



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 de Santa Maria (UFSM),
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 2020



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 de Santa Maria (UFSM),
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 2020



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, à 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.....	13
Figura 2 - Representação esquemática das correntes elétricas no núcleo que são capazes de produzir o campo geomagnético	15
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.....	16
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)	17
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 (Sn) e do ciclo solar duplo (Sn22)	18
Figura 6 - Dados de temporais de número de manchas solares (Sn) e do ciclo solar duplo (Sn22) dos anos de	22
Figura 7 - Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) das estações nos anos de 1918 a 2017.....	25
Figura 8 - Totais anuais de números de dias de chuva (dias) das estações de 1918 a 2014...25	25
Figura 9 - Totais anuais de máxima de chuva em 24 horas (mm) das estações nos anos de 1918 a 2009.....	26
Figura 10 - Periodicidades (em anos) presentes nas séries de total anual de precipitação pluviométrica, considerando o limite de confiança de 95%, com as respectivas amplitudes associadas (em milímetros) para cada estação.....	26



LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 11 - Similar a Figura 10, mas considerando as séries de total anual de números de dias de chuva	27
Figura 12 - Similar a Figura 10, mas considerando o total anual de máxima de chuva em 24 horas.....	27
Figura 13 - Espectro de coerência Wavelet entre dados de Sn e total anual de precipitação pluviométrica para POA (A), SVP (B), RG (C), e TO (D), entre Sn e o total anual de números de dia de chuva para POA (E), SVP (F), e TO (G), e entre Sn e o total anual de máxima de chuva em 24 h e a serie temporal Sn para POA (H), SVP (I), e TO (J). Os valores de coerência são indicados por cores. A linha branca indica o cone de influência e as linhas pretas são o limite do nível de confiança de 95%. As setas pretas representam o ângulo de fase entre duas séries temporais.	29
Figura 14 - Semelhante à figura 13, mas considerando o espectro de WTC entre Sn22 e o total anual de precipitação pluviométrica para POA (A), SVP (B), e TO (C), entre Sn22 e o total anual de números de dia de chuva para POA (E), SVP (F), e TO (G), e entre Sn22 e total anual de máxima de chuva em 24 h para POA (H), SVP (I), e TO (J)	31



LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 1 – Detalhe das Séries Temporais de Pluviometria	21
---	----

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
COI	Cone de Influencia
CWT	Continuous Wavelet Transform
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
RG	Rio Grande
RS	Rio Grande do Sul
SVP	Santa Vitória do Palmar
TOR	Torres
UV	Ultravioletas
WTC	Wavelet Coherence
XWT	Cross Wavelet Transform

Resumo

Há várias décadas diversos trabalhos científicos têm sugerido que forçantes geofísicos podem estar contribuindo, de forma direta ou indireta, para as variações climáticas observadas em diversas regiões do planeta. Entre estes forçantes geofísicos, o mais investigado é a atividade solar. No entanto, as variações do campo magnético terrestre também são constantemente propostas como forçantes climáticas indiretas, pois estas, em conjunto com a atividade solar, modulam a quantidade e a energia dos raios cósmicos galácticos que pode atingir a atmosfera terrestre. Tanto a radiação eletromagnética proveniente do Sol quanto o fluxo de raios cósmicos galácticos são, portanto, modulados pelas variações quase periódicas do Sol, caracterizadas principalmente pelo ciclo de manchas solares de 11 anos e pelo ciclo magnético de 22 anos. O principal indício matemático da modulação do clima a partir de forçantes geofísicos é a presença destas periodicidades típicas da variabilidade solar em séries temporais de variáveis meteorológicas. Em épocas da história em que o campo geomagnético foi menos intenso ou em regiões afetadas por anomalias geomagnéticas, os efeitos dos raios cósmicos sobre o clima podem ser então maximizados. Este é o caso do estado do Rio Grande do Sul, que vem sendo afetado pela Anomalia Magnética do Atlântico Sul durante o último século. Considerando que a economia do estado é fortemente dependente da agricultura e, portanto, do clima, é muito importante avaliar se os forçantes geofísicos estão influenciando a precipitação pluviométrica registrada no Rio Grande do Sul durante os últimos ~100 anos. Neste trabalho foram utilizados dados de totais anuais de total de precipitação pluviométrica, número de dias de chuva e de máximo de chuva em 24 horas registrados nas estações meteorológicas de Torres, Porto Alegre, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar. As séries temporais foram analisadas através dos métodos de Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais e de coerência espectral baseada na transformada de wavelets. Periodicidades entre 2 e 7 anos, características do fenômeno El Niño - Oscilação Sul, foram detectadas em todas as séries de todas as estações. As periodicidades típicas da atividade solar, em escala decadal e bidecadal, foram detectadas na maioria das séries



temporais da maioria das estações. A análise de coerência espectral revelou que o sinal solar é, geralmente, intermitente nas séries de dados meteorológicos. Os resultados deste trabalho indicam que os forçantes geofísicos podem ter contribuído para a modulação da precipitação pluviométrica na região litorânea do Rio Grande do Sul durante o último século.



SUMÁRIO	Pág.
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Variabilidade solar durante os últimos séculos	13
2.2 O campo geomagnético e a Anomalia Magnética do Atlântico Sul	14
2.3 Modulação solar e geomagnética dos raios cósmicos galácticos	16
2.4 Mecanismos físicos variabilidade solar – clima terrestre	19
3 DADOS E MÉTODOS.....	21
3.1 Materiais	21
3.2 Métodos	22
4 RESULTADOS	25
5 CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33



1. INTRODUÇÃO

Diferente da maior parte dos estados do Brasil, o Rio Grande do Sul (RS) se localiza totalmente na Zona Temperada. Esta região possui uma característica muito peculiar, visto que existe uma regularidade na distribuição das chuvas e há uma acentuada diferença de temperatura 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). O clima da região sul do Brasil sofre também uma 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 consequência da influência destes 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).

Além disso, o estado está localizado na região onde são observados os menores valores de intensidade total do campo geomagnético em todas a superfície da Terra, região está denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Atualmente, esta anomalia cobre parte do Atlântico Sul, o sul da América do Sul e parte do Pacífico Sul, sendo o seu centro localizado no território do Paraguai. A AMAS funciona como uma janela que facilita a entrada de partículas eletricamente carregadas, provenientes do espaço, até regiões mais baixas da atmosfera terrestre. Entre estas partículas extraterrestres estão os raios cósmicos galácticos (RCG), cuja penetração na atmosfera terrestre é modulada pelos campos magnéticos da Terra e do Sol, e têm sido sugeridos por vários autores como gatilho para mecanismos que podem influenciar no clima terrestre. Em regiões onde a barreira geomagnética é menos efetiva, como é o caso da região da AMAS, os efeitos das partículas eletricamente carregadas na atmosfera terrestre tendem a ser intensificados (Frigo, 2013).

Em trabalhos anteriores, baseados em análise espectral de séries temporais longas de temperatura e precipitação pluviométrica registradas no RS, foram detectadas variações cíclicas com periodicidades características desde interanual até multidecadal (p. ex. Souza Echer et al., 2008; Rampelotto et al., 2012; Frigo et al., 2013; Frigo et al., 2018). As

periodicidades mais curtas, entre 2 e 7 anos, foram atribuídas ao fenômeno ENOS. As periodicidades de aproximadamente 11 e aproximadamente 22 anos foram associadas aos ciclos solares de Schwabe (~11anos) e de Hale (~22 anos). Estes resultados indicam que a variabilidade solar pode estar contribuindo para a modulação climática no RS, nas escalas temporais decadal e bidecadal, durante o último século.

Para explicar a presença de periodicidades típicas da variabilidade solar em dados climáticos são propostos mecanismos físicos que envolvem relações diretas e indiretas. Um dos mais investigados, entre os mecanismos indiretos, é aquele que relaciona a variabilidade dos RCG com a cobertura de nuvens. Com base neste mecanismo, o aumento na ionização produzida pelos RCG durante os mínimos de intensidade magnética solar, funciona como gatilho para um mecanismo que resulta no aumento da cobertura de nuvens baixas, o que implicaria na diminuição da temperatura na superfície terrestre (Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Svensmark, 2007).

1.1 Objetivo

Objetivo deste trabalho é investigar a influência de forçantes geofísicos (campo geomagnético, variabilidade solar e raios cósmicos galácticos) sobre a precipitação pluviométrica em diferentes latitudes da região litorânea RS.

2. 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 às 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.

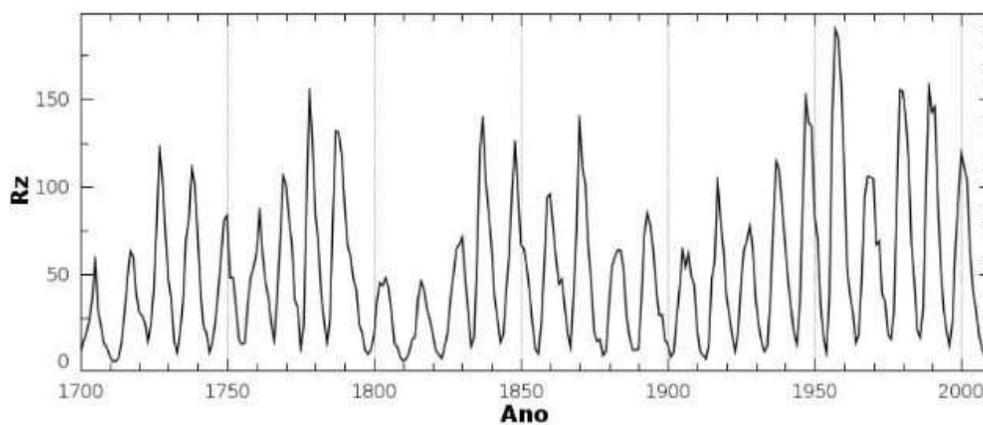


Figura 1: Número de manchas solares (Rz) entre 1700 AD e 2000 AD. Fonte: FRIGO, 2013

A análise espectral da série temporal do número de manchas solares permite a identificação de uma ciclicidade principal, de aproximadamente 11 anos. Durante este ciclo, o número de manchas solares vai 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.

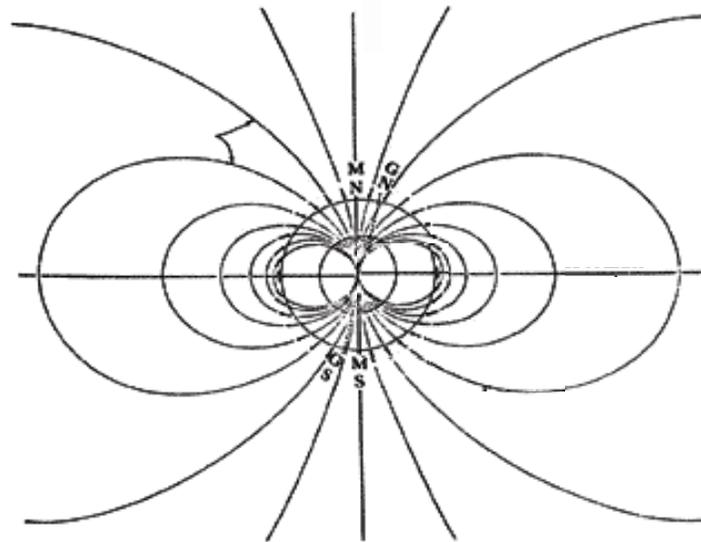


Figura 2 - Representação esquemática das correntes elétricas no núcleo que são capazes de produzir o campo geomagnético. Fonte: Otaola, 2013.

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 (Hartmann & Pacca, 2009).

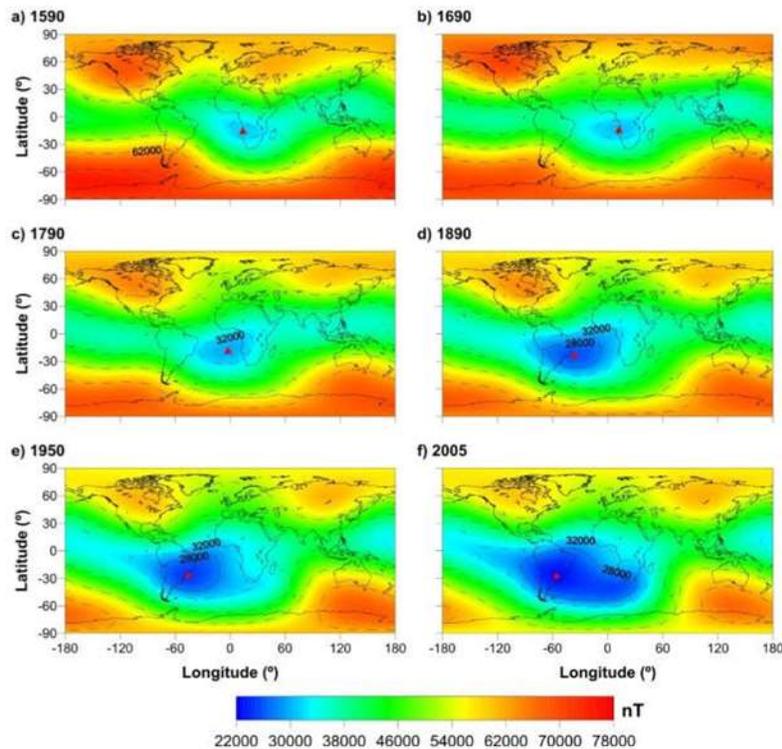


Figura 3: Evolução temporal da AMAS entre 1590 e 2005. O triângulo vermelho representa a posição do centro da AMAS. As isolinhas de 28000 e 32000 nT também estão apresentadas. Fonte: Hartmann & Pacca (2009).

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 durante o último século.

2.3 Modulação solar e geomagnética dos raios cósmicos galácticos

Os RCG são partículas energéticas originadas no espaço, que em sua maioria possuem carga elétrica positiva (prótons). Para chegar até a atmosfera da Terra eles precisam transpor as barreiras magnéticas impostas pelo Sol (heliosfera) e pela Terra (magnetosfera), conforme ilustrado Figura 4.

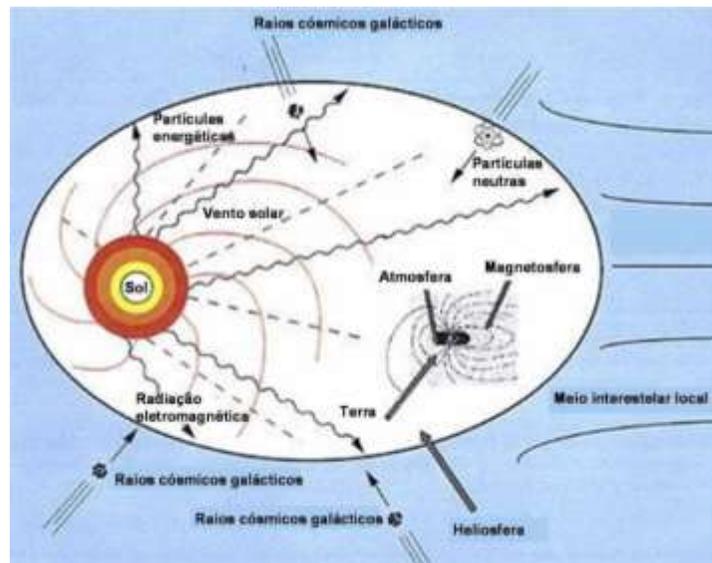


Figura 4: Ilustração, fora de escala, mostra como se dá a modulação dos RCG pelos campos magnéticos da Terra e do Sol. Fonte: (Adaptação de umbra.nascom.nasa.gov/)

A variabilidade dos RCG pode ser inferida a partir do valor médio anual do número de nêutrons detectados em observatórios na Terra, uma vez que estes nêutrons são produzidos na interação dos raios cósmicos primários com os constituintes atmosféricos. A variação na quantidade de nêutrons detectados nos observatórios de Huancayo (Peru) e Climax (Estados Unidos) ao longo do último século está apresentada na Figura 5. É possível notar que, durante as transições dos ciclos solares ímpares para os pares, a curva da contagem de nêutrons apresenta um formato triangular. Por outro lado, durante as transições dos ciclos solares pares para os ímpares, a forma da curva assemelha a um quadrado. Estes formatos característicos se devem ao efeito da modulação dos prótons (RCG) em diferentes configurações de polaridade magnética 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). Isto se deve à configuração do vetor campo geomagnético, que é vertical nos polos e horizontal no equador.

Ainda, na Figura 5, estão apresentados o número médio anual de manchas solares em termos do índice Rz (Hoyt & Schatten, 1997), que mostra claramente o ciclo solar de 11 anos (Figura 5c). Nesta figura também estão indicados o número do ciclo solar, sendo o primeiro (número 1) iniciado em 1755, e o estado de polaridade magnética do Sol. A intensidade do campo magnético do Sol e a irradiância solar seguem a mesma característica de evolução temporal apresentada pelo número de manchas solares, independente da polaridade magnética do Sol (Fröhlich, 2012). Na Figura 5d está representado ciclo de Hale, indicado como Rz22, obtido a partir da multiplicação do número de manchas solares dos ciclos solares ímpares por -1.

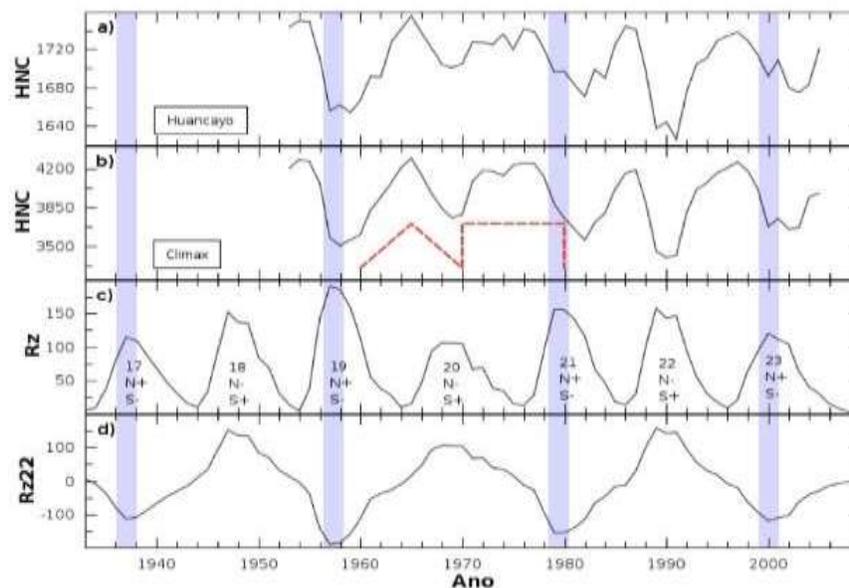


Figura 5: Séries temporais das médias anuais das contagens horárias de nêutrons (HNC) registradas nos observatórios de Huancayo e Climax, do número de manchas solares (S_n) e do ciclo solar duplo (S_n22). Fonte: FRIGO 2013.

A análise conjunta das séries temporais apresentadas na Figura 5 permite observar que os valores máximos de nêutrons (RCG) coincidem os valores mínimos de manchas solares (intensidade do campo magnético do Sol e da irradiância solar). Além disso, podemos verificar visualmente que a variabilidade temporal dos RCG apresenta uma componente principal com periodicidade de ~11 anos, que também é característica da irradiância solar. Adicionalmente, verificamos a presença de uma componente secundária, com periodicidade

de ~22 anos, que, por sua vez, não é tão significativa nos dados de irradiância solar (Fröhlich, 2012).

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 relacionado 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.



3. 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 meteorológicas de Porto Alegre (POA), Rio Grande (RG), Santa Vitoria do Palmar (SVP) e Torres (TOR) foram obtidos por fotografias das páginas dos livros correspondentes aos relatórios anuais no arquivo geral do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em Porto Alegre (RS). A Tabela 1 estão apresentados os detalhes das séries temporais analisadas.

Identificador	Cidade	Localização	Altitude	Período
POA	Porto Alegre	30,1°S; 51,2°W	10 m	1918 – 2017
RG	Rio Grande	32,2°S; 52,5°W	5 m	1918 – 2014
SVP	Santa Vitoria do Palmar	33,3°S; 53,2°W	23 m	1918 – 2017
TOR	Torres	29,2°S; 49,4°W	16 m	1946 – 2017

Tabela 1: Detalhes das series temporais.

Foram utilizados também os dados de serie temporais de número de manchas solares (Sn) e do ciclo solar duplo (Sn22), (Figura 6), referente a versão 2.0 (Clette et al., 2016, Clette and Lefèvre, 2016)

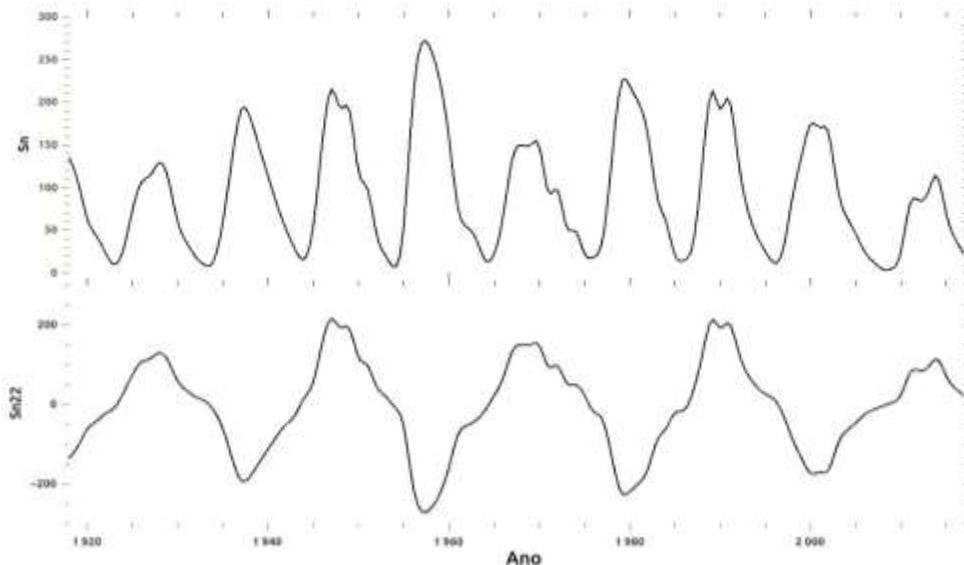


Figura 6: Dados de temporais de número de manchas solares (S_n) e do ciclo solar duplo (S_{n22}) dos anos de 1918 a 2017. Fonte: Autora.

3.2 Métodos

A partir dos dados mensais de precipitação, números de dias de chuva e máxima de chuva em 24 horas, foram calculados os totais anuais para cada estação. Como não obtivemos os dados de números de dias de chuva e máxima de chuva em 24 horas da estação RG, estão não serão analisados. Os valores são representados graficamente, permitindo a visualização de máximos e mínimos e de eventuais tendências de longo período. Posteriormente, visando a identificação de padrões cíclicos nas séries temporais, principalmente aqueles associados com a atividade solar e os RCG, foi utilizada uma técnica de análise espectral clássica.

A técnica escolhida foi a Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais, que já foi bastante utilizada no estudo de dados climáticos e de dados geofísicos no Brasil. Esta técnica consiste em ajustar os dados observacionais (Y_k), correspondentes 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 Colet 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 ARIST. Esta técnica permite também discriminar as periodicidades detectadas considerando o limite de confiança de 95%. Os resultados obtidos são então representados em forma de gráficos, que mostram as periodicidades detectadas e suas amplitudes associadas. Neste formato, é possível ter um panorama mais geral acerca da presença dos sinais da atividade solar nos dados investigados.

A outra técnica aplicada foi a coerência espectral baseada na transformada de Wavelet (Wavelet Coherence - WTC). A WTC, $R_n^2(s)$, é calculada a partir do espectro contínuo (CWT) e cruzado (XWT) de duas séries temporais, conforme definida por Grinsted et al. (2004), pode ser escrita como:

$$R_n^2 = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)}, \quad (\text{Eq. 2}),$$

onde $W_n^X(s)$ e $W_n^Y(s)$ são as WTCs das duas séries temporais x_n e y_n , $W_n^{XY}(s)$ é o espectro cruzado e S é um operador de suavização. Os valores de $R_n^2(s)$ são normalizados em relação

aos espectros individuais, $W_n^X(s) v^2$ e $W_n^Y(s) v^2$, e variam entre 0 (ausência de correlação) e 1 (correlação máxima).

A representação gráfica do espectro de WTC fornece o cone de influência, abaixo do qual os efeitos de borda não podem ser descartados. O WTC fornece também o nível de significância de 95% e os ângulos relativos da fase, indicados por setas. Estes ângulos (setas) fornecem indicações sobre a linearidade da correlação entre as duas séries temporais analisadas. Se as setas apontam horizontalmente para a esquerda ou horizontalmente para a direita (ângulos de fase de 0° ou de 180°), a relação entre as duas séries analisadas é linear. As demais configurações de ângulo de fase indicam que a relação é não linear.

4. RESULTADOS

A partir os dados coletados no arquivo geral do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram construídas as séries temporais dos totais anuais de precipitação pluviométrica das estações POA, RGD, SVP e TOR (Figura 7), dos totais anuais números de dias de chuva das estações em POA, SVP e TOR (Figura 8) e dos totais anuais de máxima de chuva em 24 horas em POA, SVP e TOR (Figura 9).

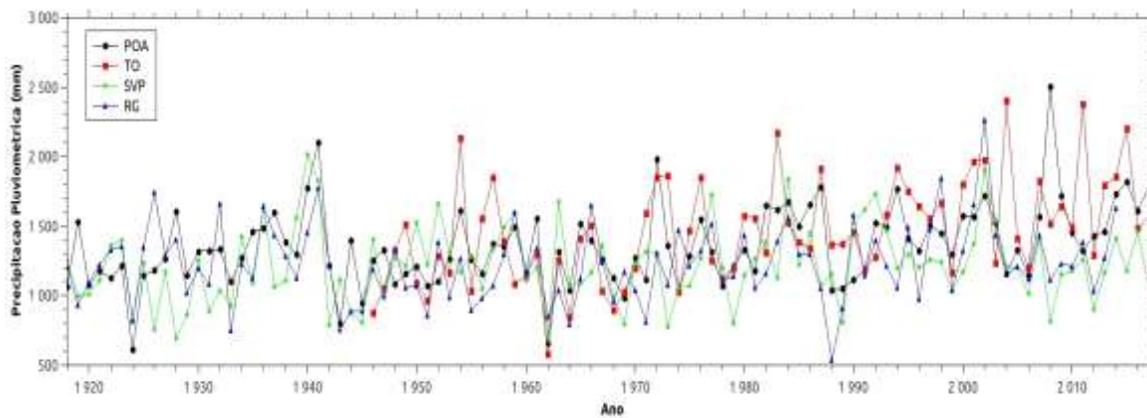


Figura 7: Totais anuais de precipitação pluviométrica (mm) das estações nos anos de 1918 a 2017. Fonte: Autora.

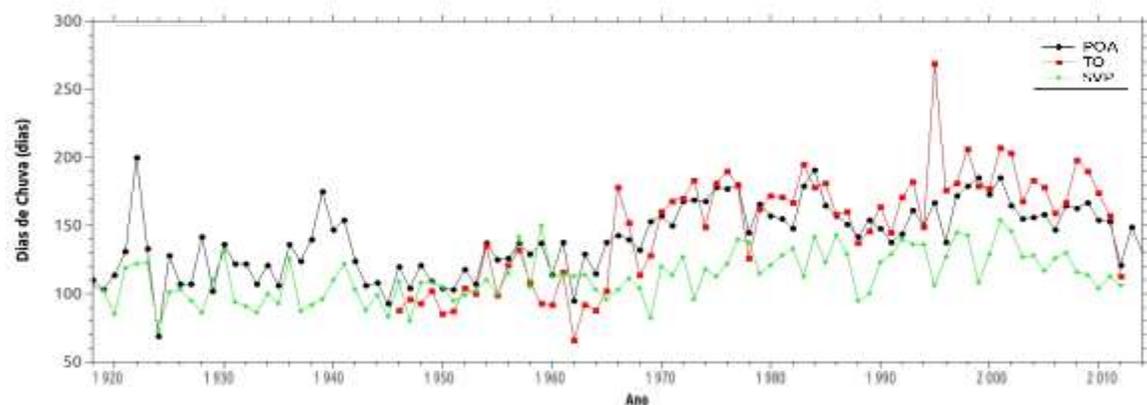


Figura 8: Totais anuais de números de dias de chuva (dias) das estações de 1918 a 2014. Fonte: Autora

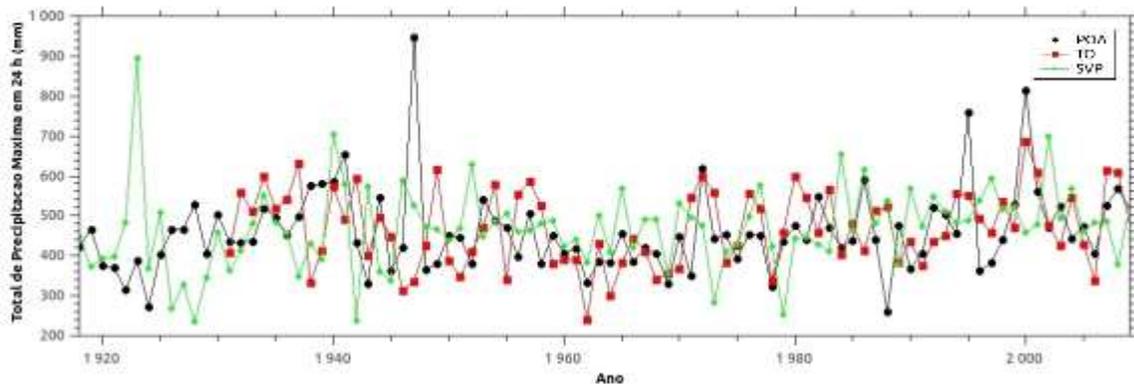


Figura 9: Totais anuais de máxima de chuva em 24 horas (mm) das estações nos anos de 1918 a 2009. Fonte: Autora.

Através da técnica ARIST foram calculadas as periodicidades presentes nas séries de total anual de precipitação pluviométrica das estações de POA, RG, SVP e TO (Figura 10), com as respectivas amplitudes associadas. Com a mesma técnica, foram obtidas as periodicidades para as series de total anual de dias de chuva (Figura 11) e precipitação máxima em 24 horas (Figura 12) das estações de POA, SVP e TO.

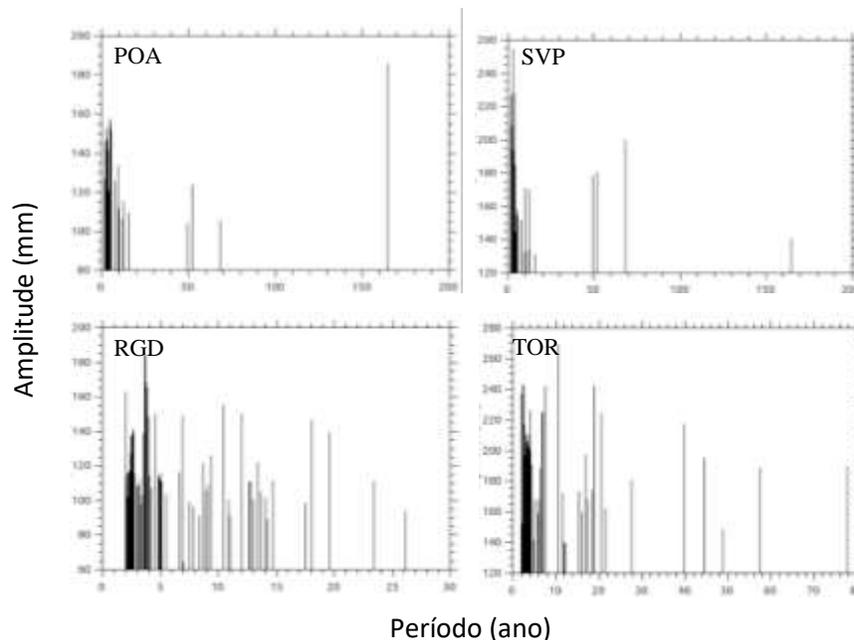


Figura 10: Periodicidades (em anos) presentes nas séries de total anual de precipitação pluviométrica, considerando o limite de confiança de 95%, com as respectivas amplitudes associadas (em milímetros) para cada estação. Fonte: Autora.

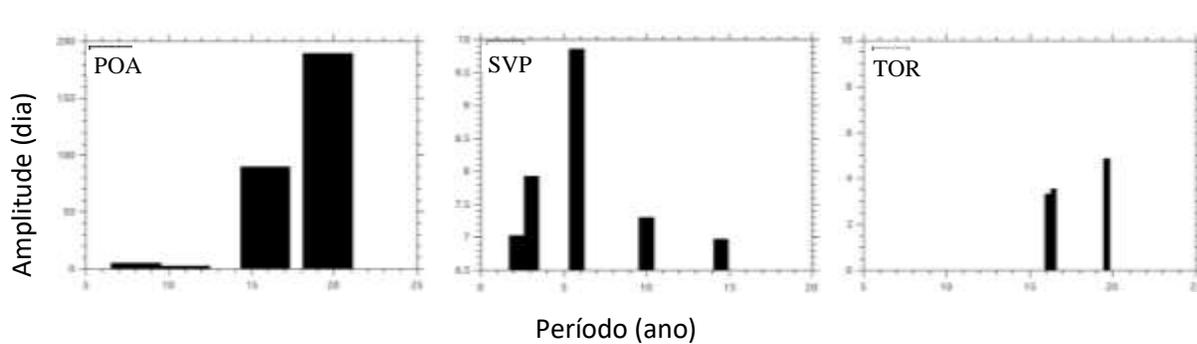


Figura 11: Similar a Figura 10, mas considerando as séries de total anual de números de dias de chuva. Fonte: Autor

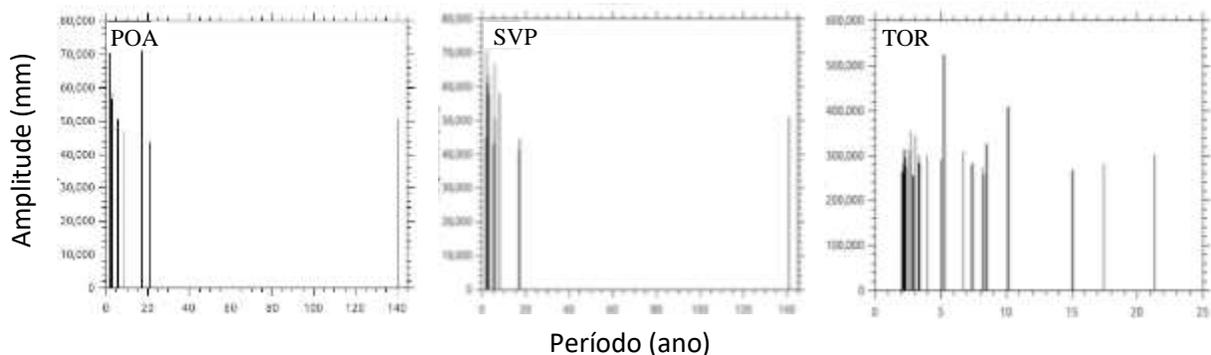


Figura 12: Similar a Figura 10, mas considerando o total anual de máxima de chuva em 24 horas. Fonte: Autora

Pode-se notar, de maneira geral, que as periodicidades associadas as maiores amplitudes em cada estação estão entre 2 e 7 anos. Esta faixa de periodicidades pode ser associada ao fenômeno ENOS. Adicionalmente, verifica-se também a presença de periodicidades nas escalas decadal e bidecadal, que, por sua vez, são comumente associadas aos ciclos solares de Schwabe e de Hale.

A investigação da continuidade ou intermitência da correlação entre atividade solar (RCG) e precipitação pluviométrica é estudada através da análise de WTC. Os espectros de WTC entre as series de Sn e Sn22 com as séries de precipitação pluviométrica estão apresentadas nas figuras 13 e 14, respectivamente.

Os maiores valores de coerência entre Sn e o total anual de precipitação (Figs 13A, 13B, 13C e 13D), para periodicidades próximas de 11 anos, são observados para a estação POA entre o início da série e ~1940 e, entre 1975 e o final da série. Em SVP, a coerência é alta entre ~1940 e ~1960 e após 1985. Em RGD, a coerência é alta entre 1940 e 1960. Já para



a estação TOR, os valores mais altos de coerência ocorrem antes de 1965 e entre 1975 e 2000. Os ângulos de fase, para estas épocas de coerência alta, indicam que a relação entre S_n e total anual de precipitação é não linear.

Para a coerência entre S_n e o total anual de números de dias de chuva (fig 13E, 13F e 13G) os maiores valores encontrados para periodicidades próximas de 11 anos são na estação TOR, entre o início da série e ~1940 e, entre ~1990 a 2000. Em SVP, a coerência é alta entre ~1950 a ~1960. Já para POA, os valores mais altos são observados entre o início da série e ~1930.

Ao analisar a coerência entre S_n e o total anual de máximo de chuva em 24h (fig 13H, 13I e 13J) o maior valor encontrado, para periodicidades próximas de 11 anos, são observados para a estação de POA, de forma semelhante as outras coerências feitas, estão entre o início da série e ~1940. Em SVP, a coerência é alta entre o início da série e ~1920. Para a estação de TOR a coerência alta pode ser observada no início da série e ~1950.

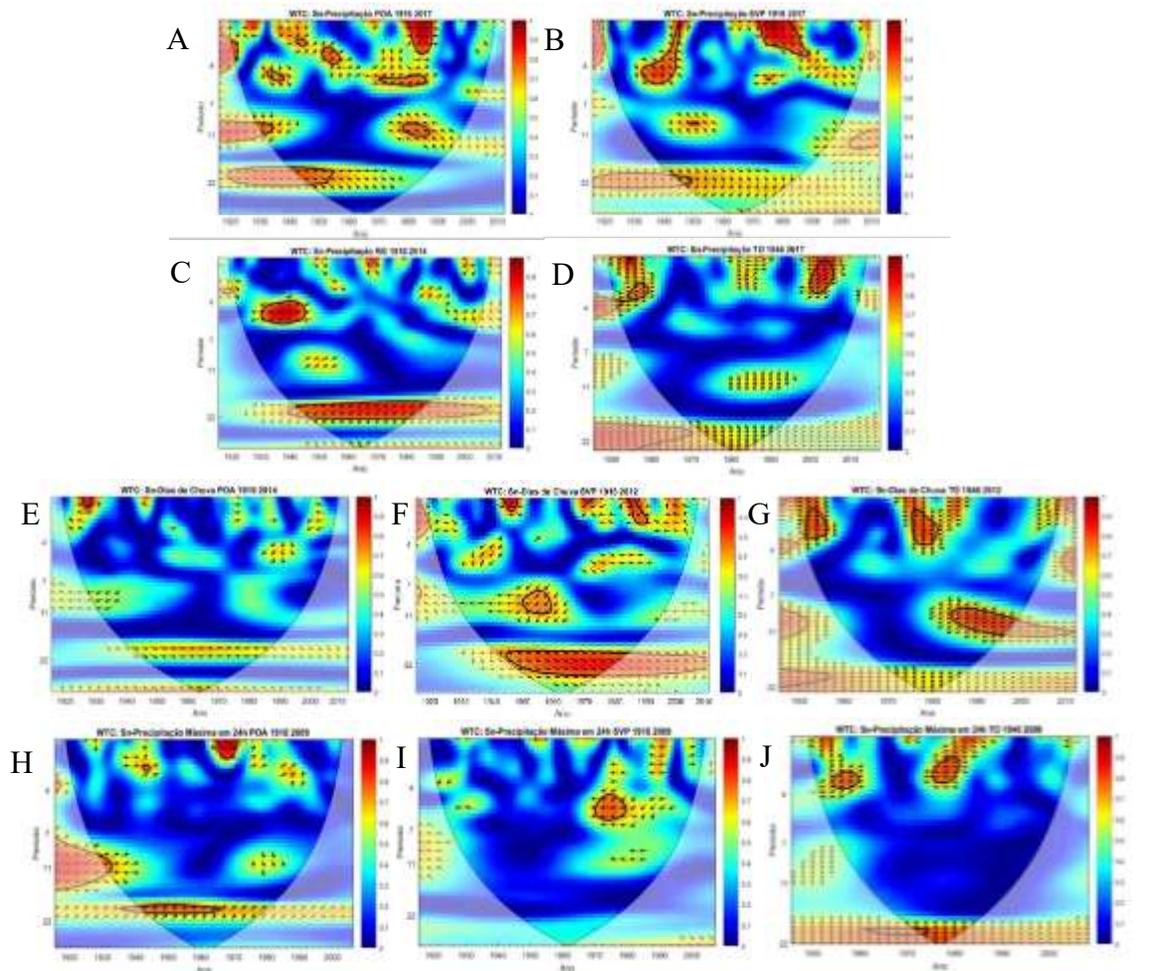


Figura 13: Espectro de coerência Wavelet entre dados de Sn e total anual de precipitação pluviométrica para POA (A), SVP (B), RG (C), e TO (D), entre Sn e o total anual de números de dia de chuva para POA (E), SVP (F), e TO (G), e entre Sn e o total anual de máxima de chuva em 24 h e a serie temporal Sn para POA (H), SVP (I), e TO (J). Os valores de coerência são indicados por cores. A linha branca indica o cone de influência e as linhas pretas são o limite do nível de confiança de 95%. As setas pretas representam o ângulo de fase entre duas séries temporais. Fonte: Autora.



Os valores de coerência entre S_{n22} e o total anual de precipitação (Figs 14A, 14B, 14C e 14D), para periodicidades próximas de 22 anos, são altos durante praticamente todo o período investigado e em todas as estações. São observados valores baixos de coerência apenas após ~1990 para POA, após ~1995 para SVP e antes de 1925 para RGD. Os ângulos de fase, para as épocas de coerência alta, indicam que a relação entre S_{n22} e total anual de precipitação é não linear.

Para a coerência entre S_{22n} e o total anual de números de dias de chuva (fig 14E, 14F e 14G) os valores são altos durante praticamente todo o período investigado e em todas as estações para periodicidades próximas de 22 anos. Os maiores valores encontrados são observados na estação SVP, entre ~1950 e o final da série, e os mais baixos entre o início da série e ~1940. Em TOR a coerência é alta entre o início e a final série. Já para POA, os valores mais altos são observados entre o ~1980 da série e ~2000, sendo mais baixo entre

Ao analisar a coerência entre S_{n22} e o total anual de máximo de chuva em 24h (fig 14H, 14I e 14J) observa-se que SVP não há indícios de periodicidade próximas de 22 anos. O maior valor encontrado, são observados para a estação de TOR, de forma semelhante as outras coerências feitas, os valores são altos durante todo o período investigado. Em POA, os valores são mais altos entre ~1940 e ~1950, após ~1990 até o final da série.

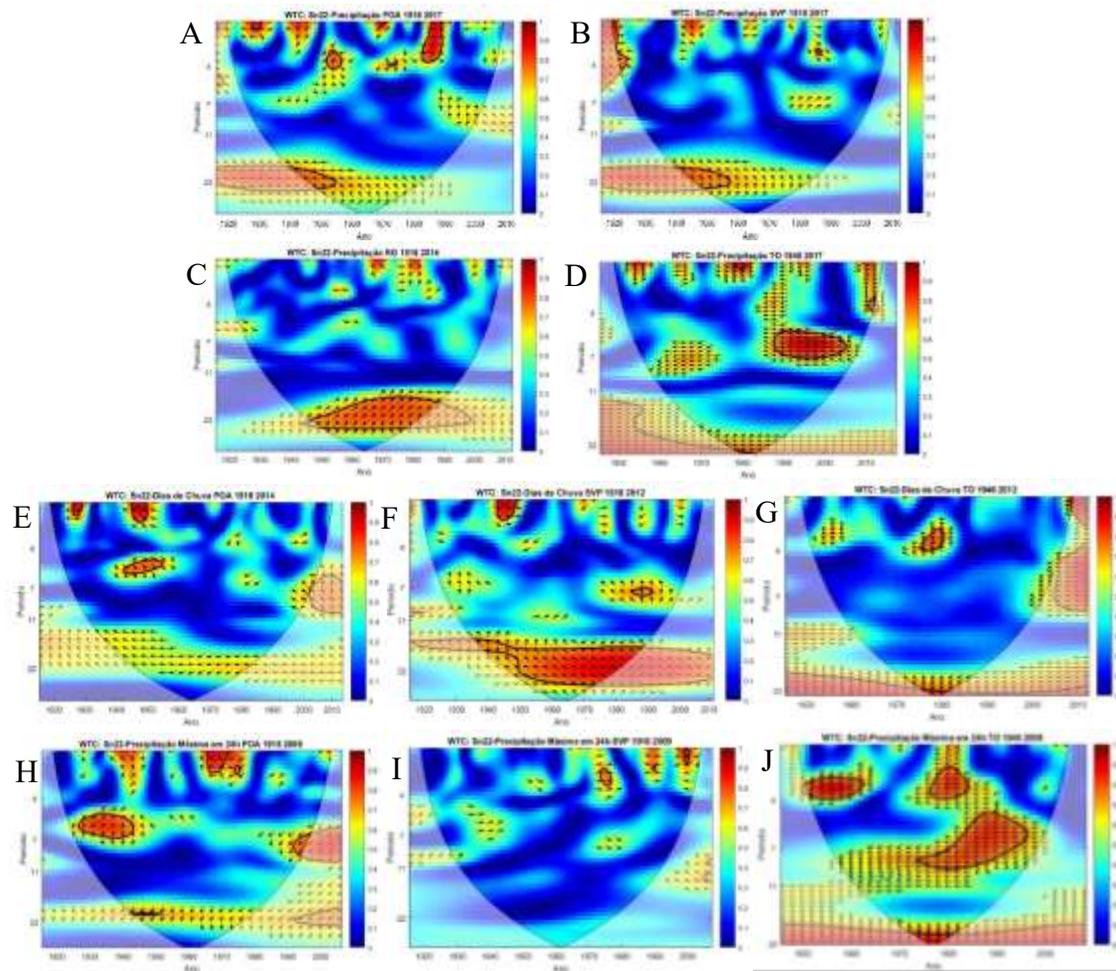


Figura 14: Semelhante à figura 13, mas considerando o espectro de WTC entre Sn22 e o total anual de precipitação pluviométrica para POA (A), SVP (B), e TOR (C), entre Sn22 e o total anual de números de dia de chuva para POA (E), SVP (F), e TOR (G), e entre Sn22 e total anual de máxima de chuva em 24 h para POA (H), SVP (I), e TOR (J). Fonte: Autora



5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar a influência de forçantes geofísicos (campo geomagnético, variabilidade solar e raios cósmicos galácticos) sobre o clima no estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados de totais anuais de precipitação, números de dias de chuva e máxima de chuva em 24 horas, horas, registrados em estações meteorológicas localizadas na região litorânea no estado do Rio Grande do Sul do RS durante o último século. Estes dados foram analisados utilizando a técnica de análise espectral clássica (ARIST) e a técnica da análise de coerência espectral baseada na transformada de wavelet (WTC).

Os resultados obtidos indicam que periodicidades típicas do fenômeno ENOS (ciclos de 2 a 7 anos), e da atividade solar (ciclos de ~11 e ~22 anos estão presentes nas séries temporais analisadas. Entre os ciclos atribuídos a variabilidade solar, a coerência espectral é mais alta e contínua para periodicidades próximas a 22 anos, característica dos RCG e não tão proeminente na irradiância solar. Estes resultados fornecem um indício matemático de que a variabilidade solar, de forma indireta e através de um mecanismo físico não linear ligado aos RCG, contribuiu para a modulação do clima da região litorânea do RS durante o último século. Os efeitos da modulação climática pelos RCG nesta região podem ter sido amplificados em decorrência da AMAS.



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.

CLETTE, F., CLIVER, E., LEFÈVRE, L., SVALGAARD, L., VAQUERO, J., LEIBACHER J. Preface to topical issue: recalibration of the sunspot number. **Sol. Phys.**, 219 (2016), pp. 2479-2486

CLETTE, F., LEFÈVRE, L., The new sunspot number: assembling all corrections. **Sol. Phys.**, 291 (2016), pp. 2629-2651

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-30-9-2012, 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, 2011



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

GRINSTED, A., MOORE, J. C., JEVREJEVA, S.: **Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series**, *Nonlin. Processes Geophys.*, 11, 561–566, <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>, 2004

Hartmann, G. A., and Pacca, I. G.: Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Ann. Brazilian Acad. Sciences*, 81(2), 243-255, 2009.

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** , 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.