



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15756-TDI/1499

RELAÇÃO SOL-TERRA ESTUDADA ATRAVÉS DE ANÉIS DE CRESCIMENTO DE CONÍFERAS DO HOLOCENO RECENTE E DO TRIÁSSICO

Alan Prestes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Nivaor Rodolfo Rigozo e Daniel Jean Roger Nordemann, aprovada em 30 de agosto de 2006.

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/11.07.13.58>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15756-TDI/1499

RELAÇÃO SOL-TERRA ESTUDADA ATRAVÉS DE ANÉIS DE CRESCIMENTO DE CONÍFERAS DO HOLOCENO RECENTE E DO TRIÁSSICO

Alan Prestes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Nivaor Rodolfo Rigozo e Daniel Jean Roger Nordemann, aprovada em 30 de agosto de 2006.

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/11.07.13.58>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Prestes, Alan.

P926r Relação sol-terra estudada através de anéis de crescimento de coníferas do holoceno recente e do triássico / Alan Prestes. – São José dos Campos : INPE, 2009.
148p. ; (INPE-15756-TDI/1499)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

Orientadores : Drs. Nivaor Rodolfo Rigozo e Daniel Jean Roger Nordemann.

1. Atividade solar. 2. Climatologia. 3. Interação sol-terra. 4. Ciclos Solares. 5. Análise de dados. 6. Dendrocronologia I.Título.

CDU 523.93

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

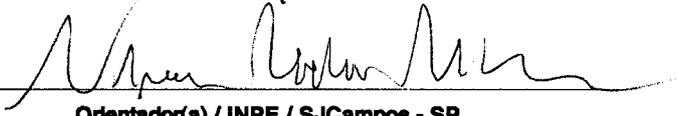
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Geofísica Espacial

Dr. Jonas Rodrigues de Souza



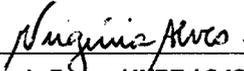
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Maria Virgínia Alves



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ezequiel Echer



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Heitor Evangelista da Silva



Convidado(a) / UERJ / Rio de Janeiro - RJ

Dr. Mario Tomazello Filho



Convidado(a) / ESALQ - USP / São Paulo - SP

Aluno (a): **Alan Prestes**

São José dos Campos, 30 de agosto de 2006

A meus pais, Valderi (*In memoriam*) e Antoninha, e meus irmãos, Alex e Adelson, por terem me incentivado e me apoiado em todos os momentos. Por todo amor e carinho que me deram e o esforço que fizeram para que eu conseguisse mais esta conquista. A minha mulher, Alexandra, e filha, Ana Júlia, pelo amor e carinho, compreensão, estímulo e força para concluir este trabalho. As minhas conquistas são conquistas de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado o privilégio da vida.

Agradeço aos meus orientadores, Dr. Daniel Jean Roger Nordemann e Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo, por terem me proporcionado a valiosa oportunidade de enriquecer meu conhecimento nestes quatro anos de estudo, pelo apoio e incentivo.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos e colegas pela amizade e pelo companheirismo ao longo desta jornada. Por estarem constantemente me incentivando e desejando o melhor.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE – São José dos campos (SP), INPE – Santa Maria (RS) e à Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta Tese.

Ao CNPq pela bolsa de doutorado a CAPES pelo auxílio de verbas.

À Dra. Damaris Kirsch Pinheiro e ao Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/UFSM, pelo apoio e pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta Tese.

Ao Dr. Nelson Schuch e ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE /INPE, pela assistência.

Ao Dr. Mario Tomazello Filho e Dr. Cláudio Sergio Lisi pela ajuda e discussões que contribuíram muito para o desenvolvimento deste trabalho, e à Escola Superior Agrícola Luis de Queiroz – ESALQ – pela infraestrutura.

Ao meu colega e amigo Juliano Antunes Guimarães Leite, pela ajuda na coleta das amostras de árvores de araucárias nas unidades de conservação.

Ao Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM - pela autorização de coleta das amostras de árvores petrificadas.

Ao IBAMA pela doação das amostras de árvores nas Florestas e Parques Nacionais, e aos Chefes e funcionários das unidades pelo auxílio nas coletas.

Ao Museu municipal de São Pedro do Sul pela colaboração.

À empresa de pedras preciosas Primmaz & Cia. Ltda, pelo corte e polimento das amostras de árvores petrificadas.

Às unidades de conservação florestal dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, pelo auxílio prestado nas coletas das amostras do lenho de árvores.

A Todas as pessoas que auxiliaram no trabalho.

RESUMO

O estudo do Sol e das variações de seu fluxo de energia é inteiramente experimental e também muito recente, o que restringe muito a compreensão de seus efeitos sobre o clima do planeta e uma possível predição do mesmo para o futuro. Assim torna-se necessário um monitoramento indireto das variações solares e de outros fenômenos geofísicos em uma escala de tempo maior no passado, possível graças à existência de registros naturais que cobrem extensos intervalos de tempo passado, como por exemplo, os anéis de crescimento de árvores. Desenvolveu-se um estudo das relações Sol-Terra no passado, através dos anéis de crescimento de árvores de araucárias (*araucaria angustifolia*) do presente e de madeiras silificadas Mesozóica (“árvores petrificadas” de 200 milhões de anos atrás), coletadas no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Das árvores de araucária “atuais” obtiveram-se cronologias médias das amostras dos lenhos coletados em Severiano de Almeida e Passo Fundo, em torno de 359 e 264 anos, respectivamente. As amostras dos lenhos petrificados, coletados em São Pedro do Sul e Mata, apresentaram de 28 a 159 anéis de crescimento. No estudo das séries temporais dos anéis de árvores do presente e do passado (amostras petrificadas) utilizou-se o método da análise espectral clássica e regressão iterativa, na procura de periodicidades e tendências neles contidas e o método da ondeleta para verificar o comportamento das periodicidades e amplitudes encontradas em função do tempo. As análises das séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das árvores (amostras petrificadas e não petrificadas) pelo método da regressão iterativa apresentou períodos representativos da atividade solar de 11 (ciclo de Schwabe), 22 (ciclo de Hale), 52 (quarto harmônico do ciclo de Suess) e 80 (ciclo de Gleissberg) anos, com uma significância estatística de 95%. Isso pode indicar uma possível influência da atividade solar no crescimento das árvores tanto no passado recente, nos últimos 300 anos, como no mais distante, em torno de 200 milhões de anos. Também foram encontrados baixos períodos de 2 a 7 anos, que podem representar uma resposta das árvores às condições climáticas locais. Verificou-se através do estudo dos anéis de crescimento das árvores do triássico e do presente, que a atividade solar apresentou os mesmos períodos fundamentais. As análises por ondeletas das séries temporais dos anéis de crescimento das árvores mostraram que existe uma boa concordância com o ciclo solar de 11 anos para as épocas de máxima e mínima atividade solar, tais como o Mínimo de Dalton e o Máximo Moderno. Já as análises por ondelata-cruzada, entre as cronologias de anéis de crescimento de Passo Fundo e Severiano de Almeida com as séries da anomalia de temperatura e do Índice da Oscilação Sul (SOI), mostraram que tanto a temperatura quanto o SOI estão influenciando o crescimento das árvores de araucária em períodos entre 2-8 anos.

SUN-EARTH RELATIONSHIP STUDIED BY TREE GROWTH RINGS IN CONIFERS FROM HOLOCENE AND TRIASSIC

ABSTRACT

The study of the Sun and of its energy flux variations is recent and fully experimental. For this reason, it is very important to develop studies in order to understand the past and predict the future using natural records at the Earth surface to monitor solar variations and their effects on climate. The studies about the Sun's variations and Sun-Earth-Climate relationships are possible because there exist natural records that cover long time intervals, such as, for example, tree growth rings, which may represent good records of climate variations in the past. In this work a study of Sun-Earth relationships was developed using tree growth rings of araucarias (*Araucaria angustifolia*) in the present time and in silicified Mesozoic wood ("petrified trees" of 200 million years ago), both collected in the Rio Grande do Sul State, Brazil. From the *Araucaria angustifolia* collected in Severiano de Almeida and Passo Fundo were obtained chronologies average for 359 and 264yr respectively. The petrified samples, collected in São Pedro do Sul and Mata, lead to 15 time series, with 28 to 159 tree growth rings. In the study of tree rings time series of the present and of the past (petrified samples), the method of classical spectral analysis, iterative regression, was used for the search of periodicities and trends contained in tree growth. The wavelet method was also used to verify the periodicities and amplitudes found as a function on time. The analysis of the time series of the tree growth rings thicknesses (petrified and not petrified samples), using the method of the iterative regression indicates representative periods of the solar activity of 11 (Schwabe cycle), 22 (Hale cycle), 52 (4th harmonic of the Suess cycle) and 80 (Gleissberg cycle) years, with a significance statistics of 95%. This may show a possible influence of the solar activity in the growth of the trees in the recent past, in last the 300 years, as in the distant past, at about 200 million years ago. Also low periods at 2 to 7 years, were found that can represent a response of the trees to local climatic conditions at their respective epochs of life. It was verified through the study of tree growth rings from Triassic and from the present times that the solar activity presented basically the same periods. The wavelet analysis has shown that it exist a good agreement of the time series of tree growth rings with the 11 year solar cycle, for the Minimum and Maximum solar activity periods, such as the Minimum of Dalton and the Modern Maximum. The cross-wavelet analysis between the chronologies of Passo Fundo, Severiano de Almeida and the series of the anomaly of temperature and of the South Oscillation Index (SOI), have shown that the temperature and the SOI are both influencing the araucaria growth in the periods between 2-8 years.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	
LISTA DE TABELAS.....	
CAPÍTULO 1.....	23
INTRODUÇÃO.....	23
CAPÍTULO 2.....	29
RELAÇÕES SOL-TERRA.....	29
2.1 Atividade solar.....	29
2.2 Causas das mudanças climáticas.....	35
2.3 A conexão Sol-Clima.....	37
2.4 Estudo da relação Sol-Terra por registros naturais.....	43
2.5 Variações de longo período na atividade solar e clima: evidências dendrocronológicas.....	47
CAPÍTULO 3.....	51
MATERIAI E MÉTODOS.....	51
3.1 Descrição do material empregado no estudo.....	51
3.1.1 Amostras do presente – <i>Araucaria angustifolia</i>	55
3.1.2 Amostras do passado – amostras petrificadas.....	57
3.2 Considerações sobre os locais de coleta.....	59
3.2.1 Locais de coleta das Araucárias.....	61
3.2.2 Locais de coleta de amostras de árvores petrificadas.....	64
3.3 Coleta das amostras.....	67
3.3.1 Amostras de araucárias.....	67
3.3.2 Amostras petrificadas.....	70
3.4 Tratamento das amostras.....	71
3.4.1 Amostras de araucárias.....	71
3.4.2 Amostras petrificadas.....	71
3.5 Obtenção das séries cronológicas.....	72

3.5.1 Obtenção através da mesa de mensuração.....	73
3.5.2 Obtenção por imagens.....	75
3.6 Dados climáticos e solares.....	79
3.7 Métodos de análises.....	80
3.7.1 Análise espectral.....	80
3.7.2 Análise por ondeletas.....	81
CAPÍTULO 4.....	83
ANÁLISE E RESULTADOS.....	83
4.1 Séries temporais dos anéis de crescimento de árvores e geofísicas.....	83
4.1.1 Amostras de araucárias.....	83
4.1.2 Amostras petrificadas.....	87
4.1.3 Séries geofísicas e climatológicas.....	90
4.2 Análises das séries dos anéis de crescimento e das séries geofísicas.....	90
4.2.1 Análise espectral clássica utilizando o método de regressão iterativa (ARIST).....	91
4.2.1.1 Análises das amostras do presente - Araucárias.....	91
4.2.1.2 Análises das amostras do passado – amostras petrificadas.....	100
4.2.2 Análises por ondeletas (wavelets)	104
4.2.2.1 Análise de ondeleta das amostras de araucárias do presente.....	104
4.2.2.2 Espectros de ondeletas-cruzadas das amostras de araucária do presente.....	107
4.2.2.3 Análise de ondeleta das amostras de árvores petrificadas.....	119
4.3 Semelhanças e diferenças das amostras de araucárias do passado recente e do passado distante.....	124
CAPÍTULO 5.....	127
CONCLUSÕES.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
APÊNDICE A – FUNÇÕES DE AJUSTES.....	147

LISTA DE FIGURAS

1.1	Número anual de ciclones oceânicos na Índia de Meldrum e o número de grupos de manchas solares.....	24
2.1	Variação na média anual do número de manchas solares, mostrando os ciclos solares e um possível período de longa duração.....	31
2.2	Imagem mostra uma seqüência de imagens em raios-X do Sol do máximo ao mínimo solar.....	33
2.3	Valores medidos da concentração de ^{14}C (curva sólida) plotado junto com o número de manchas solares. O mínimo de Maunder (1645-1715) é claramente evidente, Mas o Mínimo de Dalton (1795-1825) é menos claro. A lenta resposta do ^{14}C no tempo tende a obscurecer variações mais fracas tais como o mínimo de Dalton. Também é notado o mínimo de Spörer em torno de 1500, e outro grande mínimo em torno de 1350. Círculos pretos são dados de manchas solares vistas a olho nu.....	35
2.4	Reconstrução do número de manchas solares para o último milênio, obtido da série temporal do número de manchas solares (Rz) para o período de 1700-1999, mostrando os grandes máximos e mínimos na atividade solar, épocas de mínimos de Oort, Wolf, Spörer, Maunder e Dalton, e máximos Medieval e Moderno.....	40
2.5a	Temperatura da área continental do hemisfério norte é plotado com o comprimento do ciclo solar.....	41
2.5b	Temperatura média global da superfície do mar plotado com o número de manchas solares. Na similaridade dessas curvas é evidente que o Sol tem influenciado o clima dos últimos 150 anos. Tanto o número de manchas solares e o comprimento do ciclo solar são representativos da quantidade de energia solar que a Terra recebe.....	42
2.6	Estrutura dos anéis de crescimento de coníferas apresentando (a) o lenho inicial (earlywood) com células de paredes finas e grande diâmetro, em cores claras, (b) o lenho tardio (latewood) com células de paredes grossas e diâmetro pequeno, em cores escuras.....	46

3.1	Ilustração mostrando a fragmentação do PANGEA dando origem aos continentes eurásia e gondwana há 225 milhões de anos atrás. A partir daí, o Gondwana e a Eurásia se fragmentam e começa a migração continental, com o afastamento da América do continente africano/europeu.....	52
3.2	Escala de tempo geológico.....	53
3.3	Ocorrência de representantes da família Araucariaceae durante o Terciário.....	54
3.4	Fotomicrografia (A) e fotomicrografia-100X (B) do lenho de <i>Araucaria angustifolia</i> e anéis de crescimento ausentes (C).....	57
3.5	Xilema secundário e os anéis de crescimento das amostras petrificadas (a) e atuais (b) de araucárias	59
3.6	Distribuição da <i>Araucaria angustifolia</i> na América do Sul.....	60
3.7	Exemplares de <i>Araucaria angustifolia</i> localizados em Severiano de Almeida.....	61
3.8	Classificação climática do estado do Rio Grande do Sul.....	62
3.9	Faixas de precipitação sazonal e anual.....	63
3.10	Comportamento da temperatura sazonal e anual.....	64
3.11	Localização dos sítios paleontológicos.....	65
3.12	Fragments de tronco fóssil rolado na superfície (Jardim Paleobotânico - Mata)..	66
3.13	(A) Lenhos fósseis utilizados no calçamento e como monumento na praça em frente à Igreja Luterana da cidade de Mata. (B) Amostra com seus anéis de crescimento.....	67
3.14	Partes componentes de um trado e as amostras de lenho de <i>Araucaria angustifolia</i> coletadas	68
3.15	Obtenção de amostra de lenho do restante do tronco enraizado, seção transversal de tronco de <i>Araucaria angustifolia</i>	69
3.16	Disco adiamantado onde foram realizados os cortes das amostras.....	72
3.17	Mesa de mensuração marca Lintab III, com deslocamento horizontal e precisão de 1/100 mm, e sistema de iluminação de fibra ótica – Leica modelo KL 1500.....	74
3.18	Fragmentação que se dá através das linhas de fraqueza representadas pelo câmbio e pelos limites dos anéis de crescimento. (a) amostra AEI, (b) amostra BR287I.....	75
3.19	Exemplo de uma imagem bitmap digitalizada de uma amostra do <i>Pinus taeda</i> ,	

coletada na região sul do Brasil. Imagem foi digitalizada com uma resolução de 900 dpi.....	76
3.20 Janela inicial do programa TIIAA, que apresenta o tratamento aplicado na imagem para salientar melhor os contornos dos anéis de crescimento.....	77
3.21 Janela final do programa TIIAA que contém a imagem dos anéis de crescimento de árvores (A), para digitalizar cada anel movimenta-se a posição de cada um. Em (B) é mostrado o gráfico dos tons de cinza em função da sua posição na imagem (em pixel), juntamente com a posição de cada anel (representado pelo símbolo “•”). Como exemplos são mostrados os anéis de crescimento números 11, 12, 13 e 14 (A), e suas respectivas posições (B).....	78
4.1 Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 12 amostras do lenho das árvores coletadas em Passo Fundo.....	84
4.2 Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 10 amostras do lenho das árvores coletadas em Severiano de Almeida.....	84
4.3 Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 12 amostras do lenho das árvores coletadas em Passo Fundo (curvas pretas) e suas tendências (curvas vermelhas).....	85
4.4 Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 10 amostras do lenho das árvores coletadas em Severiano de Almeida (curvas pretas) e suas tendências (curvas vermelhas).....	85
4.5 Cronologias de cada árvore de Passo Fundo e cronologia média do local.....	86
4.6 Cronologias de cada árvore de Severiano de Almeida e cronologia média do local.....	87
4.7 Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 15 amostras do lenho das árvores coletadas em Mata e São Pedro do Sul.	88
4.8 Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 15 amostras do lenho das árvores coletadas em Mata e São Pedro do Sul (curvas pretas) e suas tendências (curvas vermelhas).....	88
4.9 Cronologias dos anéis de crescimento de cada amostra do lenho de Mata e São Pedro do Sul.....	89
4.10 Média anual do número de manchas solares (a), índice geomagnético anual aa	

(b), anomalia da temperatura entre a latitude 24° a 44° sul (c), índice de oscilação sul, SOI (d).....	90
4.11 Espectros das 12 séries cronológicas das amostras do lenho de Passo Fundo e da cronologia média do local.....	93
4.12 Ocorrência dos períodos encontrados nas 12 amostras do lenho de Passo Fundo..	94
4.13 Espectros das séries cronológicas das amostras do lenho de Severiano de Almeida e da cronologia média do local.....	95
4.14 Ocorrência dos períodos encontrados nas amostras do lenho de Severiano de Almeida.....	96
4.15 Espectros de amplitude em função da frequência das cronologias médias das amostras de Passo Fundo (a), de Severiano de Almeida (b), da série temporal do número de manchas solares (c), da série temporal do índice geomagnético <i>aa</i> (d), da série temporal da anomalia da temperatura entre 24° a 44° sul (e) e do índice de oscilação sul – SOI (f).....	98
4.16 Espectro de amplitude das séries cronológicas das amostras do lenho petrificado de Mata e São Pedro do Sul.....	102
4.17 Ocorrência dos períodos encontrados nas amostras dos lenhos petrificados.....	103
4.18 (a) Cronologia média da largura dos anéis de crescimento de árvores de Passo Fundo. (b) Espectro de ondeleta com o cone de confiança (curva preta) e nível de confiança de 95% (contorno branco).....	106
4.19 (a) Cronologia média da largura dos anéis de crescimento de árvores de Severiano de Almeida. (b) Espectro de ondeleta com o cone de confiança (curva preta) e nível de confiança de 95% (contorno branco).....	106
4.20 Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	108
4.21 Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	109
4.22 Espectro de potência cruzado entre o índice geomagnético <i>aa</i> e a série	

	cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	112
4.23	Espectro de potência cruzado entre o índice geomagnético aa e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	113
4.24	Espectro de potência cruzado entre a anomalia da temperatura entre 24° e 44° sul e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	114
4.25	Espectro de potência cruzado entre a anomalia da temperatura entre 24° e 44° sul e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	115
4.26	Espectro de potência cruzado entre o índice SOI e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	116
4.27	Espectro de potência cruzado entre o índice SOI e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de confiança (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).....	117
4.28	Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras AEI (painel esquerdo) AEII (painel direito).....	120
4.29	Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras AEIII (painel esquerdo) AEIV (painel direito).....	120
4.30	Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras AEV (painel esquerdo) AEVI (painel direito).....	121
4.31	Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras BRII (painel esquerdo) BRI (painel direito).....	121
4.32	Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras SPSa325 (painel esquerdo) SPSr2 (painel direito).....	122
4.33	Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras SPSb (painel	

esquerdo) SPSp (painel direto).....	122
4.34 Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras MataCap (painel esquerdo) Mata M1 (painel direto).....	123
4.35 Espectro de ondeleta da série cronológica da amostra Mata M2.....	123

LISTA DE TABELAS

3.1 Informações sobre a altitude, latitude e longitude dos locais de coleta.....	61
3.2 Nomenclatura das amostras de araucárias em relação aos locais de coleta.....	68
3.3 Informações sobre as amostras dos lenhos coletados em cada cidade.....	70
3.4 Nomenclatura das amostras petrificadas em relação aos locais de coleta.....	70

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O meio ambiente da Terra como nós o conhecemos só existe entre outros motivos por causa da energia que o planeta recebe do Sol. A radiação solar influencia as circulações atmosféricas e oceânicas que, por sua vez, influenciam a biosfera (National Research Council, 1994). O estudo das variações solares associadas ao seu fluxo de energia é inteiramente observacional e, também, muito recente, o que restringe muito a compreensão de seus efeitos sobre o clima do planeta e uma possível predição do mesmo para o futuro (Hoyt e Schatten, 1997). Dados obtidos por satélites, desde o início de 1980, indicam uma variação percentual de 0.1% na luminosidade solar durante o ciclo de 11 anos, com uma emissão maior para o período do máximo em relação ao mínimo no número de manchas solares (Wilson e Hudson 1988).

A pesquisa desenvolvida habitualmente sobre as relações Sol-Terra-Clima é realizada principalmente pela aquisição e análise de dados observacionais numa escala de tempo que vai do passado recente ao presente. Entre os dados observacionais mais usados, podem ser citados: as manchas solares, dados geomagnéticos e ionosféricos, dados meteorológicos, climáticos e hidrológicos.

Na Terra, vários fenômenos geofísicos ou biológicos propiciam a possibilidade de se recolher amostras, cuja análise fornece dados sobre o passado (Rigozo, 1994). Fenômenos naturais, como descritos na geologia, registram sua própria história em grande escala de tempo, da ordem de bilhões de anos. Na escala de milhões de anos, os sedimentos marinhos e oceânicos fornecem dados importantes sobre a evolução da Terra nos aspectos climatológicos, paleomagnético e biológicos. Em escalas menores, de séculos a milhares de anos, é possível, por exemplo, investigar o passado através das árvores que registram, em seus anéis de crescimento, a memória das variações do ambiente onde vivem. Nessas variações é possível identificar, dentre outras, as que são devidas a mudanças climáticas associadas as variações da atividade solar já conhecida, através de observações do número das manchas solares (Nordemann e Rigozo, 2003).

Alguns fenômenos terrestres parecem ser influenciados pelas variações da atividade solar de curto e longo períodos (Murphy, 1990). Meldrum, um meteorologista britânico na Índia, em 1885, encontrou uma forte relação entre o número de manchas solares e o número de ciclones, como mostrado na Figura 1.1. O resultado encontrado por Meldrum convenceu muitos cientistas da real relação entre Sol-Terra, e as investigações começaram. Dezenas de artigos relacionando mudanças no Sol a variações na Terra apareceram: relações entre a variação do Sol e a temperatura; precipitação e seca, fluxo de rios, ciclones; população de insetos; destruições; preços de cereais, e muitos outros tópicos (Hoyt e Schatten, 1997).

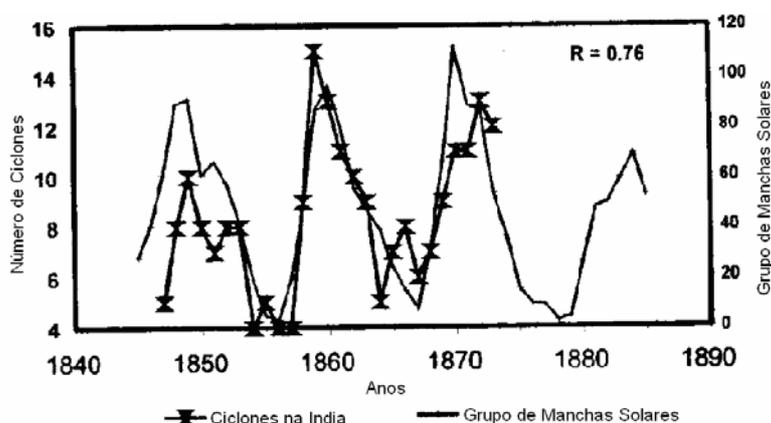


Figura 1.1: Número anual de ciclones oceânicos na Índia de Meldrum e o número de grupos de manchas solares.

FONTE: Hoyt e Schatten (1997).

Os registros isotópicos em árvores apresentam informações significativas sobre as mudanças ambientais e as relações Sol-Terra no passado (Mori, 1981). Um monitoramento indireto dessas variações no passado foi feito por Stuiver e Quay (1980), através de medidas das variações ($\Delta^{14}\text{C}$) do carbono ^{14}C produzido na atmosfera terrestre pela incidência da radiação cósmica e assimilado pelas árvores. Mudanças na razão de produção do ^{14}C estão associadas às variações da atividade solar, que apresentam uma relação inversa – nas épocas que a atividade solar é máxima existe uma baixa produção do ^{14}C e nas épocas que a atividade solar é mínima existe uma maior produção do ^{14}C . Estas flutuações se apresentam em escalas seculares bem como em escalas de décadas, incluindo o ciclo solar de 11 anos. O comportamento de longo período do Sol também mostra transientes dinâmicos tais como o mínimo de Maunder de 1645 a 1715 DC, caracterizado por um

surpreendente decréscimo da atividade solar. Novos métodos de medida têm, recentemente, permitido compreender mais profundamente as variações solares nos últimos 10000 anos. O próximo desafio é buscar informações sobre épocas mais antigas (Kurths et. al., 1993).

A escassez de registros climáticos continentais e a qualidade dos registros em anéis de crescimento de árvores originaram o desenvolvimento da dendrocronologia e da dendroclimatologia (Fritts, 1976). O aproveitamento do estudo dos anéis de crescimento de árvores para a pesquisa em Ciências Ambientais e, em particular, sobre a atividade solar no passado é mais recente (Duttilleul e Till, 1992; Kurths, 1993; Murphy et al., 1996; Rigozo, 1998; Rigozo et al., 2001; Nordemann et al., 2002). Ela se justifica pela excelente definição temporal, devida à presença de anéis de crescimento anuais que providencia uma excelente escala de tempo, e, dentro de certas condições, pela sensibilidade de parâmetros analisados (espessura dos anéis, composição elementar ou isotópica) aos fatores ou condições ambientais citadas (luz, temperatura, disponibilidade de água e de nutrientes e condições adversas) (Fritts, 1976).

Embora a conexão entre variações solares e anéis de crescimento seja mais complexa do que entre variações solares e radioisótopos cosmogênicos, vários estudos sugerem que tais conexões podem existir. Primeiramente, anéis de crescimento de árvores têm sido usados para reconstruir o clima. Segundo, a evidência da influência solar no clima também tem sido encontrada em escala de tempo de séculos bem como em escala mais curta, de 11 anos. Terceiro, evidências de ciclos solares em anéis de árvores recentes têm sido observadas (Kurths et. al., 1993; Rigozo et. al, 2002; 2004; 2006; Nordemann et. al, 2005).

Tradicionalmente, inferências paleoclimáticas baseadas em plantas têm focado no crescimento característico e/ou em uma aproximação “bioclimática” que fiam-se no uso de material taxonomicamente identificável sob a hipótese que os requerimentos climáticos dos fósseis são mais ou menos similares àqueles de seus “relativos vivos mais próximos” hoje (Poole et al, 2005). Um número de técnicas também tem sido inventado por meio do qual dados paleoclimáticos quantitativos podem ser derivados de materiais de plantas fósseis sem confiar muito na identificação taxonômica do material sob estudo. Grupos de folhas

fósseis têm recebido a maior parte da atenção por meio da qual técnicas utilizam a correlação conhecida entre a fisionomia da folha e parâmetros do clima (Poole et al, 2005).

Um tipo de material biológico que tem sido pouco utilizado a este respeito é a madeira fóssil. A madeira é freqüentemente espalhada e abundante através do tempo geológico, e unido com sua robustez natural, pode dar um arquivo potencialmente rico de dados paleoecológico e paleoclimático (Poole et al, 2005). Informações podem ser determinadas da análise dos anéis de crescimento na madeira fóssil (paleodendrocronologia) e da investigação de caracteres anatômicos específicos que são associados com certos aspectos do clima (Francis e Poole, 2002).

O campo da paleoclimatologia tem se desenvolvido substancialmente e aumentado o nosso conhecimento sobre as décadas passadas. Isto se deve à necessidade de se entender e estimar as mudanças ambientais de longos períodos ou “paleo-perspectivas” que ocorreram ou ocorrerão. É claro que o clima varia em todas as escalas de tempo, de estações do ano a milênios. E é também claro que registros instrumentais de mudanças do clima são insuficientes para observar e estudar como o sistema do clima opera em escalas de tempo muito maiores do que umas poucas décadas, ou sob forçantes climáticos diferentes do presente. A “paleo-perspectiva” permite fazer uso hábil de registros paleoclimáticos, paleoceanográficos e paleoecológicos podendo ser a ligação do presente e futuro dentro do amplo contexto de muitas realizações do sistema dinâmico do clima passado (Overpeck, 1995).

O objetivo deste trabalho é analisar a atividade solar, fenômenos geofísicos e fatores climáticos nos anéis de crescimento de árvores e suas inter-relações através de análises matemáticas. Este trabalho se justifica pelo fato das cronologias de anéis de crescimento de árvores representarem um registro natural, que são úteis no estudo de possíveis conexões entre variáveis solares/geofísicas/climáticas e porque elas podem ser usadas para inferir a sua evolução durante períodos passados sem registros instrumentais. Isto nos conduz a investigar registros de anéis de árvores de coníferas atuais, nos últimos 400 anos aproximadamente, e do passado, há cerca de 200 milhões de anos. As cronologias analisadas neste estudo são de amostras de árvores petrificadas e araucárias (*Araucaria*

angustifolia) da região Sul do Brasil (Rio Grande do Sul). Com este objetivo organizou-se o trabalho como segue:

No Capítulo II apresenta-se uma revisão bibliográfica da literatura que descreve a relação Sol-Terra; registros e observações da atividade solar e climática; e como estas podem e são estudadas nas séries temporais de anéis de crescimento de árvores;

No capítulo III descrevem-se, passo a passo, as metodologias empregadas no estudo, desde as escolhas das amostras e dos locais, os procedimentos de coleta das amostras, bem como o tratamento dado a elas. Também são mostradas a obtenção e o tratamento das cronologias dos anéis de crescimento das amostras de árvores.

No Capítulo IV apresentam-se os resultados das análises das séries cronológicas dos anéis de crescimento. Os procedimentos detêm-se na obtenção da melhor curva de ajuste para cada série, de modo que as tendências de longo período, tais como, tendência de crescimento e processos de distúrbios dentro e/ou fora da floresta (por ex., derrubada de árvores, fogo, insetos, etc.) sejam eliminadas, a fim de se obter a cronologia média do local.

No Capítulo V apresentam-se as conclusões obtidas e as observações feitas durante a realização de cada etapa do trabalho.

No Apêndice A apresentam-se as funções de ajustes representativas das longas tendências dos anéis de crescimento na obtenção das cronologias dos anéis de crescimento de árvores.

CAPÍTULO 2

RELAÇÕES SOL-TERRA

A interação Sol-Terra e os aspectos ligados aos efeitos geofísicos e climáticos da variabilidade da atividade solar representam um dos mais importantes problemas da Geofísica Espacial atual. As observações diretas do Sol, o monitoramento de sua atividade através de índices como o número de manchas solares, as medidas de parâmetros de fenômenos ambientes (temperaturas do ar e do oceano, pluviometria, níveis de rios etc.) são os meios mais utilizados para se conhecer as variações desses fenômenos e servem de base para analisar suas correlações e realizar previsões. Um monitoramento indireto das variações solares e de outros fenômenos geofísicos, numa escala de tempo maior no passado, é possível devido à existência de registros naturais, que são capazes de gravar e reter informações, melhorando a compreensão de seus efeitos sobre o clima do planeta e uma possível previsão do mesmo para o futuro, contribuindo para melhorar as previsões e validar modelos.

Neste Capítulo são apresentados conceitos básicos sobre a atividade solar e seus efeitos no clima da Terra em grandes escalas de tempo, bem como, os meios de estudo desta relação ao longo de milênios, os registros naturais, no caso, os anéis de crescimento de árvores.

2.1: Atividade Solar

O Sol tem aproximadamente 4.5 bilhões de anos. Ele é composto de 92.1% de hidrogênio e 7.8% de hélio, bem como de 0.1% dos demais elementos. Estima-se que, desde o seu início, a luminosidade do Sol tem gradualmente aumentado por aproximadamente 30%. Acredita-se que a energia gerada no Sol seja devido a uma cadeia de reações nucleares ocorrendo dentro do Sol, com quatro átomos de hidrogênio fundindo-se para formar um átomo de hélio. Como os quatro átomos de hidrogênio têm mais massa do que um átomo de hélio, o excesso de massa é convertido em energia. Esta energia é transportada do interior do Sol, primeiro por radiação e então por convecção para camadas mais externas, por último levando à deposição de energia na camada superficial (fotosfera). Na fotosfera a energia é finalmente radiada para o espaço (Hoyt e Schatten, 1997).

A emissão de energia do Sol em todas as suas formas não é constante, ela varia tanto no tempo (de segundos a séculos) quanto com a posição no Sol. Quando se observa o Sol em alta resolução, em comprimentos de onda em $H\alpha$ ou raios-X, a fotosfera e também a atmosfera solar revelam, estruturas que mudam dinamicamente de muitas maneiras. Estas estruturas são observadas em todas as latitudes no disco e em todos os níveis na atmosfera, e elas se manifestam em todas as regiões do espectro eletromagnético. A atividade solar tem influência sobre a distribuição dos campos magnéticos e partículas carregadas no meio interplanetário e tem importantes conseqüências no estado físico da atmosfera superior da Terra e para a atividade geomagnética (Priest, 1987).

A camada de convecção completa o transporte de energia e de sua irradiação do centro do Sol para o espaço pela fotosfera, e mais importante para o vento solar. Ela determina as escalas temporais e espaciais da estrutura do campo magnético coronal que controla as propriedades do vento solar. O campo magnético é gerado pelo processo de dínamo na zona convectiva. Deste campo resultam as manchas solares, “solar flares”, ejeção de massa coronal (*Coronal Mass Ejections - CME*) e outros tipos de atividade magnética, bem como o ciclo solar. Os ciclos solares, monitorados pelo número de manchas solares, são variações periódicas na atividade, com uma duração dentro de um período médio de 11 anos. Estas características resultam quando o campo magnético na superfície do Sol ganha intensidade suficiente para inibir o fluxo de calor convectivo do interior do Sol (Hoyt and Schatten, 1997).

O número das manchas solares varia com periodicidade média de 11 anos. Proeminências podem durar 200 dias, ao passo que um grande grupo de manchas pode durar metade do tempo e “Solar Flares” duram minutos a horas. Estas mudanças estão relacionadas ao ciclo de atividade solar o qual é tradicionalmente medido pelo número de manchas solares (e.g., Priest, 1987; Kivelson e Russell, 1995; Hoyt and Schatten, 1997).

Com exceção das granulações, quase todas as características observáveis na atmosfera solar devem sua existência ao campo magnético, isto é, elas representam diferentes maneiras em que o plasma solar está respondendo ao desenvolvimento do campo magnético, do qual as manchas solares são exemplos mais contundentes (Priest, 1987; Hoyt and Schatten, 1997).

A Figura 2.1 apresenta a série do número de manchas solares (R_z), em médias anuais, desde 1700.

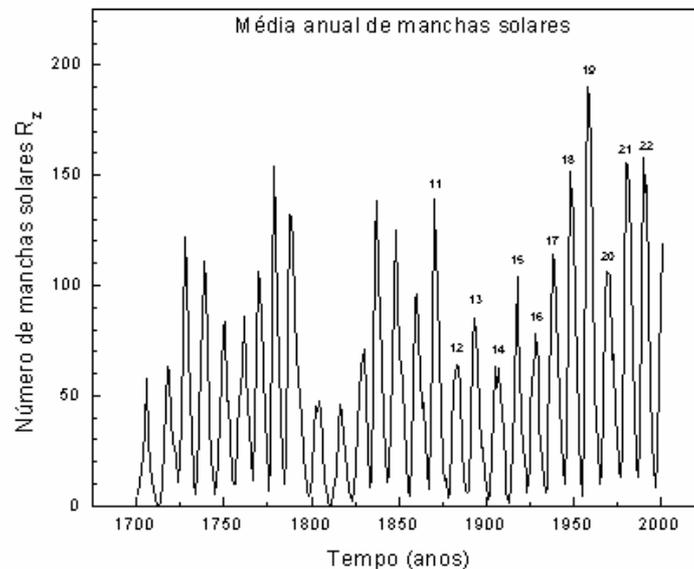


Figura 2.1: Variação na média anual do número de manchas solares, mostrando os ciclos solares.

O ciclo das manchas solares apresenta uma considerável variação no período de aproximadamente 11 anos. Por exemplo, entre 1750 - 1958 a média temporal entre os máximos foi de 10.9 anos, com um intervalo de 7.3 a 17.1 anos; ao passo que o período médio entre os mínimos foi de 11.1 anos, com uma variação entre 9 a 13.6 anos. Outra característica do ciclo solar é que o tempo de aumento do mínimo para o máximo é menor do que o de declínio para o mínimo novamente: a média no tempo de aumento é de 4.5 anos, enquanto o tempo de decaimento é 6.5 anos, com a assimetria temporal entre a fase ascendente e a descendente sendo maior quanto maior o máximo. Também, um amplo intervalo no valor de máximo e mínimo na amplitude das manchas solares é encontrado (Priest, 1987).

Variações de curto período no número de manchas solares têm magnitudes consideráveis e parecem ocorrer de forma aleatória, embora uma variação de 27 dias esteja presente; isto corresponde ao período de rotação do Sol e é causado parcialmente pela persistência de grandes manchas solares por mais de uma rotação, e parcialmente pelas longitudes

preferidas para seu aparecimento. Uma outra tendência pode ser vista na Figura 2.1 pelos picos do número de manchas solares variar a cada sete ou oito ciclos (picos altos e baixos), o que sugere que um longo ciclo pode estar acontecendo – ciclo de Gleissberg de aproximadamente 90 anos (Priest, 1987; Kivelson e Russell, 1995).

Alguns fatos observacionais intrínsecos sobre grupos de manchas bipolares são que a polaridade das manchas é a mesma, para todo um ciclo de 11 anos, revertendo seu sentido no início do novo ciclo. Esta regra da polaridade das manchas solares foi proposta por Hale e Nicholson em 1925 e foi mostrado que ela é obedecida por 97% dos grupos de manchas solares. Dois ciclos de manchas solares são necessários para o Sol retornar ao mesmo estado de polaridade, resultando numa periodicidade de 22 anos que é conhecido como ciclo de Hale (Priest, 1987).

Em função da atividade solar variar com o período de 11 anos, as estruturas do meio interplanetário e o campo magnético interplanetário também variam sistematicamente com este mesmo período. Com o congelamento das linhas de campo ao plasma, devido ao fato do vento solar ser altamente condutor, o campo magnético do Sol é arrastado com o vento solar ao longo do meio interplanetário, cuja intensidade próxima a Terra é da ordem de 5 nT. O vento solar e o campo magnético interplanetário (*Interplanetary magnetic field - IMF*) interagem com o campo magnético terrestre configurando uma região chamada magnetosfera. Perturbações no campo magnético interplanetário podem ser causadas por fenômenos solares como buracos coronais, explosões solares e ejeções de massa coronal, e assim propiciar alterações no campo magnético terrestre. As explosões solares e as ejeções de massa coronal são formas de atividade solar de pequena duração, mas cujas frequências seguem o ciclo de atividade solar (Parks, 1991; Kivelson e Russell, 1995).

A energia média radiada para a Terra, conhecida como irradiância total do Sol ou constante solar, foi por muito tempo considerada invariante, mas sabe-se agora que ela varia em escalas de tempo de dias a décadas e provavelmente escalas maiores. No topo da atmosfera da Terra a irradiância total do Sol é aproximadamente 1366 W/m^2 . Durante o curso do ciclo solar de 11 anos, a energia média emitida pelo Sol muda por aproximadamente 0.1%.

Assim, a “constante” solar varia entre 1365 a 1367 W/m² (Lean, 1991; Frölich e Lean, 1998).

No máximo do ciclo solar quando as manchas solares escuras são mais numerosas no disco solar, o Sol emite energia com uma intensidade maior. A energia extra liberada no máximo das manchas solares vem das áreas brilhantes rodeando as manchas ativas, as *Faculae*, áreas mais brilhante do que a superfície que as rodeiam, que aumenta a saída radiativa total. Durante o mínimo de Maunder, que ocorreu na última metade do século 17, tem sido postulado que a superfície do Sol não foi somente desprovido de manchas e faculae, mas também foi menos brilhante (Hoyt and Schatten, 1997; Reid, 1995; Seinfeld and Pandis, 1998).

Em outros comprimentos de onda tais como UV e EUV a variabilidade solar pode ser muito maior. Em comprimentos de onda em raios-X, o Sol pode mudar por um fator de 100 ou mesmo 1000 em poucos minutos, mas estes comprimentos de ondas somente afetam a alta atmosfera (Lean, 1991). A Figura 2.2 mostra uma seqüência de 5 anos de imagens em raios-X do Sol do máximo ao mínimo solar.

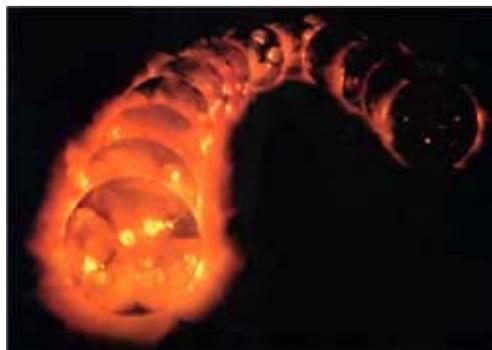


Figura 2.2: Imagem mostra uma seqüência de imagens em raios-X do Sol do máximo ao mínimo solar.

FONTE: NGDC – NOAA (2005).

Pensa-se que a energia total que sai do Sol tem mudado significativamente sobre uma longa escala de tempo. Existe evidência que a energia total do Sol pode ter sido mais baixa do que 1360 W/m² durante o século 19 e, mesmo mais baixa durante o século 17. Sobre esta escala

de tempo de centenas de anos, a saída de energia do Sol pode ter mudado por 0.5% (Lean e Rind, 1994; Seinfeld and Pandis, 1998).

O comportamento da atividade solar no passado é baseado em dados históricos de auroras e catálogos de observações a olho nu das manchas solares. Através destes catálogos foram encontrados períodos em torno de 11, 90, 200, 400 anos. De um catálogo de 2000 anos de observações das manchas solares feitas na China foi obtido o espectro de potência de variações de longos períodos da atividade solar e foi encontrado um período de 210 anos (Dergachev e Raspopov, 2000).

A existência de periodicidades solares de aproximadamente 210 e 90 anos em sinais climáticos obtidos de dados de crescimento de anéis de árvores, sedimentos marinhos, varves, $\delta^{18}\text{O}$ em testemunhos de gelo etc. mostra que a irradiância solar e a entrada de energia solar na Terra podem estar variando com as variações e tendências de longos períodos da atividade solar (Dergachev e Raspopov, 2000).

Medidas feitas por satélites desde 1979 fornecem um registro preciso da saída de energia do sol, em escala de tempo de minutos a décadas. Não existem medidas diretas da radiação solar estendendo-se além do último século ou mais. Os registros, indicadores, mais longos da atividade solar são derivados da abundância de isótopos atômicos que são produzidos na atmosfera pelo impacto de raios cósmicos, a taxa de incidência pela qual a Terra é afetada pelas condições do Sol, e assim fornecem uma história da mudança solar (Stuiver, 1980).

Quando o Sol está mais ativo, seu próprio campo magnético blindava mais efetivamente os raios cósmicos que caso contrário chocar-se-iam com a atmosfera da Terra reduzindo assim a produção de ^{14}C ; contrariamente, quando o Sol está menos ativo, a Terra recebe mais raios cósmicos, produzindo mais ^{14}C . Isótopos de ^{14}C , encontrado em anéis de árvores, e ^{10}B , aprisionado em depósitos de gelo, são sensíveis ao influxo de raios cósmicos. Os registros desses isótopos existem há milhares de anos. Eles exibem variações cíclicas em torno de 2300, 210 e 88 anos, bem como os ciclos de 11 anos das manchas solares, todos atribuídos ao Sol (Murphy et al., 1996; Bucha, 1998; Seinfeld and Pandis, 1998; Raspopov et al., 2001). A Figura 2.3 mostra a concentração de ^{14}C de anéis de árvores proporcional à

atividade solar e plotado junto com o número de manchas solares. Os últimos mil anos revelam dois ou possivelmente três grandes mínimos: (1) o mínimo de Maunder de 1645 a 1715, (2) o mínimo de Spörer em torno de 1500, e (3) o mínimo de Wolf em torno de 1350. O Grande Máximo na atividade solar próximo de 1200 é também evidente (Eddy, 1976).

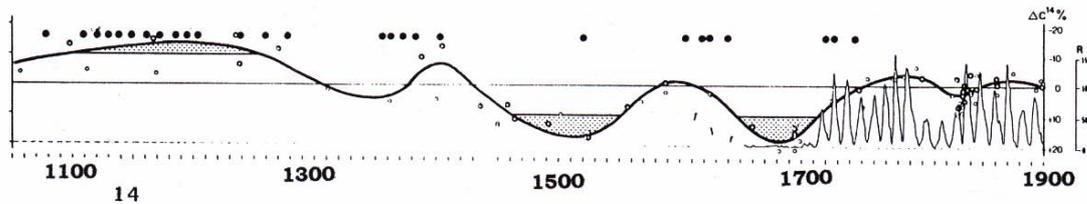


Figura 2.3: Valores medidos da concentração de ^{14}C (curva sólida) plotado junto com o número de manchas solares. O mínimo de Maunder (1645-1715) é claramente evidente, Mas o Mínimo de Dalton (1795-1825) é menos claro. A lenta resposta do ^{14}C no tempo tende a obscurecer variações mais fracas tais como o mínimo de Dalton. Também é notado o mínimo de Spörer em torno de 1500, e outro grande mínimo em torno de 1350. Círculos pretos são dados de manchas solares vistas a olho nu.

FONTE: Eddy (1976).

A presente produção de ^{14}C e ^{10}B parece estar próxima aos níveis historicamente baixos, como um resultado da persistência da alta atividade solar que inibe a taxa com a qual estes isótopos são produzidos. Existe um aumento na radiação solar total de $\sim 0.25\%$ sobre os últimos 300 anos (Seinfeld and Pandis, 1998).

2.2: Causas das mudanças climáticas

A atmosfera não é estática. Ao contrário, ela está sempre em constante agitação. As características atmosféricas mudam de lugar para lugar e com o decorrer do tempo em qualquer lugar e em escalas de tempo que variam desde os microssegundos até centenas de anos. Existem interações importantes dentro da atmosfera, que podem ser resultantes ou mesmo causadoras de tais mudanças. Essas são apropriadamente denominadas mecanismos

de realimentação, pois não existem processos simples unidirecionais de causa e efeito, uma vez que os efeitos freqüentemente retornam para alterar suas causas. Assim, as mudanças dentro da atmosfera podem ser internamente induzidas dentro do sistema Terra-atmosfera ou externamente induzidas por fatores extraterrestres (Ruddiman, 2001; IPCC, 1995; Ayoade, 1998).

Uma mudança no clima implica em uma mudança na circulação geral da atmosfera, da qual o clima depende em última análise. Contudo, o clima envolve não somente a atmosfera como também a hidrosfera, a biosfera, a litosfera e a criosfera. Estes são os cinco componentes que formam o sistema climático. Este sistema também está sujeito a influências extraterrestres, particularmente à do Sol. Portanto, o clima depende de, ou é determinado por, dois fatores principais: 1) a natureza dos componentes que formam o sistema climático e as interações entre vários componentes; 2) a natureza das condições geofísicas exteriores ao sistema climático e as influências que exercem sobre o sistema climático (Hoyt e Schatten, 1997; Seinfeld and Pandis, 1998).

O estado climático em qualquer período depende de três fatores cruciais que são: a) a quantidade de energia proveniente do Sol recebida pelo sistema climático; b) a maneira pela qual esta energia é distribuída e absorvida sobre a superfície da Terra; c) a natureza da interação dos processos entre os vários componentes do sistema climático.

As teorias de mudança climática tentam explicar as variações temporais nos três fatores acima. Contudo, as variações no clima ocorrem em diferentes escalas de tempo e, portanto, podemos requerer diferentes teorias para explicar tais variações. Esta é a razão por que nenhuma teoria isolada de mudança climática foi considerada satisfatória na explicação de todas as variações que ocorreram no clima mundial. Além disso, acredita-se que vários fatores atuam para causar uma mudança no clima. As várias teorias de mudança climática, que foram formuladas no decorrer dos anos, podem ser discutidas sob três amplas categorias, a saber: causas terrestres, astronômicas e extraterrestres (Ayoade, 1998; Hoyt e Schatten, 1997; Seinfeld and Pandis, 1998).

A. Causas terrestres: 1) Migração polar e deriva continental, 2) Mudanças na topografia da Terra, 3) Variações na composição atmosférica, 4) Mudanças na distribuição das superfícies continentais e hídricas, 5) Variações na cobertura de neve e de gelo,

B. Causas astronômicas: 1) Mudanças na excentricidade da órbita terrestre, 2) Mudanças na precessão dos equinócios, 3) Mudanças na obliquidade do plano de eclíptica.

C. Causas extraterrestres: 1) Variações na quantidade de radiação solar emitida (“output” solar), 2) Variações na absorção da radiação solar exterior à atmosfera terrestre.

Dos vários mecanismos que têm sido propostos para explicar mudanças de longos períodos no clima devido a efeitos de fenômenos solares, três diferentes aspectos da variabilidade solar podem, de modo concebível, ter um impacto direto no ambiente da superfície da Terra. São: 1) Variações na irradiância espectral, especialmente próximo ao UV e no UV médio, levando a mudanças no UV ambiente na superfície da Terra, e possivelmente conduzindo variações na dinâmica troposférica; 2) Variação da irradiância total do Sol (a “constante” solar), levando a mudanças no balanço de radiação planetária, e a variações no clima regional e global; 3) Variações no vento solar, levando a mudanças na ionização atmosférica por raios cósmicos e no circuito elétrico global, com potencial consequência para a nucleação e desenvolvimento de nuvens (Reid, 1999).

2.3: A conexão Sol-Clima

Os primeiros registros da relação entre o Sol e Terra datam de 400 anos antes de Cristo, na Grécia Antiga, quando Meton registrou o nascer do Sol e da Lua, durante 20 anos, com esperança de encontrar mudanças na suas localizações. Através de suas observações, ele percebeu manchas na face do Sol. Ao examinar seus registros pareceu confirmar-se suas crenças que quando o Sol tem mais manchas, o tempo tende a ser úmido e chuvoso (Hoyt and Schatten, 1997).

Manchas solares, flares, ejeções de massa coronal, e outros tipos de atividade magnética, bem como o ciclo solar de 11 anos, devem sua existência ao campo magnético solar. Junto com as variações de 11 anos estão mudanças com duração mais longa, tais como o ciclo de

Gleissberg, com variações de escala de tempo de aproximadamente 100 anos. Estas variações solares de longo período fazem do Sol um candidato para influenciar nosso clima sobre longas escalas de tempo (Kivelson e Russell, 1995).

A quantidade de radiação solar que alcança a Terra e as mudanças na orientação da Terra ao Sol têm sido as maiores causas de mudanças climáticas através de sua história. Se a intensidade da radiação do Sol diminuir 5 a 10% e não existir outro fator compensatório, o gelo traria o planeta em menos de um século. Durante os milhões de anos passados, a Terra experimentou 10 grandes e 40 pequenas épocas de glaciações. Todas parecem ter sido controladas por três elementos orbitais que variam ciclicamente sobre o tempo. Primeiro, mudanças na inclinação da Terra de 22° a 24.5° a cada 41000 anos. Segundo, quando a Terra está mais próxima do Sol também varia com ciclos de 19000 e 24000 anos. Terceiro, a forma de órbita da Terra varia de uma forma mais circular para uma mais elíptica com um período de 100000 anos (Seinfeld and Pandis, 1998).

Os ciclos climáticos causados por estes fatores orbitais são chamados de ciclos de Milankovitch. Superposto aos ciclos de Milankovitch estão mudanças no Sol que ocorrem sobre dias ou meses ou poucos anos. Mudanças orbitais sozinhas parecem não ter causado as vastas mudanças do clima associadas com glaciações e não glaciações. Realimentações, tais como mudanças na refletividade da Terra, quantidade de partículas na atmosfera, e o conteúdo de dióxido de carbono e metano da atmosfera, atuam juntos com as mudanças orbitais para aumentar o aquecimento e o resfriamento global. Os níveis de dióxido de carbono e metano, como mostrado nas medidas dos testemunhos de gelo, decrescem durante tempos de glaciações e aumentam durante períodos de aquecimento, embora não se saiba exatamente como ou por que suas concentrações crescem ou decrescem (Seinfeld and Pandis, 1998).

Outras variações terrestres (ex., aerossóis vulcânicos) podem influenciar o clima por poucos anos, mas não podem dirigir o sistema do clima como forçante de longa escala de tempo necessário para fornecer qualquer coisa além de distúrbios temporários e irregulares.

A redução de energia de aproximadamente 0,1% provavelmente não seja suficiente para influenciar o clima. Talvez mais críticas do que a variação de 0,1% na constante solar sejam as variações na irradiância espectral. Curtos comprimentos de onda no UV e EUV variam mais do que 10% através do ciclo solar. Estas variações podem influenciar significativamente as camadas mais sensíveis e rarefeitas da atmosfera da Terra e assim podem ter importantes implicações para mudanças do clima (Lean, 1991; Seinfeld and Pandis, 1998).

Registros da atividade solar antigamente podem ser deduzidos de isótopos cosmogênicos (^{10}Be , ^{18}O , ^{14}C , etc.) os quais mostram que registros da temperatura da Terra frequentemente, parecem estar correlacionados diretamente com a atividade solar: quando a atividade é alta, a Terra é quente (Hoyt and Schatten, 1997).

Durante a pequena era do gelo, no século 17, o clima foi notavelmente mais frio em todo o mundo. Este está correlacionado com o mínimo de Maunder, um intervalo com poucas manchas solares e auroras (tempestades geomagnéticas). Nos séculos 11 e 12, um máximo medieval na atividade solar corresponde a condições climáticas mais favoráveis. No final de 1700 e início dos anos de 1800, mínimo moderno ou de Dalton, a atividade solar diminuiu, e esta era provocou frio (Hoyt and Schatten, 1997). A Figura 2.4 mostra os grandes máximos e mínimos na atividade solar para o último milênio, épocas de mínimos de Oort, Wolf, Spörer, Maunder e Dalton, e máximos Medieval e Moderno (Rigozo et al. 2001). É agora aceito que o resfriamento global durante a Era do Gelo é o resultado de mudanças na distribuição e quantidade de luz do Sol que alcança a Terra. Durante a última era do gelo, a temperatura média global da Terra foi de aproximadamente 6 °C mais fria do que hoje (Seinfeld and Pandis, 1998).

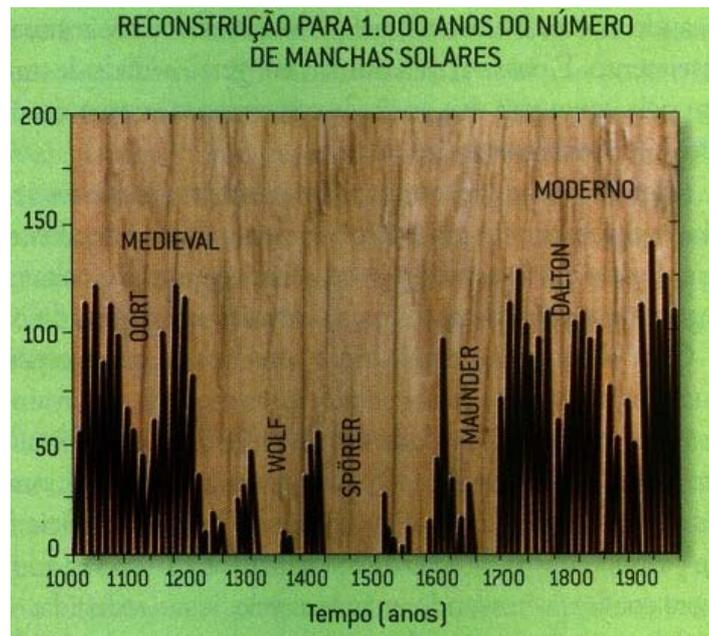


Figura 2.4: Reconstrução do número de manchas solares para o último milênio, obtidos da série temporal do número de manchas solares (R_z) para o período de 1700-1999, mostrando os grandes máximos e mínimos na atividade solar, épocas de mínimos de Oort, Wolf, Spörer, Maunder e Dalton, e máximos Medieval e Moderno.

FONTE: Adaptado de Rigozo et al. (2001).

Nos ciclos recentes, a atividade solar apresenta-se em níveis relativamente elevados. O aumento da temperatura global está aproximadamente paralela a atividade solar (Hoyt and Schatten, 1997). Dados da temperatura global estão disponíveis desde aproximadamente 1860 até o presente. As Figuras 2.5a e 2.5b mostram a comparação da temperatura média global e a atividade solar. Estas correlações são evidências que o Sol tem contribuído para o aquecimento global do século 20. Estima-se que aproximadamente 1/3 do aquecimento global pode ser o resultado de um aumento na energia solar. Então, não está claro que a atividade humana esteja mudando o clima hoje. A atividade solar pode também estar contribuindo para mudanças no clima e provavelmente mudou o clima no passado (Reid, 2000; NGDC – NOAA, 2005).

As mudanças da temperatura média da superfície da Terra para os últimos 150 anos mostram uma boa correlação com tendências de longos períodos da atividade solar, levando em conta as variações solares cíclicas dos períodos de aproximadamente 210 a 90 anos. Assim, uma significativa parte do aumento da temperatura da superfície da Terra durante os últimos 150 anos poder estar relacionada a ciclicidade de longos períodos nos processos do Sol (Dergachev e Raspopov, 2000).

De acordo com pesquisas de Crowley (2000), entre 40-65% das variações de temperatura na escala de décadas durante os 1000 anos antes de 1850 foram causadas por mudanças na irradiância solar e vulcanismo. Enquanto que vulcões individuais, usualmente, somente causam impactos no clima por um ano ou mais, erupções conjuntas podem perturbar o sistema climático por períodos mais longos de tempo.

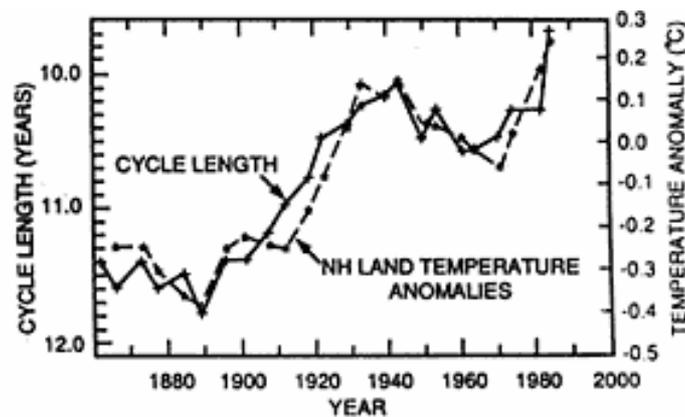


Figura 2.5a: Temperatura da área continental do hemisfério norte é plotado com o comprimento do ciclo solar.

FONTE: Friss-Christensen and Lassen (1991).

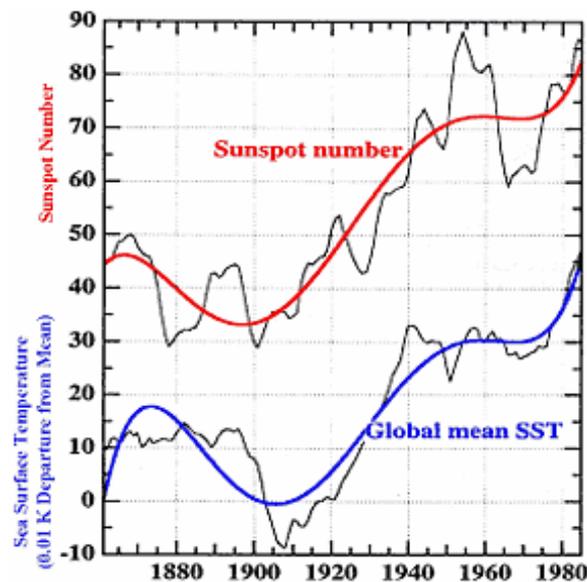


Figura 2.5b: Temperatura média global da superfície do mar plotado com o número de manchas solares. Na similaridade dessas curvas é evidente que o Sol tem influenciado o clima dos últimos 150 anos. Tanto o número de manchas solares e o comprimento do ciclo solar são representativos da quantidade de energia solar que a Terra recebe.

FONTE: Reid (1999).

A Terra tem esquentado aproximadamente $0,8^{\circ}\text{C}$ desde o século 17. Estimativas da temperatura da superfície do hemisfério norte de 1600 a 1800 se correlacionam bem com uma reconstrução das mudanças na radiação solar total, sugerindo uma influência solar predominante no clima durante estes 200 anos, período pré-industrial.

A radiação solar aumentou de 0,14% nestes 200 anos enquanto a temperatura subiu $0,28^{\circ}\text{C}$. A sensibilidade do clima indicado neste registro é 2°C por 1% de mudança na emissão de radiação solar. Aplicando esta sensibilidade para o período desde 1850, o aumento de 0,13% na radiação solar total nos últimos 140 anos teria produzido um aquecimento de $0,26^{\circ}\text{C}$. Isto é, aproximadamente metade do que tem sido observado. Se aplicarmos a mesma sensibilidade nos últimos 25 anos, mudanças solares podem dar conta por menos do que um terço do aquecimento observado (Seinfeld and Pandis, 1998).

2.4: Estudo da Relação Sol-Terra por Registros Naturais

Os estudos científicos sobre o passado são baseados em medidas feitas sobre registros naturais que, de uma maneira geral, fornecem informações sobre fenômenos do passado acontecidos antes de o homem começar a estudá-los. Os registros naturais permitiram desenvolver muitas “ciências do passado” como: paleomagnetismo e arqueomagnetismo, paleoclimatologia, paleontologia, arqueologia etc. (Nordemann e Rigozo, 2003).

As mudanças climáticas do passado, nas diferentes escalas de tempo, são estudadas com a utilização de diferentes técnicas e evidências. As discussões dos climas passados estão organizadas em duas partes. A primeira trata dos climas passados durante um período geológico anterior à história registrada. A segunda trata dos climas durante a história registrada. Nosso conhecimento do clima predominante na fase anterior à história registrada vem de fontes indiretas de evidência na crosta terrestre. Tais evidências de climas passados são muito variadas (Ayoade, 1998).

Variações paleoclimáticas envolvem um amplo intervalo de escala de tempo, e suas causas associadas operam em diferentes frequências. Muitos trabalhos paleoclimáticos têm focalizado que as variações de longos períodos no clima estão envolvidas com mudanças das placas tectônicas. Outros trabalhos evidenciam variações intermediárias, associadas às características orbitais da rotação da Terra, causando ciclos glaciais e interglaciais. Variações mais curtas, de séculos a milênios, como os ciclos de erosão, de mudança vegetacional, e da história da humanidade têm sido reconstruídos e correlacionados a ciclos da atividade vulcânica, das variações nos gases atmosféricos e da atividade solar. Informações paleoclimáticas enfatizando variações de escalas de tempo de estações a séculos podem ser obtidas em registros de testemunhos de gelo, sedimentos de varves, corais e anéis de crescimento de árvores. Variações com frequências maiores têm sido identificadas como os eventos El Niño/ Southern Oscillation (ENSO), as variações solares anuais, o véu de poeira vulcânica, oscilação bienal da atmosfera e variabilidade climática aleatória (Fritts, 1991).

Os efeitos do fenômeno El Niño no clima da América do Sul são importantes e tipicamente induzem secas no nordeste do Brasil e fortes chuvas com inundações no sul. A cronologia

dos anéis de crescimento de árvores representa um dos registros naturais e pode ser usada para inferir a evolução de tais eventos durante períodos passados, sem registros climáticos instrumentais, bem como a influência da atividade solar na taxa de crescimento da árvore (Nordemann et al., 2002).

Há muitos anos que os especialistas avaliam a idade das árvores pela contagem de seus anéis de crescimento anuais, a dendrocronologia. Essa palavra tem origem na associação de três palavras do grego antigo: dendro-crono-logia – árvore-tempo-estudo.

A dendrocronologia determina a idade das árvores pela análise dos anéis de crescimento formados em seu tronco ano a ano e estabelece relações com eventos climáticos (Schweingruber, 1988). A dendrocronologia é uma técnica que caracteriza os anéis de crescimento anuais de árvores, que registram também na celulose de suas células a atividade do ^{14}C (Stuiver and Quay, 1980).

Inúmeras são as aplicações desta ciência. Dentre elas destacam-se os estudos que comprovaram o ciclo das manchas solares, pois foram observados valores das larguras de anéis de crescimento de diferentes espécies arbóreas, que relacionaram-se aos períodos de maior e menor atividade solar (Dergachev e Raspopov, 2000; Raspopov et al., 2001, Rigozo et al., 2004).

A dendroarqueologia tem auxiliado na datação de peças de madeira encontradas em sítios arqueológicos e de obras de arte. A dendroclimatologia relaciona os anéis de crescimento anual com as condições climáticas, permitindo reconstruções e caracterizações de mudanças na temperatura global e da alternância de períodos secos e úmidos que ocorreram no passado. A dendroecologia possibilita determinar o desenvolvimento das árvores em plantações, definir os processos de manutenção das áreas plantadas para a obtenção da rentabilidade desejada, bem como caracterizar os efeitos do desmatamento sobre o restabelecimento das populações nativas. A Dendrogeologia relaciona as datações de eventos geológicos passados como erupções vulcânicas, terremotos, movimento de dunas, entre outros (Seitz e Kanninen, 1989).

As primeiras descrições sobre anéis de crescimento foram feitas por Leonardo da Vinci no século XV, ao verificar a relação entre os períodos de chuva e o crescimento das árvores (Fritts, 1976).

Com o advento do microscópio os estudos anatômicos se desenvolveram de tal forma que em 1855 já se conhecia como os lenhos das árvores se desenvolviam (Schweingruber, 1988). Com estas observações estavam criados os princípios básicos da dendrocronologia, possibilitando associar os anéis de crescimento anuais de árvores com os eventos ambientais e sua devida datação.

Dados de anéis de crescimento de árvores podem ser analisados para revelar padrões espacial e temporal da variação do clima em resposta a forçantes naturais, tais como ENSO, erupções vulcânicas, e ciclos solares (Fye, 2001).

Com a largura dos anéis de crescimento de árvores pode-se estudar a variabilidade anual de crescimento e correlacionar com temperatura e precipitação. Devido a extensa localização das árvores sobre o globo, os registros dos anéis de crescimento revelam padrões de oscilações que diferem de região para região. Um registro de anéis de árvores de 2290 anos da Tasmânia documenta um modo oscilatório relativamente estável com períodos médios de 31, 56, 79 e 204 anos (Schimel e Sulzman, 1995).

Os anéis de crescimento de coníferas aparecem em cortes transversais do tronco sob a forma de uma sucessão de zonas claras e zonas escuras. As primeiras correspondem à madeira formada no início do período de crescimento (lenho inicial ou primaveril), com células caracterizadas por paredes celulósicas finas e grandes diâmetros citoplasmáticos. A madeira produzida no final do período de crescimento (lenho tardio ou outonal), é constituída por células com paredes celulósicas espessas e reduzidos diâmetros citoplasmáticos (Amaral, 1994; Lisi, 2000).

A transição entre o lenho inicial e o tardio de um único ano é progressiva, com as dimensões das células variando de maneira quase contínua do início ao fim do período de crescimento. A passagem do lenho tardio de um ano para o inicial do ano seguinte é abrupta, permitindo a determinação anatômica dos anéis sucessivos e a medição de sua

largura (Amaral, 1994). Na Figura 2.6 é mostrada a estrutura dos anéis de crescimento de coníferas (corte transversal) apresentando o lenho inicial ou primaveril e o lenho tardio ou outonal.

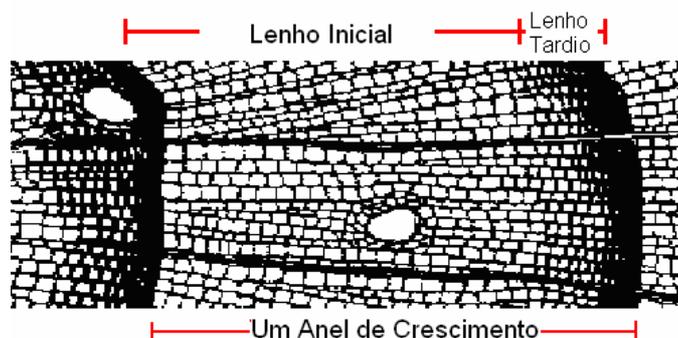


Figura 2.6: Estrutura dos anéis de crescimento de coníferas apresentando: o lenho inicial (earlywood) apresenta células com paredes finas e grande diâmetros, aparecendo em cores claras, (b) o lenho tardio (latewood) apresenta células com paredes grossas e diâmetro pequeno, aparecendo em cores escuras.

FONTE: University of Arizona (2005).

Os estudos dendrocronológicos utilizam rotineiramente espécies arbóreas que se desenvolvem em regiões de clima temperado, pois o inverno rigoroso ocasiona a parada de crescimento do lenho dessas árvores, formando anéis de crescimento anuais. No entanto, é particularmente interessante o uso de espécies de regiões de clima sub-tropical e/ou tropical, visto que tratam-se de regiões com a maior biodiversidade atualmente e por serem pouco estudadas (Lisi, 2000).

Nas regiões de contraste bem fortes entre as estações, latitudes média e elevada, os anéis são geralmente bem marcados. Algumas espécies de árvores apresentam anéis bem nítidos enquanto em outras as transições são pouco aparentes. Entre as árvores que apresentam anéis bem visíveis destacam-se as coníferas como, por exemplo, os pinheiros, as araucárias e os ciprestes. Estas árvores apresentam anéis bem visíveis mesmo em regiões de menor contraste entre as estações (Nordemann e Rigozo, 2003). Regiões de montanhas são excelentes fontes de registros paleoambientais por que seus sistemas físico e biológico são

altamente sensíveis a variações climáticas e estes sistemas fornecem registros através de um intervalo de resoluções espacial e temporal. Anéis de árvores de lugares de altas elevações fornecem registros climaticamente sensíveis que podem estender-se sobre mil anos ou mais com resolução anual a sazonal (Luckman, 1994).

Cronologias dos índices de espessuras dos anéis de crescimento de árvores têm sido usadas como registro das variações dos ciclos solares no passado. Os modelos das variações da espessura dos anéis de crescimento geralmente indicam a presença de longos e curtos períodos na fase de crescimento. Em alguns casos, um significativo ciclo de 11 anos é evidente, com um pequeno atraso de tempo em relação ao ciclo solar. Normalmente, qualquer sinal solar é superposto sobre outros sinais mais importantes, que são as periodicidades climáticas (não relacionadas à atividade solar), que possuem uma influência intensa nos fatores de crescimento das árvores, tornando difícil a identificação direta da atividade solar, a partir das análises do índice da espessura do anel (Rigozo, 1999).

2.5: Variações de longo período na atividade solar e clima: Evidências dendrocronológicas

Longas cronologias de variações cíclicas na atividade solar têm sido reconstruídas de uma ampla variedade de fontes de dados. Entre estas estão os anéis de crescimento de árvores. Variações de curtos e longos períodos da atividade solar parece exercer influência em alguns fenômenos terrestres (Murphy, 1990).

É evidente que qualquer conjunto de dados de anéis de árvores será influenciado somente pelo clima local e que o grau de resposta a diferentes fatores climáticos variará de acordo com a espécie, idade e localização de árvores individuais. Entretanto, espera-se alguma resposta à mudanças no Sol para variar similarmente entre os conjuntos de dados. Portanto, ao todo, é possível que mudanças climáticas globais serem perceptíveis se o conjunto de dados cobrir uma área geográfica suficientemente grande (Keqian e Butler, 1998).

O clima global não necessariamente responde rapidamente a mudanças na entrada de energia solar. Próximo a grandes oceanos, a inércia térmica do mar prolongará e adiará o efeito das mudanças do forçante solar, em outras palavras, os oceanos suavizam e atrasam

as mudanças climáticas. O atraso no efeito pode ser da ordem de uma ou mais décadas dependendo do tamanho do oceano e sua latitude. Assim, árvores individuais estarão sujeitas a diferentes funções de atraso e suavização de acordo a sua localização (Keqian e Butler, 1998).

Nos últimos tempos, estudos de anéis de árvores estão sendo usados para determinar ou verificar fatores climáticos que prevalecem em um dado lugar ou região que pode causar variações na largura dos anéis de árvores, e empregados para inferir fenômenos solares (Rigozo, 1999; Rigozo et al., 2004; Raspopov et al., 2004; etc).

A relação entre a largura dos anéis de crescimento de árvores e variações nas atividades solares tem sido estabelecida em numerosos estudos no crescimento de árvores em condições climáticas críticas. Dados dendrocronológicos e outros dados paleoclimáticos indicam que o efeito mais pronunciado de variações na atividade solar no clima é observado para processos solares com periodicidades de 20 anos e maiores (Raspopov et al., 2001). Raspopov et al., (2001) realizaram análises espectrais da concentração de ^{14}C em anéis de árvores para os últimos 8000 anos e variações na largura dos anéis em madeiras dos hemisférios norte e sul para várias centenas de anos encontrando variações climáticas de longos períodos correspondendo a oscilações na atividade solar. Os períodos encontrados por eles foram: 2400, 720, 420, 210, 90, e 22-23 anos.

Um monitoramento indireto das variações de curto e longo períodos da atividade solar no passado foi feito por Stuiver e Quay (1980), através de medidas de $\Delta^{14}\text{C}$ induzidos na atmosfera terrestre e registros em árvores. Mudanças na taxa de produção de ^{14}C são inversamente associadas à magnitude da atividade solar. Em épocas quando a atividade solar é máxima existe uma produção mais baixa de ^{14}C e em épocas quando a atividade solar é mínima existe uma produção maior de ^{14}C . Estas flutuações estão presentes em escalas de tempo de séculos bem como em escalas de tempo de décadas, incluindo o ciclo solar de 11 anos. Em séries temporais mais recentes de ^{14}C estudadas em anéis de crescimento de árvores de Bashkiria, Rússia, Kocharov et al. (1995) encontraram períodos próximos de 21 anos, 9.4-13.5 anos e 5.5 anos em suas análises espectrais por Fourier e métodos de máxima entropia. Damon et al. (1998) estudando uma série temporal de $\Delta^{14}\text{C}$

em anéis de árvores, para o intervalo de tempo entre 1065 e 1250 D.C., encontraram períodos em 24.3, 9.8-13.9 e 5.5 anos. Eles também encontraram um período próximo a 52 anos, que foi atribuído a uma possível influência do quarto harmônico do ciclo de Suess.

No início do último século o astrônomo A. E. Douglass começou a estudar a largura de anéis de árvores do Arizona e encontrou variações cíclicas de 11.3, 21.2 e 32.8 anos, atribuindo o ciclo de 11.3 anos ao ciclo do número de manchas solares (Hoyt and Schatten, 1997). Evidências do ciclo solar de 11 anos também foram encontrados em séries de anéis de crescimento de árvores de Formosa por Mori (1981), com uma defasagem aproximada de 2.8 anos. Kurths et al. (1993) estudando duas coníferas do Mioceno da Alemanha, de idade absoluta de $15-20 \times 10^6$ anos, também encontrou forte indicação do ciclo solar de 11 anos registrado nos anéis de crescimento destas amostras. Murphy (1990) observou periodicidades de 9-13 anos, 22 anos, relacionado ao ciclo solar de Hale, e 90 anos, ao ciclo solar de Gleissberg, em anéis de árvores da Austrália, que ele atribuiu a uma possível influência solar. Rigozo (1999) estudando a espessura dos anéis de crescimento de árvores do Sul do Brasil e do Chile encontrou períodos em torno dos ciclos solares de 11, 22 anos, e de amostras de Concórdia (SC) foi encontrado o ciclo solar de Gleissberg em torno de 90 anos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, sobre o estudo das relações Sol-Terra empregando anéis de crescimento de árvores, foram desenvolvidos os seguintes passos: Primeiro: pesquisa bibliográfica do estudo da atividade solar e da variabilidade climática em registros de anéis de árvores do presente e em fósseis; Segundo: levantamento dos locais e das possíveis amostras a serem coletadas; Terceiro: aquisição das licenças para a coleta das amostras de árvores petrificadas e amostras de araucárias, junto aos órgãos responsáveis; Quarto: pesquisas de campo para a coleta de amostras de árvores atuais e petrificadas.

Neste capítulo são apresentados, passo a passo, os procedimentos de seleção do material e métodos que foram utilizados na coleta e tratamento das amostras, bem como os métodos de análises dos dados empregados.

3.1 Descrição do material empregado no estudo

O emprego de anéis de crescimento de coníferas no estudo das relações Sol-Terra, no passado, deve-se a estudos preliminares apresentarem fortes indícios de sinais climáticos e do ciclo solar de 11 anos (Stuiver and Quay, 1980; Ammons et. al, 1983; Murphy, 1990; Kurths et. al., 1993; Nordemann et. al., 2002; Nordemann e Rigozo, 2003; Rigozo et. al, 2004). Neste estudo empregaram-se amostras da flora gimnospérmica, coníferas, do presente, araucária, e do passado, “árvores petrificadas” de aproximadamente 200 milhões de anos atrás. As localizações no espaço (localização dos continentes) e no tempo (tempo geológico) das amostras empregadas neste trabalho são mostradas nas Figuras 3.1 e 3.2, respectivamente.

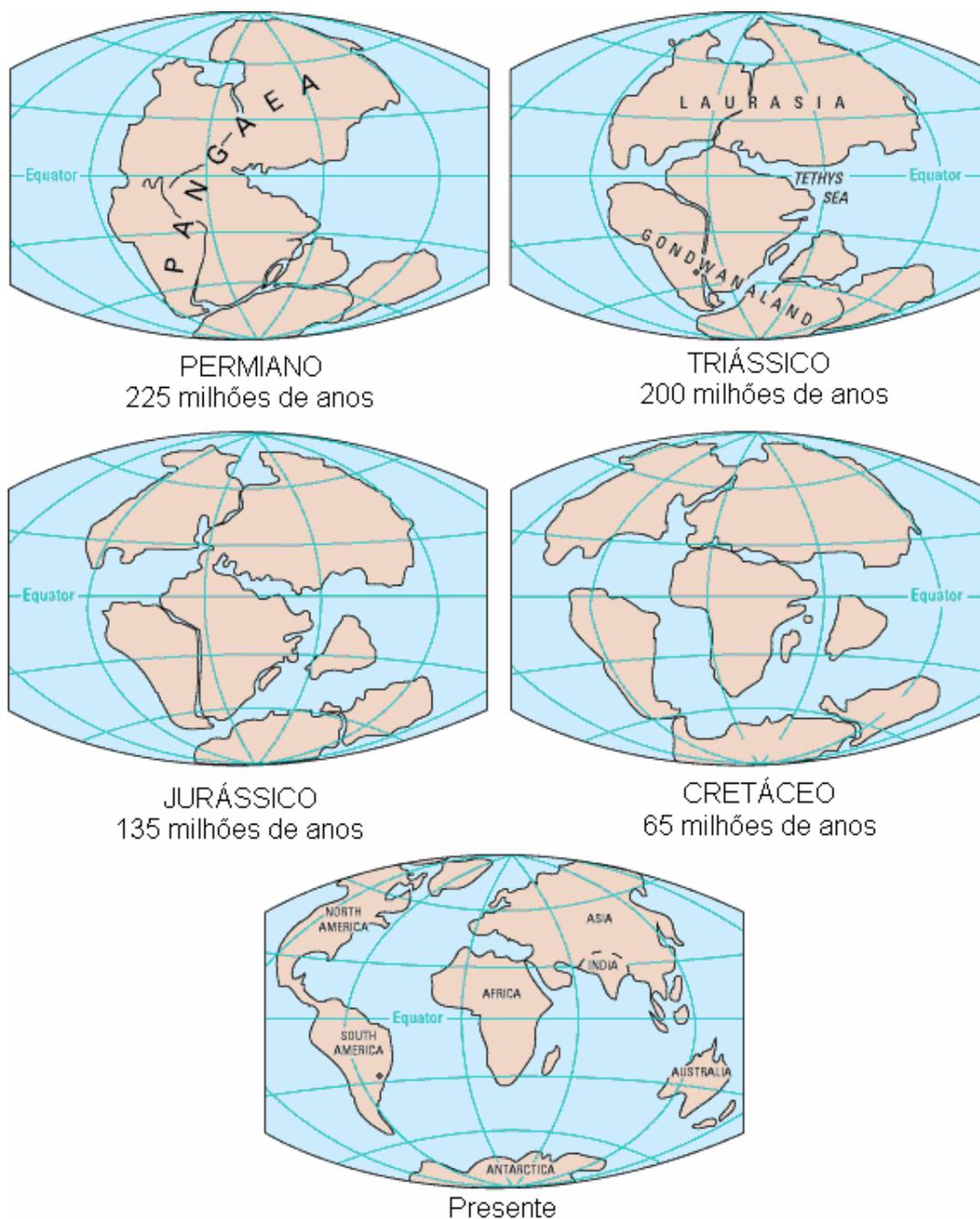


Figura 3.1: Ilustração mostrando a fragmentação do PANGAEA dando origem aos continentes EURÁSIA e GONDWANA há 225 milhões de anos. A partir daí, o Gondwana e a Eurásia se fragmentam e começa a migração continental, com o afastamento da América do continente africano/europeu
 FONTE: Adaptada de USGS (2005).

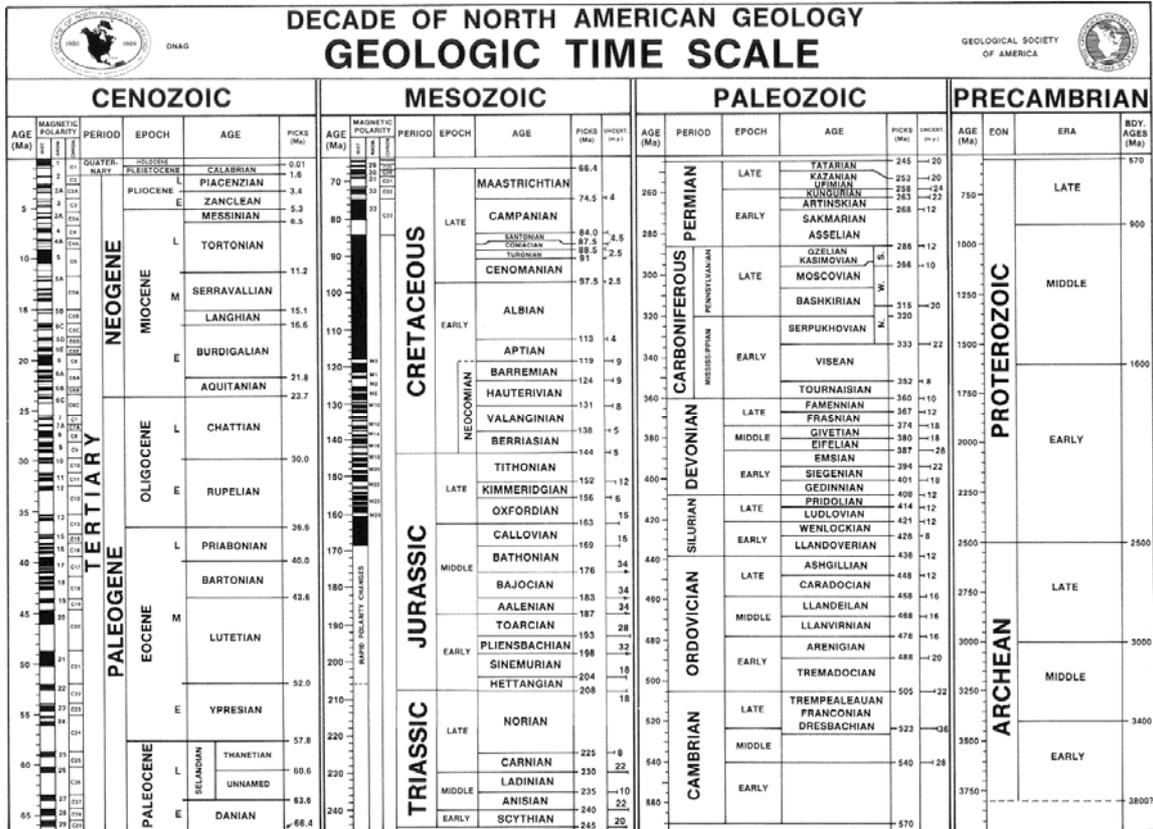


Figura 3.2: Escala de tempo geológico.

FONTE: USGS (2005).

A maior independência da água garantiu às gimnospermas seu grande sucesso adaptativo no Mesozóico (Era Mesozóica (do grego: *meso* = meio + *zoe* = vida) durou de 248,2 a 65 milhões de anos), um período caracterizado por extensas e contínuas massas de terra (Figura 3.1) favorecedoras da dispersão da flora, mas também pela existência de áreas secas e quentes no interior. Durante este tempo da história da Terra, numerosos grupos de plantas, especialmente as coníferas, puderam espalhar-se por ambos os hemisférios, uma situação bastante distinta daquela que caracteriza seus grupos modernos (Dutra e Stranz, 2000, Dutra et al., 2002).

A partir do final do Triássico inicia-se o segundo momento significativo da vida das gimnospermas. Sua diversidade é tão expressiva em tipos e órgãos preservados que poderia ser comparada com a atualidade. Os fósseis, embora de difícil atribuição taxonômica devido à mescla de caracteres de diferentes famílias modernas, permitem avaliar a presença

das Cycadophyta, Ginkgophyta e de muitos grupos de Coniferophyta (Araucariaceae, Podocarpaceae, Cupressaceae e Cheirolepidiaceae) (Stockey, R. A. 1990; Dutra et al., 2002).

As **Coniferophyta** (Carbonífero ao Recente) são o grupo moderno de gimnospermas mais abundante e de distribuição mais ampla. Conhecidas popularmente como "pinheiros", parecem ter sido as únicas a resistir à pressão exercida pela chegada das angiospermas, refugiando-se em nichos onde estas não se adaptavam tão bem. A partir do Terciário, com a separação dos continentes e o surgimento de condições globais menos aquecidas, passaram a se distribuir preferencialmente em latitudes subtropicais e temperadas ou em altitude, em zonas caracterizadas pela presença de boa umidade atmosférica (Figura 3.3) (Taylor e Taylor, 1993; Enright e Hill, 1995; Dutra e Stranz, 2000; Dutra et al., 2002).



Figura 3.3: Ocorrência de representantes da família Araucariaceae durante o Terciário.
FONTE: Dutra et al. (2002).

Fragments de lenho silicificado com afinidades coniferóides são comuns nas bacias brasileiras. Para o Triássico, no sul do Brasil, onde compõem verdadeiras "florestas petrificadas", foram atribuídos ao morfogênero *Araucarioxylon*, um lenho secundário de estrutura gimnospérmica araucarióide (picnoxílico com traqueídeos unisseriais e pontuações areoladas), sem medula preservada (Guerra-Sommer et. al., 2000; Dutra et al., 2002).

As amostras de gimnosperma do presente e do passado distante empregadas neste trabalho são descritas a seguir:

3.1.1 Amostras do presente - *Araucaria angustifolia*

A espécie florestal foi selecionada em função de suas (i) características morfológicas e anatomia da madeira, (ii) área de ocorrência e (iii) potencial dendrocronológico. Atendendo a estes critérios foi selecionada a espécie *Araucaria angustifolia*, cujas características são apresentadas a seguir:

Segundo paleontólogos, as espécies de araucárias surgiram na Era Mesozóica, há cerca de 200 milhões de anos. O gênero araucária, atualmente observado unicamente no Hemisfério Sul, é constituído por 19 espécies, sendo que somente duas ocorrem na América do Sul: *Araucaria angustifolia* no Brasil e Argentina, e *Araucaria araucana* no Chile e Argentina (EMBRAPA, 2002).

A taxonomia da *Araucaria angustifolia* obedece à seguinte hierarquia: Divisão: Gymnospermae; Classe: Coniferopsida; Ordem: Coniferae; Família: Araucariaceae; Gênero: Araucaria; Espécie: *Araucaria angustifolia* (Joly, 1979).

É uma árvore perenifólia, com 10 a 35 m de altura e 50 a 120 cm de Diâmetro à Altura do Peito (DAP), atingindo excepcionalmente 50 m de altura e 250 cm ou mais de DAP, na idade adulta. A *Araucaria angustifolia* ocupa ainda uma área muito grande nos três estados do sul do Brasil, alcançando também, manchas esparsas no sudeste e nordeste de São Paulo, sul de Minas Gerais, sudoeste do Rio de Janeiro e no leste da Província de Misiones (Argentina). A zona de vegetação ocupada pela araucária situa-se entre o paralelo 29° 30' sul, no Rio Grande do Sul (a partir de 400 m de altitude) e o paralelo 20° sul, em Minas Gerais (altitudes superiores a 1000 m), e estende-se desde 41° 30' W até 54° 30' W (Mattos, 1972; EMBRAPA, 2002).

A *Araucaria angustifolia* é característica e exclusiva da Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária), nas formações Aluvial (galeria), Submontana, Montana e Alto-Montana. A espécie é também encontrada nas áreas de tensão ecológica, entre a Floresta Estacional

Semidecidual e entre a Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica). Em uma floresta primária são encontrados de 5 a 25 exemplares por hectare. Há ocorrência de *Araucaria angustifolia* nos tipos climáticos (segundo o sistema de Köppen) Temperado úmido: Cfb (preferencialmente), subtropical úmido: Cfa e subtropical de altitude: Cwb. A classificação de Köppen leva em conta fatores como o relevo, regime de chuvas, temperatura, dentre outros. Nesta classificação são utilizadas letras que indicam a temperatura e o regime de chuvas nas diversas estações do ano. Os significados das letras são:

Primeira letra: **A**= clima quente e úmido, **B**= clima árido ou semi-árido, **C**= clima subtropical ou temperado.

Segunda letra: **f** = sempre úmido, **m** = monçônico (com pequena estação seca), **s** = chuvas de inverno, **w** = chuvas de verão.

Terceira letra: **h** = quente, **a** = verões quentes, **b** = verões brandos.

A árvores adultas apresentam tolerância aos incêndios fracos (incêndios de piso, como nos campos, não de copa) devido ao papel isolante e térmico da casca grossa. É espécie tolerante a temperaturas baixas. Mas, em algumas ocasiões, as mudas nascidas no campo, são afetadas por temperaturas inferiores a - 5°C (EMBRAPA, 2002).

As árvores de *Araucaria angustifolia* apresentam anéis de crescimento no tronco claramente demarcados quando observados a olho nú, são anuais possibilitando estimar a idade das árvores (Mattos, 1972; Lisi, 2000; Mainieri e Chimelo, 1989).

Observa-se na Figura 3.4 a anatomia dos anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia*. Pela análise macroscópica da madeira verifica-se anéis de crescimento demarcados por diferenças de coloração entre o lenho inicial (mais claro) e tardio (mais escuro) (Figura 3.4A); e presença de anéis ausentes (que não circulam completamente o tronco) em algumas árvores, como mostra a Figura 3.4C, e falsos anéis (Lisi, 2000).

Pelos exames microscópicos verifica-se que as traqueídes do lenho inicial apresentaram paredes celulares mais finas em relação às traqueídes do lenho tardio. O aumento de espessura da parede celular é gradativo na transição do lenho inicial para o tardio em determinados anos (Figura 3.4B) e abrupta em outros (Lisi, 2000).

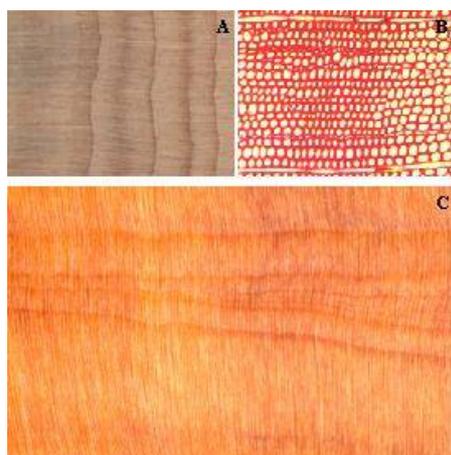


Figura 3.4: Fotomacrografia (A) e fotomicrografia-100X (B) do lenho de *Araucaria angustifolia* e anéis ausentes (C).

FONTE: Lisi (2000).

As análises dendrocronológicas possibilitam a caracterização anatômica dos anéis de crescimento das espécies estudadas, a determinação do número de anéis e da idade das árvores e o estabelecimento de cronologias das seqüências dos anéis associadas aos anos de calendário.

Na coleta das amostras de araucárias verificou-se se as árvores estavam com alguma doença ou se tinham sido atacadas por alguma praga, para eliminar qualquer influência destas nas séries de anéis de crescimento.

3.1.2 Amostras do Passado- Amostras Petrificadas

A escolha dos exemplares utilizados neste trabalho, baseou-se em critérios recomendados por Fritts (1976) para seleção de secções transversais destinadas ao estudo dendrocronológico de árvores atuais. Optou-se por secções com aparente variabilidade na largura do anel de crescimento que poderiam indicar indivíduos sensíveis às variações climáticas e fornecer um número maior de dados dendroclimáticos.

Antes de coletar as amostras petrificadas, foi realizado um levantamento das características que as amostras teriam que apresentar para dar os melhores resultados. Este levantamento foi realizado nos museu de Mata (Museu Municipal Guido Borgomanero) e São Pedro do

Sul (Museu Paleontológico e Arqueológico Professor Walter Ilha), nas praças e calçadas de Mata, e em trabalhos que empregaram tais amostras (Bolzon, 1993; Minello, 1993; Guerra-Somer e Scherer, 1999, etc.), onde se encontram amostras no qual pode-se verificar as estruturas anatômicas.

As amostras coletadas para a realização deste estudo fazem parte da lignitafloora mesozóica do Rio Grande do Sul (RS), são lenhos fósseis que consistem em formas gimnospérmicas, relacionadas a coníferas representando provavelmente uma flora “mesofítica”, ocorrido no Gondwana durante o Triássico Superior, tendo apresentado distribuição global durante o jurássico (Bolzon, 1993; Guerra-Somer e Scherer, 1999).

Guerra-Sommer e Gamernann (1985) estudaram a mineralogia de madeira de Gymnospermae de região de São Pedro do Sul, formação Rosário do Sul de idade Triássico Superior, e segundo os autores, as características do xilema secundário possuíam afinidades com o gênero *Araucarioxylon*.

Baseados nas características anatômicas (medula parenquimatosa, xilema secundário com pontuações areoladas uniseriadas, parênquima radial, raio lenhoso uniseriado) dos lenhos fósseis Mesozóicos da Região Central do Estado do RS parecem indicar uma vinculação a *coniferophyta* (Minello, 1993; Bolzon, 1993). Se forem consideradas as características do xilema secundário, evidencia-se uma afinidade a *Araucarioxylon* (Minello, 1993).

Conforme Bolzon (1993) a origem da taoflora ter-se-ia dado a partir de evento catastrófico rápido, episódico e de grande escala. Antes do evento da silicificação o agente de transporte teria sido a água. O processo de silicificação da madeira teria ocorrido em sedimentos mais próximos a superfície em ambientes com oscilação do nível de água.

Minello (1993) e Bolzon (1993) analisaram lenhos procedentes das seqüências mesozóicas da porção meridional da bacia do Paraná identificadas litoestratigraficamente as Formações Caturrita e Mata e demonstraram a existência de anéis de crescimento no xilema secundário de lenhos gimnospérmicos de grande porte. Bolzon (1993) relacionou estes anéis de crescimento a anéis indistintos, ocasionados por mudanças abruptas na disponibilidade hídrica, indicando clima quente com alternância de períodos úmidos e secos não

necessariamente anual ou cíclico. O solo onde a árvore teria crescido era provavelmente firme, com taxa de umidade variável e provavelmente pobre. O clima indicado pelos anéis de crescimento da árvore é semelhante ao atribuído para a silicificação da madeira, quente e sazonalmente úmido. É também sugerido um progressivo desenvolvimento da flora de coníferas na bacia do Paraná causado por mudanças climáticas que teriam iniciado durante a passagem do Meso para o Neotriássico, estando as floras de coníferas restritas ao intervalo Carniano-Noriano.

Mais detalhes do contexto geológico, taxonômico e bioestratigráfico da lignitafloora mesozóica do Rio Grande do Sul podem ser encontrados nos trabalhos realizados por Bolzon (1993), Minello (1993), Guerra-Sommer e Scherer (1999), Pires (2003), entre outros.

A Figura 3.5 mostra as características do xilema secundário e os anéis de crescimento das amostras petrificadas e de *Araucaria angustifolia*.

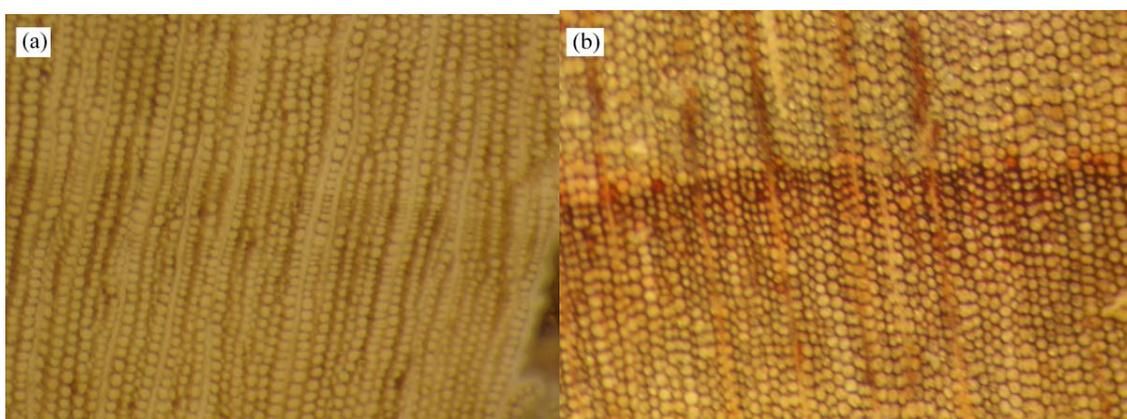


Figura 3.5: Xilema secundário e os anéis de crescimento das amostras petrificadas (a) e de araucárias (b).

3.2 Considerações sobre os locais de coleta

O desenvolvimento deste estudo, das relações Sol-Terra no passado, na região sul do Brasil, deve-se a estudos preliminares feitos em araucárias desta região, nos quais apresentaram fortes indícios de sinais do ciclo solar de 11 anos e climáticos (Rigozo et al, 2004) e a

ocorrência de extensos afloramentos de lenhos fósseis silificados no estado do Rio Grande do Sul, principalmente nas regiões dos municípios de São Pedro do Sul e Mata.

3.2.1 Locais de coleta de araucárias

Os critérios adotados para a seleção dos locais de estudo para araucárias foram (i) posição geográfica – foram selecionadas regiões de clima temperado; (ii) existência de populações nativas – foram selecionadas árvores nativas em populações naturais; (iii) idade das plantas. Atendendo a esses critérios foram selecionadas as áreas de estudos localizados no estado do Rio Grande do Sul, região sul do Brasil, nos municípios de Passo Fundo e Severiano de Almeida, indicadas na Figura 3.6, onde é mostrada a distribuição da *Araucaria angustifolia* na América do Sul.

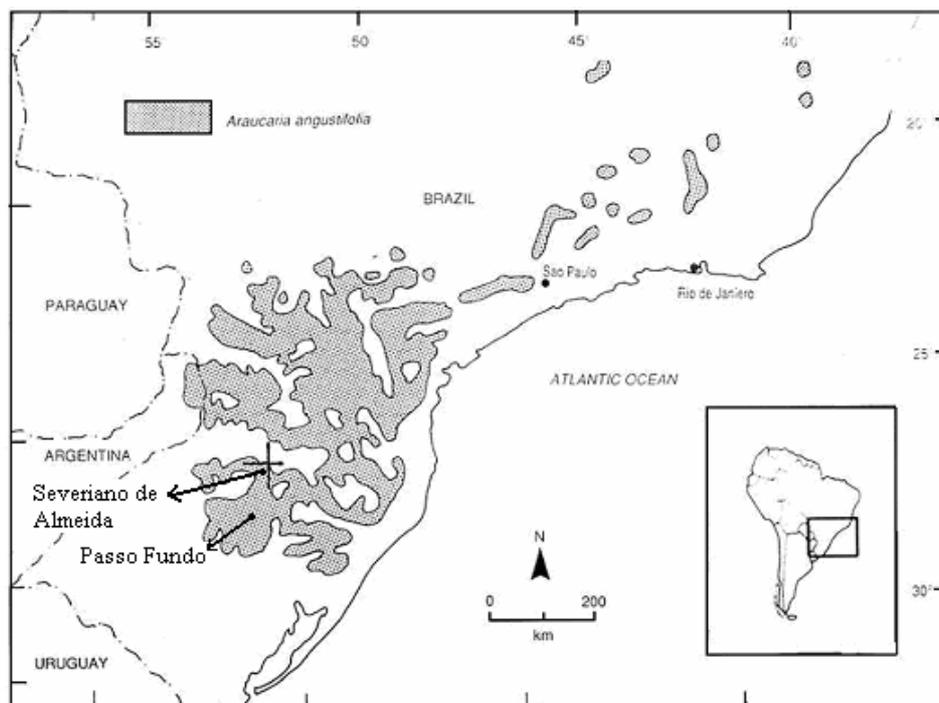


Figura 3.6: Distribuição da *Araucaria angustifolia* na América do Sul.

FONTE: Adaptada de Enright e Hill (1995).

A Tabela 3.1 mostra as informações aproximadas sobre a altitude, latitude e longitude dos locais de coletas, e a Figura 3.7 apresenta exemplares de araucárias localizadas no município de Severiano de Almeida no estado do Rio Grande do Sul.

TABELA 3.1: Informações sobre a altitude, latitude e longitude dos locais de coletas.

Cidades	Altitude (m)	Latitude (S)	Longitude (W)
Passo Fundo	740	28 ⁰ 16'	52 ⁰ 11'
Severiano de Almeida	476	27 ⁰ 25'	52 ⁰ 06'



Figura 3.7: Exemplos de *Araucaria angustifolia* localizados em Severiano de Almeida.

O clima no Rio Grande do Sul, segundo o sistema de Köppen, se enquadra na zona fundamental temperada ou "C" e no tipo fundamental "Cf" ou temperado úmido. No Estado este tipo "Cf" se subdivide em duas variedades específicas, ou seja, "Cfa" e "Cfb". A variedade "Cfa" se caracteriza por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A variedade "Cfb" também apresenta chuvas durante todos os meses do ano, tendo a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C e a do mês mais frio superior a 3°C. Desta forma, de acordo com a classificação de Köppen, o Estado fica dividido em duas áreas climáticas, "Cfa" e "Cfb", sendo que a variedade "b" se restringe ao planalto basáltico superior e ao escudo Sul-Rio-Grandense, enquanto que as demais áreas pertencem à variedade "a", conforme o mapa da Figura 3.8 (Moreno, 1961; UFSM, 2005).

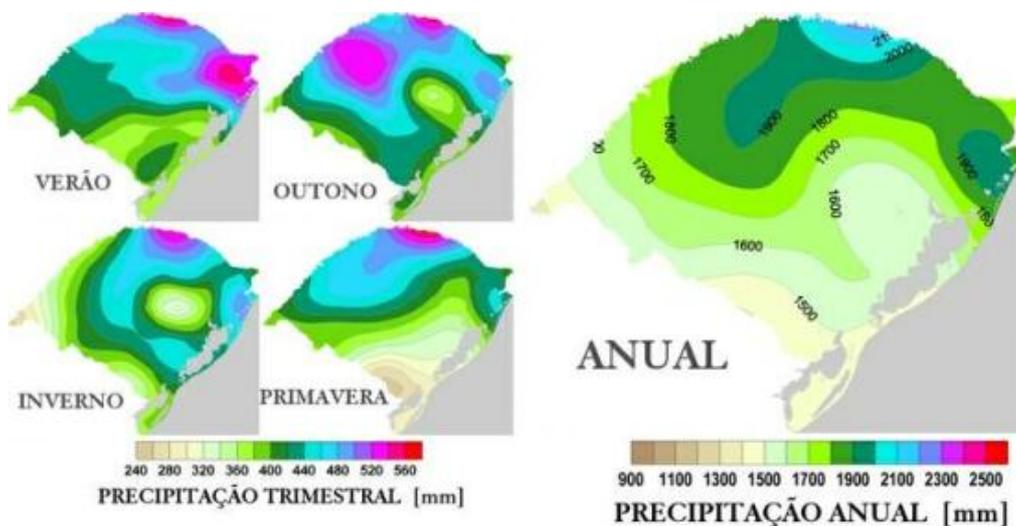


Figura 3.9: Faixas de Precipitação sazonal e anual.
 FONTE: UFSM (2005).

Segundo Nimer (1990), no que concerne à média anual da temperatura (Figura 3.10) nota-se que em nenhum local do Estado a temperatura média é superior a 18 °C. Desta forma, as isotermas anuais são típicas da Zona Temperada e sua distribuição no Rio Grande do Sul está estreitamente condicionada à latitude, maritimidade (posição) e, principalmente, ao relevo (fator geográfico, por excelência).

Temperatura em torno de 18 °C está compreendida, no Rio Grande do Sul, entre 300 m e o nível do mar no litoral e entre 500 e 200 m no interior. A temperatura anual de 16 °C abarca as áreas mais elevadas do Planalto das Araucárias, entre 750 e 700 m de altitude. A temperatura de cerca de 16 °C compreende as áreas e os locais muito elevados sobre o planalto, principalmente, sobre a superfície de Vacaria, acima de 1.000 m (Nimer, 1990).

Segundo os levantamentos efetuados no período de 1931 a 1960, a temperatura média anual do Estado varia de 14,5°C (São Francisco de Paula) e 19,8°C (São Luiz Gonzaga e Uruguaiana). A média anual das temperaturas mais elevadas varia de 20,3°C em São Francisco de Paula até 27,5 °C em Iraí. A média da temperatura mínima normal está entre 9,9°C e 15,3°C; a primeira ocorre em São Francisco de Paula e a segunda em Rio Grande. O mês mais quente é janeiro, com temperatura entre 25°C e 33°C e o mês mais frio é julho, com temperaturas mínimas que oscilam de 4,0°C a - 2,7°C (Mota et al., 1971).

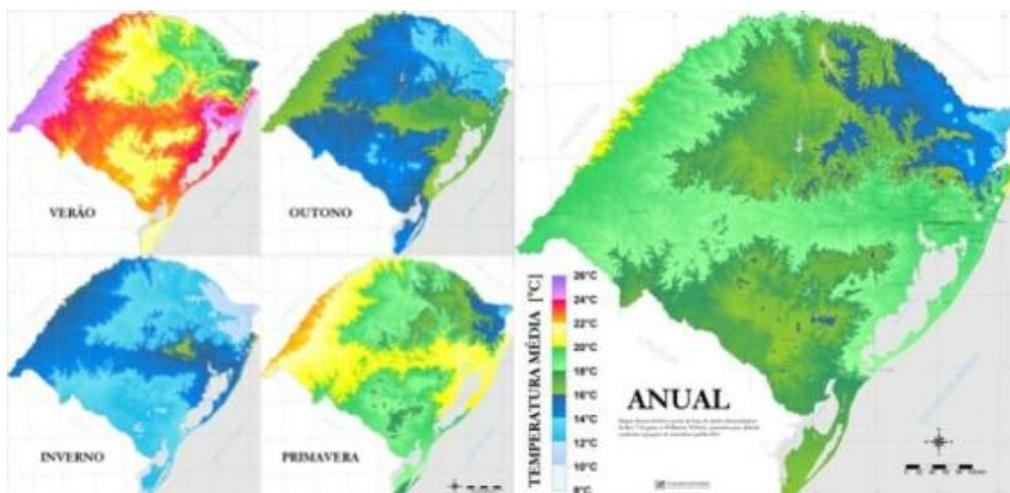


Figura 3.10: Comportamento da Temperatura sazonal e anual.

FONTE: UFSM (2005).

No Rio Grande do Sul o valor de umidade relativa do ar é muito elevado, pois variam de 75% a 85%. Enquanto no verão e primavera os valores giram em torno de 68% a 85%, no outono e inverno estes se encontram entre 76% e 90%, sendo portanto relativamente estável durante as diferentes estações do ano.

3.2.2 Locais de Coleta de Amostras de árvores petrificadas

As ocorrências de fósseis vegetais no Mesozóico do Rio Grande do Sul estão concentradas na região central do Estado. Os fósseis ocorrem como caules silicificados de grande porte, normalmente rolados sobre sedimentos de diversas idades, que se distribuem amplamente numa faixa leste-oeste de 200 km, embora o mais expressivo registro ocorra nas regiões dos municípios de São Pedro do Sul e Mata, Figura 3.11 (Guerra-Sommer e Scherer, 1999).

Estudos recentes indicam que os troncos silicificados estão associados a três diferentes unidades estratigráficas, que afloram ao longo da Depressão Periférica do Rio Grande do Sul: Formação Santa Maria, Formação Caturrita e Arenito Mata (Guerra-Sommer e Scherer, 1999).

Tendo em vista estes estudos e levando em conta os objetivos que norteiam o presente trabalho, foram selecionados os sítios paleontológicos das cidades de Mata, São Pedro do Sul, Ermida e Xiniquá (Figura 3.11). As localidades de Ermida e Xiniquá distam 8 e 20 km

da sede do município de São Pedro do Sul, próximos a BR-287 (RS-453), localizados no trecho São Pedro do Sul – acesso à Mata.

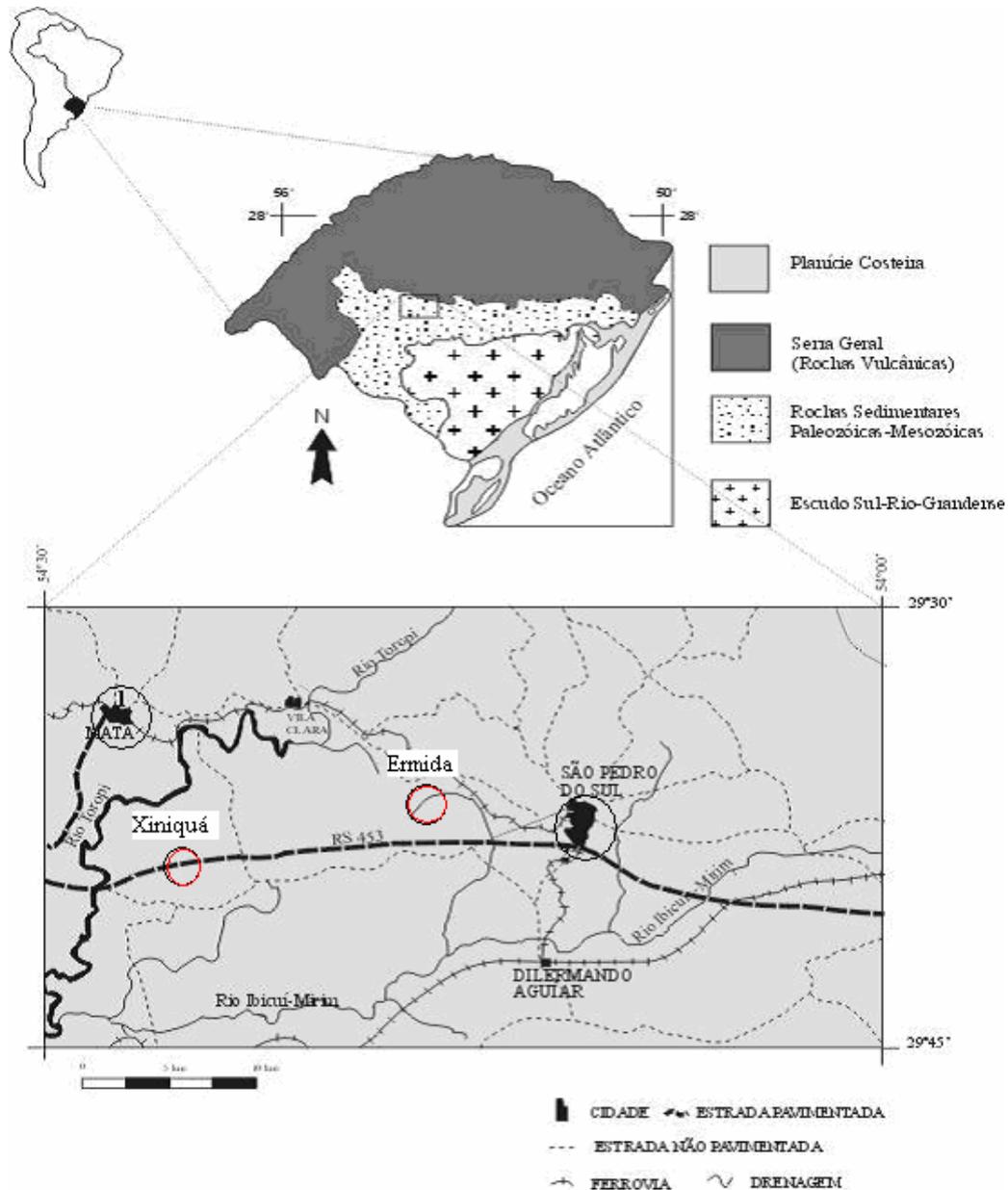


Figura 3.11: Localização dos sítios paleontológicos.

FONTE: Guerra-Sommer e Scherer (1999).

Os sítios paleobotânicos da cidade de Mata e o afloramento Piscina em São Pedro do Sul, ambos estão relacionados ao Arenito Mata. A lignitaeflora vinculada ao Arenito Mata tem

como característica o domínio de coníferas. Considerando as associações de madeiras permineralizadas destes sítios paleontológicos, pode-se observar o domínio de planos lenhosos gimnospérmicos. A medula, quando presente, na maioria dos casos, é pequena e parenquimática, sugerindo afinidade com *Coniferophyta*. O diâmetro dos troncos é expressivo variando entre 30 cm e 2 m, e o comprimento de algumas espécies ultrapassa 20 m. O processo de permineralização danifica muito as estruturas celulares, dificultando as análises anatômicas. Frequentemente lenhos silicificados ocorrem como densas associações roladas sobre a superfície (Figura 3.12), sendo pouco frequentes os afloramentos em que os troncos encontram-se inclusos na rocha o que dificulta, muitas vezes, sua vinculação a uma unidade estratigráfica específica (Guerra-Sommer e Scherer, 1999).



Figura 3.12: Fragmentos de tronco fóssil rolado na superfície (Jardim Paleobotânico - Mata).

A Figura 3.13a apresenta fragmentos de lenhos fósseis utilizados no calçamento da praça em frente à igreja luterana da cidade de Mata e um tronco fóssil como monumento, e a Figura 3.13b apresenta uma amostra de madeira petrificada com seus anéis de crescimento, obtidas nas calçadas da cidade de Mata.



Figura 3.13: (A) Lenhos fósseis utilizados no calçamento e como monumento na praça em frente à igreja luterana da cidade de Mata. (B) Amostra com seus anéis de crescimento.

Holz (1991), citado por Bolzon (1993), estudou a seqüência triássica do Rio Grande do Sul através da história tafonômica, e observou que o relevo da região deveria ser plano e o clima quente e seco, mas com nítidas fases de precipitação, sendo essas irregulares quanto ao volume de água e periodicidade. Determinou, com base em mapas paleogeográficos, que a paleolatidade da área durante o triássico seria próxima a 42° Sul.

3.3 Coleta das amostras

3.3.1 Amostras de araucária

Para a obtenção das amostras de araucárias, foi adquirida a permissão do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, órgão Federal que legalmente concede essas licenças. Os métodos adotados para a coleta das amostras de madeira para a análise dos anéis de crescimento foram os métodos não-destrutivo e destrutivo.

Método não destrutivo: Com o auxílio de um trado de aço (Sonda de Pressler) retirou-se 4 cilindros (“bagueta”) de madeira de cada árvore para as avaliações dendrocronológicas e anatômicas, através de uma incisão no tronco a 1,30 m de altura (altura do peito) aproximadamente, no sentido casca-medula. A Figura 3.14 mostra as componentes de uma

Sonda de Pressler e as amostras extraídas com a mesma. Com o trado obteve-se cilindros de ~5 mm de diâmetro e até 40 cm de comprimento.



Figura 3.14: Partes componentes de um trado e as amostras de *Araucaria angustifolia* coletadas com o mesmo.

Método destrutivo: Implica no corte da árvore e seleção de secções transversais do tronco, com aproximadamente 5 cm de espessura. Para a determinação da idade da árvore são analisados os discos de madeira da base do tronco. As amostras em discos foram obtidas do restante do tronco, que ficou enraizado no solo, como mostrado na Figura 3.15. As amostras em discos foram coletadas com uma moto-serra.

As amostras de madeira coletadas estão descritas e classificadas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Nomenclatura das amostras de araucárias em relação ao local coletado.

Nomenclatura das amostras	Local
SALN	Severiano de Almeida – Linha Napoleão
SALT	Severiano de Almeida – Linha Tigre
FPF	Floresta Nacional de Passo Fundo e arredores
PF	Passo Fundo – Cidade



Figura 3.15: Obtenção de amostra do restante do tronco que ficou enraizado Seção transversal de um tronco de *Araucaria angustifolia*.

No município de Passo Fundo, foram coletadas, em 2005, próximo a Floresta Nacional de Passo Fundo, discos das bases dos troncos (menos de 0,20 m) de 4 árvores nativas em Passo Fundo-RS, classificadas como: FPF1, FPF2, FPF3, FPF4. Estes discos são da base dos troncos de árvores, que foram abatidas com permissão junto ao Departamento de Florestas e Áreas Protegidas - Defap, órgão do estado do Rio Grande do Sul que legalmente concede essas licenças. Na mesma ocasião, com autorização do IBAMA, foram coletadas amostras em “baguetas” de outras 8 árvores, 4 raios de cada árvore, e classificadas como: PF1A, PF1D, PF2A, PF2D, amostras coletadas na cidade de Passo Fundo, e as amostras FPF5A, FPF5D, FPF10A, FPF10D, coletadas na Floresta Nacional de Passo Fundo.

No município de Severiano de Almeida-RS, realizou-se a coleta de amostras, em duas localidades em 2005: Linha Napoleão e Linha Tigre. Na Linha Napoleão foram coletadas amostras de 5 árvores, no qual extraiu-se 5 raios de cada árvore. Na Linha Tigre foram coletadas amostras de 3 árvores, no qual extraiu-se 4 raios de cada árvore. Foram também coletados discos de 2 árvores nativas na Linha Tigre. Estes discos são da base dos troncos de árvores. As informações sobre as amostras coletadas em cada município estão na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Informações sobre as amostras coletadas em cada cidade.

Local	Nº de Amostras por Lugar	Nº de Amostras por Árvore	Ano de Corte
Passo Fundo	12 (4 em Discos)	4 a 5 Baguetas	2005
		1 Disco	2005
Severiano de Almeida	10 (2 em discos)	4 a 5 Baguetas	2005
		1 Disco	2004

3.3.2 Amostras Petrificadas

Para a obtenção das amostras de árvores petrificas, foi adquirido permissão do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, órgão que legalmente concede essas licenças. Antes da coleta, foi realizado um levantamento das amostras que apresentassem os melhores resultados. Este levantamento foi realizado nos sítios paleontológicos de Mata, Ermida, Xiniquá e São Pedro do Sul. Os espécimes selecionados, em função de suas características morfológicas, anatômicas e potencial dendrocronológico, foram coletados observando-se os seguintes critérios: (i) amostras de coloração escura a cinza, critério este que esta relacionado a possibilidade de se encontrar material orgânico, apresentando assim, estruturas bem preservadas; (ii) espécimes com baixa porosidade, o que parece indicar uma maior possibilidade de preservação das estruturas originais e (iii) amostras que apresentavam indícios de anéis de crescimento, antes mesmo do tratamento (Minello, 1993). As amostras coletadas apresentaram raios variando de 13 a 47 cm e estão descritas e classificadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Nomenclatura das amostras petrificadas em relação ao local coletado

Nomenclatura das amostras	Local
AE	Sítio Paleontológico Ermida
M	Sítio Paleontológico de Mata - cidade
SPS	Sítio Paleontológico de São Pedro do Sul
BR287	Sítio Paleontológico de Xiniquá

A coleta das amostras foi realizada através do convenio entre com o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE e a Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, e após foram transportadas até a fabrica de beneficiamento de pedras preciosas, Primmaz & Cia.

Ltda. – Precious Stones, localizada na cidade de Soledade – RS, para serem cortadas e polidas.

3.4 Tratamento das amostras

3.4.1 Amostras de araucária

O preparo das amostras de madeira obtidas pelo método não destrutivo (em Baguetas) seguiu as etapas: (i) colagem em suporte de madeira, obedecendo ao sentido vertical das fibras ou as traqueídes (células alongadas) em relação ao suporte; (ii) secagem em condições ambientais; (iii) polimento das superfícies externas com uma seqüência de lixas de diferentes granulações (de 50 a 600 granos); (iv) marcação e mensuração dos anéis de crescimento.

As amostras coletadas pelo método destrutivo (em Discos) foram preparadas da seguinte forma: (i) secagem a sombra em condições ambientais; (ii) polimento das superfícies com lixas de diferentes granulações (de 50 a 600 granos), com o objetivo de destacar os anéis de crescimento e defeitos da madeira (madeira de reação, nós, anéis perdidos, etc.); (iii) análise e seleção dos melhores raios, com base na morfologia dos anéis de crescimento; (iv) marcação dos anéis de crescimento; (v) mensurações dos anéis de crescimento.

3.4.2 Amostras Petrificadas

As amostras de árvores petrificadas foram beneficiadas na empresa de pedras preciosas Primmaz & Cia. Ltda. Elas foram cortadas com discos adiantados, refrigerados a óleo (Figura 3.16) com capacidade de corte de até 70 cm. Após o corte foi removido o óleo e elas foram polidas, para posterior digitalização e obtenção das séries temporais.



Figura 3.16: Disco adiamantado onde foram realizados os cortes das amostras.

3.5 Obtenção das séries cronológicas

Esta etapa da pesquisa compreende a obtenção das séries temporais das espessuras dos seus anéis de crescimento, das amostras petrificadas e amostras de árvores não petrificadas, através de uma mesa de mensuração e imagens digitais. Todas as séries cronológicas das amostras não petrificadas foram obtidas através da mesa de mensuração. Já as séries das amostras petrificadas foram obtidas através de imagens digitais e mesa de mensuração. Os métodos estão descritos a seguir.

A obtenção das séries cronológicas dos anéis de crescimento das amostras selecionadas foi conduzida no Laboratório do Setor de Anatomia e de Identificação de Madeiras do Departamento de Ciências Florestais – ESALQ/USP e no Grupo de Geofísica por Registros Naturais – GEONAT/DGE/INPE.

O primeiro passo para a mensuração da largura dos anéis de crescimento é a seleção da área adequada das medidas. Isso significa que, na escolha dos raios de um disco de madeira, devem ser considerados parâmetros como a presença de madeira de reação (formada pela

árvore para a sua estabilidade em terreno inclinado), nós de madeira, anéis de crescimento ausentes, etc. Medidas precisas são obtidas quando são primeiramente identificados e demarcados os limites dos anéis de crescimento (Schweingruber, 1988).

3.5.1 Obtenção Através da Mesa de Mensuração

A medida da largura do anel de crescimento pode ser realizada com réguas de precisão como o paquímetro, instrumentos óticos como as lupas e os estereomicroscópios dotados de retículas escalonadas, entre outros (Lisi, 2000).

Todas as amostras, com as superfícies transversais previamente polidas, foram examinadas sob microscópio estereoscópico (com aumentos de 6.3 a 40 vezes) e sistema de iluminação de fibra ótica (Figura 3.17) para a demarcação dos anéis anuais de crescimento e a exclusão dos falsos anéis de crescimento. Foi realizada a contagem dos anéis de crescimento para a determinação da idade das árvores e a sua correlação com os respectivos anos do calendário civil para as amostras do presente.

As demarcações dos anéis de crescimento nas amostras petrificadas foram feitas através da observação com o microscópio na parte polida, observando as estruturas anatômicas, e em algumas também, pela fragmentação que se dá preferencialmente através das linhas de fraqueza representadas pelo câmbio e pelos limites dos anéis de crescimento. Isto é observado na Figura 3.18.

A determinação da largura dos anéis anuais de crescimento foi realizada em um equipamento denominado mesa de medição, constituído de um microscópio estereoscópico com ocular e retículo e uma bancada (mesa de medição propriamente dita) acoplada eletronicamente a um microcomputador, com deslocamento calibrado para precisão de 0,01 mm.



Figura 3.17: Mesa de mensuração marca Lintab III, com deslocamento horizontal e precisão de 1/100 mm, e sistema de iluminação de fibra ótica – Leica modelo KL 1500.

Através do movimento giratório manual de uma manivela, a amostra foi deslocada na mesa de medição, sendo demarcado o limite de cada anel de crescimento pelo retículo, pela pressão de um botão de controle da mesa de medição que registra a posição inicial e a distância percorrida pela mesma, correspondente a largura do anel anual de crescimento. Os valores foram transferidos para uma planilha eletrônica para o desenvolvimento dos cálculos e obtenção das figuras de variação da largura dos anéis de crescimento.

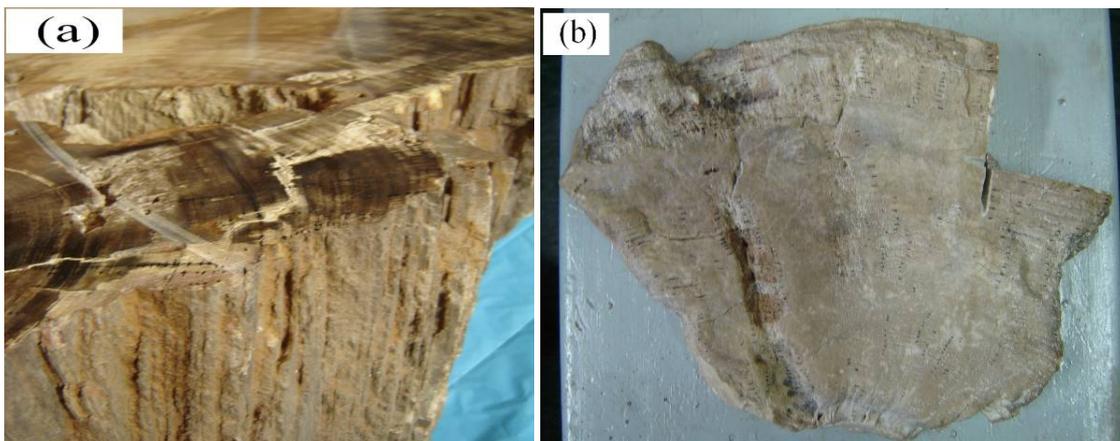


Figura 3.18: Fragmentação que se dá através das linhas de fraqueza representadas pelo câmbio e pelos limites dos anéis de crescimento. (a) amostra AEI, (b) amostra BR287I.

3.5.2 Obtenção por Imagens

O procedimento foi desenvolvido para o estudo dendrocronológico das araucárias (*Araucaria angustifolia*) e dos Pinheiros (*Pinus Elliotti* e *Pinus Taeda*) e pode ser aplicado para outras espécies de coníferas. As amostras de madeira foram primeiramente polidas, a fim de deixar os anéis adequados ao seu estudo ótico. O sistema utilizado neste estudo, para a obtenção das imagens foi uma câmera fotográfica digital Cyber-Shot Sony DSC-F828, com resolução máxima de 8 megapixels (3264x2448), sistema de cores RGBE, formato de gravação JPEG, RAW e TIFF (formato de arquivo não compactado) e sensibilidade ISO de 64 a 800. Também, pode-se obter as imagens com um digitalizador de mesa de alta resolução.

As digitalizações das amostras foram feitas selecionando determinadas regiões da fatia de tronco, que não apresentassem nenhum defeito nos anéis no qual poderia prejudicar na sua identificação, junto com uma escala (por ex. uma trena ou régua). As resoluções de obtenção das imagens são determinadas conforme a proximidade entre os anéis, ou seja, as amostras que apresentem anéis muito próximos uns dos outros, utiliza-se uma resolução alta, e as amostras que tinham os anéis mais afastados utiliza-se resoluções mais baixas. O inconveniente de se usar alta resoluções nas obtenções das imagens é a grande quantidade

de memória que cada arquivo de imagem ocupa. Todas as imagens foram salvas no formato TIFF e depois convertida em escala de tons de cinza de 0 a 256 e salvas em um arquivo bitmap.

Rigozo (1998) criou um programa no ambiente IDL 5.0, chamado de Tratamento Interativo de Imagens de Anéis de Árvores (TIIAA), que lê imagens bitmap (Figura 3.19), no qual se aplica um simples tratamento para se obter a melhor imagem que facilite na identificação visual dos anéis (Figura 3.20). Logo após é determinada a posição de cada anel (em pixels) na imagem (Figura 3.21), através da identificação de cada anel individual, pelas diferenças nos valores dos tons de cinza (Sheppard and Graumlich 1996), onde os maiores valores representam o lenho tardio, enquanto, os menores valores em tons de cinza é o lenho inicial (Figura 21B). Isso é feito com a ajuda de um mouse, onde clica-se sobre o centro da amostra, na imagem o com o cursor do mouse, para obter-se a posição inicial. Depois clica-se sobre o primeiro anel na imagem e obtêm-se a posição do primeiro anel. Assim para obter-se as posições de todos os anéis na imagem é só clicar em cima de cada anel. A espessura do primeiro anel (em pixel) é determinada pela subtração da posição do primeiro anel pela posição do centro da amostra. A espessura do segundo anel é obtida através da subtração da posição do segundo anel pela posição do primeiro anel. Este procedimento é feito até se obter a espessura do último anel da imagem (Figura 21A). Caso aconteça algum erro na obtenção das posições pelo operador, é possível voltar e começar novamente do início.

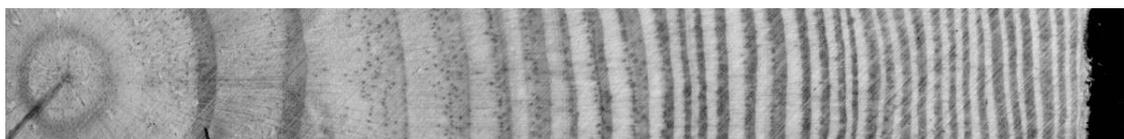


Figura 3.19: Exemplo de uma imagem bitmap digitalizada de uma amostra do *Pinus taeda*, amostra coletada na região Sul do Brasil. Esta imagem foi digitalizada com uma resolução de 900 dpi.

FONTE: Rigozo (1998).

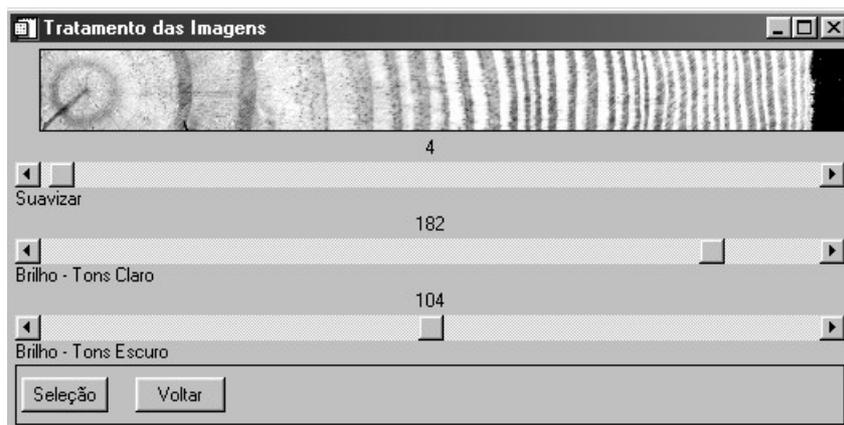


Figura 3.20: Janela inicial do programa TIAA, que apresenta o tratamento aplicado na imagem para salientar melhor os contornos dos anéis.

FONTE: Rigozo (1998).

No final é apresentado um gráfico em escala de tons de cinza (de 0 até 256) em função do comprimento da imagem (em pixel) juntamente com um símbolo (●) indicando as posições de cada anel que o operador identificou (Figura 21B). Também, no final, é criado um arquivo de dados que contém a série temporal das espessuras dos anéis da imagem.

O TIAA reproduz a espessuras entre os pontos, para as diferentes resoluções, com excelente precisão Rigozo et al. (2004). Assim, para os anéis de árvores, uma parte experimental consistiu na coleta de amostras (fatias de árvores já cortadas e/ou testemunhos internos extraídos por meio de uma broca oca especialmente adquirida para esta finalidade).

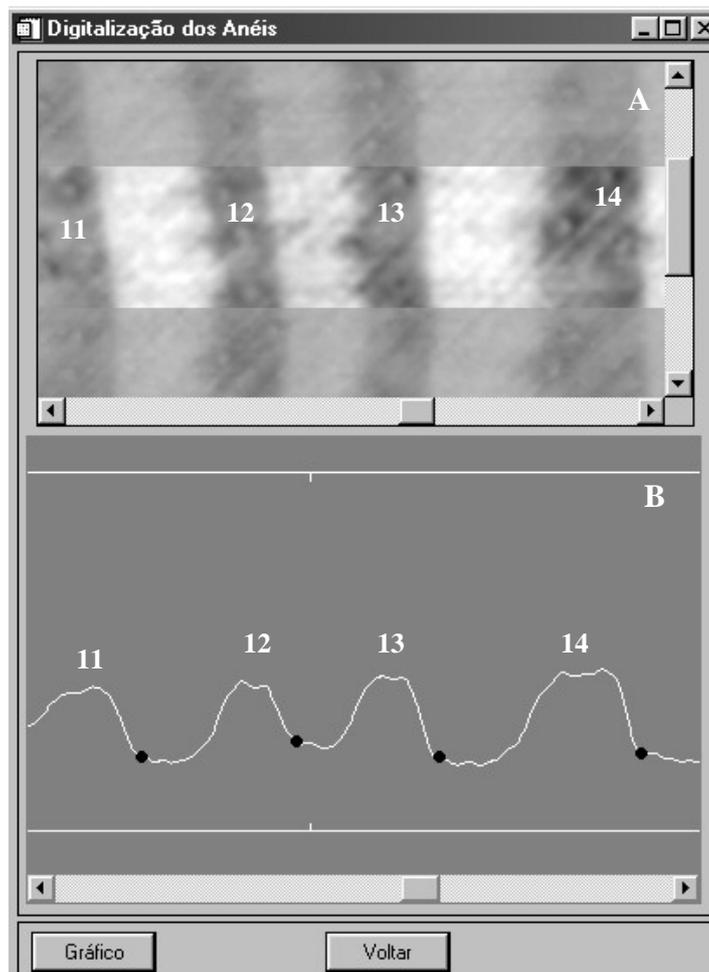


Figura 3.21: Janela final do programa TIIAA que contém a imagem dos anéis de árvores (A), para digitalizar cada anel movimenta-se a posição de cada um. Em (B) é mostrado o gráfico dos tons de cinza em função da sua posição na imagem (em pixel), juntamente com a posição de cada anel (representado pelo símbolo “•”). Como exemplo são mostrados os anéis 11, 12, 13 e 14 (A), com suas respectivas posições (B).

FONTE: Rigozo (1998).

As cronologias das larguras (em milímetros) dos anéis de crescimento para o desenvolvimento deste estudo foram obtidas das 12 amostras de araucárias da região de Passo Fundo e das 10 de Severiano de Almeida e das 15 amostras de árvores petrificadas da região de São Pedro do Sul e Mata.

As larguras dos anéis de 4 raios de cada amostra de araucária e de 1 a 2 raios das amostras petrificadas foram medidas, cuidando sempre as áreas que apresentavam madeira de reação, falsos anéis e perda de anel. Dos raios melhores correlacionados, foi calculado o valor médio de cada anel, obtendo assim a cronologia de cada árvore. De cada cronologia foi removido a tendência de crescimento. Após obter a cronologia de cada árvore, sem a tendência, foi feita a cronologia média do sítio em estudo. As tendências de crescimento foram determinadas por ajustes polinomiais e exponenciais. A média de todas as amostras foi calculada para eliminar variações individuais e obter uma cronologia baseada em variações comuns nestas amostras. Os ajustes utilizados são apresentados no Apêndice A.

3.6 Dados climáticos e solares

Os dados utilizados neste estudo são séries temporais da atividade solar (R_z , número de manchas solares) e geomagnética (Índice Geomagnético aa), série de temperatura, obtida de estações próximas dos locais de coletas das amostras de árvores, índices de atividade climática/atmosférica – Índice de Oscilação SUL (SOI):

O índice solar R_z , número de manchas solares é obtido do centro de dados do Sunspot Index Data Center em Bruxelas, Bélgica. O número de manchas solares é o mais longo índice da atividade solar disponível e é representativo do estado geral da atividade solar (Hoyt e Schatten, 1997).

Índice Geomagnético aa é obtido dos centros de dados do NGDC – National Geophysical Data Center – National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, Estados Unidos e do World Data Center – WDC, Kyoto, Japão. O índice aa é uma medida da atividade geomagnética global derivada usando dados de somente dois observatórios aproximadamente antipodais. Os dados estão disponíveis desde 1868. Para cada intervalo de 3 horas, o índice K é medido nas duas estações e convertido em amplitude; um índice aa individual é a média dos valores do norte e do sul, multiplicado por um peso para explicar pequenas diferenças em latitude das duas estações. O intervalo da escala de aa é 2-600 e os seus valores estão em unidades de 1nT (Mayaud, 1980; Rangarajan, 1989).

O índice de oscilação sul (Southern Oscillation Index - SOI) é obtido o sítio <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/soi.htm>. O Southern Oscillation Index (SOI) é calculado das flutuações mensais ou sazonais na diferença de pressão do ar entre Tahiti e Darwin. Valores negativos do SOI indicam episódios El Niño, e valores positivos estão associados a episódios La Niña.

Dados de temperatura são obtidas do Goddard Institute for Space Studies, NASA (<http://data.giss.nasa.gov/>), para a América do Sul. Por falta de uma longa série de temperatura para a região, utilizamos a série temporal da anomalia da temperatura entre 24^o a 44^o sul, que é a série mais longa e mais próxima às áreas de coleta das amostras de anéis de árvores.

3.7 Métodos de análise

Obtidas as séries temporais das espessuras dos anéis de árvores, inicia-se a etapa de análise matemática dessas séries temporais pelos métodos de análises espectrais clássicos (regressão iterativa) e por ondeletas, além das correlações matemáticas com outras séries temporais (manchas solares, temperatura, precipitação, índices geomagnéticos etc.).

3.7.1 Análise Espectral

A estimativa espectral é um método poderoso na análise de dados e frequentemente usado para estudar processos geofísicos. Muitas técnicas têm sido desenvolvidas para análise de longas séries temporais estacionárias.

O método da regressão iterativa, descrito na sua forma geral por Wolberg (1967), e aperfeiçoado e adaptado em linguagem C por Rigozo e Nordemann (1998) - (ARIST – Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais) -, foi aplicado na procura de periodicidades em séries temporais. Este método é um ajuste de mínimos quadrados iterativo e pode ser aplicado ao ajuste de qualquer função (derivável em relação aos parâmetros e variáveis), a dados experimentais, sem necessidade de linearização prévia. Ele é aplicado, neste trabalho, à procura de periodicidades em séries temporais, com o uso, para cada período considerado, de uma única função senoidal com três parâmetros

desconhecidos, a_0 = amplitude, a_1 = frequência angular, e a_2 = fase da função. O ponto inicial do método é a definição da chamada função condicional, que é:

$$F = Y - a_0 \sin(a_1 t + a_2) \quad (3.7)$$

onde Y é o sinal medido, t é o tempo e a_0 , a_1 , a_2 são os três parâmetros desconhecidos, que serão procurados por iterações através da minimização do quadrado desta função F . O número máximo de iterações utilizado na determinação dos três parâmetros pode ser escolhido entre 50 a 200 (Rigozo e Nordemann, 1998). A vantagem deste método é que ele fornece o desvio padrão de cada um dos três parâmetros determinados. Isto permite uma seleção das amplitudes mais importantes, que apresentam maiores valores na relação amplitude/desvio.

3.7.2 Análise por Ondeletas

O método de análise espectral por ondeletas (mais conhecido como wavelets) realiza a procura de periodicidades e a extração de funções não periódicas das sub-séries analisadas ao longo da série principal (Rigozo et al., 2001).

As pesquisas realizadas sobre as séries temporais de fenômenos geofísicos têm a finalidade de esclarecer os processos que os geram ou interferem neles assim como evidenciar interações entre fenômenos diferentes. A análise espectral dinâmica clássica faz uso do método de Fourier ou do periodograma aplicado a subconjuntos de dados de duração constante. A variante com ondeleta analisa subconjuntos de dados de duração adaptada ao período investigado, sendo esta duração igual a um número constante deste período. Trata-se de uma ondeleta senoidal embutida num retângulo (amplitude x duração) chamada em inglês de “boxcar”. O uso de funções de ajuste preexistentes e padronizadas, como a ondeleta de Morlet nos softwares empregados, permite realizar estas análises em tempos mais curtos e compatíveis com o número de séries temporais a serem tratadas.

A transformada em *ondeletas* analisa um sinal $s(y)$ em cada instante t sobre um intervalo de escala a . Assim, a transformada de um sinal definido sobre um intervalo unidimensional é apresentada como sendo uma função de duas variáveis, t e a , as quais

devem ser consideradas como independentes. Então, a Transformada em *ondeletas* estuda uma escala particular pela convolução de $s(y)$ com uma *ondeleta* localizada $g_a(y)$, a qual estará dilatada ou contraída a partir de uma *ondeleta* mãe, $g(y)$, em função da escala investigada. Lau and Weng (1995) definiram $g_a(y)$ da forma $g_a(y) = 1/\sqrt{a} g(y - t/a)$.

Segundo Lau and Weng (1995) a Transformada em *ondeletas* é definida como:

$$T_g(a,t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g^* \left(\frac{y-t}{a} \right) s(y) dy \quad (3.8)$$

onde g^* representa o complexo conjugado de g definida sobre o semi-plano (t, a) . Os valores de $T_g(a, t)$ exprimem então, a decomposição do sinal $s(y)$ numa posição t e numa escala a precisas. O conjunto de valores para este parâmetro fornece assim, uma representação bi-dimensional do sinal no tempo (espaço) e em escala (frequência ou número de onda). Segundo Farge (1992a) pode-se definir uma densidade de energia no tempo-escala como $S(a, t) = |T_g(a, t)|^2 / a$.

Quando são analisadas duas series temporais $x(t)$ e $y(t)$, com transformadas de *ondeletas* $T_n^X(a, t)$ e $T_n^Y(a, t)$, pode-se definir o espectro cruzado da forma $T_n^{XY}(a, t) = T_n^X(a, t) [T_n^{Y*}(a, t)]$, onde $T_n^{Y*}(a, t)$ é o complexo conjugado de $T_n^Y(a, t)$. O espectro cruzado têm valores complexos e assim a potência espectral será dada por $|T_n^{XY}(a, t)|^2$ e a fase cruzada por $\tan^{-1} \{ \text{Im}[T_n^{XY}(a, t)] / \text{Re}[T_n^{XY}(a, t)] \}$ (Torrence and Compo, 1998).

A *ondeleta* complexa de Morlet, constituída de uma onda plana de frequência ω_0 , modulada por envelope Gaussiano de largura unitária, dada por $g(t) = e^{-i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$, é a mais adequada para captar periodicidades de sinais geofísicos, de maneira contínua ao longo das escalas de frequências (Weng and Lau, 1994).

CAPÍTULO 4

ANÁLISE E RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os procedimentos de análise das séries temporais da espessura dos anéis de crescimento, os resultados e discussões. Os procedimentos detêm-se na obtenção da melhor curva de ajuste para cada série, de modo que as longas tendências sejam eliminadas, a fim de se obter a cronologia média do sítio em estudo, para após fazer a análise matemática dessas séries temporais pelos métodos de análises espectrais clássicos (regressão iterativa), por ondeletas (wavelets) e ondeleta-cruzada obtendo assim as correlações com outras séries temporais (no caso, número de manchas solares, índice geomagnético aa, anomalia de temperatura entre a latitude 24° a 44° sul e o Índice de Oscilação Sul - SOI).

4.1 SÉRIES TEMPORAIS DOS ANÉIS DE ÁRVORES E GEOFÍSICAS

4.1.1 Amostras de Araucárias

As séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento das amostras de araucárias estão apresentadas num único gráfico, para cada local de coleta. Para Passo Fundo, as séries temporais obtidas das 12 amostras coletadas são mostradas na Figura 4.1, e para Severiano de Almeida, as séries temporais obtidas das 10 amostras são mostradas na Figura 4.2. Nos respectivos gráficos, o último ano com valor de espessura de anel representa o último ano de vida de crescimento das árvores, antes de serem coletadas as amostras.

Obtidas as séries temporais da espessura dos anéis de crescimento para cada árvore, tenta-se determinar a melhor curva de ajuste que represente tendências como o crescimento biológico de cada árvore, anomalia e/ou danos que podem ter ocorrido em alguma árvore, ou algum outro fenômeno esporádico que tenha ocorrido. Para cada amostra foi adotada uma curva para o ajuste dos dados, que melhor represente as tendências em cada série temporal, como são apresentadas na Figuras 4.3 para as séries de Passo Fundo, e na Figura 4.4 para as séries de Severiano de Almeida. As funções de ajustes utilizadas são mostradas no Apêndice A.

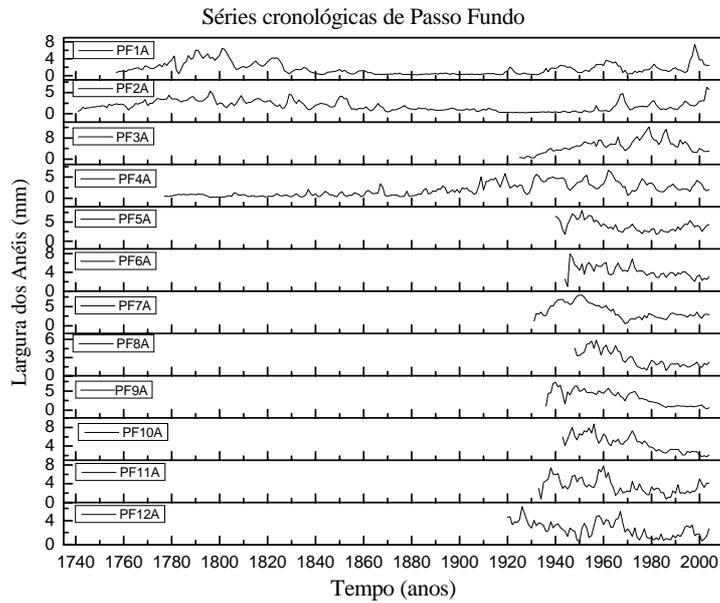


Figura 4.1: Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 12 amostras de árvores coletadas em Passo Fundo.

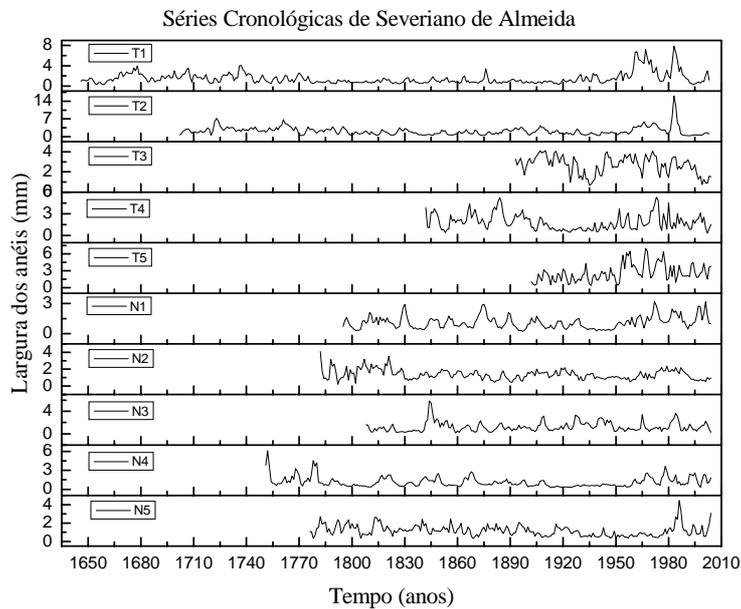


Figura 4.2: Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 10 amostras de árvores coletadas em Severiano de Almeida.

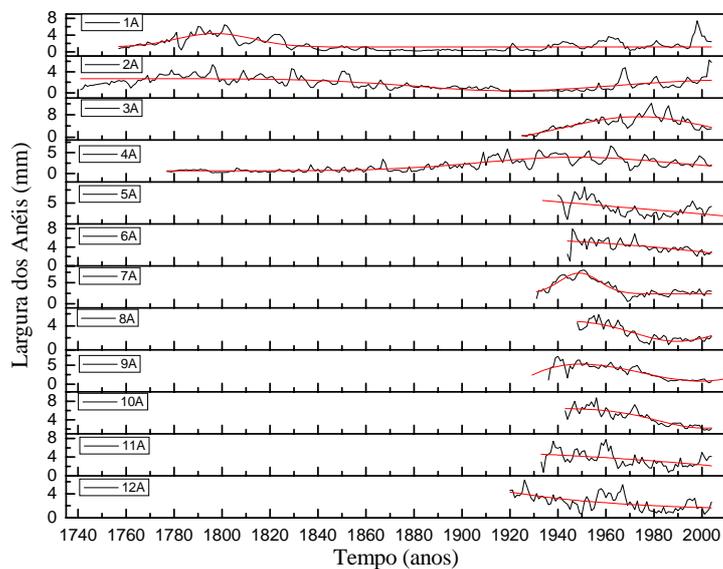


Figura 4.3: Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 12 amostras de árvores coletadas em Passo Fundo (curvas pretas) e suas tendências (curvas vermelhas).

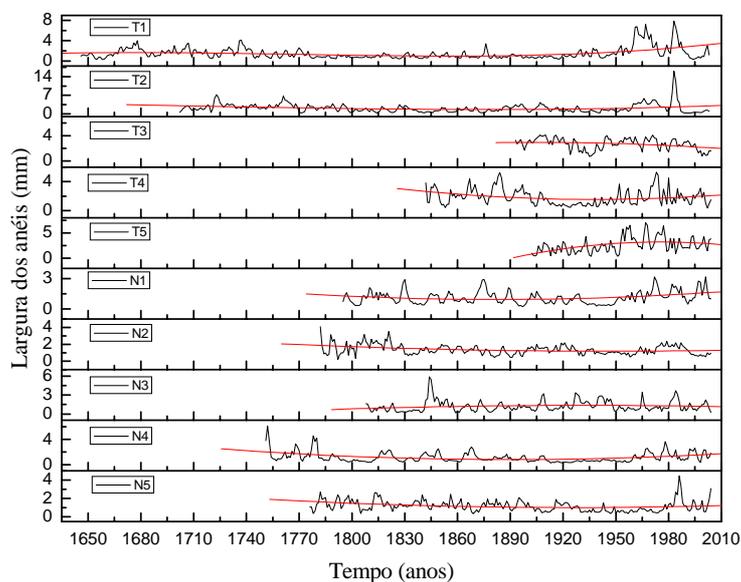


Figura 4.4: Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 10 amostras de árvores coletadas em Severiano de Almeida (curvas pretas) e suas tendências (curvas vermelhas).

Uma vez determinadas as curvas de ajuste que melhor representam as tendências efetuou-se o processo de eliminação das mesmas dos dados. Esse processo foi feito subtraindo as tendências de cada série dos dados medidos, obtendo assim, as cronologias da variação da largura dos anéis em relação as suas tendências. Após obteve-se uma cronologia média de cada local. Esta cronologia média foi obtida através da média das cronologias de cada árvore para cada local, calculando-se a média entre os anéis de crescimento em anos correspondentes. Assim, mostra-se nas Figuras 4.5. e 4.6 as cronologias de cada árvore e a cronologia média dos locais, para Passo Fundo e Severiano de Almeida, respectivamente.

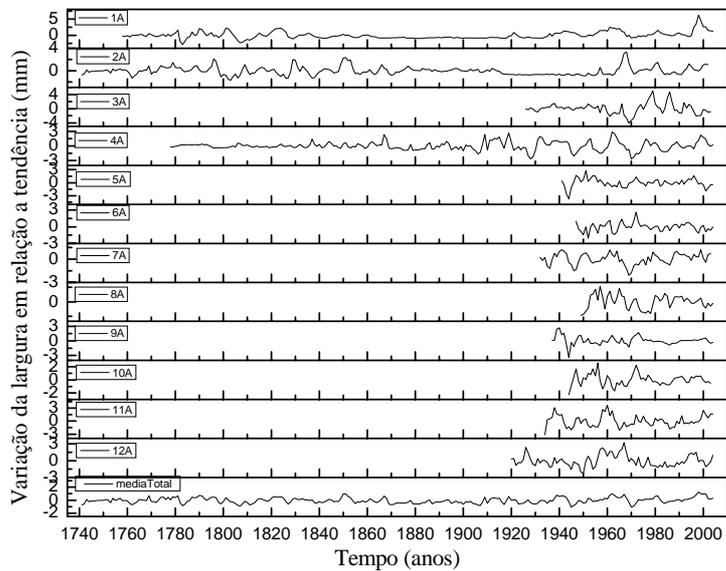


Figura 4.5: Cronologias de cada árvore de Passo Fundo e cronologia média do local.

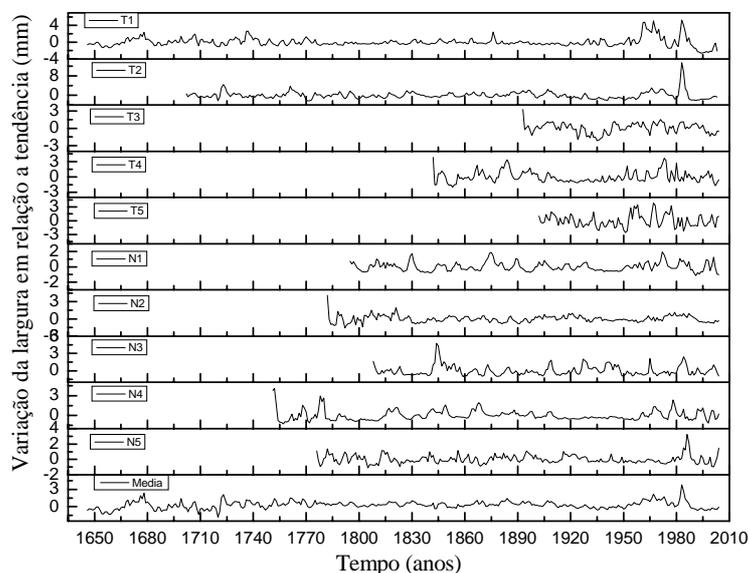


Figura 4.6: Cronologias de cada árvore de Severiano de Almeida e cronologia média do local.

4.1.2 Amostras Petrificadas

As séries temporais das espessuras dos anéis de crescimento das amostras de árvores petrificadas são arranjadas, como para as amostras de araucárias, num único gráfico. As séries temporais obtidas das 15 amostras coletadas nos municípios de Mata e São Pedro do Sul são mostradas na Figura 4.7. Como não se tem conhecimento do tempo absoluto de quando as árvores viveram, os anéis estão dispostos na seqüência dos anéis em que foram mensurados, do primeiro (mais próximo do centro) até o último (exterior).

Seguindo a mesma metodologia aplicada às séries das amostras do presente, tenta-se determinar a melhor curva de ajuste que represente possíveis tendências como o crescimento biológico de cada árvore, anomalia e/ou danos que podem ter ocorrido em alguma árvore, ou algum outro fenômeno indesejado que tenha ocorrido. Para cada amostra foi adotada uma curva para o ajuste dos dados, que melhor represente as tendências em cada série temporal, como são apresentadas na Figuras 4.8. As funções de ajustes utilizadas são mostradas no Apêndice A.

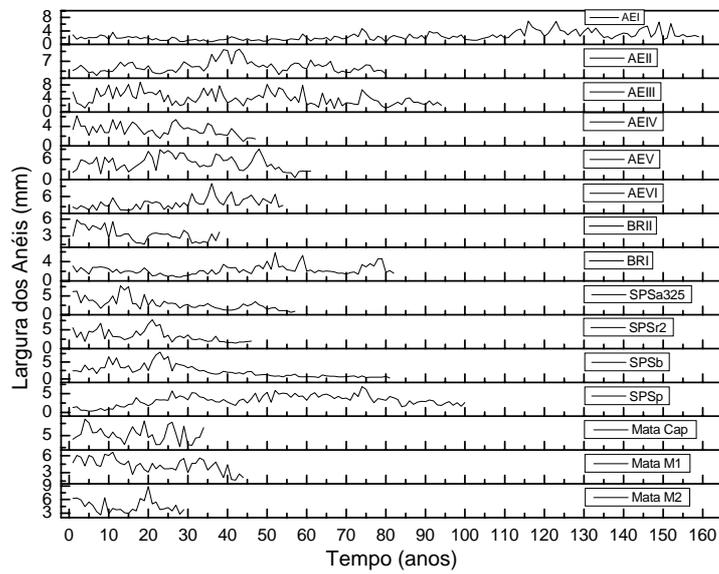


Figura 4.7: Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 15 amostras de árvores coletadas em Mata e São Pedro do Sul.

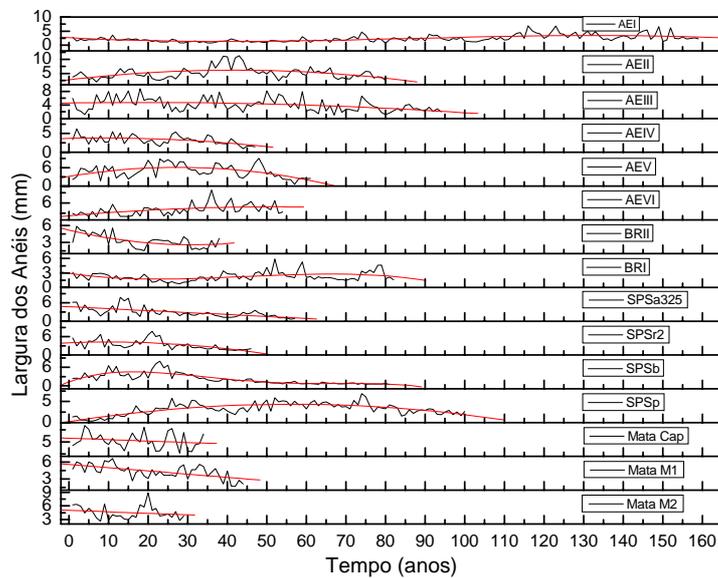


Figura 4.8: Séries temporais da espessura dos anéis de crescimento das 15 amostras de árvores coletadas em Mata e São Pedro do Sul (curvas pretas) e suas tendências (curvas vermelhas).

Determinadas as curvas de ajuste que melhor representam as tendências efetuou-se o processo de eliminação das mesmas nos dados. Esse processo foi feito subtraindo as tendências de cada série dos dados medidos, obtendo assim, as cronologias da variação da largura dos anéis em relação as suas tendências, como mostrado na Figura 4.9.

Não foi obtida a cronologia média das amostras, pois, diferente dos registros de anéis de árvores modernas, registros fósseis devem ser tratados como eventos individuais e únicos. Por causa da transposição natural de árvores fósseis para longe da localização em que elas cresceram, a identificação cruzada entre árvores quase nunca pode ser realizada (Ammons et al., 1983).

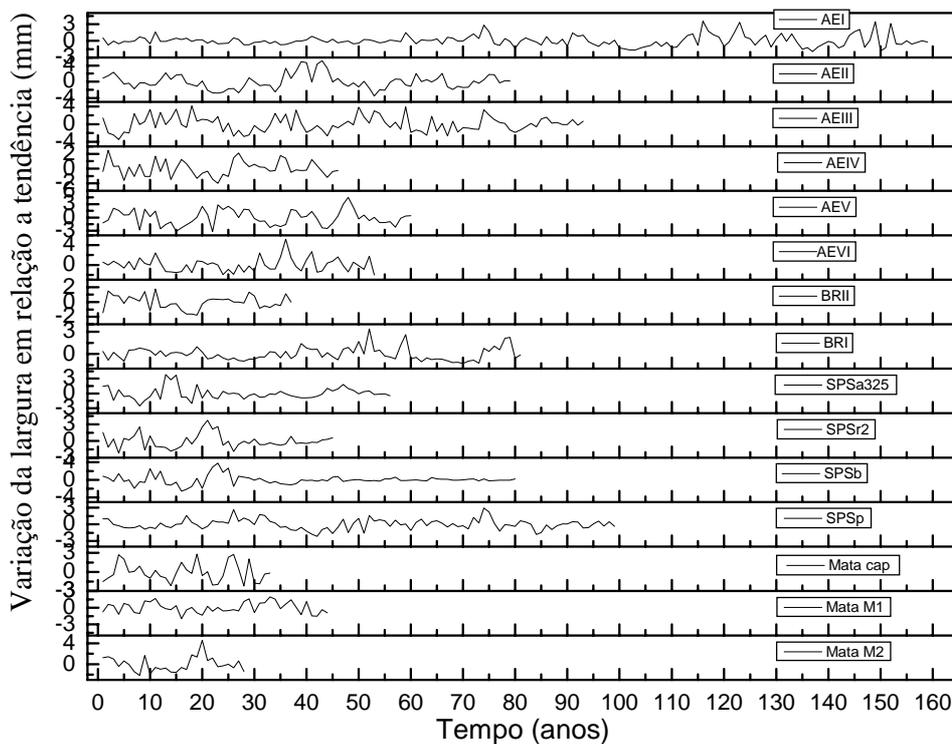


Figura 4.9: Cronologias dos anéis de crescimento de cada amostra de Mata e São Pedro do Sul.

4.1.3 Séries Geofísicas e Climatológicas

As séries geofísicas utilizadas para averiguar suas influências no crescimento dos anéis de árvores foram: o número de manchas solares, de 1700 a 2004; índice geomagnético aa, de 1868 a 2004; anomalia da temperatura entre as latitudes de 24° a 44° sul, de 1880 a 2004; e o SOI, de 1866 a 2004. As séries são apresentadas na Figura 4.10.

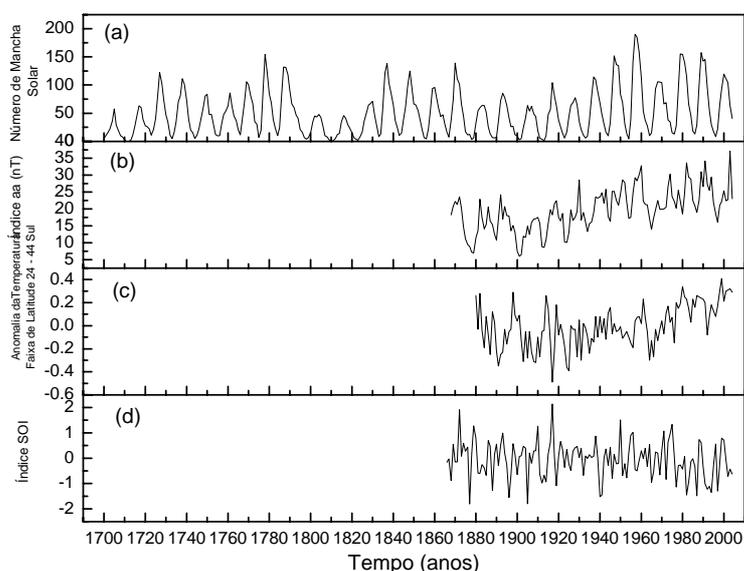


Figura 4.10: Média anual do número de manchas solares (a), índice geomagnético anual aa (b), anomalia da temperatura entre a latitude 24° a 44° sul (c), índice de oscilação sul, SOI (d).

4.2 ANÁLISES DAS SÉRIES DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO E DAS SÉRIES GEOFÍSICAS

As análises de anéis de crescimento foram originalmente estabelecidas para estudos cronológicos e paleoclimatológicos de madeiras do final do quaternário (Holoceno), mas recentemente têm sido aplicadas a estudos paleoclimatológicos no passado geológico. Anéis de crescimento em madeiras petrificadas (permineralizadas) preservam registros de alta resolução (resolução anual), e podem dar informações detalhadas das mudanças do

paleoclima (Kumagai et al., 1995) e também indícios da atividade solar (Ammons et al., 1983; Kurths et al., 1993). Logo, tendo em vista estes estudos, e muitos outros citados anteriormente, e levando em conta os objetivos do presente trabalho, de estudar as Relações Sol-Terra através de anéis de crescimento de árvores, apresentamos os resultados das análises das séries temporais de anéis de crescimento de madeiras do presente (Era cenozóica – Período Quaternário – Época Holoceno) das regiões de Passo Fundo e Severiano de Almeida, e das madeiras petrificadas do passado (Era mesozóica – Período Triássico) das regiões de São Pedro do Sul e Mata. As análises matemáticas dessas séries tencionam identificar fenômenos geofísico e espacial que causam variações registradas ano-a-ano durante a vida da árvore.

Uma vez obtidas as cronologias das espessuras dos anéis de crescimento, representativas de cada local e período em estudo, fez-se a análise espectral utilizando o método de regressão iterativa (ARIST) e ondeletas de cada cronologia e das séries geofísicas. Também se fez ondeletas cruzadas das séries cronológicas do presente com as séries geofísicas, a fim de se determinar os sinais que podem influenciar o desenvolvimento dos anéis de crescimento de árvores. Através destas análises pretende-se investigar a constituição espectral das séries temporais, buscando correlacioná-las como causa e efeito, avaliá-las e compará-las.

4.2.1 Análise Espectral Clássica Utilizando o Método de Regressão Iterativa (ARIST)

4.2.1.1 Análises das amostras do presente - Araucárias

Nesta etapa do trabalho são apresentadas as análises espectrais para todas as séries temporais dos anéis de crescimento de Passo Fundo e Severiano de Almeida obtidas pelo ARIST e somente períodos com nível de confiança acima de 95% são apresentados.

A Figura 4.11 mostra os espectros de amplitude como uma função da frequência das 12 séries cronológicas e da cronologia média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, apresentadas na Figura 4.5, cobrindo o intervalo de 1741 a 2004.

Baseados nos períodos encontrados nos espectros das cronologias, dividiu-se os períodos, com base na literatura, em intervalos característicos relacionados a eventos El-Niño,

fenômeno que altera a atividade climática de todo o globo, com uma periodicidade, não bem definida, geralmente sendo entre 4 e 7 anos, podendo ser também entre 2 e 7 anos (Oliveira, 1971); a intervalos que correspondem a atividade solar, que são os intervalos entre 8 a 14 anos, que correspondem ao ciclo médio de 11 anos do número de manchas solares (ciclo de Schwabe), 20 a 29 anos, correspondendo ao ciclo em torno de 22 anos (ciclo de Hale), intervalo em torno de 70-90, correspondendo ao ciclo de Gleissberg, 180 a 210 correspondendo ao ciclo de Suess (Kivelson e Russell, 1995; Hoyt e Schatten, 1997, Damon et al., 1998); e também intervalos que possam estar ligados a outros forçantes ou mesmo serem gerados pela atividade solar, como será discutido posteriormente: intervalos em torno de 50 anos que podem estar relacionados ao quarto harmônico do ciclo de Suess, ~210 anos (Rigozo et al., 2004), em torno de 35 anos que é conhecido como ciclo climático de Bruckner (Raspopov et al., 2000; Raspopov et al., 2004), e em torno de 18 anos conhecido como ciclo Lunar de Saros (Hoyt e Schatten, 1997).

Várias análises espectrais do número de manchas solares (R_z) foram feitas aplicando diferentes métodos (análise de Fourier, método da máxima entropia, Multitaper) para diferentes períodos (Currie, 1973; Rodaski et al., 1975; Courtillot et al., 1977; Clua de Gonzalez et al., 1993; Tsirulnik et al., 1997; Juckett, 2001; Prestes, 2002; Prestes, 2006). As características gerais encontradas nas várias análises espectrais são similares entre si com respeito a três fatores: parece existir um curto ciclo de 5,5 anos (representa o segundo harmônico do ciclo de 11 anos); o pico de 11 anos pode ser um triplo pico com um período mais curto, em torno de 8 anos, um mais longo, em torno de 13 anos; e existe um longo ciclo que é encontrado mais frequentemente em torno de 90 anos (Herman e Goldberg, 1978). O tamanho dos ciclos do número de manchas solares (R_z), determinado do ano de mínimo valor de R_z ao ano anterior ao mínimo seguinte, como apresentado em Kivelson e Russell (1995), página 73, apresenta um valor médio de 9.67 anos, variando de 9 a 11 anos, cobrindo o ciclo 11 ao 22 (correspondente ao intervalo de 1868 a 1995).

Peristykh e Damon [1998], analisaram mudanças nos períodos dos ciclos de Hale e de Schwabe, por meio de $\Delta^{14}\text{C}$, antes do mínimo solar de Maunder (1540-1645 DC.), durante (1645-1715 DC.) e depois do mínimo (1715-1805 DC.). Antes do mínimo de Maunder o ciclo de Hale apresentava um período de 22.9 anos, durante o mínimo o ciclo apresentou

duas periodicidades em 24 e 15.8 anos, e após o mínimo o ciclo de Hale apresentou um período de 26 anos.

Nos espectros das 12 cronologias, como observados na Figura 4.11, encontraram-se periodicidades dentro de todos os intervalos estabelecidos acima e estas também são encontradas dentro da cronologia média do sítio, onde observam-se períodos em 5.1, 5.4, 5.9, 6.6, 6.9, 8.1, 8.8, 9.2, 9.7, 11, 12.4, 14.6, 16.2, 23, 29.2, 35, 55.7, 73.1, 188.6 e 325.4 anos.

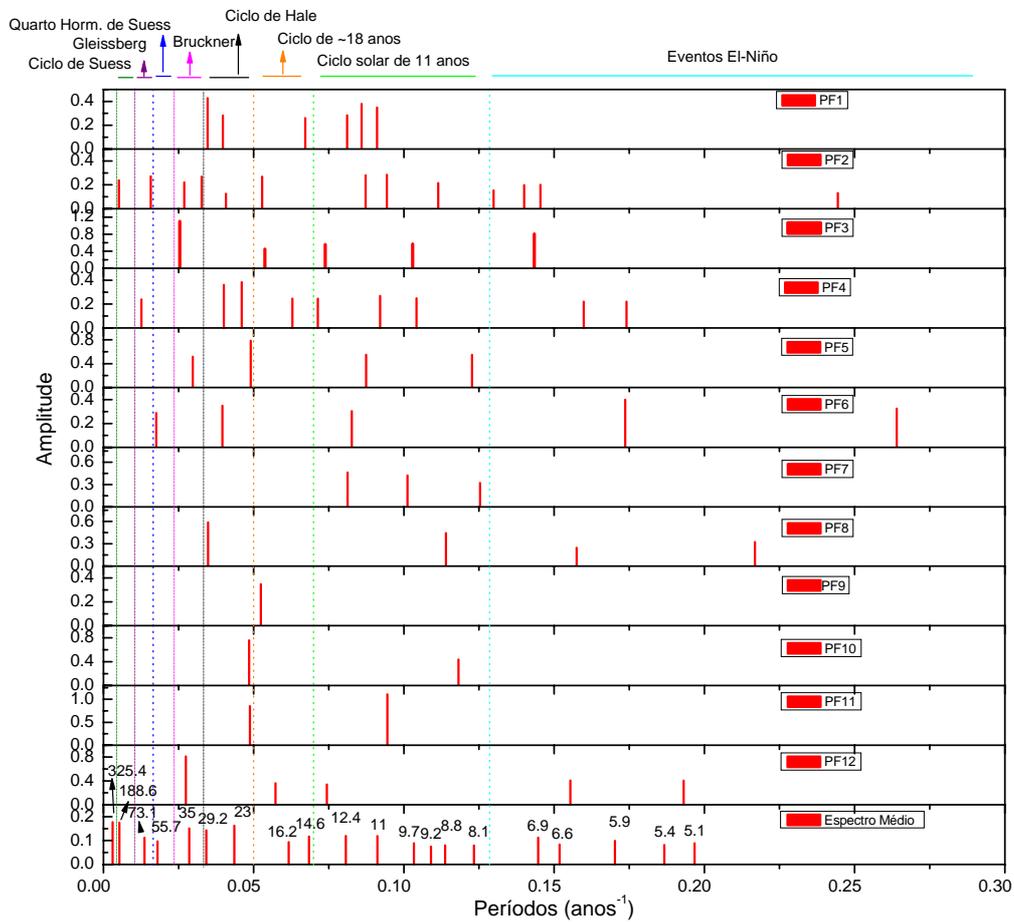


Figura 4.11: Espectros das 12 séries cronológicas das amostras de Passo Fundo e da cronologia média do local.

Para identificar melhor as periodicidades encontradas em todas as 12 séries cronológicas de Passo Fundo, como observado na Figura 4.11, fez-se um histograma dos períodos em intervalos relacionados com as possíveis causas, como mostrado na Figura 4.12. O histograma mostra que os períodos mais característicos nas 12 séries cronológicas estão entre o intervalo de 8 a 14 anos relacionado ao ciclo de Schwabe, com uma ocorrência de 21 vezes, e com uma ocorrência de 13 vezes estão os períodos entre 2 a 7 anos relacionados com eventos El-Niño. Também mostra a ocorrência de outros períodos relacionados com o ciclo de Hale, ao ciclo de Bruckner, ao quarto harmônico de Suess, ao ciclo de Gleissberg e ao ciclo de Suess.

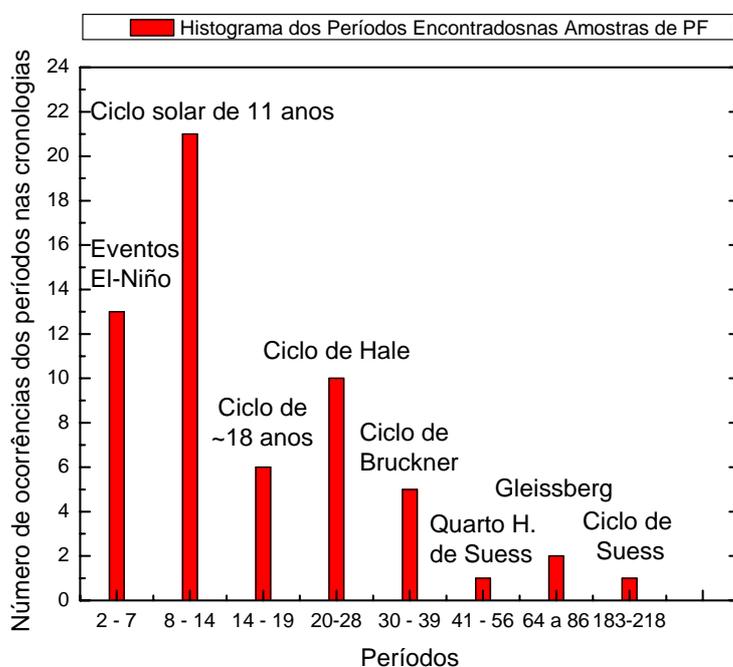


Figura 4.12: Ocorrência dos períodos encontrados nas 12 séries cronológicas das amostras de Passo Fundo.

Os resultados do histograma mostram que as principais periodicidades obtidas nas séries temporais médias, das espessuras dos anéis de crescimento de árvores para Passo Fundo, estão condizentes. Isto indica que não houve perdas ou introdução dos sinais de frequências após a obtenção de uma série temporal média da largura dos anéis de crescimento, representativas do local, nas análises espectrais. Estes resultados mostram que a atividade

solar está influenciando o crescimento dos anéis de crescimento de árvores de Passo Fundo e também uma possível influência dos fenômenos El-Niño.

Na Figura 4.13 é mostrada a análise espectral das 10 séries cronológicas e da cronologia média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, apresentada na Figura 4.6, que cobre o intervalo de 1646 a 2004. As mesmas considerações, com respeito aos intervalos, feitas para a análise espectral das cronologias de Passo fundo foram consideradas aqui.

Nos espectros das 10 cronologias encontraram-se periodicidades dentro de todos os intervalos estabelecidos acima, além de um período em torno de 129 anos, e dentro do espectro da cronologia média do sitio, observam-se períodos em 5.0, 5.1, 5.7, 7.5, 7.7, 9.0, 9.3, 11.0, 12.2, 12.8, 13.8, 14.5, 15.3, 23.9, 48.9 e 72.5. Períodos dentro do ciclo de Bruckner, de Suess e o período em 129 não estão presentes na cronologia média.

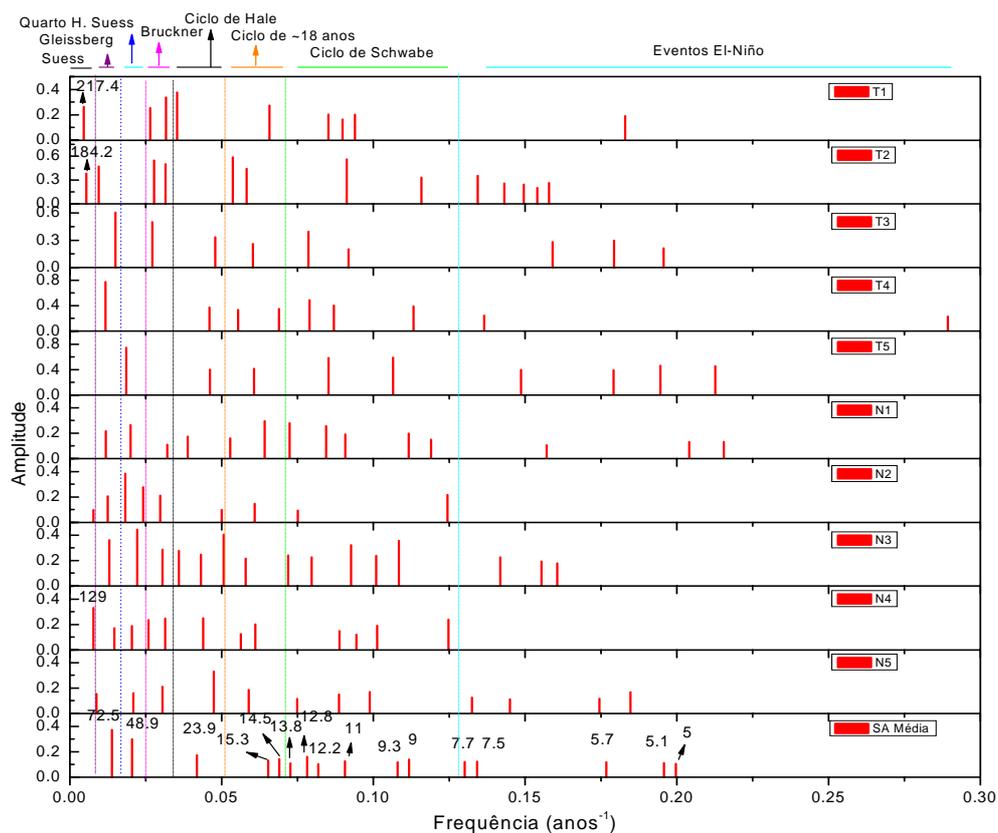


Figura 4.13: Espectros das séries cronológicas das amostras de Severiano de Almeida e da cronologia média do local.

Na Figura 4.14 é apresentada a ocorrência dos períodos nos espectros das cronologias mostrados na Figura 4.13. O histograma das periodicidades encontradas nas 10 séries cronológicas de Severiano de Almeida. Os períodos estão dentro de intervalos relacionados com as possíveis causas. O histograma mostra que os períodos mais característicos nas 10 séries estão entre o intervalo de 8 a 14 anos, com uma ocorrência de 32 vezes, e com uma ocorrência de 25 vezes estão os períodos entre 2 a 7 anos. No intervalo relacionado com o ciclo de Buckner há uma ocorrência de 11 vezes, que por algum motivo foi atenuado, não estando presente na cronologia média. Também não está presente na cronologia média a periodicidade de 129 anos que aparece em duas séries. Mas, as principais periodicidades estão presentes na cronologia média, sendo elas as relacionadas aos eventos El-Niño e ao ciclo de 11 anos de Schwabe. Rigozo [1999], estudando séries de anéis de crescimento do sul do Brasil, encontrou um histograma similar, com os períodos de maior ocorrência em torno de 12 anos.

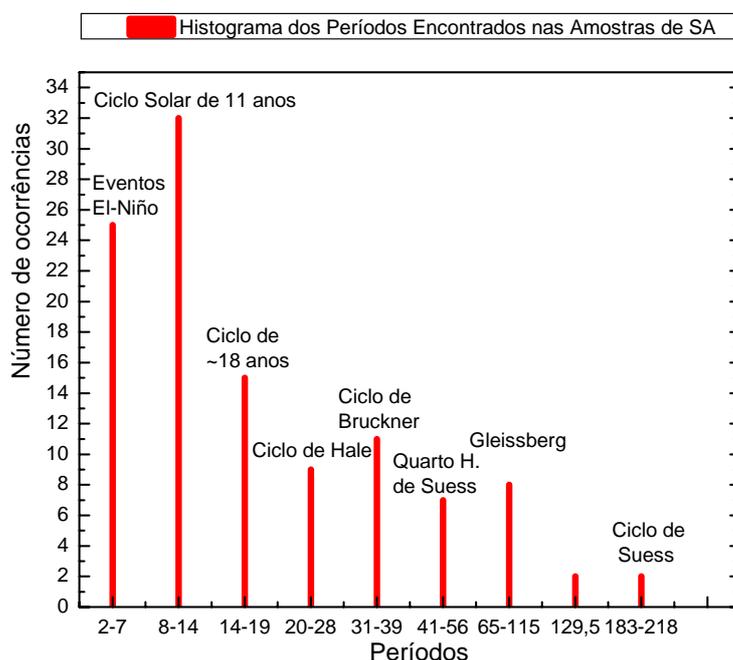


Figura 4.14: Ocorrência dos períodos encontrados nas 10 séries cronológicas das amostras de Severiano de Almeida.

Para averiguar se as nossas considerações com respeito aos intervalos considerados para os períodos encontrado nos espectros das séries cronológicas de Passo Fundo e Severiano de Almeida como sendo devidos a suas possíveis causas, realizamos a análise espectral das séries temporais, apresentadas na Figura 4.10, do número de manchas solares, do índice geomagnético *aa*, da anomalia da temperatura entre 24° a 44° sul e do SOI. As análises são apresentadas na Figura 4.15, onde se observa o espectro de amplitude para as séries temporais da espessura dos anéis de árvores de Passo Fundo e Severiano de Almeida, do número de manchas solares, do índice geomagnético *aa*, da anomalia da temperatura entre 24° a 44° sul e do índice de oscilação sul – SOI, para um nível de confiança de 95%. Observam-se no espectro da cronologia de Passo Fundo períodos em 5.1, 5.4, 5.9, 6.6, 6.9, 8.1, 8.8, 9.2, 9.7, 11, 12.4, 14.6, 16.2, 23, 29.2, 35, 55.7, 73.1, 188.6 e 325.4. O espectro da cronologia média de Severiano de Almeida apresenta períodos em 5.0, 5.1, 5.7, 7.5, 7.7, 9.0, 9.3, 11.0, 12.2, 12.8, 13.8, 14.5, 15.3, 23.9, 48.9 e 72.5. No espectro de amplitude das manchas solares foram encontrados os períodos de 8.1-12, 28.5, 43.5, 54.7, 104.2 e 225.4 anos. Já no espectro de amplitude do índice geomagnético *aa*, foram encontrados os períodos: 4.3, 5.3, 8.1-11.0, 17.1, 22.6, 29.3, 96.4 e 170.3 anos. No espectro da anomalia da temperatura entre 24° a 44° sul foram encontrados os períodos de 4.2, 6.7, 7.6, 8.2, 10.1, 14.7, 20.3 e 158.1. Para o espectro do SOI obtiveram-se os períodos de 2.9, 3.4, 3.5, 3.6, 4.2, 4.8, 5.2, 5.7, 6.4, 7.4, 9, 13.6 e 45.9, onde se observa o domínio dos baixos períodos, entre 2.9-7.4.

O espectro de amplitude dos anéis de árvore de Passo Fundo apresenta periodicidades, que podem ser atribuídas a variabilidade solar. As periodicidades encontradas são: 5.1-5.4, 8.1-14.6, 23.0, 29.2, 55.7, 73.1, 188.6 e 325.4 anos. Essas periodicidades encontradas representam o segundo harmônico do ciclo de 11 anos, 5.5 anos, o ciclo de 11 anos, o ciclo de Hale (22 anos), o quarto harmônico do ciclo de Suess (52 anos) [Damon et al. 1998], o ciclo de Gleissberg (~80 anos) e longas tendências que podem representar periodicidades próxima ou maior que 200 anos da atividade solar. Para o espectro de amplitude dos anéis de árvore de Severiano de Almeida, semelhante ao de Passo Fundo, encontraram-se periodicidades que também podem ser atribuídas a variabilidade solar. As periodicidades encontradas são: 5-5.7, 9-14.5, 23.9, 48.9 e 72.5 anos. Para ambas as séries, podem também

ser considerados os períodos de alta frequência aos eventos El-Niño ou a condições climáticas, no caso dos períodos entre 5-7.7 anos.

Há similaridades entre os espectros de Rz, *aa*, e a anomalia da temperatura, principalmente relacionadas ao período médio de 11 anos da atividade solar, ciclo de Hale e o ciclo de Gleissberg. Isto se deve ao fato de a atividade solar influenciar a atividade geomagnética, pelas mudanças no campo magnético solar (Kishcha et al., 1999; Stamper et al., 1999; Ricahrdson et al., 2000; Prestes, 2002; Prestes, 2006) e também a temperatura, provavelmente através da irradiação solar (Friss-Christensen e Lassen, 1991; Hoyt e Schatten, 1977; Reid, 1999, Tsiropoula, 2003).

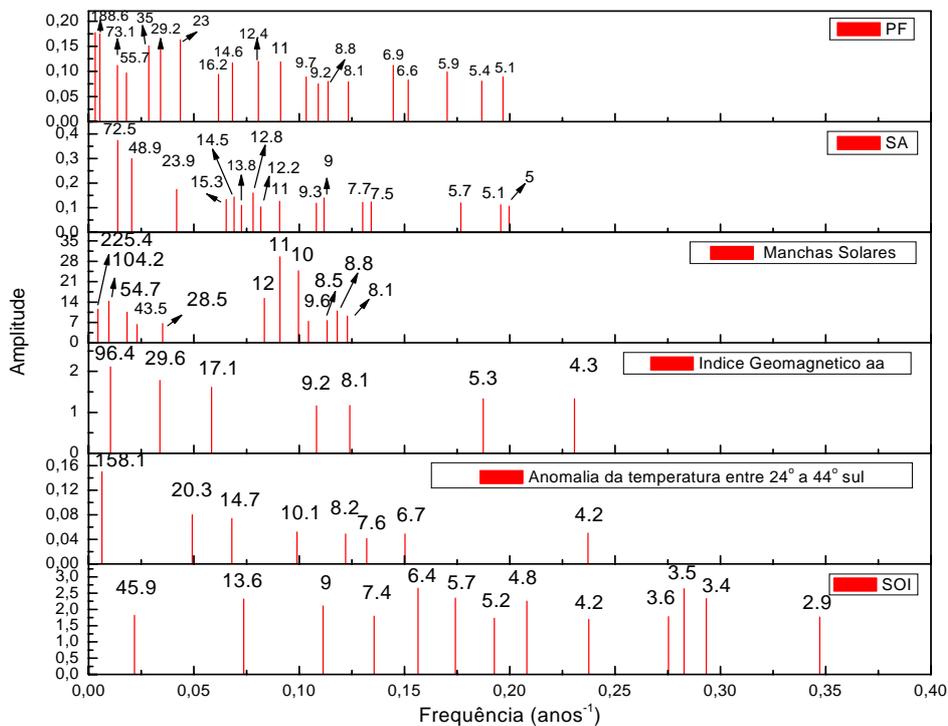


Figura 4.15: Espectros de amplitude em função da frequência das cronologias médias das amostras de Passo Fundo (a), de Severiano de Almeida (b), da série temporal do número de manchas solares (c), da série temporal do índice geomagnético *aa* (d), da série temporal da anomalia da temperatura entre 24° a 44° sul (e) e do índice de oscilação sul – SOI (f).

Pode se observar nos espectros de amplitude das cronologias de Passo Fundo e Severiano de Almeida que não existe um domínio das longas periodicidades sobre as baixas periodicidades, isto é, longos períodos não escondem os baixos. A natureza deste resultado sugere uma resposta favorável para fatores ambientais de longos e curtos períodos que influenciam os anéis de crescimento destes sítios. Um resultado similar foi encontrado por Nordemann et al. [2005] estudando amostras do sul do Brasil.

Vários trabalhos realizados em séries cronológicas de anéis de crescimento encontraram resultados similares com respeito aos sinais relacionados com a atividade solar. Murphy [1990 and 1991] estudando anéis de árvores da Austrália e de Taiwan observaram periodicidades entre 9.3 e 13.3 anos e 11.1 e 13.6 anos, respectivamente. Eles atribuíram essas periodicidades encontradas ao ciclo solar de 11 anos. Rigozo et al. [2004] estudando anéis de árvores da Região Sul do Brasil, encontraram periodicidades da atividade solar com períodos de 10.6 e 83.4 anos, correspondentes ao ciclo solar de 11 anos e o ciclo de Gleissberg de 80 anos, respectivamente. Rigozo et al. [2002] estudando a evolução temporal dos sinais de frequências, encontrados nos anéis de árvores de Concórdia, Sul do Brasil, também acharam uma forte indicação da resposta no crescimento dos anéis de árvores ao aumento da atividade solar no ciclo de 11 anos, no intervalo de tempo de 1940 a 1970. Nordemann et al. [2005], estudando cronologias do sul do Brasil e do Chile, também encontraram periodicidades relacionadas a atividade solar, 79, 51.3, 23.7 e 10.5 anos para as amostras do sul do Brasil; e 197, 89.6, 50.3, 11.8 e 10.5 anos para as amostras do Chile. Roig et al. [2001], estudando séries cronológicas de árvores fósseis de ~50000 anos atrás e de árvores vivas do Chile, encontraram propriedades espectrais similares entre si, indicando que fatores similares têm afetado o crescimento radial das árvores desde o final do Pleistoceno. As propriedades espectrais similares encontradas nas duas séries foram: períodos entre 136-153, 81-94, 47-53, 35, 24, 17.8, 11.8, 6.6, 5.1, 4.58, 4.3, 3.7, 3.2 e 2.77 anos. Eles relacionaram os períodos de 81-94, 24, 11.8 anos à modulação solar.

Existem ciclos que podem surgir do batimento entre dois ciclos de diferentes comprimentos. Alguns ciclos de 7 e 8 anos podem surgir do batimento de outros dois ciclos (Hoyt e Schatten, 1997). Kurths et al. [1993], mostrou que as combinações de dois períodos encontrados por eles geravam outros dois $[(1/12.6)+(1/17.1)=1/7.3]$ e $(1/12.6)-$

$(1/17.1)=1/47.9$]. Raspopov et al. [2000,2001], interpretaram o ciclo de Bruckner como resultante do efeito não linear da atividade solar no ambiente terrestre, isto é, resultante da frequência combinatória do ciclo de Gleissberg ($T_1=1/v_1 \approx 90$ anos) e do ciclo de Hale ($T_2=1/v_2=22$ anos) [$T_- = 1/v = 1/v_1 - 1/v_2 \approx 30$; $T_+ = 1/v = 1/v_1 + 1/v_2 \approx 17$]. Com isto, considerando que o comprimento do ciclo solar varia, eles concluíram que os períodos nos intervalos de ~ 30 - 35 anos e de ~ 17 - 18 anos são resultados de efeitos não lineares da atividade solar em processos na atmosfera. Também consideraram a variabilidade climática de ~ 18 anos como podendo ser um efeito combinatório da periodicidade das marés lunares no clima, ciclo de Saros, com a atividade solar. Outra consideração sobre o ciclo de Bruckner consiste na presença de duas bandas de frequência com períodos centrados em 30 e 45 anos revelados por Sazonov [1979]. Ele enfatizou que em épocas de alto nível de atividade solar ocorria período mais curto ($T \approx 30$ anos) e em épocas de baixo nível de atividade solar ocorria período mais longo ($T \approx 45$ anos). Raspopov et al. [2000, 2001], consideraram o período de aproximadamente 45 anos com sendo o segundo harmônico do ciclo de 90 anos.

Considerando que alguns períodos sejam devido ao batimento entre outros dois, os períodos encontrados na cronologia média de Passo Fundo, foram: $[(1/11)+(1/16.2) \approx 1/6.6$ e $(1/11)-(1/16.2) \approx 1/35]$ ou $[(1/23)+(1/73.1) \approx 1/17.5$ e $(1/23)-(1/73.1) \approx 1/33.5]$, logo se obteve do batimento dos períodos de 11 e 16.2 anos, os períodos de 6.6 a 35 anos, e dos períodos de 23 e 73.1 os períodos de 17.5 e 33.5.

4.2.1.2 Análises das Amostras do Passado – Amostras Petrificadas

Nos registros de anéis de crescimento de árvores fósseis do triássico da região de São Pedro do Sul e Mata, procurou-se detectar e caracterizar a presença de períodos, que possam dar indicações das possíveis variáveis, que estavam atuando no crescimento das árvores, naquela época em comparação com o presente, principalmente relacionados com ciclos da atividade solar.

A análise espectral, de todas as 15 séries temporais de anéis de crescimento das amostras fósseis apresentadas na Figura 4.9, empregando o método ARIST fornece os espectros de

amplitude mostrado na Figura 4.16, e somente períodos com nível de confiança acima de 95% são apresentados. As séries cobrem intervalos entre 28 a 159 anos.

Semelhante ao que foi feito nos espectros das amostras do presente, de Passo Fundo e Severiano de Almeida, se dividiu os períodos encontrados nos espectros das séries das árvores petrificadas em intervalos relacionados a atividade solar e a condições ambientais (variabilidade de temperatura/precipitação). Os períodos encontrados estão dentre dos intervalos: 2.1 a 7.3 relacionados a condições climáticas, 8 a 13.8 relacionados ao ciclo de 11 anos da atividade solar, 14.9 a 19.5 relacionadas ao ciclo Lunar de Saros, 20 a 29 relacionados ao ciclo de Hale, 32.3 a 39.5 relacionados ao ciclo de Bruckner, e 54 anos relacionado ao quarto harmônico de Suess. A ocorrência de períodos com relação ao ciclo de Gleissberg (~90 anos) nas amostras petrificadas não foi encontrado, devido provavelmente, as séries não serem muito mais longas que o ciclo.

Como foi observado nas séries cronológicas de Passo Fundo e Severiano de Almeida, os espectros de amplitude das cronologias das amostras petrificadas, também, não apresentam um domínio das longas periodicidades sobre as baixas periodicidades em todas as séries, isto é, longos períodos não escondem os baixos. A natureza deste resultado sugere uma resposta favorável para fatores ambientais de longos e curtos períodos que influenciaram os anéis de crescimento daquela época e local.

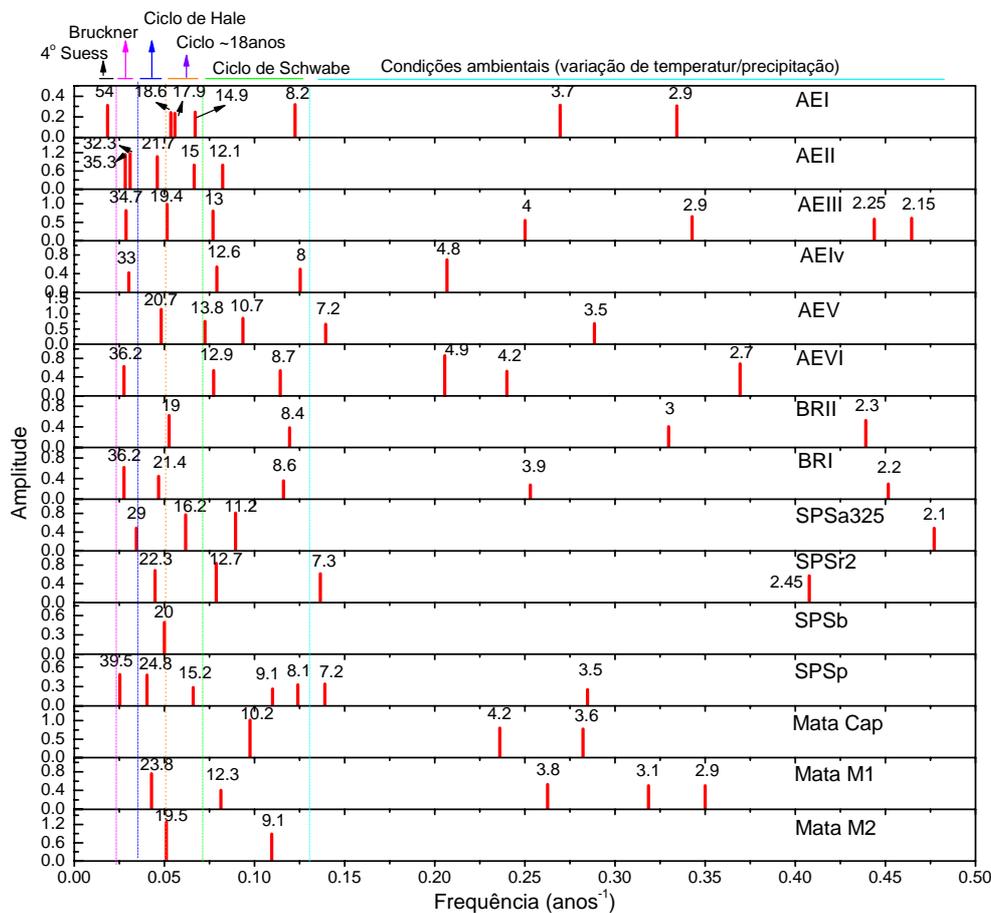


Figura 4.16: Espectro de amplitude das séries cronológicas das amostras petrificadas de Mata e São Pedro do Sul.

Para identificar melhor as periodicidades encontradas em todas as 15 séries cronológicas das amostras petrificadas, de São Pedro do Sul e Mata Passo Fundo, como apresentadas na Figura 4.16, fez-se um histograma dos períodos em intervalos relacionados com as possíveis causas, como mostrado na Figura 4.17. O histograma mostra que os períodos mais característicos nas 15 séries estão entre o intervalo de 2.1 a 7.3 anos relacionado às condições climáticas, com uma ocorrência de 26 vezes, e com uma ocorrência de 18 vezes estão os períodos entre 8 a 13.8 anos relacionados ao ciclo de Schwabe. Também mostra a ocorrência de outros períodos relacionados com o ciclo de Hale (20-29 anos) ocorrendo 8 vezes, ao ciclo de Bruckner (32.3-39.5 anos) ocorrendo 7 vezes, ao quarto harmônico de Suess (54 anos) com 1 ocorrência. Estes resultados mostram que a atividade solar pode ter

influenciado o crescimento dos anéis de crescimento das árvores petrificadas do triássico, com períodos idênticos da atividade solar do holoceno, bem como as condições climáticas exerceram forte influência. Segundo Bolzon [1993], o clima da região naquela época seria quente com alternância de períodos úmidos e secos, e o fator limitante do crescimento dos indivíduos teria sido a umidade.

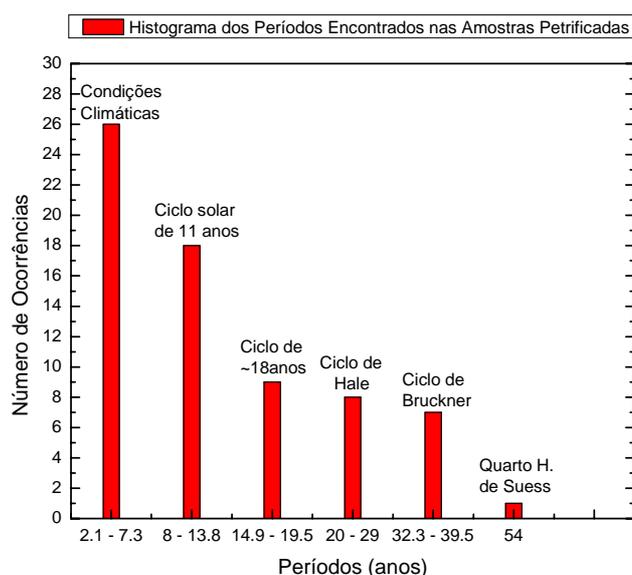


Figura 4.17: Ocorrência dos períodos encontrados nas 15 séries cronológicas das amostras petrificadas.

Pesquisas realizadas por Ammons et al. [1983] em registros de anéis de crescimento de coníferas fósseis do terciário (50 milhões de anos, Eoceno, e 20 milhões, Mioceno) apresentaram a existência de períodos de ~5.8, 12 a 15, 20 a 25 e 30 anos. Kurths et al. [1993], analisou registros da largura dos anéis de duas coníferas do Mioceno com uma idade absoluta de 15-20 milhões de anos e encontrou períodos em ~5.5-5.7, 8.4-12.8, 14.8-18.6, 49-53, 150 e 220 anos.

As análises dos registros da largura dos anéis de crescimento das árvores do triássico, com uma idade absoluta de ~200 milhões de anos, podem refletir periodicidades solares do passado pré-histórico, onde encontrou-se evidências de períodos dentro do intervalo

associado ao ciclo principal de atividade solar de 11 anos, bem como, períodos associados ao ciclo de 22 anos de Hale.

Comparando com os resultados obtidos nas séries cronológicas do presente e do passado, observa-se que ambas apresentam características semelhantes, ou seja, elas sofreram influências tanto da atividade solar quanto das condições climáticas, e com base neste estudo e os realizados por Ammons et al. [1983] e Kurths et al. [1993] se levanta a hipótese de que há 200 milhões de anos atrás, o Sol apresentava as mesmas periodicidades apresentadas no presente.

4.2.2 Análises por Ondeletas (Wavelets)

A análise espectral clássica é uma excelente ferramenta para detectar sinais embutidos em séries temporais. Entretanto, ela somente indica que uma dada frequência existe, mas não indica em que tempo ela começou, por quanto tempo ela existiu e quando ela cessou ou se sua frequência mudou. Logo, para o estudo das relações Sol-Terra, tratando-se com evolução não estacionária é absolutamente necessário lidar com estas questões. Por isso, utilizou-se a transformada ondeleta, que é uma poderosa ferramenta para analisar sinais não estacionários, nas séries de anéis de crescimento e nas séries geofísicas (Nordemann et al., 2005). Nos mapas das ondeletas o eixo Y representa a escala (períodos) das ondeletas em anos, o eixo X é o tempo, também em anos, e a escala de cores indica a amplitude no espectro, para cada periodicidade em um dado tempo. As periodicidades significativas com 95% de confiança são delimitadas por linhas de contorno brancas. O mapa de ondeletas também apresenta o cone da região de influência (delimitado por uma curva parabólica preta), no qual a região externa desta curva é onde se apresentam os efeitos de bordas da série temporal. Assim, somente a região dentro do cone de influência deve ser analisada [Torrence and Compo, 1998].

4.2.2.1 Análise de Ondeleta das Amostras de Araucárias do Presente

Na Figura 4.18 apresenta a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, de 1741 a 2004, e seu espectro da ondeleta de Morlet, para os períodos variando de 2 a 132 anos. Pode-se observar que a periodicidade, variando de ~2-5 anos, esta presente

entre 1900-1925, e a periodicidade em torno de 5 anos aparece esporadicamente em 4 faixas de intervalo de tempo: 1774-1804, 1844-1874, 1914-1934, 1944-1984, aproximadamente. Já o ciclo em torno de 11 anos apresenta três eventos significantes; entre 1750-1795, 1825-1870 e 1930-2004, aproximadamente. Os ciclos de 22 e de 33 anos, apresentaram duas faixas de intervalo de tempo; 1754-1850 e 1890-2004. O ciclo de Gleissberg apresentou uma faixa de período de 1744-1900. Com exceção das periodicidades entre 2-5 anos, todas as outras foram detectadas na análise espectral clássica (ARIST), e mostraram não ser constante no tempo e apresentaram uma grande variância.

A Figura 4.19 apresenta a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, de 1646 a 2004, e seu espectro da ondeleta de Morlet, para os períodos variando de 2 a 264 anos. Pode-se observar que as curtas periodicidades entre 2 a 7 anos apresentam eventos esporádicos mais significantes em ~1660-1790 e 1970-1990. A periodicidade em torno de 5 anos aparece com uma forte amplitude entre 1700-1780 e 1970-1990, aproximadamente. Já o ciclo em torno de 11 anos apresenta dois eventos mais significantes entre 1710-1790 e 1950-1990, aproximadamente. Os ciclos de ~22 e de ~33 anos, apresentaram duas faixas de intervalo de tempo; 1646-1760 e 1950-2004. O ciclo de Gleissberg está presente durante todo o intervalo, 1646-2004, onde se observa que de 1646-2004 ele se encontrava entre 100-150 anos e também entre 1646-1760 apresentava uma periodicidade entre 40-90 anos, e a partir de 1850 até o presente se encontrava entre 40-150 anos. Como era de se esperar, todas essas periodicidades foram detectadas na análise espectral clássica, e mostraram não ser constante no tempo.

Rigozo et al. [2002], analisando séries cronológicas de araucárias (1837-1996), obtidas em Concórdia (Lat: 27° 11'S; Long: 51° 59'W; Alt:640m), estado de Santa Catarina, utilizando ondeletas, encontraram uma forte periodicidade em torno de 11 anos entre 1908 e 1996, e também periodicidades de 3 a 7 anos nos intervalos de 1908-1916, 1919-1940, 1950-1960 e 1970-1985, aproximadamente. Eles relacionaram o período de ~11 anos ao ciclo solar de 11 anos e os períodos de 3 a 7 anos a influência de eventos El-Niño e variações nas condições ambientais.

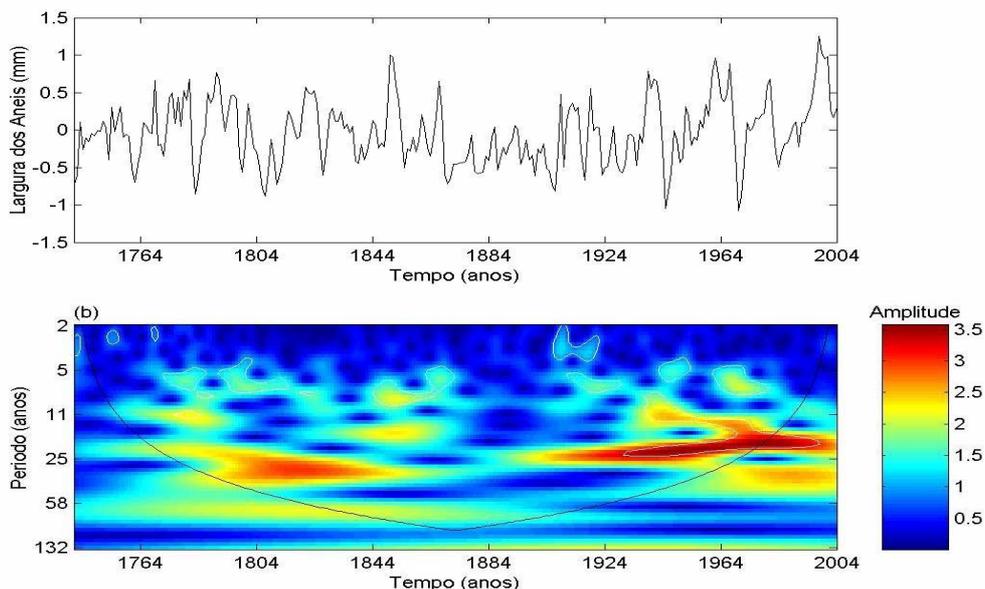


Figure 4.18: (a) Cronologia média da largura dos anéis de crescimento de árvores de Passo Fundo. (b) Espectro de ondeleta com o cone de influência (curva preta) e nível de confiança de 95% (contorno branco).

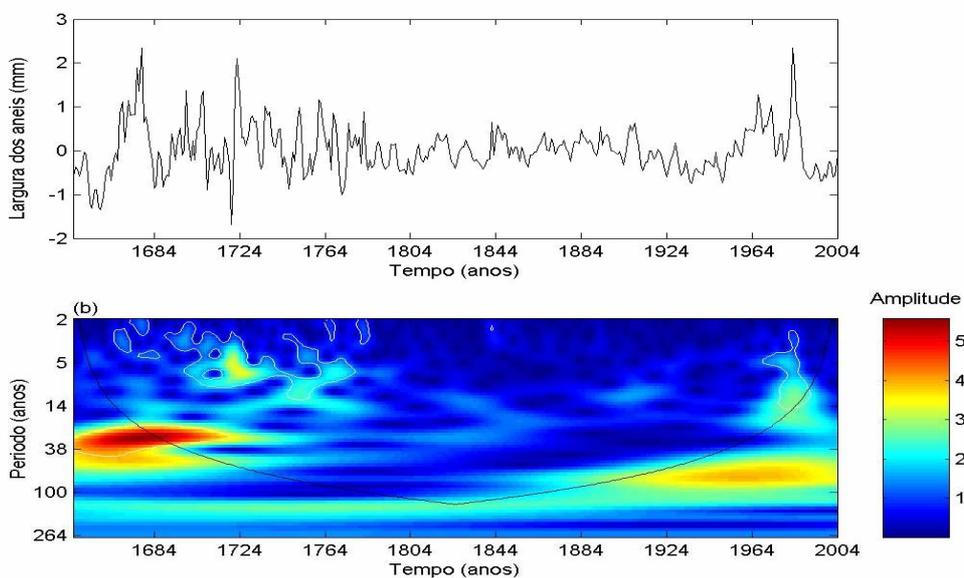


Figure 4.19: (a) Cronologia média da largura dos anéis de crescimento de árvores de Severiano de Almeida. (b) Espectro de ondeleta com o cone de influência (curva preta) e nível de confiança de 95% (contorno branco).

4.2.2.2 Espectros de Ondeletas-Cruzadas das Amostras de Araucária do Presente

O espectro de ondeleta-cruzada de Morlet mostra exatamente o que existe de comum entre duas séries temporais. O eixo Y representa a escala (períodos) do espectro em anos, o eixo X é o tempo, também em anos, e a escala de cores indica a potência cruzada do espectro, para cada periodicidade em um dado tempo. As periodicidades significativas com 95% de confiança são delimitadas por linhas de contorno brancas. O mapa de ondeleta-cruzada também apresenta o cone da região de influência (delimitado por uma curva parabólica branca), no qual a região externa desta curva é onde se apresentam os efeitos de bordas da série temporal. Assim, somente a região dentro do cone de influência deve ser analisada [Torrence and Compo, 1998].

A Figura 4.20 apresenta o mapa de ondeleta-cruzada entre o número de manchas solares e os anéis de crescimento de árvores de Passo Fundo, para os períodos variando de 2 a 132 anos. Duas periodicidades são predominantes: o período de 11 anos e o de 55-90 anos. Observa-se que as periodicidades são intermitentes, isto é, a amplitude e a potência cruzada variam com o tempo. Os intervalos de ocorrência dos períodos em torno de 11 anos no espectro cruzado estão entre: 1750-1800, 1825-1880 e 1930-2004, aproximadamente. Observa-se que os intervalos correspondem a períodos em que o número de manchas solares apresentou seus maiores valores, ou seja, maior atividade solar. Ainda podemos observar que durante o mínimo de Dalton (1795-1825) os anéis de árvores não apresentaram o sinal de 11 anos em seu crescimento. O mesmo ocorreu para o período de 1875-1935, que também correspondeu a um baixo número de manchas solares. Mostrando que a resposta dos anéis de árvores é mais favorável durante os intervalos de máximo número de manchas solares, que corresponde a atividade solar mais intensa. Com respeito ao ciclo de Gleissberg pode-se observar variações com períodos entre 60-90 anos para o intervalo de 1744-1900.

Ogurtsov et al. [2002b], estudando registros da atividade solar encontraram no espectro de ondeleta da série temporal do número de manchas solares de 1700 a 1990 que o ciclo de Gleissberg apresentou um período de aproximadamente 60-65 anos entre 1720 a 1850 e de

1770 até 1990 exibiu um período de aproximadamente 90 anos. As periodicidades em torno do ciclo de Schwabe (~11 anos) estavam presentes durante todo período.

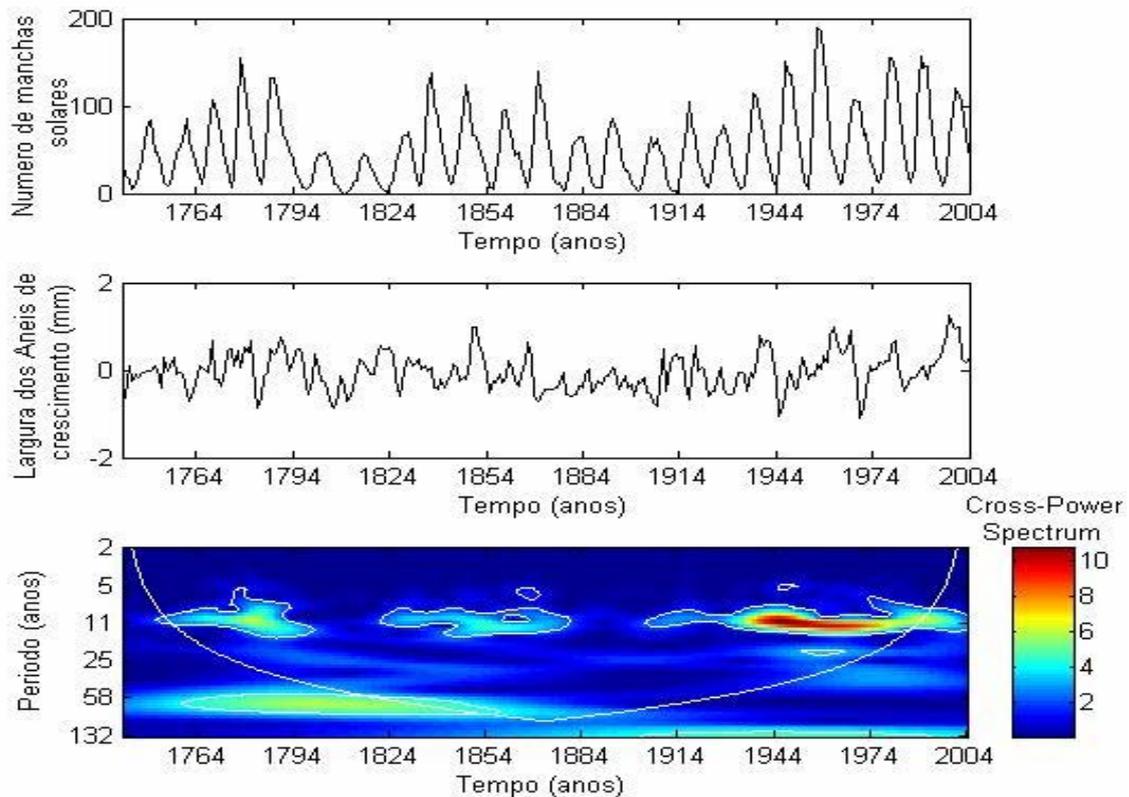


Figura 4.20: Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

A Figura 4.21 apresenta o mapa de ondeleta-cruzada entre o número de manchas solares e os anéis de crescimento de árvores de Severiano de Almeida, para os períodos variando de 2 a 264 anos. Como no espectro cruzado de Passo Fundo, duas periodicidades aqui são predominantes: o período de 11 anos e o de ~90-130 anos. Observa-se que as periodicidades têm a amplitude variável no tempo. Os intervalos de ocorrência dos períodos em torno de 11 anos no espectro cruzado estão entre: 1710-1795, 1825-1855, 1885-1935 e 1950-1990, aproximadamente. Os intervalos correspondem principalmente a períodos em que o número de manchas solares apresentou seus maiores valores. Pode-se observar que

durante o mínimo de Dalton (1795-1825) os anéis de árvores não apresentaram o sinal de 11 anos em seu crescimento, mostrando que a resposta dos anéis de árvores é mais favorável durante os intervalos onde o número de manchas solar apresenta maiores amplitudes, que corresponde a atividade solar mais intensa. Pode-se observar, ainda, que o ciclo de Gleissberg apresenta variações com períodos entre 90-130 anos para o intervalo de 1790-2004.

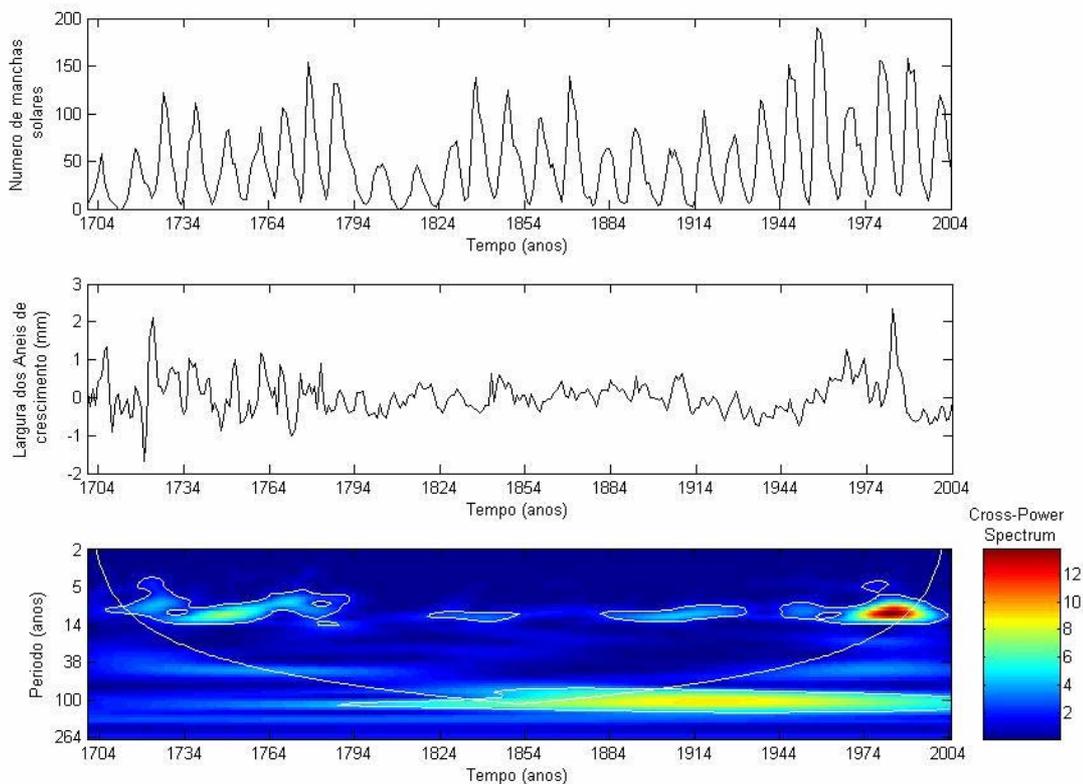


Figura 4.21: Espectro de potência cruzado entre o número de manchas solares e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

Com base nos espectros ondeletas das séries cronologias dos anéis de crescimento de Passo Fundo e Severiano de Almeida e nos espectros de ondeleta cruzada entre as cronologias e a série temporal do número de manchas solares observou-se o seguinte:

- a) Para Passo Fundo: Comparando os intervalos de ocorrência dos períodos em torno de 11 anos no espectro de ondeleta dos anéis de crescimento de Passo Fundo (1750-1800, 1825-1880 e 1930-2004) com a série temporal e o espectro de ondeleta do número de manchas solares (Figura 4.20), observa-se que os intervalos correspondem a períodos em que o número de manchas solares apresentou seus maiores valores, ou seja, maior atividade solar. Ainda dessa comparação podemos observar que durante o mínimo de Dalton (1795-1825) os anéis de árvores não apresentaram o sinal de 11 anos em seu crescimento. O mesmo ocorreu para o período de 1875-1935, que também correspondeu a um baixo número de manchas solares. Mostrando que a resposta dos anéis de árvores é mais favorável durante os intervalos onde o número de manchas solar apresenta maiores amplitudes, que corresponde a atividade solar mais intensa. Com respeito ao ciclo de Gleissberg pode-se observar uma mudança dinâmica similar entre os espectros de ondeletas dos anéis de crescimento e o número de manchas solares para o intervalo de 1744-1900, onde se encontram variações com períodos entre 60-100 anos.
- b) Para Severiano de Almeida: Comparando os intervalos de ocorrência dos períodos em torno de 11 anos no espectro de ondeleta dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, principalmente nos intervalos 1710-1790 e 1950-1990, com a série temporal e o espectro de ondeleta do número de manchas solares (Figura 4.21), observa-se que os intervalos são correspondentes a períodos em que o número de manchas solares apresentou seus maiores valores, como visto na análise de Passo Fundo. Podemos observar que durante o mínimo de Dalton (1795-1825) os anéis de árvores não apresentaram o sinal de 11 anos em seu crescimento. O mesmo ocorreu para o período de 1875-1935, que também correspondeu a um baixo número de manchas solares. Como observado na série cronológica de Passo Fundo, aqui também se observa que a resposta dos anéis de árvores é mais favorável durante os intervalos onde o número de manchas solar apresenta maiores amplitudes, que corresponde a atividade solar mais intensa. Com respeito ao ciclo de Gleissberg pode-se observar uma mudança dinâmica similar entre os espectros de ondeletas dos anéis de crescimento e o número de manchas solares para o intervalo de 1790-2004, onde se encontram variações com períodos entre 90-130 anos.

Existem pequenas diferenças entre os espectros de ondeltas de Passo fundo e Severiano de Almeida. Talvez estas estejam ligadas a diferença de altitude, enquanto Passo Fundo esta situada no planalto riograndense a altitude de ~740 m, Severiano de Almeida esta situada em um vale a ~470 m de altitude, ou seja, as diferenças seriam devidas às condições ambientais locais.

Os resultados obtidos dos espectros cruzados entre as séries cronologias de Passo Fundo e Severiano de Almeida com a série temporal do número de manchas solares, Figuras 4.20 e 4.21, mostram que os anéis de crescimento de árvores têm uma melhor resposta em épocas de atividade solar mais intensa, ao passo que em épocas de atividade solar baixa (como o Mínimo de Dalton) a resposta é fraca ou quase nula.

Como observamos neste trabalho, Rigozo et al. [2002, 2003] também observam uma alta correlação entre séries cronológicas de árvores do sul do Brasil e o número de manchas solares.

Do espectro cruzado de ondeleta de Morlet entre as séries do índice geomagnético *aa* e a espessura dos anéis de árvores de Passo Fundo, para os períodos variando de 2 a 66 anos, apresentado na Figura 4.22, obteve-se as seguintes regiões de confianças: o período próximo a 5, 12, 17, 25 e 33 anos. O período de ~5 anos está entre o intervalo de 1940-1955, enquanto os períodos entre 9-15 estão no intervalo de 1900-2004, já o período de ~17 anos compreende ao intervalo de 1944-2004, o período de ~25 anos esta entre o intervalo de ~1870-1970, e o período de ~33 anos esta entre o intervalo de 1950-2004.

A Figura 4.23 apresenta o espectro cruzado de ondeleta de Morlet entre as séries do índice geomagnético *aa* e a espessura dos anéis de árvores de Severiano de Almeida, para os períodos variando de 2 a 66 anos. As regiões de confianças apresentadas são: o período próximo a 5, 12, 17 anos. O período de ~5 anos está entre o intervalo de 1970-1990, o período ~12 anos esta nos intervalos de 1880-1930 e 1965-2000, e o período ~17 anos esta entre 1965-1995.

Da análise das Figuras 4.22 e 4.23, vemos que o índice *aa* esta exercendo uma influência nas séries cronológicas principalmente com periodicidades relacionadas a atividade solar,

nos períodos de 12 e 22 anos. Uma hipótese para esta influência é que: com maior atividade solar maior a atividade geomagnética, e quanto maior ela é, maior será a blindagem magnética, interferindo assim no fluxo de raios cósmicos que alcança as camadas mais baixas da atmosfera, alterando assim a cobertura de nuvens. Pode-se ver uma forte similaridade com o espectro de ondeleta do número de manchas solares para os períodos relacionadas ao ciclo de Schwabe (11 anos), já que a atividade solar influencia a atividade geomagnética por meio do campo magnético solar. Além do ciclo acima, o índice aa apresenta alguns eventos esporádicos de curtos períodos, que provavelmente estão relacionados sua maior variabilidade causada por diferentes tipos de atividade magnética solar, por exemplo, os buracos coronais e CMEs (Prestes, 2002).

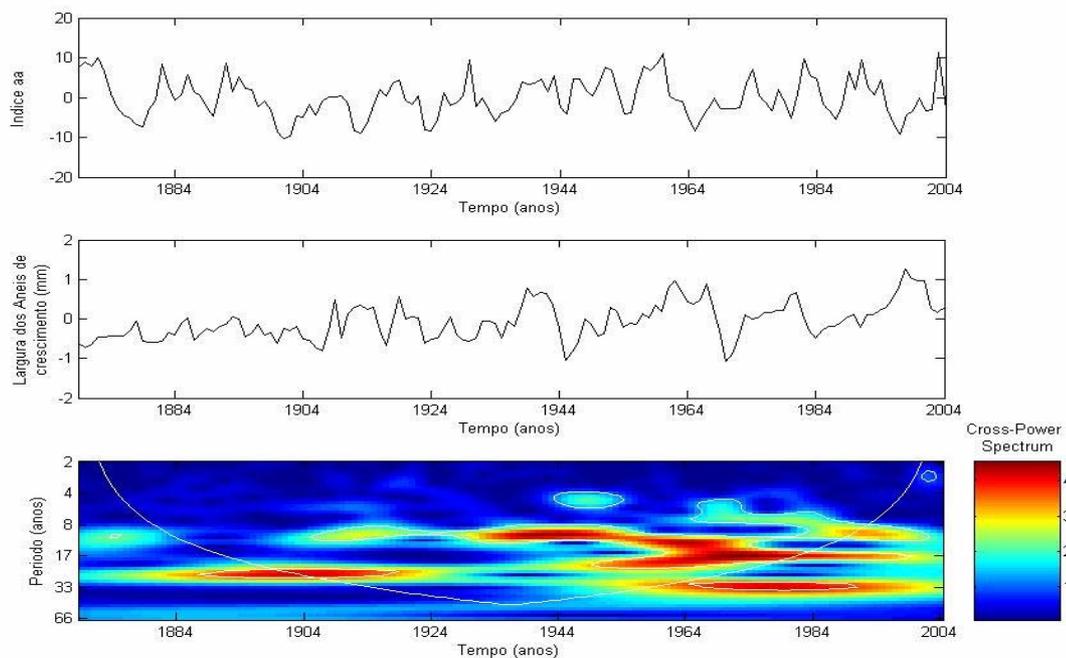


Figura 4.22: Espectro de potência cruzado entre o índice geomagnético aa e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

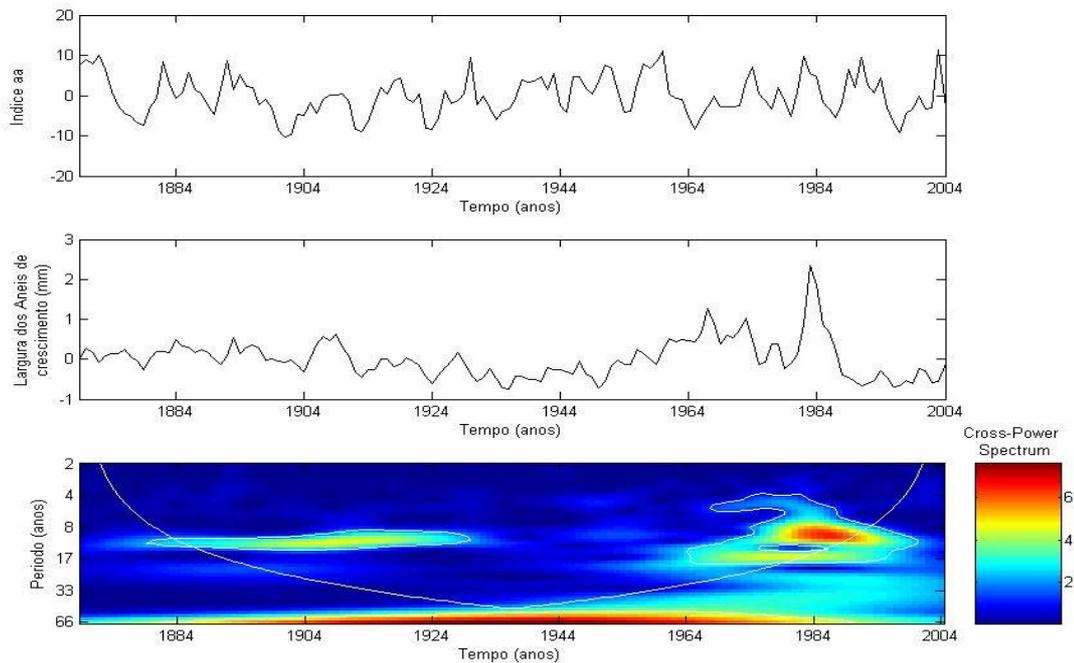


Figura 4.23: Espectro de potência cruzado entre o índice geomagnético aa e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

A Figura 4.24 apresenta o espectro cruzado de ondeleta de Morlet entre as séries da anomalia da temperatura entre 24° e 44° sul e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, para os períodos variando de 2 a 66 anos. As regiões de confiança apresentadas são: curtas periodicidades entre 2 a 8 anos, o período próximo a 12 e 22 anos. As curtas periodicidades entre 2 a 8 anos estão presentes entre o intervalo de ~1910-1935. Pode-se observar neste intervalo que quanto mais alta a temperatura, mais largo é o anel de crescimento e quanto mais baixa a temperatura mais estreito ele é. Vemos a influência da temperatura no crescimento da árvores observando o comportamento em 1917, quando a temperatura apresentou seu menor valor. O período ~12 anos aparece entre os anos de 1944-1974 e 1965-2000, e o período ~22 anos esta presente em todo o intervalo, 1880-2004. Vários trabalhos têm mostrado que as periodicidades em torno de 11, 22 e 90

anos encontradas em séries de temperatura estão relacionadas a atividade solar (Raspopov et al., 2004).

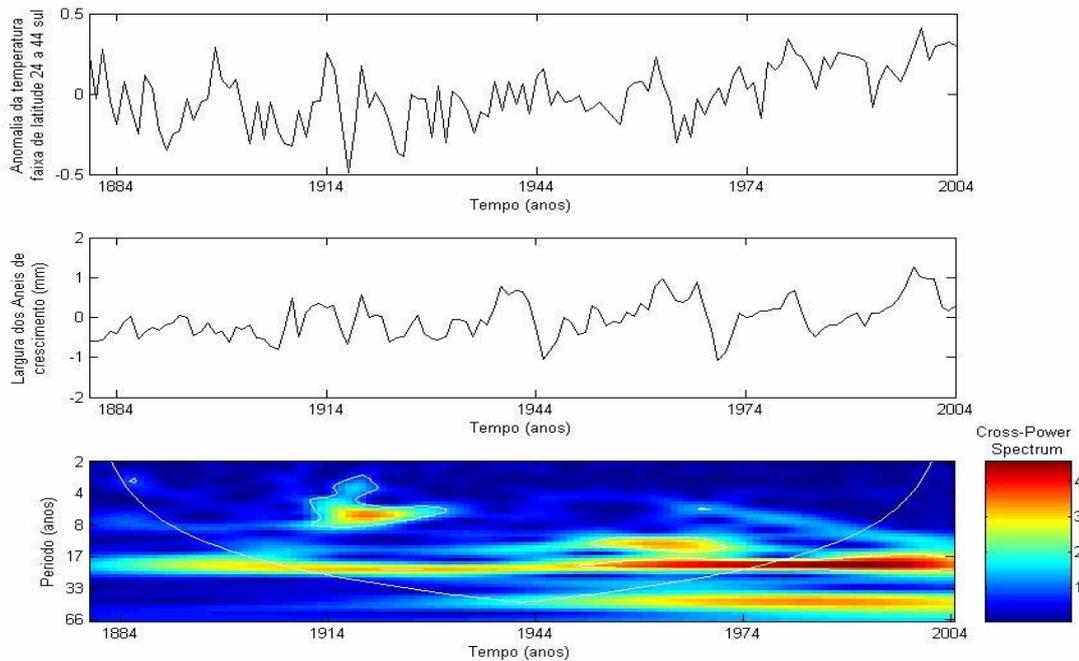


Figura 4.24: Espectro de potência cruzado entre a anomalia da temperatura entre 24° e 44° sul e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

A Figura 4.25 apresenta o espectro cruzado entre as séries da anomalia da temperatura entre 24° e 44° sul e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida. As regiões de confiança presentes são: o período próximo a 5, 12, 22 anos. O período de ~5 anos está entre o intervalo de ~1920-1930, o período ~12 anos está no intervalo de 1970-1995, e o período ~22 anos está presente no intervalo, 1960-2004.

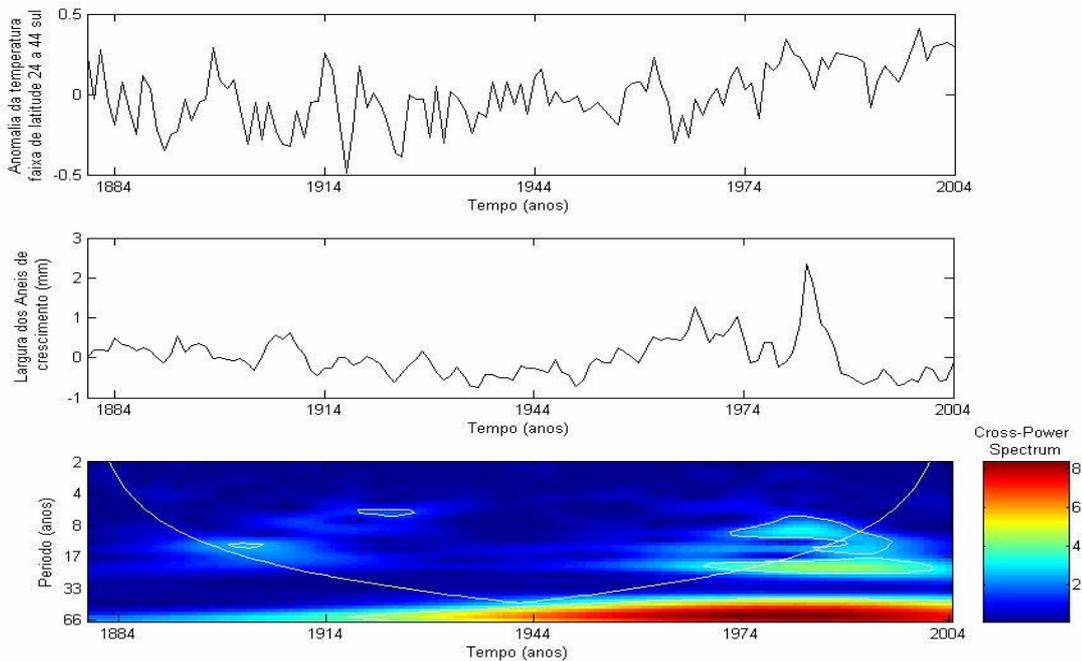


Figura 4.25: Espectro de potência cruzado entre a anomalia da temperatura entre 24° e 44° sul e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

A Figura 4.26 apresenta o espectro cruzado entre o índice SOI e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo. As regiões de confiança apresentadas são: os períodos esporádicos entre 3-9 anos e o período em torno de 17 anos. O período com maior amplitude entre 3-9 anos está entre o intervalo de ~1910-1925. O período ~17 anos está nos intervalos de 1935-1990.

Rigozo et al. [2003] estudando sinais do ENSO impressos em anéis de árvores do sul do Brasil por meio de ondeletas encontraram forte amplitude para períodos entre 2-8 anos que mostram ser não estacionários, alternando as periodicidades, estando presente em algum tempo e ausente em outros.

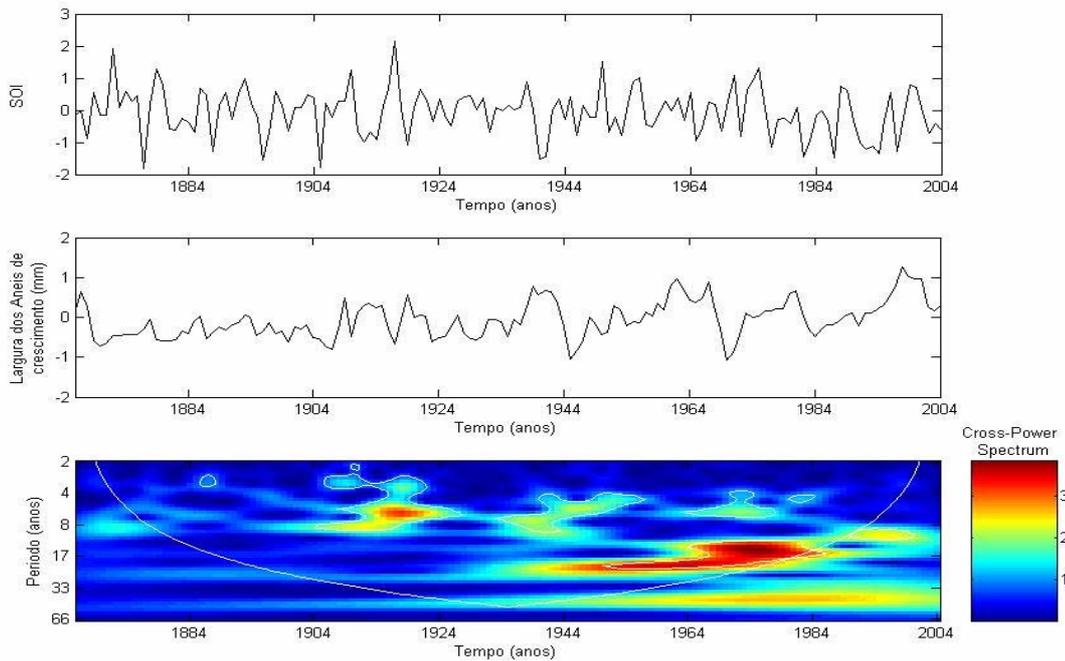


Figura 4.26: Espectro de potência cruzado entre o índice SOI e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Passo Fundo, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

A Figura 4.27 apresenta o espectro cruzado entre o índice SOI e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida. As regiões de confiança apresentadas são: dois períodos esporádicos entre 3-9 anos e o período em torno de 17 anos. Um período entre 3-9 anos está no intervalo de ~1905-1925 e outro entre 1970-1990. O período ~17 anos está nos intervalos de 1970-2000.

Com respeito ao índice SOI observou-se que, durante o período de 1982/1983 o sistema climático global exibiu possivelmente a maior variedade de extremos que qualquer outro período similar no século. Os desastres climáticos deste intervalo são exemplos das consequências do fenômeno de extensão global e magnitude histórica: o El Niño/Oscilação Sul (ENSO). As chuvas intensas, ocasionadas pelo fenômeno ENSO de 1982/1983 causaram enchentes em 270 municípios do Paraná, 199 em Santa Catarina e 191 no Rio Grande do Sul (Gasquez e Magalhães, 1987).

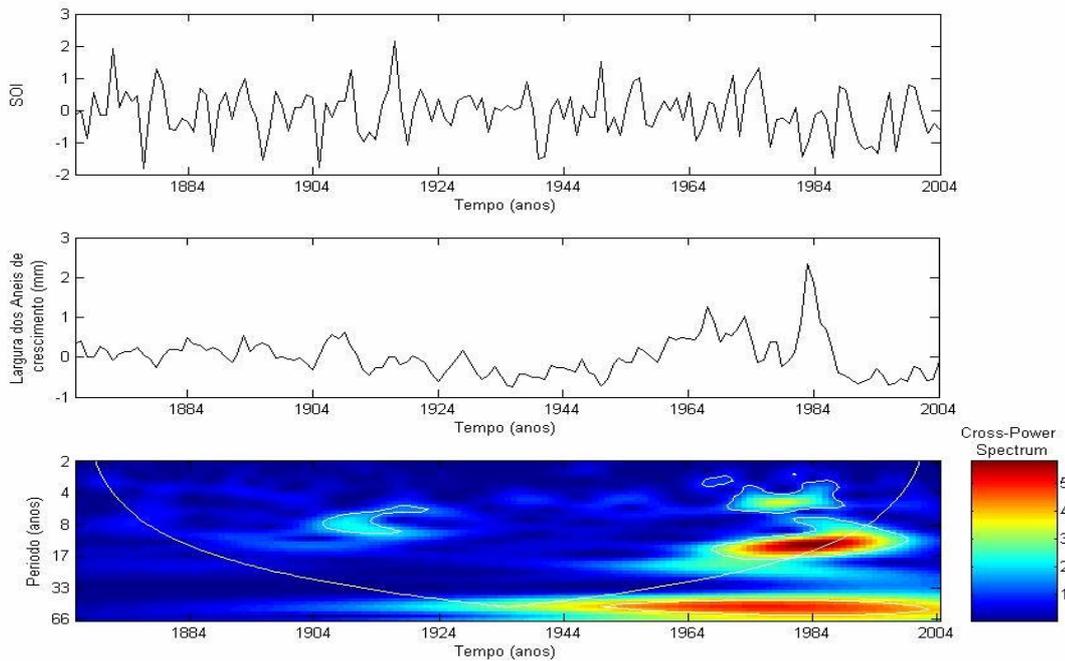


Figura 4.27: Espectro de potência cruzado entre o índice SOI e a série cronológica média dos anéis de crescimento de Severiano de Almeida, com o cone de influência (curva branca) e o nível de confiança de 95% (contorno branco).

Ropelewski e Halpert (1987) fizeram um trabalho de análise de impactos do ENSO para várias regiões do globo, e apesar de contarem com poucos dados observados no Sul do Brasil, seus resultados sugeriram que em anos de El Niño ocorre um excesso de precipitação, em relação à normal climatológica, a partir do mês de novembro do ano de surgimento do fenômeno e estendendo-se até o mês de fevereiro do ano seguinte ao seu surgimento.

Em um estudo similar ao anterior, Ropelewski e Halpert (1989) analisaram os impactos globais na precipitação nas fases frias do ENSO (La Niña). Alguns resultados desse trabalho mostram que esses anos tendem a apresentar uma queda na quantidade de precipitação inferior à normal climatológica no período que se estende de junho a dezembro do ano em que a fase fria ocorre. Rao & Hada (1990) e Studzinski (1995) mostraram que em anos de ENSO durante sua fase quente na Região Sul ocorre geralmente um excesso de

precipitação no sul do Brasil, norte da Argentina e Uruguai, e na fase fria do ENSO (La Niña), ocorre uma deficiência de precipitação.

Grimm et al. (1998) realizaram estudos similares àqueles de Ropelewski e Halpert (1987, 1989), porém usando um conjunto amplo de dados de precipitação (250 estações) sobre a Região Sul do Brasil. Esse estudo reforçou a evidência da relação do excesso de precipitação nesta região com o fenômeno El Niño. Em várias localidades do Sul do Brasil os efeitos devido ao fenômeno El Niño começam a ser notados em várias sub-regiões a partir da primavera do ano do fenômeno e que, em geral, o Sul do Brasil apresenta um forte e consistente padrão de anomalias de precipitação associados aos extremos de ENSO, mais forte do que na Argentina e no Uruguai (Pezzi, 2000).

Embora seja evidente a relação do ENSO com a precipitação na região sul, uma parcela significativa dos picos de anomalias não está aparentemente relacionada com o fenômeno (Studzinski, 1995).

Observa-se nos espectros de ondeleta cruzada das cronologias de Passo Fundo e Severiano de Almeida com as séries da anomalia de temperatura e do SOI, que para o intervalo de ~1900-1930 tanto a temperatura quanto o SOI estão influenciando nas cronologias nos períodos entre 2-8 anos. Coincidentemente, este é o intervalo de maior amplitude para o período tanto da temperatura quanto do SOI. Com base nos resultados obtidos dos espectros cruzados, conclui-se que os curtos períodos encontrados nas séries cronológicas dos anéis de crescimento de Passo Fundo e Severiano de Almeida são devidos a temperatura e ao SOI, principalmente quando estes apresentam grandes amplitudes, como observado no intervalo de ~1900-1930. Observa-se nas séries cronológicas de Passo Fundo e Severiano de Almeida que em 1982-1983 ambas as séries apresentam um pico, que corresponde aos anos em que houve a ocorrência de El-Niño, que acarretou chuvas intensas no Rio Grande do Sul. Também se observa claramente nos espectros cruzados das séries cronológicas de Passo Fundo e Severiano de Almeida com as séries da anomalia de temperatura e do SOI, que a cronologia de Passo Fundo está mais suscetível às influências da temperatura e do índice SOI. Provavelmente isto se deva a diferença de altitude e a fatores ambientais e ecológicos.

As hipóteses aceitáveis neste trabalho para uma possível relação Sol/clima são: uma é através da variação da irradiância total do Sol, levando a mudanças no estoque de radiação planetária, e a variações no clima regional e global (Lean et al., 1995; Reid, 1997), a outra é através das variações associadas ao campo magnético solar, que deve influenciar o clima da terra, através da modulação dos raios cósmicos galácticos e sua influência sobre a cobertura de nuvens [Pudovkin and Veretenenko,1995; Pudovkin and Raspopov,1992; Svensmark and Friis-Christensen, 1997]. Tanto a radiação solar quanto a intensidade dos raios cósmicos são modulados pela atividade solar [Hoyt and Schatten, 1997; Reid, 1997; Svenmarks and Friss-Christensen, 1997], que podem influenciar o clima terrestre, induzindo variações na temperatura e na cobertura de nuvens, que por sua vez podem influenciar o clima da região onde as árvores crescem, através da variação da temperatura da superfície, na precipitação e na radiação solar [Svenmarks and Friss-Christensen, 1997; Haigh, 1999].

4.2.2.3 Análise de Ondeleta das Amostras de Árvores Petrificadas

Os registros da largura dos anéis das amostras petrificadas foram analisados pelo método da ondeleta, para ver as mudanças dinâmicas dos períodos e amplitudes encontrados pela análise harmônica.

No mapa de ondeleta da amostra AEI da Figura 4.28 observa-se que as periodicidades dominantes estão relacionadas ao ciclo de 11, 22 e 33 anos, e também há ocorrências esporádicas de curtos períodos. No mapa de ondeleta da amostra AEII observam-se periodicidades relacionadas ao ciclo de 11, 22 e 33 anos, e em um curto intervalo há ocorrência de um curto período ~5 anos.

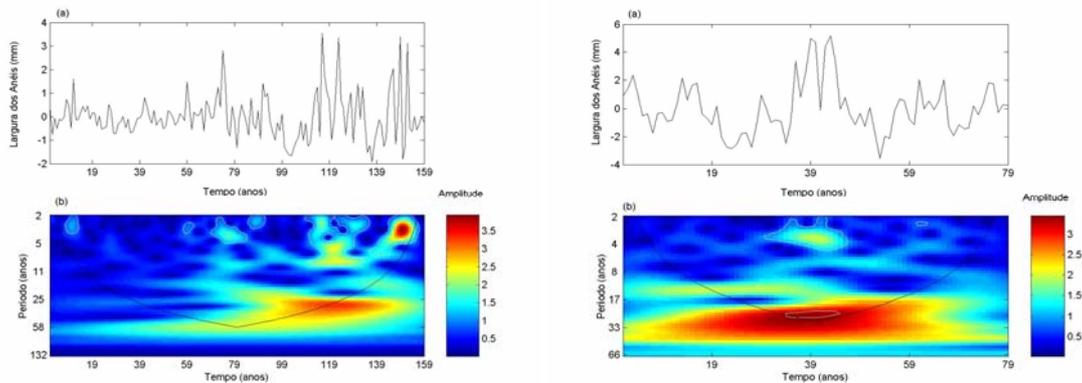


Figura 4.28: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras AEI (painel esquerdo) AEII (painel direito).

No mapa de ondeleta da amostra AEIII da Figura 4.29 observa-se que as periodicidades dominantes estão relacionadas ao ciclo de 11, 22 e 33 anos, e também há ocorrência de intermitente de curtos períodos. Já no mapa de ondeleta da amostra AEIV observa-se que as periodicidades dominantes estão relacionadas ao ciclo de 11 anos e também há um período de 5 anos que esta presente em todo o intervalo, além de ocorrências esporádicas de períodos mais curtos.

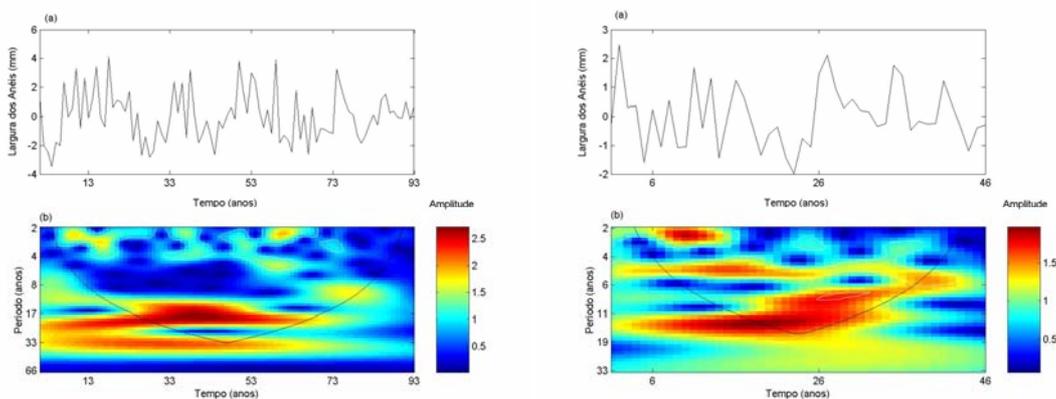


Figura 4.29: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras AEIII (painel esquerdo) AEIV (painel direito).

No mapa de ondeleta da amostra AEV da Figura 4.30 observa-se que as periodicidades dominantes estão relacionadas ao ciclo de 11 e 22 anos, e também há ocorrência de

intermitente de curtos períodos. Já no mapa de ondeleta da amostra AEVI observa-se que as periodicidades dominantes estão relacionadas ao ciclo de 11 anos e também há um período de 5 anos, além de ocorrências esporádicas de períodos mais curtos.

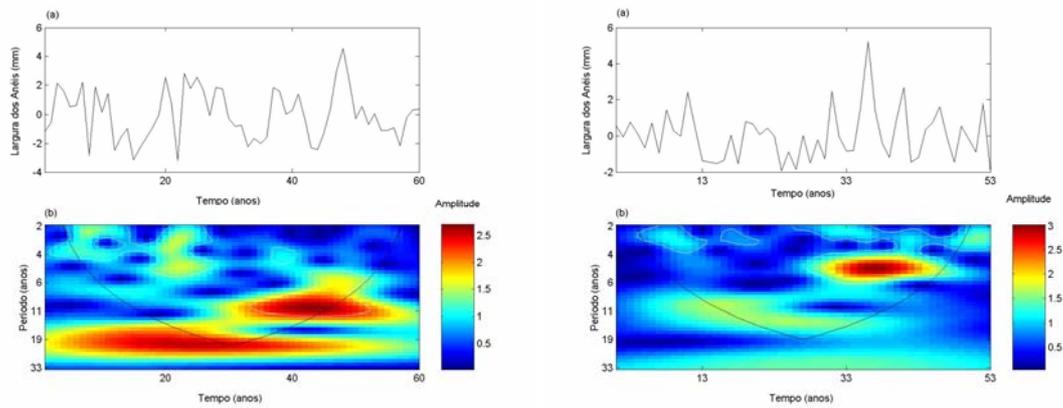


Figura 4.30: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras AEV (painel esquerdo) AEVI (painel direito).

No mapa de ondeleta da amostra BRII da Figura 4.31 observa-se a periodicidade relacionada ao ciclo de 11 anos, e também há ocorrência de curtos períodos. No mapa de ondeleta da amostra BRI observa-se periodicidades relacionadas ao ciclo de 11 e 22 anos e também há um período de 5 anos, além de ocorrências esporádicas de períodos mais curtos.

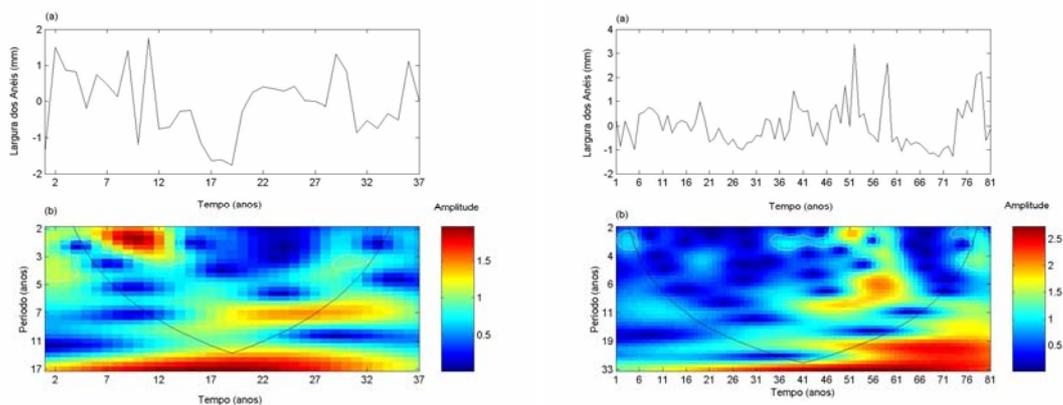


Figura 4.31: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras BRII (painel esquerdo) BRI (painel direito).

No mapa de ondeleta da amostra SPSa325 da Figura 4.32 observa-se a periodicidade relacionada ao ciclo de 11 anos, períodos em ~ 18 anos, além da ocorrência de curtos períodos em curtos intervalos da série. No mapa de ondeleta da amostra SPSr2 observa-se principalmente períodos entre ~ 11 a 22 anos.

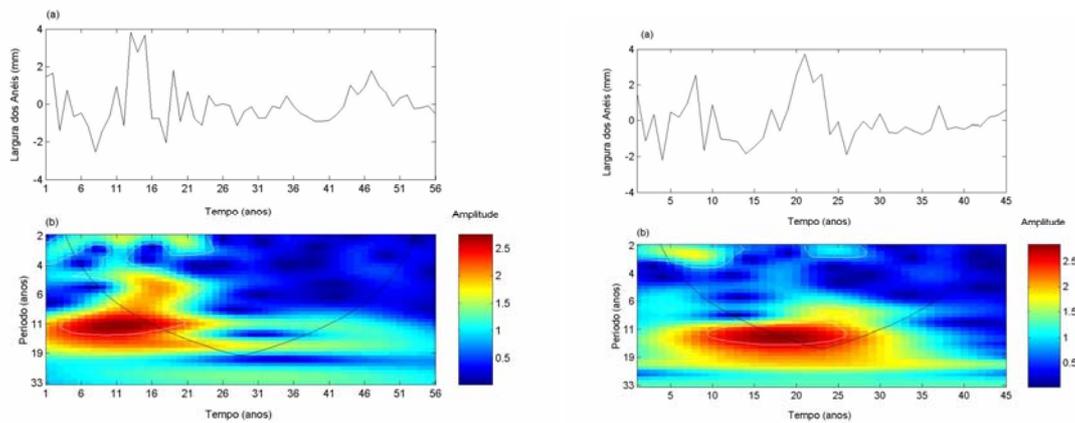


Figura 4.32: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras SPSa325 (painel esquerdo) SPSr2 (painel direito).

O mapa de ondeleta da amostra SPSb da Figura 4.33 mostra a periodicidade em torno de 11 e 20 anos, e também alguns curtos períodos. No mapa de ondeleta da amostra SPSp observa-se principalmente períodos entre ~ 20 a 40 anos, e também períodos em ~ 10 anos.

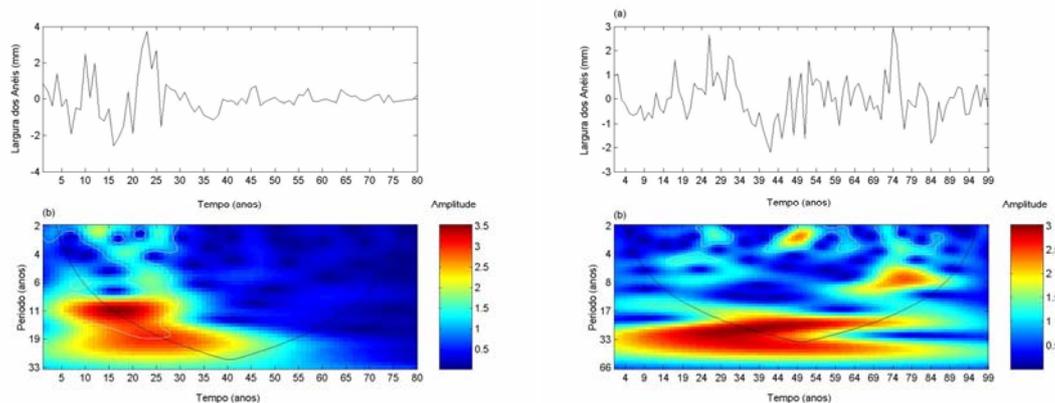


Figura 4.33: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras SPSb (painel esquerdo) SPSp (painel direito).

O mapa de ondeleta da amostra MataCap da Figura 4.34 mostra um período predominantemente próximo a 11 anos, e também curtos períodos em torno de 3-5 anos. No mapa de ondeleta da amostra Mata M1 observam-se principalmente curtos períodos entre 2-5 anos, e também períodos em ~11 anos.

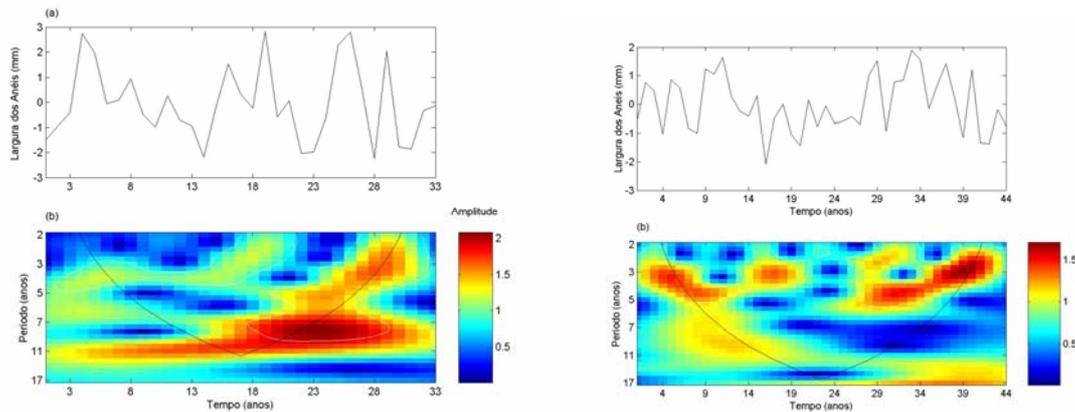


Figura 4.34: Espectros de ondeletas das séries cronológicas das amostras MataCap (painel esquerdo) Mata M1 (painel direito).

O mapa de ondeleta da amostra Mata M2 da Figura 4.35 mostra um período próximo a 11 anos, e também curtos períodos em torno de 2-5 anos.

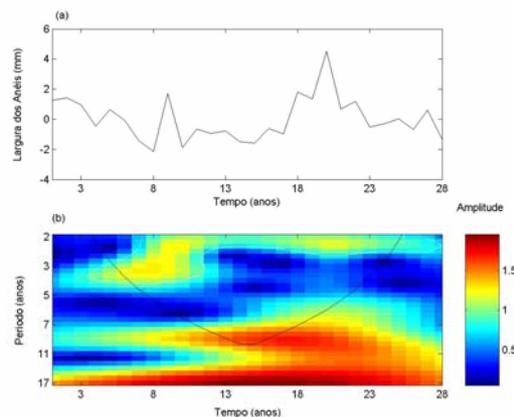


Figura 4.35: Espectro de ondeleta da série cronológica da amostra Mata M2

Pode-se observar nos mapas de ondeletas das séries cronológicas das amostras petrificadas, mostrados nas Figuras 4.28 a 4.35, a ciclicidade dos curtos períodos relacionados a eventos climáticos, provavelmente relacionados a umidade (Bolzon, 1993), os períodos relacionados com a atividade solar, períodos em torno de 11, 22 anos, períodos ~18 anos relacionados ao ciclo lunar de Saros, e os períodos relacionados com o ciclo climático de Bruckner em torno de ~30-35. Observa-se que todos os períodos encontrados na análise harmônica são encontrados aqui, e que em muitos casos eles não são constantes no tempo.

Desses resultados podemos ver uma possível influência da atividade solar nas séries cronológicas dos anéis de crescimento das amostras fósseis, semelhantemente a aquelas apresentadas nas séries cronológicas do presente.

4.3 Semelhanças e Diferenças das Amostras de Araucárias do Passado Recente e do Passado Distante

Com base na análise espectral harmônica e por ondeletas, obteve-se as constituições espectrais das séries cronológicas das amostras de araucárias e das amostras petrificadas. Com isto, efetuou-se uma comparação hipotética das semelhanças e diferenças entre as periodicidades da atividade cambial das amostras relacionadas com os eventos climáticos e solares, ou seja, correlacioná-las com suas possíveis causas.

Observando-se os espectros da análise harmônica e por ondeletas, bem como, os histogramas das séries cronológicas das amostras do presente e do passado, nota-se que ambas apresentam periodicidades semelhantes com relação aos períodos da atividade solar do presente e também apresentam forte influência das condições climáticas, provavelmente da temperatura e da precipitação, respectivamente.

Os espectros de ondeletas cruzados do número de manchas solares e os anéis de crescimento de Passo Fundo e Severiano de Almeida apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21, respectivamente, mostram a forte relação entre a atividade solar e crescimento das árvores para os períodos de ~11 e ~90 anos. Isto representa uma possível resposta da variação dos anéis de crescimento para épocas em que a atividade solar é máxima.

Os fatores climáticos e as condições ambientais locais representam uma maior influência no crescimento dos anéis de árvores (Fritts, 1976) e, que qualquer influência solar, a partir das variações de sua irradiação, deva ser menor. No entanto, há confirmações de que variações nas espessuras dos anéis de crescimento são atribuídas, em parte, à atividade solar. Essas confirmações também são baseadas em estudos feitos em outras séries de anéis de crescimento, obtidas a partir de outras espécies de árvores em locais com contrastes no clima, como visto no decorrer do texto (Murphy, 1990 e 1991; Schimel, 1995; Roig et al., 2001; Raspopov et al., 2004; entre outros), e também há evidências convincentes e independentes das influências das periodicidades solar em séries temporais das espessuras dos anéis de árvores que são obtidas pelas variações nos longos registros do ^{14}C (Stuiver e Quay, 1980; Damon et al., 1998; Raspopov et al., 2001).

Das considerações, parece não haver diferenças consistentes entre os espectros dos anéis de crescimento de árvores fósseis e dos espectros dos anéis de árvores modernas, observados neste trabalho. Se os ciclos estão relacionados a atividade solar, parece que, com base nestas gravações da atividade nos anéis de árvores, ciclos similares ocorreram há 200 milhões de anos atrás.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Das periodicidades nas cronologias dos anéis de crescimento e suas possíveis causas

As séries temporais das espessuras dos anéis de árvores de Passo Fundo (RS) e Severiano de Almeida (RS), cobrindo intervalos de tempo de 1741-2004 e 1646-2004, respectivamente, e as séries geofísicas e climatológicas foram estudadas pela análise espectral clássica, ondeleta e ondeleta-cruzada, permitindo identificar as características não estacionárias das periodicidades em cada série e assim compará-las. Foram achadas fortes evidências da influência dos ciclos solares de Schwabe (~11anos), de Hale (~22anos) e de Gleissberg (~80-90 anos), que apresentaram grande variabilidade no tempo, nas séries cronológicas. O ciclo solar de 11 anos está presente nos anéis de árvores principalmente durante as épocas de atividade solar mais intensa, para os intervalos de 1764 a 1804, 1824 a 1884 e 1924 a 1984. Os mapas de ondeleta-cruzada entre as séries temporais do número de manchas solares e das espessuras dos anéis de árvores apresentaram os mesmos resultados, para os ciclos solares de 11 e 80-90 anos encontrados nos mapas de ondeleta-amplitude dos anéis de árvores. Os curtos períodos (2-8 anos) encontrados nas análises são devidos, principalmente, a variações de grande amplitude da temperatura e dos eventos El-Niño, como evidenciado no intervalo de ~1900-1930. Os ciclos de ~18 anos (ciclo Lunar de Saros) e ~30-35 anos (ciclo climático de Bruckner) podem ser resultantes da frequência combinatória do ciclo de Gleissberg e do ciclo de Hale, resultado de efeitos não lineares da atividade solar em processos na atmosfera. O período de ~50 anos pode estar relacionado ao quarto harmônico do ciclo de Suess ou como sendo o segundo harmônico do ciclo de 90 anos.

As séries cronológicas das amostras petrificadas apresentam ciclos similares aos apresentados pelas séries cronológicas do presente. Ciclos de curtos períodos possivelmente relacionados a eventos climáticos, provavelmente relacionados a umidade, períodos em torno de 11 e 22 anos relacionados com a atividade solar, período ~18 anos relacionado ao ciclo lunar de Saros, e o período relacionado com o ciclo climático de Bruckner em torno de ~30-35 anos. Todos os períodos encontrados na análise espectral clássica também foram

encontrados na análise ondeleta, onde fica evidente que eles não são constantes no tempo, como observado nos mapas de ondeleta das séries mostrados nas Figuras 4.28 a 4.35,

Considerações Gerais

Os resultados obtidos neste trabalho nos permitem concluir que:

Cronologias de anéis de crescimento de árvore de amostras recentes do Rio Grande do Sul apresentam em seu espectro de potência períodos que correspondentes ao ciclo solar de 11 anos. Nós interpretamos esse sinal como significando uma modulação pela variabilidade solar do clima local onde as árvores cresceram. As séries também apresentaram em seus espectros vários outros períodos relacionados à fenômenos climáticos e outros ciclos de atividade solar. No entanto, a análise por ondeletas nos informa que estas periodicidades não são estacionárias.

Cronologias de anéis de crescimento de árvore de amostras petrificadas do Rio Grande do Sul do período triássico (~200 milhões de anos atrás) também apresentam em seu espectro de potência, períodos correspondentes ao ciclo solar de 11 anos. Das semelhanças com as amostras recentes, inferimos destes resultados:

- A existência de um ciclo solar de ~11 anos no período triássico.
- A existência de uma influência da atividade solar sobre o clima terrestre naquele período.
- Além dos períodos de ~11 anos, as amostras do triássico também apresentaram em seus espectros vários outros períodos possivelmente relacionados à fenômenos climáticos e outros ciclos de atividade solar. A análise por ondeletas nos informou que estas periodicidades não são estacionárias.

Dos espectros da análise harmônica e ondeletas, bem como, os histogramas das séries cronológicas das amostras do presente e do passado, observa-se que ambas apresentam periodicidades semelhantes com relação aos períodos da atividade solar do presente e também apresentam forte influência das condições climáticas.

Parece não haver diferenças significantes entre os espectros dos anéis de crescimento de árvores fósseis e dos espectros dos anéis de árvores modernas observadas neste. Com base

nos registros da atividade solar nos anéis de árvores, ciclos similares ocorreram à 200 milhões de anos, ou seja, o Sol apresentou as mesmas características básicas observadas no presente há 200 milhões de anos atrás.

Trabalhos Futuros

Para a complementação deste trabalho pretende-se fazer:

O calculo da fase entre a atividade solar e as séries cronológicas dos anéis de crescimento para verificar se a atividade solar influencia diretamente o crescimento.

Correlacionar as séries cronológicas com outros dados climatológicos como precipitação, dados do nível do rio Paraná, etc. Também, verificar se a oscilação quase-bianual (QBO) exerce influência sobre o crescimento das árvores.

Verificar a influência do oceano atlântico nos anéis de crescimento.

Estudar as periodicidades encontradas em anéis de crescimento de árvores e suas possíveis causas em diferentes latitudes e longitudes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, A.C.B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios-X em madeira**. 1994, 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

AMMONS, R.; AMMONS, A.; AMMONS, R. B. Solar activity-related quasi-cycles in tertiary tree-ring records: evidence and methodological studies. In: McCormac, B.M. (Ed.), **Weather and climate responses to solar variations**. Colorado: Associated Univ. Press, 1983. p. 535-543.

ATTOLINI, M. R.; CECCHINI, S.; GALLI, M.; MOCHAROV, G. E.; NANNI, T., 400 year record of $\Delta^{14}\text{C}$ in tree rings: the solar activity cycle before, during and after the Maunder Minimum and longer cycles. **II Nuovo Cimento**, v.16, n.4, p.419-436, 1993.

AYOADE, J. O., **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil. Gênero: Geografia do Brasil, 1998. 332 p.

BEER, J.; OESCHGER, H.; FINKEL, R. C.; CASTAGNOLI, G. C.; BONINI, G.; ATTOLINI, M. R.; GALLI, M., Accelerator measurements of ^{10}Be : The 11 year solar cycle from 1180-1800 A.D. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, B10/11, 415-418, 1985.

BOLZON, R.T. **A lignitafloora mesozóica do Rio Grande do Sul (Brasil): métodos de estudo e considerações sobre tafonomia, paleoecologia e paleoclimatologia**. Dissertação do Curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 142p, 1993.

BUCHA, V. Influence of the earth's magnetic field on radiocarbon dating. In: OLSSON, I.U. (Ed). **Radiocarbon variations and absolute chronology**. Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1970. p.501-510.

BUCHA, V.; BUCHA JR., V., Geomagnetic forcing of changes in climate and in the atmospheric circulation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n.2, p. 145-169, 1998.

CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA - CENA/USP. Laboratório de ^{14}C , **Técnicas e aplicações em estudos paleoambientais**. Disponível em <http://www.cena.usp.br/labs/labc14.htm>. Acesso em: 30 maio 2005.

CLÚA DE GONZALEZ, A. L.; GONZALEZ, W. D.; DUTRA, S. L. G.; TSURUTANI, B. T., Periodic Variation in the Geomagnetic Activity: A Study Based on the A_p Index. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A6, p. 9215-9231, 1993.

COURTILLOT, V., LE MOUEL, J. L., AND MAYAUD, P. N., Maximum entropy spectral analysis of the geomagnetic activity index aa over a 107-year interval, **Journal of Geophysical Research**, v. 82, p. 2641, 1977.

CRAIG, H. Carbon-13 variations in sequoia rings and the atmosphere. **Science**, v.119, p.141-143, 1954.

CROWLEY, T. J., Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. **Science**, v.289, p.270-277, 2000.

CURRIE, R. G., Geomagnetic line spectra - 2 to 70 years, **Astrophysics and Space Science**, v.21, p.425-438, 1973.

DAMON, P. E.; EASTONE, C. J.; HUGHES, M. K.; KALIN, R. M.; LONG, A.; PERISTYGH, A. N., Secular variation of $\Delta^{14}\text{C}$ during the medieval solar maximum: a progress report. **Radiocarbon**, v.40, n.1, p.343-350, 1998.

DERGACHEV, V.A., RASPOPOV, O.M., The long-term solar cyclicity (210 and 90 years) and variation of the global terrestrial air temperatures since 1868. In: SOLAR & SPACE WEATHER EUROCONFERENCE, THE SOLAR CYCLE AND TERRESTRIAL CLIMATE, 1., 2000, Santa Cruz de Tenerife. **Proceedings...** Santa Cruz de Tenerife: [s.n], 2000.

DUTRA, T. L. E STRANZ, A. The history of Araucariaceae: a new antartic approach and its fossil record. In: SOUTHERN CONNECTION CONGRESS, 3, 2000, Christchurch, New Zealand. **Programme and Abstracts..** New Zealand: Wickliffe Press Ltd., 1: 84. 2000.

DUTRA, T. L.; BOARDMAN, D. R.; SOUZA-LIMA, W. **Os vegetais:** as gimnospermas. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix. Disponível em: <http://www.infonet.com.br/phoenix/>, ano 4, n. 46, 2002.

EDDY, J. A., The Maunder minimum. **Science**, v.192, p. 1189-1192, 1976.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Cultivo do Pinheiro do Paraná.** Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinheiro-do-Parana/CultivodoPinheirodoParana/sistema/index.htm>. Acesso em: 12 dezembro 2002.

ENRIGHT, N. J. AND HILL, R. S. **Ecology of the southern conifers.** Washington: Smithsonian Institution Press, 342p, 1995.

FARGE, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v.24, p.395–457, 1992a.

FRANCIS, J.E., POOLE, I. Cretaceous and Tertiary climates of Antarctica: evidence from fossil wood. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.182, p.47–64, 2002.

FRIIS-CHRISTENSEN, E. E LASSEN, K., Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. **Science**, v. 254, p. 698-700, 1991.

FRITTS, H.C. **Tree rings and climate.** London: Academic Press, 1976.

FRITTS, H. C., **Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data.** Arizona: The University of Arizona Press, 1991.

FRÖLICH, C.; LEAN, J., The Sun's Total Irradiance Cycles, Trends And Related Climate Change Uncertainties Since 1976, **Geophysical Research Letter**. v.97, p.7579–7591, 1998.

FYE, F. K., CLEAVELAND, M. K., Paleoclimatic analyses of tree-ring reconstructed summer drought in the United States, 1700-1978. **Tree-Ring Research**, v. 57, n.1, p.31-34. 2001.

GASQUEZ, M.; MAGALHÃES, A.R. **Climate anomalies and their impacts in Brazil during the 1982-1983 ENSO event**. Climate Crisis UNEP e NCAR, Report, Lugano, 1987 cap. 5, p 30-36, 1987.

GUERRA-SOMMER, M., GAMERNANN, N. Mineralogia de troncos fósseis da região de São Pedro do Sul, Triássico, Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA. **Série Geologia**. Rio de Janeiro: DNPM, v.27, n.2, 597-603p, 1985.

GUERRA-SOMMER, M.; SCHERER, C.M.S. Sítios Paleobotânicos do Arenito Mata nos Municípios de Mata e São Pedro do Sul, RS. In: Schobbenhaus,C.; Campos,D.A.; Queiroz,E.T.; Winge,M.; Berbert-Born,M. (Edit.) **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio009/sitio009.htm>, 1999.

GUERRA-SOMMER, M; CAZZULO-KLEPZIG, M; BOLZON, R. T; ALVES, L. S. R. & IANNUZZI, R. As floras Triássicas do Rio Grande do Sul: Flora *Dicroidium* e Flora *Araucarioxylon*. In: Holz, M. ; De Ros, L. F.(eds.), **Paleontologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: [s.n], 2000. p. 85-106.

GRIMM, A. M., SET FERRAZ; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with *El Niño* and *La Niña* events. **Journal Climate**, v.11, p.2863-2880, 1998.

GRIMM, A. M., SANT'ANNA, SILVA, C. L. Influência de fases extremas da oscilação sul sobre a intensidade e frequência das chuvas no Sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA - CL00093,11., 2000. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2000.

GRISSINO-MAYER, H. D. **Henri D. Grissino-Mayer's ultimate tree-ring web pages.**

Disponível em: <http://web.utk.edu/~grissino/>. Acesso em: 28 junho 2006.

HAIGH, J. D. Modelling the impact of solar variability on climate, **Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.61, p.63-72, 1999.

HERMAN, J. R. E GOLDBERG, R. A. **Sun, weather, and climate.** Washington: Scientific and Technical Information Branch, 1978. 360p. (NASA SP-426).

HOYT, D. V. E SCHATTEN, K. H. **The role of sun in climate change.** Oxford: University Press, 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change**, 1995.

JOLY, A. B. **Botânica, introdução à taxonomia vegetal.** 50. ed. São Paulo: Editora Nacional, 1979. 777 p.

JONG, A.F.M. DE; MOOK, W.G. Medium-term atmospheric ¹⁴C variations. **Radiocarbon**, v.22, p.267-272, 1980.

JUCKETT, D. A. Period and phase comparisons of near-decadal oscillations in solar, geomagnetic, and cosmic ray time series. **Journal of Geophysical Research**. v. 106, n. A9, p. 18651-18665, 2001.

KEQIAN, Z.; BUTLER, C. J., A statistical study of the relationship between the solar cycle length and tree-ring index values. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.60, p.1711-1718, 1998.

KISHCHA, P. V.; DMITRIEVA, I. V.; OBRIDKO, V. N. Long-term variations of the Solar-geomagnetic correlation, total Solar irradiance, and northern hemispheric temperature (1868-1997). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.61, p. 799-808, 1999.

- KIVELSON, M.G., RUSSELL, C. T. **Introduction to space physics**. Los Angeles: University of California, Ed. Cambridge University Press, 1995.
- KOCHAROV, G. E.; OSTRYAKOV, V. M.; PERISTYKH, A. N.; VASIL'EV, V. A., Radiocarbon content variations and Maunder minimum of solar activity. **Solar Physics**, v.159, p.381-391, 1995.
- KUMAGAI, H.; SWEDA, T.; HAYASHI, K.; KOJIMA, S.; BASINGER, J. F.; SHIBUYA, M.; FUKAOA, Y.; Growth-ring analysis of Early Tertiary conifer woods from the Canadian high Arctic and its paleoclimatic interpretation. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.116, p.247-262, 1995.
- KURTHS, J.; SPIERING, C.; MÜLLER-STOLL, W.; STRIEGLER, U., Search for solar periodicities in Miocene tree ring widths. **Terra Nova**, v.5, p.359-363, 1993.
- LAU, K. M. AND WENG, H. Y., Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.76, p.2391-2402, 1995.
- LEAN, J. Variations in the Sun's radiative output. **Reviews of Geophysics**, v.29, n.4, 505-535, 1991.
- LEAN, J. AND RIND, D. Solar variability: implications for global change. **EOS**, v.75, p.1-7, 1994.
- LEAN, J.; BEER, J.; BRADLEY, R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 23, p. 3195-3198, 1995.
- LEAVITT, S.W. Isotopes and trace elements in tree rings. In: INTERNATIONAL DENDROCHRONOLOGICAL SYMPOSIUM. 1990, Ystad. **Proceedings...** Ystad: [s.n.], 1990. p.182-190.

LISI, C. S., **Atividade de ^{14}C do fallout e razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ em anéis de crescimento de árvores de clima tropical e subtropical do Brasil.** Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 92 p. 2000.

LUCKMAN, B. H., Using multiple high-resolution proxy climate records to reconstruct natural climate variability: An example from the Canadian Rockies. In: BENISTON, M. (ed.), **Mountain environments in changing climates.** London: Routledge, 1994. p. 42-59.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P. **Fichas de características das madeiras brasileiras.** São Paulo: IPT, 1989.

MAYAUD, P.N. **Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices.** Washington: American Geophysical Union, 1980, Geophysical Monograph 22.

MATTOS, J.R. **O pinheiro brasileiro.** São Paulo: Grêmio Politécnico, 620p 1972.

MCHARGUE, L. R.; DAMON, P. E., The global beryllium 10 cycle. **Reviews of Geophysics**, v.29, n.2, p.141-158, 1991.

MINELLO, L.F. **As florestas petrificadas da Região de São Pedro do Sul e Mata, RS: introdução ao estudo dos processos de fossilização e análise morfológica; legislação pertinente e análise do desenvolvimento da consciência preservacionista.** Porto Alegre: Curso de Pós Graduação em Geociências. Dissertação (Mestrado em Geociências) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 484p, 1993.

MITCHELL, J. M., An overview of climatic variability and its causal mechanisms. **Quaternary Research**, v.6, p.481-493, 1976.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura, 41p, 1961.

MORI, Y., Evidence of an 11-year periodicity in tree-rings series from Formosa related to the sunspot cycle. **Journal Climatology**, v.1, p.345-353, 1981.

MOTA, F. S.; BEIRSDORF, F.; GARCEZ, J. R. B. **Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina** - normais agroclimáticas. Pelotas: Ministério da Agricultura, 80p. (V.1, Circular, 50), 1971.

MURPHY, J. O., Australian tree ring chronologies a proxy data for solar variability. **Proceedings ASA**, v.8, n.3, p.292-297, 1990.

MURPHY, J. O., The downturn in solar activity during solar cycles 5 and 6. **Proceedings ASA**, v.9, n.2, p.330 -331, 1991.

MURPHY, J. O.; SAMPSON, H.; VEBLEN, T. T.; VILLALBE, R., Reconstruction of the annual variation in Zurich sunspot number from tree ring-index times series. **Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon**, p.853-869, May 1996. Arizona, International conference, 1996.

NESME-RIBES, E., FERREIRA, E. N., Solar dynamics and Its impact on solar irradiance and the terrestrial climate. **Journal of Geophysics Research**, v.98, n. A11, p. 18923-18935, 1993.

NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER - NGDC-NOAA: **satélite YOHKOH** – telescópio raios-X. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>. Acesso em: 24 maio 2005.

NIMER, E. Clima. In: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Geografia do Brasil: Região Sul**. Rio de Janeiro: 1990. p.151-187.

NORDEMANN, D. J. R., RIGOZO, N. R., ECHER, E., VIEIRA, L. E. A. Solar activity and El Niño effects on Southern Brazil Araucaria ring widths (1955-1997). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DENDROCHRONOLOGY, 6., 2002. Québec City. **Proceedings...** Québec: [s.n], 2002 (Poster).

NORDEMANN, D. J. R.; RIGOZO, N. R. Árvores contam uma história do sol. **Scientific American**, v. 2, n. 14, p. 30-37, 2003.

NORDEMANN, D. J. R.; ROGOZO, N. R., FARIA, H. H. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records. **Advences in Space Research**. v.35, p.891-896, 2005.

OGURTSOV, M. G.; KOCHAROV, G. E.; LINDHOLM, M.; MERILÄINEN, J.; ERONEN, M.; NAGOVITSYN, YU. A. Evidence of solar variation in tree-ring-based climate reconstructions. **Solar Physics**. v.205, p.403-417, 2002a.

OGURTSOV, M. G.; NAGOVITSYN, YU. A.; KOCHAROV, G. E.; JUNGER, H. Long-period cycles of the Sun's activity record in direct solar data and proxies. **Solar Physics**. v.211, p.371-394, 2002b.

OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e você: o fenômeno climático**. São José dos Campos: Transtec Editorial, 1971.

OLSSON, I.U. ^{14}C in extractives from wood. **Radiocarbon**, v.22, p.515-524, 1980.

OVERPECK, J. T., Paleoclimatology and climate system dynamics. **Reviews of Geophysics**. Vol. 33 Supplement, 1995.

PARKS, G. K. **Physics of space plasmas**. Washington: Addison-Wesley, 1991.

PEARMAN, G.I.; FRANCEY, R.J.; FRASER, P.J.B. Climate implications of stable carbon isotopes in tree rings. **Nature**, v.260, p.771-772, 1976.

PIRES, E. F.; *Sommerxylon spiralous n. gen. et. n. sp. no Mesozóico do Rio Grande do Sul*: significado taxonômico e paleoclimático. 165p, Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PERISTYKH, A. N.; Damon, P. Modulations of atmospheric ^{14}C concentrations by the solar wind and irradiance components of the Hale and Schwabe solar cycles. **Solar Physics**, v.177, p. 343-355, 1998.

PEZZI, L. P., UBARANA, V., REPELLI, C., Desempenho e Previsões de um Modelo Regional Estatístico para a Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira Geofísica**, v.18, n.2, 2000.

POOLE, I.; CANTRILL, D. AND UTESCHER, T. A multi-proxy approach to determine Antarctic terrestrial palaeoclimate during the Late Cretaceous and Early Tertiary. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.222, p. 95– 121, 2005.

PRESTES, A. **Estudo estatístico da variabilidade dos índices geomagnéticos e sua relação com o ciclo solar**. 2002. (INPE-15716-TDI/1473). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.04.03.34>>. Acesso em: 20 maio 2009.

PRESTES, A. ; RIGOZO, N. R.; ECHER, E.; VIEIRA, L. E. A. Spectral analysis of sunspot number and geomagnetic indices (1868 - 2001). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, p. 182-190, 2006.

PRIEST, E. R. **Solar magneto-hydrodynamics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1987. 369p. Geophysics and Astrophysics Monographs.

PUDOVKIN, M.I. AND RASPOPOV, O.M. The mechanism of solar activity impact on the state of the lower atmosphere and meteorological parameters. **Geomagnetism and Aeronomy**, v.32, n.5, p.593-608, 1992.

PUDOVKIN, M.I. AND VERETENENKO, S.V. Cloudiness decrease associated with Forbush-decrease of galactic cosmic rays. **Journal Geophysical Research**, v.57, p.1349-1355, 1995.

RAISBECK, G. M.; YIOU, F., Production of long-lived cosmogenic nuclei and their applications. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v.B5, n. 2, p. 91-99, 1984 .

RANGARAJAN, G. K. Indices of geomagnetic activity. In: JACOBS, J.A. (ed.).

Geomagnetism. London: Academic Press, v. 3, Cap. 5, 1989. p. 323-384.

RAO, V.B., HADA, K., Characteristics of Rainfall over Brazil: Annual Variations and Connections with the Southern Oscillations. **Theoretical and Applied Climatology**, v.42, p.81-91, 1990.

RASPOPOV, O.M.; SHUMILOV, O.I.; KASATKINA, E. A.; TURUNEN, E.; LINDHOLM, M. 35-Year climatic Bruckner Cycle – Solar control of climate variability? In: In: SOLAR & SPACE WEATHER EUROCONFERENCE, THE SOLAR CYCLE AND TERRESTRIAL CLIMATE, 1., 2000, Santa Cruz de Tenerife. **Proceedings...** Santa Cruz de Tenerife: [s.n], 2000.

RASPOPOV, O.M., DERGACHEV, V.A., SHUMILOV, O.I., KOLSTRÖM, T., LINDHOLM, M., MERILÄINEN, J., EGGERTSSON, Ó., VASILIEV, S.S., KUZMIN, A.V., YU KIRTSIDELY, I., KASATKINA, E.A. Dendrochronological evidence of long-term variations in solar activity and climate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE TREE RINGS AND PEOPLE, Davos. **Proceedings...** Davos: Kaennel Dobbertin M., Bräker O.U. (eds.), 2001

RASPOPOV, O.M., DERGACHEV, V.A., KOLSTRÖM, T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.209, p. 127–139, 2004.

REID, G. C., Solar variability and its implications for the human environment. **Jornal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v.61, p.3-14, 1999.

REID, G. C., Solar forcing of global climate change since the mid-17th century. **Climatic Change**, v.37, p.391-405, 1997.

REID, G. C., The sun-climate question: is there a real connection? **Reviews of Geophysics**, v.33 Supplement, 1995.

REID, G. C., Solar variability and the Earth's climate: introduction and overview. **Space Science Reviews**, v.94, p. 1-11, 2000.

RIGOZO, N. R., AND NORDEMANN, D. J. R. Análise por regressão iterativa de periodicidades em séries temporais de registros geofísicos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 16, n. 2/3, p. 149-158, 1998.

RIGOZO, N. R. **Registros da atividade solar e de outros fenômenos geofísicos em anéis de crescimento de árvores**. 1998. 131 p. (INPE-7260-TDI/702). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1998. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/08.27.16.08>>. Acesso em: 20 maio 2009.

RIGOZO, N. R.; ECHER, E.; VIEIRA L.E.A.; NORDEMANN, D.J. R. Reconstruction of Wolf sunspot numbers on the basis of spectral characteristics and estimates of associated radio flux and solar Wind parameters for the last millennium. **Solar Physics**, v.203, p. 179-191, 2001.

RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R.; ECHER, E.; ZANANDEA, A.; GONZALEZ, W. D. Solar variability effects by tree-ring data wavelets analysis. **Advance Space Research**, v. 29, n. 12, p. 1985-1988, 2002.

RIGOZO, N. R., VIEIRA, L. E. A., ECHER, E. AND NORDEMANN, D. J. R. Wavelet analysis of Solar-ENSO imprints in tree ring data from southern brazil in the last century. **Climatic Change**, v.60, p. 329-340, 2003.

RIGOZO, N. R., NORDEMANN, D. J. R., ECHER, E. AND VIEIRA, L. E. A. Search for Solar Periodicities in Tree-Ring Widths from Concórdia (S.C., Brazil). **Pure and Applied Geophysics**, v.161, p. 221-233, 2004.

RADOSKI, H. R., FOUGERE, P. F. AND ZAWALIK, E. J. A comparison of power spectral estimates and applications of the maximum entropy model. **Journal of Geophysical Research**, v.80, p.619, 1975.

ROIG, F.A.; LE-QUESNE, C.; BONINSEGNA, J.A.; BRIFFA, K.R.; LARA, A.; GRUDD, H.; JONES, P.D.; VILLAGRÁN, C. Climate variability 50,000 years ago in mid-latitude Chile as reconstructed from tree rings. **Nature**, v. 410, p. 567-570, 2001.

ROPELEWSKI, C.R.; HALPERT, S., Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v.115, p.1606-1626, 1987.

ROPELEWSKI, C., HALPERT, M. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation, **Journal Climate**, v.2, p.268-283,1989.

RUDDIMAN, W. F., **Earth's climate: past and future**. New York: W.H. Freeman & Sons, 2001.

SAZONOV, B. I. Brückner cycle of droghts. In: Criterious and characteristics of droghts phenomena in USSR. Leningrad:Hydrometeoizdat, 1979. p. 82-92.

SCHIMEL, D. AND SULZMAN, E., Variability in the earth climate system: decadal and longer timescales. **Reviews of Geophysics**, v. 33 Supplement, 1995.

SCHWARZBACH, M., **Climates of the past: an introduction to palaeoclimatology**. Londres: Van Nostrand, 1963.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings: basics and applications of dendrochronology**. Dordrech: D. REIDEL, 1988. 273p.

SEINFELD, J. H., PANDIS, S. N., **Atmospheric chemistry and physics**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

SEITZ, R.A.; KANNINEN, M. Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil: Preliminary results. **IAWA Bulletin**, v.10, n.2, p.170-174, 1989.

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÕES – SEMC. **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**. Disponível em: http://www.semc.rs.gov.br/atlas/INDEX_rgs.htm. Acesso em: 26 junho 2005.

SHEPPARD, P. R.; GRAUMLICH, L. J., A reflected-light video imaging system for tree-ring analysis of conifers. **Tree Rings, Environment and Humanity. Radiocarbon**, p. 879-889, may 1996. Arizona: International conference, 1996.

STAMPER, R.; LOCKWOOD, M.; WILD, M. N.; CLARK, T. D. G. Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. A12, p. 28325-28342, 1999.

STOCKEY, R. A. Antarctic and Gondwana Conifers. In: Taylor, T. N. & Taylor, E. L. (eds.). **Antarctic paleobiology: its role in the reconstruction of Gondwana**. New York: Springer-Verlag, 1990. p. 179 – 191.

STUIVER, M.; POLACH, H.A. Discussion: Reporting of ^{14}C data. **Radiocarbon**, v.19, n.3, p.355-363, 1977.

STUIVER, M.; QUAY, P. D., Changes in Atmospheric carbon-14 attributed to a variable Sun. **Science**, v.207, n.4426, p.11-19, 1980.

STUIVER, M., Solar variability and climatic change during the current millennium. **Nature**, v. 286, p.868-871, 1998.

STUDZINSKI, C. D. S. **Um estudo da precipitação na região Sul do Brasil e sua relação com os Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Sul**. 1995. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1995.

SVENSMARK, H. AND FRIIS-CHRISTENSEN, E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage--a missing link in solar-climate relationships, **Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics**, v.59, p.1225-1232, 1997.

TAYLOR, T. N. & TAYLOR, E. L. **The biology and evolution of fossil plants**. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 982 pp. 1993.

TORRENCE, C. AND COMPTON, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.79, p.61-78, 1998.

TSIROPOULA, G. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, V.65, P.469-482, 2003.

TSIRULNIK, L. B., KUZNETSOVA, T. V. and OrAEvsky, V. N. The MGM spectral analysis of Wolf sunspot numbers: Preliminary results. **Advance Space Research**. v. 20, n. 12, p. 2365- 2368, 1997.

UNIVERSITY OF ARIZONA. Disponível em:

<http://www.ltrr.arizona.edu/dendrochronology.html>. Acesso em: 26 junho 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM. **Inventário florestal contínuo. Convênio: UFSM/SEMA-RS**. Disponível em:

<http://coralx.ufsm.br/ifcrs/index.php>. Acesso em: 25 maio 2005.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS. Disponível em:

<http://pubs.usgs.gov/publications/text/historical.html>. Acesso em: 14 julho 2005.

WENG, H. AND LAU, K. M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. **Journal Atmospheric Science**, v.51, p.2523, 1994.

Wolberg, J. R., Prediction analysis. Princeton: Van Nostrand Company, N. J.1967. 291p.

APÊNDICE A

FUNÇÕES DE AJUSTES

Neste apêndice são apresentadas as funções de ajustes utilizadas na eliminação das longas tendências da espessura dos anéis de crescimento. Todas as funções de ajustes que foram usadas fazem parte do software Origin 7.0 e estão referenciadas no manual do usuário do mesmo (Origin User's Manual).

A eliminação das longas tendências efetua a remoção dos sinais não climáticos em uma série: sinais que incluam qualquer tendência de crescimento biológico, sinais perturbados da árvore, ou ambos. Decisões sobre o tipo de curva para o ajuste de uma série nem sempre é simples. Necessita-se ter o máximo de informações possíveis sobre as amostras coletadas; posição na história, características do lugar e características das espécies utilizadas. Um dilema comum está em decidir quais características de crescimento nas séries representa fatores climáticos ou não climáticos. Este tipo de decisão se obtém através de uma comparação com várias árvores da mesma espécie, ou entre diferentes espécies. Esta comparação entre árvores se faz para o mesmo local ou até região onde as características de crescimento sejam comuns (Grissino-Mayer, internet).

Uma variedade de funções que representam o crescimento biológico tem sido usada para o processo de ajuste de curva, como funções parabólicas, hiperbólicas, logarítmica, polinomiais, exponenciais e média móvel.

A.1 – Ajuste Linear

$$Y(t) = a_0 + a_1x(t)$$

onde: $Y(t)$ é o crescimento esperado para o ano t ; a_0 e a_1 são os coeficientes de regressão; x é o comprimento do anel no ano t .

A.2 – Ajuste Exponencial

$$Y(t) = ae^{-bt} + k$$

onde: $Y(t)$ é o crescimento esperado para o ano t ; a , b e k variam de série a série.

A.3- Ajuste Polinomial

$$Y(t) = a_0 + a_1x(t) + a_2x^2(t) + \dots + a_mx^m(t)$$

onde: $Y(t)$ é o crescimento esperado para o ano t ; a_0, a_1, \dots, a_m são os coeficientes de regressão; x é o comprimento do anel no ano t , m é o grau da função de ajuste.

Esta função é, muitas vezes, excelente para o ajuste de séries temporais do comprimento dos anéis, para o caso em que existam processos de distúrbios no crescimento das árvores, além do crescimento biológico. Deve-se tomar muito cuidado no uso desta função de ajuste para eliminar frequências ambientais importantes. Um dos maiores problemas no uso dessa aproximação é como determinar m . Por isso deve-se ter o maior número possível de informações a respeito do sítio em que se encontra a amostra.

A.4- Ajuste Gaussiano

$$Y = Y_0 + [A / w (\pi/2)^{-1/2}] e^{-\{[2(x-x_0)^2] / w^2\}}$$

onde: A é a área total sobre a curva da base; x_0 é o centro do pico na abcissa; w é igual a 2 vezes o desvio padrão da distribuição Gaussiana (2σ) ou aproximadamente 0.849 o comprimento do pico para a metade da altura; y_0 é a base da curva; x representa os dados de entrada.