

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FRANCESCO ANTONELLI

**AVALIAÇÃO DA POSSÍVEL INFLUÊNCIA DE FORÇANTES GEOFÍSICOS SOBRE
A VARIABILIDADE DA TEMPERATURA NA REGIÃO LITORÂNEA DO RIO
GRANDE DO SUL NO ÚLTIMO SÉCULO**

**CAÇAPAVA DO SUL
2016**

FRANCESCO ANTONELLI

**AVALIAÇÃO DA POSSÍVEL INFLUÊNCIA DE FORÇANTES GEOFÍSICOS SOBRE
A VARIABILIDADE DA TEMPERATURA NA REGIÃO LITORÂNEA DO RIO
GRANDE DO SUL NO ÚLTIMO SÉCULO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Éverton Frigo

**CAÇAPAVA DO SUL
2016**

Cutter Antonelli, Francesco

Avaliação da possível influência de forçantes geofísicos sobre a variabilidade da temperatura na região litorânea do Rio Grande do Sul no último século.

68 Páginas, tamanho 30 cm.

Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava do Sul, 08 de Dezembro de 2016.

Orientador: Éverton Frigo

1. Mudanças climáticas.
2. Atividade Solar.
3. Raios cósmicos galácticos.
4. Anomalia Magnética do Atlântico Sul.
5. Temperatura do Rio Grande do Sul.

Gostaria de agradecer à Unipampa pelo espaço e meios disponibilizados para estudo durante a graduação, aos professores e funcionários da Universidade pelo carinho, e em especial ao Professor Éverton Frigo pelo conhecimento passado ao longo deste trabalho. Agradeço também ao INMET por disponibilizar os dados climáticos utilizados.

Também quero expor minha total gratidão à minha mãe Celina, por me apoiar ao longo de todo o curso e pelos ensinamentos na minha formação como pessoa, e à minha namorada Camila pela paciência e companheirismo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Temperaturas médias anuais do Estado do Rio Grande do Sul.....	4
Figura 2 - Deslocamento e evolução temporal da AMAS de 1590 a 2005.....	7
Figura 3 - Arranjo de telescópios captadores de radiação altamente energética localizados no Observatório Fred Lawrence Whipple no Arizona.....	9
Figura 4 - Movimento de partículas carregadas pra diferentes regiões do CMT.....	10
Figura 5 - Mapa das rigidezes de corte vertical magnética (em GV) da Terra.....	11
Figura 6 - Mapa global mostrando as isolinhas de variação da rigidez magnética de corte vertical entre 1950 e 2000.....	12
Figura 7 - O diagrama esquemático, fora de escala espacial, mostra o mecanismo de entrada dos RCG no Sistema Solar.....	13
Figura 8 - A figura mostra fontes de radiação ionizantes no espaço interplanetário.....	13
Figura 9 - Registro das séries temporais das médias anuais das contagens horárias de nêutrons (HNC) nos observatórios de Huancayo (a) e Climax (b). Em (c) e (d) estão o número de manchas solares (Rz) e o ciclo solar duplo (Rz22), respectivamente.....	14
Figura 10 – Representação do efeito de espalhamento das partículas incidentes quando atingem moléculas de ar "chuveiro cósmico".....	16
Figura 11 – Figura representativa dos fenômenos envolvidos entre a entrada dos RCG com a diminuição de temperatura.....	17
Figura 12 - A imagem expressa diferentes comportamentos da radiação solar nos processos atmosféricos e de superfície.....	18
Figura 13 – Localização das estações meteorológicas (quadrados azuis) que tiveram os dados fornecidos pelo INMET: Torres (TO), Porto Alegre (PA) e Santa Vitória do Palmar (SV).....	19
Figura 14 – Série referente aos dados de temperatura mínima das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1930 e 2014.....	20
Figura 15 – Série referente aos dados de temperatura máxima das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1930 e 2014.....	21
Figura 16 – Série referente aos dados de temperatura média das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1930 e 2014.....	21

Figura 17 – Série referente aos dados de amplitude térmica das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1930 e 2014.....	22
Figura 18 – Exemplo do resultado ARIST para a série de Tmax em TOR.....	24
Figura 19 – Exemplo do resultado da WTC para série de Rz com Tmed em POA.....	27
Figura 20 - Séries temporais das temperaturas máximas anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP.....	28
Figura 21 - Séries temporais das temperaturas mínimas anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP.....	28
Figura 22 - Séries temporais das temperaturas médias anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP.....	29
Figura 23 - Séries temporais das amplitudes térmicas anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP.....	29
Figura 24 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Tmax pela análise ARIST.....	33
Figura 25 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Tmin pela análise ARIST.....	34
Figura 26 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Tmed pela análise ARIST.....	35
Figura 27 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Amp pela análise ARIST.....	36
Figura 28 – Coerência entre Tmax e Rz (a) e Tmax e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.....	41
Figura 29 – Coerência entre Tmin e Rz (a) e Tmax e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.....	42
Figura 30 – Coerência entre Tmed e Rz (a) e Tmax e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.....	43
Figura 31 – Coerência entre Amp e Rz (a) e Tmax e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMAS – Anomalia Magnética do Atlântico Sul
Amp – Amplitude térmica
AS – Atividade Solar
ARIST – Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais
CLOUD - *Cosmics Leaving Outdoor Droplets*
CERN - *European Organization for Nuclear Research*
CMS - Campo Magnético Solar
CMT Campo Magnético Terrestre
CWT – *Continuous Wavelet Transform*
DISME – Distrito de Meteorologia
DTU - *Danish National Space Institute*
ENSO – El Niño – Oscilação Sul
ICMS – Inversão do Campo Magnético do Sol
IGRF – *International Geomagnetic Reference Field*
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*
POA – Porto Alegre
RCG – Raios Cósmicos Galácticos
RS - Rio Grande do Sul
Rz – Séries temporais do número de manchas solares
Rz22 – Número de manchas solares multiplicado por -1 em ciclos ímpares
ST – Série(s) Tempora(l)is
TFJ - Transformada de Fourier Janelada
SOI – *Southern Oscillation Index*
SVP – Santa Vitória do Palmar
Tmax – Temperatura máxima
Tmed – Temperatura média
Tmin – Temperatura mínima
TOR - Torres
WTC – *Wavelet Coherence*
XWT – *Cross Wavelet Transform*

RESUMO

Este trabalho investiga a influência dos raios cósmicos galácticos (RCG) e da atividade solar (AS) sobre a variabilidade da temperatura média anual, registrada em três estações meteorológicas localizadas nas proximidades do litoral do estado do Rio Grande do Sul, no período entre 1931 e 2014. A área de estudo foi escolhida considerando que a mesma apresenta baixa intensidade de campo geomagnético em decorrência da influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) durante o último século, o que pode tornar possíveis efeitos associados aos RCG mais significativos na região. Além do campo geomagnético, esses raios cósmicos são modulados pelo campo magnético do Sol, mais especificamente pelos ciclos de atividade solar de aproximadamente 11 anos e pelo ciclo magnético solar de 22 anos. Como consequência das modulações solar e geomagnética, regiões com campo geomagnético menos intenso são caracterizadas por um maior fluxo de RCG que, por sua vez, em decorrência da modulação solar apresentam variações periódicas decadais similares às periodicidades dos ciclos solares. Resultados da análise espectral clássica utilizando o método de Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) e da Análise de Coerência espectral baseada na Transformada de Ondaleta (WTC) revelaram a presença de sinais típicos dos RCG nos dados climáticos, através de ciclos de 11 e 22 anos. Este resultado é um indicativo de que parcela das variações de temperatura no litoral do RS pode estar atribuída aos forçantes geofísicos.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. atividade solar. raios cósmicos galácticos. anomalia magnética do atlântico sul. temperatura do Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

The goal of this work is to investigate the influence of galactic cosmic rays (RCG) and the solar activity on the annual average temperature variability registered in three weather stations, covering the period between 1931 and 2014 along the coast of the Rio Grande do Sul (RS) State. The study area was chosen considering the lower intensity of geomagnetic field resulting of the influence of the South Atlantic Magnetic Anomaly (AMAS) during the last century, which can make possible effects associated to the RCG more significant on this region. Besides the geomagnetic field, RCG are modulated by the Sun's magnetic field, more specifically by solar activity/magnetic cycles of ~11 and ~22 years. As a result of solar and geomagnetic modulation, regions with low geomagnetic field intensity are characterized by high RCG fluxes which, as a consequence of solar modulation, show decadal periodic variations similar to solar periodicities. Results of classical spectral analysis using the Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) method and spectral Coherence analysis using Wavelet Transform (WTC) revealed typical signals of the RCG and solar activity on the climatic data, through 11 and 22 year cycles. This result is an mathematical indication that part of temperature variations in the coast of RS can be attributed to these geophysical forcings.

Keywords: Climate change. Solar activity. Galactic cosmic rays. South Atlantic Magnetic Anomaly. Rio Grande do Sul's temperature.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Gerais	2
2.2	Específicos	2
3	JUSTIFICATIVA	3
4	REVISÃO TEÓRICA	3
5	ÁREA DE ESTUDO	19
6	MATERIAL	19
7	MÉTODOS DE ANÁLISE	22
7.1	ARIST	22
7.2	Análise de coerência espectral (WTC)	25
8	RESULTADOS	27
8.1	Análises preliminares das Séries Temporais	30
8.2	Resultados ARIST	30
8.3	Resultados WTC	30
9	DISCUSSÃO	44
10	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	447

1 INTRODUÇÃO

A procura de explicações para as mudanças climáticas observadas no último século tem despertado o interesse não só da comunidade científica, mas também da população. Tendo em vista a sensibilidade do sistema climático do nosso planeta, pequenas variações em processos físico-químicos que ocorrem na atmosfera podem desencadear de forma acentuada mudanças no equilíbrio deste sistema, implicando eventos naturais que muitas vezes deixam marcas no registro geológico.

As condições climáticas caracterizam-se como principal fator de intemperismo, pois afetam os padrões e a intensidade da erosão e indiretamente mudam substancialmente a geomorfologia do local (CPRM, 2016; HOLZ, 2012). Como exemplo de feições e estruturas geológicas que possuem conexão com processos atmosféricos estão discordâncias erosivas em pacotes sedimentares formadas durante uma fase de regressão forçada ou feições do tipo morainas e estrias em rochas de regiões tropicais causadas pela movimentação de geleiras, cujos processos podem ocorrer, respectivamente, durante períodos interglaciares e de glaciação, eventos estes que estão sujeitos à oscilações de apenas poucos graus na temperatura total do planeta. Como outro exemplo, podemos citar a estratificação cruzada do tipo hummocky em areia fina, produzida durante uma forte tempestade, fenômeno que por sua vez é resultado da desestabilização no balanço energético entre pressão, temperatura e umidade do ar (ETTWEIN; MASLIN, 2011).

O impacto desses fenômenos, tanto na segurança, na economia, mídia e bem estar social levou cientistas à necessidade de entender a relação entre os efeitos causados por processos naturais internos, como forçantes oceânicos, atividades vulcânicas, deriva continental, etc., naturais externos, como ciclos de Milankovitch, impactos meteóricos, atividade solar, raios cósmicos galácticos, etc., e antrópicos, pela emissão de aerossóis, queima de combustíveis fósseis, etc., com as variações do clima terrestre.

Alguns trabalhos, como Svensmark & Friis-Christensen (1997), Svensmark et al. (2007) e Svensmark (2007), sugerem que uma parcela importante da variação do clima deve-se aos agentes naturais com origem externa à Terra e um dos fenômenos responsáveis por essas variações estaria relacionado com o fluxo dos raios cósmicos galácticos (RCG) na atmosfera. Os RCG são predominantemente partículas eletricamente positivas provenientes de diferentes direções do espaço e sua

intensidade detectada na Terra é dependente da modulação devida aos campos magnéticos da Terra (CMT) e do Sol (CMS). Além disso a área de estudo sofre influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), que é caracterizada por baixos valores de campo magnético, e uma vez que o campo é enfraquecido a entrada destas partículas é facilitada.

De acordo com o mecanismo sugerido por Svensmark & Friis-Christensen (1997), essa maior entrada de RCG produziria uma maior cobertura de nuvens baixas, que por sua vez implica numa diminuição nos valores de temperatura observados na superfície da Terra. Considerando que uma série de fatores controlam as variações espaciais e temporais do fluxo de RCG, diferentes efeitos climáticos podem ser esperados em diferentes localizações da superfície terrestre assim como em diferentes épocas (FRIGO, 2013).

Devido aos fatores já mencionados é esperado que possíveis efeitos climáticos associados aos RCG e à atividade solar (AS) sejam mais significativos na região da AMAS, que influencia principalmente as Regiões Sul e Sudeste do Brasil. No entanto, nenhum estudo ainda investigou estas relações entre forçantes geofísicos e o clima para locais próximos da região litorânea do RS considerando diferentes latitudes.

2 OBJETIVOS

2.1 Gerais

O objetivo geral deste trabalho é investigar a possível presença de sinais característicos da AS e dos RCG em séries temporais de dados de temperatura registrados em estações meteorológicas localizadas na região litorânea do Estado do Rio Grande do Sul, no período entre 1931 e 2014.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Analisar as séries temporais dos dados brutos e da anomalia térmica de T_{max} , T_{med} , T_{min} e Amp nas estações de TOR, POA e SVP.

- b) Buscar a presença de sinais característicos dos RCG e das variações da atividade solar nas séries, utilizando a metodologia de análise espectral clássica ARIST.
- c) Identificar as épocas e locais para os quais os sinais típicos dos RCG e AS são mais significativos, utilizando a análise de Coerência espectral baseada na Transformada de Ondas (WTC).
- d) Comparar os resultados obtidos com resultados de trabalhos anteriores realizados em outras localidades no Estado do Rio Grande do Sul.

3 JUSTIFICATIVA

Considerando que o Estado do Rio Grande do Sul situa-se na área de abrangência da AMAS e que grande parte de sua economia está relacionada com a agricultura, cujos resultados em termos de produtividade são altamente dependentes das condições climáticas, e com o turismo, do qual também está sujeito às condições meteorológicas, é muito importante investigar a atuação de forçantes geofísicos de origem interna e externa à Terra nesta região, pois com o conhecimento dos agentes controladores e das suas influências podem tornar possíveis previsões sobre o clima a longo prazo.

Portanto, pode-se dizer que o estudo de fenômenos externos em dados climáticos é necessário para o avanço científico e econômico. Este trabalho contribui para o enriquecimento de informações que, através de um número suficiente de resultados poderá tornar possível a avaliação da total influência da AMAS no clima do RS e em outras partes do Continente Sul-Americano, como também entender a parcela da contribuição dos RCG no sistema climático destas e de outras áreas.

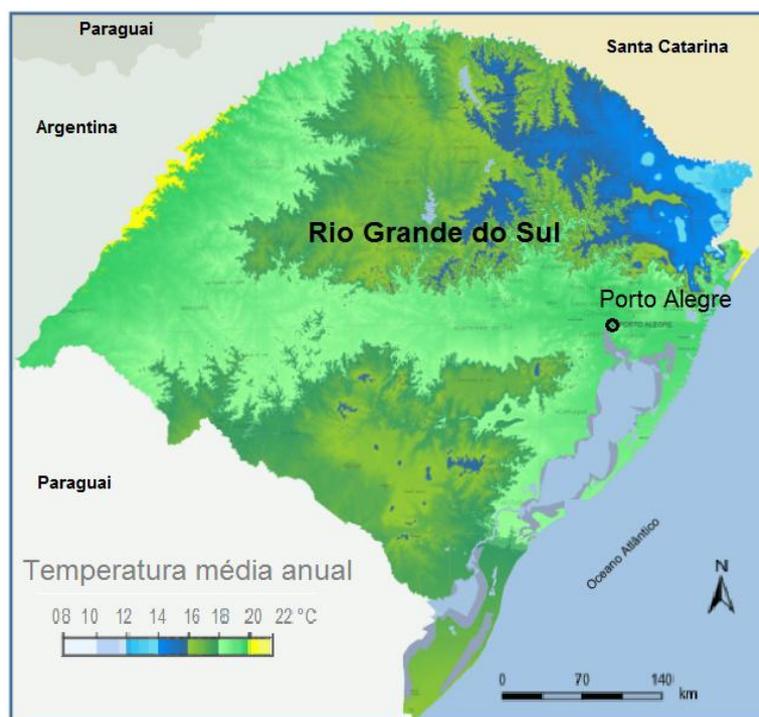
4 REVISÃO TEÓRICA

4.1 Aspectos climáticos do Sul do Brasil

Conforme Mendonça & Danni-Oliveira (2007, p.141), “a *variabilidade térmica do espaço brasileiro* é retratada por seus valores médios anuais e expressa também a importante ação do relevo e da dinâmica das massas de ar que nele atuam”. A sazonalidade térmica é mais acentuada na porção meridional do país enquanto as regiões intertropicais são caracterizadas mais pelas variações pluviométricas do que pelas amplitudes térmicas. O setor meridional Brasileiro corresponde a 6% do território total do país e está incluído na faixa climática subtropical. A região Sul está inserida nessa faixa e é nela que ocorrem os valores mais baixos de temperatura, cujos índices térmicos anuais são inferiores a 19°C (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

No Rio Grande do Sul o clima é temperado e do tipo subtropical mesotérmico úmido (pela classificação de Köppen) e é constituído por quatro estações razoavelmente bem definidas. Eventualmente, em alguns locais é possível ter ocorrência de geada e precipitação de neve. As temperaturas apresentam grande variação térmica, com verões quentes e invernos rigorosos (ATLAS..., 2016). As mínimas são de até -10°C e máximas de 40°C e as temperaturas médias variam em maior parte entre 15 e 18°C, sendo que as temperaturas médias mais baixas pertencem à Serra Gaúcha, localizada no norte do Estado (Figura 1).

Figura 1 – Temperaturas médias anuais do Estado do Rio Grande do Sul.



Modificado de: ATLAS... (2016).

A região subtropical brasileira tem seu clima fortemente afetado pelos eventos El-Niño e La-Niña mas em maior escala de tempo também pode apresentar padrões de temperatura e chuva semelhantes ao dos ciclos solares em seus registros (GUSEV et al., 2004; SOUZA ECHER et al., 2008; RIGOZO et al., 2003, 2004; PRESTES et al., 2011). Trabalhos anteriores investigando a possível modulação climática por fenômenos geofísicos (AS/RCG) para localidades do RS já foram realizados por diversos autores. Gusev et al. (2004) e Echer et al. (2008) analisaram dados de cem anos do total anual de precipitação pluviométrica registrada na estação meteorológica de Pelotas e verificaram que intervalos bidecadais estiveram presentes durante praticamente todo o intervalo observado. Análises de dados de temperatura média anual e/ou do total anual de precipitação pluviométrica, realizadas por Rampelotto et al. (2012), Frigo (2013), Frigo et al. (2013), Smaniotto (2015) e Lima (2015), forneceram indícios matemáticos de que os RCG podem atuar como gatilho para variações climáticas com periodicidades típicas de ~11 e ~22 anos para diferentes localidades do estado do Rio Grande do Sul. Ainda, os resultados destes autores indicaram que os efeitos dos RCG sobre o clima muitas vezes apresentam dependência com a localização do centro da AMAS.

Um resumo dos primeiros estudos relacionando a atividade solar, medida através da quantidade de manchas na superfície do Sol, com a temperatura ou com outras variáveis climáticas e eventos meteorológicos pode ser encontrado em Hoyt & Schatten (1997).

4.2 O Campo Geomagnético

O modelo do CMT pode ser simplificado na forma de um dipolo magnético, cujo eixo do dipolo intercepta a superfície da Terra nas coordenadas $79,3^\circ$ N; $288,6^\circ$ E; $79,3^\circ$ S e $108,6^\circ$ E. Seus polos geomagnéticos atualmente estão localizados próximos aos polos geográficos e inclinados aproximadamente $11,3^\circ$ em relação ao eixo de rotação do planeta. Este campo é resultado da interação de duas componentes, uma de origem interna e outra de origem externa.

O campo geomagnético interno é gerado no núcleo e é o responsável pelo CMT apresentar geometria aproximadamente dipolar. Esse campo, que também é chamado de principal pois corresponde a mais de 90% do campo total observado, funciona como um escudo protetor para as partículas que vem do Sol e do cosmos e

que propagam-se em nossa direção (PINHEIRO, 2013). Atualmente, a Teoria do Geodínamo é a melhor proposta para explicar a geração deste campo. A teoria sugere que o movimento do fluido condutor no núcleo externo, cujo fluido é composto principalmente por ferro em estado líquido, provocado pela rotação da Terra e pelas correntes de convecção, gera correntes elétricas e por consequência um campo magnético (IPMA, 2016). Já o CMT secundário tem origem externa ao nosso planeta e é responsável por apenas aproximadamente 5% do campo magnético total. Sua origem é atribuída às correntes elétricas induzidas na ionosfera e magnetosfera devido à interação com o vento solar (FRIGO, 2013).

A intensidade do CMT total varia entre ~24 000 nT para regiões centrais da América do Sul até ~66 000 nT entre a Antártica e o sul da Austrália. Além de não ser homogêneo o campo sofre variações temporais, que podem ser de curta ou longa duração. As primeiras estão associadas a eventos que alteram o CMT secundário e como exemplo temos as variações diárias, as tempestades magnéticas (que podem dar origem às auroras boreais) e impulsos magnéticos. Por outro lado, as variações mais lentas têm a sua origem no interior do núcleo externo e dá-se o nome de variação secular (IPMA, 2016).

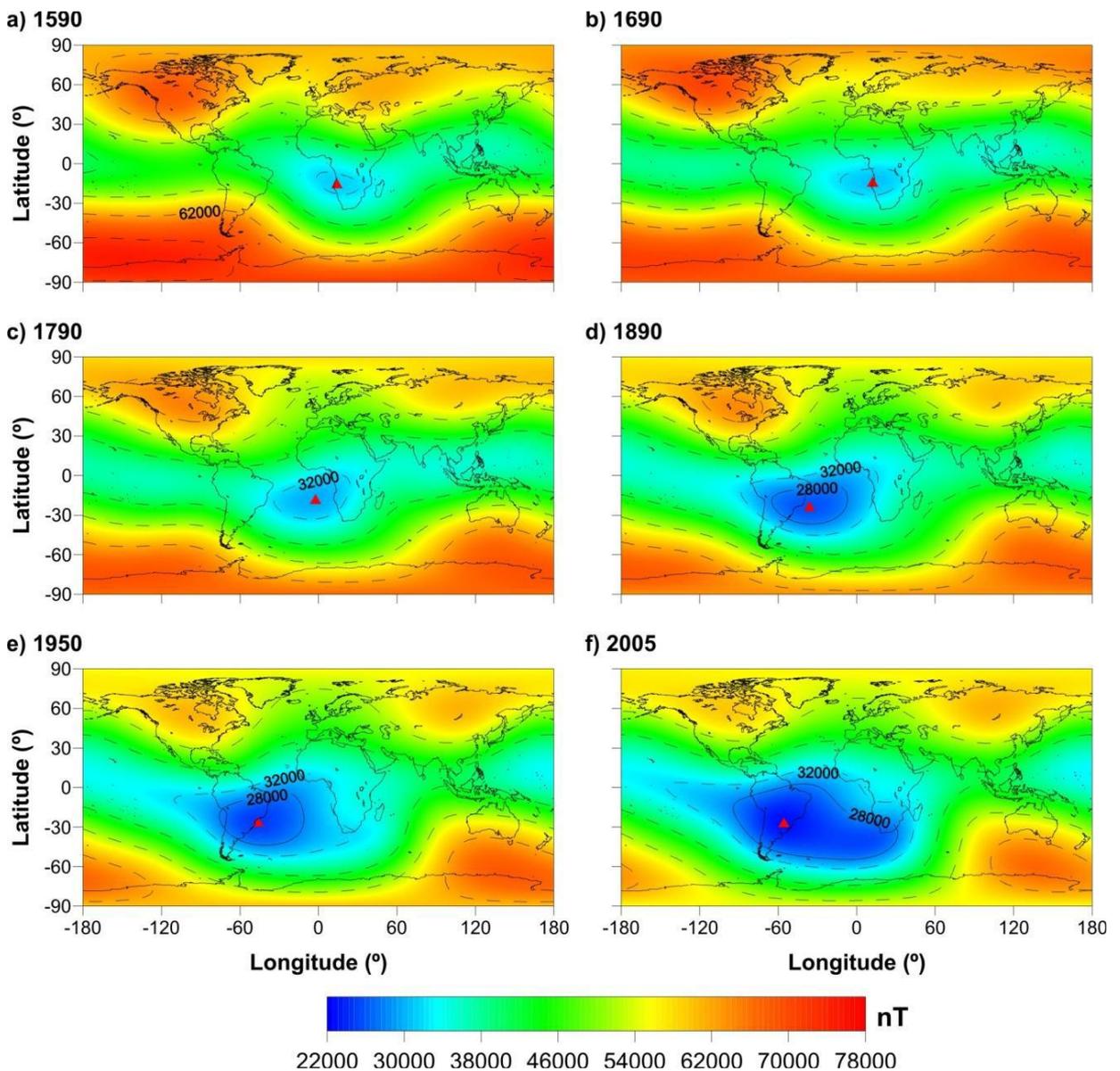
O comportamento do CMT principal é representado matematicamente através de modelos baseados em harmônicos esféricos onde os valores do campo para cada local podem ser estimados através do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), atualizado a cada cinco anos. O cálculo é possível simplificando o modelo para condições ideais como o núcleo centrado, a não existência de correntes elétricas na superfície da Terra e ionosfera e adotando um campo magnético sem variações. Desta forma, o campo pode ser descrito apenas por duas equações de Maxwell, a Lei de Ampère e a Lei de Gauss para o magnetismo, onde a primeira mede a intensidade do campo magnético através da distribuição de densidade de corrente elétrica enquanto a segunda diz que todas as linhas de campo são linhas contínuas e fechadas, saindo de um polo N a um polo S, para que o fluxo magnético sobre uma superfície fechada seja sempre nulo (FRIGO, 2013).

4.3 Anomalia Magnética do Atlântico Sul

O centro da AMAS é o ponto de menor intensidade do campo magnético em toda a superfície da Terra, implicando no maior índice de radiação vinda do espaço

do que qualquer outra localidade do nosso planeta. Ao enfraquecer a magnetosfera, a anomalia permite um grande fluxo de partículas altamente energéticas em sua região de influência, facilitando a entrada dos RCG na atmosfera. Conforme Hartmann (2005), o aumento deste fluxo pode provocar problemas na transmissão e recepção de dados via satélite e nas linhas de transmissão de correntes elétricas. Devido a estes efeitos e a outros relacionados ao clima, a região têm sido motivo para o desenvolvimento de pesquisas.

Figura 2 – Deslocamento e evolução temporal da AMAS de 1590 a 2005. O triângulo vermelho representa a posição do centro da anomalia. Os valores estão representados em nano-Tesla.



Fonte: Hartmann & Pacca (2009).

Os processos físicos internos responsáveis pela criação da AMAS ainda não são bem conhecidos mas de acordo com pesquisas mais recentes sua causa deve estar atribuída à excentricidade do dipolo geomagnético e pela presença de perturbações multipolares, que acabam produzindo uma série de fenômenos físicos na magnetosfera e ionosfera (VIEIRA; SILVA, 2006).

O deslocamento para oeste e aumento da área de abrangência da AMAS entre 1590 e 2005 é apresentada na Figura 2. As isolinhas de intensidade de 28000 e 32000 nT foram calculadas a partir do modelo gufm1 para o intervalo 1590-1890 enquanto para o intervalo entre 1900-2005 o cálculo foi feito através do IGRF. O valor do campo no centro da AMAS caiu de cerca de 31000 nT em 1590 para menos de 23000 nT em 2005 (FRIGO, 2013).

Estudos publicados por König et al. (1978) e Smart & Shea (2009) mostram que a rigidez magnética de corte vertical P_c vem diminuindo ao longo do último século na região influenciada pela AMAS. Além do enfraquecimento nos valores de P_c , registros históricos indicam que a posição e a tendência de trajetória da AMAS variam ao longo do tempo, mas não se sabe ao certo o que ocasiona a migração e a dessa anomalia. Atualmente ela ocupa parte do oceano Atlântico Sul e a maior parte do continente Sul-Americano, com sentido de deriva para oeste e velocidade de deslocamento de $0,18^\circ$ por ano, sendo esse valor similar a rotação diferencial entre o núcleo da Terra e a rotação da superfície, que é estimada entre $0,3^\circ$ e $0,5^\circ$ (LEITHOLD, 1987).

4.4 Raios cósmicos

Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas (100 MeV a 10 GeV em média) que viajam no espaço com velocidades próximas à da luz. Esses raios podem ser extragalácticos ou galácticos (RCG). Os RCG são compostos quase que totalmente por prótons (~95%) e núcleos de Hélio (~4%) além de outros núcleos de elementos mais pesados (~1%) e sua entrada na Terra depende da modulação magnética solar e terrestre. De acordo com Arruda (2010), essas partículas se propagam no espaço de maneira tortuosa, o que pode aumentar de 10^3 anos, caso se propagasse em linha reta, para 10^7 anos o tempo de permanência deles na nossa galáxia. Apesar de sua origem ainda não ser bem compreendida, Svensmark (2007) sugere que a principal fonte de aceleração dos RCG que chegam até o nosso planeta provém de explosões de supernovas dentro da Via Láctea. Segundo Mursula &

Usoskin (2003), além da liberação de energia durante essas explosões, suas acelerações também podem estar atribuídas às explosões de estrelas de nêutrons e buracos negros.

Há mais de sete décadas monitores de nêutrons localizados em pontos com diferentes rigidez de corte geomagnético e variáveis altitudes, telescópios direcionais de contagem de muons (em superfície e em subsolo) e detectores em balões atmosféricos têm monitorado a intensidade dos RCG (AHLUWALIA; YGBUHAY, 2013). Os monitores de nêutrons são sensíveis aos raios cósmicos em cerca de 0,5-20 GeV, que coincide com o intervalo da modulação de energia solar mais eficaz. Devido a isto, a contagem de nêutrons se tornou o principal meio de estudo detalhado sobre o comportamento da modulação solar através do tempo desde 1950 (USOSKIN et al, 2001).

Figura 3 – Arranjo de telescópios captadores de radiação altamente energética localizados no Observatório Fred Lawrence Whipple, no Arizona.



Fonte: Swordy & Wakely (2009).

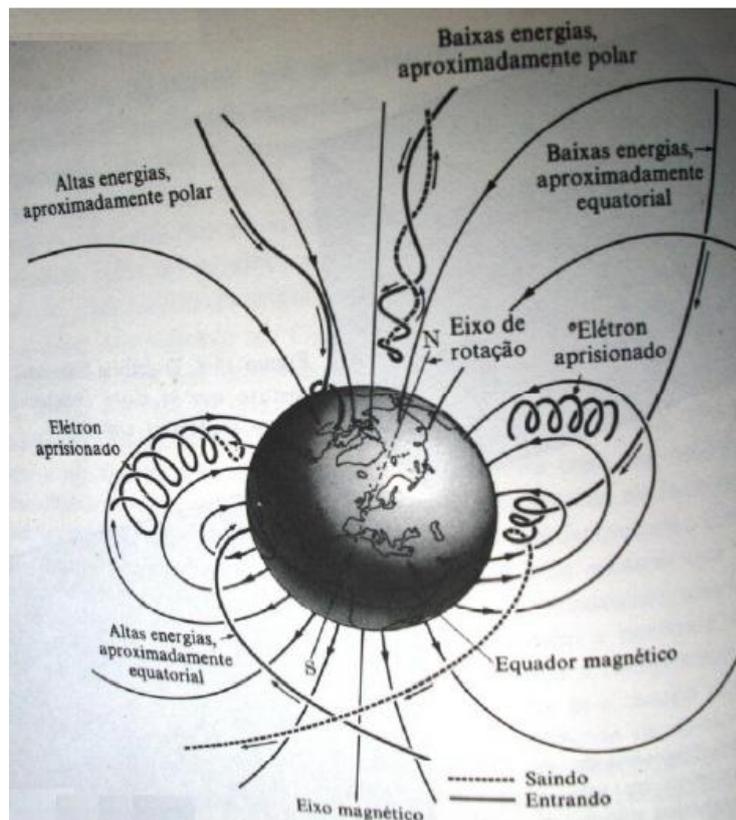
4.4.1 Relação entre os RCG e o CMT

A modulação terrestre se dá principalmente em razão da intensidade e da direção do CMT. Em locais onde o CMT é anormalmente pouco intenso, como é o caso da região da AMAS, ou é predominantemente vertical, como nas regiões polares, a entrada de RCG até a baixa atmosfera é facilitada (FRIGO, 2013).

Da mesma forma que a maior densidade das linhas do campo magnético ocorre nas extremidades de um ímã, por analogia, a incidência de partículas eletricamente carregadas, como os RCG, devem ser maiores em regiões polares do que em regiões equatoriais, já que estas tendem a se alinhar ao campo magnético terrestre dipolar. O comportamento da entrada de cargas elétricas na Terra é mostrada na Figura 4.

O movimento de uma partícula eletricamente carregada na heliosfera pode ser governado pela curvatura do vetor campo magnético (STRAUSS; POTGIETER; FERREIRA, 2012). Assim, dependendo da quantidade de vetores atuantes no sistema, a partícula pode deslocar-se na direção da lamina de corrente heliosférica com o sentido dependendo do sinal da carga da partícula.

Figura 4 - Movimento de partículas carregadas para diferentes regiões do CMT.



Fonte: Alonso & Finn (1972).

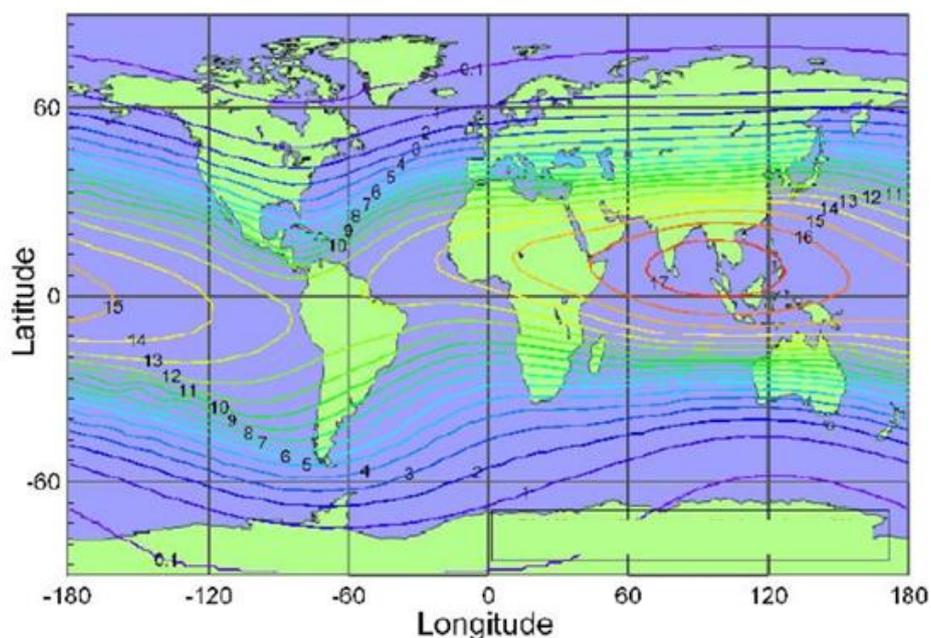
A penetração de partículas carregadas de acordo com o local da superfície está ligada com a rigidez de corte geomagnética (P_s), que é valor mínimo que uma partícula primária deve ter para que suas partículas secundárias alcancem a baixa atmosfera. Para esse cálculo são levados em conta os fatores de intensidade e direção do campo geomagnético, a rigidez magnética da partícula (momento por unidade de carga) e sua direção de propagação (FRIGO, 2013). Este valor foi definido por Störmer (1930) como:

$$P_s = 300 \frac{M}{R^2} \frac{\cos^2 \lambda_G}{[1 + (1 - \cos^3 \lambda_G \cos \epsilon \sin \zeta)^{1/2}]^2} \quad \text{EQ. 1}$$

Sendo a rigidez de corte P_s dada em GV, onde M é o momento do dipolo geomagnético, r é a distância do local ao centro da Terra, ϵ e ζ são os ângulos de zênite e azimute em relação à partícula incidente e λ_c é a latitude geomagnética do local de incidência. Habitualmente vemos a rigidez de corte P_s , representada em termos de rigidez de corte vertical P_c , onde o ângulo zênite é considerado zero $\epsilon = 0$.

A Figura 5 apresenta um mapa de rigidez de corte vertical para as diferentes posições geográficas, onde podemos observar que nos polos os valores de P_c são baixos, chegando a 1GV, enquanto nas regiões equatoriais, onde CMT é em maior parte horizontal, encontramos altos valores de P_c , que atingem até 17GV.

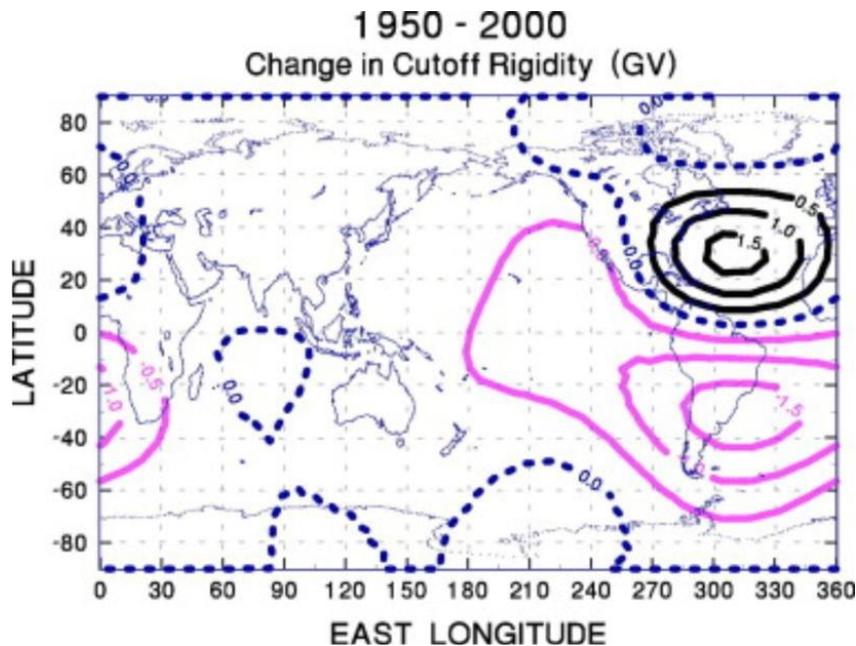
Figura 5 - Mapa das rigidezes de corte vertical magnética (em GV) da Terra.



Fonte: Vieira (2012).

De acordo com Smart & Shea (2009), os valores de P_c nos últimos 50 anos diminuíram até mais que 1,5 GV na região do Atlântico sul e da América do Sul enquanto que houve cerca dos mesmos 1,5 GV de acréscimo dos valores de P_c na América Central para o mesmo intervalo de tempo. Esse processo de decréscimo teve provável início ao redor dos anos de 1800 para a área compreendida pela AMAS. Nas demais regiões do planeta praticamente não houve variação nos valores de P_c . A diminuição da rigidez de corte vertical deverá prosseguir enquanto a intensidade do CMT continuar diminuindo nesta região (FRIGO 2013). A Figura 6 enfatiza as mudanças nos valores de P_c entre 1950 e 2000 calculadas por Smart & Shea (2009).

Figura 6 - Mapa global mostrando as isolinhas de variação da rigidez magnética de corte vertical entre 1950 e 2000. As linhas na cor preta indicam as regiões onde a rigidez aumentou enquanto as linhas na cor rosa indicam regiões onde a rigidez diminuiu.



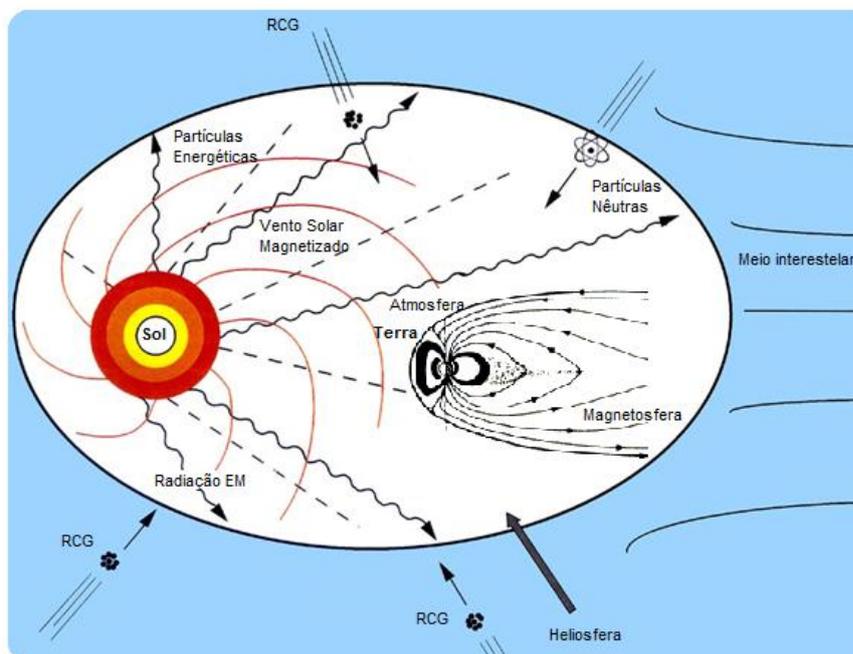
Fonte: Smart & Shea (2009).

4.4.2 Relação entre os RCG e a atividade solar

É bem estabelecido que a entrada, assim como a energia espectral, dos RCG na atmosfera é modulada não só pelo CMT mas também pela atividade solar (AS) e que existe uma relação inversa entre a AS e a intensidade destes raios cósmicos (IRC) observados. Entre os vários parâmetros de atividade solar que tem alta correlação com os RCG estão o número de manchas solares (SSN), fluxo solar (SF), erupções solares agrupadas (GSF), índice de explosão solar (SFI) e índice coronal (CI). Estes parâmetros estão estritamente ligados com as variações de intensidade e polaridade magnética durante os ciclos solares (GUPTA, 2005).

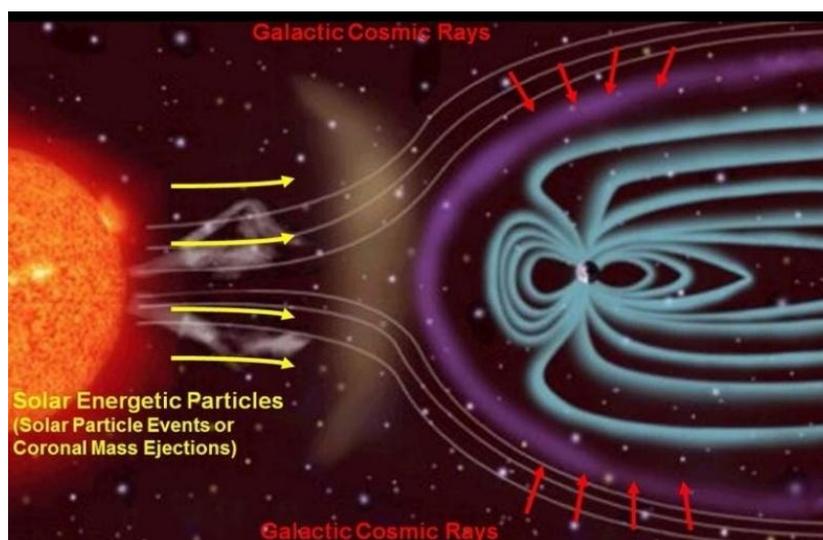
Em escala de tempo anual a multidecadal a modulação solar se deve principalmente aos ciclos de Schwabe, que refere-se ao ciclo de AS e é presenciado a cada 11 anos em média, e pelo ciclo de Hale, que é referente a inversão da polaridade do CMS e possui periodicidades de aproximadamente 22 anos. Em épocas em que o Sol está magneticamente mais ativo, há uma maior quantidade de manchas na fotosfera e ejeções de massa coronal são mais frequentes e de maior intensidade.

Figura 7 – O diagrama esquemático, fora de escala espacial, mostra o mecanismo de entrada dos RCG no Sistema Solar. O número de partículas cósmicas incidentes é dependente das variações do CMT e da AS.



Modificado de: http://umbra.nascom.nasa.gov/solar_connections/domain.html.

Figura 8 - A figura simula o contato das partículas energéticas com a Magnetosfera. O plasma, proveniente de uma explosão na superfície do Sol durante máximos de AS, além de deformar o CMT desviam os RCG para longe da Terra, causando menor contagem de RCG durante esses eventos.

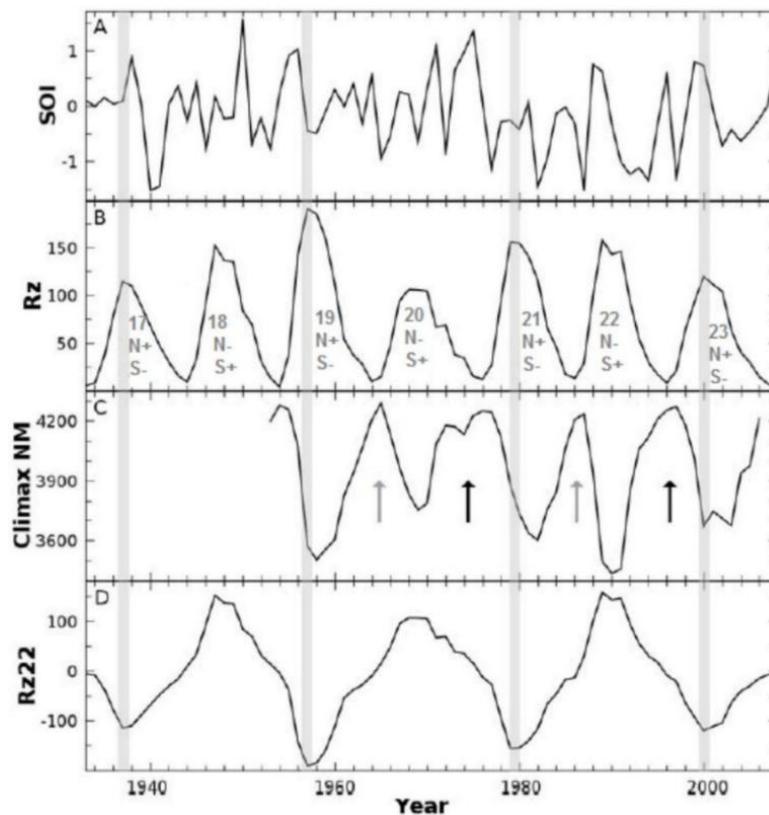


Fonte: <http://Wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray>.

O plasma ejetado funciona como um escudo temporário contra a entrada dos RCG em todo o sistema solar (Figura 7). Isto ocorre pois, quando os RCG entram na

heliosfera, as partículas sofrem convecção com o vento solar para longe do Sol e, conseqüentemente, para longe dos seus planetas orbitantes (SVENSMARK, H.; BONDO; SVENSMARK, J.; 2009). Além disso, quando a onda de choque atinge a magnetosfera, ela provoca um efeito de achatamento das linhas do CMT nas regiões equatoriais, aumentando a densidade das linhas e reforçando o campo, reduzindo em escala de horas ou dias a contagem de raios cósmicos nas proximidades. Essa diminuição na contagem dos RCG durante distúrbios geomagnéticos é chamada de decréscimo de Forbush. Da mesma forma, períodos de baixa intensidade magnética solar, ou menor incidência de manchas solares, são associados a períodos com grande penetração de RCG na atmosfera terrestre (Figura 8).

Figura 9 – Registro da ST das médias anuais das contagens horárias de nêutrons (HNC) no observatório de Climax (c). Em A está a evolução temporal média do índice SOI e em B e D estão o número de manchas solares (Rz) e o ciclo solar duplo (Rz22), respectivamente. As setas cinzas e pretas em C indicam a transição entre ciclos solares ímpares e pares, mostrando o comportamento bi-modal das ST de HNC.



Fonte: Frigo et al. (2013).

O comportamento dos forçantes geofísicos nas séries é descrito graficamente na Figura 9. Na Figura 9C, a modulação geomagnética e solar dos RCG é apresentada

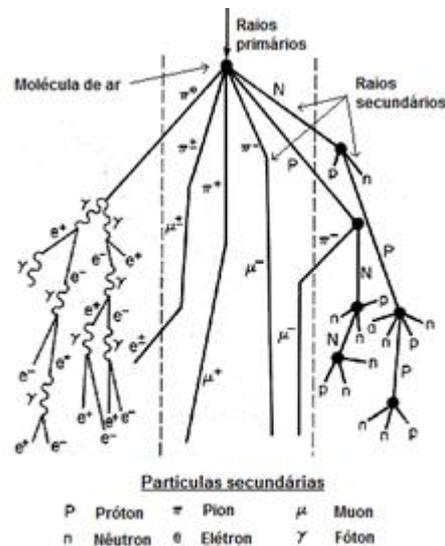
em termos do valor médio anual do número de nêutrons, produzidos durante as primeiras interações dos raios primários com a atmosfera e detectados a cada hora pelo observatório de Climax (Estados Unidos). O número médio anual de manchas solares (Figura 9B) é representado em termos do índice Rz (HOYT; SCHATTEN, 1997). O ciclo de Hale (Figura 9D) trata do número de manchas solares multiplicado por -1 em ciclos ímpares, representado como Rz22. O SOI estima a amplitude ENSO, cujos valores negativos/positivos estão relacionados aos eventos El Niño/La Niña. Esses dados apresentam relação inversa muito forte, com máximo de atividade solar associado ao mínimo de fluxo de RCG. Também é visto que, durante a transição dos ciclos solares 19 para 20 e 21 para 22 o espectro possui uma forma triangular mais fina, e um formato mais espesso e quadrado para as transições dos ciclos solares 20 para 21 e 22 para 23 anos. Esse comportamento foi observado pela primeira vez em 1919 pelo astrônomo George Ellery Hale.

4.4.3 Relação entre os RCG e o clima

Ainda existe um grande debate sobre a real influência dos forçantes geofísicos sobre condicionantes meteorológicas. Enquanto alguns cientistas como Svensmark & Friis-Christensen (1997), Harrison & Stephenson (2005), Vieira & Silva (2006) e Svensmark (2013) associam estes fatores externos a uma parcela importante nas flutuações de temperatura através do aumento na cobertura de nuvens, outros como Laut (2003), Lockwood & Fröhlich (2007), Brown, B. (2008) e Brown, P. (2013) negam que a energia dos RCG seja suficiente para causar variações significativas no clima, tornando a resposta para esse assunto o principal desafio da cosmoclimatologia.

De acordo com Brazilevskaya (2000), apesar da energia trazida na Terra pelos RCG ser desprezível ($\sim 10^{-9}$ W/cm²) em comparação com a energia envolvida em outros processos atmosféricos eles continuam sendo a principal fonte de ionização em altitudes menores de 60 km, transformando-os em possíveis mediadores de mecanismos físico-químicos que ligam a variabilidade solar com o clima terrestre. O processo inicia quando partículas cósmicas atingem o topo da atmosfera terrestre e, por meio de colisões com átomos de nitrogênio e oxigênio, reações nucleares fazem com que um conjunto de várias outras partículas seja gerado, dando início ao processo conhecido como “Chuveiro Cósmico” (Figura 10).

Figura 10 – Representação do efeito de espalhamento das partículas cósmicas incidentes quando atingem moléculas de ar. Durante o processo também são criados outros íons secundários. A este fenômeno dá-se o nome de chuva cósmica.

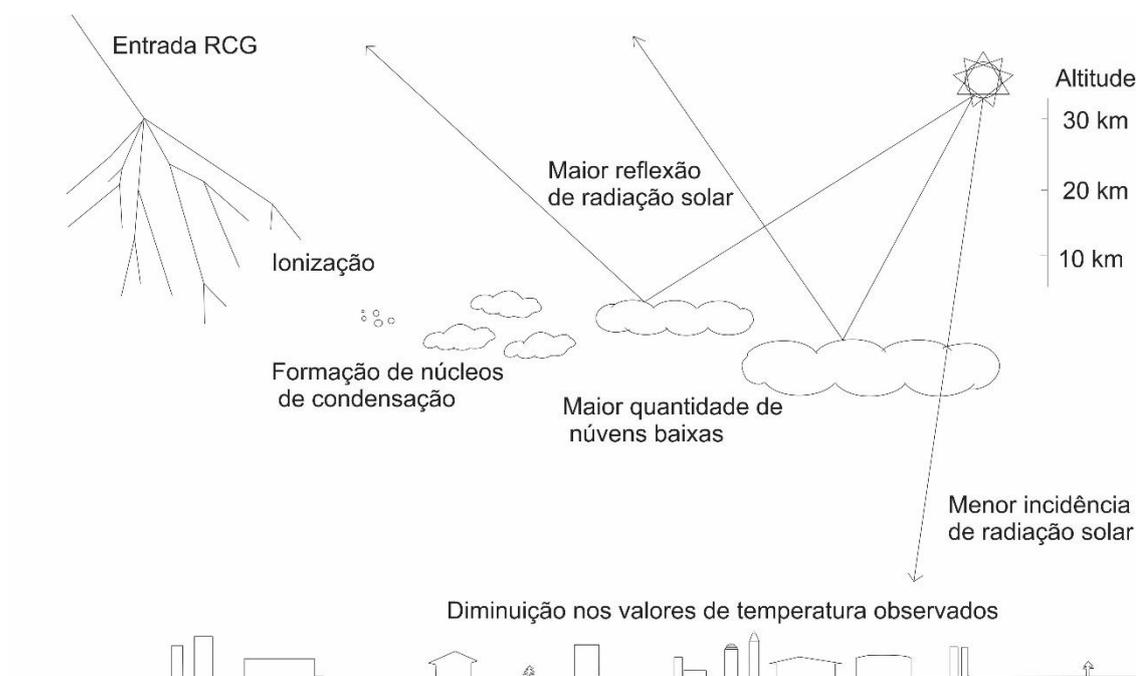


Modificado de: <http://neutronm.bartol.udel.edu>.

As partículas que estão no espaço e não atingiram a atmosfera superior da Terra são denominadas raios cósmicos primários enquanto os raios cósmicos secundários são gerados durante a colisão das partículas primárias com os constituintes atmosféricos (WADA; MURAKAMI, 1988). O número de partículas secundárias vai depender da quantidade de energia da partícula primária, onde o número de partículas criadas, ou íons, será maior quanto maior for a energia da partícula primária incidente (VIEIRA, 2002). Um grande número de íons pode favorecer a formação de núcleos de aerossóis estratosféricos, compostos principalmente por misturas de ácidos sulfúricos (H_2SO_4), água (H_2O) e, eventualmente, ácido nítrico (HNO_3), como mostra a Figura 11. As cargas elétricas dos múons (partícula semelhante ao elétron porém de massa muito superior) e dos elétrons, soltos pelos RC primários durante o espalhamento cósmico, têm um papel fundamental na estabilização de aglomerados dessas moléculas. Através de ligações com grupos frágeis o elétron se junta a um núcleo incentivando-o a crescer e a condensar que, após isso, irá migrar para outros núcleos de H_2SO_4 e H_2O e assim sucessivamente (RAMACHANDRAN, 2010). A nucleação de aerossóis pode acarretar maior condensação de nuvens de baixa altitude, que por sua vez implica em maiores taxas de deflexão e difusão da radiação solar total provocando indiretamente

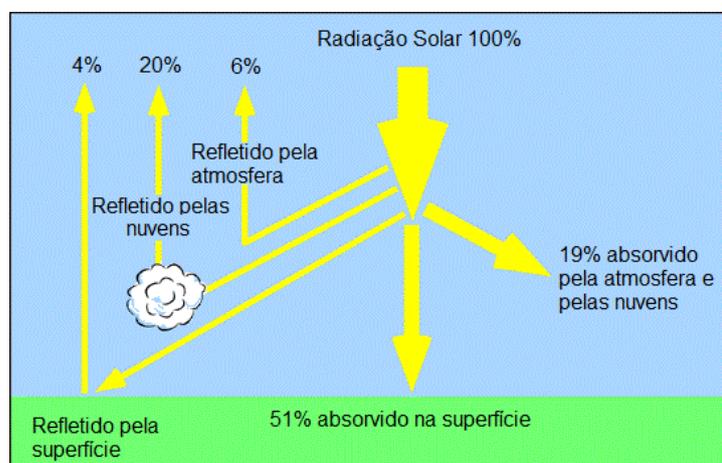
diminuição nas temperaturas observadas e aumentando também as chances de chuva (DIKINSON, 2007). Um esquema simplificando todo o processo pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Figura representativa dos fenômenos envolvidos entre a entrada dos RCG com a diminuição de temperatura.



Fonte: Autor.

Figura 12 - A imagem expressa diferentes comportamentos da radiação solar nos processos atmosféricos e de superfície. A presença de nuvens baixas pode ser responsável por um albedo de 20% da radiação incidente total.



Fonte: <http://www.physicalgeography.net>.

As nuvens baixas cobrem mais de um quarto da Terra e exercem um forte efeito de resfriamento na superfície, já que é responsável por refletir cerca de 20% da radiação solar total incidente (Figura 12). Apenas 2% na variação da cobertura de nuvens baixas durante um ciclo solar implica uma mudança no aquecimento terrestre de $1,2 \text{ Wm}^{-2}$, valor este bem significativo se formos pensar que o valor de 1.4 Wm^{-2} , segundo dados do IPCC (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) foi atribuído para os efeitos dos gases estufas somando todas as emissões de dióxido de carbono desde a primeira revolução industrial até os dias de hoje (SVENSMARK, 2007).

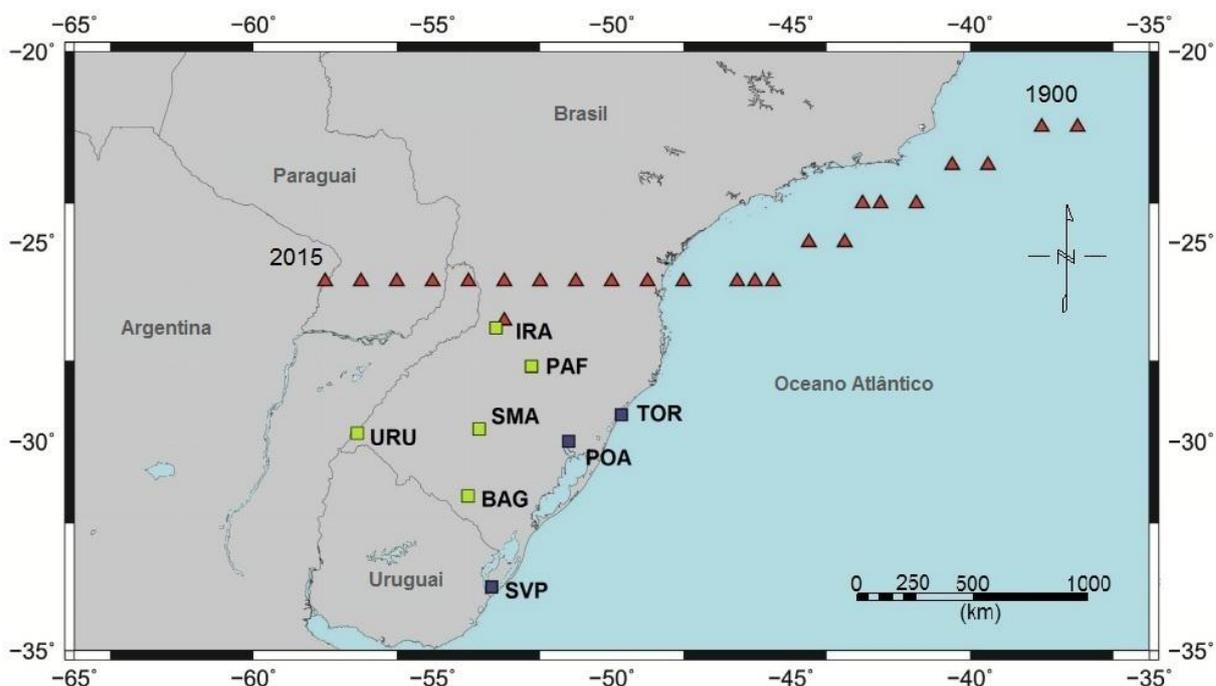
Para testar a hipótese foram feitos alguns experimentos em laboratório, cujos testes mais importantes foram realizados pelo Instituto Dinamarquês *Danish National Space Institute* (DTU) e pela *European Organization for Nuclear Research* (CERN) através do projeto *Cosmics Leaving Outdoor Droplets* (CLOUD). Por meio da simulação das condições atmosféricas reais e induzindo radiações com energia comparável aos RCG, ambos experimentos sugeriram que os RC galáticos são capazes de contribuir para o aumento na taxa de aerossóis. Contudo, mais testes seriam necessários (FRIGO, 2013). Já no recente projeto da DTU chamado de *SKY experiment*, Svensmark et al. (2007) verificou um vasto número de gotículas microscópicas flutuando no ar dentro da câmara de reação e conseguiu provar que os elétrons liberados pelos raios cósmicos agem como catalisadores, mostrando-se eficientes e velozes na formação de moléculas de água e de estáveis e ultrapequenos aglomerados de ácido sulfúrico, que são os compostos essenciais na construção de núcleos condensadores de nuvens. Além desses testes práticos, Harrison & Stephenson (2005) levantaram dados acerca da difusão de radiação, que é usada para inferir sobre a quantidade de nuvens, com a contagem de nêutrons no Reino Unido e concluíram que em dias de alto fluxo de raios cósmicos (acima de 3600×10^2 na contagem de nêutrons⁻¹, que ocorre 87% das vezes, em média) (i) a possibilidade de um dia nublado aumenta ($19\% \pm 4\%$), e (ii), a fracção de difusão aumenta em ($2\% \pm 0,3\%$) em comparação com baixo fluxo de raios cósmicos.

Tendo como base esses estudos, é muito provável que o aumento na produção de íons cosmógenos pela entrada de RCG desencadeie processos físicos importantes relacionados ao clima (através dos efeitos de ionização, condensação e reflexão solar), que implicam alterações nas variáveis de temperatura e precipitação pluviométrica, podendo interferir no balanço climático ao longo do tempo.

5 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo concentra-se na região costeira do estado do Rio Grande do Sul, área que vem sendo influenciada pela AMAS por mais de um século. As estações meteorológicas escolhidas se encontram nas cidades de Torres (TOR), Porto Alegre (POA) e Santa Vitória do Palmar (SVP), cujas estações em conjunto abrangem informações climáticas sobre o litoral gaúcho de Norte a Sul (Figura 13).

Figura 13 – Localização das estações meteorológicas cujos dados foram fornecidos pelo INMET. Quadrados azuis (escuros) representam as estações investigadas neste trabalho (TOR, POA e SVP) e quadrados verdes (claros) as demais estações analisadas em trabalhos anteriores (mas que serão discutidas adiante). As posições do centro da AMAS entre 1900 e 2015 estão indicadas pelos triângulos.



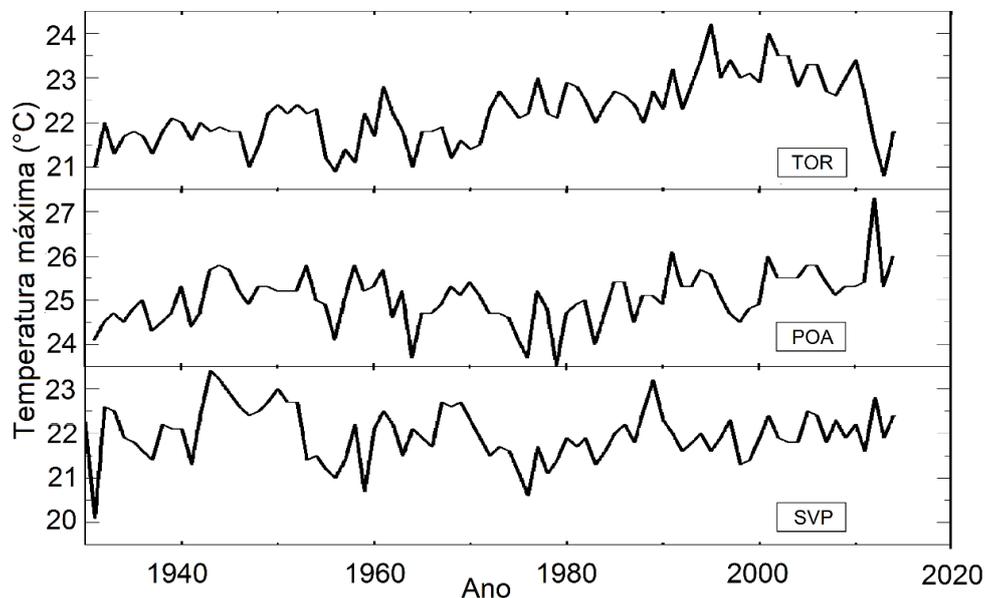
Fonte: Autor.

6 MATERIAL

Os dados climáticos utilizados compreendem registros da temperatura correspondentes ao período 1931-2014, totalizando um intervalo de 83 anos. Os dados foram obtidos no arquivo histórico do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com sede em Porto Alegre. Durante alguns dias foram tiradas fotos dos relatórios mensais de observações de Tmin e Tmax de cada

referida estação. Posteriormente, os dados foram digitados e organizados em forma de tabelas. As séries de dados brutos de Tmax, Tmin, Tmed e Amp para cada estação estão apresentados nas figuras 14, 15, 16 e 17 a seguir. Os valores de Tmed são resultados da soma entre as médias anuais de Tmax e Tmin dividida por dois enquanto a Amp é variabilidade térmica, que é obtida pela diferença entre Tmax e Tmin.

Figura 14 - Séries referentes aos dados de temperatura máxima das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1931 e 2014.



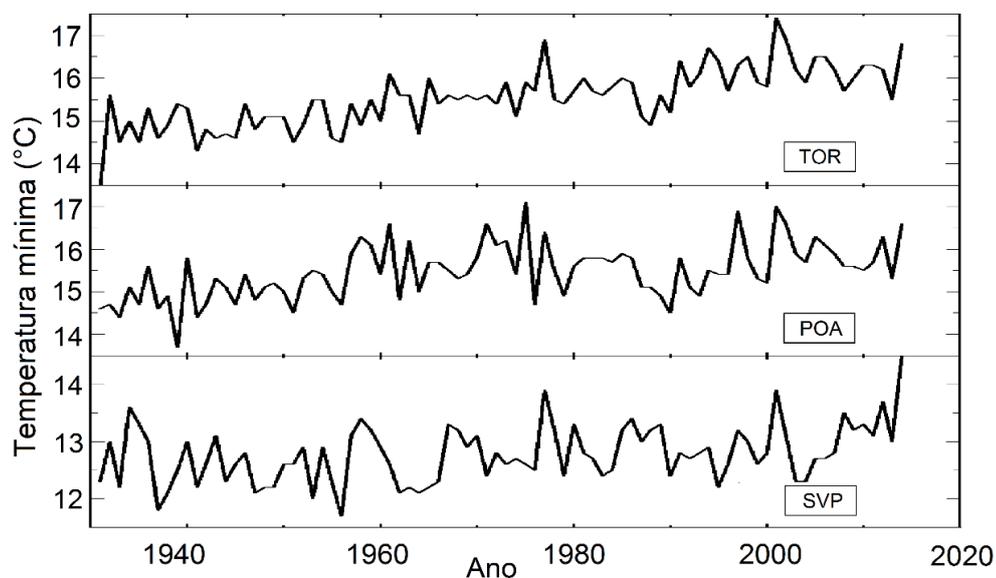
Fonte: Autor.

Nota-se que as séries possuem uma tendência crescente, ou seja, houve um processo de aumento de temperatura ao longo do tempo nesse intervalo investigado. Além disso, podemos observar que a inclinação das curvas de temperatura aumenta conforme a localização das estações se aproxima da AMAS, apresentando um processo de aquecimento mais acentuado ao norte, em TOR, acréscimos menos intensos na região central, em POA, e menor inclinação da curva para a parte sul do Estado, em SVP. Os picos menores e que mais vezes aparecem ao longo das ST devem estar relacionados com as atividades ENSO.

É possível localizar ciclos decadais e bidecadais em algumas situações, que provavelmente têm como atribuição os forçantes geofísicos. Através da Figura 17 nota-se que TOR apresentou variações de Amplitude pequenas em comparação com

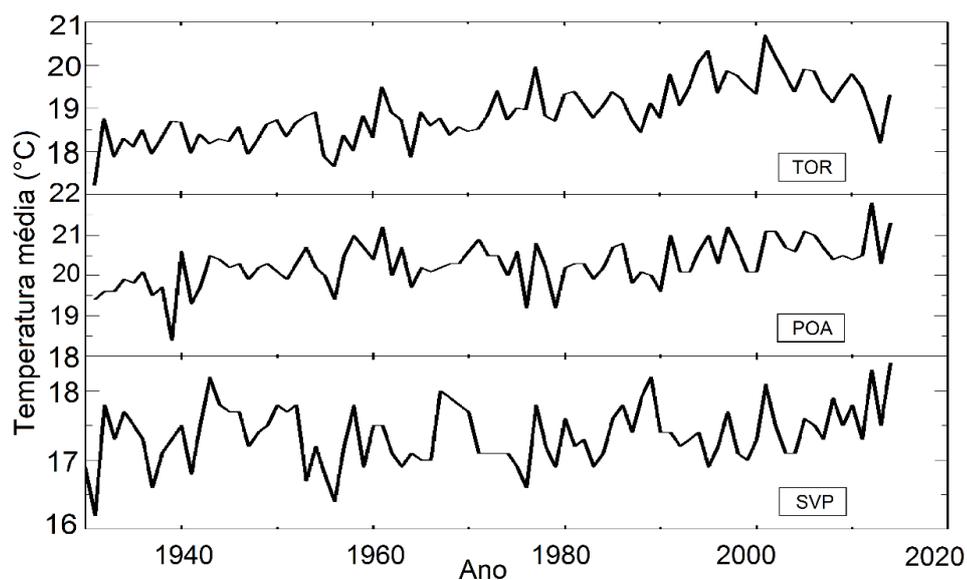
as outras duas estações enquanto que para dados de T_{min} e T_{med} (Figura 15 e 16) foi a estação de SVP que apresentou a menor variação de temperatura.

Figura 15 – Séries referentes aos dados de temperatura mínima das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1931 e 2014.



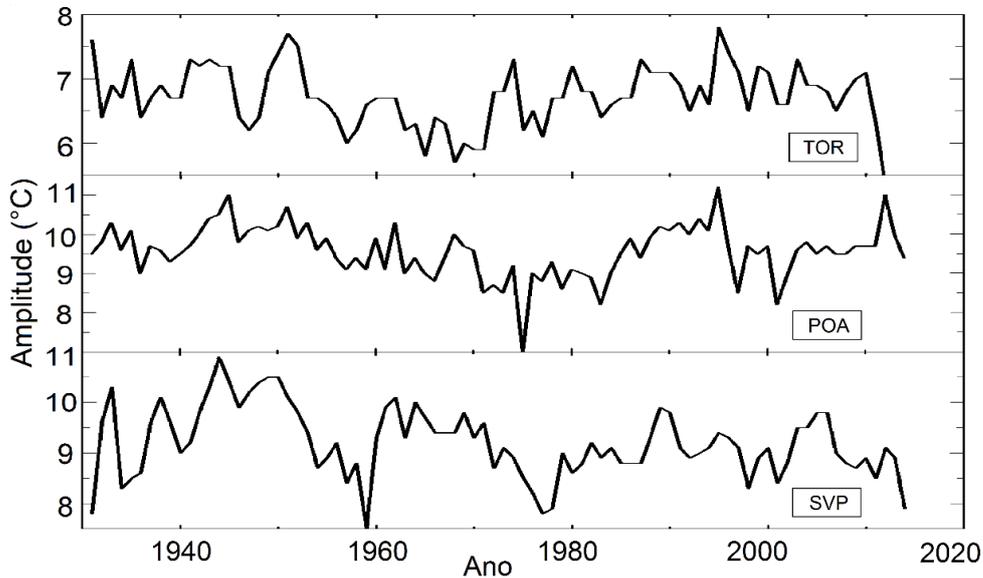
Fonte: Autor.

Figura 16 – Séries referentes aos dados de temperatura média das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1931 e 2014.



Fonte: Autor.

Figura 17 – Séries referentes aos dados de amplitude térmica (Amp) das estações de TOR, POA e SVP compreendidos entre 1931 e 2014.



Fonte: Autor.

7 MÉTODOS DE ANÁLISE

A complexidade do sinal de uma ST não-linear, que é característico de variáveis atmosféricas e oceânicas, exige ferramentas especiais para seu processamento e análise. Neste trabalho os dados foram processados através de dois métodos: a Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST) e a análise de Coerência espectral baseada na Transformada de Ondaletas (WTC). O primeiro é empregado basicamente com o objetivo de identificar variações periódicas e medir a influência destas nas séries enquanto o segundo permite extrair informações sobre as épocas em que determinado ciclo foi estatisticamente significativo e de que forma ele ocorre, bem como obter valores sobre a coerência e fase entre duas séries.

7.1 ARIST

Com a finalidade de identificar variações cíclicas nos dados foi escolhido utilizar o método clássico de avaliação espectral chamado de Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais (ARIST), que utiliza um ajuste de mínimos quadrados para determinar periodicidades sem a necessidade de linearização prévia. Desenvolvido

primeiramente por Wolberg (1967) e posteriormente implementado através de códigos computacionais por Rigozo & Nordemann (1998), o ARIST busca três parâmetros desconhecidos nas séries temporais, que são a amplitude a_0 , frequência angular a_1 e fase a_2 , objetivando minimizar o quadrado da chamada função condicional a cada iteração. A função condicional F_k é a diferença entre os dados experimentais Y e o ajuste de uma função senoidal a estes dados em um instante de tempo k .

$$F_k = Y_k - a_0 \sin(a_1 t_k + a_2) \quad \text{EQ. 2}$$

Respeitando a frequência estabelecida pelo Teorema de Nyquist ($f_a \geq 2 f_s$), este método analisa todo o espectro de frequências das séries com uma confiança estatística de 95%. Com ele é possível determinar o desvio padrão de todos os parâmetros, possibilitando encontrar os períodos mais importantes através da razão da amplitude e de seu desvio padrão.

Como descrito em Vieira (2012) e em Lima (2015), a cada iteração realizada temos um conjunto de valores a_i calculados, usando as relações de recorrência:

$$a_0 = a'_0 - A_0 \quad \text{EQ. 3.1}$$

$$a_1 = a'_1 - A_1 \quad \text{EQ. 3.2}$$

$$a_2 = a'_2 - A_2 \quad \text{EQ. 3.3}$$

Sendo a'_i os valores de a_i de uma iteração anterior tendo suas atribuições, no caso da primeira iteração, escolhidos com uma mesma ordem grandeza que os valores esperados. Os termos corretivos A_i são elementos de uma matriz $A_{(3 \times 1)}$, solução do sistema linear $A = C^{-1}V$, em que os termos C_{ij} e V_{ij} , das matrizes $C_{3 \times 3}$ e $V_{3 \times 1}$, são os somatórios para todos os n presentes na série temporal, calculados a cada iteração. As iterações só param quando o somatório dos elementos da matriz A atingir um valor muito pequeno, menor que 10^{-6} , critério de convergência adotado pelo método. Os cálculos são feitos através das seguintes equações:

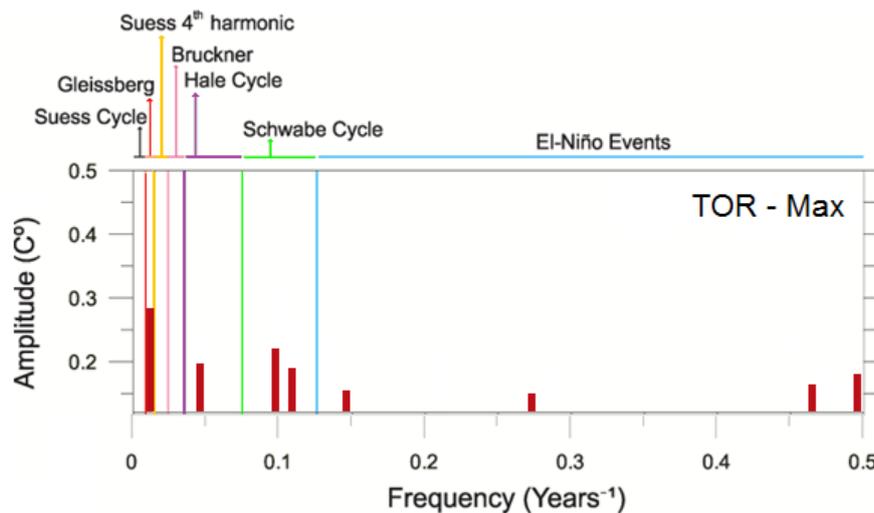
$$C_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial F_k}{\partial a_i} \right) \left(\frac{\partial F_k}{\partial a_j} \right) \quad \text{EQ. 4.1}$$

$$V_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial F_k}{\partial a_i} \right) (\partial F_k) \quad \text{EQ. 4.2}$$

Onde L é o valor de ponderação de cada ponto e neste trabalho será utilizado o valor igual a 1 para todas as análises.

Diferentemente da Transformada clássica de Fourier, o ARIST nos fornece a significância estatística do espectro em um determinado intervalo de frequências nas séries e consegue estimar ciclos de comprimentos de onda maiores do que o da própria série como o ciclo solar de Gleissberg, que possui periodicidade ~83 anos (sendo este valor o tamanho da série), e o ciclo de Suess (~200 anos). A localização no eixo x do gráfico indica a frequência do sinal correspondente, que através dela é possível distinguir um ciclo do outro. O eixo vertical representa a parcela energética atribuída a cada ciclo detectado em relação à amplitude do espectro total. O comprimento da série abrange desde os eventos La Niña e El Niño (SOI), de ciclicidade de 2 a 7 anos, até o ciclo solar de Suess. Um exemplo dos resultados gerados por este programa pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Exemplo do resultado ARIST para a série de Tmax em TOR.



Fonte: Autor.

Como exemplo utilizou-se a série de Tmax da estação de TOR. No caso, os únicos intervalos onde não houve registro foram os referentes aos ciclos de Bruncker e Suess, sendo que a maior amplitude, de cerca de 0,28°C, pode ser atribuída ao ciclo

de Gleissberg. O Ciclo de Schwabe (~11 anos) foi detectado duas vezes enquanto o Ciclo de Hale (~22 anos) foi presenciado uma vez, sendo que essas são as periodicidades de maior interesse no estudo.

7.2 Análise de coerência espectral (WTC)

A transformada de ondaletas (TO) na forma contínua ou *Continuous Wavelets Transform* (CWT) foi desenvolvida pela primeira vez na década de 80 através de trabalhos realizados por dois pesquisadores franceses, o geofísico Morlet e o físico Grossmann (MORETTIN, 2014). Essa transformada sugere ser a TO mais adequada para o levantamento de informações espectrais em séries temporais não estacionárias e com uma vasta variedade de frequências, cuja Transformada de Fourier Janelada (TFJ) não apresenta bons desempenhos. Através de dilatação e compressão das janelas móveis no tempo ou espaço, esta técnica consegue capturar sinais de alta e baixa frequência simultaneamente, ao contrário da TFJ que possui a janela fixa em um determinado intervalo (BARBOSA; BLITZKOW, 2008). Ela é obtida a partir da convolução da série temporal com a função ondaleta.

A coerência espectral (WTC) é uma medida da correlação cruzada entre duas séries temporais como função da frequência que permite identificar as áreas comuns do espectro nas quais as duas ST apresentam alta amplitude espectral. A WTC é calculada a partir das transformadas de ondaletas na forma contínua (CWT) das duas séries (TORRENCE; COMPO, 1998; FRIGO, 2013). A ideia por trás da WTC é aplicar a wavelet como um filtro passa-banda nas séries. Diferente das demais técnicas, esta não usa bases do tipo seno e cosseno e sim bases com energia finita.

Uma função onda adequada para capturar variações nos sinais geofísicos é a wavelet complexa de Morlet, que através da resposta de valores de coerência entre 0 e 1 permite analisar mudanças de amplitude e fase do sinal em um nível de detalhe espacial e temporal bastante satisfatório (>90%). A wavelet de Morlet, por definição, consiste de uma onda plana modulada por um envelope Gaussiano, cuja expressão matemática pode ser descrita na forma:

$$W_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \int_{t=1}^N f(t) \psi_0^* \left[\frac{t-k}{j} \right] dt \quad \text{EQ. 5}$$

$$\psi_0(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{1}{2}t^2} \quad \text{EQ. 6}$$

O cálculo que descreve a análise de coerência é descrita pela EQ. 7, sendo S um operador de suavização, w_x^n e w_y^n resultados da convolução entre as ST e a base de Morlet e w_n^{XY} a análise de ondaletas cruzadas entre as ST.

$$R_n^2 = \frac{|S(s^{-1}w_n^{XY}(s))|^2}{S[s^{-1}|w_n^X(s)|^2][s^{-1}.S|w_n^Y(s)|^2]} \quad \text{EQ. 7}$$

Segundo definido por Torrence & Webster (1999), S_{escala} está relacionado à suavização na escala dos eixos das ondaletas e S_{tempo} pela suavização no eixo temporal.

$$S_{(w)} = S_{escala}(S_{tempo}(W_n(s))) \quad \text{EQ. 8}$$

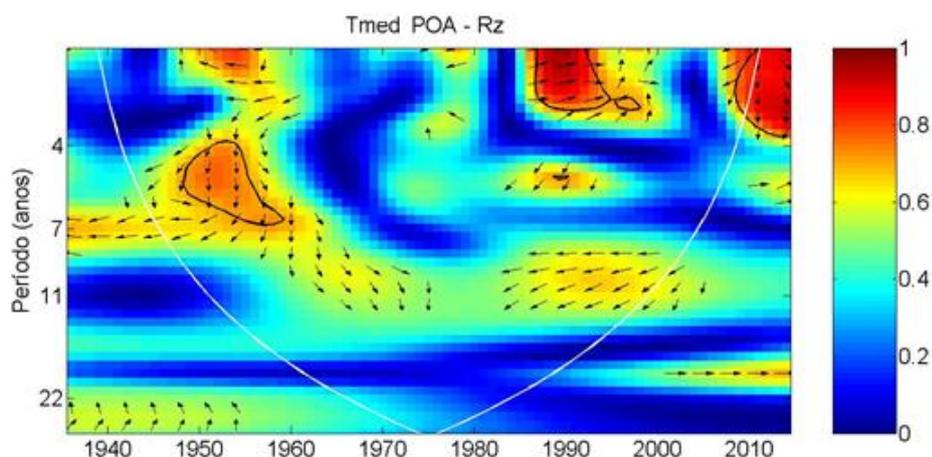
$$S_{tempo}(W)|_s = \left[W_n(S) \otimes c_1^{\frac{-t^2}{2s^2}} \right] |_s \quad \text{EQ. 9}$$

$$S_{escala}(W)|_s = (w_N(S) \otimes c_2 \Pi(0,6))|_s \quad \text{EQ. 10}$$

Em conjunto com a análise de R_n^2 , devem ser analisados os ângulos de fase X_n e Y_n , que permite avaliar se as regiões de altos valores de coerência espectral apresentam linearidade entre si, através do coeficiente de correlação de Pearson, reforçando a possibilidade de que exista relação de causalidade entre as duas séries temporais investigadas (FRIGO, 2013; GRINSTED, 2014). Setas apontando totalmente para a direita ou totalmente para a esquerda nos diz que os picos das duas ST estão em fase ou anti-fase, respectivamente. Qualquer outra configuração dos ângulos de fase que não seja 0° ou 180° indica uma relação não linear. As cores quentes surgem quando há alto índice de coerência enquanto as setas pretas representam o ângulo de fase entre as séries. Contornos pretos indicam índice de confiabilidade de 95% ou mais e foram inseridos automaticamente apenas em altos valores de coerência. A condição de que a wavelet não é completamente localizada no tempo implica em artefatos de borda nos resultados gráficos da coerência. Dessa forma, para os efeitos de borda não serem ignorados é útil introduzir um cone de influência e assumir que parcelas dos valores externos ao cone estarão sujeitos a

erros. Aqui tomamos o cone de influência delimitado com a cor branca como a área abaixo do qual o espectro de potência de wavelet caiu por 1×10^{-2} em relação ao valor máximo. Um exemplo dos resultados gerados por este programa pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Exemplo do resultado da WTC para série de Rz com Tmed para a estação de POA.



Fonte: Autor.

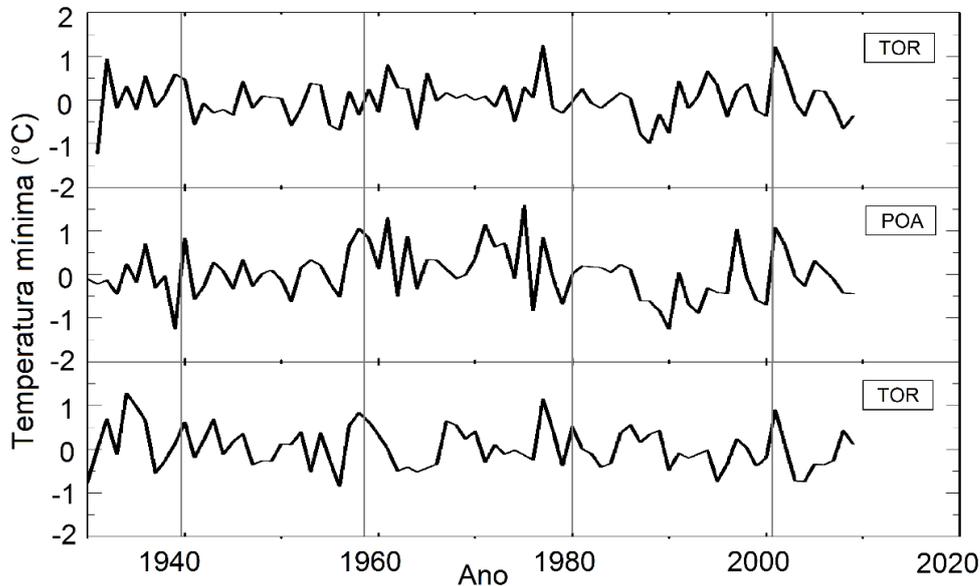
Para este exemplo, utilizamos a série de Tmed de POA para cruzar com a série de Rz, ou seja, o interessante neste caso é analisar o comportamento do gráfico na faixa compreendida pelo período de 11 anos, indicado no eixo y, ao longo do intervalo temporal, no eixo x. Neste caso, não houve uma alta coerência espectral entre as séries de Rz e Tmed de POA, cujos maiores valores foram vistos de 1960 a 1975 e de 1982 a 2000, apresentando caráter intermitente e correlação anti-fase no último intervalo, ambos com 60% de coerência.

8 RESULTADOS

8.1 Análises preliminares das Séries Temporais

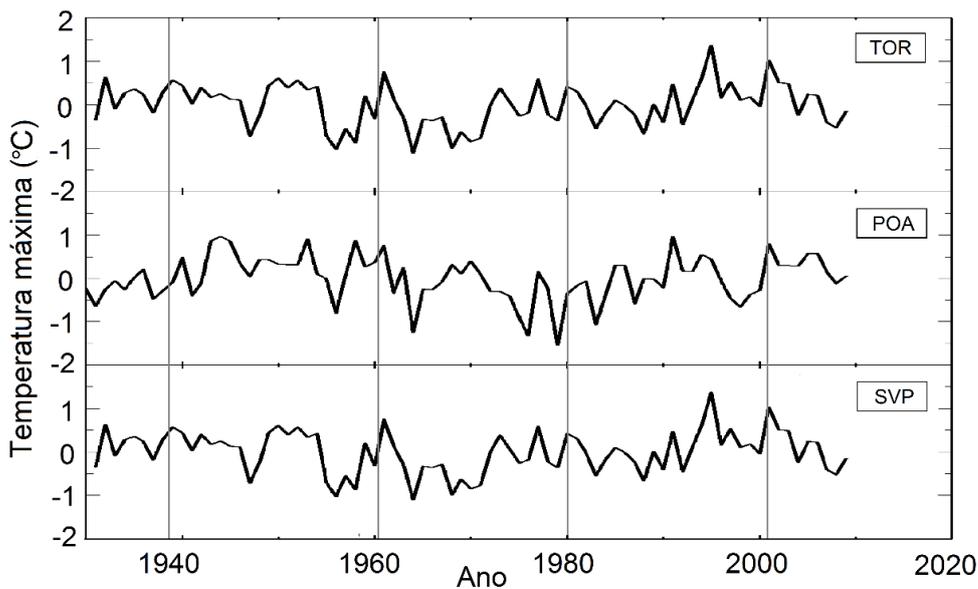
Os gráficos a seguir são referentes às séries temporais de temperatura originais após a remoção da tendência linear de longo período. Esta técnica permite uma melhor observação dos máximos e mínimos presentes nas séries originais e possibilita a utilização de ferramentas de análise espectral.

Figura 20 - Séries temporais das anomalias de temperaturas mínimas anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP. As bandas sombreadas indicam eventos de máxima temperatura ocorridos simultaneamente, em épocas próximas do ciclo solar duplo (Rz22).



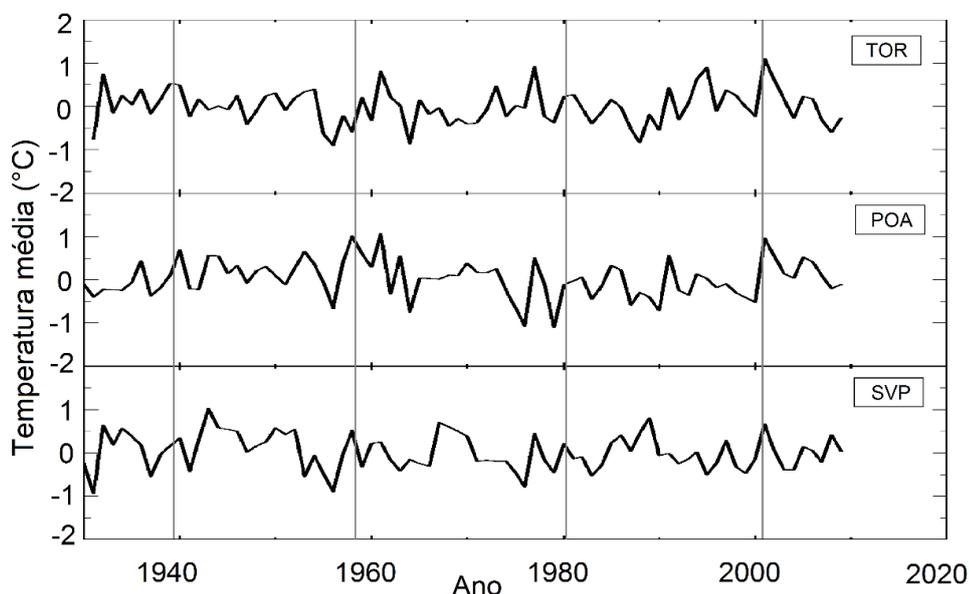
Fonte: Autor.

Figura 21 - Séries temporais das anomalias de temperaturas máximas anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP. As bandas sombreadas indicam eventos de máxima temperatura ocorridos simultaneamente, em épocas próximas do ciclo solar duplo (Rz22).



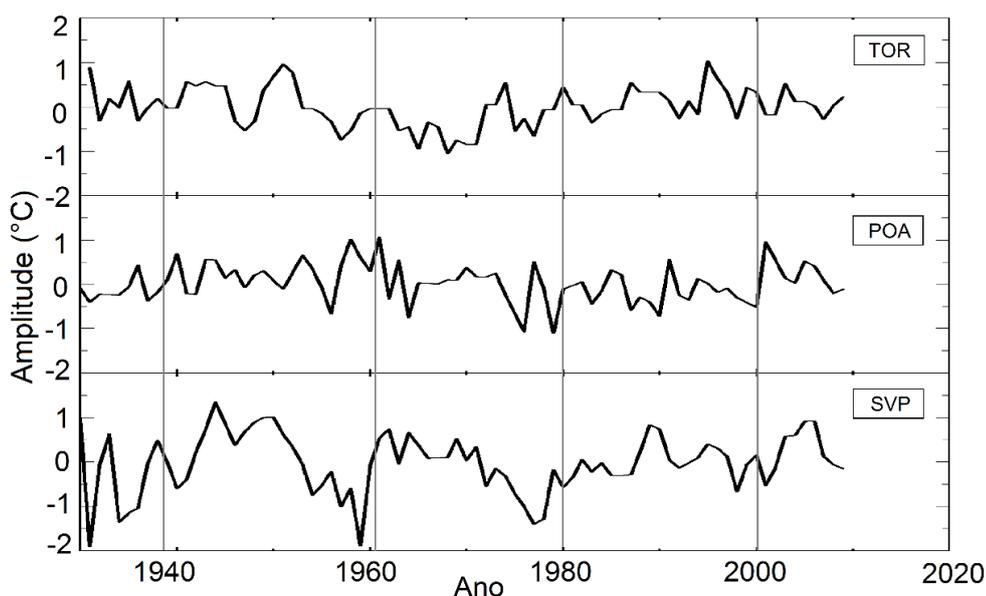
Fonte: Autor.

Figura 22 - Séries temporais das anomalias de temperaturas médias anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP. As bandas sombreadas indicam eventos de máxima temperatura ocorridos simultaneamente, em épocas próximas do ciclo solar duplo (Rz22).



Fonte: Autor.

Figura 23 - Séries temporais das anomalias de amplitudes térmicas anuais, livre de tendências, das estações meteorológicas: TOR, POA e SVP. As bandas sombreadas indicam eventos de máxima temperatura ocorridos simultaneamente, em épocas próximas do ciclo solar duplo (Rz22).



Fonte: Autor.

Podemos observar nas Figuras 20, 21, 22 e 23 onde são apresentadas as séries temporais livres de tendências lineares de longo período, que o comportamento

das curvas de temperatura das estações meteorológicas de TOR, POA e SVP é similar, como o esperado. A semelhança é explicada devido às estações estarem localizadas próximas umas das outras. Eventuais diferenciações podem ser atribuídas aos aspectos locais, pelos efeitos de continentalidade e maritimidade e, principalmente, pelas variações latitudinais, que imaginamos serem responsáveis pela maior parcela de tais disparidades. Esses fatores puderam implicar pequenas dissociações entre as três séries para um mesmo intervalo temporal nas questões de amplitude dos valores ou, mais raramente, mudança no sentido da curva (acréscimo/decréscimo). Linhas sobreadas foram adicionadas em épocas próximas aos ciclos de Hale (~22 anos) em seus períodos de atividade máxima, sugerindo uma relação entre os picos de temperatura com a alta atividade dos ciclos magnéticos solares para estas datas.

Os três primeiros conjuntos de séries temporais apresentados pelas Figuras 16, 17 e 18 revelaram uma ótima correlação entre altas temperaturas e os ciclos de 22 anos e, como mostra a Figura 22, houve boa concordância entre os picos de da ST Amplitude (Amp) com máximos dos ciclos de Hale. Vale mencionar que a série POA para a mesma variável Amp apresentou as mais altas grandezas de valores entre todas as séries investigadas, com medidas que oscilam entre $-2,0^{\circ}\text{C}$ e $+1,5^{\circ}\text{C}$.

8.2 Resultados ARIST

O resultado da análise espectral das séries temporais de Tmax, Tmin, Tmed e Amp foram investigados a partir do método de ARIST, cujos resultados gráficos estão apresentados na integra no APÊNDICE A. Vale mencionar que foram utilizadas os dados de anomalia térmica para o cálculo. Sendo assim, o valor espectral máximo possível é 2°C , ou seja, uma amplitude de 0.5°C nos resultados ARIST indica que no mínimo 25% da variação de temperatura que ocorreu está totalmente atribuída ao determinado ciclo.

Nas séries de Tmax (Figura A1_01) verificou-se altos valores em periodicidades mais longas para todas as três estações, principalmente para o intervalo que pode ser associado ao Ciclo solar de Gleissberg (~85 anos) e para o ciclo de Hale (18 a 26 anos), cuja maior manifestação deste último ciclo foi visto nos dados de SVP com amplitude maior que 0.4°C . Também houve alta significância espectral no intervalo

pertencente ao ciclo de Schwabe, que se refere à atividade solar (AS) e possui periodicidades de ~ 11 anos. Os ciclos mais curtos (de 3-7 anos) estão relacionados aos eventos La Niña e El Niño (*ENSO*) e, assim como as outras periodicidades anteriormente mencionadas, foram presenciados em todas as três estações.

Analisando a Figura A1_02 (que é referente às séries de T_{min}) é possível notar uma menor influência dos ciclos solares, cuja manifestação discreta do ciclo de Hale (~22 anos) ocorre em TOR e um pouco mais acentuada em POA. O ciclo de ~11 anos é visto apenas em SVP, porém duas vezes e com até 0.3°C de amplitude. Diferentemente de T_{max}, os sinais de maiores comprimentos de ondas nas séries de T_{min} sugerem estarem relacionados aos Ciclos de Bruckner (~33 anos) em TOR e ao Quarto Harmônico de Suess em SVP. Além destas, é vista uma periodicidade de ~60 anos que pode estar associada ao Ciclo de Suess e/ou à Oscilação Multidecadal do Atlântico nos dados de POA.

O gráfico de T_{med} (Figura A1_03) mostra que a parcela da energia espectral nos dados atribuída aos ciclos decadais (~11 anos) em TOR e POA é de baixa amplitude enquanto a mesma periodicidade não foi registrada em SVP. As três estações detectaram periodicidade bidecadal, ou seja, na faixa de frequência referente ao ciclo de Ciclo de Hale, mas todas apresentaram valores muito baixos de amplitude.

O gráfico da Amplitude (Figura A1_04) apresentou resultados curiosos e de difícil correlação. No mesmo tempo que detectou periodicidades de ~11 anos para TOR e POA, sinais para o intervalo de ~22 anos nessas duas estações não foram obtidas. Enquanto isso, SVP que não detectou periodicidades de ~11 anos na série revelou a maior amplitude energética para o Ciclo de Hale (ciclo que descreve a inversão da polaridade magnética solar - ICMS), além do Quarto Harmônico de Suess para TOR e SVP e do Gleissberg para POA. As periodicidades de alta frequência referentes ao *ENSO* continuam presentes em todas as séries investigadas.

8.2.1 Mapas ARIST

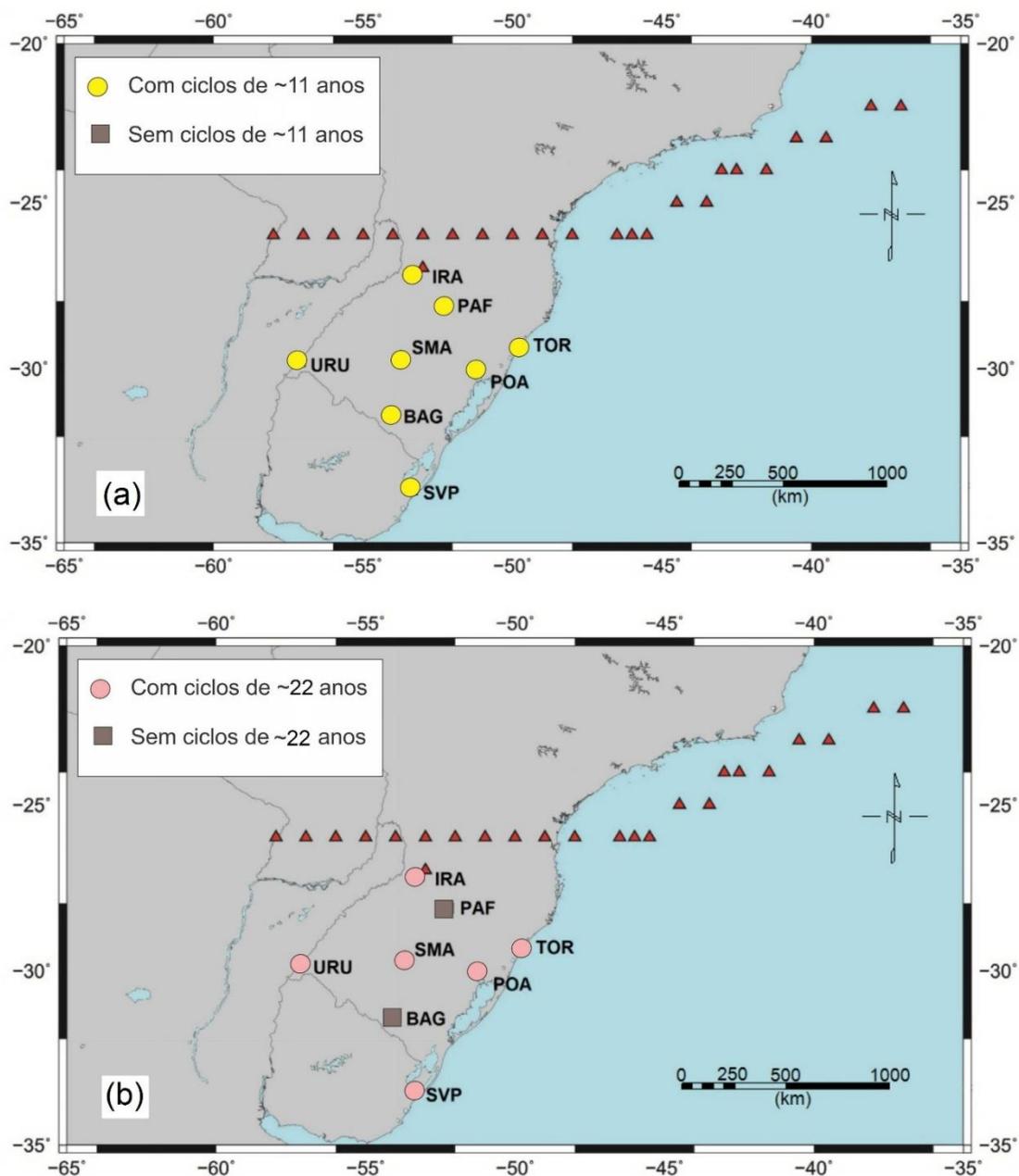
Para fornecer uma avaliação qualitativa e facilitar a apresentação final dos resultados do ARIST, estes foram organizados e resumidos em mapas, nas Figuras 24, 25, 26 e 27. Além das três estações utilizadas nesse trabalho os mapas também abrangem os resultados anteriores obtidos por Smaniotta (2015) e Lima (2015). As

estações adicionadas localizam-se em Iraí (IRA), Passo Fundo (PAF), Uruguaiiana (URU), Bagé (BAG) e Santa Maria (SMA), completando o banco de dados de todos os registros de temperatura do Rio Grande do Sul, para um período mínimo de 1935-2008. Os mapas indicam onde houve periodicidades de 11 e 22 nas séries. Não foram gerados mapas para os ciclos SOI (2-7 anos) pois esses estiveram presente em todas as séries observadas, tornando a tarefa sem justificativa (afirmativa inválida para as estações de IRA, PAF e BAG pois esse intervalo nessas estações não foi investigado e nada pode-se concluir).

Não foi possível encontrar uma relação entre o ciclo da AS (Ciclo de Schwabe) e da ICMS (Ciclo de Hale) registrados nas estações do RS com a distância da trajetória do centro da AMAS em todos os casos. Porém, verifica-se que a estação de IRA, que é a estação localizada mais próxima da trajetória da anomalia e cujo centro da AMAS já coincidiu no passado com sua localização, registrou ambos os ciclos em todas as séries. Apesar da estação de PAF ter apresentado ciclos de ~22 anos apenas na variável Amp, podemos ver que as estações localizadas mais ao norte (e menos distantes do centro da AMAS) tiveram um maior registro de ciclos, indicando possível influência do centro da anomalia nos registros de temperatura para estações próximas. Observou-se também que houve um maior número de periodicidades de ~11 em comparação com periodicidades de ~22 anos, fato previsível uma vez que ciclos mais curtos tem chances de ocorrer com mais frequência ao longo do tempo. Nos dados de Tmax, o ciclo de ~11 esteve presente em todas as estações e o ciclo de 22 anos só não foi visto em BAG e PAF. Os mapas de Tmin apresentaram resultados curiosos pois, com exceção de Bagé, todas as estações alinhadas longitudinalmente (longitudes ~ 53°W) tiveram o ciclo de ~11 anos registrado nas séries, mas para os ciclos de 22 anos o mesmo conjunto de dados apresentou comportamento contrário, obtendo registro da periodicidade nas estações centrais e posicionadas na mesma latitude (latitudes ~ 30° S), além de IRA que também detectou essa periodicidade.

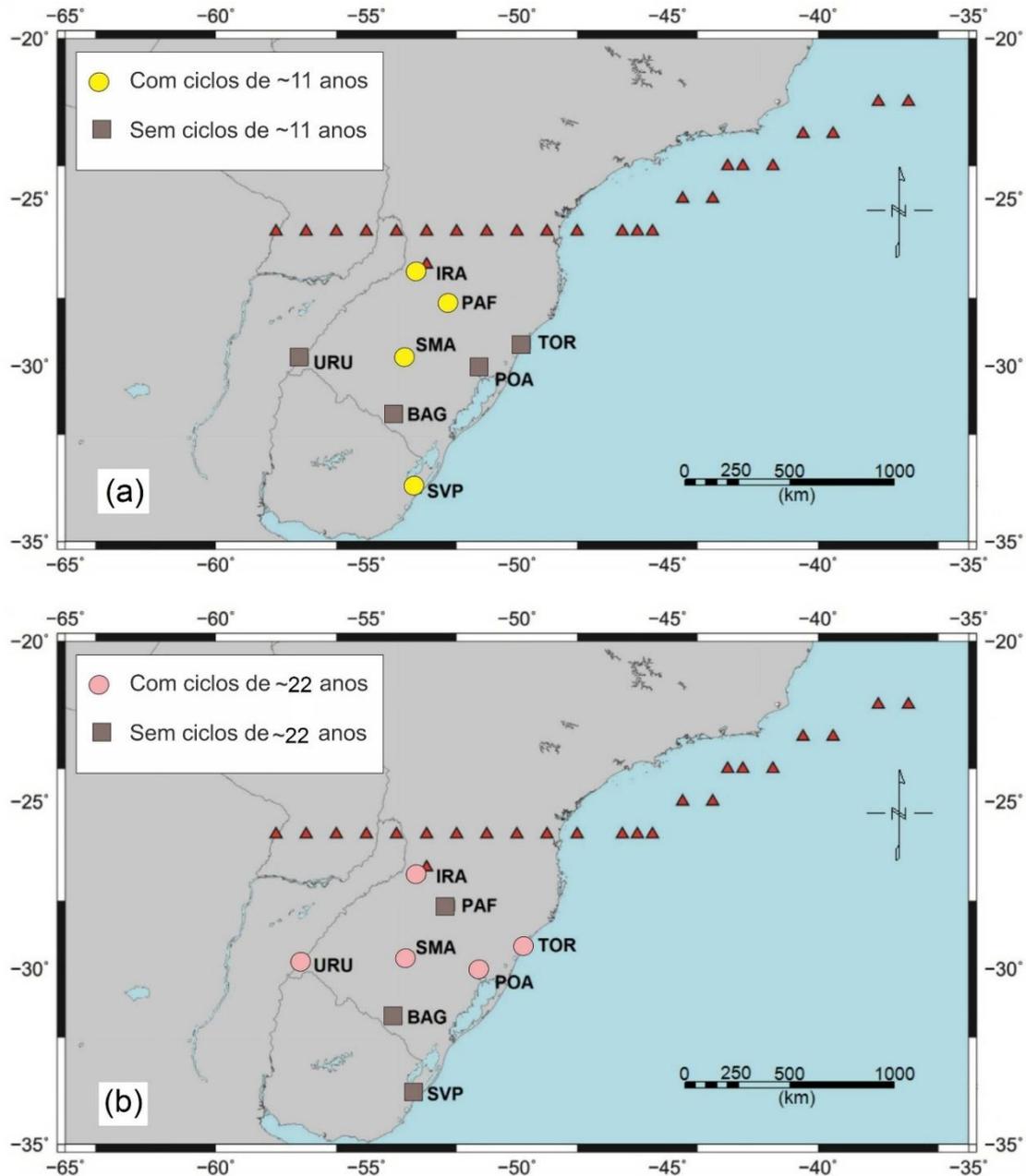
Todavia, as estações localizadas mais ao Norte apresentaram maiores registros dos ciclos nas séries de Tmin. Tmed apresentou ciclicidade de ~11 anos em todas menos em SVP e ciclicidade de ~22 anos em todas menos PAF e BAG. Com exceção de URU e SVP o ciclo de Schwabe foi visto em todas as estações nas séries de Amp e nas estações mais próximas do centro da Anomalia o ciclo de Hale tende a ser presente nesse conjunto.

Figura 24 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Tmax. As esferas representam estações onde houve presença do ciclo enquanto quadrados indicam estações que não registraram tais periodicidades.



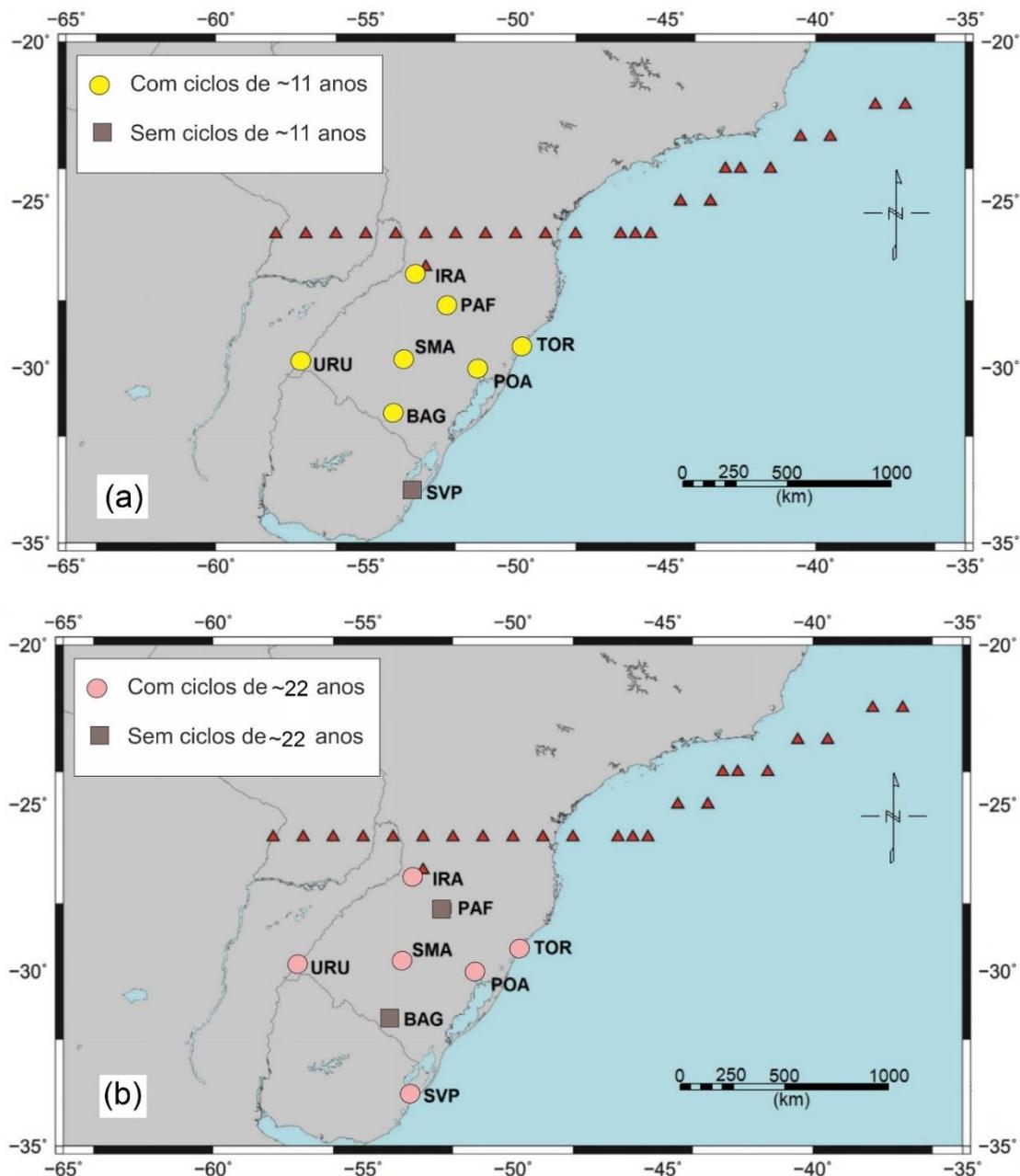
Autor

Figura 25 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Tmin. As esferas representam estações onde houve presença do ciclo enquanto quadrados indicam estações que não registraram tais periodicidades.



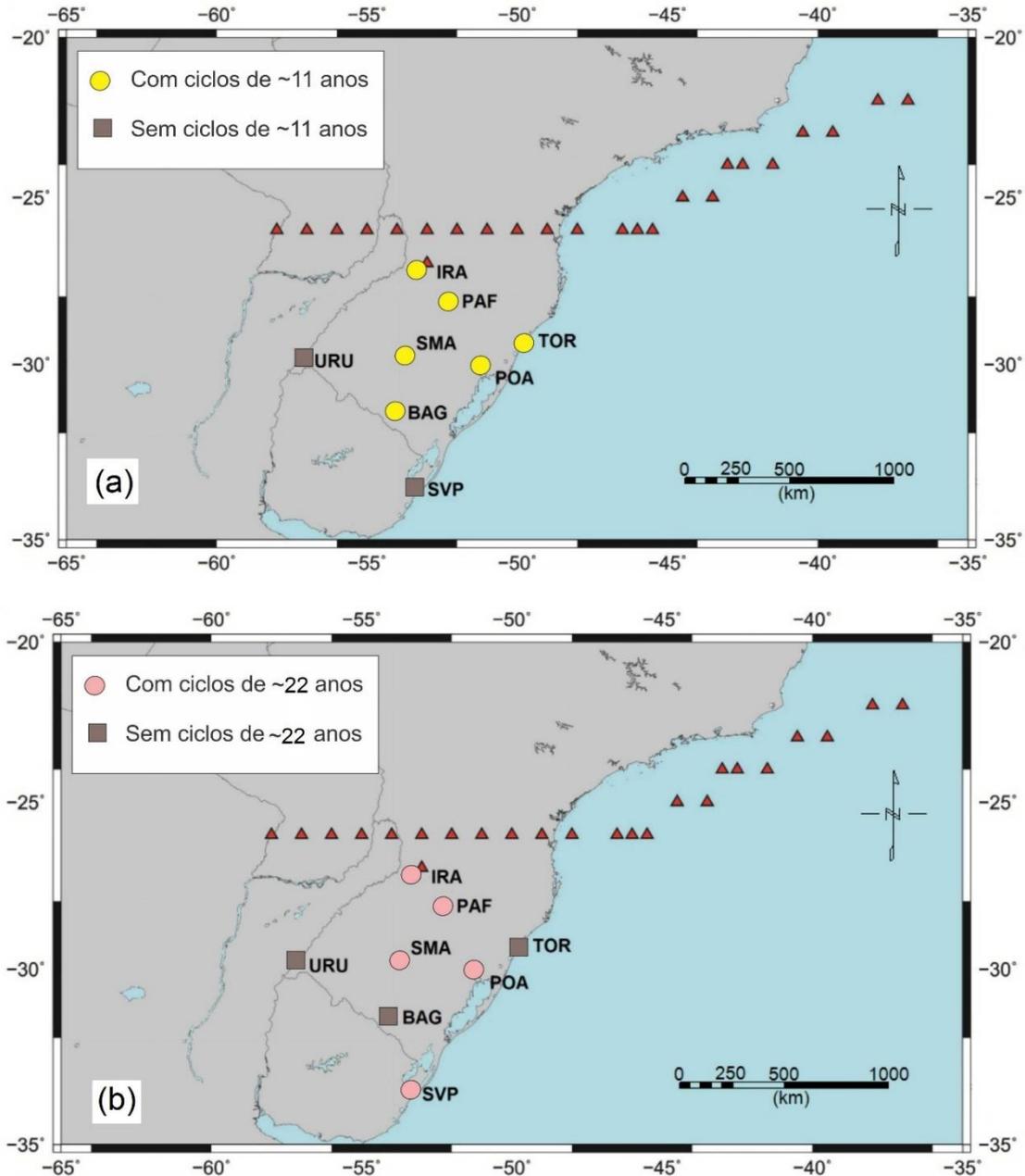
Autor.

Figura 26 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Tmed. As esferas representam estações onde houve presença do ciclo enquanto quadrados indicam estações que não registraram tais periodicidades.



Autor.

Figura 27 – Presença do ciclo de 11 anos (a) e 22 anos (b) nos dados de Amp. As esferas representam estações onde houve presença do ciclo enquanto quadrados indicam estações que não registraram tais periodicidades.



Autor.

8.3 Resultados WTC

A coerência entre as séries temporais de Rz, Rz22 e SOI com as séries de Tmax, Tmin, Tmed e Amp foram investigados a partir do método de WTC, cujos resultados

são fornecidos graficamente no APÊNDICE B. Para o processamento também fez-se uso dos dados de anomalia térmica. A interpretação dos resultados é dada a seguir.

8.3.1 Resultados das análises de coerência entre séries temporais de temperatura e Rz.

A Figura A2_01 representa a coerência espectral entre as séries de Tmax e Rz para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Nela é possível notar que os ciclos de periodicidades curtas se manifestaram de forma intermitente e não linear na estação de TOR e SVP para intervalos de ~4 anos, referente ao ciclo ENSO (2-7 anos). Em POA, coerência para o mesmo intervalo foi vista no início da série até 1960 e no final, a partir de 1990, com relação linear e em fase apenas para a última parte. O ciclo de 11 anos se dá de forma contínua ao longo de toda a série de TOR e em anti-fase, com valor de coerência máxima até 1970 e valores medianos de ~0.6 a partir dessa data. Em POA a coerência para este intervalo se deu a partir de 1960 e de forma contínua até o final e com valores próximos a 0.8 enquanto em SVP houve baixos valores de coerência mas dentro do COI. Sinais do Ciclo de Hale (22 anos) foram vistos de forma contínua ao longo de toda a estação de POA e SVP com valores médios de coerência e ambos com relação anti-fase, mas não houve sinal deste intervalo em POA.

A Figura A2_02 representa a coerência espectral entre as séries de Tmin e Rz para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Ciclos de 2-7 anos se manifestaram de forma intermitente para as três estações. Uma relação linear anti-fase foi vista de 1960 a 1970 em TOR e em fase no período 1985-1990 para POA e SVP. Quanto ao ciclo de 11 anos ele foi visto de forma contínua ao longo de toda a série Tmin-SVP, estando em fase nos anos 1955 a 1970, e valores de coerência próximos a 1 a partir de 1985. Em POA ciclicidades de 11 anos apenas a partir 1970 em diante enquanto que TOR só por volta de 1985 em diante. O ciclo de 22 anos foi presenciado dentro do COI apenas em POA, de forma contínua, em fase e com valor modesto de coerência durante todo o intervalo investigado.

A Figura A2_03 descreve a coerência espectral entre as séries de Tmed e Rz para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Nela é possível notar que os ciclos de periodicidades curtas se manifestaram de forma intermitente e de predominância linear em fase para os registros mais recentes. TOR revelou no

intervalo de 11 anos e com sinal contínuo altos valores de coerência entre Tmed e Rz ao longo de todo o registro temporal. Em POA esse ciclo foi observado apenas por volta de 1970 e depois de 1982 a 2005 e em SVP de 1970 em diante, sendo que a partir de 1980 o sinal se tornou mais forte e com relação linear em fase. Redigindo a atenção ao ciclo de 22 anos, que não foi marcante de forma geral nesse conjunto de ST, ele foi expressado moderadamente somente em SVP do início da série até 1990.

A Figura A2_04 revela a coerência espectral entre as séries de Amp e Rz para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Ciclos ENSO são descritos principalmente em TOR e SVP cuja última estação teve relação linear e coerência de 70% ou 80% de 1973 a 1995. A coerência com o ciclo de Schwabe (11 anos) é muito alta ou máxima até 1970 em TOR. Nada desse ciclo foi registrado em POA mas em SVP volta a aparecer de forma contínua dentro do cone de influência, porém com valores baixos. Ciclos de Hale em POA e em SVP mostraram relação predominantemente anti-fase e sinal em todo intervalo e com amplitude de ~ 0.6 .

8.3.2 Resultados das análises de coerência entre séries temporais de temperatura e Rz22.

A Figura A2_05 descreve a coerência espectral entre as séries de Tmax e Rz22 para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Evidentemente houve grande correlação das séries de Tmax com a série Rz22. Os valores de coerência são máximos (ou seja, 1) em POA e em SVP em todo o intervalo de tempo, ambos em fase. Em TOR o sinal também é persistente ao longo de todo o intervalo analisado, porém com amplitudes discretas e sinal anti-fase depois da década de 90. Em SVP também o sinal de 11 se manteve contínuo ao longo do tempo, e em fase até 1960. Em TOR o ciclo de Schwabe foi visto em 1950-1970 e 1980-2014 enquanto ENSO se mostrou intermitente nessa estação e em SVP, mas em POA o período em que houve coerência de Rz22 com Tmax foi de 1970-2005.

A Figura A2_06 mostra a coerência espectral entre as séries de Tmin e Rz22 para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Nível de coerência alto e em fase, com coerência de 80% a 100% no intervalo até 4 anos em SVP para o período 1950-1990, mas para os ciclos de 11 e 22 anos a coerência com Rz22 foi nula. Em POA valor de coerência de ~ 0.7 e em todo registro temporal para o Ciclo de Hale, de 1950 a 1980 para o Ciclo de Schwabe e em TOR valores maiores que 0.6 somente

após o COI, região que pode estar contaminada com erros. TOR apresentou resultados fortes e intermitentes de coerência para atividades relacionadas ao ENSO.

A Figura A2_07 representa a coerência espectral entre as séries de Tmed e Rz22 para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Pode-se notar que os dados de Tmed sofreram grande influência de Tmax, já que os gráficos estão bem parecidos, com exceção para o Ciclo de Hale em POA que se destacou apresentando valores de máxima coerência e fase para todo período de investigação em Tmax, diferentemente do que ocorreu em Tmed. Para Tmed-TOR a interpretação é a mesma da feita em Tmax-TOR e entre Tmed-SVP e Tmax-SVP a diferença é de que a primeira possui coerência de valores mais altos em relação à segunda e um novo sinal fraco por volta de 1990 para um intervalo de 2-7 anos.

A Figura A2_08 descreve a coerência espectral entre as séries de Amp e Rz22 para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Para TOR apenas ciclos de 2-7 anos obtiveram coerência enquanto POA teve sinais apenas entre as periodicidades 11 e 22, onde apresentaram uma ótima concordância linear com fase zero e valores acima de 0.8 para todo o período. Em SVP o sinal também permaneceu constante ao longo da série no mesmo intervalo porém as séries estiveram fase apenas fora do COI, de 1934 a 1970. Sinais dos ciclos ENSO aparecem com carácter intermitente em TOR e SVP.

8.3.3 Resultados das análises de coerência entre séries temporais de temperatura e SOI.

Este conjunto de gráficos é caracterizado por apresentar grande semelhança entre eles, principalmente para Tmax e Tmed. A Figura A2_09 é referente à coerência espectral entre as séries de Tmax e SOI para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Sinais dos ciclos ENSO aparecem de forma intermitente nas três estações, sendo que apenas em POA de 1970 a 2000 os picos das duas séries coincidiram e se somaram, ou seja, estiveram em fase. Na faixa de intervalo de 22 anos houve coerência significativamente importante somente em SVP e até meados de 1990, ademais não foram registradas outras periodicidades decadais e/ou multidecadais entre Tmax e SOI.

A Figura A2_10 é referente à coerência espectral entre as séries de Tmin e SOI para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Nenhuma estação

apresentou coerência no intervalo do Ciclo de Hale. Quanto ao Ciclo de Schwabe teve sinal intermitente para TOR, até 1950 e em fase a partir de 1980, e em POA no intervalo temporal 1935-1980 e 1999-2014 em fase. Apenas uma zona de coerência para, e SVP, que ocorreu no intervalo 1988-2014.

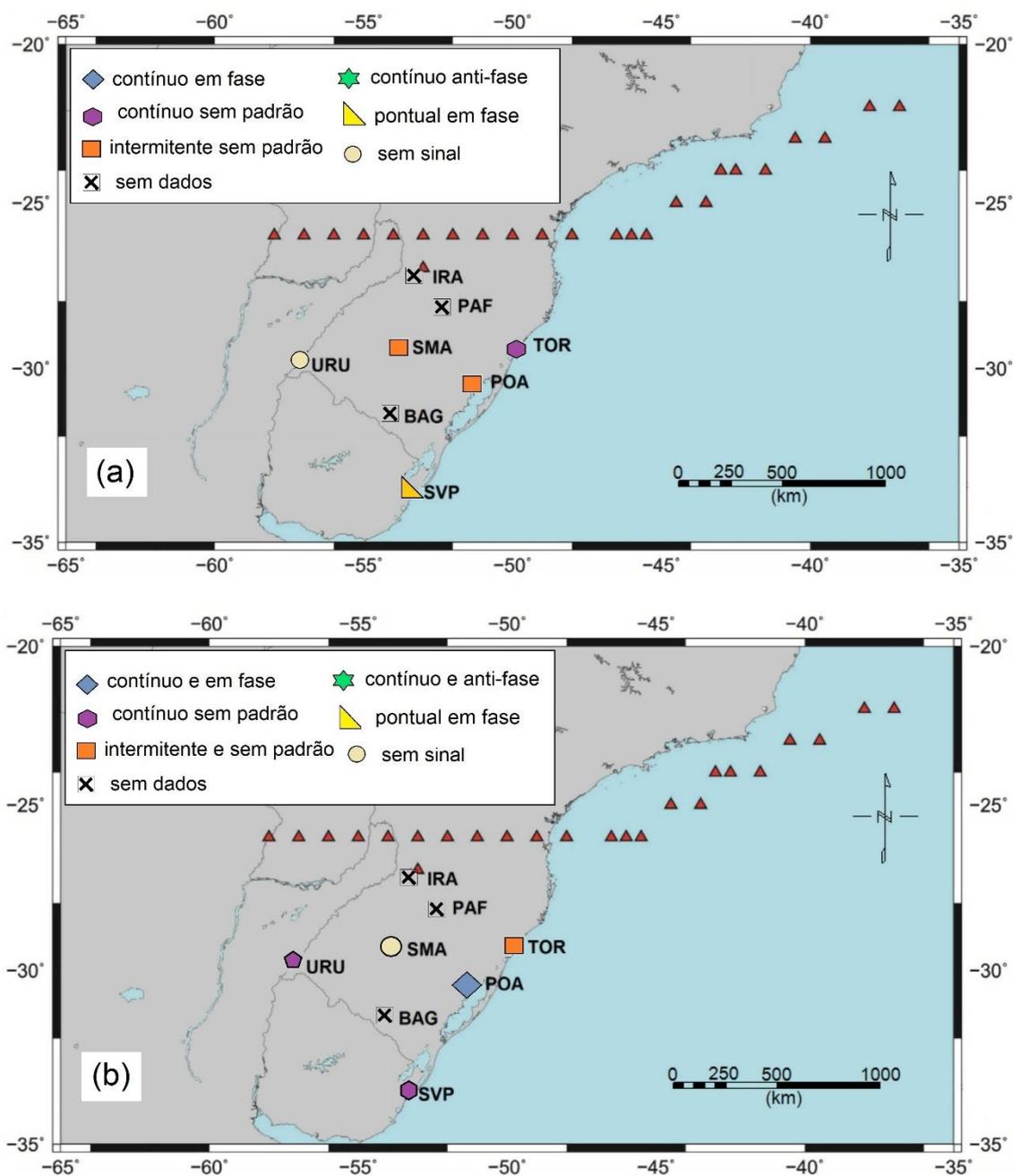
A Figura A2_11 mostra a coerência espectral entre as séries de Tmed e SOI para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Muito parecida com a Figura A2_09 com diferença que o sinal para o período compreendido ao Ciclo de Schwabe é mais forte a partir de 1980, possuindo valores de amplitude entre 0.8 e 0.9. Também em SVP o sinal de 1970 a 2010 desaparece no intervalo de 2-7 anos e surge um sinal desde 1990 na faixa dos 11 anos mas fora do COI.

A Figura A2_12 representa a coerência espectral entre as séries de Amp e SOI para as estações de TOR, POA e SVP, respectivamente. Destaque para a estação meteorológica de SVP que apresentou sinais muito fortes nos ciclos relacionados ao *ENSO* para todo o período observado e com as ST em fase. Em TOR sinais esporádicos ao longo de todo o tempo para o mesmo ciclo enquanto em POA cores quentes apenas por volta do ano 2000. O ciclo de Schwabe foi presenciado no final da série Amp-TOR e de 1960 até 1985 em POA, ambos com valores medíocres de coerência. Apenas SVP apresentou sinais do ciclo de Hale e se deu de forma contínua e bastante definida, com valores de 0.7 a 0.9.

8.4 Mapas WTC

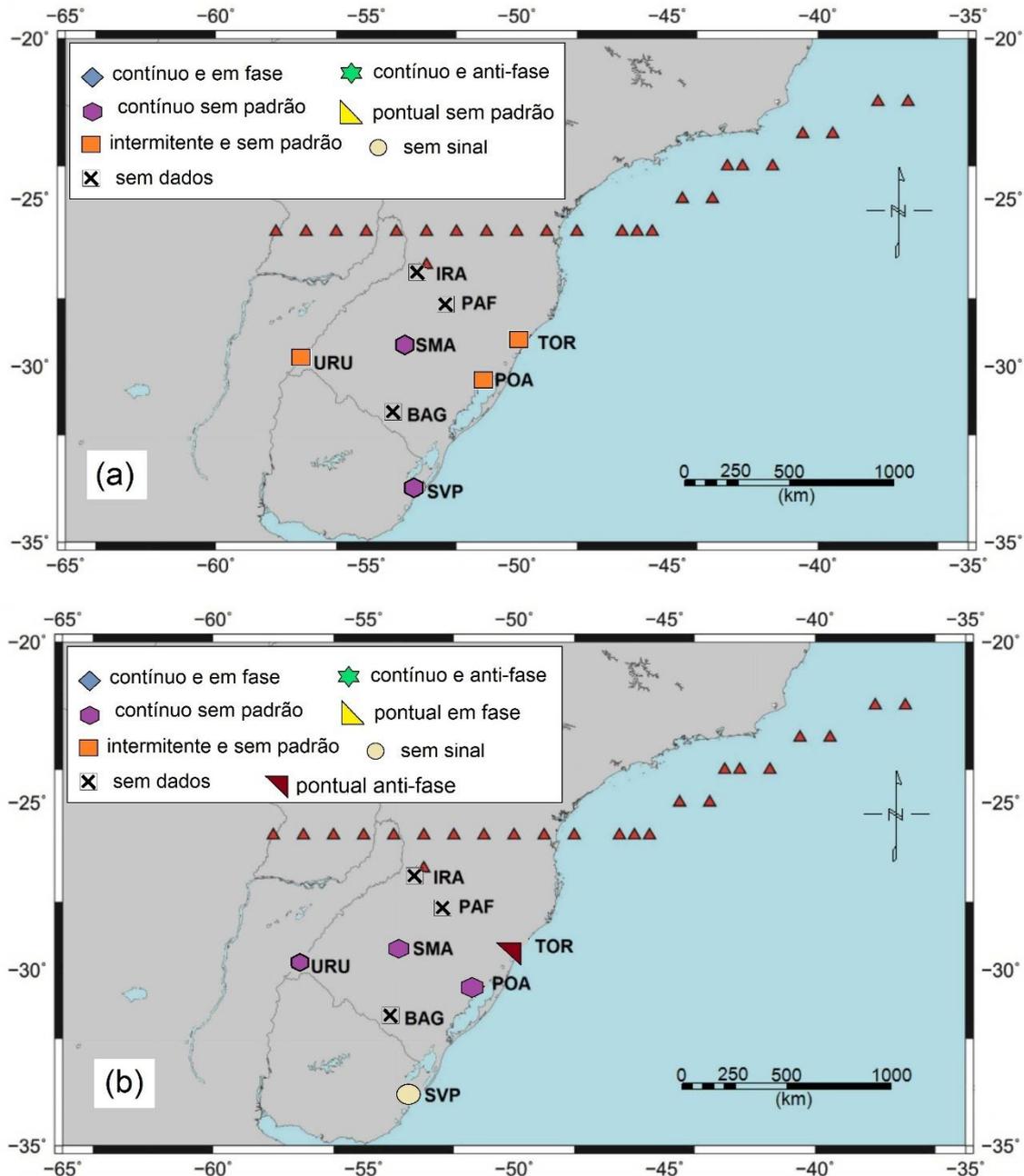
Um resumo simplificado dos resultados da análise de coerência entre Tmax, Tmin, Tmed e Amp com Rz e Rz22 pode ser obtido através dos mapas das figuras 28, 29, 30 e 31. Onde foi feita a coerência com a série Rz foi observado e interpretado o intervalo de 11 anos e para coerências com a série Rz22 foi observado e interpretado o intervalo de 22 anos. O sinal foi classificado como “contínuo” para sinal com área de abrangência em todo o comprimento da série, “pontual” se ocorria uma vez e com área de abrangência menor que metade do comprimento e “intermitente” se o sinal aparecia mais de uma vez na série para o mesmo intervalo ou uma vez com área de abrangência $>1/2$ do intervalo total. Não houve análise de coerência nas estações de Iraí (IRA), Passo Fundo (PAF) e Bagé (BAG).

Figuras 28 – Coerência entre Tmax e Rz (a) e Tmax e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.



Fonte: Autor.

Figuras 29 – Coerência entre T_{min} e Rz (a) e T_{min} e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.

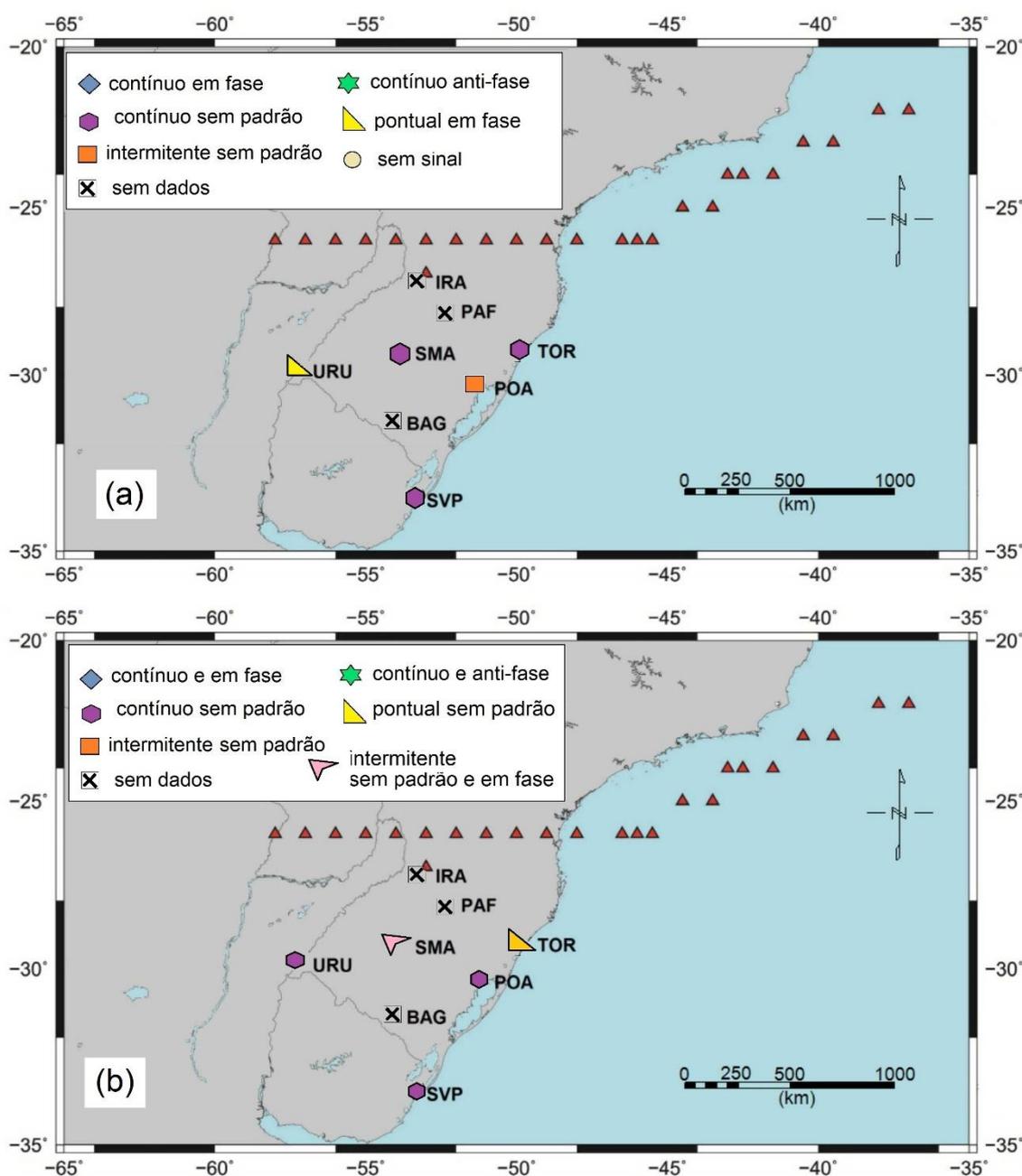


Fonte: Autor.

Pode-se observar que em muitos casos houve registro contínuo não-linear, ou seja, contínuo sem padrão, principalmente para as séries de T_{med} e T_{min}. Sinal contínuo em fase apenas em POA nas séries de T_{max} e Amp, ambas para o ciclo de ~22 anos. Sinal contínuo sem padrão foi visto na latitude ~30°S em SMA na série de T_{min}, também com os dados Rz22. Os mapas da variável de T_{med} caracterizaram-

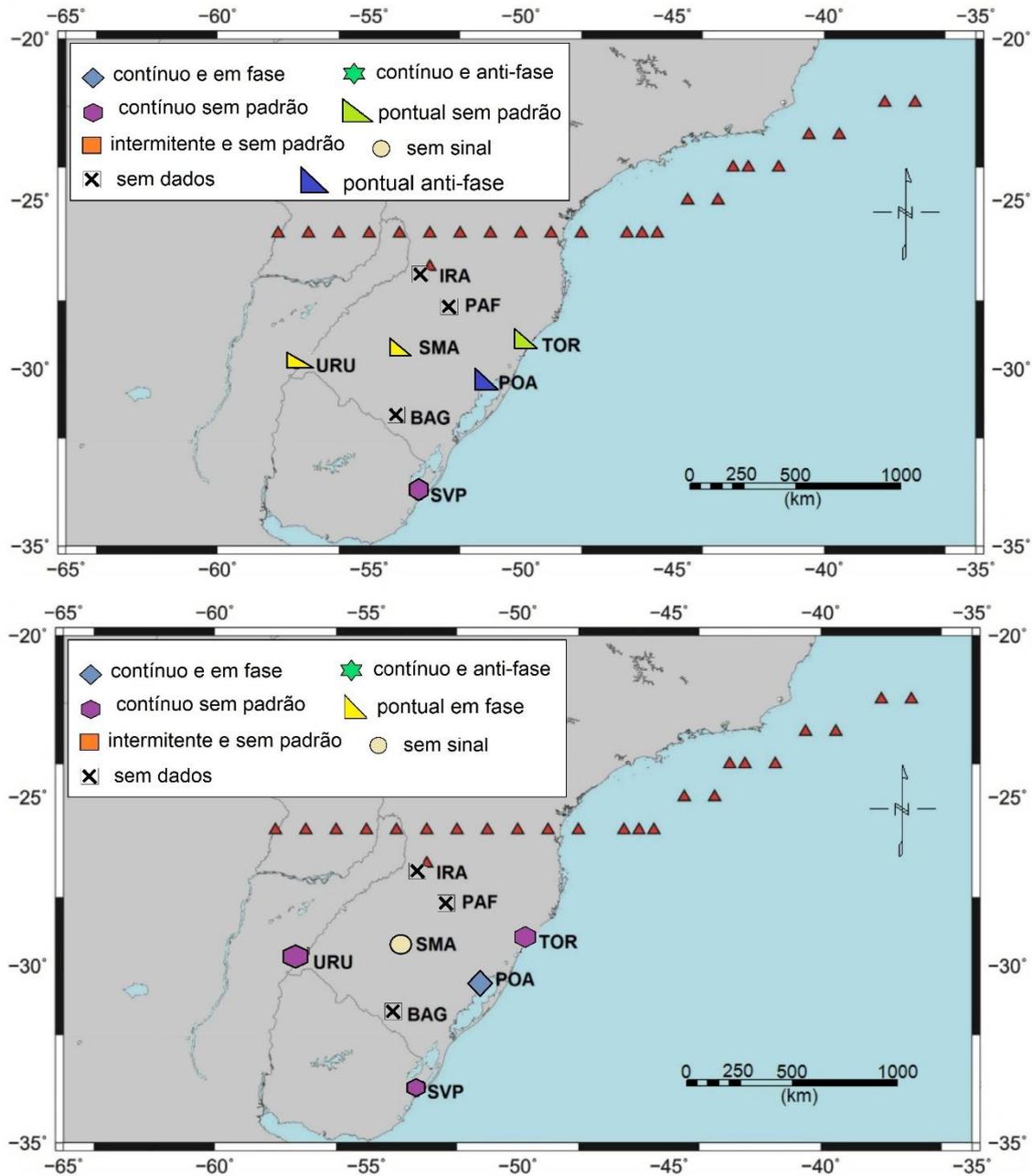
se por não apresentar padrão nos sinais de coerência. De modo geral houve uma maior coerência nos dados de Tmax e Tmin e, aparentemente, nos mapas de Amp para o ciclo de ~11 anos há uma certa tendência entre a localização latitudinal ~30°S e o tipo de sinal detectado (pontual), pois as estações TOR, SMA, POA e URU apresentam respostas semelhantes porém com fase variada. POA não apresentou ciclo de ~22 anos duas vezes nos mapas WTC

Figuras 30 – Coerência entre Tmed e Rz (a) e Tmed e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.



Fonte: Autor.

Figuras 31 – Coerência entre Amp e Rz (a) e Amp e Rz22 (b). Os símbolos representam diferentes comportamentos observados em cada estação.



Fonte: Autor.

9 DISCUSSÃO

Os resultados ARIST mostraram que as séries Tmax e Tmed tiveram uma maior influência de periodicidades características da atividade solar, sendo que em Tmax só não teve registro em PAF e BAG para o período de ~22 anos e Tmed apresentou

ciclicidade de ~11 anos em todas menos em SVP e ciclicidade de ~22 anos em todas com exceção novamente para PAF e BAG. As estações localizadas mais ao Norte apresentaram maiores registros dos ciclos nas séries de T_{min}, e também sugeriram dependência com a longitude. Verificou-se que a estação de IRA, que é a estação localizada mais próxima da trajetória do centro da Anomalia e cujo centro da AMAS já coincidiu no passado com sua localização registrou ambos os ciclos em todas as séries. Porém, PAF que é a segunda mais próxima apresentou ciclos de Hale apenas na série de Amp. Os mapas de Amp verificaram ciclos de ~11 anos em todas estações menos URU e SVP e periodicidades de ~22 anos em estações mais próximas do centro da AMAS. BAG caracterizou-se pela ausência de ciclos na maioria das séries e a estação de SVP, que está posicionada ao extremo Sul, não apresentou um padrão, dificultando qualquer entendimento relacionando as variações de temperatura com a posição em relação ao centro da AMAS.

Na análise de Coerência espectral WTC o sinal para intervalos de ~11 e ~22 anos é predominantemente contínuo e sem padrão, principalmente em T_{min} e T_{med}, sendo que os índices mais expressivos no valor de coerência para esses ciclos foram através das séries de T_{max} e T_{min}. Sinal contínuo em fase apenas em POA nas séries de T_{max} e Amp, para o ciclo de ~22 anos. Aparentemente a latitude teve uma implicância importante nos resultados de coerência já que sinais contínuos sem padrão foram vistos na latitude ~30°S no mapa de T_{min} e Rz22 e pontuais nos mapas de Amp e Rz. Quanto às três estações litorâneas, sinais dos eventos ENSO e do Ciclo de Schwabe e/ou Ciclo de Hale estiveram presentes em todas as séries analisadas. A característica do sinal de coerência nas séries SOI para o intervalo referente ao fenômeno ENSO foi exclusivamente intermitente e sem padrão.

10 CONCLUSÕES

Através dos mapas observou-se que as estações localizadas mais próximas do centro da Anomalia Magnética do Atlântico Sul tiveram um maior registro dos ciclos, indicando que o enfraquecimento do campo geomagnético causado pela anomalia pode ter facilitado o processo de entrada das partículas cósmicas e essas terem influenciado os valores de temperatura nas cidades próximas ao centro da AMAS. Mas ao contrário dos resultados encontrados por Rampelotto et al. (2012) e Frigo et

al. (2013), que observaram uma tendência de ciclos de 22 anos se manifestarem em áreas próximas do centro da Anomalia e nenhuma relação entre ciclos de 11 anos com a posição geográfica, o Ciclo de Schwabe apresentou grande dependência com o centro da mesma anomalia, ao mesmo tempo que não foi possível inferir qualquer razão entre o Ciclo de Hale com sua distribuição geográfica. Portanto, a análise feita por Grimm et. al. (2000) e Barros et. al. (2002) continua válida, já que os sinais da atividade solar/RCG e ENSO aparecem com diferentes características e em locais distintos.

Os resultados obtidos neste trabalho são um indicativo matemático de que os RCG podem desencadear processos atmosféricos que afetem indiretamente o clima na região de abrangência da AMAS, através das modulações magnéticas solares. Apesar da impossibilidade de provar que a ocorrência dos ciclos decadais e bidecais nos dados de temperatura investigados têm origem nos forçantes geofísicos externos, comprovou-se a existência de uma relação estatística muito expressiva, que concorda com resultados obtidos por diversos outros trabalhos nas áreas de cosmoclimatologia (SVENSMARK, 2013), paleoclimatologia (ENGELS; VAN GEEL, 2012) e dendroclimatologia (DENGER; AEBY; GRACE, 2009).

Para o avanço do estudo é necessário investigar um maior número de dados, tanto no que diz respeito à quantidade de estações quanto à heterogeneidade da própria variável (informações meteorológicas, biológicas, geoestatísticas, etc.), como também no comprimento da série, através de um maior tempo de registro. O próximo passo como sugestão de trabalhos futuros é aplicar a Análise de Coerência nas estações de IRA, PAF e BAG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLUWALIA, H. S., YGBUHAY, R. C. The onset of sunspot cycle 24 and galactic cosmic ray modulation, **Adv, in Space Res**, v 48, 1, p. 61-64, 2013.

ALONSO. M.; FINN, E. J. **Física: um curso universitário**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972, v. 2, p. 565.

ARRUDA, M. L. **Raios cósmicos: mensageiros do nosso Universo**. Laboratório de Instrumentação Física e Experimental de partículas – LIP, 2010. Disponível em <<http://pt.slideshare.net/luisaarruda/raios-cosmicos>>. Acesso em 08 jul. 2016.

ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL, **Clima, temperatura e precipitação**. Disponível em:

http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu_filho=791&cod_menu=790&tipo_menu=APRESENTACAO&cod_conteudo=1332>. Acesso em: 17 Nov. 2016.

BARBOSA, B. C. A., BLITZKOW, D. **Ondaletas: Histórico e Aplicação**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2008, 39 p.

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.**, 80-1, 33–44, 2002.

BRAZILEVSKAYA, G. A. Observation of variability in cosmic rays. **Space Science Reviews**. Vol. 94, Issue 1-2, p. 25-38, 2000.

BROWN, P. Cosmic Rays Not Causing Climate Change. **Scient. American**, Nov. 2013. Disponível em <<http://www.scientificamerican.com/article/cosmic-rays-not-causing-climate-change/>>. Acessado em: 04 Jul. 2016.

BROWN, B.H. Short-term changes in global cloud cover and in cosmic radiation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v.70: p.1122–1131, 2008.

CARSLAW, K. S.; HARRISON, R. G.; KIRKBY, J. Cosmic rays, clouds, and climate. **Science**, v. 298, p. 1732-1736, 2002.

COSMIC RAY. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em <https://pt.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Citando_a_Wikip%C3%A9dia>. Acesso em 01 Jul. 2016.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **O Intemperismo e Erosão**. Disponível em: <<http://cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/O-Intemperismo-e-a-Erosao-1313.html>>. Acesso em: 27 Ago. 2016.

DENGER, S., AEBY, D., GRACE, J. A relationship between galactic cosmic radiation and tree rings. *New Phytologist*, v. 184, 3, p. 545–551, 2009.

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

ECHER, S. 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). **Clim. Change**, v. 87, p. 489–497, 2008.

ENGELS, S., VAN GEEL, B. The effects of changing solar activity on climate: contributions from palaeoclimatological studies. **J. Space Weather Space Clim.**, 2, A 09, 2012.

ETTWEIN, V., MASLIN, M. **Physical Geography: Fundamentals of the physical environment**. Ed. University of London, London, 145 p. 2011.

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

_____, E., PACCA, I. G., PEREIRA FILHO, A. J., RAMPULLOTO, 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.

_____, E., SILVA, D. S. S., LIMA, P. C. M., PACCA, I. G., RIGOZO, N. R., RAZEIRA, M, TATSCH, J. D., PRESTES, A. Periodicities of ~11 and ~22 years in average annual temperatures from Iraí (27.18°S, 53.23°W), Southern Brazil. **Annales Geophysicae**, a ser submetido, 2015.

KÖNIG, P. J., WALT, A. J. V. D., STOKER, P. H., RAUBENHEIMER, B. C., SHEA, M. A., SMART, D. F. Vertical cutoff rigidity and the intensity distribution of cosmic rays near Cape Town. In: 15th International Cosmic Ray Conference, August 13-26, Bulgaria. **Conference Papers**, v. 4, A79-37301 15-93, Sofia, Bulgarian Academy of Sciences, 1978, p. 173-177.

GUPTA, M., MISHRA, V. K., MISHRA A.P. **Correlative study of solar activity and cosmic ray intensity for solar cycles 20 to 23**, 29th International Cosmic Ray Conference, August 3–10, Pune, India, **Conference Papers**, v. 2, , p. 147-150, 2005.

GRINSTED, A., MOORE, J.C., JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear process in Geophysics**, v. 11, p. 561-566, 2004.

GUSEV, A. A., MARTIN, I. M., MELLO, M. G. S., PANKOV, V., PUGACHEVA, G., SCHUCH, N. J., SPJELDVINK, W. N. Bidecadal cycles in liquid precipitations in Brazil, **Adv. Space Res.**, 34, 370–375, 2004.

GRIMM, A., BARROS, V., DOYLE, M. Climate variability in southern South America Associated with El Niño La Niña events, **J. Climate**, 13, 35–58, 2000.

HARRISON, R. G., STEPHENSON, D. B. Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds. **Proceedings of the Royal Society A**. p. 1221–1233, 2005.

HARTMANN, G. A. **A Anomalia magnética do atlântico Sul: Causas e feito**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 151, 2005.

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

HOLTZ, M. **Estratigrafia de sequências**, Histórico, Princípios e Aplicações. Ed. Interciência, São Paulo, p. 272, 2012.

HOYT, D. V. E., SCHATTEN, K. H. **The role of sun in climate change**. Oxford University Press, New York, Ed 1, p. 288, 1997.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera. **Geomagnetismo**. Disponível em <<http://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/geofisica/geomagnetismo/>>. Acesso em: 05 jul. 2016, 00:09.

LAUT, P. Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** v. 65, p. 801–812, 2003.

LEITHOLD, A. **A Anomalia Magnética do Atlântico Sul**. Instituto de aeronáutica e Espaço - IAE - Campus de Pesquisas Geofísicas Major Edsel de Freitas Coutinho – CPGMEFC. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/anomaliamagneticaatlanticosul2/>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

LIMA, P. C. M. **Avaliação da possível influência de forçantes geofísicos sobre a variabilidade da temperatura na latitude ~30°S no estado do Rio Grande do Sul no último século**. Trabalho de conclusão de curso, Unipampa, Caçapava do Sul, p. 58, 2015.

LOCKWOOD, M., FRÖHLICH, C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. **Proceedings of the Royal Society A.**, v. 463, p. 2447–2460, 2007.

MENDONÇA, F., DANNI-OLIVEIRA, I., M. **Climatologia, noções básicas e climas do Brasil**. Ed. Oficina de Textos, 1° Ed., São Paulo, p.205, 2009.

MURSULA, K., USOSKIN, I. Heliospheric physics and cosmic rays. Oulu: University of Oulu, 2003. **Lecture Notes**. Disponível em <http://cc.oulu.fi/~usoskin/Lect_2003.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2016.

MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas de Séries Temporais**. Ed. EDUSP, 2° Ed., São Paulo, p.320, 2014.

NASA, Jet Propulsory Laboratory (JPL), **Voyager the interstellar mission**. Disponível em <<http://voyager.jpl.nasa.gov/mission/interstellar.html>>. Acesso em: 04 Jul. 2016.

PINHEIRO, K. **Magnetismo da Terra: Curso on-line**. Rio de Janeiro, Observatório Nacional, m.01, Disponível online no ano de 2012.

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. Sun–earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano De Almeida, Southern Brazil, **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, 73, 1587–1593, 2011.

RAMACHANDRAN, R. Scientists argue that cloud formation modulated by galactic cosmic rays has an impact on climate change. **Frontline, India's National Magazine**, v.28, 06, 2011. Disponível em: <<http://www.frontline.in/static/html/fl2806/stories/20110325280610700.htm>>. Acesso em: 12 set. 2016.

RAMPELOTTO, P. H., RIGOZO, N. R., DA ROSA, M. B., PRESTES, A., FRIGO, E., ECHER, S. 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.

_____, N. R., VIEIRA, L. E. A., ECHER, E., NORDEMANN, D. J. R. Wavelet Analysis of Solar-ENSO Imprints in Tree Ring Data from Southern Brazil in the Last Century, **Clim. Change**, v. 60, p. 329–340, 2003.

_____, N. R., NORDEMANN, D. J. R., ECHER, E., VIEIRA, L. E. A. Search for solar periodicities in tree-ring widths from Concórdia (S.C., Brazil), **Pure Appl. Geophys.**, v. 161, p. 221–233, 2004.

SMANIOTTO, D. **Avaliação da possível influência de forçantes geofísicos sobre a variabilidade da temperatura em diferentes latitudes do estado do Rio Grande do Sul no último século.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, p. 44, 2015.

SMART, D. F., SHEA M. A. Fifty years of progress in geomagnetic cutoff rigidity determinations. **Adv. Space Res.**, v. 44, p. 1107-1123, 2009.

STRAUSS, R. D., POTGIETER, M. S., FERREIRA, S. E. S. Modeling ground and space based cosmic ray observations. **Advances in Space Research**, v. 49, p. 392-407, 2012.

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.

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

_____, H., PEDERSEN, J.O.P.P, MARSH, N., ENGHOFF, M., UGGERHØJ, U. Experimental Evidence for the Role of Ions in Particle Nucleation under Atmospheric Conditions. **Proceedings of the Royal Society**. Vol. 463, pp. 385–96, 2007.

_____, H., BONDO, T., SVENSMARK, J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. **Geophysical Research Letter**, v.36, 15, 2009.

SWORDY, S., WAKELY, S. **Veritas discovers evidence for the origin of cosmic rays**. University of Chicago, KAVLI Institute for Cosmological Physics – KICP -, 2009. Disponível em: <https://kicp.uchicago.edu/research/highlights/highlight_2009-11-24.html> Acesso em: 04 Jul. 2016.

TORRENCE, C., COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 79, p. 61-67, 1998.

USOSKIN, I.G., MURSULA, K., KANANEN, H., KOVALTSOV, G.A. **Dependence of cosmic rays on solar activity for odd and even solar cycles**. Rev. Elsevier. Vol. 27, 3, p. 571-576, 2001.

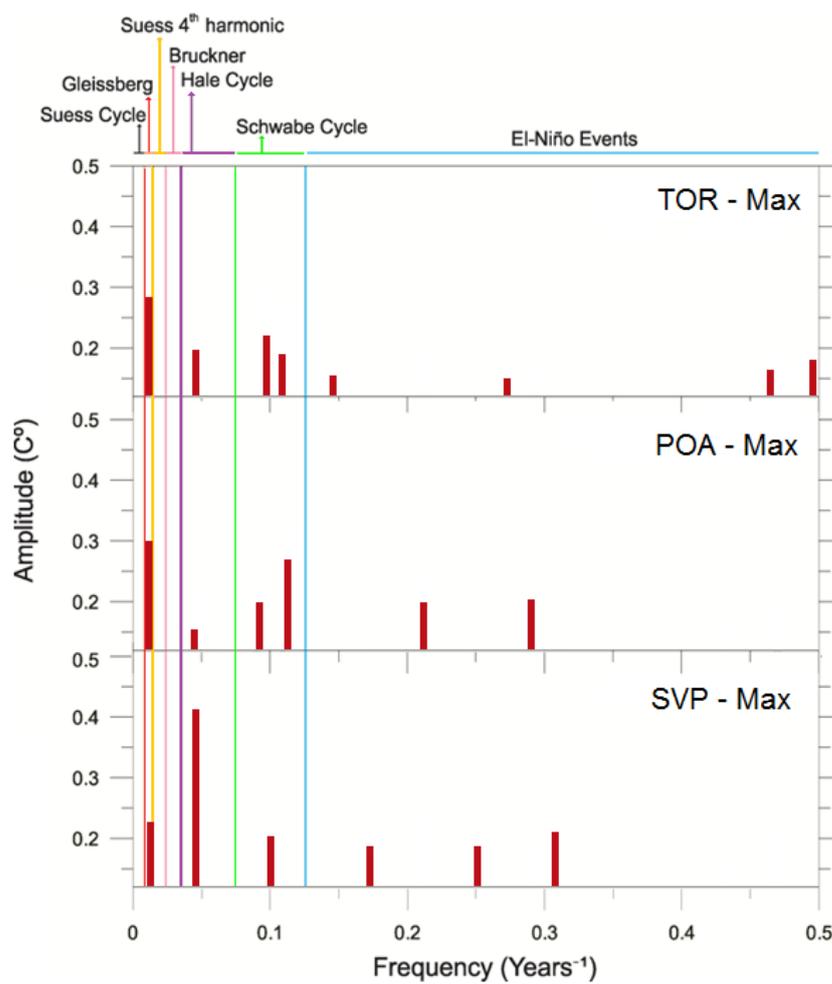
VIEIRA, L. R. **Estudo das Séries Temporais de Raios Cósmicos Secundários Mediante Análise Espectral e Wavelets**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, p. 110, 2012.

VIEIRA, L. R., SILVA L. A. Geomagnetic modulation of clouds effects in the Southern Hemisphere Magnetic Anomaly through lower atmosphere cosmic ray effects. **Geophysical Research Letters**, Vol 33, L14802, 2006.

WADA, M., MURAKAMI, K., ODA, M.; NISHIMURA, J.; SAKURAI, K. Cosmic rays in the interplanetary space. **Cosmic Ray Astrophysics**, p. 299- 334. Tóquio, 1988.

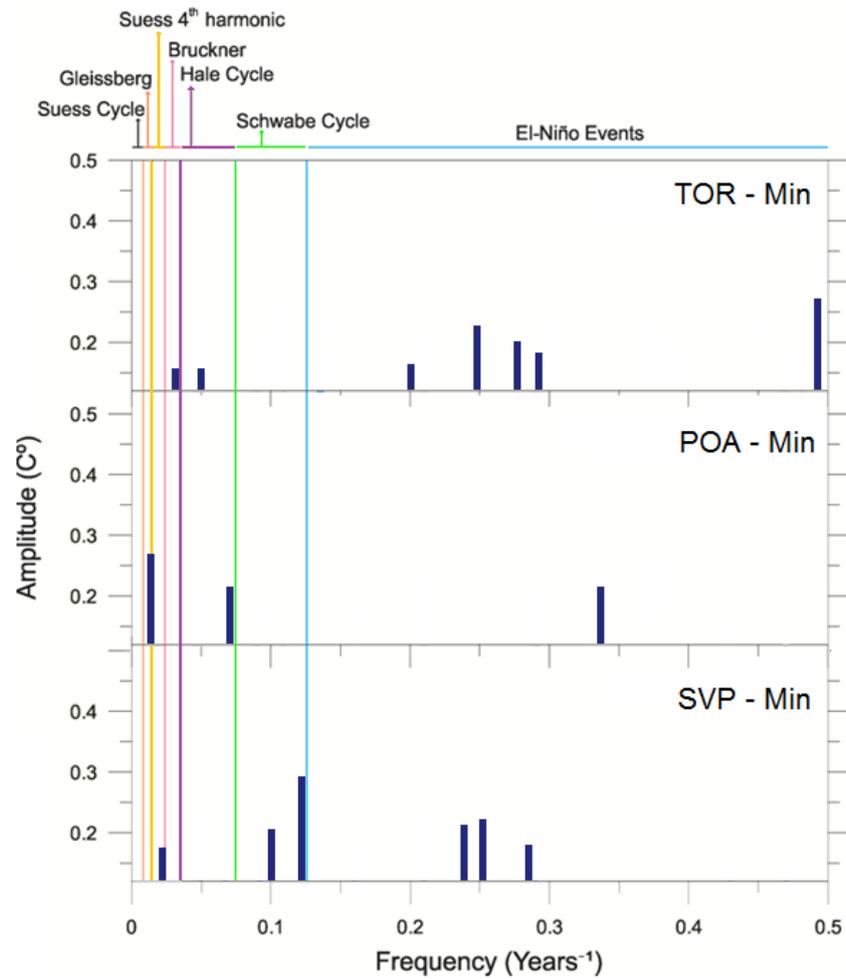
APÊNDICE A1 – Resultados ARIST

Figura A1_01 – Espectro de amplitude das ST de temperatura máxima de TOR, POA e SVP sobre uma confiança de 95%.



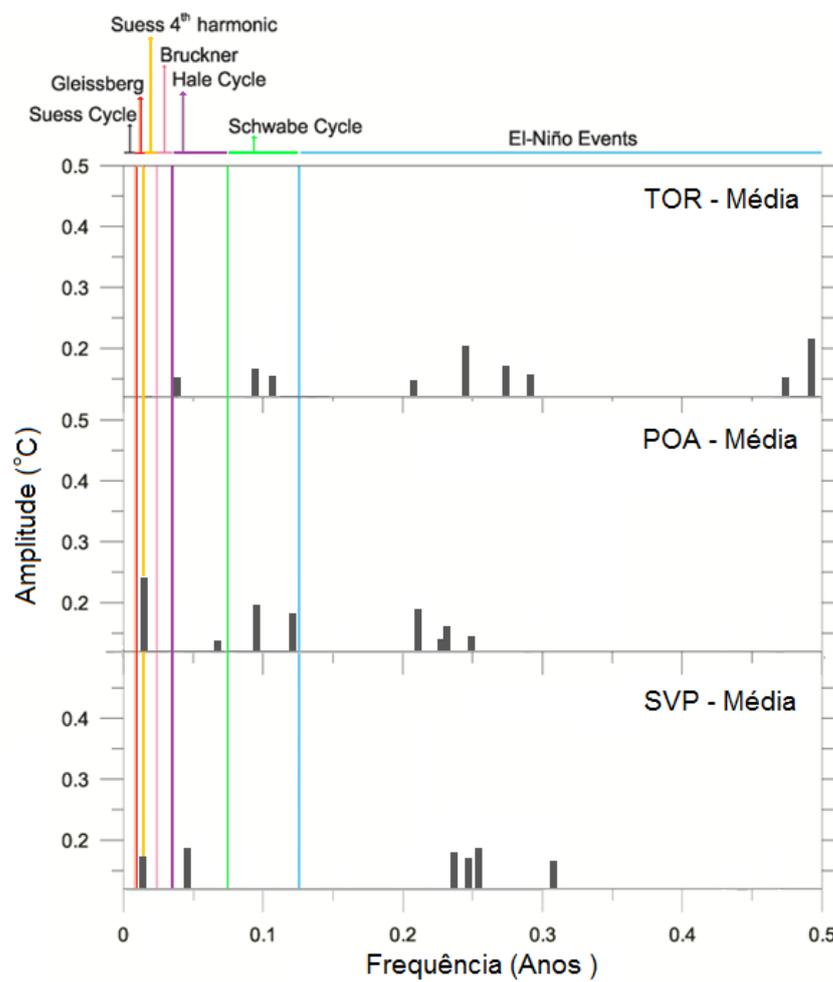
Autor.

Figura A1_02 – Espectro de amplitude das ST de temperatura mínima de TOR, POA e SVP sobre uma confiança de 95%.



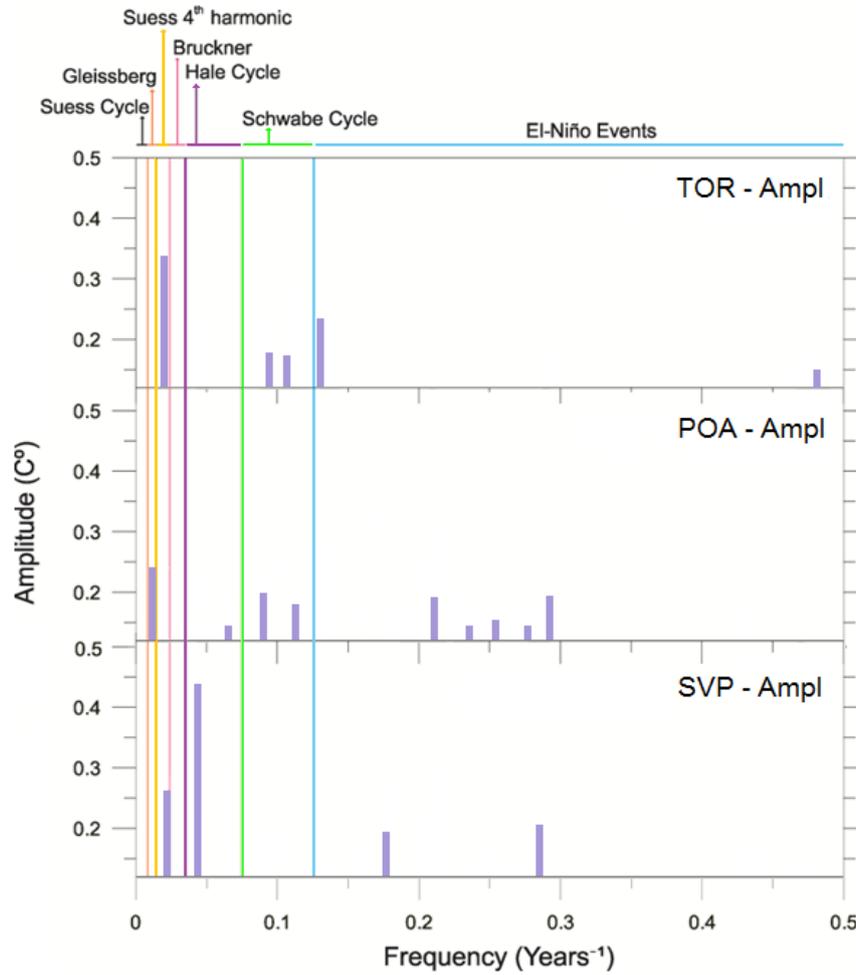
Autor.

Figura A1_03 – Espectro de amplitude das ST de temperatura média de TOR, POA e SVP sobre uma confiança de 95%.



Autor.

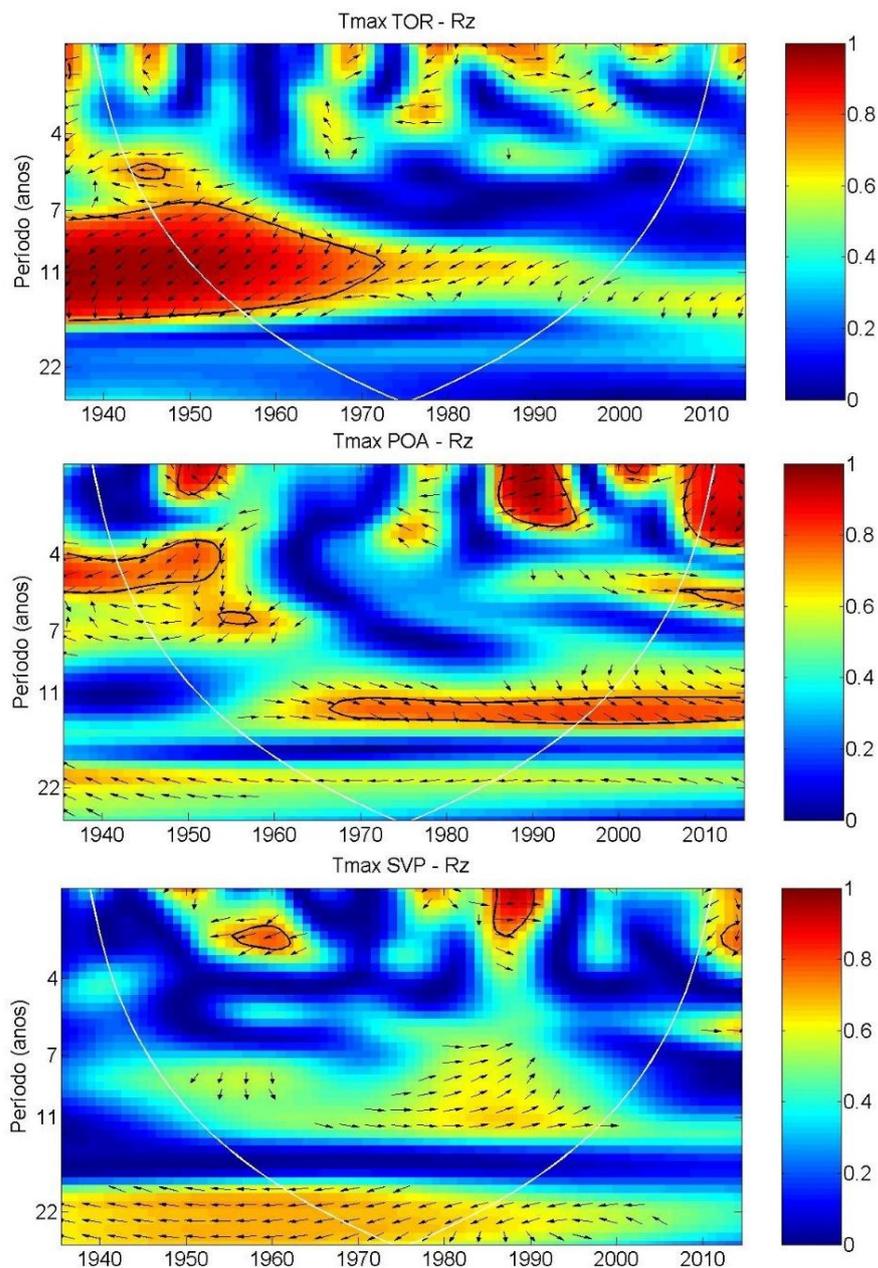
Figura A1_04 – Espectro de amplitude das ST de amplitude térmica de TOR, POA e SVP sobre uma confiança de 95%.



Autor.

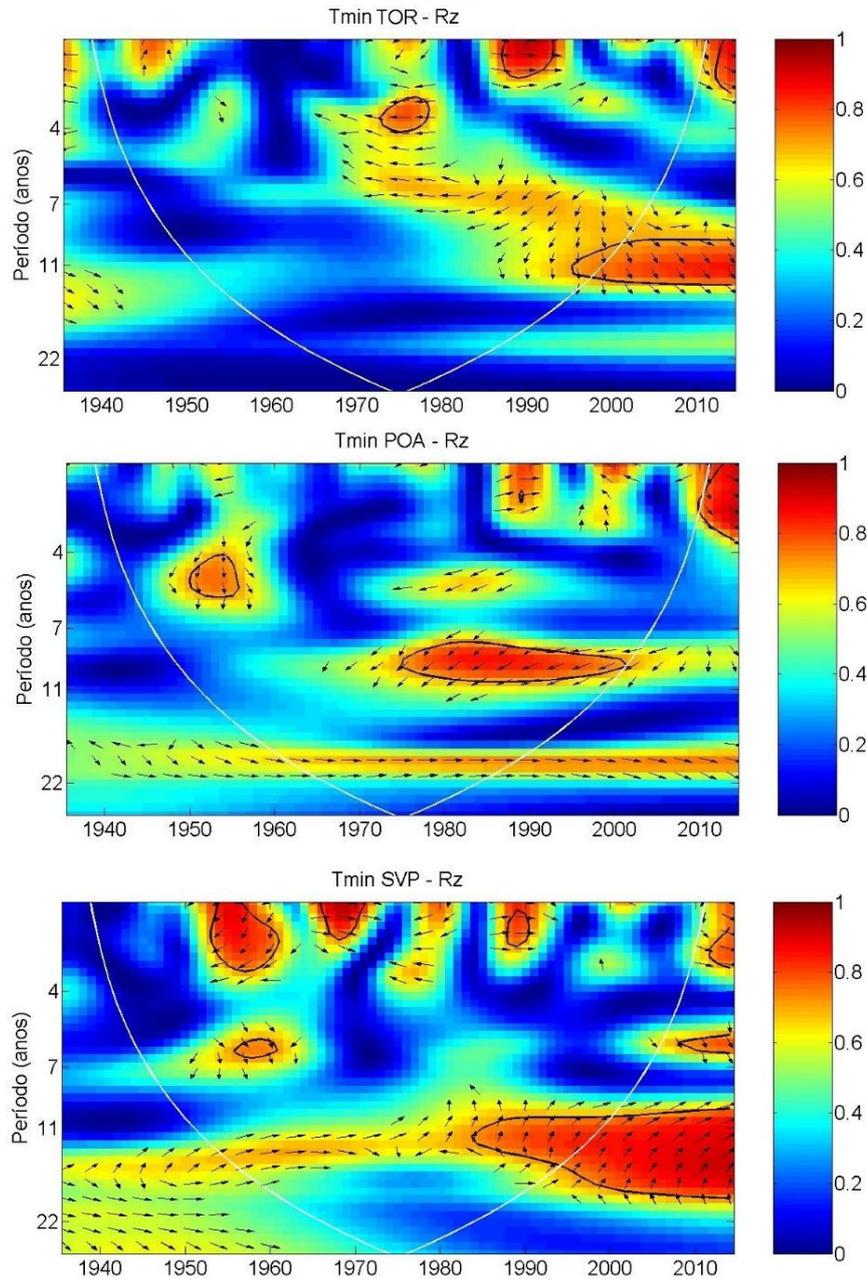
APÊNDICE A2 – Resultados WTC

Figura A2_01 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz e as séries Tmax das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



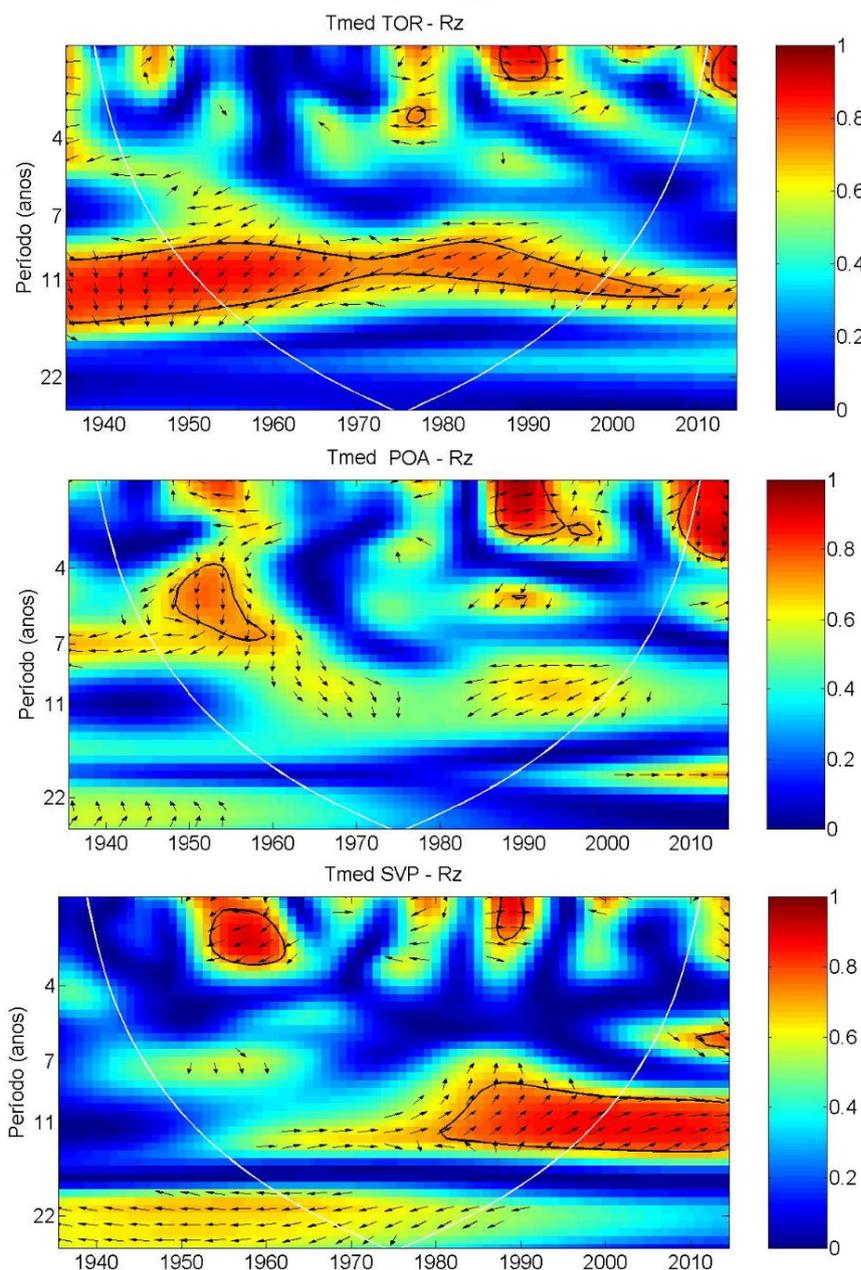
Fonte: Autor.

Figura A2_02 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz e as séries Tmin das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



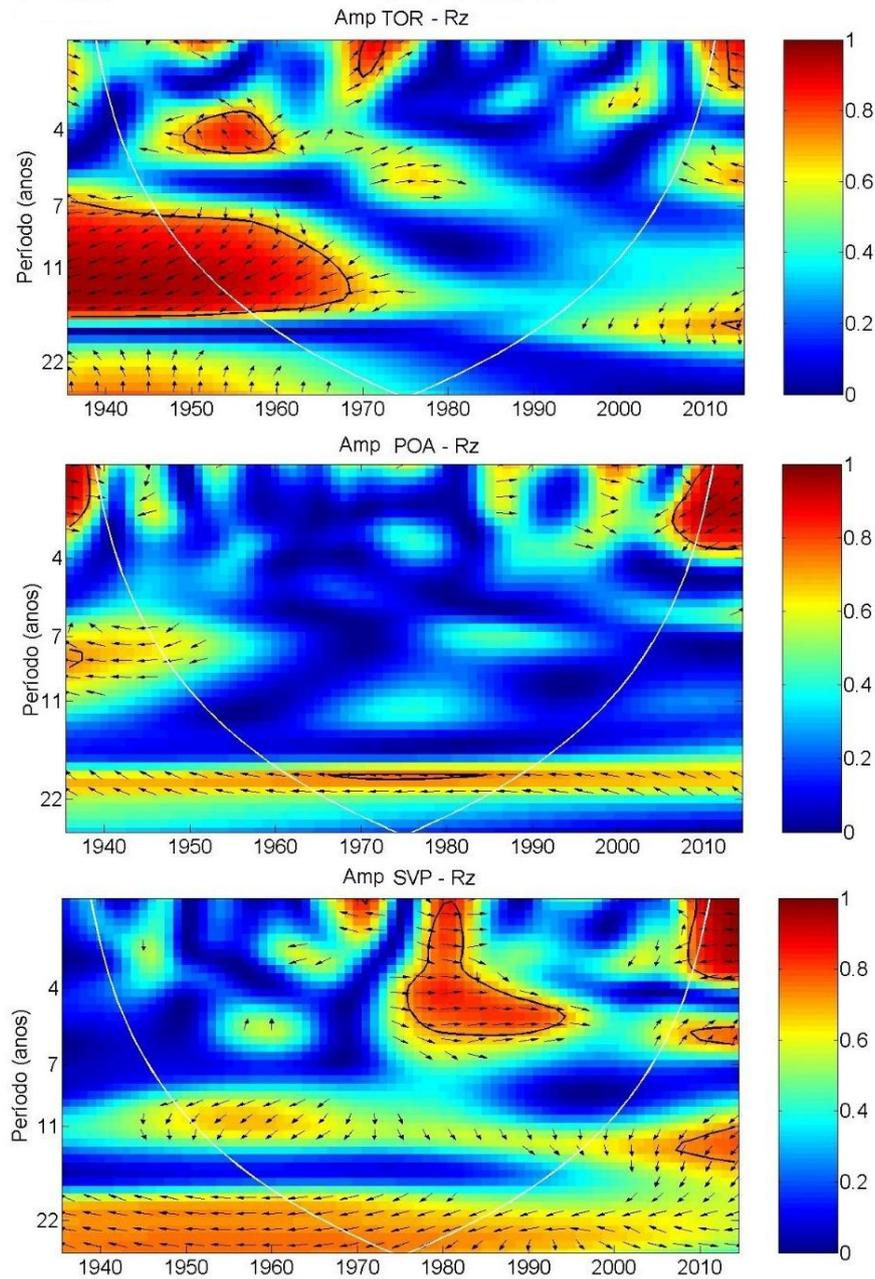
Fonte: Autor.

Figura A2_03 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz e as séries Tmed das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



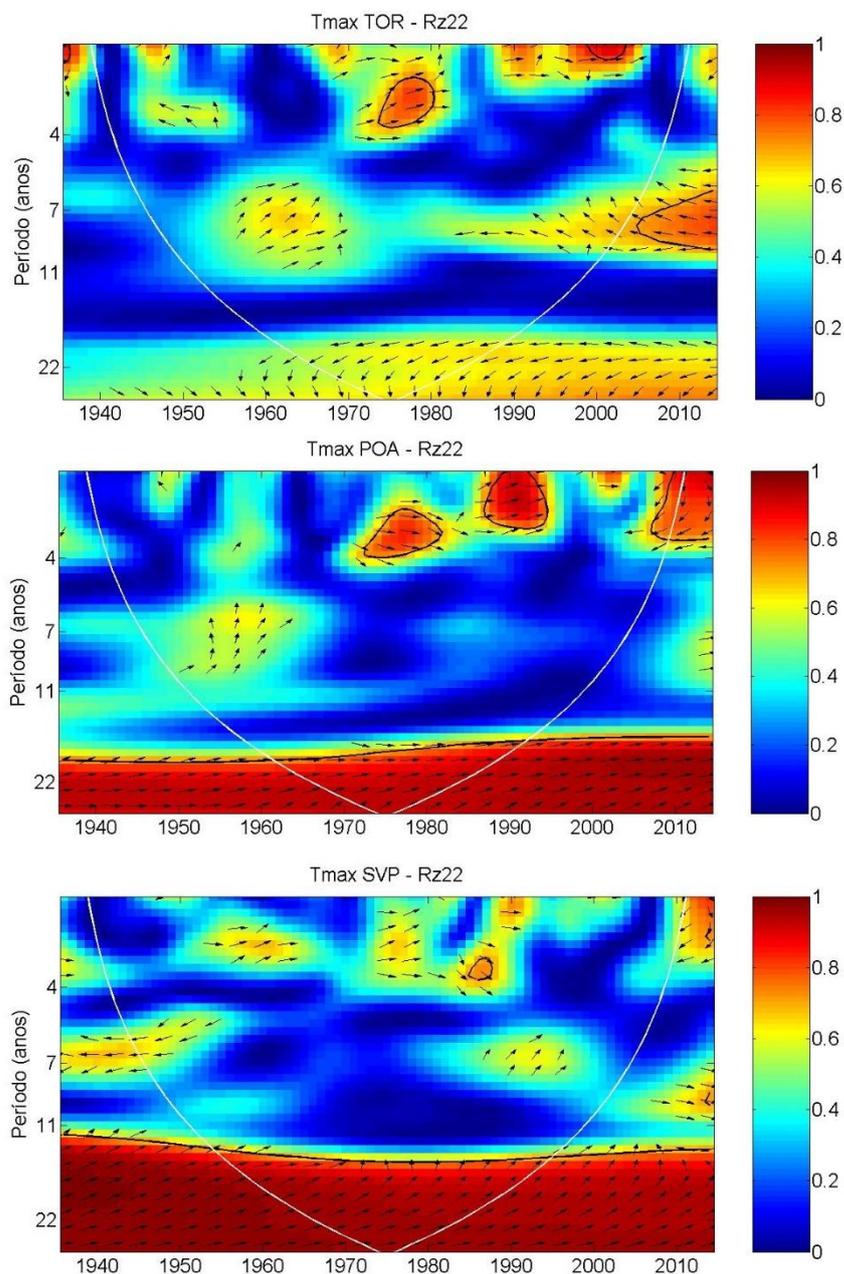
Fonte: Autor.

Figura A2_04 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz e as séries Amp das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



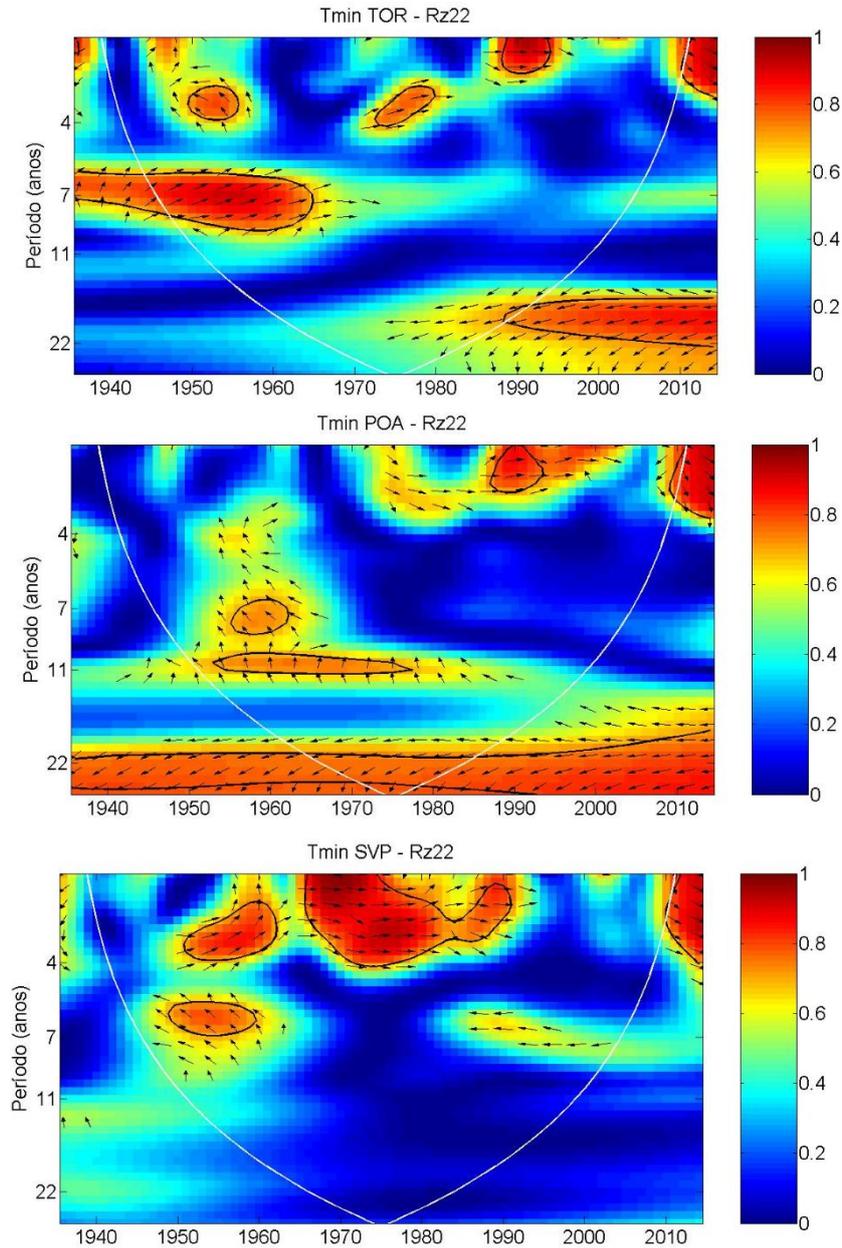
Fonte: Autor.

Figura A2_05 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz22 e as séries Tmax das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



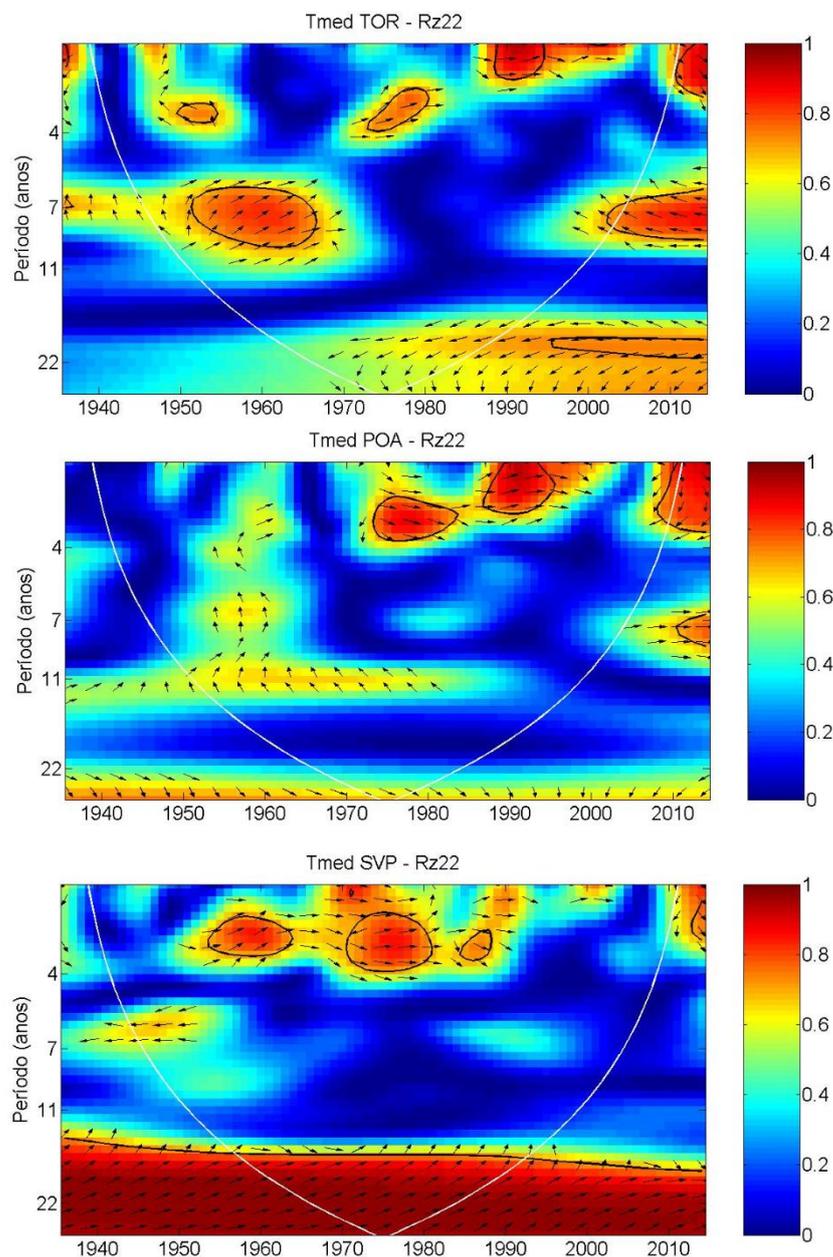
Fonte: Autor.

Figura A2_06 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz22 e as séries Tmin das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



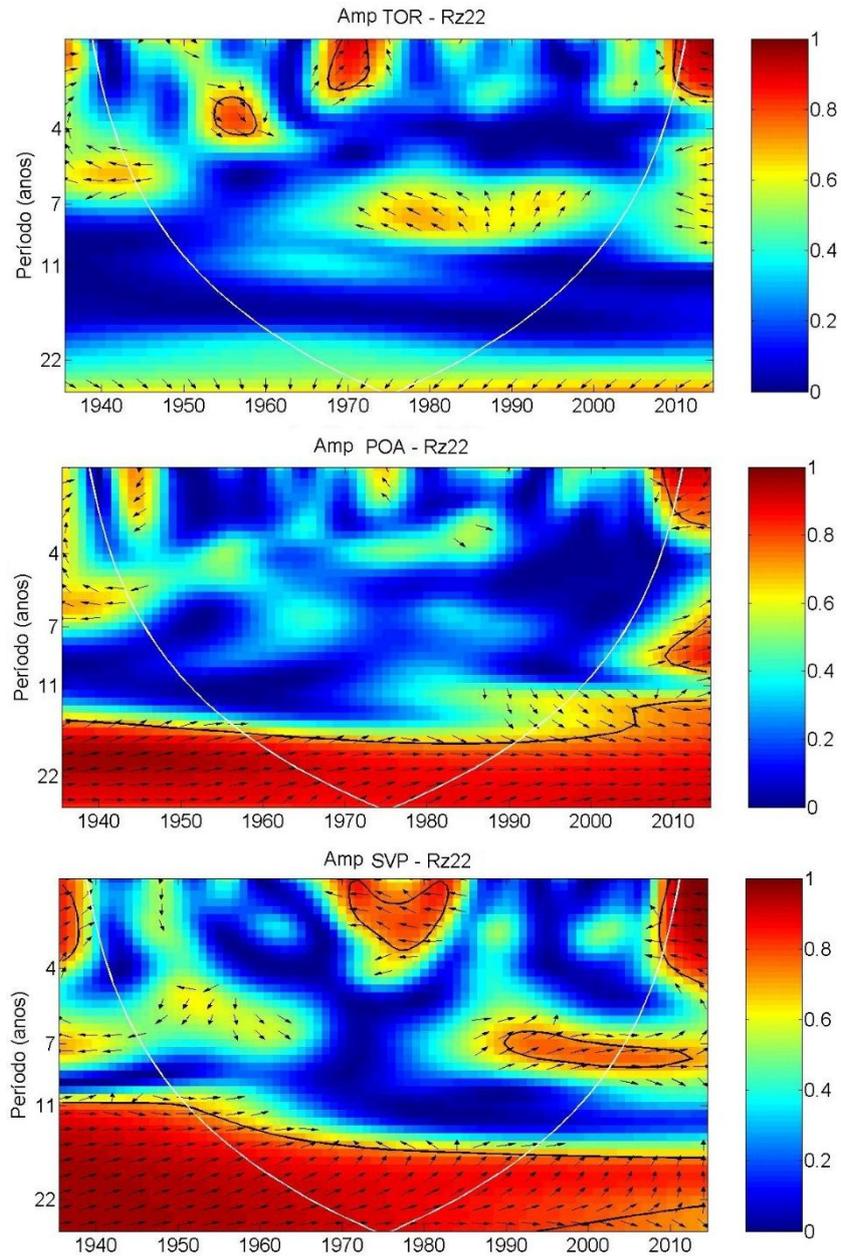
Fonte: Autor.

Figura A2_07 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz22 e as séries Tmed das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



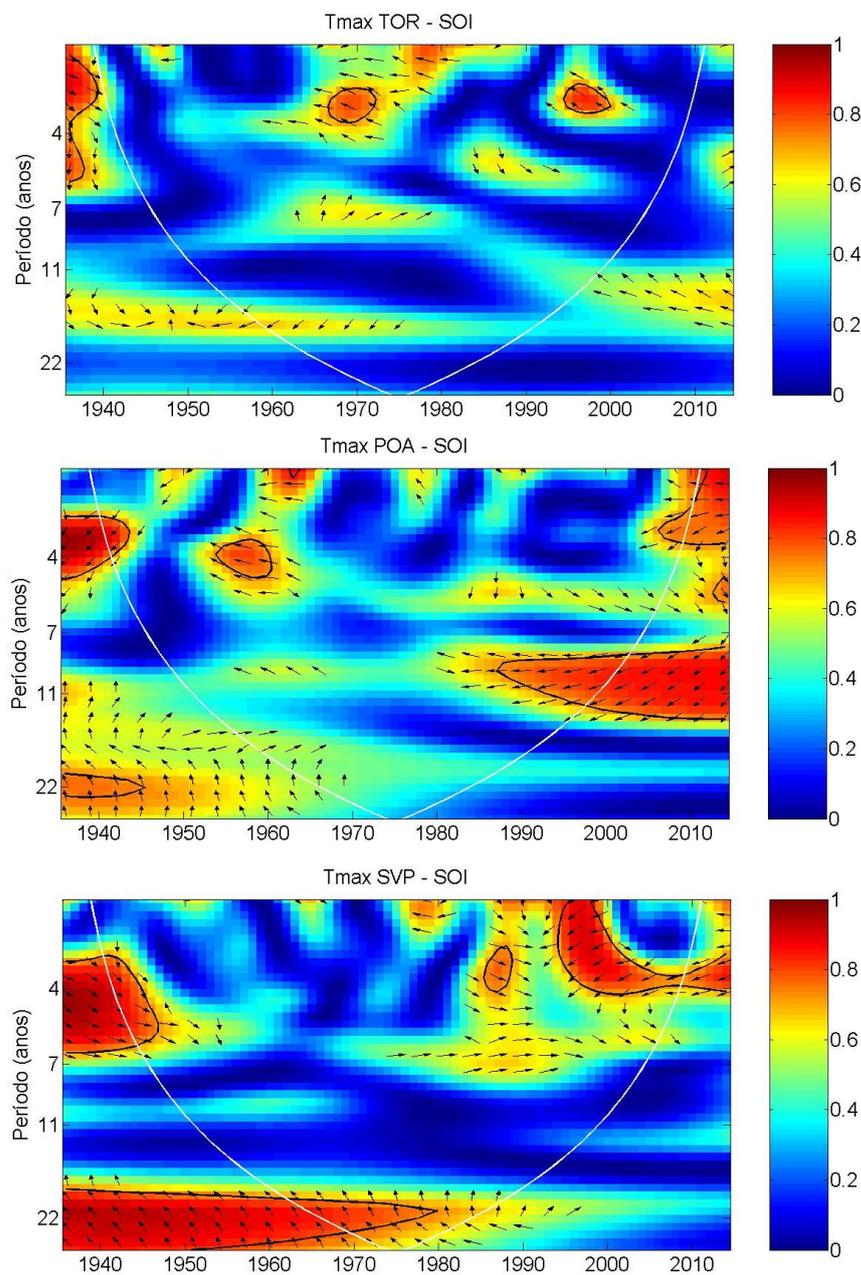
Fonte: Autor.

Figura A2_08 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal Rz22 e as séries Amp das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



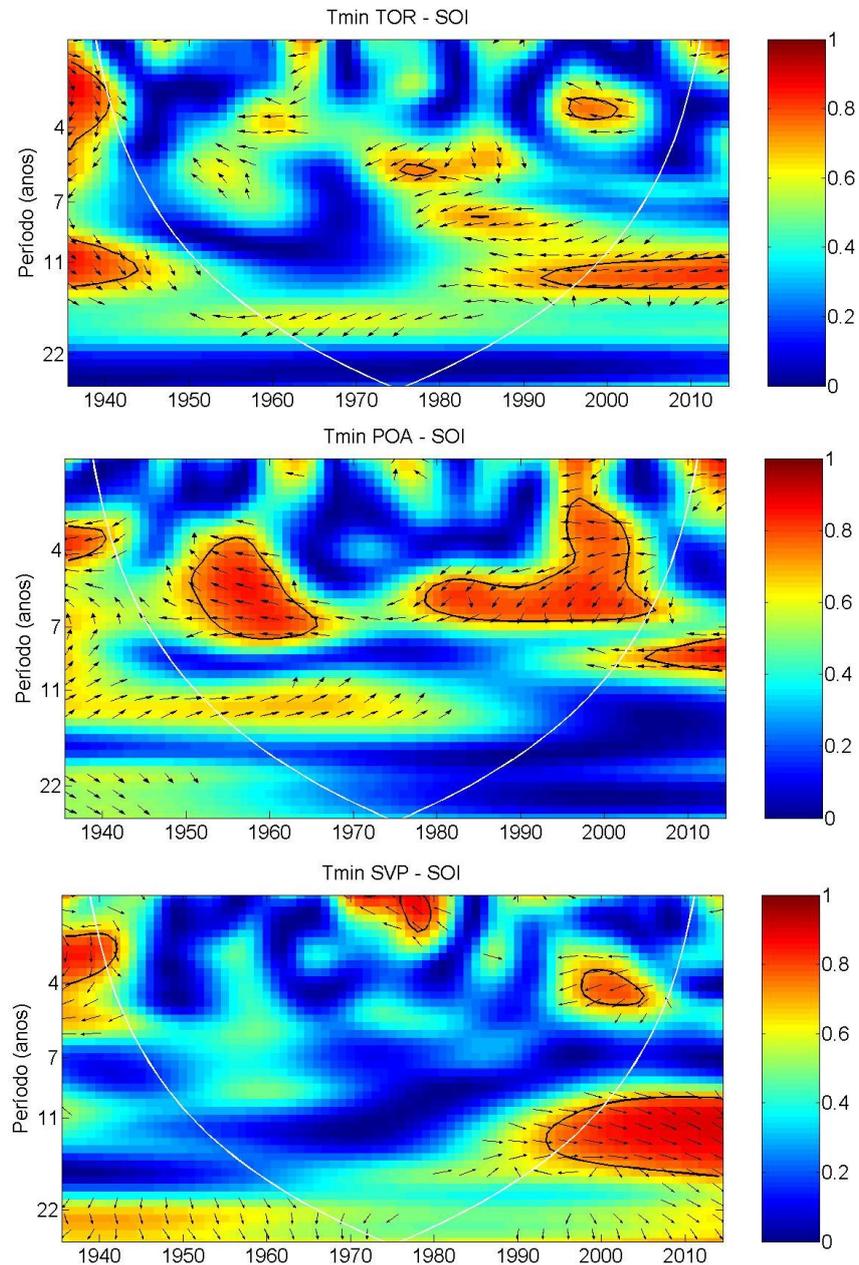
Fonte: Autor.

Figura A2_09 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal SOI e as séries Tmax das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



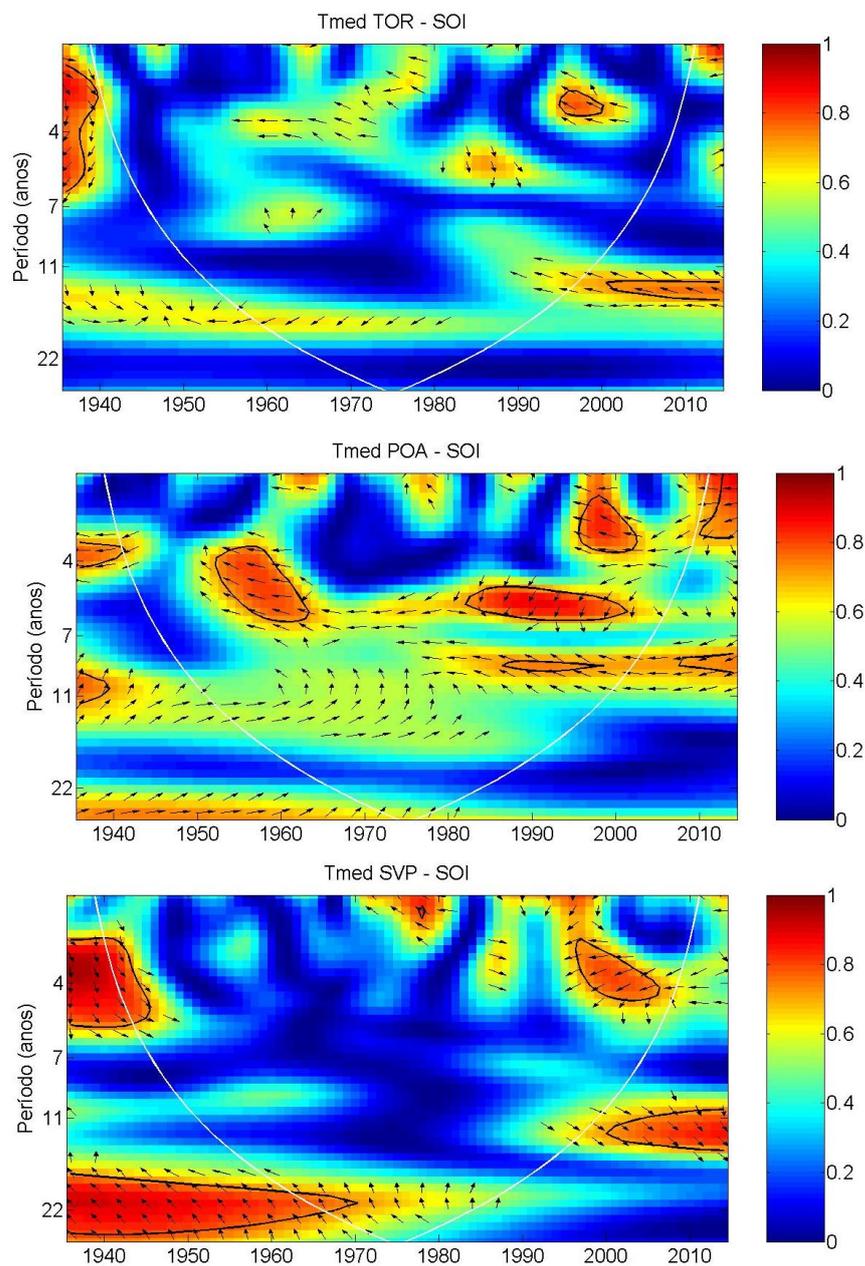
Fonte: Autor.

Figura A2_10 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal SOI e as séries Tmin das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



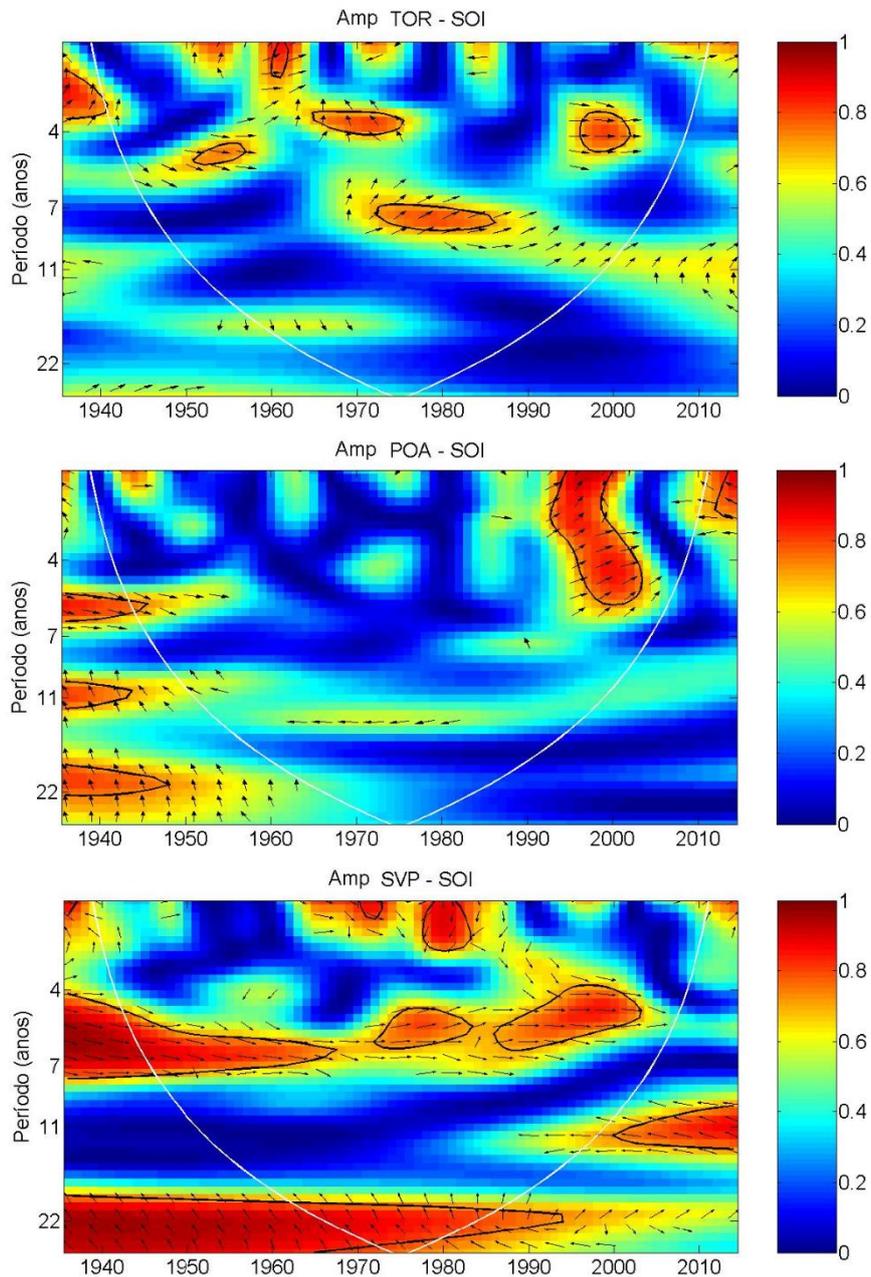
Fonte: Autor.

Figura A2_11 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal SOI e as séries Tmed das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



Fonte: Autor.

Figura A2_12 - Espectro de coerência wavelet entre a série temporal SOI e as séries Amp das estações TOR, POA e SVP. Os valores de coerência estão indicados pelas cores. A curva branca em formato de U indica o cone de influência (COI), abaixo da qual efeitos de borda não podem ser desprezados. A linha preta indica o limite de confiança de 95% para os valores de coerência. As setas pretas indicam os ângulos de fase.



Fonte: Autor.