura 3 - Evolução temporal da AMAS entre 1590 e 2005.O triângulo vermelho representa a posição do centro da AMAS. As isolinhas de 28000 e 32000 nT também estão apresentadas	14
Figura 4 - Séries temporais das médias anuais das contagens horárias de nêutrons (HNC) registradas nos observatórios de Huancayo e Climax, do número de manchas solares (Rz) e do ciclo solar duplo (Rz22)	15
Figura 5 - Ilustração mostrando como se dá a modulação dos GCR pelos campos magnéticos da Terra e do Sol	16
Figura 6 - Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Porto Alegre nos anos de 1916 a 2009.	21
Figura 7 - Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Rio Grande nos anos de 1910 a 2008	21
Figura 8 - Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Santa Vitoria do Palmar nos anos de 1913 a 2009	22
Figura 9 - Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Torres nos anos de 1946 a 2009	22



LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Detalhe das Séries Temporais de Pluviometria	18
Tabela 2 - Períodos estatisticamente significante no total anual de precipitação pluviométrica em milímetros para cada estação	23



Lista de Símbolos e Abreviaturas

ARIST	Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais
AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
AS	Atividade Solar
CMT	Campo Magnético Terrestre
ECMWF	Centro Europeu de Previsão de Tempo de Médio Prazo
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
RCG	Raios Cósmicos Galácticos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITS	Irradiância total Solar
PPEs	Precipitação de Partículas Altamente Energéticas
POA	Porto Alegre
RGD	Rio Grande
RS	Rio Grande do Sul
SVP	Santa Vitória do Palmar
TOR	Torres
UV	Ultravioletas



Resumo

Durante os últimos anos as variações climáticas observadas na Terra têm sido predominantemente associadas a ação antrópica. Entretanto, alguns pesquisadores têm encontrado indícios de que forçantes naturais possam estar modulando o clima e o meio ambiente mesmo durante o último século. Entre estes forçantes, destacam-se os forçantes geofísica atividade solar (AS), fluxo de raios cósmicos galácticos (RCG) e campo magnético terrestre (CMT). Para a análise da influência de forçantes geofísicos sobre a variação de precipitação no estado do Rio Grande do Sul (RS) foram utilizados os dados de quatro estações pluviométricas distribuídas pelo estado do RS, as quais tem seus registros desde 1910 até 2016, sendo que uma grande parte destes dados ainda estão registrados em papel nos arquivos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As estações utilizadas neste trabalho foram Torres, Porto Alegre, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar. Os forçantes geofísicos utilizados neste trabalho foram o número de manchas solares, que serve como indicador da variabilidade da atividade solar (AS) e do fluxo de raios cósmicos galácticos (RCG) e, dados de intensidade do campo magnético terrestre (CMT), obtidos a partir do modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). Afim de detectar variações periódicas relacionadas a estes forçantes, foi utilizado o método de análise espectral clássica Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST). Os resultados indicaram uma tendência de aumento do total anual de precipitação ao longo dos anos e a presença de periodicidades geralmente associadas ao El Niño - Oscilação Sul (2 a 7 anos) e aos ciclos solares de Schwabe (~11anos) e de Hale (~22 anos).



SUMÁRIO	Pág.
1 INTRODUÇÃO	09
1.1 Objetivos	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 Variabilidade solar durante os últimos séculos	11
2.2 O campo geomagnético e a Anomalia Magnética do Atlântico Sul	12
2.3 Modulação solar e geomagnética dos raios cósmicos galácticos	14
2.4 Mecanismos físicos variabilidade solar – clima terrestre	16
3 DADOS E MÉTODOS.....	18
3.1 Materiais	18
3.2 Métodos	19
4 RESULTADOS	21
5 CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1. INTRODUÇÃO

A produção agropecuária nacional é fortemente contribuída pelo estado o Rio Grande do Sul (RS), tanto para o mercado interno quanto o de exportação. O percentual de 11,6 do total do Valor Adicionado Bruto da agropecuária brasileira em 2014, fez com que o RS ficasse na primeira posição do *ranking* nacional (FEIX et al., 2017). No entanto, este setor é significativamente afetado pelo clima, principalmente pela quantidade e distribuição da precipitação pluviométrica ao longo dos anos.

Uma das principais características do clima da região Sul, que o distingue das demais regiões do Brasil, é a regularidade na distribuição das chuvas e a acentuada diferença de temperatura observada entre os meses de verão e de inverno. Os principais fatores que contribuem para a definição deste padrão climático são a posição geográfica, a atuação de frentes frias (nos meses de inverno) e sistemas de mesoescala (nos meses de verão). Além destes, o clima da região sul do Brasil sofre forte influência de sistemas de grande escala, como o fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS) que pode atuar de forma a diminuir ou aumentar os índices pluviométricos da região. Como resultado da influência conjunta de todos estes fatores, o valor total médio de precipitação pluviométrica no RS varia entre 1.250 mm e 2.000 mm por ano (Barros et al., 2002; Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

A identificação de padrões climáticos, que se repetem ao longo de anos, décadas ou períodos ainda maiores, pode ser facilitada com a utilização de ferramentas de análise espectral. Estas ferramentas permitem a identificação de variações periódicas em séries temporais de dados meteorológicos. Resultados de trabalhos anteriores utilizando a técnica Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) em dados meteorológicos do RS indicam que, além de periodicidades de 2 a 7 anos, características do fenômeno ENOS, periodicidades mais longas, de aproximadamente 11 e aproximadamente 22 anos são identificadas em séries temporais longas de temperatura e precipitação pluviométrica (p. ex. Souza Echer et al., 2008; Rampelotto et al., 2012; Frigo et al., 2013; Frigo et al., 2018). Estes ciclos, em escala temporal decadal e bidecadal, são manifestações características da variabilidade solar associadas ao ciclo de manchas solares de 11 anos e ao ciclo magnético

solar de 22 anos. A identificação destes ciclos nos dados climáticos do RS corrobora com a proposição de que a variabilidade solar atua como forçante climático nestas escalas de tempo.

A investigação da possível modulação climática pela atividade solar no RS torna-se ainda mais interessante em razão da presença da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Esta anomalia, que atualmente cobre o sul da América do Sul, consiste da região da superfície terrestre onde são observados os menores valores de intensidade do campo geomagnético. Como o campo geomagnético funciona como um escudo protetor, que protege a Terra da entrada de partículas eletricamente carregadas provenientes do espaço, é menos intenso na região da AMAS, a entrada destas partículas extraterrestres é facilitada. Considerando que a entrada destas partículas é modulada também pela atividade solar, os seus efeitos na atmosfera terrestre tendem a ser intensificados durante os extremos do ciclo solar e nas regiões de campo geomagnético pouco intenso (Frigó, 2013).

Os mecanismos físicos propostos para explicar a presença de periodicidades típicas da variabilidade solar em dados climáticos envolvem relações diretas e indiretas. Entre os mecanismos indiretos, um dos mais investigados é aquele que relaciona a variabilidade dos raios cósmicos galácticos (RCGs), modulados pelos campos magnéticos do Sol e da Terra, e a cobertura de nuvens. De acordo com este mecanismo, o aumento na ionização produzida pelos RCGs durante os mínimos de intensidade magnética solar, funciona como um gatilho para o aumento da cobertura de nuvens baixas, o que implicaria na diminuição da temperatura na superfície terrestre (Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Svensmark, 2007). Como as variações de temperatura impactam também em outras variáveis meteorológicas e, na região da AMAS a entrada de RCGs é facilitada, a região do RS constitui-se como um local interessante para o estudo das relações entre os forçantes geofísicos (atividade solar, campo geomagnético, AMAS e RCGs) e o clima.

1.1 Objetivo

Objetivo deste trabalho trata-se investigar a influência de forçantes geofísicos (campo geomagnético, variabilidade solar e raios cósmicos galácticos) sobre os totais de precipitação no estado do Rio Grande do Sul.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Variabilidade solar durante os últimos séculos

O Sol é reconhecido como a principal fonte de energia para o sistema climático terrestre. Além da energia na forma de radiação eletromagnética, o Sol emite também partículas em todas as direções que, em algumas situações, podem atingir a Terra. Além disso, todo o sistema solar está envolvido pelo campo magnético solar, denominado como Heliosfera. A Heliosfera é uma barreira que blinda a entrada de parte, dependendo de suas energias, das partículas eletricamente carregadas provenientes de fora do sistema solar. A intensidade do campo magnético solar segue o ciclo de manchas solares e reverte sua polaridade a cada aproximadamente 11 anos (Kirchhoff, 1991).

A variabilidade solar é monitorada através de observações há vários séculos. O índice da variabilidade solar mais conhecido é o número de manchas solares. Estas manchas, localizadas na fotosfera solar, são relacionadas à diferenças de temperatura entre regiões vizinhas causadas pela intensa atividade magnética solar. A Figura 1 apresenta a evolução temporal do número de manchas solares, representada em termos do índice Rz, entre 1700 e 2010.

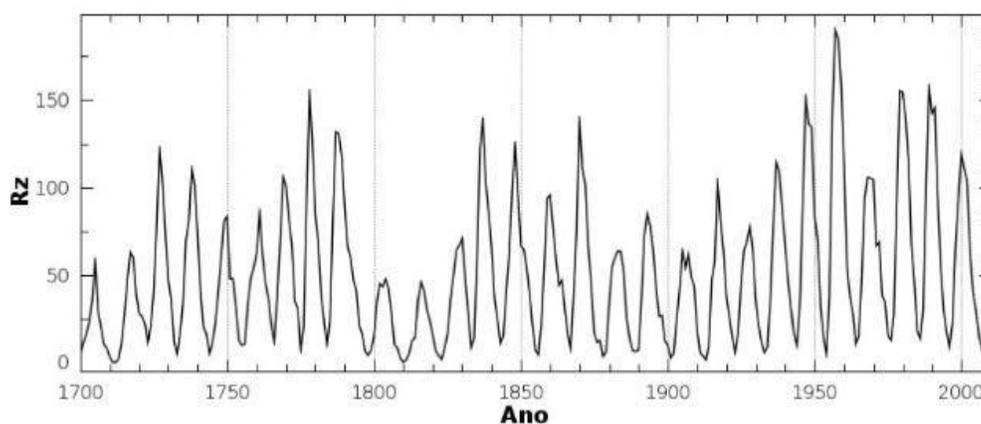


Figura 1: Número de manchas solares (Rz) entre 1700 AD e 2000 AD.
Fonte: FRIGO, 2013

A análise de série temporal do número de manchas solares permite a identificação de uma ciclicidade de aproximadamente 11 anos desde um valor mínimo (praticamente nenhuma mancha solar), que coincide com o mínimo de atividade solar, até um valor máximo (número relativamente grande de manchas), coincidindo com o máximo de atividade solar e, posteriormente retornando novamente aos valores mínimos. Esta variação com periodicidade de 11 anos é conhecida como *ciclo de manchas solares* ou *ciclo solar de Schwabe*. Conforme descoberto por George Ellery Hale em 1919, a cada 11 anos o Sol altera sua polaridade magnética, permanecendo durante ~11 anos em um estado de polaridade e nos 11 anos seguintes na polaridade oposta. Assim, o intervalo necessário para que um mesmo estado de polaridade se repita é de ~22 anos. Este ciclo aproximadamente bidecadal é denominado *ciclo solar duplo* ou *ciclo magnético solar de Hale*.

Entre as partículas originárias de fora do sistema solar e que influenciam em processos físicos na atmosfera terrestre estão os raios cósmicos galácticos (RCG). Os RCG são predominantemente partículas com carga elétrica positiva originárias na explosão de supernovas. A entrada dos RCGs no sistema solar é influenciada pelos ciclos solares de Schwabe e de Hale (Kudela, 2009).

2.2 O campo geomagnético e a Anomalia Magnética do Atlântico Sul

O campo geomagnético (Figura 2), que é a barreira natural que protege a Terra de partículas provenientes do espaço, é gerado no interior da Terra e apresenta um formato predominantemente dipolar. Os maiores valores de intensidade geomagnética total são observados nas regiões polares e os menores valores na região equatorial. Nas regiões polares, o campo geomagnético é predominantemente vertical, tendo uma configuração paralela a direção de propagação das partículas eletricamente carregadas. Nesta situação, a penetração de partículas eletricamente carregadas é facilitada. Situação oposta ocorre na região equatorial, na qual o campo geomagnético é predominantemente horizontal.

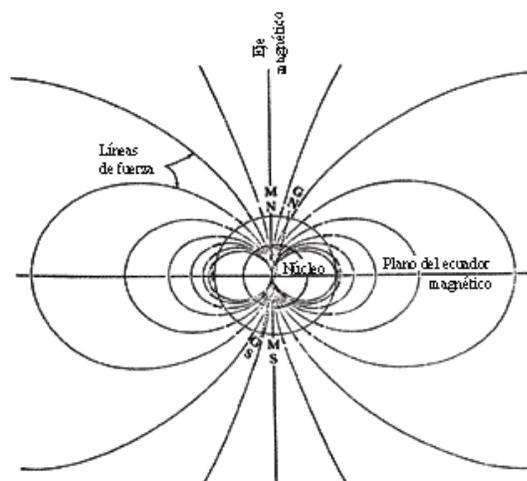


Figura 2 - Representação esquemática das correntes elétricas no núcleo que são capazes de produzir o campo geomagnético. Fonte: Otaola, 2013.

No entanto, em algumas regiões da Terra, componentes não dipolares são importantes e acabam distorcendo a configuração dipolar do campo geomagnético. A maior feição de campo não dipolar presente na superfície terrestre é a AMAS. Nesta região, são observados valores de intensidade geomagnética total maiores do que aqueles observados na região equatorial. A AMAS é conhecida desde a construção das primeiras cartas geomagnéticas globais com razoável resolução espacial. O ponto de menor intensidade geomagnética vem se deslocando para oeste durante os últimos séculos (Figura 3). Concomitantemente com este deslocamento do seu centro, a extensão territorial da AMAS vem aumentando.

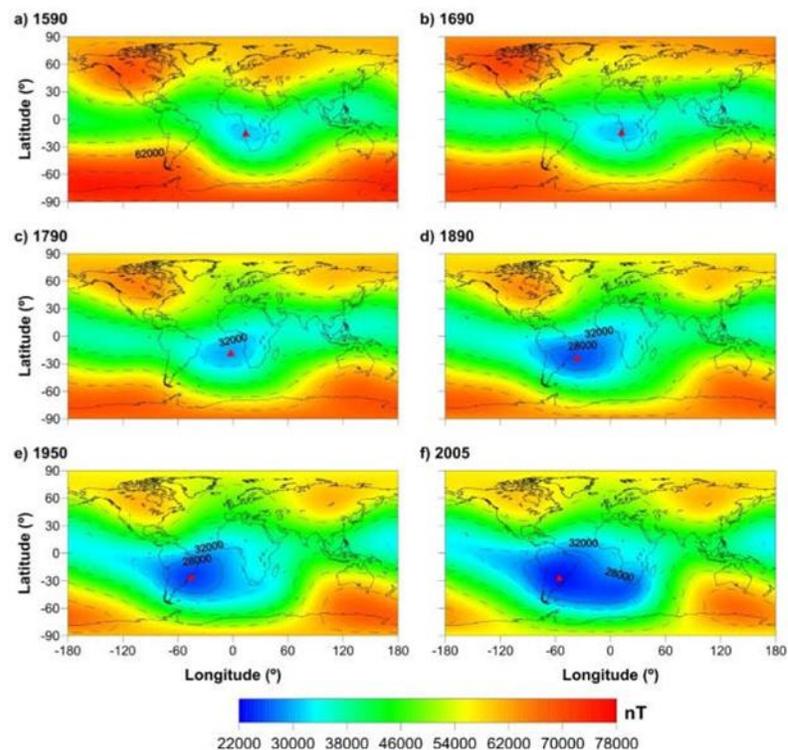


Figura 3: Evolução temporal da AMAS entre 1590 e 2005. O triângulo vermelho representa a posição do centro da AMAS. As isolinhas de 28000 e 32000 nT também estão apresentadas. Fonte: Hartmann & Pacca (2009)..

Atualmente, a AMAS cobre todo o sul da América do Sul, o sul do Oceano Atlântico Sul e uma porção do sul do Pacífico Sul. O território do estado do Rio Grande do Sul se encontra na área de influência da AMAS, tendo o centro da AMAS cruzado muito próximo do limite norte do RS.

2.3 Modulação solar e geomagnética dos raios cósmicos galácticos

As partículas de raios cósmicos galácticos passam por diversas barreiras que dificultam e os modulam até que penetrem na atmosfera da Terra. Entre estas barreiras estão a Heliosfera, campo magnético do Sol, e a Magnetosfera, campo magnético terrestre (figura 4).

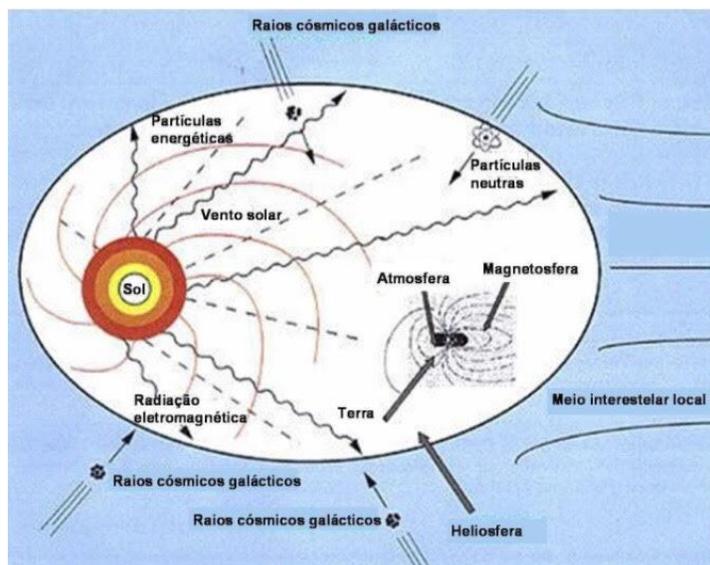


Figura 4: Ilustração, fora de escala, mostra como se dá a modulação dos RCG pelos campos magnéticos da Terra e do Sol. Fonte: (Adaptação de umbra.nascom.nasa.gov/)

Sabendo que os raios cósmicos são partículas energéticas originadas no espaço, e quase 90% dos raios cósmicos são prótons. Pode ser observado na figura 5, que a variabilidade dos RCG, que está apresentada em função do valor médio anual do número de nêutrons (produzidos na interação dos raios cósmicos primários com os constituintes atmosféricos), detectados em Huancayo (Peru) (Fig. 5a) quanto em Climax (Estados Unidos) (Figura 5b) que a forma da curva da contagem de nêutrons aproxima-se de um formato triangular. Isto ocorre durante as transições dos ciclos solares ímpares para os pares. Enquanto que, durante as transições dos ciclos solares pares para os ímpares a forma da curva assemelha a um quadrado, como indicada pela curva vermelha na Figura 5b. Esta modulação é dependente do estado de polaridade magnética do campo do Sol (Jokipii et al., 1977; Okazaki et al., 2008).

Percebe-se também nas figuras 5a e 5b, que a contagem de nêutrons registrados em Huancayo (próximo ao equador geomagnético) é bem menor do que a contagem registrada em Climax (próximo ao polo geomagnético) devido as modulações produzidas pelo campo geomagnético que se manifestam espacialmente e em escala de temporal longa, podendo ser secular ou maior.

Em sequência, estão apresentados o número médio anual de Revisão Bibliográfica 15 manchas solares em termos do índice Rz (Hoyt & Schatten, 1997), que mostra claramente o ciclo solar (11 anos) (Figura 5c). Assim como está representado do ciclo de Hale, utilizando o índice Rz22, obtido multiplicando-se o número de manchas solares dos ciclos solares ímpares por -1 (Figura 5d).

Ao analisar todas as figuras, verifica-se que existe uma anti-correlação entre a variabilidade dos nêutrons (Figuras 5a e 5b) e Rz (Figura 5c), sendo que os máximos da atividade solar estão associados aos mínimos do fluxo de RCG vice-versa. Este comportamento em ciclos solares pares e ímpares difere a variabilidade dos RCG da variabilidade da irradiância solar, pois esta última segue basicamente o ciclo de manchas solares independente da polaridade magnética do Sol (Fröhlich, 2012).

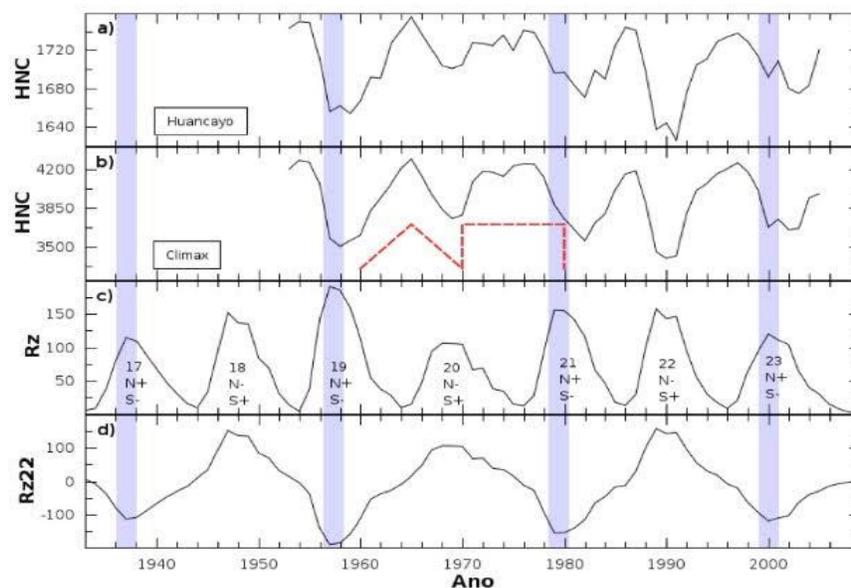


Figura 5: Séries temporais das médias anuais das contagens horárias de nêutrons (HNC) registradas nos observatórios de Huancayo e Climax, do número de manchas solares (Rz) e do ciclo solar duplo (Rz22). Fonte: FRIGO 2013.

2.4 Mecanismos físicos variabilidade solar – clima terrestre

A presença de sinais típicos da variabilidade solar em dados climáticos é conhecida há mais de um século. Em 1801, o astrônomo William Herschel sugeriu que chovia menos quando o número de manchas solares era alto (Dorman, 2012). As relações entre a variabilidade solar e o clima terrestre podem ser diretas ou indiretas. A possibilidade de relação direta, isto é, um aumento (diminuição) na irradiância solar causando diretamente um aumento (diminuição) de temperatura na Terra, vem sendo descartada há décadas (p. ex. Dickinson, 1975). Por outro lado, existem diversas sugestões de mecanismos que podem conectar a variabilidade solar ao clima de forma indireta. A descrição destes mecanismos, baseada em Frigo et al. (2018), é apresentada a seguir.

Um dos mecanismos indiretos que relaciona a variabilidade solar ao clima sugere que a ionização produzida pelos RCGs na baixa atmosfera contribui para a formação de núcleos de condensação de nuvens. Após crescerem, estes núcleos contribuem para o aumento da cobertura de nuvens baixas, que, por sua vez, tem o efeito de diminuir a temperatura na superfície terrestre. Como a entrada de RCGs na atmosfera é modulada pela variabilidade solar, os raios cósmicos apresentam variações periódicas coincidentes com aquelas observadas na atividade solar, isto é, periodicidades de aproximadamente 11 e aproximadamente 22 anos. Além disso, os efeitos dos RCGs sobre o clima tendem a ser intensificados em regiões onde a barreira geomagnética é menos efetiva.

Outro mecanismo indireto, também relacionado a atividade solar que pode influenciar no clima é a precipitação de partículas altamente energéticas (PPEs). A ocorrência de PPEs na região da AMAS já foi reportada em vários trabalhos envolvendo dados geomagnéticos (p. ex. Trivedi et al., 2005) e medidas em satélites (Grigoryan et al., 2008). Estudos experimentais sugerem que a precipitação de elétrons relativísticos provenientes do cinturão de radiação de Van Allen pode influenciar na disponibilidade de nitrogênio reativo nas porções mais altas da atmosfera. No entanto, o mecanismo físico que conecta a variabilidade da quantidade de nitrogênio com o clima na baixa atmosfera ainda não é bem apropriadamente estabelecido (Mironova et al., 2005).



Outros dois mecanismos, detalhados em Solanki (2013), relacionam as variações na irradiância solar com as variações climáticas. De acordo com o primeiro destes mecanismos, a radiação solar no comprimento de onda do visível absorvida pela superfície terrestre dá início a um mecanismo que se desenvolve de baixo para cima. Este mecanismo influencia a atmosfera e os oceanos através de alterações na zona de convergência intertropical e nas circulações tropicais. O segundo mecanismo, que se desenvolve de cima para baixo, é relacionada com a variação da intensidade da radiação ultravioleta na estratosfera. Este mecanismo é baseado no fato de que as variações na atividade solar durante um ciclo de 11 anos são mais intensas em comprimentos de onda mais curtos. As variações na radiação ultravioleta modificam as concentrações de ozônio e levam a mudanças na dinâmica da circulação atmosférica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção estão apresentados os materiais utilizados e as técnicas de análise empregadas no desenvolvimento deste estudo.

3.1 Materiais

Os dados relacionados às estações de Porto Alegre (POA), Rio Grande (RGD), Santa Vitoria do Palmar (SVP) e Torres (TOR) foram obtidos por fotografias das páginas dos livros correspondentes aos relatórios anuais no arquivo geral do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em Porto Alegre. Abaixo, na Tabela 1 estão apresentados os detalhes das séries temporais analisadas.

Para cada estação foram digitalizados todos os valores totais mensais de precipitação. Os totais de dias de chuva e valores relacionados as precipitações máximas em 24 horas estão em fase de digitalização. Em exceção, os dados de RGD já haviam sido previamente digitalizados em forma de tabelas e continham apenas os valores totais mensais de precipitação.

Identificador	Cidade	Localização	Altitude	Período
POA	Porto Alegre	30,1°S; 51,2°W	10 m	1916 – 2009
RGD	Rio Grande	32,2°S; 52,5°W	5 m	1910 – 2008
SVP	Santa Vitoria do Palmar	33,3°S; 53,2°W	23 m	1913 – 2009
TOR	Torres	29,2°S; 49,4°W	16 m	1946 – 2009

Tabela 1: Detalhes das series temporais.

3.2 Métodos

A partir dos dados mensais de precipitação, foram calculados os totais anuais de precipitação para cada estação. Os valores são então representados graficamente, permitindo a visualização de máximos e mínimos proeminentes e de eventuais tendências de longo período. Posteriormente, visando a identificação de padrão cíclicos nas séries temporais, principalmente aqueles associados com a atividade solar, foi utilizada uma técnica de análise espectral clássica.

As técnicas de análise espectral clássica, como a técnica de Fourier, permitem estimar os comprimentos dos períodos presentes em determinada série temporal e as amplitudes associadas a cada periodicidade identificada. Em outras palavras, é possível dizer quais as periodicidades que mais contribuem para a oscilação de determinada variável meteorológica. Por exemplo, ao analisar uma série temporal do total anual de precipitação pluviométrica, é possível indicar se o ENOS é, ou não, o fenômeno periódico que mais contribui para a variabilidade pluviométrica de determinado local.

No Brasil, uma técnica de análise espectral clássica bastante utilizada na análise de dados climáticos e de dados geofísicos é a Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais. Esta técnica consiste em ajustar os dados observacionais (Y_k), correspondentes a a cada instante de tempo (t_k), através de uma função senoidal que possui três parâmetros desconhecidos visando minimizar, através de um processo iterativo, a chamada função condicional (F_k), definida como:

$$F_k = Y_k - a_0 \text{sen}(a_1 t_k + a_2) \quad (\text{Eq. 1})$$

Os três parâmetros desconhecidos são a amplitude (a_0), a frequência angular (a_1) e a fase (a_2). Como resultado do processo ARIST são obtidos os três parâmetros associados a cada uma das periodicidades detectada na série temporal. Uma importante vantagem desta técnica, em relação à outras técnicas de análise espectral clássica, é o fato de que ela fornece o desvio padrão associado a cada periodicidade detectada (Rigozo & Nordemann, 1998;



Rigozo et al., 2005). Com esta informação, é possível selecionar somente aquelas periodicidades que possuem um maior nível de confiança estatístico. De acordo com Rigozo et al. (2005) o número máximo de iterações selecionado para o caso de séries temporais típicas de dados climáticos e geofísicos deve ser 200. Para garantir a condição de estacionariedade das séries temporais, geralmente é realizada a remoção da tendência linear de longo período antes da aplicação da técnica ARIST.

Após a técnica ARIST ser aplicada nas séries temporais de precipitação, as periodicidades e suas respectivas amplitudes são representadas em forma de tabela. Neste formato, é possível ter um panorama mais geral acerca da presença dos sinais da atividade solar nos dados investigados.

4. RESULTADOS

As séries temporais dos totais anuais de precipitação pluviométrica das estações em Porto Alegre (figura 6), Rio Grande (figura 7), Santa Vitória do Palmar (figura 8) e Torres (figura 9), respectivamente.

Na figura 6, para a estação de Porto Alegre, pode-se observar um leve aumento nos totais pluviométricos a partir da metade da década de 1970. Resultado similar pode ser observado na figura 9, para a localidade de Torres. Analisando estas figuras pode-se notar que todas variam em torno de 2500 mm e 500mm. As amplitudes medias para cada estação, relacionados as determinadas datas dos dados são aproximadamente de 1550 mm, 1400 mm, 1650 mm e 1500 mm, para figura 6, 7, 8 e 9, nesta determinada ordem.

Na estação de Porto Alegre foi registrado de 1916 até 2009 que as amplitudes máximas ocorram no início dos anos 1940, 1970 e no final dos anos 2000. As mínimas registradas foram no final da década de 1910, meados anos 20', e no início dos anos 1960.

A estação de Rio Grande, representado na figura 7, apresenta amplitude máxima registradas, perante as datas de 1910 a 2008, são visíveis em meados anos 10' e inicio dos anos 2000, e as mínimas são aparentes um pouco antes de iniciar os anos 1920 e 1990.

Para figura 8, estação de Santa Vitoria do Palmar, pode-se observar que as amplitudes nos anos de 1913 a 2009 não existem muitos mínimos visíveis, no entanto, em relação as amplitudes máximas são notáveis que no inicio de 1940 e 1914 houve uma grande variação.

Da mesma forma, em Torres, figura 9, os dados de amplitude mínima não são tão expressivamente visíveis durante os anos de 1949 a 2009. Porém, as amplitudes máximas registradas foram na metade dos anos 50'. Início da década de 1970 e metade dos anos 00'.

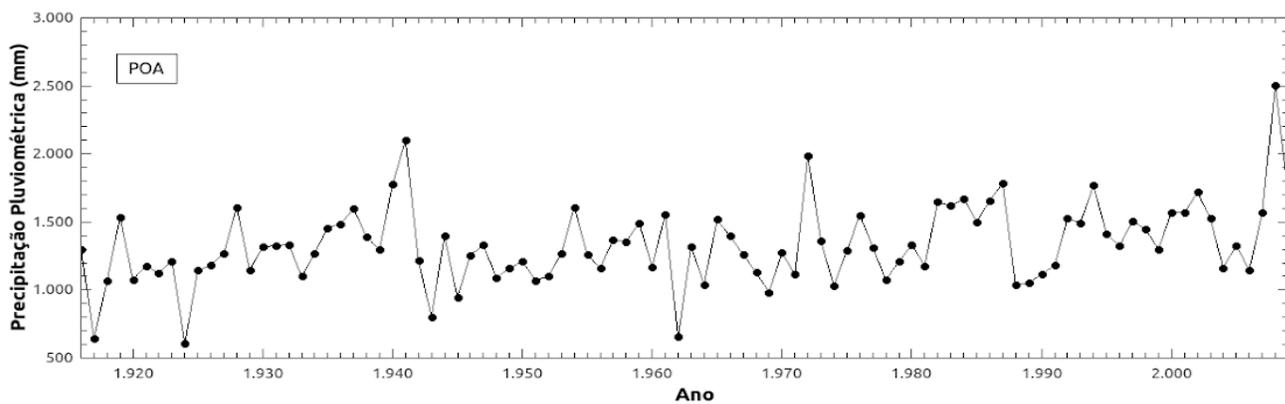


Figura 6: Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Porto Alegre nos anos de 1916 a 2009. Fonte: Autora.

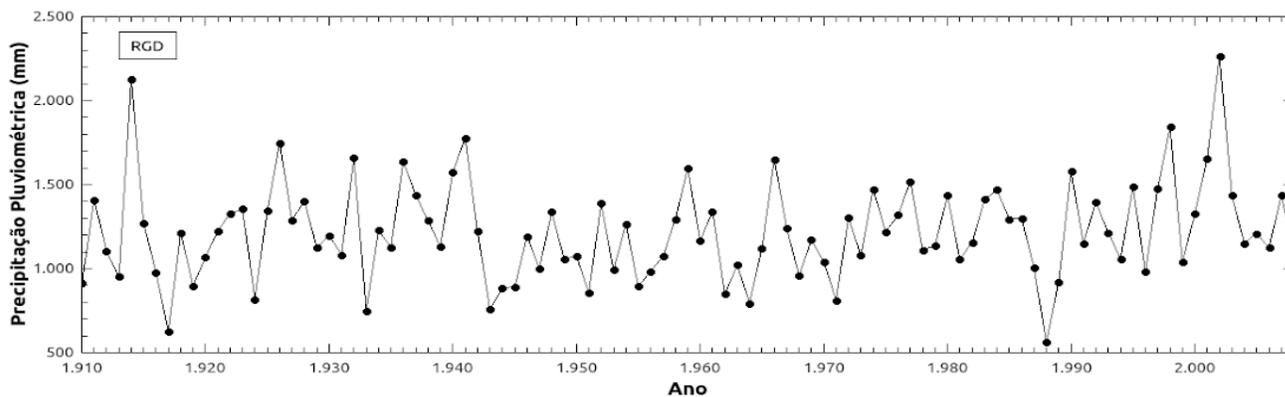


Figura 7: Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Rio Grande de 1910 a 2008. Fonte: Autora

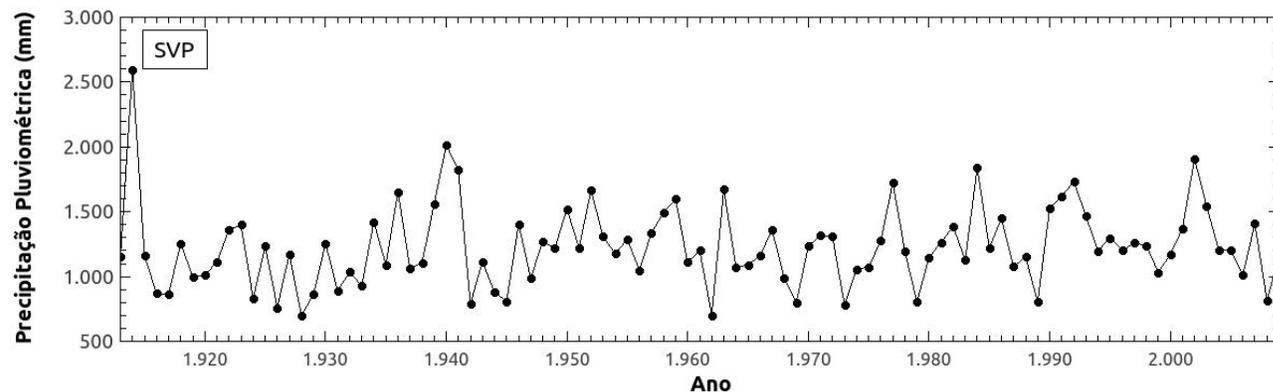


Figura 8: Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Santa Vitoria do Palmar nos anos de 1913 a 2009. Fonte: autora.

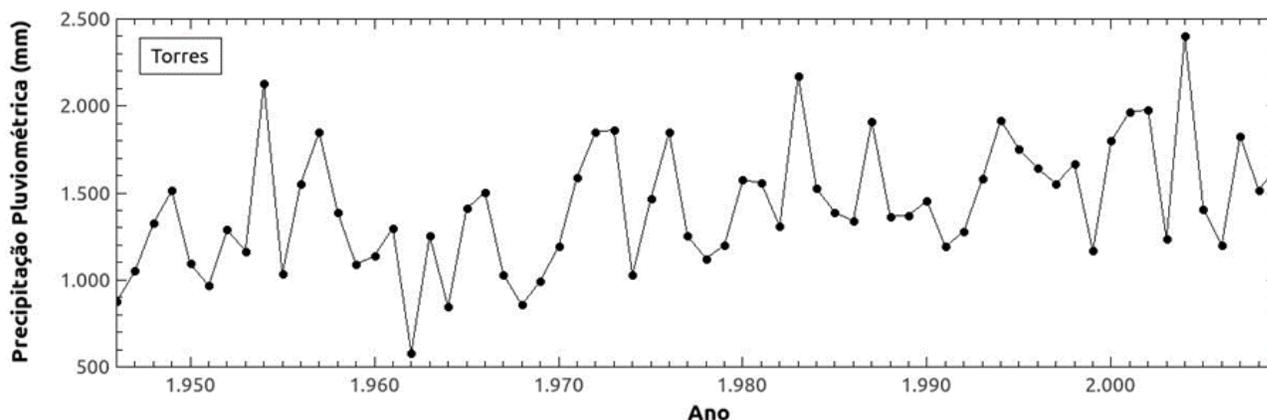


Figura 9: Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) de Torres de 1946 a 2009. Fonte: autora.

Através do método ARIST foram obtidas as periodicidades para a série de total anual de precipitação pluviométrica das estações de POA, RGD, SVP e TOR, como mostra a tabela 2, com as devidas amplitudes.

Estação	Períodos (Amplitude (mm))			
	2 a 7 anos	8 a 15 anos	20 a 23 anos	40 a 80 anos
POA	2.36 (101.7), 3.19 (100.3), 3.56 (116.4), 4.47 (91.0), 6.18 (95.4), 6.72 (96.0)	8.94 (110.0), 11.33 (86.0), 13.86 (39.6)	24.22 (84.4)	70.62 (80.9)
RGD	2.26 (102.9), 3.63 (104.6), 4.41 (102.7), 5.46 (106.9), 6.32 (113.9)	8.78 (126.5), 12.56 (82.4)	22.00 (89.1)	76.17 (80.8)
SVP	2.26 (137.7), 5.17 (118.4), 6.33 (130.6)	8.83 (159.2), 12.9 (101.5)	21.15 (88.2)	42.28 (115.5)
TOR	2.19 (134.3), 2.40 (140.8), 2.94 (138.2), 3.59 (135.2), 5.72 (118.8), 7.63 (129.4)	9.38 (124.2), 14.82 (117.7)	22.94 (134.6)	

Tabela 2: Períodos estatisticamente significante no total anual de precipitação pluviométrica em milimetro para cada estação. Fonte: Autora.



Na tabela, pode-se notar que as maiores amplitudes de cada estação são encontradas nos períodos de dois a oito anos. Sendo elas 116.4mm para POA, 126.5 mm para RGD, 159.2 mm para SVP e 140.8 mm para TOR.

As periodicidades encontradas de 2 a 7 anos normalmente são associadas a fenômenos como *El Niño*. As 8 e 14 anos podem estar relacionadas com a componente principal da variabilidade solar, *ciclos solares de Schwabe*, também é observada a periodicidade de 22 anos, que pode ser associada à variabilidade magnética do Sol, *ciclo de Hale*.

5. CONCLUSÕES

Os primeiros meses foram dedicados a leitura de livros de Introdução a Geofísica Espacial (Kirchhoff, Volker W. J. H., 1991) e Climatologia- Noções Básicas e Climas do Brasil (Francisco Mendonça, Inês Moresco Danni-Oliveira, 2007). Durante a revisão bibliográfica também foi realizada a digitalização de todos os dados meteorológicos obtidos pelo INMET. Conseqüentemente foram calculados os dados dos totais anuais de precipitação.

Os resultados obtidos indicaram uma tendência de aumento do total anual de precipitação ao longo dos anos e no total de chuvas, como pode ser visto nas imagens das figuras 6 e 9, nas quais a tendência não foram retiradas. Foram vistas também a presença de periodicidades geralmente associadas ao El Niño - Oscilação Sul (2 a 7 anos) e aos ciclos solares de Schwabe (~11 anos) e de Hale (~22 anos). Indicando que a variabilidade solar pode estar modulando o clima nas localidades investigadas durante o último século.

Para dar continuidade a este trabalho, serão analisados mais a fundo os dados do número de dias de chuva. Assim como analisar os dados registrados no total de precipitação pluviométrica em 24 horas e utilizaremos a técnica de coerência Wavelet.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, V. R.; GRIMM, A. M.; DOYLE, M. E.: Relationship between temperature and circulation in Southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events, **J. Meteorol. Soc. Japan.**, v. 80-1, p. 33-44, 2002.

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

DORMAN, L. I.: Cosmic rays and space weather: effects on global climate change, **Ann. Geophys.**, 30, 9–19, doi:10.5194/angeo-30-92012, 2012.

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S.; AGRANONIK; C. Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul — 2017. **Porto Alegre: FEE**, 2017.

FRIGO, E. **Variações geomagnéticas, heliomagnéticas e do fluxo de raios cósmicos galácticos: possíveis consequências climáticas na região da América do Sul**. 2013. 142 p. Tese (Doutorado em Geofísica), Universidade de São Paulo (USP), 2013.

FRIGO, E.; ANTONELLI, F.; SILVA, D. S. S.; RAMPELLOTO, P. H.; LIMA, P. C. M.; PACCA, I. I. G.; BAGESTON, J. V.: Effects of solar activity and galactic cosmic ray cycles on the modulation of the annual average temperature at two sites in southern Brazil, **Ann. Geophys.**, v. 36, p. 555-564. <https://doi.org/10.5194/angeo36-555-2018>, 2018.

FRIGO, E.; PACCA, I. G.; PEREIRA FILHO, A. J.; RAMPELLOTO, P. H.; RIGOZO, N. R. Evidence for cosmic rays modulation in temperature records from the South Atlantic Magnetic Anomaly region. **Annales Geophysicae**, v. 31, p. 1833-1841, 2013.

FRÖHLICH, C., Total Solar Irradiance Observations. **Surv. Geophys.**, v. 33, p. 453-473, 201

GRIGORIAN, O. R.; ROMASHOVA, V. V.; PETROV, A. N. SAA drift: Experimental Results, **Adv. Space Res.**, v. 41, p. 76–78, 2008.

JOKIPII, J.R., LEVY, E.H., HUBBARD, W.B., Effects of particle drift on cosmic-ray transport. I. General properties, application to solar modulation. **Astrophys. J.**, v. 213, p. 861- 868, 1977

HOYT, D. V.; SCHATTEN, K. H. **The Role of the Sun in Climate Change**. Oxford University Press, 279 pp., 1997.

KUDELA, K. On energetic particles in space. **Acta Physica Slovaca**, v. 59, n. 5, p. 537-652, 2009.

KIRCHHOFF, V. W. J. A. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: Editora Edusp, 1991.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**, São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.

MIRONOVA, I. A.; APLIN, K. L.; ARNOLD, F.; BAZILEVSKAYA, G. A.; HARRISON, R. G.; KRIVOLUTSKY, A. A.; NICOLL, K. A.; ROZANOV, E.; TURUNEN, E.; USOSKIN, I. G. Energetic Particle Influence on the Earth's Atmosphere, **Space Sci. Rev.**, v. 194, p. 1–96, <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>, 2015.

OTAOLA, J., MENDOZA B., PÉREZ R. El Sol y La Tierra : Una Relación Tormentosa , http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/114/htm/sec_7.htm, 2013.

OKAZAKI, Y., FUSHISHITA, A., NARUMI, T. et al., Drift effects and the cosmic ray density gradient in a solar rotation period: First observation with the Global Muon Detector Network (GMDN). **Astrophys. J.**, v. 681, p. 693-707., 2008

RAMPELOTTO, P.H.; RIGOZO, N.R.; DA ROSA, M.B.; PRESTES, A.; FRIGO, E.; SOUZA ECHER, M.P.; NORDEMANN, D.J.R. Variability of rainfall and temperature (1912-2008) parameters measured from Santa Maria (29°41'S, 53°48'W) and their connections with ENSO and solar activity. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 77, p. 152-160, 2012.

RIGOZO, N.R.; NORDEMANN, D.J.R. Análise por regressão iterativa de periodicidades em series temporais de registros geofísicos. **Rev. Bras. Geofis.**, v. 16, p.149-157.1998.

RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R.; ECHER, E.; VIEIRA, L. E. A.; FARIA, H. H.: Comparative study between four classical spectral analysis methods. **Appl. Math. Comp.**, v. 168, p. 411-430, 2005.

SOLANKI, S. K.; KRIVOVA, N. A.; HAIGH, J. D. Solar Irradiance Variability and Climate, **Annu. Rev. Astron. Astr.**, v. 51, p. 311–351, <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141007>, 2013.

SOUZA ECHER, M.P.; ECHER, E.; NORDEMANN, D.J.R.; RIGOZO, N.R.; PRESTES, A. Wavelet analysis of a centennial (1895-1994) southern Brazil rainfall series (Pelotas, 31°46'19"S 52°20'33"W). **Climatic Change**, v. 87, p. 489-497.2008.

SVENSMARK, H. Cosmoclimatology: a new theory emerges. **News Rev. Astron. Geophys.**, v. 48, p. 1.18–1.24, 2007.

SVENSMARK, H., FRIIS-CHRISTENSEN, E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 59, p.1225-1232, 1997.

TRIVEDI,N.B.; ABDU, M.A.; PATHAN, B.M.; DUTRA, S.L.G.; SCHUCH, N. J.; SANTOS, J. C.; BARRETO, L. M. Amplitude enhancement of SC(H) events in the South Atlantic anomaly region, **J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.**, v. 67, p. 1751–1760, 2005.

Participação em Eventos:

HERDIES, G. R.; Frigo, E.; Coelho, S.M.S.C. “Análise da Influência de Forçantes Geofísicos Sobre o Campo de Precipitação no Estado do Rio Grande do Sul”. In: **VII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia**, 2018, Santa Maria.

HERDIES, G. R.; Caprara , B. B.; Cruz , M. F.; Frigo, E.; Coelho, S.M.S.C. “Solar Signals in Pluviometric Precipitation Data from Extreme Southern Brazil: Preliminary Results”. In **The 27th IUGG General Assembly**, 2019, Montreal.