

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ONDALETAS APLICADAS À ANÁLISE DE VARIABILIDADE
DE BAIXA FREQUÊNCIA EM SÉRIES DE AFLUÊNCIA
AOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS BRASILEIROS**

SARAH LOPES DOS ANJOS

ORIENTADOR: CARLOS HENRIQUE RIBEIRO LIMA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2015

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ONDALETAS APLICADAS À ANÁLISE DE VARIABILIDADE DE
BAIXA FREQUÊNCIA EM SÉRIES DE AFLUÊNCIA
AOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS BRASILEIROS**

SARAH LOPES DOS ANJOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS.

APROVADA POR:

**Prof. Carlos Henrique Ribeiro Lima, PhD (PTARH-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dirceu Silveira Reis Junior, PhD (PTARH -UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Celso Augusto Guimarães Santos, PhD (PPGECAM-UFPB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF: MAIO – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

ANJOS, S.L.

ONDALETAS APLICADAS À ANÁLISE DE VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA EM SÉRIES DE AFLUÊNCIA AOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS BRASILEIROS. xviii, 124p., 210 x 297 mm (ENC/FT/ UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2015). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| 1. Variabilidade de baixa frequência | 2. Ondaletas (wavelet) |
| 3. Sistema hidrelétrico | 4. Influências climáticas |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANJOS, S.L. (2015). *Ondaletas aplicadas à análise de variabilidade de baixa frequência em séries de afluência aos reservatórios hidrelétricos brasileiros*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-171/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 124p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Sarah Lopes dos Anjos.

TÍTULO: Ondaletas aplicadas à análise de variabilidade de baixa frequência em séries de afluência aos reservatórios hidrelétricos brasileiros.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Sarah Lopes dos Anjos
Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me ensina a amar e cuida de mim em todos os momentos da minha vida.

Agradeço a minha família, que me dá o suporte e apoio que preciso.

Agradeço aos amigos, que me apoiam em momentos difíceis e me incentivam a não desistir.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Carlos Henrique Ribeiro Lima, que muito me ensinou e, por vezes, se tornou um psicólogo.

RESUMO

A análise da variabilidade espaço-temporal de séries históricas de vazão é de suma importância para a gestão dos recursos hídricos, pois leva a um melhor entendimento das flutuações naturais de sistemas hidrológicos e forma a base de conhecimento para construção e aperfeiçoamento de modelos de previsão e simulação de vazões. Neste trabalho, busca-se avaliar, nas séries de afluência aos reservatórios brasileiros, tendências cíclicas que ocorrem com períodos relativamente longos (a partir de 2 anos), ou seja, oscilações que atuam numa frequência baixa, permitindo que vazões permaneçam por longos períodos em faixas abaixo ou acima do valor médio histórico.

A análise da variabilidade de baixa frequência é realizada por meio da transformada ondaletas (*wavelet*), cuja análise não-estacionária permite a decomposição de séries temporais no domínio frequência-tempo. Analisou-se, então, a ocorrência de oscilações de longos períodos com vazões predominantemente abaixo ou acima da média histórica nas vazões afluentes aos reservatórios ligados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), objetivando, dessa forma, melhor compreender oscilações de baixa frequência nas afluências hidroenergéticas ao sistema hidrelétrico nacional.

A análise do espectro global das ondaletas mostrou que somente algumas bacias do País, além de alguns reservatórios, apresentaram variabilidade de baixa frequência nas bandas de 2 a 4 anos, de 4 a 8 anos, de 8 a 16 anos e de 16 a 32 anos. Na análise anual das variabilidades de baixa frequência verifica-se que a maior parte das séries hidrológicas oscila em baixa frequência somente em alguns períodos específicos do histórico, não sendo observado nos dados analisados nenhum padrão persistente de variabilidade de baixa frequência.

Com o objetivo de avaliar a influência de forçantes climáticas de larga escala nos padrões encontrados, aplicou-se a análise da ondaleta a índices climáticos globais representativos da variabilidade de baixa frequência na atmosfera e oceano, como o índice de oscilação decenal do Pacífico (PDO). Os resultados encontrados apontam para uma influência limitada de tais forçantes nas oscilações de baixa frequência das vazões ao SIN, sugerindo que forçantes atmosféricas de menor escala estariam associadas a tais flutuações nas vazões, o que, neste caso, teria sua previsibilidade de longo prazo reduzida.

ABSTRACT

The multiscale analysis of spatio-time variability is very important for the management of water resources, because it contributes to a better understanding of the natural fluctuations of the hydrologic systems and forms the knowledge base for streamflow forecast and simulation. The objective of this study was to analyze the existence of low-frequency variability in the streamflow of Brazil's main reservoirs.

The low frequency variability analysis was performed by the wavelet transform, which allows the non-stationary decomposition of the time series in the time frequency domain. Then, the presence of low-frequency variability (occurrence of long periods with flows predominantly above or below the historical average) in the reservoirs connected to the National Interconnected System (SIN - Brazil) was analysed to better understand the low frequency fluctuations in the hydroenergetic series of inflows to the SIN.

The global wavelet spectrum analysis showed that only a few basins in the country, and some reservoirs, showed low frequency variability in the analyzed bands (2-4 years, 4-8 years, 8-16 years and 16-32 years). In the annual low frequency variability results showed that most of the series display only low frequency variability in certain years and not throughout the whole time series.

In order to study reasons for the low frequency variability observed, the same variability was analyzed in the climatic indexes, such as the Pacific Decadal Oscillation (PDO). However, the results point to a limited influence of such factors in the low frequency oscillations of the SIN inflow series, suggesting that smaller-scale atmospheric forces would be associated with such fluctuations in the SIN inflow.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	5
2.1 - OBJETIVO GERAL.....	5
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3 - REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 - ESTACIONARIEDADE E VARIABILIDADE CLIMÁTICA	6
3.2 - SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO	9
3.3 - ANÁLISE DE ONDALETAS (<i>WAVELETS</i>)	10
3.3.1 - Ondaletas (<i>Wavelets</i>).....	10
3.3.2 - Estudos Anteriores	14
3.4 - VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA E OS FENÔMENOS CLIMÁTICOS.....	18
3.4.1 - El Niño Oscilação Sul (ENSO).....	19
3.4.2 - Oscilação Decenal do Pacífico (PDO).....	23
3.4.3 - <i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i> (AMO)	25
3.4.4 - <i>North Atlantic Oscillation</i> (NAO)	25
3.4.5 - <i>Arctic Oscillation</i> (AO).....	26
4 - METODOLOGIA.....	28
4.1 - REGIÃO DE ESTUDO E DADOS HIDROCLIMÁTICOS.....	28
4.2 - ANÁLISE DE ONDALETAS	30
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORTE DO SIN	32
5.2 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORDESTE DO SIN	34
5.3 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUL DO SIN.....	36
5.4 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUDESTE DO SIN	37
5.5 - RESUMO DA ANÁLISE DE ONDALETAS PARA AS AFLUÊNCIAS DAS REGIÕES DO SIN	39
5.6 - ANÁLISE DE ONDALETA PARA A UHE FURNAS.....	40

5.7 - ANÁLISE DO ESPECTRO GLOBAL DA ONDALETA PARA OS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS	42
5.8 - ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL DA ESCALA MÉDIA NAS BANDAS EM ESTUDO DAS ONDALETAS PARA OS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS	48
5.9 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE NIÑO 3.4	56
5.10 - RESUMO DA ANÁLISE DE ONDALETAS PARA OS ÍNDICES CLIMÁTICOS ESTUDADOS	58
6 - CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICES.....	67
A – POSTOS DO SIN COM SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS MENSAS DISPONIBILIZADAS PELO ONS E FONTES DE OBTEÇÃO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS.....	68
B – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORTE DO SIN.....	74
C – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORDESTE DO SIN.....	77
D – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUL DO SIN	80
E – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUDESTE DO SIN.....	83
F – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A UHE FURNAS.....	86
G – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A UHE ITAIPU	89
H – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA TUCURUÍ.....	92
I – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA SOBRADINHO	95
J – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA SERRA DA MESA.....	98
K – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE NIÑO 3.4.....	101
L – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE PDO.....	104

M – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE AMO	107
N – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE SOI	110
O – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE MEI	113
P –ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE ONI.....	116
Q – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE NAO	119
R – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE AO	122

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURA E ABREVIACÕES

AMO	Índice climático – <i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i>
AO	Índice climático – <i>Arctic Oscillation</i>
ENSO	El Niño Oscilação Sul
MEI	Índice climático – <i>Multivariate ENSO Index</i>
MWmed	Megawatt médio
NAO	Índice climático – <i>North Atlantic Oscillation</i>
NIÑO 3.4	Índice climático – <i>Niño 3.4 SST Index</i>
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>
ONI	Índice climático – <i>Oceanic Niño Index</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDO	Índice climático – <i>Pacific Decadal Oscillation</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOI	Índice climático – <i>Southern Oscillation Index</i>
T	Período
TSM	Temperatura na superfície do mar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Anomalias (desvios com relação à média histórica anual) das afluições (em MWmed) às regiões do SIN.	2
Figura 3.1 – Exemplos de séries de máximos anuais de vazão com tendências monotônicas crescente (UHE Jurumirim) e decrescente (UHE Euclides da Cunha), respectivamente (Anjos e Bueno, 2011).....	7
Figura 3.2 – Ondaletas básicas (Torrence e Compo, 1998).	12
Figura 3.3 – (a) Sinal composto com as frequências de 7,5, 30, 60 e 120 Hz; (b) Espectro de potência da ondaleta; e (c) Espectro de potência global da ondaleta para este sinal (Santos <i>et al.</i> , 2013).....	14
Figura 3.4 – (a) Vazão anual média no posto Orós. (b) Espectro da ondaleta de potência normalizada utilizando a ondaleta de Morlet. (c) Potência wavelet média na banda 2-6 anos (Lima e Martins, 2004).	16
Figura 3.5 – Espectro da ondaleta cruzada entre o índice NIÑO 3.4 e a vazão da água doce continental da América do Sul (Labat, 2010, adaptado).	16
Figura 3.6 – Efeitos do fenômeno El Niño na América do Sul (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007, adaptado).	20
Figura 3.7 – Definição das regiões do Pacífico equatorial para o monitoramento do El Niño (Equatorial Currents and El Niño, 2014).....	20
Figura 3.8 – Série histórica do índice NIÑO 3.4 (1870 a 2013).	21
Figura 3.9 – Série histórica do índice MEI.	21
Figura 3.10 – Série histórica do índice ONI (1950 a 2013).	22
Figura 3.11 – Série histórica do índice SOI (1866 a 2011).....	22
Figura 3.12 – Anomalias do índice NIÑO 3.4 de 1870 a 2013.....	23
Figura 3.13 – Valores mensais para o índice PDO. De 1900 a setembro de 2009 (<i>Pacific Decenal Oscillation (PDO) Graphics</i> , 2014, adaptado).	24
Figura 3.14 – Série histórica do índice AMO (1856 a 2013).	25
Figura 3.15 – Série histórica do índice NAO (1950 a 2013).....	26
Figura 3.16 – Série histórica do índice AO (1950 a 2013).	27
Figura 4.1 – Usinas do Sistema Interligado Nacional – SIN, operadas pelo ONS.	29
Figura 4.2 – Passo a passo dos estudos realizados.	31
Figura 5.1 – Série de afluições da região Norte do SIN (1931 a 2013).	33

Figura 5.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluências anuais da região Norte do SIN.	33
Figura 5.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 12 a 16 anos e 16 a 20 anos para as afluências anuais da região Norte do SIN.	34
Figura 5.4 – Série de afluências da região Nordeste do SIN.	35
Figura 5.5 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluências anuais da região Nordeste do SIN.	35
Figura 5.6 – Série temporal da escala-média na banda de 2 a 4 anos para as afluências anuais da região Nordeste do SIN.	36
Figura 5.7 – Série de afluências da região Sul do SIN.	36
Figura 5.8 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluências anuais da região Sul do SIN.	37
Figura 5.9 – Série temporal da escala-média na banda de 2 a 4 anos para as afluências anuais da região Sul do SIN.	37
Figura 5.10 – Série de afluências da região Sudeste do SIN.	38
Figura 5.11 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluências anuais da região Sudeste do SIN.	38
Figura 5.12 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluências anuais da região Sudeste do SIN.	39
Figura 5.13 – Série de vazões médias anuais da UHE Furnas.	40
Figura 5.14 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Furnas.	40
Figura 5.15 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos e 16 a 20 anos para as vazões da UHE Furnas.	41
Figura 5.16 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 2 a 4 anos.	42
Figura 5.17 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 4 a 6 anos.	43
Figura 5.18 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 6 a 8 anos.	44
Figura 5.19 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 8 a 12 anos.	45
Figura 5.20 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 12 a 16 anos.	46

Figura 5.21 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 16 a 20 anos.	47
Figura 5.22 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 2 a 4 anos.....	49
Figura 5.23 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 4 a 6 anos.....	50
Figura 5.24 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 6 a 8 anos.....	51
Figura 5.25 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 8 a 12 anos.....	52
Figura 5.26 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 12 a 16 anos.....	53
Figura 5.27 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 16 a 20 anos.....	54
Figura 5.28 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 20 a 24 anos.....	55
Figura 5.29 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 24 a 32 anos.....	56
Figura 5.30 – Série histórica do índice NIÑO 3.4 (1870 a 2013).	57
Figura 5.31 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice NIÑO 3.4.	57
Figura 5.32 – Série temporal da escala-média nas bandas de 2 a 4 anos e de 4 a 6 anos para o índice NIÑO 3.4.	58
Figura B.1 – Série de afluições da região Norte do SIN (1931 a 2013).....	74
Figura B.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluições anuais da região Norte do SIN.....	74
Figura B.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluições anuais da região Norte do SIN.....	75
Figura B.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluições anuais da região Norte do SIN.....	76
Figura C.1 – Série de afluições da região Nordeste do SIN (1931 a 2013).	77
Figura C.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluições anuais da região Nordeste do SIN.....	77

Figura C.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluições anuais da região Nordeste do SIN.....	78
Figura C.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluições anuais da região Nordeste do SIN.	79
Figura D.1 – Série de afluições da região Sul do SIN (1931 a 2013).	80
Figura D.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluições anuais da região Sul do SIN.....	80
Figura D.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluições anuais da região Sul do SIN.....	81
Figura D.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluições anuais da região Sul do SIN.....	82
Figura E.1 – Série de afluições da região Sudeste do SIN (1931 a 2013).....	83
Figura E.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluições anuais da região Sudeste do SIN.....	83
Figura E.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluições anuais da região Sudeste do SIN.....	84
Figura E.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluições anuais da região Sudeste do SIN.	85
Figura F.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Furnas (1931 a 2012).	86
Figura F.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Furnas.....	86
Figura F.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Furnas.....	87
Figura F.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Furnas.....	88
Figura G.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Itaipu (1931 a 2012).	89
Figura G.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Itaipu.	89
Figura G.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Itaipu.	90
Figura G.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Itaipu.	91
Figura H.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Tucuruí (1931 a 2012).....	92

Figura H.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Tucuruí.	92
Figura H.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Tucuruí.	93
Figura H.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Tucuruí.	94
Figura I.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Sobradinho (1931 a 2012).	95
Figura I.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Sobradinho.	95
Figura I.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Sobradinho.	96
Figura I.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Sobradinho.	97
Figura J.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Serra da Mesa (1931 a 2012).	98
Figura J.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Serra da Mesa.	98
Figura J.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12anos para as vazões da UHE Serra da Mesa.	99
Figura J.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Serra da Mesa.	100
Figura K.1 – Série histórica do índice NIÑO 3.4 (1870 a 2013).	101
Figura K.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice NIÑO 3.4.	101
Figura K.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice NIÑO 3.4.	102
Figura K.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice NIÑO 3.4.	103
Figura L.1 – Série histórica do índice PDO (1900 a 2013).	104
Figura L.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice PDO.	104
Figura L.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice PDO.	105
Figura L.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice PDO.	106

Figura M.1 – Série histórica do índice AMO (1856 a 2013).	107
Figura M.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice AMO.	107
Figura M.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice AMO.	108
Figura M.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice AMO.	109
Figura N.1 – Série histórica do índice SOI (1866 a 2011).	110
Figura N.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice SOI.	110
Figura N.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice SOI.	111
Figura N.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice SOI.	112
Figura O.1 – Série histórica do índice MEI (1950 a 2013).	113
Figura O.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice MEI.	113
Figura O.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice MEI.	114
Figura O.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice MEI.	115
Figura P.1 – Série histórica do índice ONI (1950 a 2013).	116
Figura P.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice ONI.	116
Figura P.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice ONI.	117
Figura P.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice ONI.	118
Figura Q.1 – Série histórica do índice NAO (1950 a 2013).	119
Figura Q.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice NAO.	119
Figura Q.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice NAO.	120

Figura Q.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice NAO.	121
Figura R.1 – Série histórica do índice AO (1950 a 2013).....	122
Figura R.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice AO.	122
Figura R.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice AO.	123
Figura R.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice AO.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Funções de ondaletas básicas – propriedades fundamentais	13
Tabela 4.1 – Índices climáticos utilizados.	29
Tabela 5.1 – Anos em que cada região apresentou variabilidades de baixa frequência.	39
Tabela 5.2 – Anos em que cada índice climático apresentou variabilidade de baixa frequência.	58
Tabela A.1 – Postos do SIN com séries de vazões médias mensais disponibilizadas pelo ONS (2014) e utilizadas neste estudo – os números entre parênteses são os códigos dos postos utilizados pelo ONS.	68
Tabela A.2 – Fontes de obtenção dos índices climáticos.	73

1 - INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações relacionadas aos estudos em hidroclimatologia é o impacto da variabilidade climática na disponibilidade hídrica e suas consequências nas atividades que dependem da água. A análise da variabilidade espaço-temporal das séries temporais de vazão é de suma importância para a gestão dos recursos hídricos. Em geral, os projetos de recursos hídricos (barragens de geração ou de abastecimento, projetos de drenagem urbana, irrigação, etc.) são planejados com base nas vazões afluentes (previsão e descrição estatística), e, caso essas sofram mudanças contínuas, devem ser avaliados seus impactos.

A ocorrência de longos períodos (acima de 2 anos, por exemplo) oscilatórios com vazões predominantemente abaixo ou acima da média histórica é conhecida como variabilidade de baixa frequência, que pode ser entendida como uma mudança no padrão da variável. Tais mudanças podem ocorrer com períodos e intensidades diferentes, por exemplo, uma série pode ter um período de 5 anos abaixo da média histórica, seguido por um período de 2 anos acima dessa média, assim como esses anos podem ocorrer com valores muito acima da média, ou pouco abaixo, etc. Diversos exemplos dessa variabilidade aparecem em séries hidrológicas (como no Canadá – Coulibaly *et al.*, 2000; no semi-árido brasileiro – Lima e Martins, 2004; nas vazões de grandes rios nos 5 continentes não congelados – Labat, 2008; no rio Cuiabá – Destro *et al.*, 2012; e nos principais reservatórios brasileiros – Alves *et al.*, 2013; etc), assim como em séries relacionadas a outras variáveis climáticas (como na variabilidade solar no sul da América do Sul – Compagnucci *et al.*, 2014; na precipitação na Argentina – Barreiro *et al.*, 2014; na temperatura na superfície do mar – Labat, 2010; dentre outros).

A identificação da existência de uma variabilidade de baixa frequência regendo as vazões afluentes nos reservatórios brasileiros, assim como a caracterização de seus atributos (frequência, grau de variabilidade, dependência de fatores climáticos) pode auxiliar no planejamento da operação de reservatórios hidroelétricos e no gerenciamento dos recursos hídricos. Por exemplo, a previsão, com certa antecedência, de anos de vazões acima ou abaixo da média de longo prazo poderia subsidiar as tomadas de decisão e colaborar com o desempenho de sistemas hídricos com base em séries sintéticas de vazão.

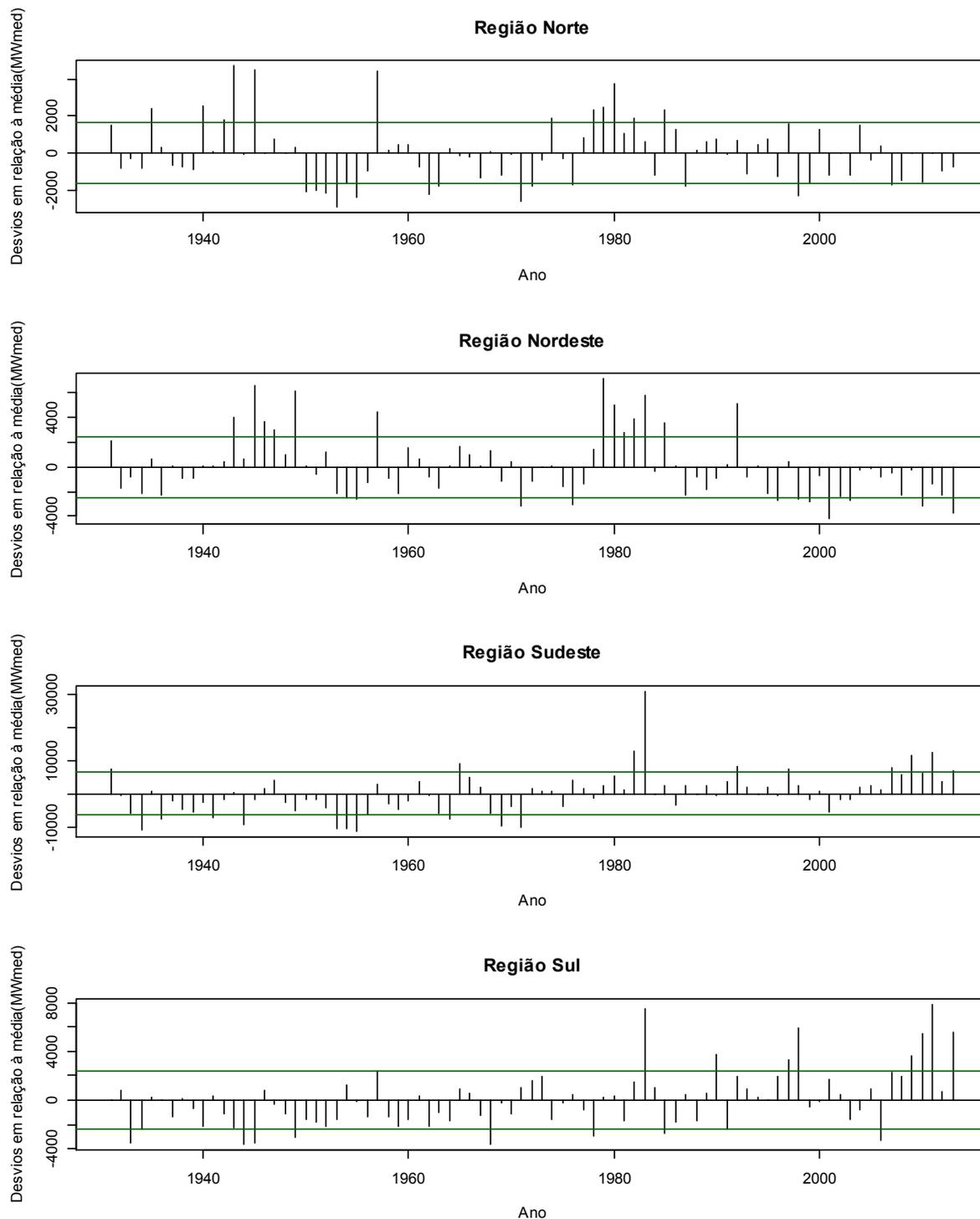


Figura 1.1 – Anomalias (desvios com relação à média histórica anual) das afluências (em MWmed) às regiões do SIN.

Nota: As afluências foram calculadas com base na queda média das usinas e seus valores de vazão média mensal. Como parâmetro de significância, foi utilizado o desvio padrão da série amostral.

A Figura 1.1, por exemplo, mostra como as afluências hidroenergéticas (em MWmed) evoluíram ao longo do tempo nos reservatórios das regiões do Sistema Interligado Nacional – SIN.

Ao se observar essa figura, pode-se notar como, ao longo dos anos, houve longos períodos de aflúências acima ou abaixo da média histórica, o que poderia caracterizar a variabilidade de baixa frequência.

Ainda na Figura 1.1, pode-se notar que, desde 1993, as aflúências das regiões Norte e Nordeste estão abaixo da média histórica. Já nas regiões Sul e Sudeste, é possível identificar dois períodos distintos desde 1930: até o ano de 1971, as aflúências encontram-se abaixo da média histórica, e, após esse período, as aflúências, em sua maioria, se situam acima da média, com máximos significativos desde 2007. Por meio da comparação entre as figuras, notam-se diferentes padrões de variabilidade das vazões no País, de forma que, no mesmo ano em que uma determinada região sofre expressiva cheia, outra pode estar experimentando seca significativa. Neste trabalho, buscou-se identificar essas variabilidades e verificar a relação com algum índice climático.

Para alcançar esse objetivo, foi utilizada a transformada ondaletas (*wavelet*) nas séries das aflúências das regiões abrangidas pelo SIN, nos índices climáticos estudados e nos reservatórios despachados pelo ONS. A decomposição de séries temporais poderia ser realizada pela transformada de Fourier, que decompõe a série em funções de senos e cossenos. No entanto, a transformada de Fourier pressupõe uma série estacionária, em que os padrões são sempre os mesmos ao longo de toda a série. Já a análise de ondaletas, derivada da transformada de Fourier, permite a decomposição de séries temporais no domínio frequência-tempo de forma não estacionária, o que torna tal metodologia mais recomendada para o estudo de variáveis hidroclimatológicas (Torrence e Compo, 1998; Lima e Martins, 2004; Veerstegh, 2008; Labat, 2008; Santos *et al.*, 2013; dentre outros).

Alguns estudos da variabilidade de baixa frequência em vazões buscam atribuir tais padrões a variações climáticas de larga escala por meio de correlações entre índices climáticos e séries históricas de vazões ou a precipitação que incide na bacia hidrográfica. Em escala global, um dos principais índices climáticos utilizados em estudos hidroclimáticos é o El Niño Oscilação Sul (ENSO). No entanto, existe um consenso crescente sobre a existência de influência de outros índices climáticos como a Oscilação Decenal do Pacífico (PDO), a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) e a Oscilação Multidecenal do Atlântico (AMO), atuando como forçantes da variabilidade do sistema hidrológico em períodos decenais ou em maiores escalas (Balaji *et al.*, 2012).

Nos estudos de previsão e simulação de vazões, caso sejam identificados padrões nas variáveis que as influenciam, essas informações podem ser utilizadas para melhorar a previsão. Por exemplo, sabendo-se que uma região é bastante influenciada pelo fenômeno El Niño, e que, quando este ocorre, a região sofre com uma seca fora dos padrões, pode-se, com os estudos de previsão do fenômeno, tomar a decisão de acumular mais água nos reservatórios da região, de forma que, nos anos seguintes, na época da seca, suas consequências sejam minimizadas.

O Brasil é um país de larga escala espacial, com comportamentos hidrológicos distintos ao longo do território (vide Figura 1.1, por exemplo). Alguns estudos têm sido realizados em função da busca de uma explicação climática para essa variabilidade, geralmente, por meio de índices climáticos (veja Lima e Martins, 2004; Destro *et al.*, 2012; Alves *et al.*, 2013). Este trabalho busca contribuir para identificar a abrangência desses diferentes comportamentos, assim como a influência de forçantes climáticas de larga escala na variabilidade de baixa frequência das vazões afluentes dos reservatórios abrangidos pelo SIN.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro a presente introdução, e 18 apêndices. No segundo capítulo são apresentados os objetivos gerais e específicos do estudo. O terceiro contém o referencial teórico e a revisão bibliográfica, em que estão abordadas estacionariedade e a variabilidade climática, a análise de variabilidade e de tendências, a análise de ondaletas, os fenômenos climáticos e alguns dos seus respectivos índices e a apresentação de alguns estudos realizados sobre a tendência e mudança climática no Brasil. No quarto capítulo é apresentada a metodologia utilizada, aspectos gerais do setor hidroelétrico brasileiro, a forma de obtenção dos dados hidroclimatológicos utilizados no trabalho e a descrição da aplicação da metodologia das ondaletas. O capítulo cinco contém os resultados e as discussões a respeito destes. Por fim, as principais conclusões obtidas com o estudo são apresentadas no capítulo seis. As características principais das usinas estudadas e a análise de ondaletas detalhada para alguns postos e índices são registrados nos apêndices.

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

Por meio da análise de ondaletas, identificar a existência de variabilidade de baixa frequência nas vazões afluentes a reservatórios do sistema hidroelétrico nacional e avaliar a influência de forçantes climáticas de larga escala nesse tipo de variabilidade.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as variabilidades do sistema de oferta hidroenergética, por meio da análise de ondaletas;
- Identificar a existência de variabilidade de baixa frequência nas vazões afluentes aos principais reservatórios hidroelétricos brasileiros, por meio da análise de ondaletas;
- Analisar os padrões espaciais e temporais da variabilidade de baixa frequência dos reservatórios estudados;
- Identificar a influência das variabilidades de baixa frequência de forçantes climáticas de larga escala na variabilidade das vazões afluentes aos reservatórios estudados.

3 - REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para examinar a variabilidade de baixa frequência nas vazões afluentes aos reservatórios brasileiros, é necessário relacionar a estacionariedade estatística com a variabilidade climática e estudar os fenômenos climáticos mais influentes no Brasil, utilizando, para tanto, as metodologias mais recomendadas para o estudo dessa variabilidade. Assim, o referencial teórico e a revisão bibliográfica estão divididos em quatro partes. Na primeira parte (3.1) são apresentados os conceitos de estacionariedade e de variabilidade climática. O subitem 3.2 apresenta uma descrição do Operador Nacional do Sistema (ONS). Já o subitem 3.3 apresenta a técnica de análise de ondaletas, suas vantagens e características principais e mostra como a referida técnica tem sido utilizada em estudos atuais na área de hidroclimatologia. Finalmente, o subitem 3.4 trata da variabilidade de baixa frequência e dos fenômenos climáticos, apresentando os índices utilizados no estudo.

3.1 - ESTACIONARIEDADE E VARIABILIDADE CLIMÁTICA

A estacionariedade é um conceito fundamental que permeia o estudo de vazões afluentes em engenharia de recursos hídricos. A maior parte dos modelos de séries temporais e de previsão de variáveis hidroclimatológicas utiliza esse conceito como pressuposto para seus cálculos. Uma série é dita estacionária quando não ocorrem modificações nas características estatísticas da sua população ao longo do tempo. Por outro lado, uma série pode sofrer alterações monotonicamente crescentes ou decrescentes da sua média (ver Figura 3.1), ou o desvio padrão dessa série pode variar ao longo do tempo. Neste caso, a série é dita não estacionária. Outras possibilidades de não estacionariedade são a não estacionariedade cíclica, em que as características estatísticas da série variam em ciclos de períodos iguais ou não, e a não estacionariedade “por salto” em que, em função de alguma mudança brusca na região de onde a série foi obtida (como a implantação de uma usina com regularização de vazões afluentes a montante do posto), a série muda suas características, repentinamente, para um novo padrão.

Neste trabalho, será verificada e identificada a não estacionariedade cíclica, juntamente com a variabilidade de baixa frequência, ou seja, períodos em que a variável encontra-se, por mais de dois anos, acima ou abaixo da média, sendo que esses períodos podem ser variáveis entre

si (também não estacionários). Por exemplo, uma série pode apresentar dez anos acima da média histórica, seguidos por três anos abaixo, seguidos por cinco anos acima, etc.

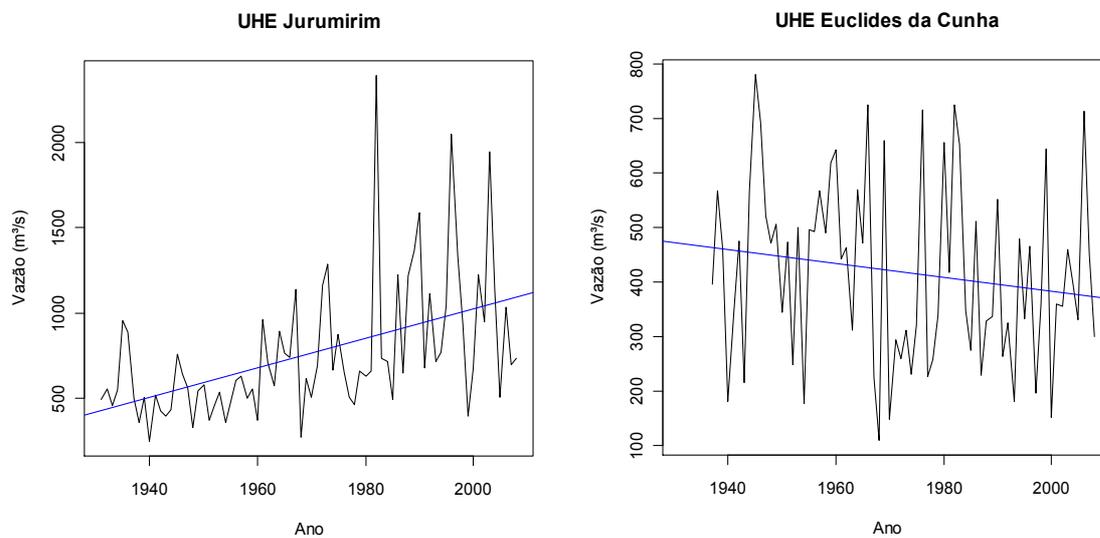


Figura 3.1 – Exemplos de séries de máximos anuais de vazão com tendências monotônicas crescente (UHE Jurumirim) e decrescente (UHE Euclides da Cunha), respectivamente (Anjos e Bueno, 2011).

Apesar de a maioria dos estudos hidrológicos utilizar a estacionariedade como pressuposto, Milly *et al.* (2008) afirmam que a estacionariedade *morreu* e não deve mais ser usada como suposição padrão, tendo em vista que as alterações recentes do clima terrestre têm levado a alterações nas médias de precipitação, evapotranspiração e vazões nos rios. Além disso, as mudanças antropogênicas, como obras de infraestrutura (modificações de canais, obras de drenagem) e cobertura e uso do solo, vêm gerando alterações no risco de inundações, no abastecimento e na qualidade da água (Lima e Lall, 2008; Müller *et al.*, 1998; Milly *et al.*, 2008; dentre outros). No entanto, do ponto de vista prático, hoje já discussões importantes sobre se considerar ou não a estacionariedade das séries hidrológicas nos estudos de hidrologia.

A presença de não estacionariedades em séries de vazões pode estar associada às forçantes climáticas e às não climáticas. As forçantes não climáticas influenciam os recursos hídricos por meio de mudanças no uso do solo e da água, construções de reservatórios, emissões de poluentes, etc (IPCC, 2013). A violação da hipótese da estacionariedade nas séries de vazão pode levar à sub ou à superestimação das estatísticas estimadas pela amostra, como, por exemplo, sua curva de permanência e os quantis de cheia, gerando, conseqüentemente, diversos danos (Anjos e Bueno, 2011) como, por exemplo, o mau planejamento do funcionamento do sistema energético.

Ao se esperar que um ponto do rio tenha certa vazão específica, uma usina é dimensionada para gerar certa quantidade de energia. Caso as vazões tenham sido estimadas acima da realidade, a usina poderá estar superdimensionada, gerando menos energia do que seria esperado na implantação. O oposto pode ocorrer caso a vazão real seja acima da estimada, pois a usina poderia estar gerando energia abaixo do seu potencial. Pode ocorrer também de que o dimensionamento esteja correto, mas existam, na série real, variabilidades de baixa frequência, de forma que, no longo prazo, a energia gerada seja condizente com o dimensionamento, mas que, em alguns anos, a energia seja significativamente maior ou menor que a média estimada.

Os modelos estacionários simples não reproduzem efetivamente a variabilidade de um clima não estacionário e a incorporação aos modelos de algum mecanismo que auxiliasse na explicação das variações climáticas poderia ajudar no aprimoramento da estimação da variância da série e na estimação de suas estatísticas (Katz e Parlange, 1993 e 1998, *apud* Mehrotra e Sharma, 2007). Uma abordagem sugerida seria permitir variações nos parâmetros do modelo por condicionamento com uma covariável climática (Anjos e Bueno, 2011; Mehrotra e Sharma, 2007).

A variabilidade climática compreende as variações no estado médio do clima abrangendo as escalas temporal e espacial, além de eventos climáticos individuais (USAID, 2007). Essa variabilidade é uma propriedade intrínseca do sistema climático global, responsável por oscilações naturais nos padrões climáticos (Confalonieri, 2003).

A variabilidade climática natural leva a características de vazões mutáveis no tempo, e esta variação pode ser parcialmente quantificável e previsível com a perspectiva de um processo dinâmico, que pode gerar uma melhor gestão dos recursos hídricos quando inserida na operação de reservatórios e no planejamento da geração de energia hidroelétrica. Por exemplo, sabendo-se que são esperados alguns anos com vazões abaixo da média histórica, pode-se reservar a água nos anos anteriores, para utilizá-la para geração e abastecimento ao longo dos anos de seca.

Alves (2012) ressaltou que a variabilidade climática temporal possui diversas escalas, como a variabilidade climática interdecenal (escala de décadas), interanual (escala de anos) e intrasazonal (escala de meses ou estações). Embora seja uma componente da dinâmica climática

global conhecida, seu impacto, mesmo dentro dos limites esperados, pode ter reflexos significativos nas atividades humanas, como na produção agrícola e na produção de energia por meio de usinas hidrelétricas (Nunes e Lombardo, 1995). No entanto, a identificação e previsão de tais variabilidades ainda é um desafio na atualidade.

3.2 - SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO

O sistema de produção de energia elétrica brasileiro é composto primariamente por usinas hidrelétricas. A hegemonia da hidroeletricidade na matriz energética nacional obriga à análise cuidadosa do regime fluvial e seus padrões de variabilidade, já que essas variabilidades podem trazer efeitos desastrosos para a oferta de energia elétrica, e, conseqüentemente, para a economia do País.

Usualmente, ao se estudar um novo empreendimento hidrelétrico, ou ao realizar uma análise econômica de um empreendimento existente, são feitas simulações de vazões afluentes à estes reservatórios, de forma a se criar um plano de ação para diversos cenários hidrológicos. Dessa maneira, as simulações geralmente são realizadas com as séries históricas de vazões afluentes aos locais estudados, considerando-se também cenários otimistas e pessimistas para as vazões afluentes. Com a utilização da variabilidade de baixa frequência, referidos estudos podem ser aprofundados, de forma a captar as possíveis conseqüências de um fenômeno hidrológico e criar um plano de tomada de decisão para cenários futuros, considerando novas simulações e expectativas de vazões afluentes.

Alves *et al.* (2013) avaliaram, nos postos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as tendências monotônicas das séries mensais por meio dos métodos clássicos (média e mediana móvel, regressão linear, regressão local de Lowess e Mann-Kendall-Sen), sem considerar a correlação entre os dados. Em seus estudos, os autores concluíram que a região Nordeste do País possui alguns reservatórios que apresentam tendências de diminuição de vazões médias, enquanto as regiões Sul e Sudeste apresentam alguns reservatórios com tendências ao aumento das afluências médias. Alguns outros autores também identificaram tendências ascendentes nas vazões máximas de postos fluviométricos no Sul e Sudeste do Brasil (Müller *et al.*, 1998; Lima e Lall, 2008; Anjos e Bueno, 2011; entre outros).

O estudo da variabilidade de baixa frequência no SIN, assim como da não estacionariedade, pode auxiliar no gerenciamento da distribuição de energia no Brasil. Por ser um sistema interligado, o gerenciamento da distribuição de energia no País não depende apenas de uma região, mas do equilíbrio entre as afluências e a demanda energética do País como um todo. Dessa maneira, identificando-se espacialmente as regiões com variabilidade de baixa frequência, pode-se criar planos contendo as estratégias e medidas a serem adotadas em anos de vazões fora da média.

3.3 - ANÁLISE DE ONDALETAS (*WAVELETS*)

A decomposição de séries temporais em séries no domínio frequência-tempo pode ser efetuada tanto pela transformada de Fourier, quanto pela transformada em ondaletas, derivada da transformada de Fourier. A transformada de Fourier decompõe as séries em senos e cossenos de forma contínua e uniforme, portanto, para sinais estacionários é uma ferramenta poderosa, mas não é uma ferramenta interessante para a análise de séries não estacionárias. Por esta razão, o uso da transformada em ondaletas é preferível para a análise de séries temporais de fenômenos climáticos (Torrence e Compo, 1998; Goswami e Chan, 1999; Lima e Martins, 2004; Labat, 2008; Veersteegh, 2008; Spaeth, 2008; Wang *et al.*, 2011). O subitem 3.3.1 mostra uma descrição do método de análise de ondaletas, enquanto o 3.3.2 apresenta alguns estudos já realizados com essa metodologia e seus resultados.

3.3.1 - Ondaletas (*Wavelets*)

O princípio em que se baseia a análise de ondaletas é a divisão da variação dos sinais em dois domínios: escala (frequência ou período) e localização no tempo. Assim, com a análise de ondaletas, pode-se identificar alguma variação específica ocorrida em uma dada escala temporal e localização na série (Kang e Lin, 2007). Labat *et al.* (2005) ressaltaram que, por assumir a estacionariedade dos dados, a análise de Fourier implica na identificação de processos que ocorrem ao longo de toda a série de dados.

O método das ondaletas se assemelha ao método de Fourier (que decompõe as séries temporais em funções de senos e cossenos), pois decompõe a série temporal em funções ortogonais, com seu domínio tanto nos números reais quanto nos números complexos. Para ser considera-

da uma função de ondaleta, a função deve possuir média zero e ser localizada tanto no espaço temporal, quanto no espaço das frequências (Farge, 1992, *apud* Torrence e Compo, 1998).

Os métodos baseados em ondaletas podem são mais apropriados para a análise de séries temporais de variáveis hidrometeorológicas, o que se constitui em vantagem relativamente a outros métodos, como a análise de Fourier (Veerstegh, 2008; Labat, 2008; Santos *et al.*, 2013). A aplicação das ondaletas abrange as análises de séries temporais que contêm não estacionariedade de diversas frequências (Daubechies, 1990, *apud* Torrence e Compo, 1998) e, portanto, é apropriada para a análise de variabilidade de baixa frequência das vazões afluentes aos reservatórios brasileiros.

As funções de ondaletas mais utilizadas são o “chapéu mexicano” e a transformada de Morlet (Figura 3.2). A função do “chapéu mexicano” é derivada de uma função gaussiana, com valores reais, enquanto a transformada de Morlet é uma função complexa (Compagnucci *et al.*, 2014; Torrence e Compo, 1998). A principal diferença entre as duas funções é que o “chapéu mexicano” fornece uma resolução melhor no tempo, enquanto a transformada de Morlet gera mais precisão na frequência (Torrence e Compo, 1998). Para este estudo, foi utilizada a transformada de Morlet, pois essa função de ondaletas, segundo Compagnucci *et al.* (2014), é mais adaptada para capturar o comportamento oscilatório da onda e retorna tanto valores de amplitude quanto de fase, sendo, por conseguinte, a função mais utilizada para estudos hidrológicos dessa área (ver também Santos *et al.*, 2013).

Para realizar a análise de ondaletas, deve-se assumir que existe uma função de ondaletas $\psi_0(\eta)$ que depende de um fator de tempo adimensional (η). Exemplos das funções de ondaletas, incluindo a ondaleta de Morlet e do “chapéu mexicano”, encontram-se descritas na Tabela 3.1 e plotadas na Figura 3.2.

Devido ao tamanho finito das séries temporais, erros na definição das ondaletas podem ocorrer no começo e no final da série. Uma solução é preencher o início e o final da série com zeros antes de realizar a transformada, e, então, removê-los depois da transformada (já que se assume que os dados são cíclicos). Os chamados “cones de influência” são as regiões do espectro da ondaleta onde os efeitos da borda se tornam importantes. Se T é o número de dados da série temporal, somente períodos menores que $T/(2\sqrt{2})$ são consideradas significantes (fora do cone de influência) (Labat, 2010).

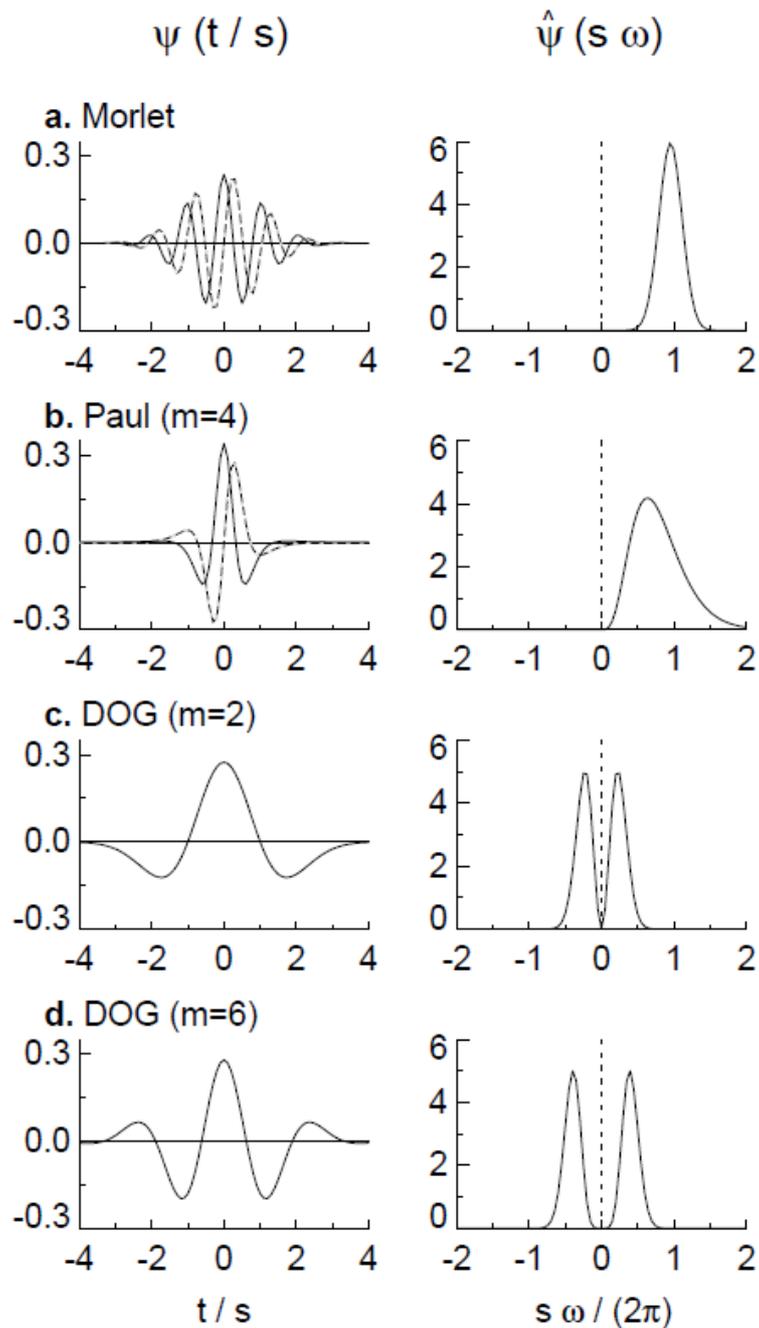


Figura 3.2 – Ondaletas básicas (Torrence e Compo, 1998).

Nota: a parte esquerda é composta pela parte real (linha sólida) e pela parte imaginária (linha tracejada) para as ondaletas no domínio do tempo. A parte direita é a ondaleta correspondente no domínio da frequência. A ondaleta (a) é a de Morlet, enquanto a (c) é a ondaleta do “chapéu mexicano”, gaussiana de grau 2.

A Tabela 3.1 mostra as funções de ondaletas no domínio do tempo ($\psi_0(\eta)$), da frequência ($\hat{\psi}_0(s\omega)$), o seu desdobramento no tempo (τ_s) e o comprimento de onda de Fourier (λ) para as funções principais de ondaletas.

Tabela 3.1 – Funções de ondaletas básicas – propriedades fundamentais.
Os valores constantes de ψ_0 e $\hat{\psi}_0$ garantem energia total como uma unidade (Torrence e Compo, 1998).

Ondaleta	$\psi_0(\eta)$	$\hat{\psi}_0(s\omega)$	Desdobramento no tempo (τ_s)	Comprimento de onda de Fourier (λ)
Morlet	$\pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}$	$\pi^{-1/4} H(\omega) e^{-(s\omega-\omega_0)^2/2}$	$\sqrt{2}s$	$\frac{4\pi s}{\omega_0 + \sqrt{2 + \omega_0^2}}$
Paul	$\frac{2^m i^m m!}{\sqrt{\pi(2m)!}} (1 - i\eta)^{-(m+1)}$	$\frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} H(\omega) (s\omega)^m e^{-s\omega}$	$s/\sqrt{2}$	$\frac{4\pi s}{2m+1}$
DOG	$\frac{(-1)^{m+1}}{\sqrt{\Gamma(m + \frac{1}{2})}} \frac{d^m}{d\eta^m} (e^{-\eta^2/2})$	$\frac{-i^m}{\sqrt{\Gamma(m + \frac{1}{2})}} (s\omega)^m e^{-(s\omega)^2/2}$	$\sqrt{2}s$	$\frac{2\pi s}{\sqrt{m + \frac{1}{2}}}$

Morlet: frequência = ω_0 ;

Paul: ordem = m e

DOG: derivado de uma função Gaussiana, para o “chapéu mexicano”, m=2.

Em seu guia prático para a transformada em ondaletas, Torrence e Compo (1998) listam os seguintes passos para a análise:

- 1) encontrar a transformada de Fourier para a série temporal;
- 2) escolher um tipo de função de ondaleta e as escalas a serem analisadas;
- 3) para cada escala, construir uma ondaleta normalizada;
- 4) encontrar a ondaleta naquela escala;
- 5) determinar o cone de influência e o comprimento de onda de Fourier naquela escala;
- 6) após repetir os passos 3 a 5 para todas as escalas, remover os preenchimentos e plotar os espectros de onda das ondaletas;
- 7) assumir um ruído de Fourier em cada escala, e, então utilizar a função qui-quadrado para encontrar o contorno com 95% de significância.

Torrence e Compo (1998) explicam que a distribuição utilizada para encontrar o nível de significância desejado deve ser a função qui-quadrado, pois se demonstrou que o espectro da ondaleta segue a função de Fourier. Como os componentes da análise de Fourier são normalmente distribuídos, os componentes da ondaleta também são normalmente distribuídos, então a função indicada para o cálculo do intervalo de confiança deve ser a função qui-quadrado.

Para exemplificar, Santos *et al.* (2013), geraram uma série composta pelas frequências 7,5, 30, 60 e 120 Hz (Figura 3.3a), o seu espectro de potências (Figura 3.3b) e o espectro global de potências (Figura 3.3c). A parte (c) da figura mostra o espectro global de potências que seria um espectro similar ao fornecido pela análise clássica de Fourier. No espectro de potências (b), pode-se notar em que período (tempo) cada frequência é significativa, mostrada pelos contornos pretos da figura. Dessa maneira, a análise de ondaletas difere da análise de Fourier por mostrar quando cada sinal é significativo na série.

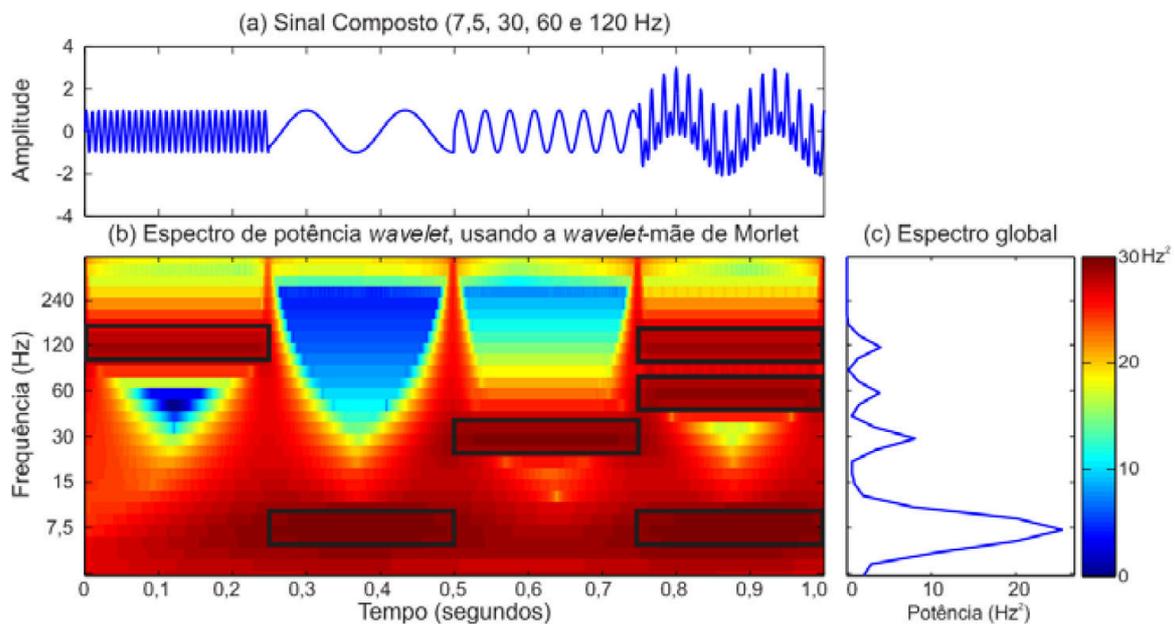


Figura 3.3 – (a) Sinal composto com as frequências de 7,5, 30, 60 e 120 Hz; (b) Espectro de potência da ondaleta; e (c) Espectro de potência global da ondaleta para este sinal (Santos *et al.*, 2013).

3.3.2 - Estudos Anteriores

Compagnucci *et al.* (2014) exploraram, por meio da análise de ondaletas, a influência da irradiação solar no ciclo hidrológico da América do Sul identificaram que a correlação entre esses fatores não é tão grande no período de oscilação solar de aproximadamente 11 anos (quase decenal), mas é significativa no período de 30 anos (multidecenal). Os autores ressaltaram que as vazões afluentes a um rio são indicadores climáticos valiosos, já que, quando não influenciados por forças antropogênicas (como mudanças no uso do solo), sua variabilidade se dá, principalmente, devido às mudanças na precipitação e na temperatura da bacia.

Lima e Martins (2004) utilizaram a transformada em ondaletas para identificar as correlações entre os espectros de potência das ondaletas das vazões anuais no semi-árido brasileiro e das anomalias na temperatura da superfície dos oceanos, identificadas por alguns índices climáticos dos oceanos Pacífico e Atlântico. Nessa análise, alguns dos postos estudados mostraram evidências de correlação com os índices do oceano Pacífico, mas não do oceano Atlântico. Na análise de variabilidade das vazões, os autores mostraram a evolução temporal do espectro de potência da ondaleta dos postos estudados, como se observa na Figura 3.4.

Santos e Morais (2013), por meio da análise de ondaletas, identificaram três padrões de distribuição das variabilidades mensais da precipitação na bacia do rio São Francisco (região nordeste do Brasil). Em uma das áreas, foi identificada apenas a variabilidade anual das precipitações. Em outra, foi identificada mais de uma variabilidade mensal e na última foi encontrada uma mistura de padrões de variabilidade de precipitação.

O espectro da ondaleta é comumente mostrado como na Figura 3.4, na qual pode-se verificar o objeto da análise de ondaletas, no caso, os valores da vazão média do posto Orós. Na parte (b), encontra-se o espectro da ondaleta de potência normalizada utilizando a ondaleta escolhida (no caso, a ondaleta de Morlet), em que o eixo vertical é o período, o eixo horizontal é o tempo. Ainda na parte (b), os contornos em preto incluem regiões de significância acima de 95%, usando um espectro de fundo com ruído branco ($\text{lag}1=0$) e a curva tracejada demarca o cone de influência da ondaleta, em que os pontos fora do cone são pontos em que a série foi preenchida com “zeros” em anos sem dados (antes do início da série ou depois do seu fim). Na parte (c) da figura, encontra-se a potência média da ondaleta entre dois períodos (no caso da Figura 3.4, de 2 a 6 anos), em que se pode verificar o “perfil” do espectro da ondaleta. A linha tracejada – parte (c) – é o nível de significância de 95 % utilizando o mesmo espectro de fundo de (b).

No trabalho de Lima e Martins (2004), apresentado na Figura 3.4, na parte (b), pode-se verificar que há fortes variâncias na banda 2 a 4 anos para os períodos de 1915 a 1925 e 1970 a 1990, e na banda de 8 a 16 anos para os períodos de 1925 a 1930 e 1970 a 1990. Já na parte (c) da mesma figura, pode-se verificar que a variância média não é constante ao longo da série, sendo acima do nível de significância por três vezes no período considerado.

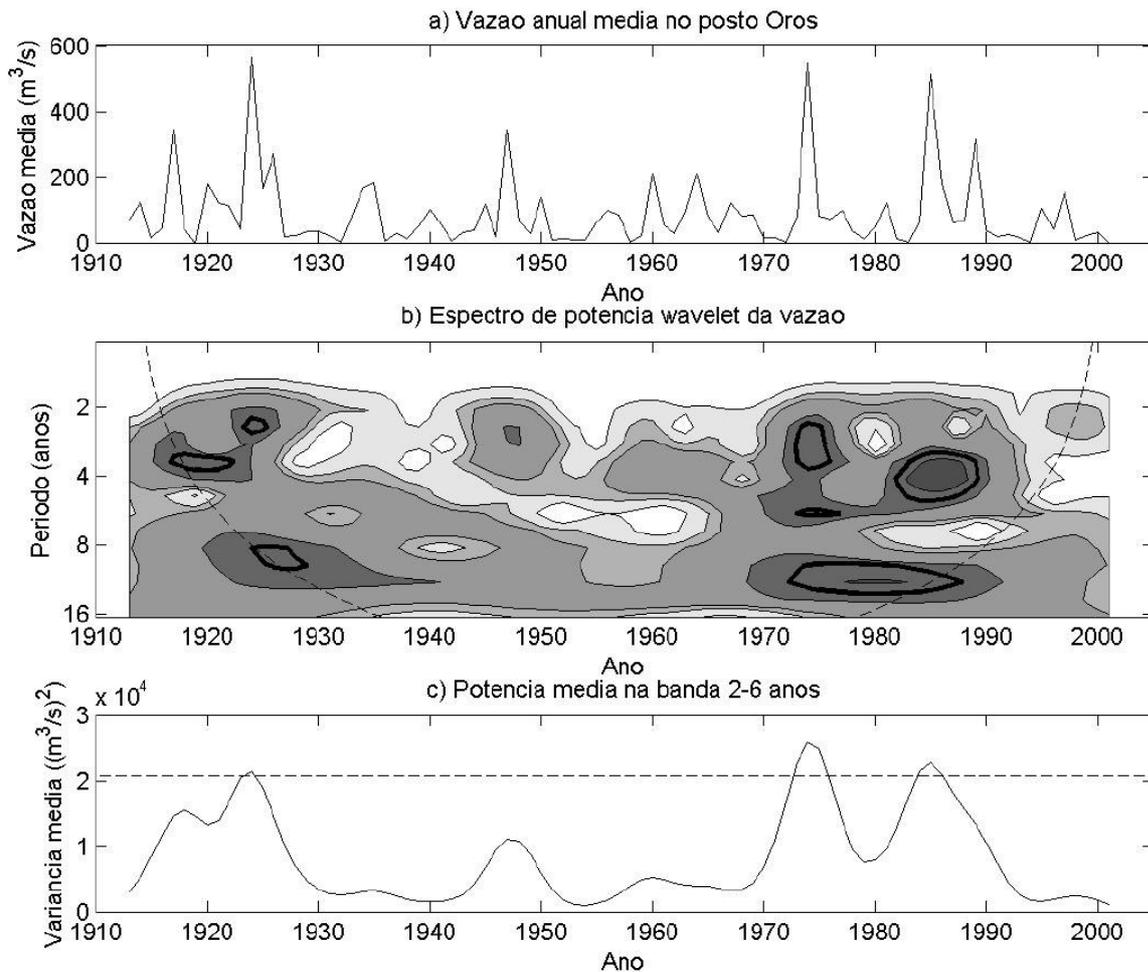


Figura 3.4 – (a) Vazão anual média no posto Orós. (b) Espectro da ondaleta de potência normalizada utilizando a ondaleta de Morlet. (c) Potência wavelet média na banda 2-6 anos (Lima e Martins, 2004).

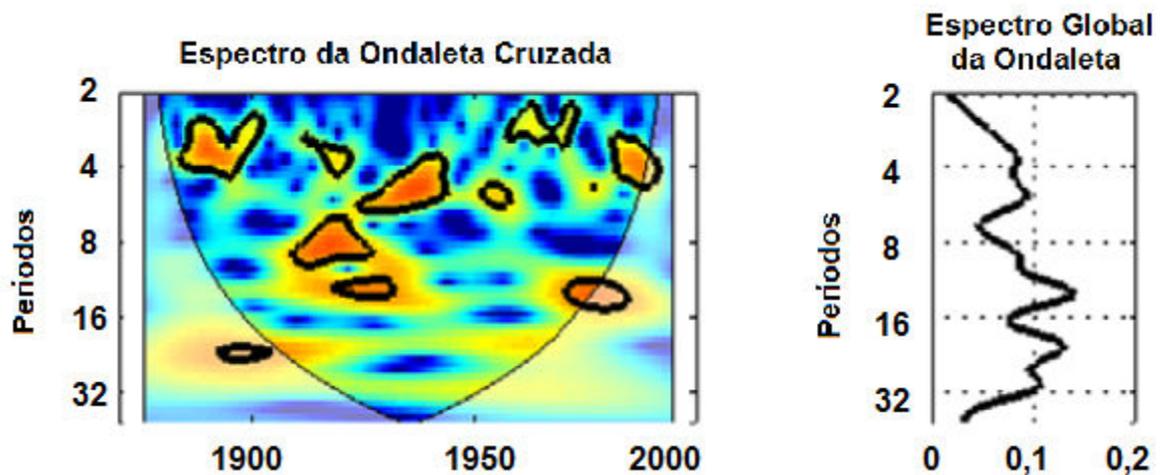


Figura 3.5 – Espectro da ondaleta cruzada entre o índice NIÑO 3.4 e a vazão da água doce continental da América do Sul (Labat, 2010, adaptado).

Os contornos pretos dos espectros das ondaletas são os níveis de significância de 95% usando um espectro de fundo de ruído branco ou vermelho. Segundo Torrence e Compo (1998), pôde-se utilizar um modelo simples para o ruído vermelho, que é função processo autorregressivo univariado de ordem um (lag-1). O lag-1 é a correlação entre a série e ela mesma, mas deslocada de uma unidade de tempo.

Além da análise simples de ondaletas, existe também a análise cruzada de ondaletas, que identifica o grau de similaridade entre dois sinais, quantificando o grau de relacionamento entre esses sinais no tempo (Labat, 2005).

Labat (2010) realizou a análise cruzada de ondaletas (“*cross wavelet analysis*”) entre a vazão anual de água doce continental dos cinco continentes não congelados e cinco índices climáticos selecionados para seu estudo. A análise cruzada de ondaletas considera que, para cada conjunto tempo-frequência, o valor da potência da ondaleta cruzada é a multiplicação da potência de ondaleta de um sinal pela potência da ondaleta do outro sinal analisado. Assim, para cada conjunto vazão X índice, tem-se o espectro de pontos de maior influência entre eles. Em seu estudo, conforme a Figura 3.5, o autor verificou que, para as vazões da América do Sul, a variabilidade na banda de 2 a 8 anos se relaciona com as variações do Oceano Pacífico, representadas pelo índice NIÑO 3.4, assim como a banda de 16 a 30 anos.

Silva *et al.* (2013) aplicaram a análise cruzada de ondaletas entre a precipitação e a vazão mensal da bacia do Alto São Francisco, que mostrou que essas séries apresentam correlação entre si e uma variabilidade de baixa frequência anual das séries hidrometeorológicas.

A análise de ondaleta é bastante utilizada em outras modelagens hidroclimatológicas, como na previsão e simulação de variáveis temporais. Mehrotra e Sharma (2007) utilizaram a análise de ondaletas para simular a geração de precipitação diária em alguns sítios que apresentavam variabilidade de baixa frequência e concluíram que o modelo foi capaz de reproduzir as principais características temporais e espaciais da série de precipitação. Wang *et al.* (2011) também geraram séries temporais sintéticas a partir da análise de ondaletas, em que desconstruíram a série dividindo-a em ondaletas e, a partir de um algoritmo de reconstrução da série, geraram uma série sintética que mostrou as características de dependência e as propriedades estatísticas semelhantes às da série original, de modo que as séries simuladas apresentaram variabilidades de baixa frequência semelhantes às das séries originais.

A análise de ondaletas também pode ser utilizada na previsão de séries temporais. Kisi (2011) sugeriu uma regressão por ondaletas para prever a cota do rio (utilizada para o cálculo da vazão afluente), que se apresentou com desvios padrões menores do que a previsão por meio de redes neurais artificiais. Santos e Silva (2014) utilizaram a análise de ondaletas juntamente com a metodologia de redes neurais artificiais para previsão de vazões com 1, 3, 5 e 7 dias baseadas nas variabilidades de baixa frequência das séries originais, que geraram melhores resultados que a análise usual de redes neurais para todas as situações testadas pelos autores.

3.4 - VARIABILIDADE DE BAIXA FREQUÊNCIA E OS FENÔMENOS CLIMÁTICOS

Frequentemente, os estudos da variabilidade de baixa frequência são realizados por meio de correlações entre os índices climáticos e as vazões afluentes a um rio, ou por meio da correlação entre as forçantes climáticas e a precipitação que incide na bacia hidrográfica. Segundo Alves (2012), a variabilidade temporal dos fenômenos climáticos condiciona o regime de precipitação e evaporação em uma bacia hidrográfica e, desta forma, determina os padrões de variação das vazões.

Em escala global, um dos principais fenômenos climáticos utilizados em estudos hidroclimáticos é o El Niño Oscilação Sul (ENSO) (por exemplo: Núñez *et al.*, 2013; Merz *et al.*, 2014; Renom *et al.*, 2011; Alves, 2012), que é representado por alguns índices climáticos, como NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 4, NIÑO 3.4 – que representam a temperatura na superfície do mar (TSM) de alguns locais no oceano Pacífico –, MEI (*Multivariate ENSO Index*), ONI (*Oceanic Niño Index*) e SOI (*Southern Oscillation Index*). O subitem 3.4.1 descreve o fenômeno ENSO, assim como indica alguns trabalhos que mostram sua influência no mundo.

Outros índices climáticos também são utilizados em modelagens estatísticas de fenômenos hidrológicos. O PDO (*Pacific Decadal Oscillation*) encontra-se descrito no subitem 3.4.2, enquanto os outros índices também utilizados neste trabalho – AMO (*Atlantic Multidecadal Oscillation*), NAO (*North Atlantic Oscillation*) e AO (*Arctic Oscillation*) – são descritos nos subitens 3.4.3, 3.4.4 e 3.4.5, respectivamente.

3.4.1 - El Niño Oscilação Sul (ENSO)

O ENSO é uma perturbação interanual do sistema climático, caracterizada por mudanças dos ventos alísios e variação na temperatura e na pressão das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial, com impactos diversificados no clima global (vide Philander, 1990; Diaz e Markgraf, 2000; Trenberth e Caron, 2000; NOAA, 2014, Amarasekera *et al.*, 1997). Os fenômenos conhecidos como El Niño e La Niña representam extremos opostos do ciclo do ENSO.

Para a classificação do fenômeno El Niño, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região leste-central equatorial do Oceano Pacífico Sul deve aumentar pelo menos 0,5°C durante um período mínimo de três meses. Já o fenômeno conhecido por La Niña é o processo inverso, ou seja, de diminuição da temperatura em ao menos 0,5°C durante o mesmo período. Os efeitos do El Niño na América do Sul podem ser visualizados na Figura 3.6.

Para monitorar as alterações da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico e o fenômeno El Niño/La Niña, foram criados quatro índices climáticos: NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 4 e NIÑO 3.4 (Equatorial Currents and El Niño, 2014). Como se pode observar na Figura 3.7, as regiões referentes a cada índice do El Niño são:

- NIÑO 1+2: 0 a 10°S e 90 a 80°W;
- NIÑO 3: 5°S a 5°N e 150 a 90°W;
- NIÑO 4: 5°S a 5°N e 160°E a 150°W e
- NIÑO 3.4: 5°S a 5°N e 170 a 120°W.

Neste trabalho, dentre esses índices, será estudado apenas o NIÑO 3.4, por ser o mais representativo, sendo assim, o mais utilizado em outros estudos da área (Labat, 2010; Alves, 2012; Barreiro *et al.*, 2014). Os valores médios anuais desse índice de 1870 a 2013 encontram-se na Figura 3.8.



Figura 3.6 – Efeitos do fenômeno El Niño na América do Sul (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007, adaptado).

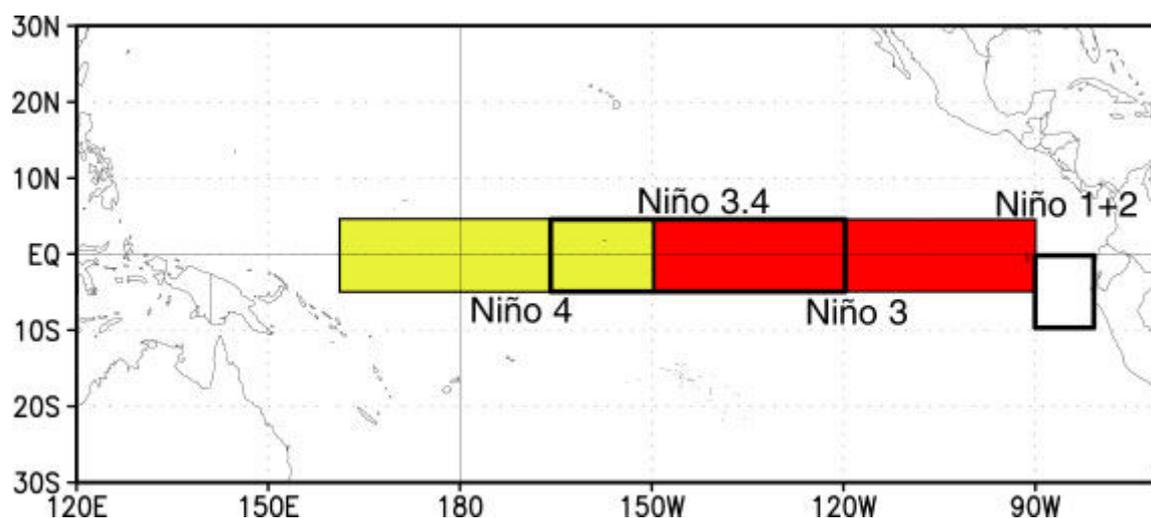


Figura 3.7 – Definição das regiões do Pacífico equatorial para o monitoramento do El Niño (Equatorial Currents and El Niño, 2014).

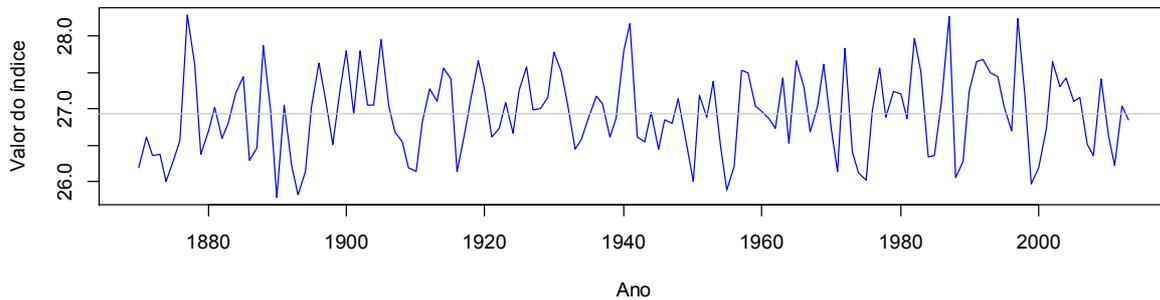


Figura 3.8 – Série histórica do índice NIÑO 3.4 (1870 a 2013).

Nota: a linha azul representa o valor do índice em cada ano, enquanto a linha cinza representa a média dos valores do índice ao longo de toda sua série histórica.

Além desses quatro índices, outros índices climáticos também auxiliam na quantificação do fenômeno ENSO. Neste trabalho, serão estudados os índices MEI (*Multivariate ENSO Index*), ONI (*Oceanic Niño Index*) e SOI (*Southern Oscillation Index*). O MEI (Figura 3.9) é calculado pela componente principal de seis variáveis observadas no oceano Pacífico: pressão atmosférica no nível do mar, componente zonal e meridional do vento na superfície do mar, temperatura da superfície do mar, temperatura do ar na superfície do mar e insolação solar. O ONI (Figura 3.10) é a média móvel de três meses das anomalias de temperatura na região do índice NIÑO 3.4. Ao se comparar a Figura 3.9 com a Figura 3.10, nota-se que ambas apresentam comportamentos similares, o que é esperado, já que ambas são representações de índices que quantificam o fenômeno ENSO. Já o índice SOI (Figura 3.11) dá uma indicação do desenvolvimento e intensidade dos eventos do ENSO no Oceano Pacífico.

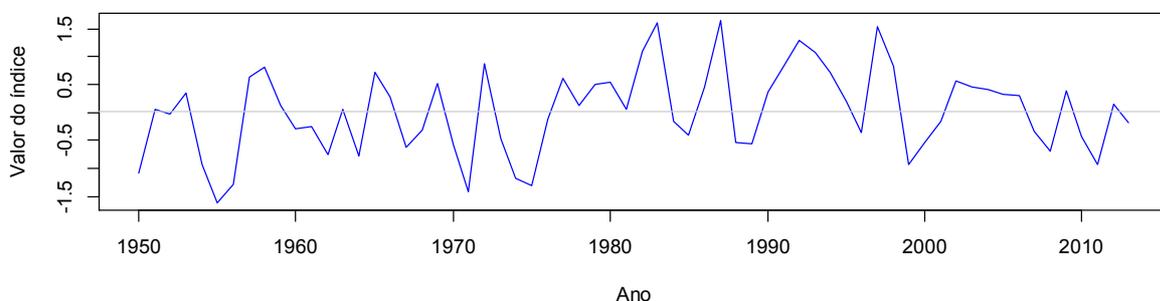


Figura 3.9 – Série histórica do índice MEI.

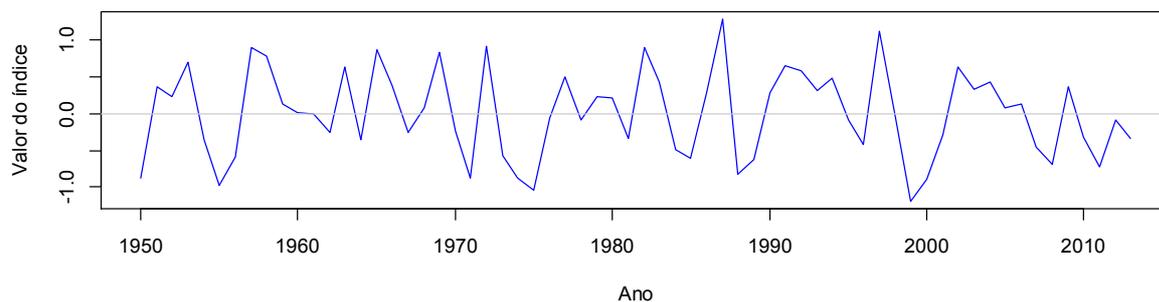


Figura 3.10 – Série histórica do índice ONI (1950 a 2013).

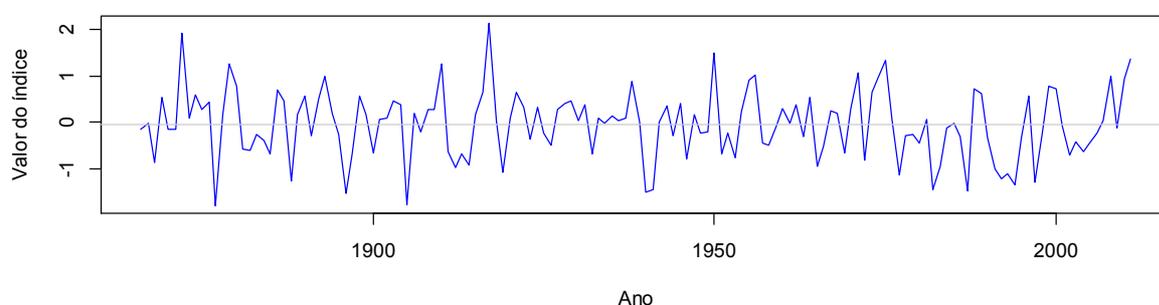


Figura 3.11 – Série histórica do índice SOI (1866 a 2011).

Nota: Para as figuras acima, a linha azul representa o valor do índice em cada ano, enquanto a linha cinza representa a média dos valores do índice ao longo de toda sua série histórica.

Na Figura 3.12, pode-se observar que os fenômenos El Niño/La Niña podem ter diferentes dimensões, o que leva a influências diferentes no clima e na hidrologia dos locais por eles afetados. Nos últimos anos, por exemplo, pode-se observar que o fenômeno da La Niña (abaixo da linha de significância inferior) está mais frequente que o El Niño, o que pode influenciar na variabilidade de baixa frequência das vazões dos rios brasileiros.

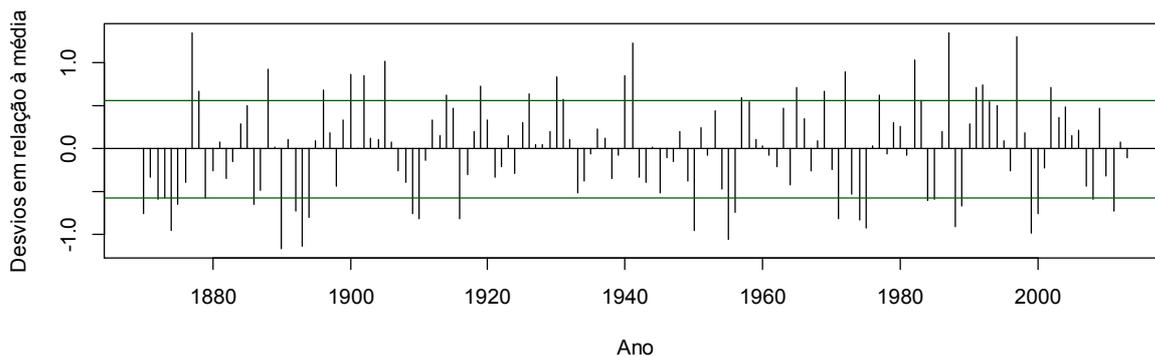


Figura 3.12 – Anomalias do índice NIÑO 3.4 de 1870 a 2013.

Nota: como parâmetro de significância, foi utilizado o desvio padrão da série amostral (1870-2013).

O fenômeno El Niño ocorre em intervalos irregulares de 2 a 7 anos, enquanto a La Niña, em intervalos também irregulares de 3 a 5 anos.

Merz *et al.* (2014) comentaram que a relação entre as oscilações climáticas de larga escala e as variáveis hidroclimáticas está presente em muitos estudos. O ENSO, por exemplo, exerce influência em várias partes do mundo.

Barreiro *et al.* (2014) citaram vários trabalhos que mostram que os subtropicais são fortemente influenciados pelo ENSO, o que pode mudar as condições do oceano brasileiro e, assim, alterar a persistência de anomalias atmosféricas na América do Sul. Barreiro (2010) identifica que, durante eventos de El Niño, os oceanos do Brasil e do Uruguai tendem ao aumento de temperatura por meio de mudanças nos padrões dos fluxos de calor atmosféricos, alterando as anomalias do clima na região Sul e Sudeste do País.

Renom *et al.* (2011) constataram que as mudanças na evolução do El Niño depois de 1976 podem ter desempenhado um papel na alteração da relação entre eventos de temperatura extrema no Uruguai e a circulação atmosférica. Labat (2008) mostrou que a oscilação de 4 a 6 anos das vazões dos rios Andinos pode ser diretamente associada ao ENSO.

3.4.2 - Oscilação Decenal do Pacífico (PDO)

A Oscilação Decenal do Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation* – PDO) pode ser definida como a primeira componente principal da variabilidade da temperatura na superfície do mar do

oceano Pacífico (Mantua *et al.*, 1997) e é medida pela anomalia da intensidade da PDO em relação aos seus valores médios (Alves, 2012).

Como se pode observar na Figura 3.13, os valores do índice PDO possuem duas fases: uma com temperaturas acima da média (vermelho) e outra representada por temperaturas abaixo da média (azul). Pode-se observar que existe uma inversão de polaridade neste índice nos anos de 1925 (temperaturas acima da média), 1947 (temperaturas abaixo da média) e 1977 (temperaturas acima da média novamente) (Mantua *et al.*, 1997).

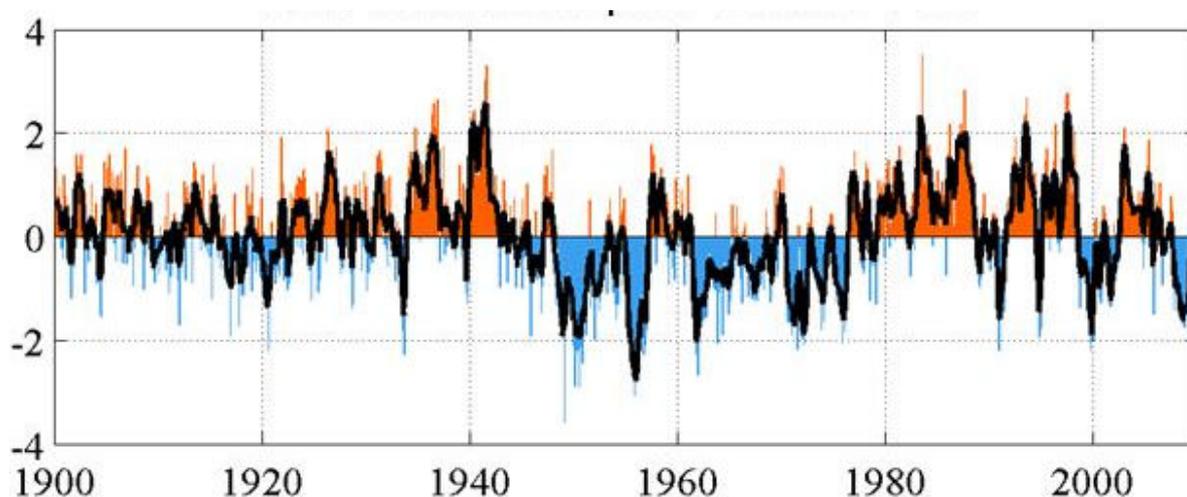


Figura 3.13 – Valores mensais para o índice PDO. De 1900 a setembro de 2009 (*Pacific Decadal Oscillation (PDO) Graphics*, 2014, adaptado).

Nuñez *et al.* (2013) analisaram a relação entre a variabilidade multitemporal, as mudanças do regime dos índices PDO e ENSO e o regime de vazões e precipitações nas bacias andinas na região norte e central do Chile. Nessa região, os autores não detectaram correlação entre a mudança de fase dos índices e a precipitação, mas detectaram a relação entre as trocas de fase dos índices climáticos e as vazões da região, que também dependiam de sua latitude. Em suas conclusões, os autores enfatizaram que a identificação dessas relações é importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, como, por exemplo, na alocação de recursos para projetos de drenagem e de irrigação. Nuñez *et al.* (2013), em sua pesquisa, mostraram que a variabilidade de baixa frequência do clima do Pacífico poderia ser significativamente útil na análise hidrológica para a gestão da água, de modo a melhorar a previsão sazonal, se os índices climáticos fossem incluídos como preditores significativos.

3.4.3 - *Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO)*

O índice Oscilação Multidecenal do Atlântico (*Atlantic Multidecadal Oscillation – AMO*) é a representação de uma série continuada de mudanças de longa duração na temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico Norte, com alterações entre frio e quente em fases que duram entre 20 e 40 anos (ver Figura 3.14) e apresentam diferença entre os extremos de aproximadamente 0,6°C (1°F) (NOAA, 2014).

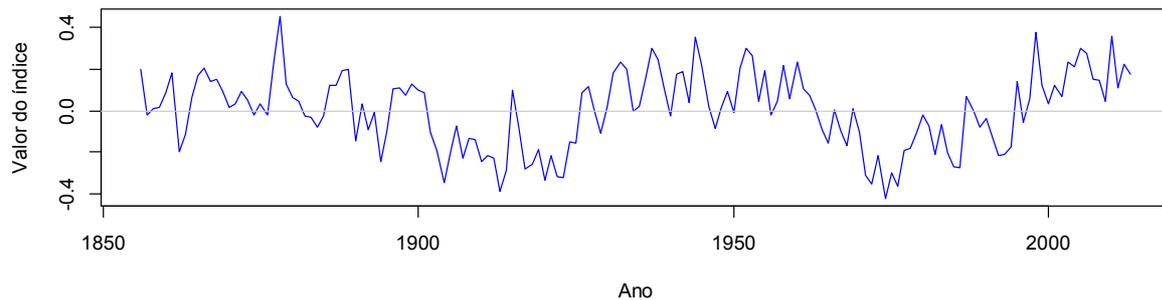


Figura 3.14 – Série histórica do índice AMO (1856 a 2013).

Barreiro *et al.* (2014) mostraram que o índice AMO tem influência na precipitação da América do Sul, mais precisamente, na parte norte da Argentina. Seager *et al.* (2010) mostraram que o AMO apresenta um papel dominante na variabilidade de baixa frequência do sudeste da América do Sul. Além disso, Timilsena *et al.* (2009), ao realizar um estudo na bacia do rio Colorado (Estados Unidos da América), identificaram que, quando o AMO está frio e o PDO quente, as vazões da bacia encontram-se acima da média.

3.4.4 - *North Atlantic Oscillation (NAO)*

A Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation – NAO*) é baseada na diferença de pressão da superfície do nível do mar entre o alto Subtropical e o baixo Subpolar no oceano Atlântico norte. Ambas as fases do NAO estão associados a mudanças na intensidade e localização da corrente de ar e tempestades do Atlântico Norte e em modulações de grande escala dos padrões normais de calor e de umidade, o que, por sua vez, resulta em mudanças de temperatura e padrões de precipitação, se estendendo para o leste da América do Norte, para a Europa ocidental e central (NOAA, 2014).

O índice NAO alterna de intensidade e posição ao longo de períodos mensais e anuais. Essas flutuações variam em sua duração e força de um período para o outro, o que torna difícil sua utilização em previsões climáticas detalhadas (NOAA, 2014). A série histórica do índice NAO está representada na Figura 3.15.

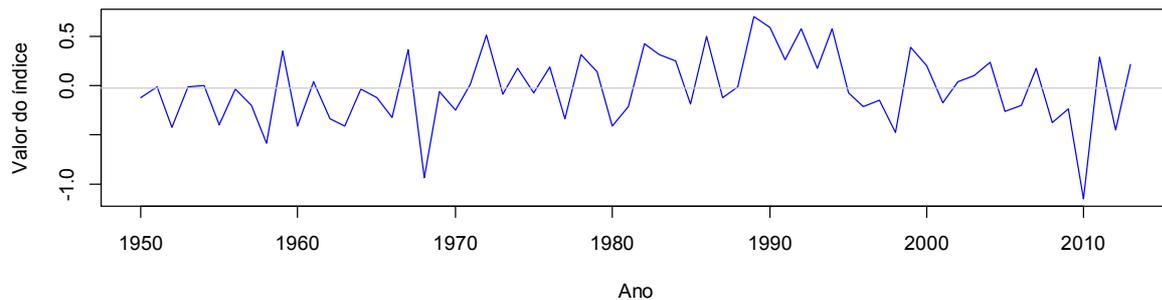


Figura 3.15 – Série histórica do índice NAO (1950 a 2013).

Labat (2008) realizou uma análise de ondaletas nas vazões de grandes rios nos cinco continentes não congelados e identificou que o índice NAO é correlacionado com as descargas de água doce na África e na Europa, mas também um pouco relacionado com as descargas das Américas do Sul e do Norte. Na continuação de seus estudos, Labat (2010) identificou que o índice NAO mostra impacto na variabilidade de baixa frequência na banda de 4 a 16 anos na descarga de água doce dos cinco continentes não congelados.

3.4.5 - *Arctic Oscillation (AO)*

A Oscilação do Ártico (*Arctic Oscillation – AO*) é caracterizada por ventos circulando em sentido anti-horário na região Ártica em torno de 55 graus de latitude norte. Quando o índice AO está na fase positiva, um anel de ventos fortes circulando em torno do Polo Norte atua para confinar o ar mais frio para as regiões polares. Na fase negativa, este cinto de ventos torna-se mais fraco e mais distorcido, permitindo uma penetração mais fácil para o sul de massas de ar mais frias, massas de ar árticas e aumento de tempestades nas latitudes médias (NOAA, 2014). A série histórica do índice AO está representada na Figura 3.16.

A Oscilação do Ártico é um índice (variável com o tempo sem periodicidade particular) do padrão dominante da pressão do nível do mar. A AO aparenta ser a causa para muitas das

recentes mudanças que tem ocorrido no ártico. Seus efeitos não estão restritos apenas ao Ártico, mas também aparenta ser uma importante fonte de variabilidade do hemisfério Norte como um todo. A Oscilação do Ártico é descrita como um “padrão de gangorra” em que a pressão atmosférica nos polos e em latitudes médias flutua entre fases positivas e negativas. A fase positiva do índice está relacionada a tempestades oceânicas mais para o norte do Atlântico Norte, trazendo tempo mais úmido para o Alasca, Escócia e Escandinávia e tempo mais seco para áreas como Califórnia e Espanha (NOAA, 2014).

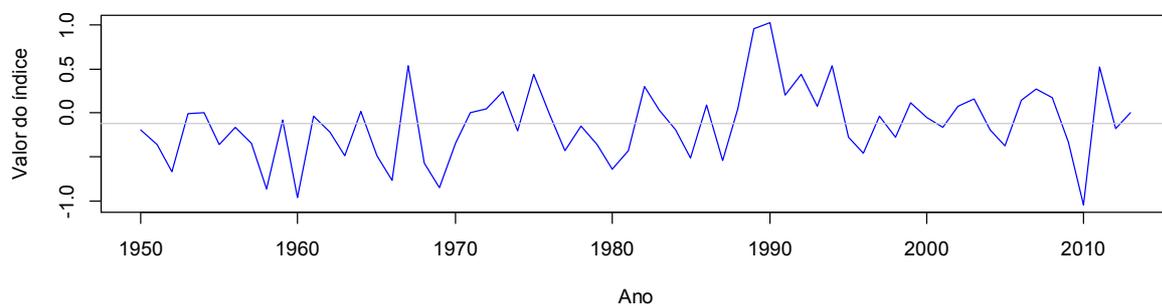


Figura 3.16 – Série histórica do índice AO (1950 a 2013).

Labat (2008), em seus estudos, identificou que o índice AO é correlacionado com as descargas de água doce na Europa e na América do Norte. Assim como o índice NAO, o índice AO se mostrou, em Labat (2010), correlacionado, na banda de 4 a 15 anos, com as vazões afluentes dos cinco continentes não congelados.

4 - METODOLOGIA

Com o objetivo de identificar as variabilidades de baixa frequência nas vazões afluentes aos reservatórios brasileiros em diversas bandas, foi utilizada a análise de ondaletas nas séries de energias afluentes às 4 regiões do SIN, nas vazões afluentes aos 156 principais reservatórios brasileiros e em 8 índices climáticos.

4.1 - REGIÃO DE ESTUDO E DADOS HIDROCLIMÁTICOS

Como o objetivo desses estudos é identificar a variabilidade de baixa frequência nas vazões afluentes dos reservatórios do Operador Nacional do Sistema (ONS), os principais dados utilizados são advindos dessa fonte.

Segundo ONS (2014), o Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema de produção e transmissão da energia elétrica no Brasil, predominantemente constituído por usinas hidrelétricas, de grande porte e com múltiplos proprietários, de todas as regiões do Brasil e apenas 1,7% da energia elétrica requerida pelo País encontra-se fora do SIN (principalmente na região amazônica).

As séries de vazões médias mensais naturalizadas do SIN são definidas pelo ONS (2014) como a “vazão que ocorreria numa seção do rio, se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte – tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimento urbano, rural e industrial)”.

O ONS disponibiliza as séries de vazões naturalizadas tanto mensais quanto diárias. Neste trabalho, serão avaliadas apenas as vazões médias anuais naturalizadas, pois o uso de vazões naturalizadas elimina as influências antropogênicas, corroborando com o foco nas influências climáticas nas vazões afluentes aos reservatórios estudados. A Figura 4.1 mostra um mapa com a localização das 156 usinas estudadas.

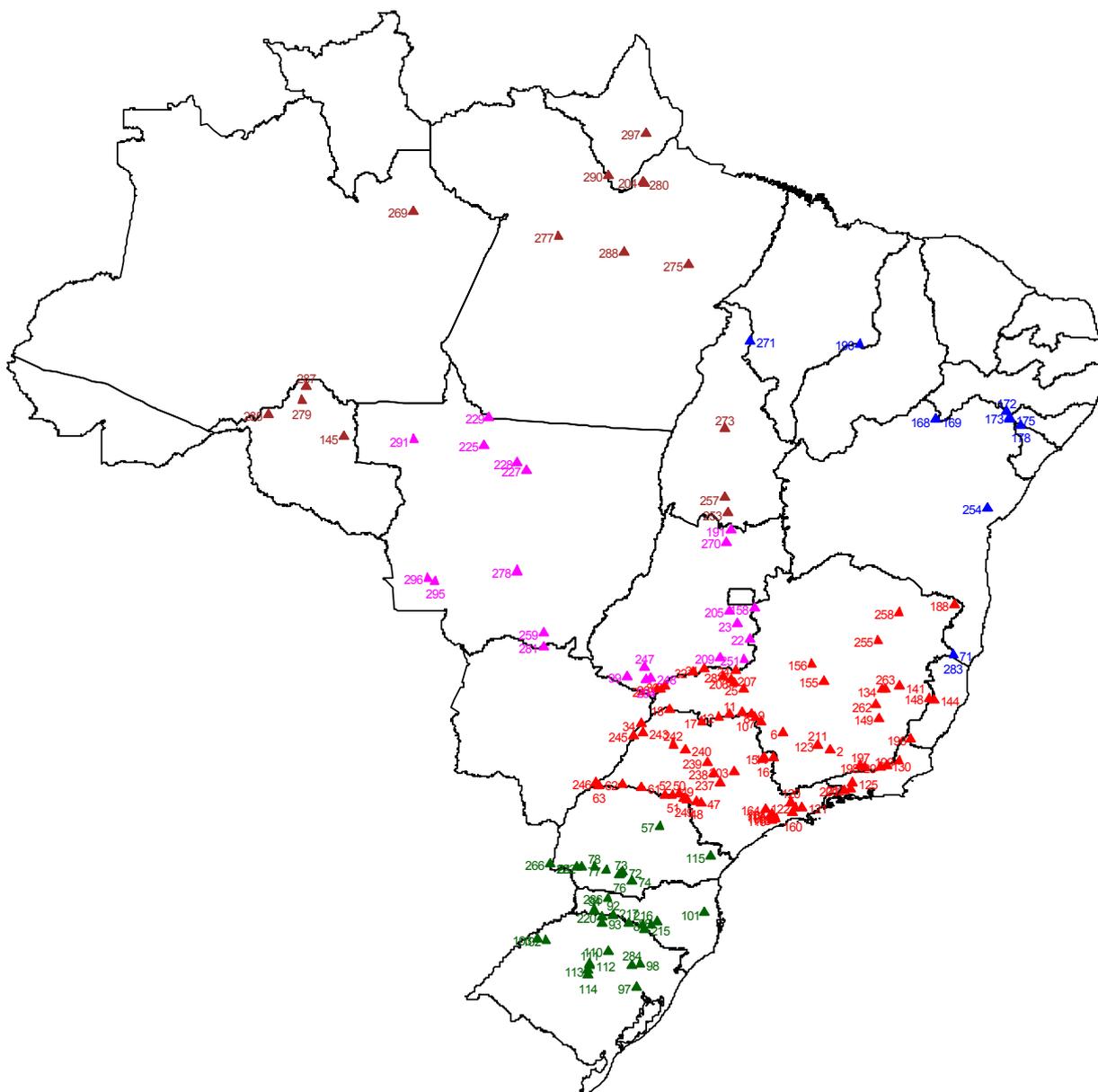


Figura 4.1 – Usinas do Sistema Interligado Nacional – SIN, operadas pelo ONS.
 Nota: a numeração das usinas encontra-se na Tabela A.1 do Apêndice A.

A influência da variabilidade climática nos padrões de variação de vazões dos reservatórios será avaliada a partir de dados de 8 índices climáticos, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Índices climáticos utilizados.

Índice	Nome
NIÑO 3.4	<i>Niño 3.4 SST Index (SST 5N-5S,170W-120W)</i>
PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation</i>
AMO	<i>Atlantic multidecadal Oscillation (SST Index)</i>
SOI	<i>Southern Oscillation Index</i>

Índice	Nome
MEI	<i>Multivariate ENSO Index</i>
ONI	<i>Oceanic Niño Index</i>
NÃO	<i>North Atlantic Oscillation</i>
AO	<i>Arctic Oscillation</i>

4.2 - ANÁLISE DE ONDALETAS

A análise de ondaletas foi escolhida como a metodologia a ser utilizada neste trabalho devido à recomendação de diversos autores quanto à sua utilização para análise não estacionária de variabilidade de baixa frequência (Lima e Martins, 2004; Veerstegh, 2008; Labat, 2008; Kang e Lin, 2007; Labat *et al.*, 2005; Compagnucci *et al.*, 2014; Torrence e Compo, 1998).

Para auxiliar o uso da modelagem em ondeletas, Torrence e Compo (1998) disponibilizaram um programa de análise de ondaletas (script para ser utilizado no MATLAB), que está disponível em <http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/> e foi utilizado como base para realização deste trabalho. Também foram utilizados os pacotes “mapprools” (Bivand e Lewin-Koh, 2014) e “biwavelet” (Gouhier, 2014), do *software* R.

Para realizar a análise espacial das variabilidades de baixa frequência das vazões afluentes aos principais reservatórios do Brasil, foi realizada a análise de ondaletas nos 156 principais reservatórios, identificando-se, em cada banda, quais reservatórios apresentam espectros globais da ondaleta (*global wavelet spectrum*) acima do nível de significância de 95%. Para cada banda (2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos, 8 a 12 anos, 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos, e 24 a 32 anos), foram identificados e locados os reservatórios que, numa média das potências de todos os anos analisados (1931 a 2012), apresentaram, ao menos em uma escala, potência maior do que a significativa.

Após a análise do espectro global das potências da ondaleta, procedeu-se para a análise temporal das potências. Nessa fase, para cada banda analisada e cada reservatório analisado, foram identificados os anos em que a potência média na banda apresentou-se maior do que o nível de significância de 95%.

A análise de ondaletas foi, então, aplicada para os índices climáticos, de forma a se identificar os anos em que os índices apresentam variabilidade climática de baixa frequência em cada banda.

Concluídas as análises de ondaletas (vazões afluentes aos reservatórios e índices climáticos), com o mapeamento dos reservatórios que apresentam variabilidades de baixa frequência em cada ano estudado, foram identificados, para cada um dos índices, os anos em que estes também apresentam tal variabilidade, com o objetivo de analisar a influência dos índices das variabilidades das vazões afluentes aos reservatórios. A Figura 4.2 mostra a sequência de estudos realizados.

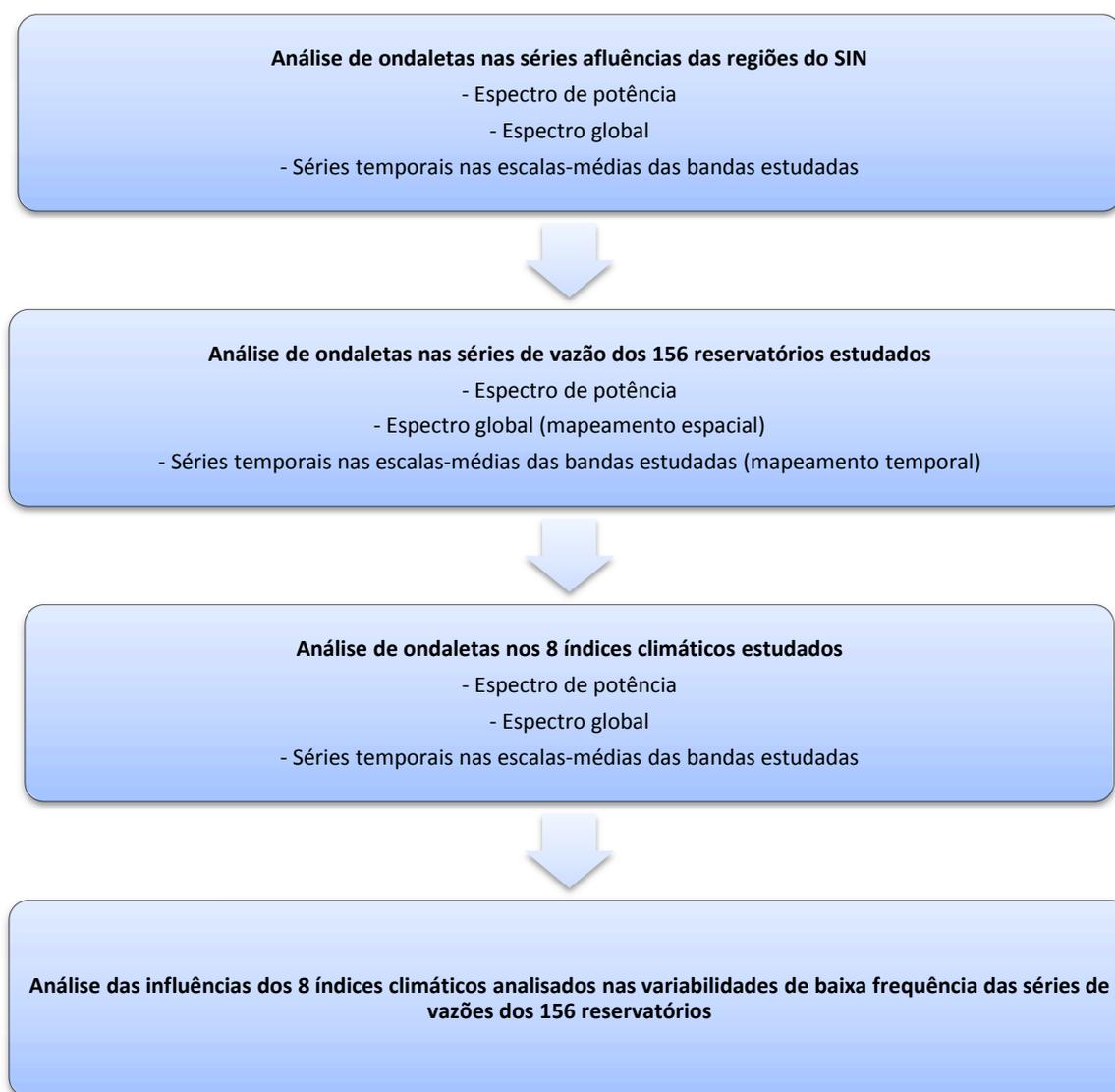


Figura 4.2 – Passo a passo dos estudos realizados.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma a facilitar o entendimento dos procedimentos e metodologias adotados, serão apresentados, primeiramente, os resultados da análise de ondaletas para as afluições das regiões do SIN, e, posteriormente, as análises espaciais das variabilidades de baixa frequência nos principais reservatórios do território brasileiro, assim como a análise de ondaletas para os índices climáticos.

Nos subitens de 5.1 a 5.4 são apresentadas as análises das ondaletas para as regiões Norte, Nordeste, Sul e Sudeste, respectivamente, seguido por um resumo dos resultados, dado no subitem 5.5. No subitem 5.6 é apresentada a análise de ondaletas apenas da UHE Furnas (região Sudeste), de modo exemplificativo da análise de ondaletas em cada um dos reservatórios. Nos Apêndices B a E, é possível encontrar essa mesma análise para outros quatro reservatórios, um em cada região do Brasil: Itaipu, na região Sul; Tucuruí, na região Norte; Sobradinho, na região Nordeste, e Serra da Mesa, na região Centro-Oeste. Esses reservatórios foram escolhidos por serem os reservatórios de maior potência em sua região.

Além disso, nos apêndices F a L, pode-se encontrar a análise das ondaletas dos índices climáticos PDO, AMO, SOI, MEI, ONI, NAO e AO, enquanto a análise de ondaletas do índice NIÑO 3.4 pode ser vista no subitem 5.9.

5.1 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORTE DO SIN

A série de afluições da região Norte do SIN encontra-se na Figura 5.1, o espectro de potência e para a ondaleta de Morlet aplicada à série em estudo, assim como seu espectro global de potência, encontram-se na Figura 5.2.

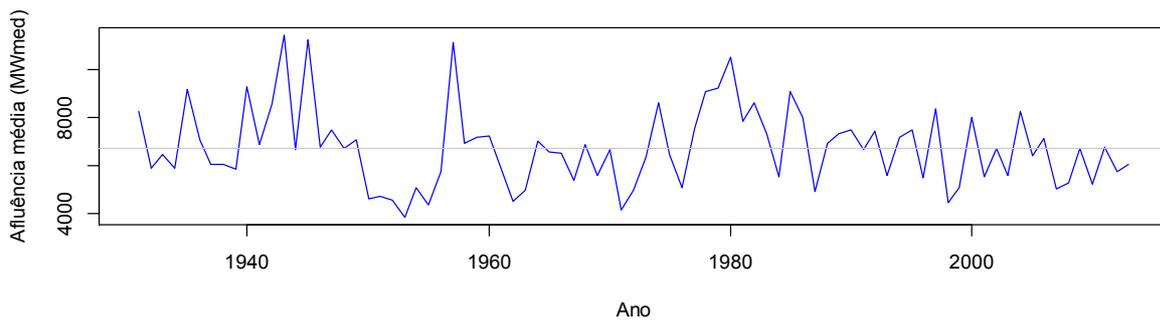


Figura 5.1 – Série de aflúências da região Norte do SIN (1931 a 2013).

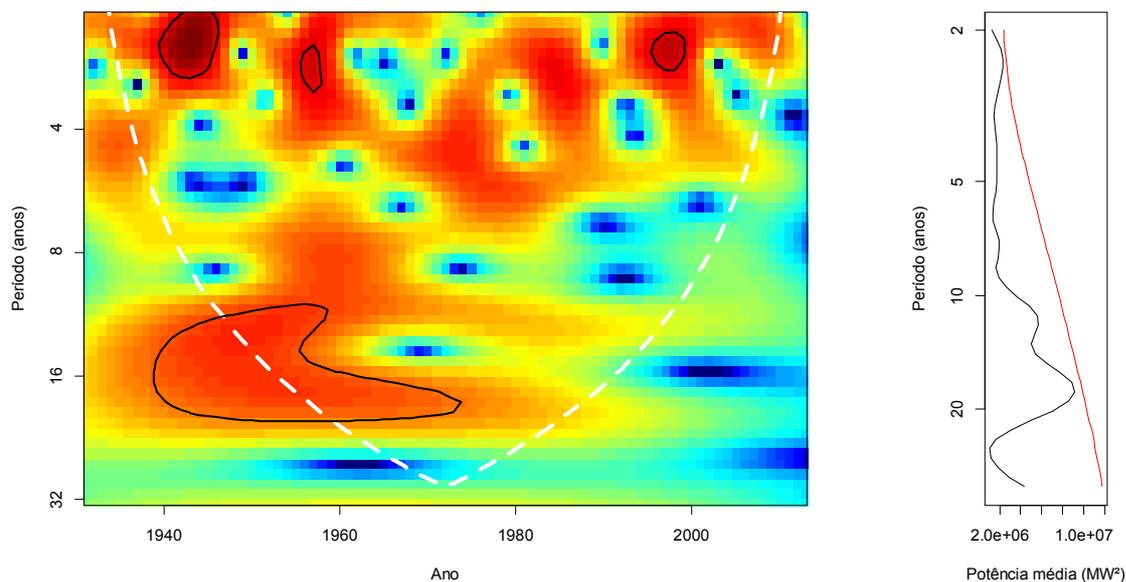


Figura 5.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as aflúências anuais da região Norte do SIN.

Nota: o cone de influência encontra-se na parte externa da linha branca tracejada, enquanto os contornos em preto assinalam regiões com significância acima de 95%.

No espectro de potência da ondaleta de Morlet para as aflúências anuais da região Norte do SIN, pode-se identificar três períodos com variabilidades significantes na banda de 2 a 4 anos, demarcados pelos contornos pretos, e um período, parcialmente dentro do cone de influência, nas bandas de 12 a 20 anos.

Após a análise do espectro de potência da ondaleta, pode-se realizar a análise por bandas ao longo dos anos da série. Conforme mostrado na Figura 5.3, pode-se notar que nos anos de 1942 a 1945 e no ano de 1957, a média das potências da ondaleta encontrada na banda de 2 a 4 anos ultrapassou o nível de significância, indicando que houve uma variabilidade de baixa

frequência nessa banda durante os referidos anos. Na banda de 12 a 16 anos e na banda de 16 a 20 anos, a série apresenta a variabilidade de baixa frequência significativa nos anos 1940 a 1957 e 1941 a 1970, respectivamente.

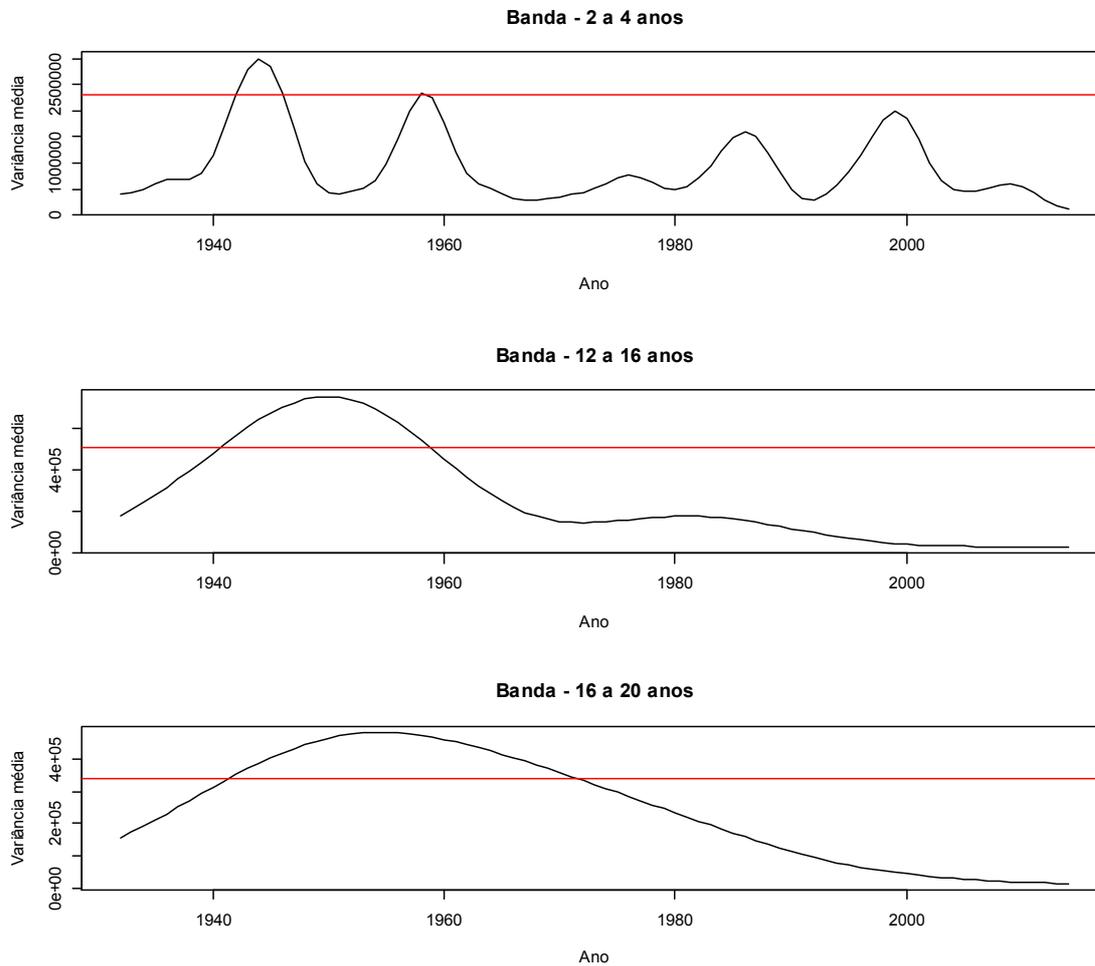


Figura 5.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 12 a 16 anos e 16 a 20 anos para as afluências anuais da região Norte do SIN.

5.2 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORDESTE DO SIN

A série de afluências da região Nordeste do SIN encontra-se na Figura 5.4, o espectro de potência e para a ondaleta de Morlet aplicada à série em estudo, assim como seu espectro global de potência, encontram-se na Figura 5.5.

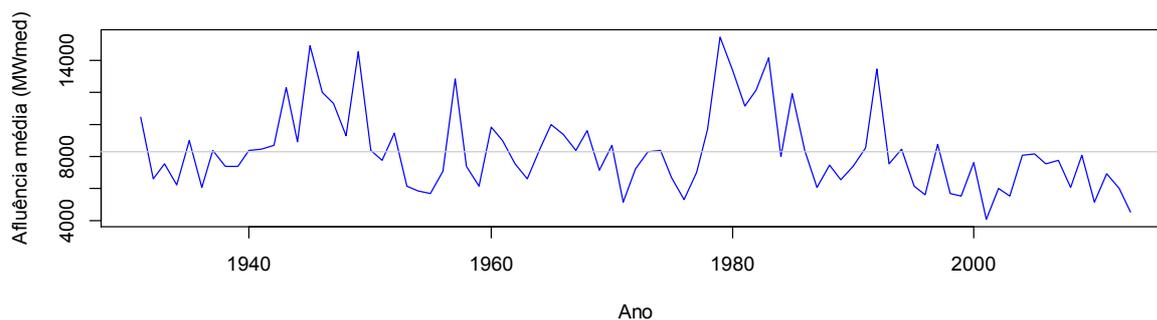


Figura 5.4 – Série de aflúências da região Nordeste do SIN.

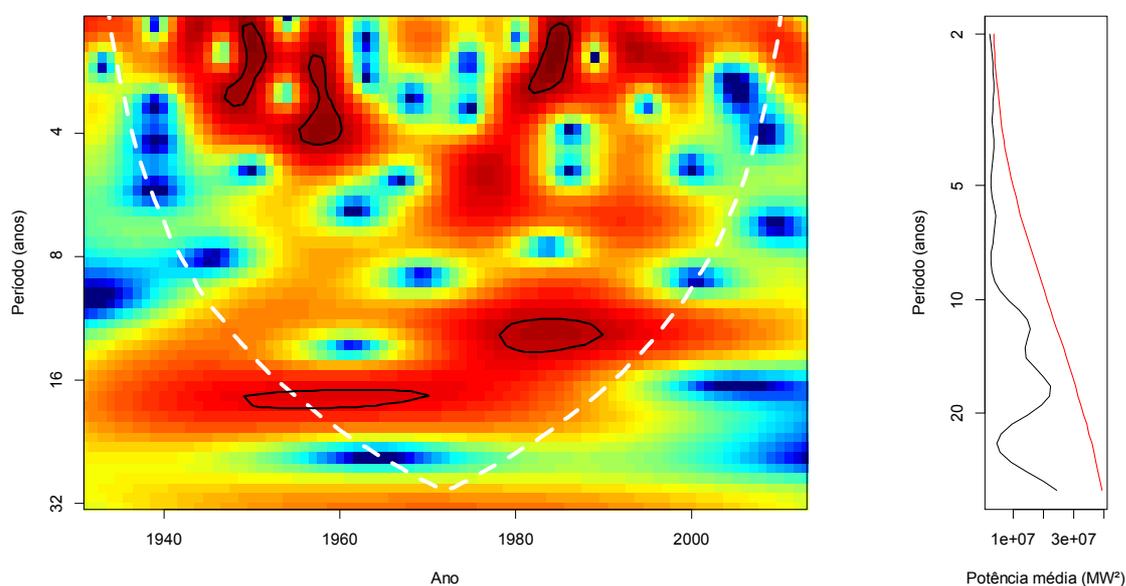


Figura 5.5 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as aflúências anuais da região Nordeste do SIN.

Nota: o cone de influência encontra-se na parte externa da linha branca tracejada, enquanto os contornos em preto assinalam regiões com significância acima de 95%.

Pode-se observar na Figura 5.5 três momentos em que a significância da ondaleta se encontra acima de 95% na banda de 2 a 4 anos, e, próximo ao período de 16 anos, mais dois momentos em que isso ocorre. No entanto, na análise global da série, esta não apresenta variabilidade de baixa frequência significativa em nenhuma banda.

A Figura 5.6 representa o espectro médio na banda de 2 a 4 anos, em que os momentos com a potência acima do nível de significância no espectro de potência da ondaleta são vistos nos dois primeiros períodos, mas não chega ao nível de significância conjunto das bandas totais no terceiro momento. Nas duas bandas próximas dos 16 anos analisadas (12 a 16 anos e 16 a

20 anos), a série, quando analisada a escala média dessas bandas, não apresentou variabilidade de baixa frequência significativa. Os resultados para todas as bandas analisadas podem ser vistos no Apêndice C.

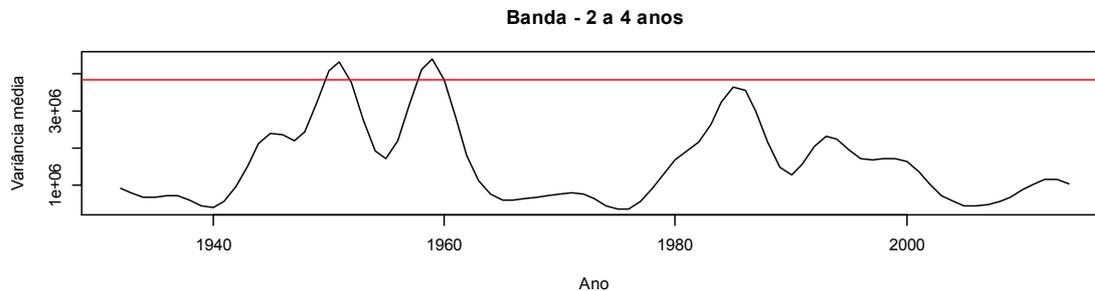


Figura 5.6 – Série temporal da escala-média na banda de 2 a 4 anos para as aflúências anuais da região Nordeste do SIN.

5.3 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUL DO SIN

A série de aflúências da região Sul do SIN encontra-se na Figura 5.7, o espectro de potência e para a ondaleta de Morlet aplicada à série em estudo, assim como seu espectro global de potência, encontram-se na Figura 5.8.

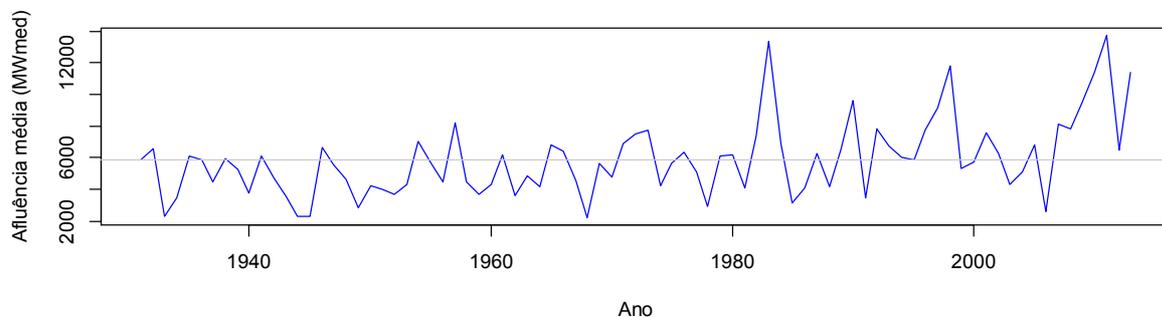


Figura 5.7 – Série de aflúências da região Sul do SIN.

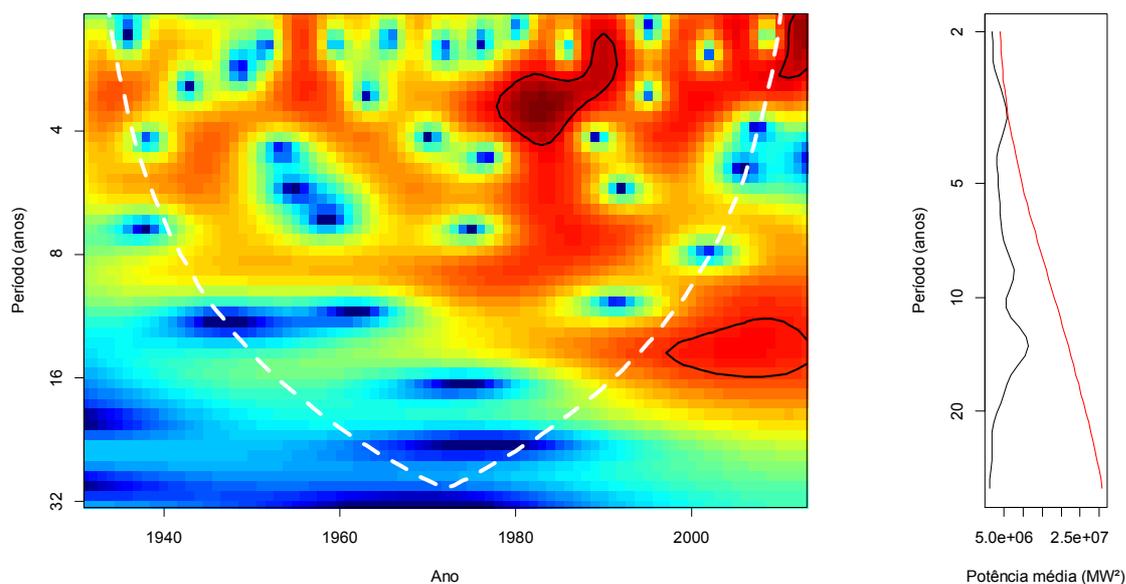


Figura 5.8 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluências anuais da região Sul do SIN.

Nota: o cone de influência encontra-se na parte externa da linha branca tracejada, enquanto os contornos em preto assinalam regiões com significância acima de 95%.

Ao se analisar a Figura 5.8 e a Figura 5.9, pode-se notar que apenas na banda de 2 a 4 anos encontrou-se variabilidade de baixa frequência significativa na análise de ondaletas das afluências energéticas da região Sul, esse período ocorreu na década de 1980.

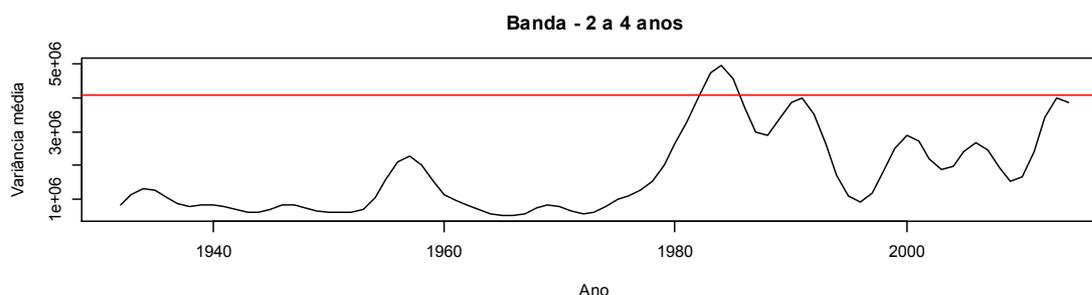


Figura 5.9 – Série temporal da escala-média na banda de 2 a 4 anos para as afluências anuais da região Sul do SIN.

5.4 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUDESTE DO SIN

A série de afluências da região Sudeste do SIN encontra-se na Figura 5.10, o espectro de potência e para a ondaleta de Morlet aplicada à série em estudo, assim como seu espectro global de potência, encontram-se na Figura 5.11.

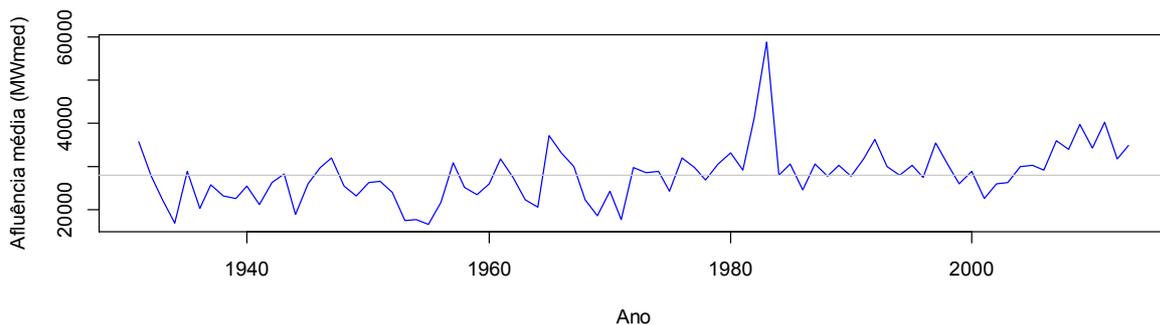


Figura 5.10 – Série de afluências da região Sudeste do SIN.

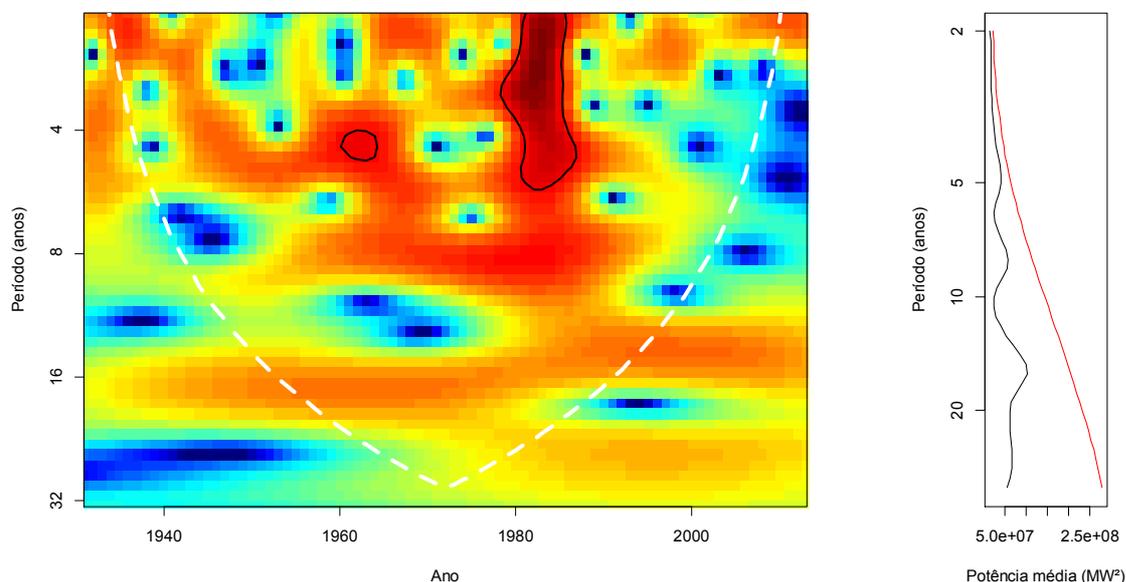


Figura 5.11 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluências anuais da região Sudeste do SIN.

Nota: o cone de influência encontra-se na parte externa da linha branca tracejada, enquanto os contornos em preto assinalam regiões com significância acima de 95%.

Ao se aplicar a transformada em ondaletas para as afluências da região Sudeste, pode-se observar que, na banda de 2 a 6 anos, encontra-se variabilidade de baixa frequência na década de 1980 e, na década de 1960, existe um pequeno período em que a variabilidade de baixa frequência pode ser encontrada no período de 4 anos. Essa variabilidade também pode ser verificada ao se analisar as séries temporais da escala-média nas bandas de 2 a 4 anos e de 4 a 6 anos, em que, na primeira metade da década de 1980, os valores de potência média encontram-se acima do nível de significância, e na década de 60, ao se analisar a banda de 4 a 6 anos, a média das potências se aproxima do nível de significância.

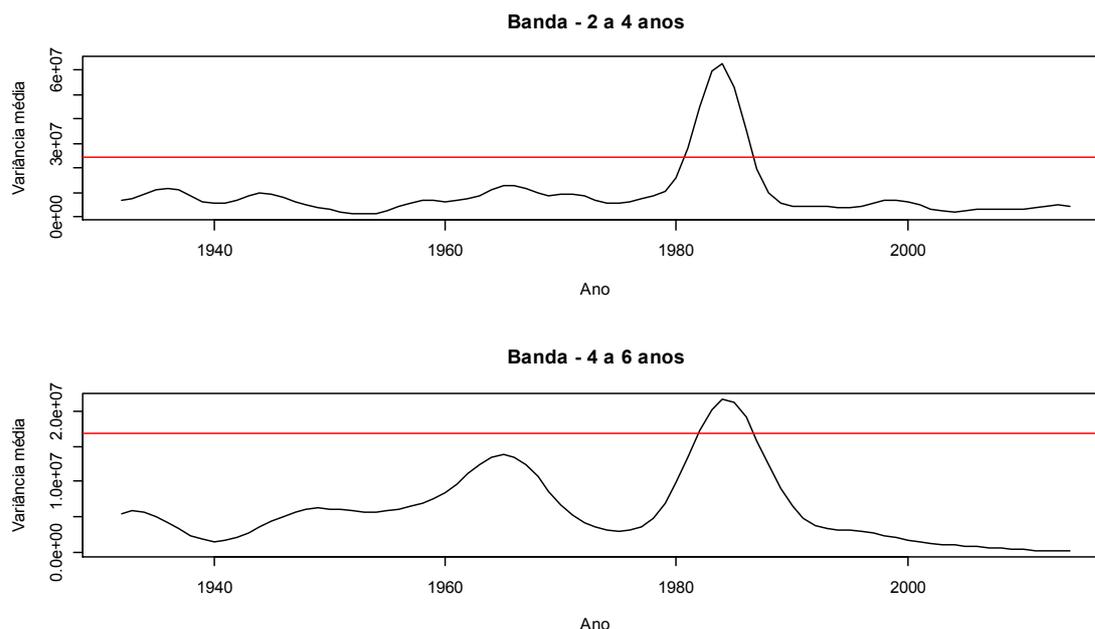


Figura 5.12 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluições anuais da região Sudeste do SIN.

5.5 - RESUMO DA ANÁLISE DE ONDALETAS PARA AS AFLUÊNCIAS DAS REGIÕES DO SIN

De forma resumida, as afluições apresentam, em cada uma das bandas, variabilidades de baixa frequência conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Anos em que cada região apresentou variabilidades de baixa frequência.

Banda/Região	Norte	Nordeste	Sul	Sudeste
Banda – 2 a 4 anos	1942-1945 1957	1949-1950 1957-1958	1982-1984	1980-1985
Banda – 4 a 6 anos	-	-	-	1981-1985
Banda – 6 a 8 anos	-	-	-	-
Banda – 8 a 12 anos	-	-	-	-
Banda – 12 a 16 anos	1940-1957	-	2000-2012*	-
Banda – 16 a 20 anos	1941-1970	-	-	-
Banda – 20 a 24 anos	-	-	-	-
Banda – 24 a 32 anos	-	-	-	-

*O período de 2000 a 2012, na banda de 12 a 16 anos da região Sul não pode ser considerado significativo por estar fora do cone de influência.

Após realizada a análise de ondaletas para as regiões do SIN como um todo, partiu-se para a análise individual dos reservatórios. Como um exemplo, o subitem 5.6 apresenta a análise de ondaletas para a UHE Furnas.

5.6 - ANÁLISE DE ONDALETA PARA A UHE FURNAS

A série de vazões naturalizadas da UHE Furnas encontra-se na Figura 5.13, o espectro de potência e para a ondaleta de Morlet aplicada à série em estudo, assim como seu espectro global de potência, encontram-se na Figura 5.14.

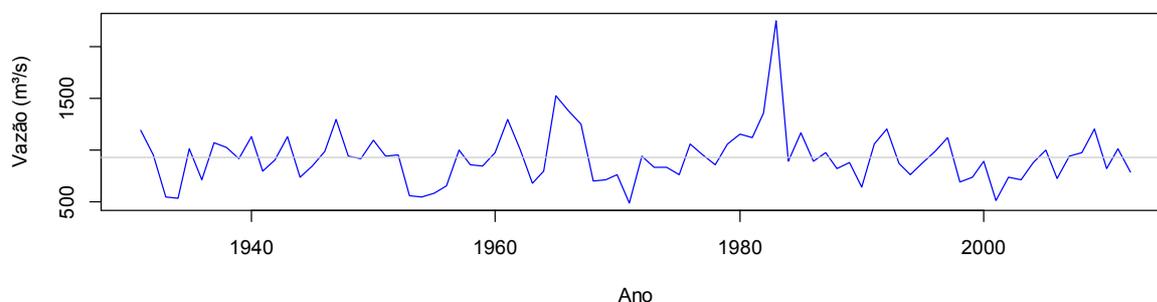


Figura 5.13 – Série de vazões médias anuais da UHE Furnas.

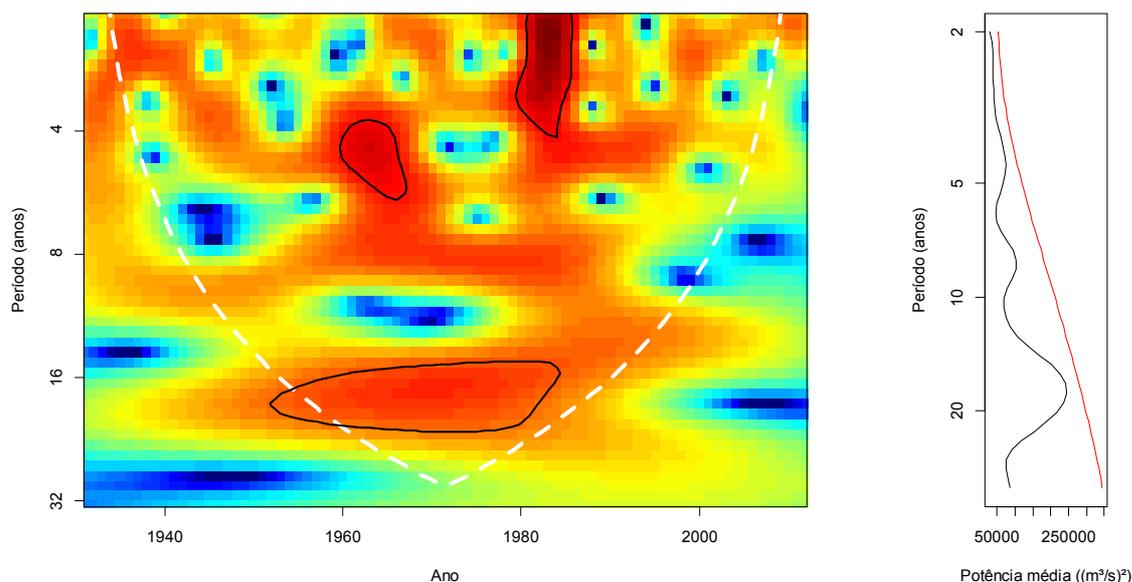


Figura 5.14 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Furnas.

Nota: o cone de influência encontra-se na parte externa da linha branca tracejada, enquanto os contornos em preto assinalam regiões com significância acima de 95%.

Ao analisar a Figura 5.14, pode-se notar que, numa média de todos os anos analisados, as vazões da UHE Furnas não ultrapassaram o nível de significância de 95%, indicando que, de forma geral, a série toda não apresenta variabilidade de baixa frequência em nenhuma das escalas analisadas. No entanto, pode-se notar, pela Figura 5.14, que, em alguns anos, a variabilidade de baixa frequência foi significativa. Parte-se então, para a análise da série temporal da escala média nas bandas em estudo (Figura 5.15).

No espectro de potência da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Furnas, pode-se identificar três locais com variabilidades significantes, demarcados pelos contornos pretos. Na banda de 2 a 4 anos, pode-se notar, entre 1981 e 1985, variabilidade de baixa frequência. Na banda de 4 a 6 anos, esse contorno aparece na década de 1960 e, na banda de 16 a 32 anos, o contorno aparece em quase toda a série não afetada pelo cone de influência (entre as décadas de 1950 e 1980) - Figura 5.14 e Figura 5.15.

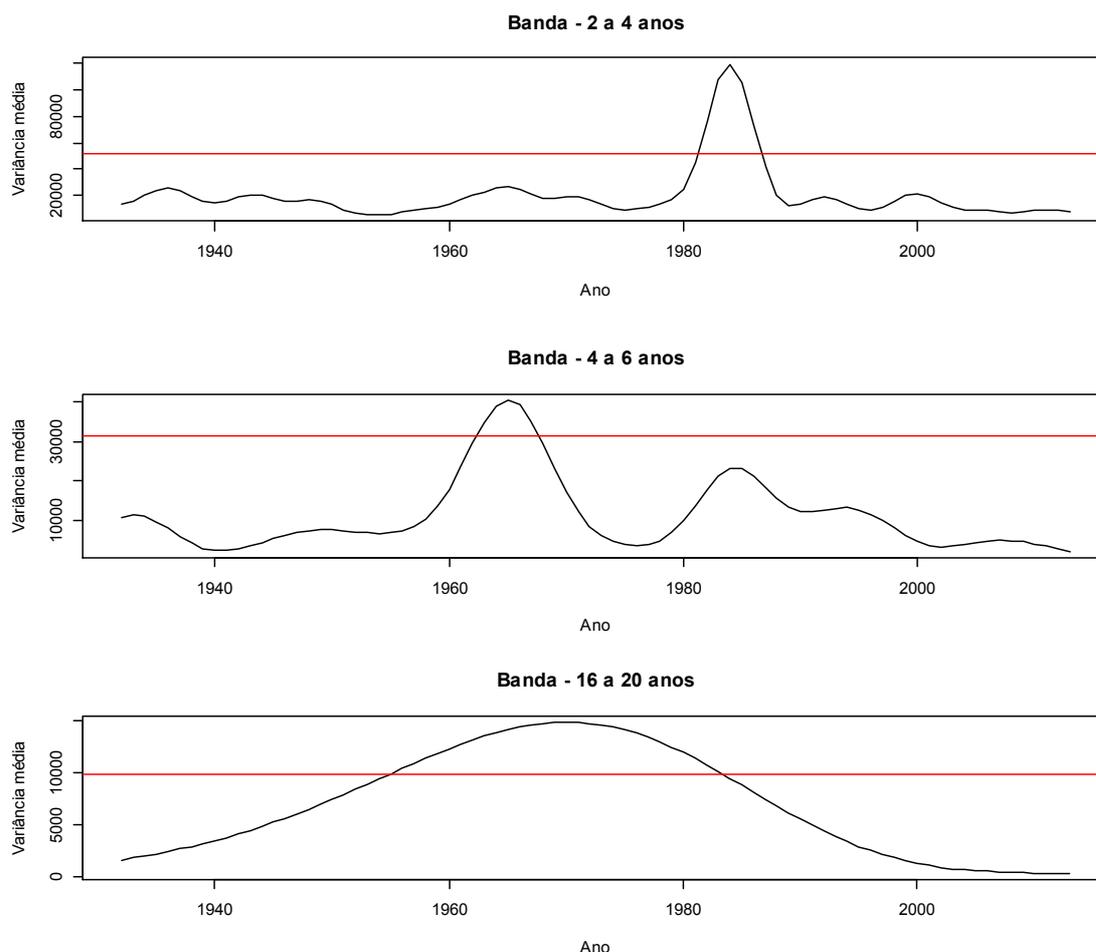


Figura 5.15 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos e 16 a 20 anos para as vazões da UHE Furnas.

5.7 - ANÁLISE DO ESPECTRO GLOBAL DA ONDALETA PARA OS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS

De forma a determinar a distribuição espacial das variabilidades de baixa frequência, foi realizada a análise das ondaletas para todos os 156 reservatórios estudados, conforme a Figura 5.16 (banda de 2 a 4 anos), a Figura 5.17 (banda de 4 a 6 anos), a Figura 5.18 (banda de 6 a 8 anos), a Figura 5.19 (banda de 8 a 12 anos), a Figura 5.20 (banda de 12 a 16 anos) e a Figura 5.21 (banda de 16 a 20 anos).



Figura 5.16 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 2 a 4 anos.

A banda de 2 a 4 anos foi a banda que apresentou mais usinas com variabilidade de baixa frequência significativa ao longo de toda a série. Nessa banda, como pode ser visto na Figura 5.16, 19 reservatórios apresentaram variabilidade de baixa frequência, sendo 9 deles na Bacia do Iguaçu.

Banda - 4 a 6 anos



Figura 5.17 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 4 a 6 anos.

Já na banda de 4 a 6 anos (Figura 5.17), apenas 5 usinas apresentaram essa variabilidade ao longo de toda a série analisada (1931 a 2012), sendo que três dessas usinas estão na Bacia do Jacuí, na região Sul. Na banda de 6 a 8 anos (Figura 5.18), apenas essas três usinas apresentam variabilidade de baixa frequência na análise global.

Banda - 6 a 8 anos



Figura 5.18 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 6 a 8 anos.

Com base na Figura 5.19, pode-se observar que a variabilidade de baixa frequência na banda de 8 a 12 anos, ao se analisar todos os anos das séries (1931 a 2012), somente se apresentou significativa em 7 reservatórios estudados, com uma concentração na bacia do Paranaíba.

Banda - 8 a 12 anos



Figura 5.19 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 8 a 12 anos.

A bacia do Paranaíba também se mostrou significativa na análise global da banda de 12 a 16 anos (Figura 5.20) e na banda de 16 a 20 anos (Figura 5.21).

Banda - 12 a 16 anos



Figura 5.20 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 12 a 16 anos.

Banda - 16 a 20 anos



Figura 5.21 – Distribuição espacial das usinas que apresentaram, em seu espectro global da ondaleta, variabilidade de baixa frequência na banda de 16 a 20 anos.

A análise global na banda de 20 a 24 anos só identificou um reservatório com variabilidade de baixa frequência significativas que foi a Pequena Central Hidrelétrica Serra do Rosal, localizada na divisa entre o estado do Espírito Santo e do Rio de Janeiro. Da mesma forma, na banda de 24 a 32 anos, apenas um reservatório foi identificado, a saber o reservatório da Usina Hidrelétrica de Manso, no estado de Mato Grosso.

5.8 - ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL DA ESCALA MÉDIA NAS BANDAS EM ESTUDO DAS ONDALETAS PARA OS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS

A análise do espectro global da ondaleta pode mostrar em que bandas, ou escalas, pode-se considerar que existem variabilidades de baixa frequência na série total em estudo. No entanto, também é importante avaliar a evolução temporal das variabilidades de baixa frequência.

A análise da escala-média do espectro de potência (mesma metodologia aplicada para gerar a Figura 5.14 a partir do espectro de potência – Figura 5.15 – na série de Furnas) foi aplicada a todos os reservatórios em estudo.

Para facilitar a visualização, os postos foram divididos em suas regiões, e, então, na ordem da numeração ONS, foram plotados, no eixo y, os anos em que cada posto apresentou variabilidade de baixa frequência nas bandas em estudo. Assim como no mapa da Figura 4.1, as regiões estão divididas da seguinte forma:

- Sul – cor verde;
- Sudeste – cor vermelha;
- Centro-Oeste – cor rosa;
- Nordeste – cor azul e
- Norte – cor marrom.

A posição no eixo y de cada um dos postos, assim como algumas de suas características, pode ser encontrada na Tabela A.1, no apêndice A. A UHE Furnas, por exemplo, está localizada na posição 35 do eixo y nas figuras apresentadas neste subitem.

A observação dos gráficos apresentados nas Figuras 5.22 a 5.29 permite identificar, para cada ano estudado, quais usinas apresentam variabilidade de baixa frequência significativa em cada banda.

Assim, na Figura 5.22, nota-se que grande parte dos reservatórios das regiões sul, sudeste e centro-oeste apresentou a variabilidade de baixa frequência na banda de 2 a 4 anos na década de 1980. Em vários pontos da figura é possível perceber conjuntos de usinas que apresentam

as variabilidades estudadas no mesmo ano. Isso se dá também pelo fato de que muitas dessas usinas se encontram nas mesmas bacias hidrográficas, por vezes, no mesmo rio.

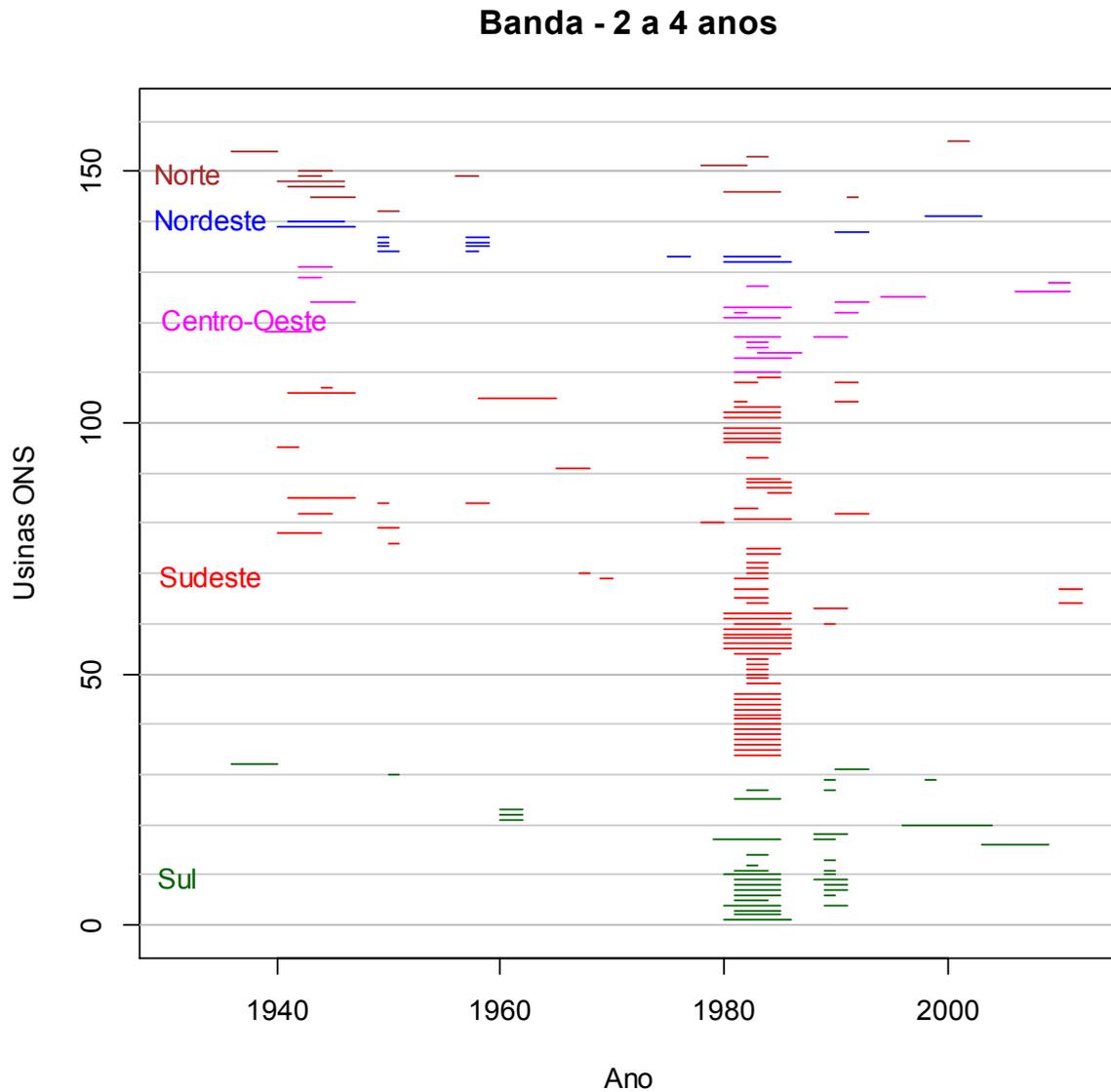


Figura 5.22 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 2 a 4 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Banda - 4 a 6 anos

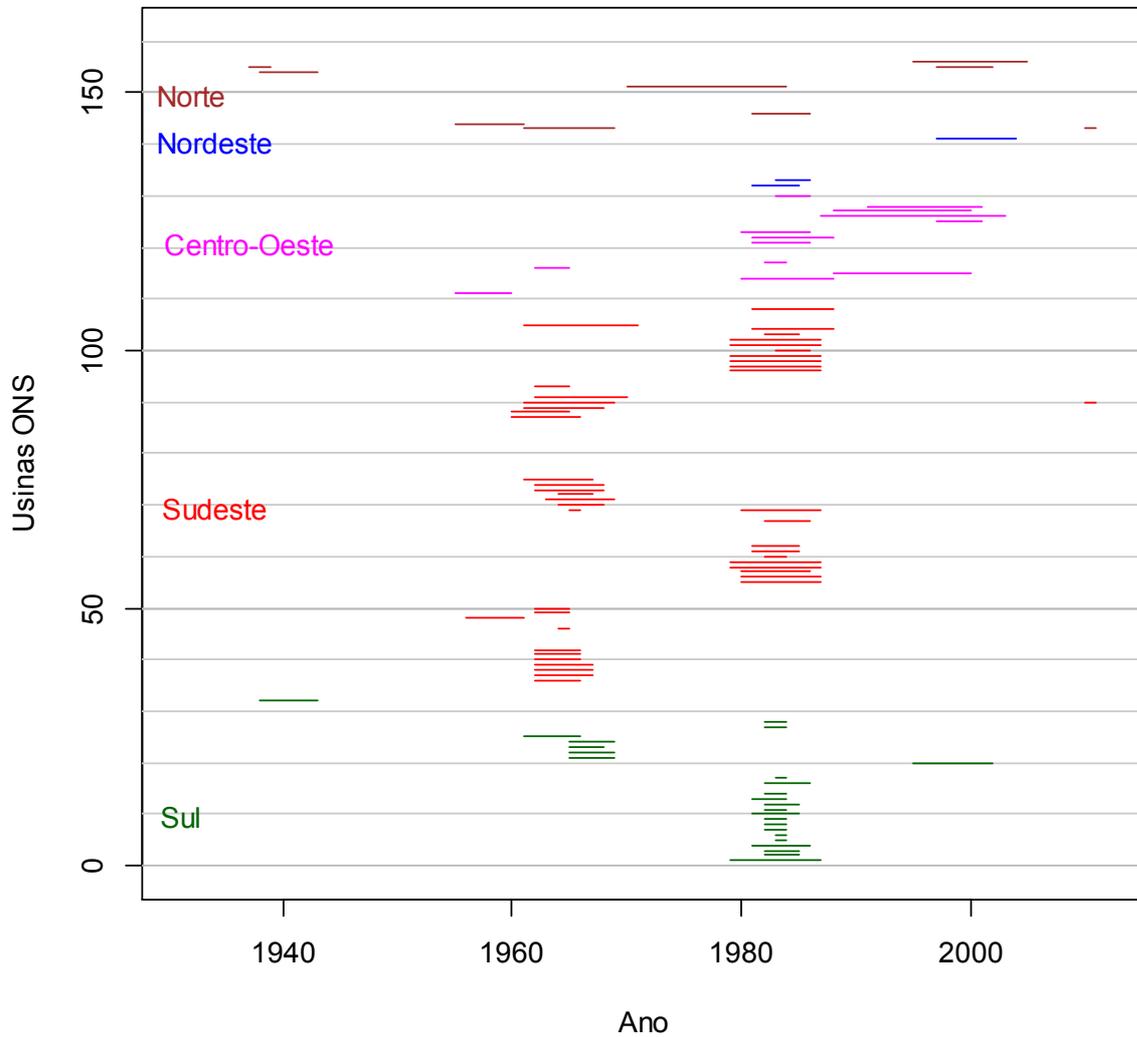


Figura 5.23 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 4 a 6 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Na banda de 4 a 6 anos (Figura 5.23) e na banda de 6 a 8 anos (Figura 5.24), nota-se, tanto na década de 1980, quanto na década de 1960, que vários dos postos analisados apresentaram a variabilidade de baixa frequência.

Banda - 6 a 8 anos

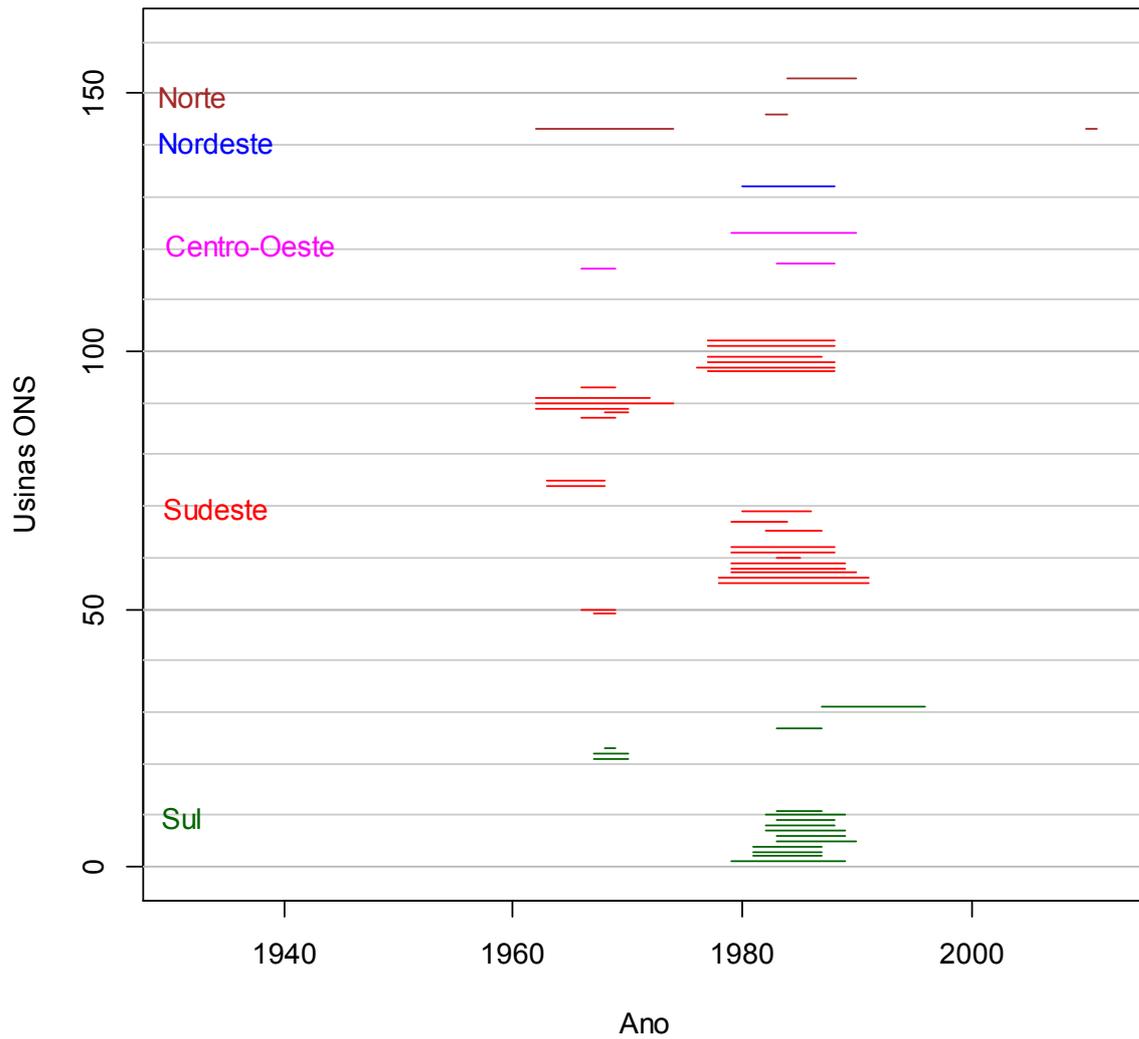


Figura 5.24 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 6 a 8 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Banda - 8 a 12 anos

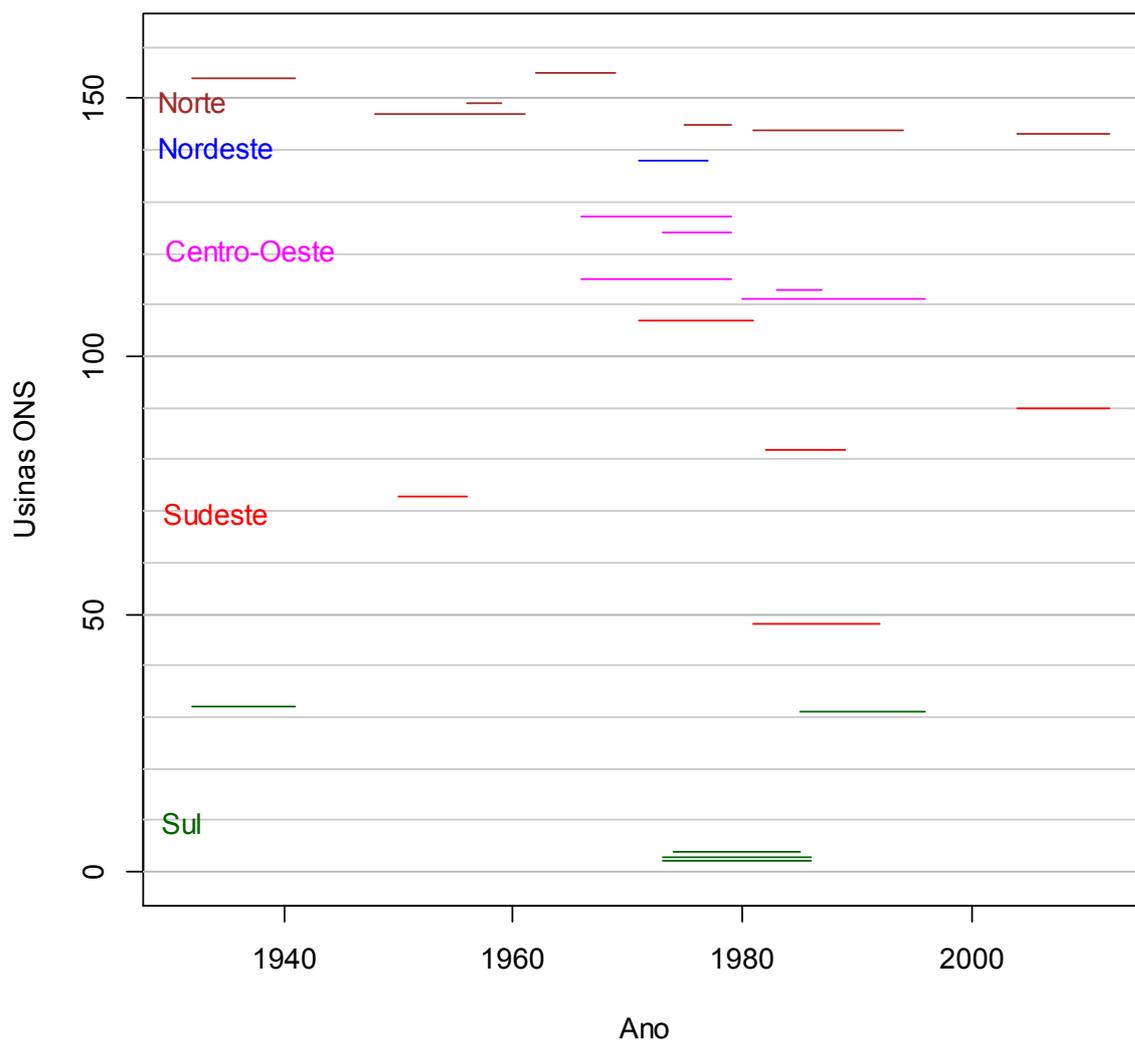


Figura 5.25 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 8 a 12 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Na banda de 8 a 12 anos, que pode ser vista na Figura 5.25, assim como na banda de 12 a 16 anos (Figura 5.26), apenas alguns reservatórios apresentaram variabilidades de baixa frequência em sua série, não se apresentando nenhuma década significativa na análise ao longo dos anos.

Banda - 12 a 16 anos

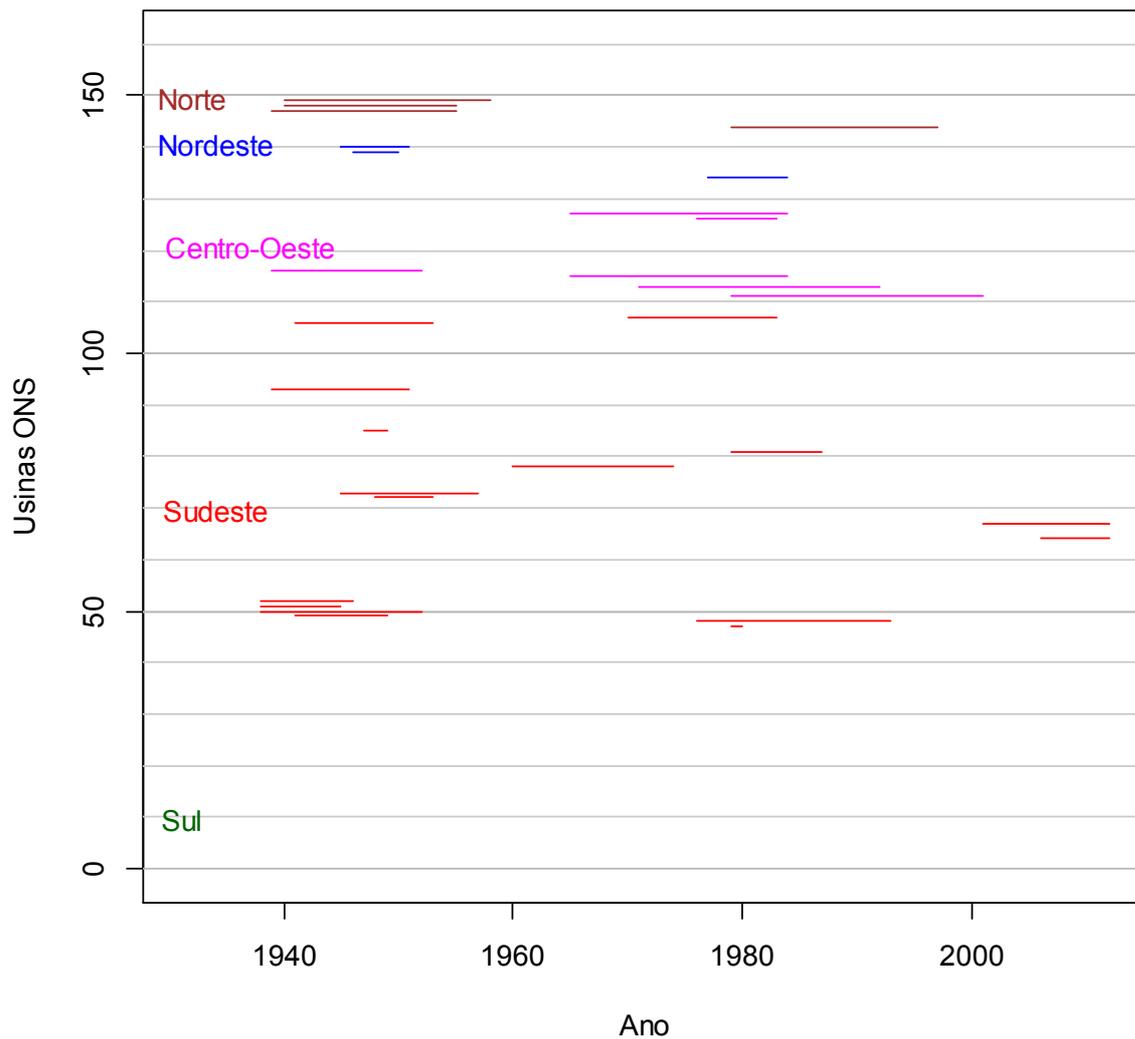


Figura 5.26 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 12 a 16 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Banda - 16 a 20 anos

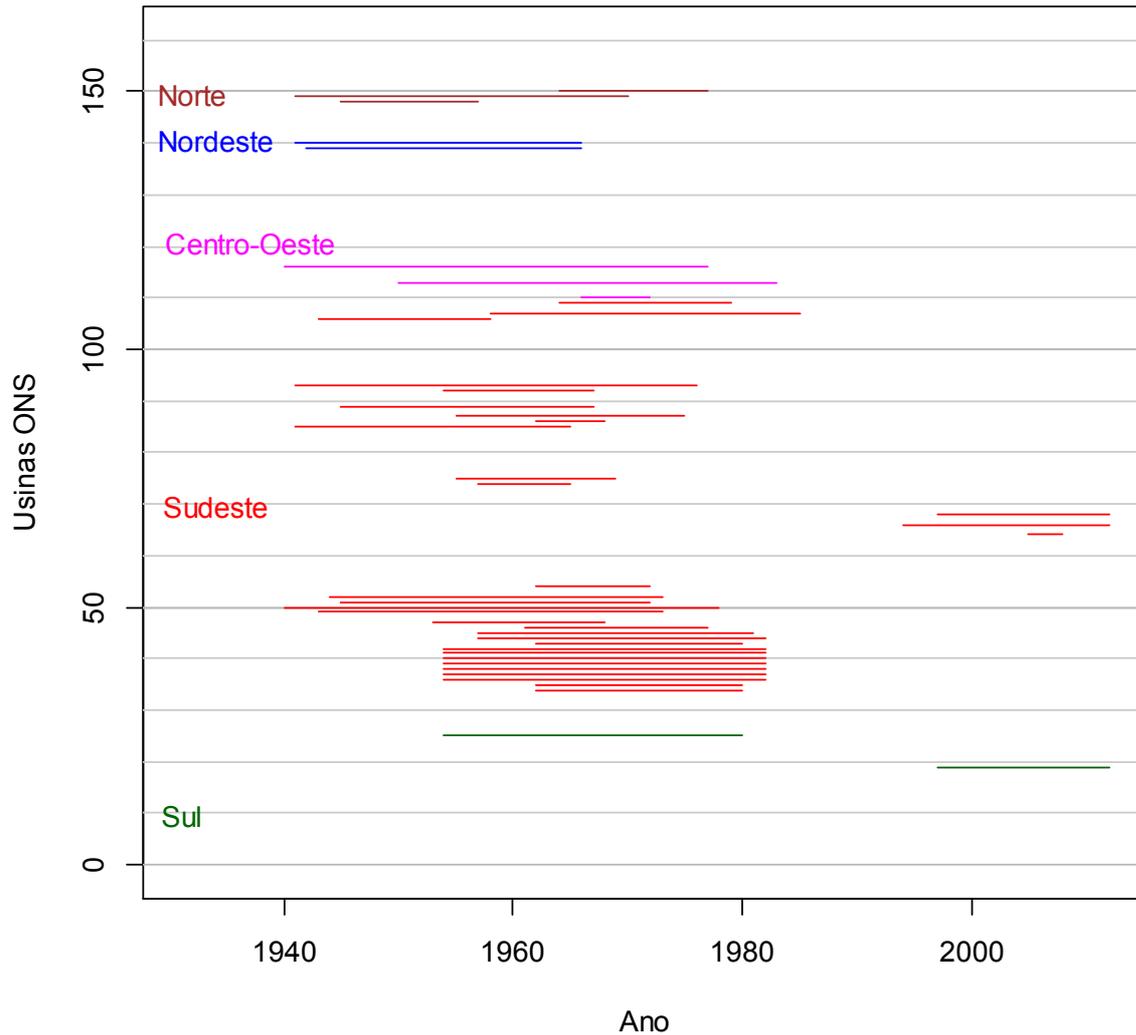


Figura 5.27 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 16 a 20 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Uma banda analisada que chamou atenção na análise de ondaletas realizada foi a banda de 16 a 20 anos – apresentada na Figura 5.27 –, em que grande parte dos reservatórios localizados na região sudeste, assim como outros reservatórios espalhados pelo Brasil, apresentou variabilidade de baixa frequência nas décadas de 1960 e 1970.

Banda - 20 a 24 anos

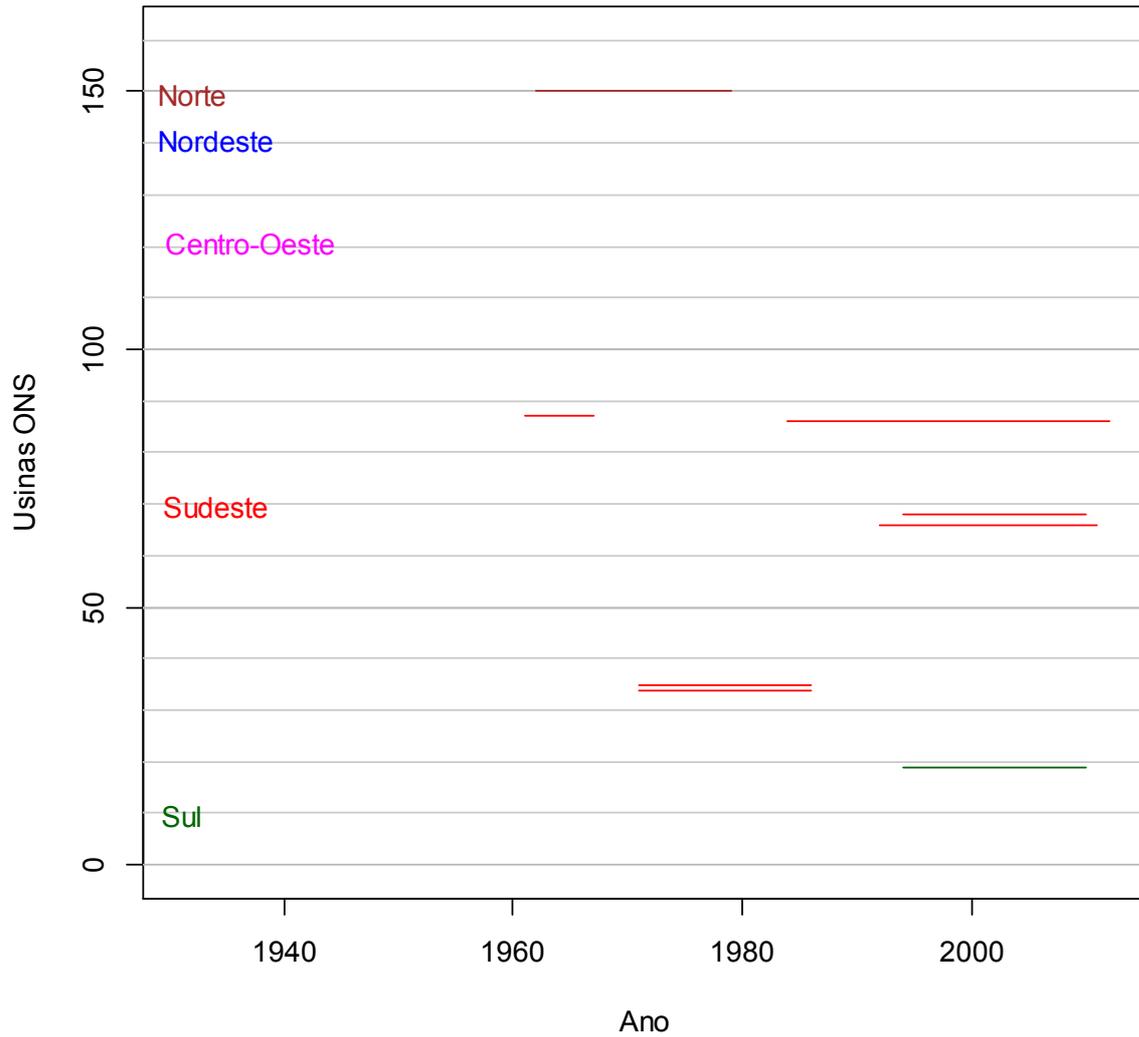


Figura 5.28 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 20 a 24 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

Finalmente, nas Figuras 5.28 e 5.29, nota-se que poucos dos reservatórios analisados apresentaram variabilidade de baixa frequência nas bandas de 20 a 24 anos e de 24 a 32 anos.

Banda - 24 a 32 anos

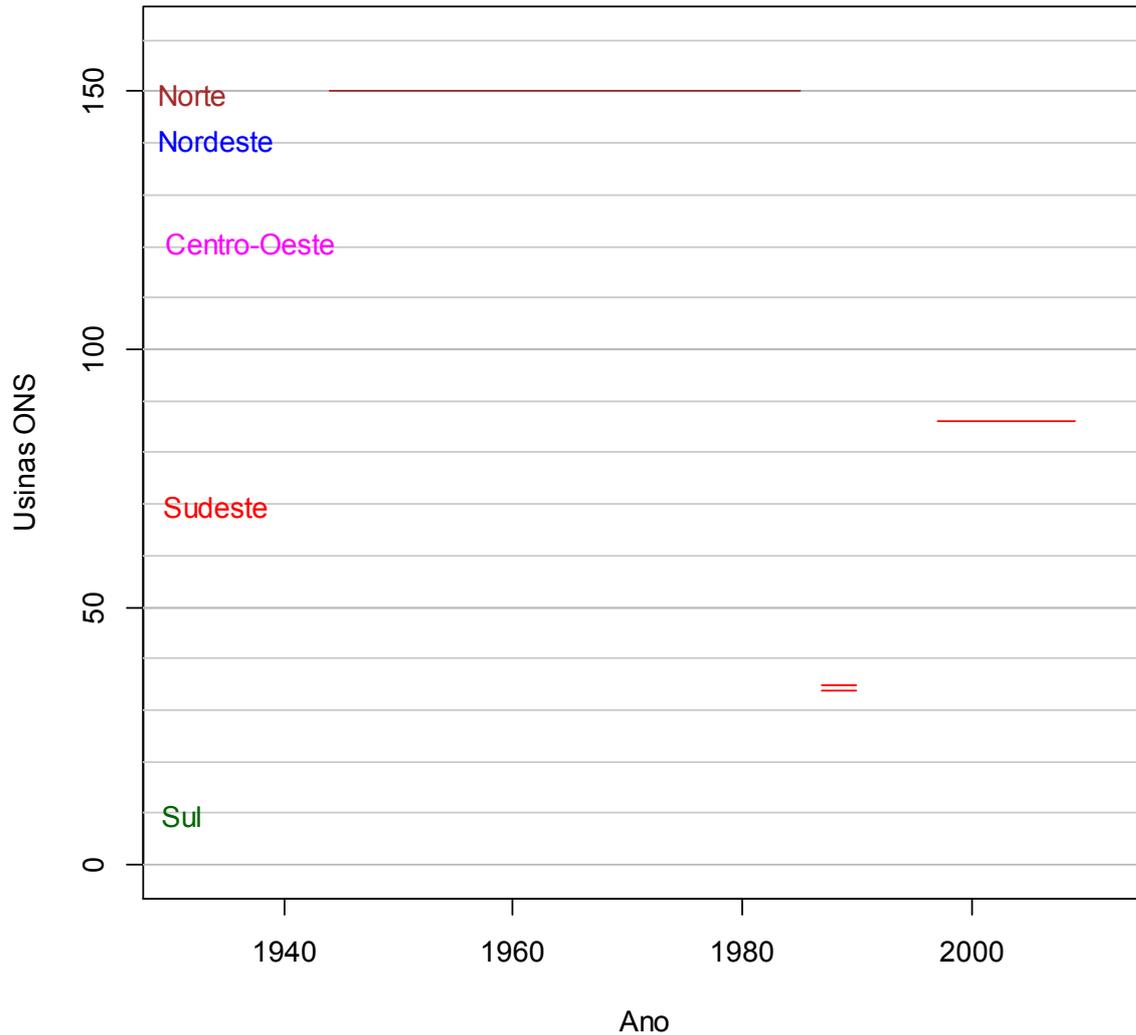


Figura 5.29 – Anos em que cada usina do ONS apresenta variabilidade de baixa frequência na banda de 24 a 32 anos.

Nota: a posição das usinas (eixo y) encontra-se descrita no Apêndice A.

5.9 - ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE NIÑO 3.4

A série do índice NIÑO 3.4 encontra-se na Figura 5.30, o espectro de potência e para a ondaleta de Morlet aplicada à série em estudo, assim como seu espectro global de potência, encontram-se na Figura 5.31.

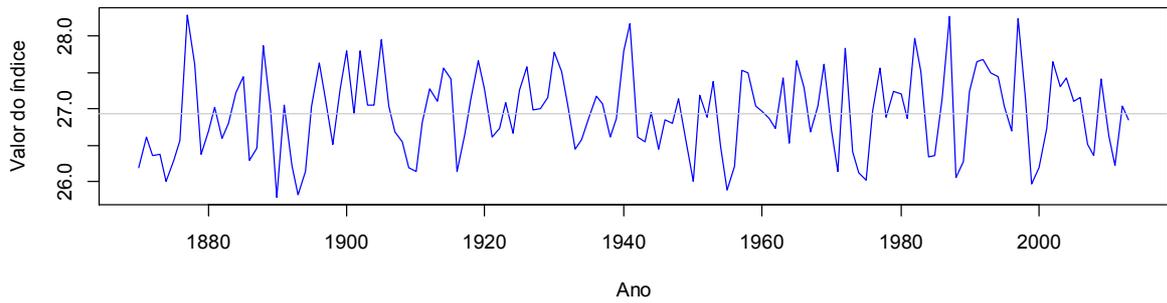


Figura 5.30 – Série histórica do índice NIÑO 3.4 (1870 a 2013).

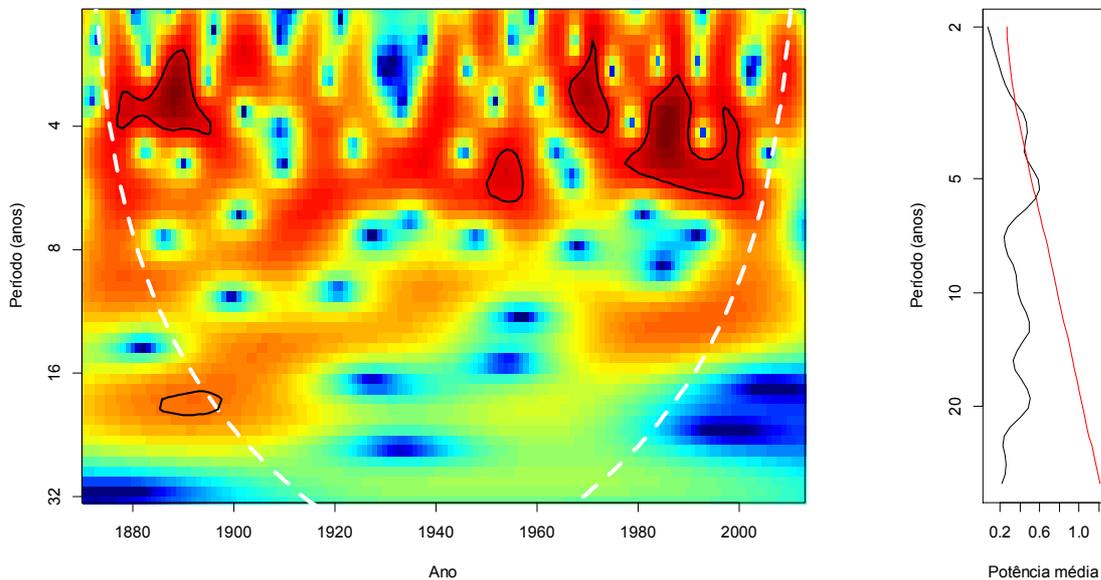


Figura 5.31 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice NIÑO 3.4.

Nota: o cone de influência encontra-se na parte externa da linha branca tracejada, enquanto os contornos em preto assinalam regiões com significância acima de 95%.

No espectro de potência da ondaleta do índice NIÑO 3.4, pode-se identificar até a escala de 8 anos, existe, em quatro momentos distintos, locais com variabilidades significantes, demarcados pelos contornos pretos. O espectro global da ondaleta do índice NIÑO 3.4, também apresentado na Figura 5.31, mostra que, nas escalas abaixo de 8 anos, a variabilidade de baixa frequência deste índice pode ser considerada significativa.

A análise da série temporal da escala média nas bandas em estudo (Figura 5.32) mostra o que pode ser inferido do espectro de potência da ondaleta. Nas bandas de 2 a 4 anos e de 4 a 6

anos, a série analisada, em mais de um momento, passa do nível de significância de 95%, o que não ocorre nas outras bandas analisadas.

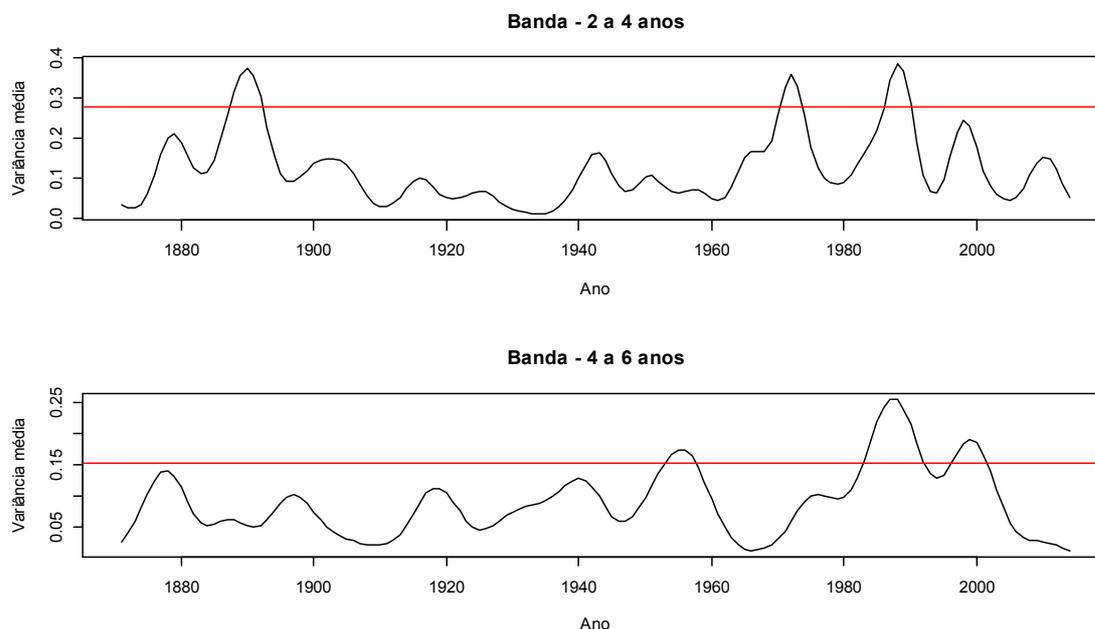


Figura 5.32 – Série temporal da escala-média nas bandas de 2 a 4 anos e de 4 a 6 anos para o índice NIÑO 3.4.

5.10 - RESUMO DA ANÁLISE DE ONDALETAS PARA OS ÍNDICES CLIMÁTICOS ESTUDADOS

A mesma análise de ondaletas foi realizada para os demais índices utilizados neste estudo – PDO, AMO, SOI, MEI, ONI, NAO e AO –, e pode ser encontrada nos Apêndices K a R.

De forma resumida, os índices apresentam, em cada uma das bandas, variabilidades de baixa frequência conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Anos em que cada índice climático apresentou variabilidade de baixa frequência.

Índice/Banda	Banda de 2 a 4 anos	Banda de 4 a 6 anos	Banda de 6 a 8 anos
NIÑO 3.4	1887-1891	1953-1956	
	1970-1972	1982-1991	-
	1986-1989	1996-2000	
PDO	-	1934-1943	-

Índice/Banda	Banda de 2 a 4 anos	Banda de 4 a 6 anos	Banda de 6 a 8 anos
		1950-1959	
		1990-1997	
	1914-1916		
AMO	1942-1944	1929-1936	-
	1995-1999		
SOI	1871	1916-1920	1907-1918
		1953-1957	
MEI	1970-1972	1956-1987	
		1952-1957	
ONI	1970-1972	1984-1989	
		1998-1999	
NAO	-	-	
	1966-1968		
AO	2010	-	

Ao se comparar os dados da Tabela 5.2 com os resultados obtidos no subitem 5.8, pode-se notar que a variabilidade de baixa frequência dos índices climáticos estudados não poderia necessariamente ser considerada influente para a variabilidade de baixa frequência dos reservatórios brasileiros.

6 - CONCLUSÕES

Na primeira parte do estudo foi apresentada a variabilidade de baixa frequência de séries históricas de dados hidrometeorológicos, enfatizando que, caso esta seja identificada, é possível que a utilização de uma modelagem hidrológica que agregue esse fator aos estudos auxilie no gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente em um país como o Brasil, que tem como sua principal fonte de produção de energia as usinas hidroelétricas.

Utilizando a análise de ondaletas, metodologia que permite a decomposição de séries temporais no domínio frequência-tempo de forma não estacionária, analisou-se a presença de variabilidade de baixa frequência (ocorrência de longos períodos oscilatórios com vazões predominantemente abaixo ou acima da média histórica) das aflúncias médias anuais das regiões do SIN, de 156 reservatórios operados pelo ONS e dos índices climáticos NIÑO 3.4, PDO, AMO, SOI, MEI, ONI, NAO e AO. O processo da transformada em ondaletas foi analisado em seu espectro de potência, espectro global de potência e nas escalas-médias, ao longo dos anos, em 8 bandas (de 2 a 4 anos, de 4 a 6 anos, de 6 a 8 anos, de 8 a 12 anos, de 12 a 16 anos, de 16 a 20 anos, de 20 a 24 anos e de 24 a 32 anos).

Para realizar essas análises nos 156 reservatórios estudados, foram apresentados mapas e gráficos de modo a buscar entender a distribuição espacial dos fenômenos estudados. A análise do espectro global das ondaletas mostrou que somente alguns reservatórios apresentaram variabilidade de baixa frequência em cada uma das bandas analisadas. A banda de 2 a 4 anos foi a única banda que se destacou nessa análise, apresentando 19 reservatórios com variabilidade de baixa frequência ao se analisar toda a série histórica de vazões.

Na análise anual das variabilidades de baixa frequência, algumas décadas e regiões chamaram atenção nos estudos. Na banda de 2 a 4 anos, foi identificada a variabilidade de baixa frequência em grande parte dos reservatórios brasileiros na década de 1980. Nas bandas de 4 a 6 anos e de 6 a 8 anos, dois momentos históricos foram identificados, alguns reservatórios, principalmente das regiões Sul e Sudeste, apresentaram resultados significativos na década de 1960 e na década de 1980, que também pode ser apontada como uma década com variabilidades significativas em diversos reservatórios das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Dentre as bandas analisadas, a única outra que se mostrou relevante foi a de 16 a 20 anos, em que

grande parte dos reservatórios localizados na região sudeste, assim como outros reservatórios espalhados pelo Brasil, apresentou variabilidade de baixa frequência nas décadas de 1960 e 1970.

Para buscar atribuir causas para as variabilidades de baixa frequência encontradas, foram analisadas as mesmas variabilidades em alguns índices climáticos, no entanto, nenhum índice pode ser categoricamente relacionado com a variabilidade de baixa frequência das vazões afluentes aos principais reservatórios brasileiros por meio deste estudo. Nesse sentido, é possível que as oscilações encontradas sejam provenientes de processos climáticos que atuam numa menor escala espaço-temporal, como chuvas convectivas, por exemplo. Tais processos possuem uma maior limitação em termos de previsibilidade, o que indica que as flutuações de baixa frequência encontradas para os reservatórios estudados são caracterizados por uma elevada aleatoriedade, sendo, por conseguinte, de difícil previsão e integração a modelos de simulação e previsão de vazões.

Dessa forma, a modelagem não estacionária da variabilidade de baixa frequência nos principais reservatórios brasileiros se mostrou importante por verificar que essa variabilidade não é existente em toda a série de vazões e afluições, mas apenas pode ser verificada em alguns períodos das séries e ainda é pouco associada a forçantes climáticas de larga escala. A análise das ondaletas, por ser não estacionária, possibilitou essa verificação, de forma que a identificação de um período de baixa frequência auxilia na explicação de fenômenos hidrológicos pontuais, mas persistentes no tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, B.C.C. (2012). *Avaliação dos padrões de variabilidade e mudança climática no Setor hidrelétrico brasileiro*, Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 99p.
- Alves, B.C.C., Souza Filho, F.A., Silveira, C.S. (2013). “Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS).” In: *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(4), 19-34.
- Amarasekera, K.N., Lee, R.F, Williams, E.R., Eltahir, E.A.B. (1997). “ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers.” In: *Journal of Hydrology*, 200, 24-39.
- Anjos, S.L., Bueno, C.S.S. (2011). *Estudos de Tendências Temporais e Modelagem Não Estacionária de Frequência de Eventos de Cheias*, Monografia de Projeto Final, Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 96p.
- Balaji, R., Connor, R., Glennie, P., Van Der Gun, J., Loyd, G. J., Young, G. (2012). “The water resource: Variability, vulnerability and uncertainty.” In: *Managing Water under Uncertainty and Risk — the United Nations World Water Development*, 4(3), 77–100.
- Barreiro, M. (2010). “Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America.” In: *ClimDyn*, 35, 1493-1508.
- Barreiro, M., Díaz, N., Renom, M. (2014). “Role of the global oceans and land–atmosphere interaction on summertime interdecadal variability over northern Argentina.” In: *ClimDyn*, 42, 1733-1753.
- Bivand, R., Lewin-Koh, N. (2014). “maptools: Tools for reading and handling spatial objects”. R package version 0.8-30. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=maptools>>
- Compagnucci, R.H., Berman, A.L., Herrera, V.V., Silvestri, G. (2014). ”Are Southern South American Rivers linked to the solar variability?” In: *International Journal of Climatology*, 34, 1706-1714.
- Confalonieri, U.E.C. (2003). “Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil.” In: *Revista Terra*, I(20), 193-204.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Rasmussen, P., Bobée, B. (2000). “A recurrent neural networks approach using indices of low-frequency climatic variability to forecast regional annual runoff.” In: *Hydrological Processes*, 14, 2755-2777.

- Destro, C.A.M., Lima, G.A.R., Zeilhofer, P. (2012). “Análise de Séries emporais de Vazão Média Mensal do Rio Cuiabá Através do Método de Análise de Espectro Singular.” In: *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(2), 111-120.
- Dettinger, M.D., Cayan, D.R., McCabe, G.M., Marengo, J.A. (2000) “*Multiscale streamflow variability associated with El Niño/Southern Oscillation.*” In: Diaz, H.F., Markgraf, V. (5a. ed.), *El Niño and the Southern Oscillation--Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*: Cambridge University Press, 113-146.
- Diaz, H.F., Markgraf, V. (2000) *El Niño and the Southern Oscillation: multiscale variability and global and regional impacts*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Equatorial Currents and El Niño. (2014) Disponível em: <<http://oceanworld.tamu.edu/resources/oceanography-book/equatorialcurrents.htm>> acesso em 03 de maio de 2014.
- Goswami, J.C., Chan, A.K. (1999). *Fundamentals of Wavelet Theory, Algorithms, and Application*. Nova York: Wiley-Interscience, 359p.
- Gouhier, T. (2014). “biwavelet: Conduct univariate and bivariate wavelet analyses”. R package version 0.14. Disponível em: <<http://biwavelet.r-forge.r-project.org>>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, 1535p.
- Kang, S., Lin, H. (2007). “Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in agricultural watershed.” In: *Journal of Hydrology*, 338, 1-14.
- Kisi, O. (2011) “Wavelet Regression Model as an Alternative to Neural Networks for River Stage Forecasting.” In: *Water Resources Management*, 25, 579-600.
- Labat, D. (2005). “Recent advances in wavelet analyses: Part 1 – A review of concepts.” In: *Journal of Hydrology*, 314, 278–288.
- Labat, D. (2008). “Wavelet analysis of the annual discharge records of the world’s largest rivers.” In: *Advances in Water Resources*, 31, 109–117.
- Labat, D. (2010). “Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices.” In: *Journal of Hydrology*, 385, 269–278.
- Labat, D., Ronchail, J., Guyot, J.L. (2005). “Recent advances in wavelet analyses: Part 2 – Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability.” In: *Journal of Hydrology*, 314, 289–311.

- Lima, C. H. R., Martins, E. S. P. R. (2004) “Determinação dos Padrões de Variabilidade Interanual de Vazões do Semi-Árido Brasileiro com uso da Transformada Wavelet.” In: *VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, São Luis, Brasil.
- Lima, C.H.R., Lall, U. (2008). “Hidroclimatologia de cheias: eventos extremos, não estacionariedade, processos climáticos de larga escala e uma perspectiva para simulações num contexto de mudanças climáticas globais.” In: *II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C. (1997) “A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon productions.” In: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079.
- Mehrotra, R., Sharma, A. (2007). “A semi-parametric model for stochastic generation of multi-site daily rainfall exhibiting low-frequency variability.” In: *Journal of Hydrology*, 335, 180-193.
- Mendonça, F., Danni-Oliveira, I.M. (2007) *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 208p.
- Merz, B., Aerts, J., Ambjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Blöschl, G., Bouwer, L. M., Brauer, A., Cioffi, F., Delgado, J. M., Gocht, M., Guzzetti, F., Harrigan, S., Hirschboeck, K., Kilsby, C., Kron, W., Kwon, H.-H., Lall, U., Merz, R., Nissen, K., Salvati, P., Swierczynski, T., Ulbrich, U., Viglione, A., Ward, P. J., Weiler, M., Wilhelm, B., Nied, M. (2014). “Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management.” In: *Natural Hazards Earth System Sciences. Discussions*, 2, 1559-1612.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D.P., Stouffer, R.J. (2008). “Stationarity is dead: whiter water management?” In: *Science*, 319, 573-574.
- Müller, I.I., Krüger, C.M., Kavisky, E. (1998). “Análise de estacionariedade de series hidrológicas na bacia incremental de Itaipu.” In: *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(4), 51-71.
- NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration). NOAA – National Oceanic & Atmospheric Administration. (2014) Disponível em: < <http://www.noaa.gov/> > acesso em 23 de abril de 2014.
- Nunes, L.H., Lombardo, M.A. (1995). “A questão da variabilidade climática: Uma reflexão crítica.” In: *Revista do Instituto Geológico*, 16(1), 21-31.

- Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R., Arumí, J.L. (2013). “Influence of Pacific Ocean multidecadal variability on the distributional properties of hydrological variables in north-central Chile.” In: *Journal of Hydrology*, 501, 227-240.
- ONS - Operador Nacional do Sistema. ONS – Avaliação de Curto Prazo da Operação - Séries Históricas de Vazões. (2014) Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx> acesso em 29 de abril de 2014.
- Pacific Decadal Oscillation (PDO) Graphics. (2014) Disponível em: <<http://jisao.washington.edu/pdo/graphics.html>> acesso em 25 de abril de 2014.
- Philander, S.G. (1990) *El Niño, La Niña, and Southern Oscillation*. San Diego: Academic Press, 293p.
- Renom, M., Rusticucci, M., Barreiro, M. (2011). “Multidecadal changes in the relationship between extreme temperature events in Uruguay and the general atmospheric circulation.” In: *ClimDyn*, 37, 2471–2480.
- Santos, C.A.G., Freire, P.K.M.M., Torrence, C. (2013) “A transformada *wavelet* e sua aplicação na análise de séries hidrológicas.” In: *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, 271-280.
- Santos, C.A.G., Galvão, C.O., Campos Junior, M.B. (2002) “Análise das precipitações mensais no semi-árido através da transformada *wavelet*.” In: *VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Maceió, Brasil.
- Santos, C.A.G., Morais, B.S. (2013) “Identification of precipitation zones within São Francisco River basin (Brazil) by global wavelet power spectra.” In: *Hydrological Sciences Journal*, 58:4, 789-796.
- Santos, C.A.G., Silva, G.B.L. (2014) “Daily streamflow forecasting using a wavelet transform and artificial neural network hybrid models.” In: *Hydrological Sciences Journal*, 59:2, 312-324.
- Seager, R., Naik, N., Baethgen, W., Robertson, A., Kushnir, Y., Nakamura, J., Jurburg, S. (2010) “Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in southeast South America over the past century.” In: *Journal of Climate*, 23, 5517–5539.
- Silva, R.M., Santos, C.A.G., Macêdo, M.L.A., Silva, L.P, Freire, P.K.M.M. (2013) “Space-time variability of rainfall and hydrological trends in the Alto São Francisco River basin.” In: *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*, 359, 177-182.
- Spaeth, F. (2008). *Modelo para previsão de vazão fluvial baseado em wavelets e redes neurais*, Dissertação de Mestrado em Ciências da Computação, Programa de Pós-

Graduação em Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 92p.

- Timilsena, J., Piechota, T., Tootle, G., Singh, A. (2009). “Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term Colorado river basin streamflow.” In: *Journal of Hydrology*, 365, 289-301.
- Torrence, C., Compo, G. (1998). “A practical guide to wavelet analysis.” In: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78.
- Trenberth, K.E., Caron, J.M. (2000) “The Southern Oscillation Revisited: Sea level pressures, surface temperatures and precipitation.” In: *Journal of Climate*, 13, 4358-4365.
- USAID – United States Agency for International Development. (2007) Adapting to climate variability and change: A guidance manual for development planning. Washington, DC, EUA.
- Veerstegh, G.J.M. (2008). “Solar forcing of climate. 2: Evidence from the Past.” In: *Space Science Reviews*. 120(3–4), 243–286.
- Wang, Q., Hu, S., Li, Y. (2011). “Wavelet Transform Method for Synthetic Generation of Daily Streamflow.” In: *Water Resources Management*. 25, 41–57.

APÊNDICES

A – POSTOS DO SIN COM SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS MENS AIS DISPONIBILIZADAS PELO ONS E FONTES DE OBTEÇÃO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS

Tabela A.1 – Postos do SIN com séries de vazões médias mensais disponibilizadas pelo ONS (2014) e utilizadas neste estudo – os números entre parênteses são os códigos dos postos utilizados pelo ONS.

Usina*	Posição**	Região	Latitude	Longitude
Camargos (1)	33	Sudeste	-21,3231	-44,6097
Itutinga (2)	34	Sudeste	-21,2919	-44,6192
Furnas (6)	35	Sudeste	-20,6692	-46,3139
Mascarenhas de Moraes (7)	36	Sudeste	-20,2819	-47,0669
Estreito (8)	37	Sudeste	-20,1528	-47,2808
Jaguara (9)	38	Sudeste	-20,0203	-47,4261
Igarapava (10)	39	Sudeste	-19,9872	-47,7572
Volta Grande (11)	40	Sudeste	-20,0328	-48,2214
Porto Colômbia (12)	41	Sudeste	-20,1311	-48,5722
Caconde (14)	42	Sudeste	-21,5742	-46,6219
Euclides Da Cunha (15)	43	Sudeste	-21,6047	-46,9522
A.S.Oliveira (16)	44	Sudeste	-21,6253	-47,0156
Marimondo (17)	45	Sudeste	-20,3131	-49,1883
Água Vermelha (18)	46	Sudeste	-19,8644	-50,3486
Batalha (22)	110	Centro-Oeste	-17,3456	-47,4894
Corumbá Iii (23)	111	Centro-Oeste	-16,7883	-47,9392
Emborcação (24)	47	Sudeste	-18,4483	-47,9847
Nova Ponte (25)	48	Sudeste	-19,1339	-47,6942
Capim Branco Ii (28)	49	Sudeste	-18,6589	-48,4386
Itumbiara (31)	50	Sudeste	-18,4083	-49,0992
Cachoeira Dourada (32)	51	Sudeste	-18,5019	-49,4911
São Simão (33)	52	Sudeste	-19,0153	-50,4931
Ilha Solteira (34)	53	Sudeste	-20,3797	-51,3689
A.A. Laydner (47)	54	Sudeste	-23,2106	-49,2303
Piraju (48)	55	Sudeste	-23,1544	-49,38
Chavantes (49)	56	Sudeste	-23,1289	-49,7317

Usina*	Posição**	Região	Latitude	Longitude
Lucas Nogueira Garcez (50)	57	Sudeste	-22,9017	-49,9967
Canoas II (51)	58	Sudeste	-22,9383	-50,2508
Canoas I (52)	59	Sudeste	-22,9411	-50,5172
Mauá (57)	1	Sul	-24,0633	-50,7014
Capivara (61)	60	Sudeste	-22,6603	-51,3581
Taquaruçu (62)	61	Sudeste	-22,5444	-52,0006
Rosana (63)	62	Sudeste	-22,6022	-52,8728
Santa Clara PR (71)	132	Nordeste	-17,8961	-40,2017
Fundão (72)	2	Sul	-25,7086	-51,9981
Desvio Jordao (73)	3	Sul	-25,7597	-52,0856
Foz do Areia (74)	4	Sul	-26,0139	-51,6644
Segredo (76)	5	Sul	-25,7881	-52,1142
Salto Santiago (77)	6	Sul	-25,6211	-52,6089
Salto Osorio (78)	7	Sul	-25,5372	-53,0089
Baixo Iguaçu (81)	8	Sul	-25,5033	-53,6717
São Roque (88)	9	Sul	-27,4975	-50,8054
Garibaldi (89)	10	Sul	-27,6214	-50,9881
Itá (92)	11	Sul	-27,2669	-52,3814
Passo Fundo (93)	12	Sul	-27,5525	-52,7314
Foz do Chapecó (94)	13	Sul	-27,07	-53,04
Monte Claro (97)	14	Sul	-29,8636	-51,5206
Castro Alves (98)	15	Sul	-29,0081	-51,3789
Espora (99)	112	Centro-Oeste	-18,6667	-51,85
Salto Pilão (101)	16	Sul	-27,18	-49,08
São José (102)	17	Sul	-28,1769	-54,75
Passo São João (103)	18	Sul	-28,1289	-55,0492
Traição (104)	63	Sudeste	-23,595	-46,6939
Pedreira (109)	64	Sudeste	-23,7031	-46,6742
Ernestina (110)	19	Sul	-28,5558	-52,5456
Passo Real (111)	20	Sul	-29,0167	-53,1833
Jacuí (112)	21	Sul	-29,0667	-53,2
Itauba (113)	22	Sul	-29,25	-53,2364

Usina*	Posição**	Região	Latitude	Longitude
Dona Francisca (114)	23	Sul	-29,4269	-53,2725
Governador Parigot de Souza (115)	24	Sul	-25,1378	-48,8733
Pedras (116)	65	Sudeste	-23,8183	-46,6897
Guarapiranga (117)	66	Sudeste	-23,6717	-46,7272
Billings (118)	67	Sudeste	-23,7894	-46,5461
Jaguari (120)	68	Sudeste	-23,195	-46,0281
Paraibuna (121)	69	Sudeste	-23,41	-45,6011
Santa Branca (122)	70	Sudeste	-23,3731	-45,8711
Funil (123)	71	Sudeste	-21,1439	-45,0369
Sta Cecilia (125)	72	Sudeste	-22,4833	-43,8389
Anta (129)	73	Sudeste	-21,9211	-42,7903
Ilha dos Pombos (130)	74	Sudeste	-21,8511	-42,6081
Salto Grande (134)	75	Sudeste	-19,1461	-42,7489
Baguari (141)	76	Sudeste	-19,0331	-42,1169
Mascarenhas (144)	77	Sudeste	-19,5008	-40,9186
Rondon 2 (145)	142	Norte	-10,05	-61,97
Aimorés (148)	78	Sudeste	-19,4564	-41,0947
Candongá (149)	79	Sudeste	-20,2075	-42,8547
Retiro Baixo (155)	80	Sudeste	-18,84	-44,83
Três Marias (156)	81	Sudeste	-18,2139	-45,2583
Queimado (158)	113	Centro-Oeste	-16,2092	-47,3233
Alto Tietê (160)	82	Sudeste	-23,5769	-45,9725
Edgard de Souza sem Tributários (164)	83	Sudeste	-23,455	-46,9106
Sobradinho (169)	133	Nordeste	-9,43333	-40,8283
Itaparica (172)	134	Nordeste	-9,1425	-38,31
Moxotó (173)	135	Nordeste	-9,35778	-38,2083
Paulo Afonso (175)	136	Nordeste	-9,41639	-38,2086
Xingó (178)	137	Nordeste	-9,61806	-37,79
Itapebi (188)	84	Sudeste	-16,11	-40,17
Boa Esperança (190)	138	Nordeste	-6,68889	-43,5667

Usina*	Posição**	Região	Latitude	Longitude
Cana Brava (191)	114	Centro-Oeste	-13,4078	-48,1422
Rosal (196)	85	Sudeste	-20,9172	-41,7217
Picada (197)	86	Sudeste	-21,9	-43,5333
Sobragi (198)	87	Sudeste	-21,94	-43,37
Itaocara (199)	88	Sudeste	-21,6905	-42,1603
Tocos (201)	89	Sudeste	-22,7486	-44,1247
Lajes/P.Passos/Fontes Nova (202)	90	Sudeste	-22,6919	-43,8639
Santana (203)	91	Sudeste	-22,0744	-48,0453
Cachoeira Caldeirão (204)	143	Norte	-0,85278	-51,2967
Corumbá Iv (205)	115	Centro-Oeste	-16,3211	-48,1903
Miranda (206)	92	Sudeste	-18,9133	-48,0392
Capim Branco I (207)	93	Sudeste	-18,7958	-48,1369
Corumbá I (209)	116	Centro-Oeste	-17,9894	-48,5325
Funil-Grande (211)	94	Sudeste	-21,1439	-45,0369
Barra Grande (215)	25	Sul	-27,7667	-51,2167
Campos Novos (216)	26	Sul	-27,6017	-51,3169
Machadinho (217)	27	Sul	-27,5236	-51,7847
Monjolinho (220)	28	Sul	-27,3289	-52,735
Salto Caxias (222)	29	Sul	-25,5433	-53,4925
Salto Apicás (225)	117	Centro-Oeste	-10,3386	-56,9828
Sinop (227)	118	Centro-Oeste	-11,2689	-55,4542
Colider (228)	119	Centro-Oeste	-10,9847	-55,766
Teles Pires (229)	120	Centro-Oeste	-9,34306	-56,7764
Barra Bonita (237)	95	Sudeste	-22,5194	-48,5339
A.S. Lima (238)	96	Sudeste	-22,1536	-48,7525
Ibitinga (239)	97	Sudeste	-21,7572	-48,9919
Promissão (240)	98	Sudeste	-21,2956	-49,7831
Salto Verdinho (241)	99	Sudeste	-19,1467	-50,7678
Nova Avanhandava (242)	100	Sudeste	-21,1167	-50,2017
Três Irmãos (243)	101	Sudeste	-20,6714	-51,2986
Jupia (245)	102	Sudeste	-20,7814	-51,6336

Usina*	Posição**	Região	Latitude	Longitude
Porto Primavera (246)	103	Sudeste	-22,4819	-52,9561
Caçu (247)	121	Centro-Oeste	-18,36	-51,23
Barra Dos Coqueiros (248)	122	Centro-Oeste	-18,7233	-51,0031
Ourinhos (249)	104	Sudeste	-23,0678	-49,8375
Serra do Facão (251)	123	Centro-Oeste	-18,0697	-47,6736
São Salvador (253)	144	Norte	-12,7997	-48,2414
Pedra do Cavalo (254)	139	Nordeste	-12,5844	-38,9994
Irapé (255)	105	Sudeste	-17,4	-42,9
Peixe Angical (257)	145	Norte	-12,2361	-48,3878
Murta (258)	106	Sudeste	-16,3778	-42,1636
Itiquira I E II (259)	124	Centro-Oeste	-17,0908	-54,8308
Foz do Rio Claro (261)	107	Sudeste	-19,1158	-50,6436
Guilman-Amorim (262)	108	Sudeste	-19,7081	-42,96
Porto Estrela (263)	109	Sudeste	-19,1164	-42,6631
Itaipu (266)	30	Sul	-25,4075	-54,5872
Balbina (269)	146	Norte	-1,91639	-59,4756
Serra da Mesa (270)	125	Centro-Oeste	-13,8272	-48,3078
Estreito Tocantins (271)	140	Nordeste	-6,58528	-47,4672
Lajeado (273)	147	Norte	-9,75639	-48,3744
Tucuruí (275)	148	Norte	-3,83306	-49,6469
Curuá-Una (277)	149	Norte	-2,81944	-54,3
Manso (278)	126	Centro-Oeste	-14,8831	-55,7983
Samuel (279)	150	Norte	-8,75111	-63,4542
Coaracy Nunes (280)	151	Norte	-0,90361	-51,2578
Ponte de Pedra (281)	127	Centro-Oeste	-17,6078	-54,8272
Santa Clara Mg (283)	141	Nordeste	-17,8961	-40,2017
14 de Julho (284)	31	Sul	-29,05	-51,6667
Jirau (285)	152	Norte	-9,25499	-64,6445
Quebra Queixo (286)	32	Sul	-26,6503	-52,5511
Santo Antonio (287)	153	Norte	-8,25	-63,33
Belo Monte (288)	154	Norte	-3,41194	-51,9517
Santo Antônio do Jari (290)	155	Norte	-0,65	-52,5167

Usina*	Posição**	Região	Latitude	Longitude
Dardanelos (291)	128	Centro-Oeste	-10,1619	-59,465
Salto (294)	129	Centro-Oeste	-18,8011	-51,1811
Jauru (295)	130	Centro-Oeste	-15,2389	-58,73
Guaporé (296)	131	Centro-Oeste	-15,1242	-58,9631
Ferreira Gomes (297)	156	Norte	0,855591	-51,1947

* O número entre parênteses é o número ONS.

** Posição nos gráficos dos subitens 6.3 e 6.5.

Tabela A.2 – Fontes de obtenção dos índices climáticos.

Índice	Nome	Sítio
NIÑO 3.4	Niño 3.4 SST Index SST 5N-5S,170W- 120W	http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.data
PDO	Pacific Decadal Oscillation	http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest
AMO	Atlantic multidecadal Oscillation (SST Index)	http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/AMO/
SOI	Southern Oscillation Index	http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/SOI/
MEI	Multivariate ENSO Index	http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html
ONI	Oceanic Niño Index	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
NAO	North Atlantic Oscillation	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml
AO	Arctic Oscillation	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/monthly.ao.index.b50.current.ascii.table

B – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORTE DO SIN

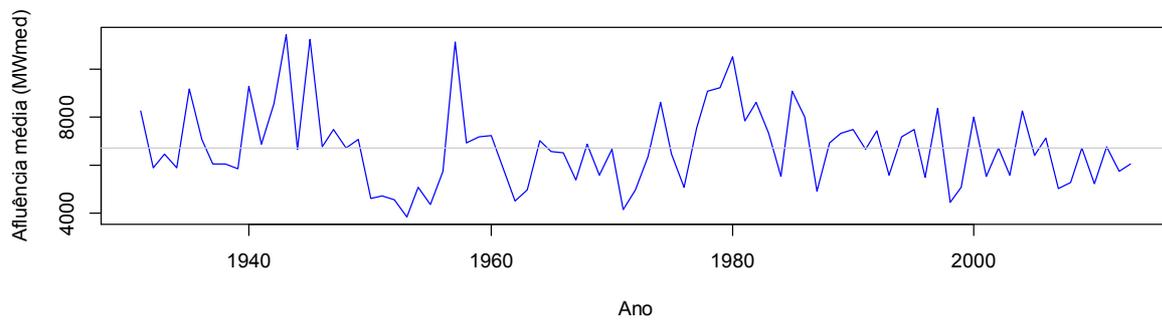


Figura B.1 – Série de aflúências da região Norte do SIN (1931 a 2013).

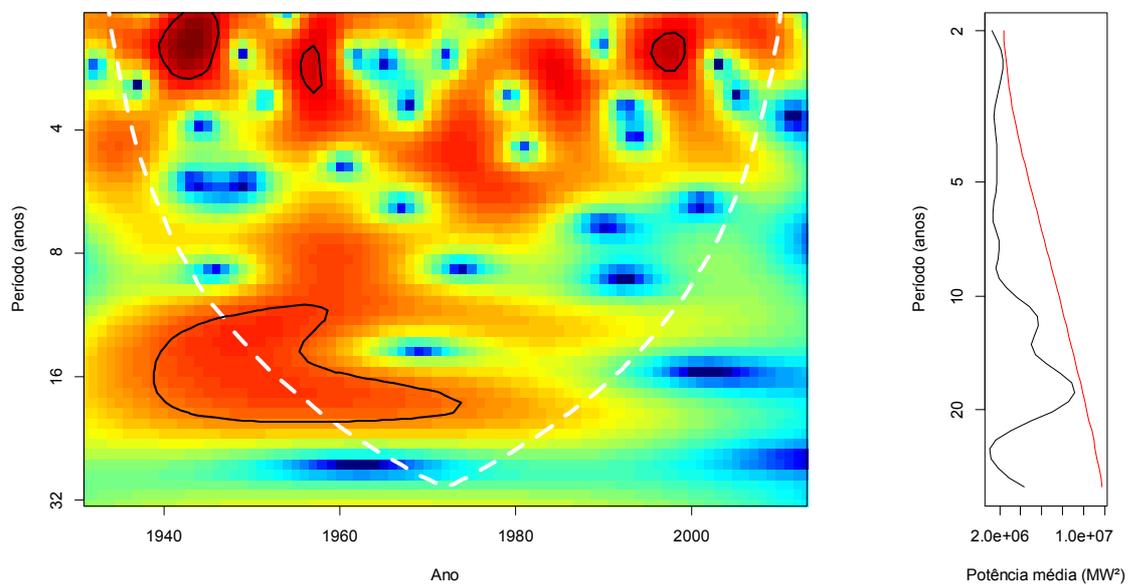


Figura B.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as aflúências anuais da região Norte do SIN.

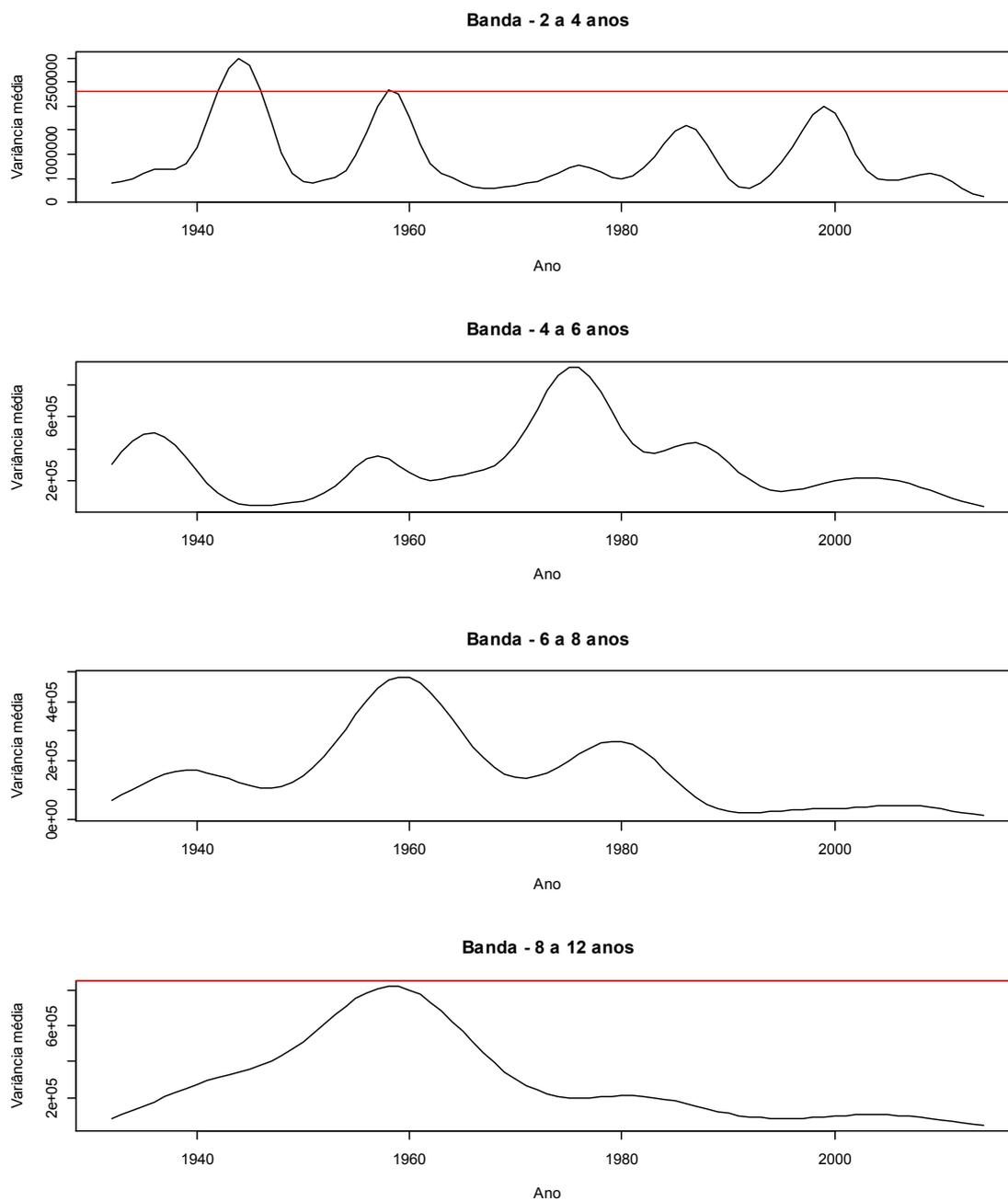


Figura B.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluências anuais da região Norte do SIN.

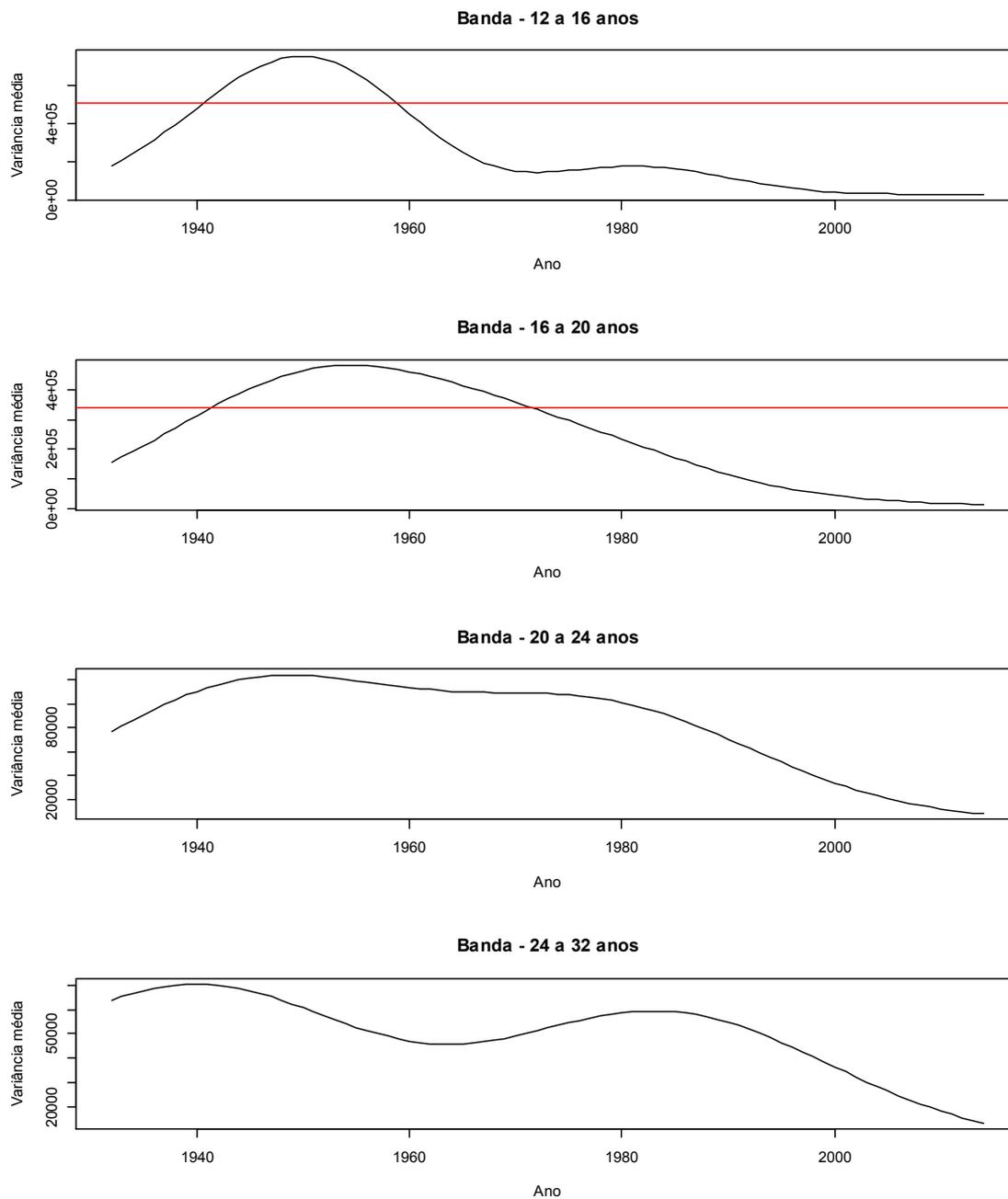


Figura B.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluências anuais da região Norte do SIN.

C – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO NORDESTE DO SIN

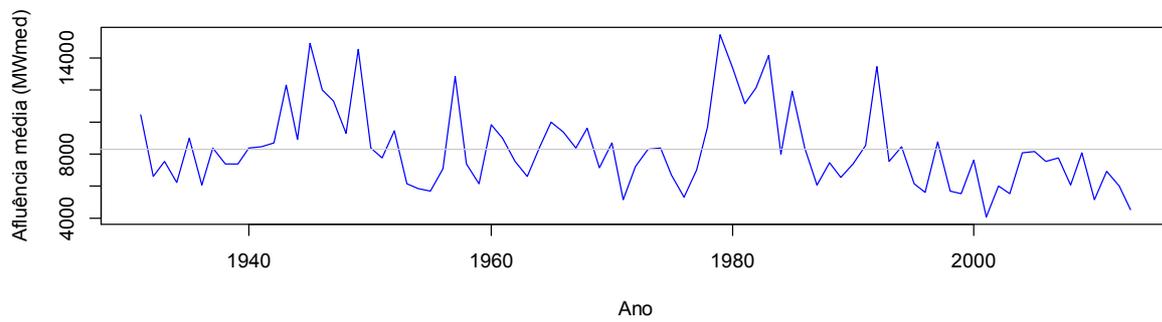


Figura C.1 – Série de afluições da região Nordeste do SIN (1931 a 2013).

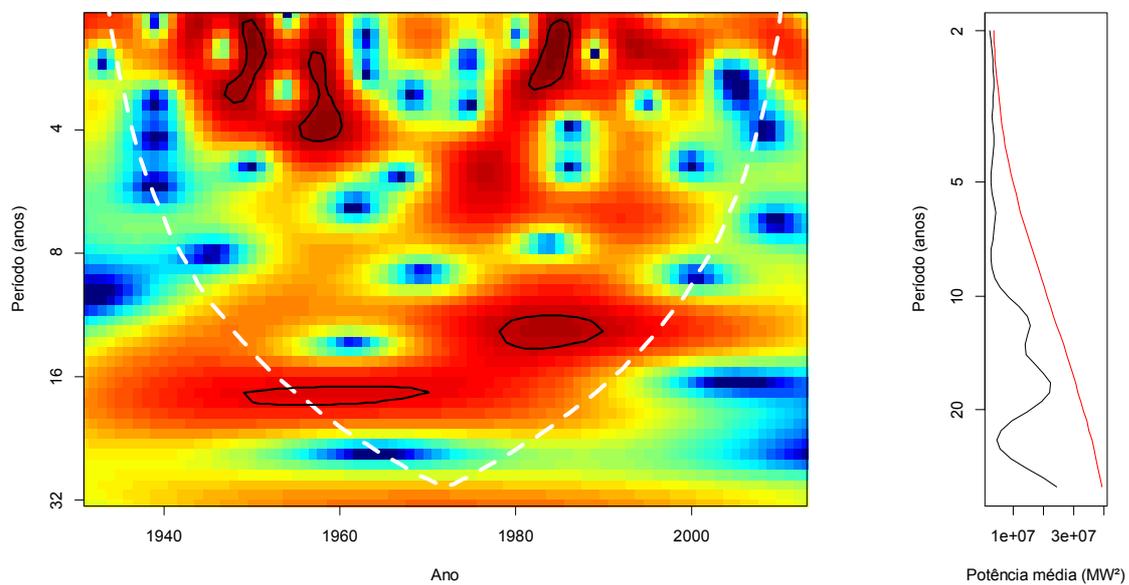


Figura C.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluições anuais da região Nordeste do SIN.

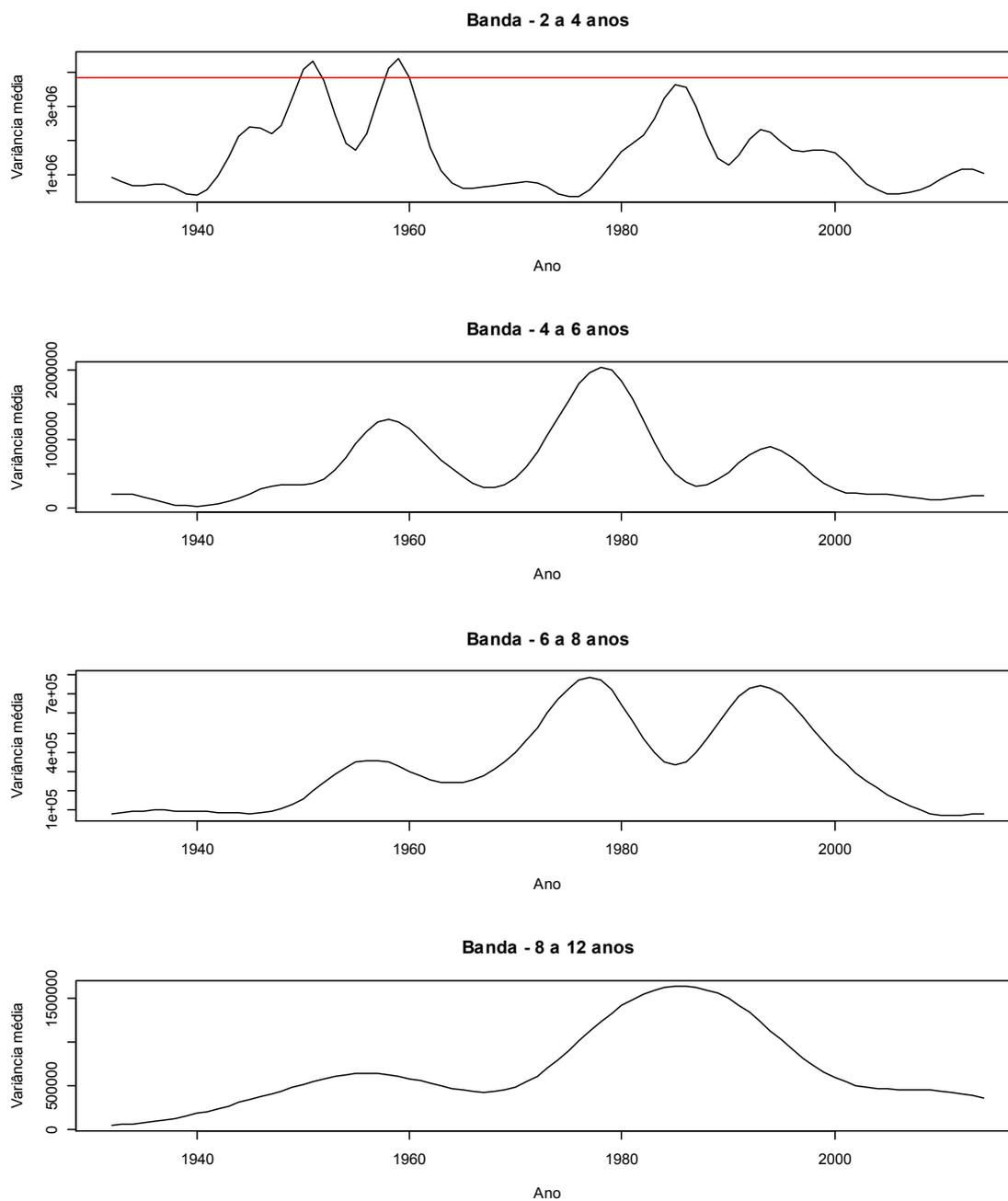


Figura C.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluências anuais da região Nordeste do SIN.

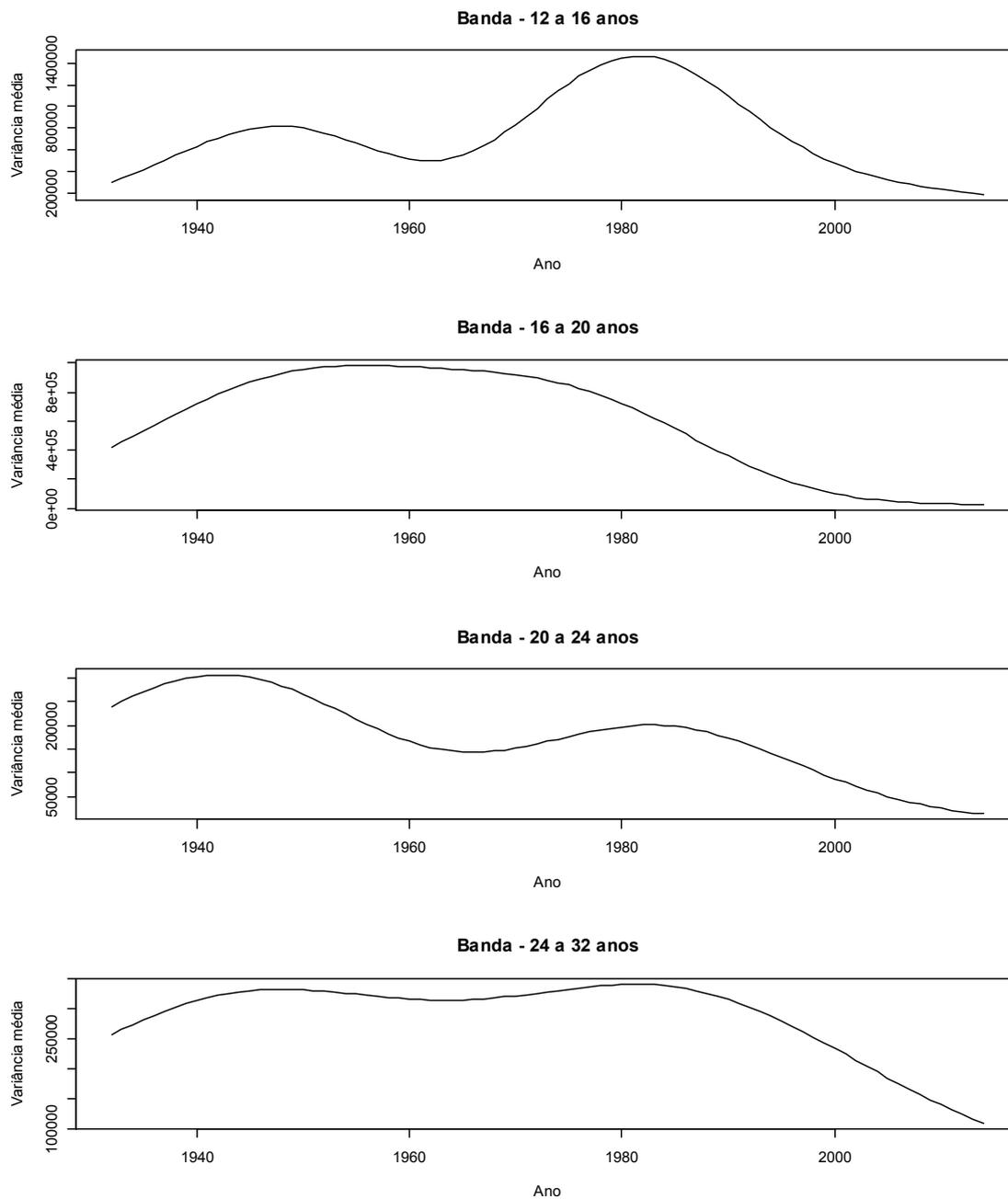


Figura C.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluições anuais da região Nordeste do SIN.

D – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUL DO SIN

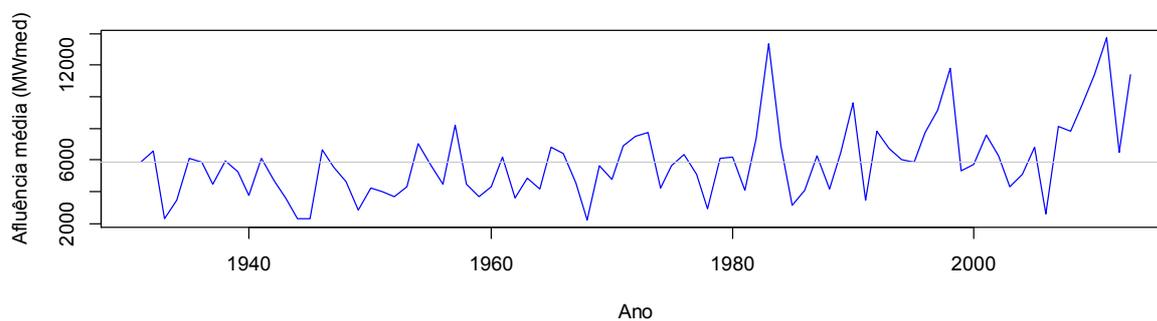


Figura D.1 – Série de aflúências da região Sul do SIN (1931 a 2013).

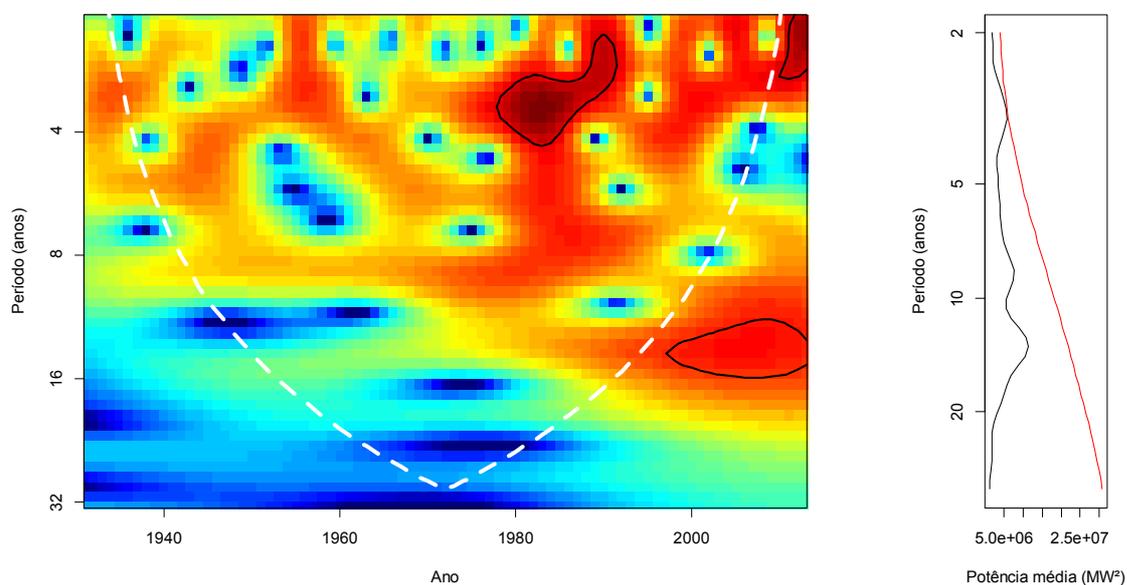


Figura D.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as aflúências anuais da região Sul do SIN.

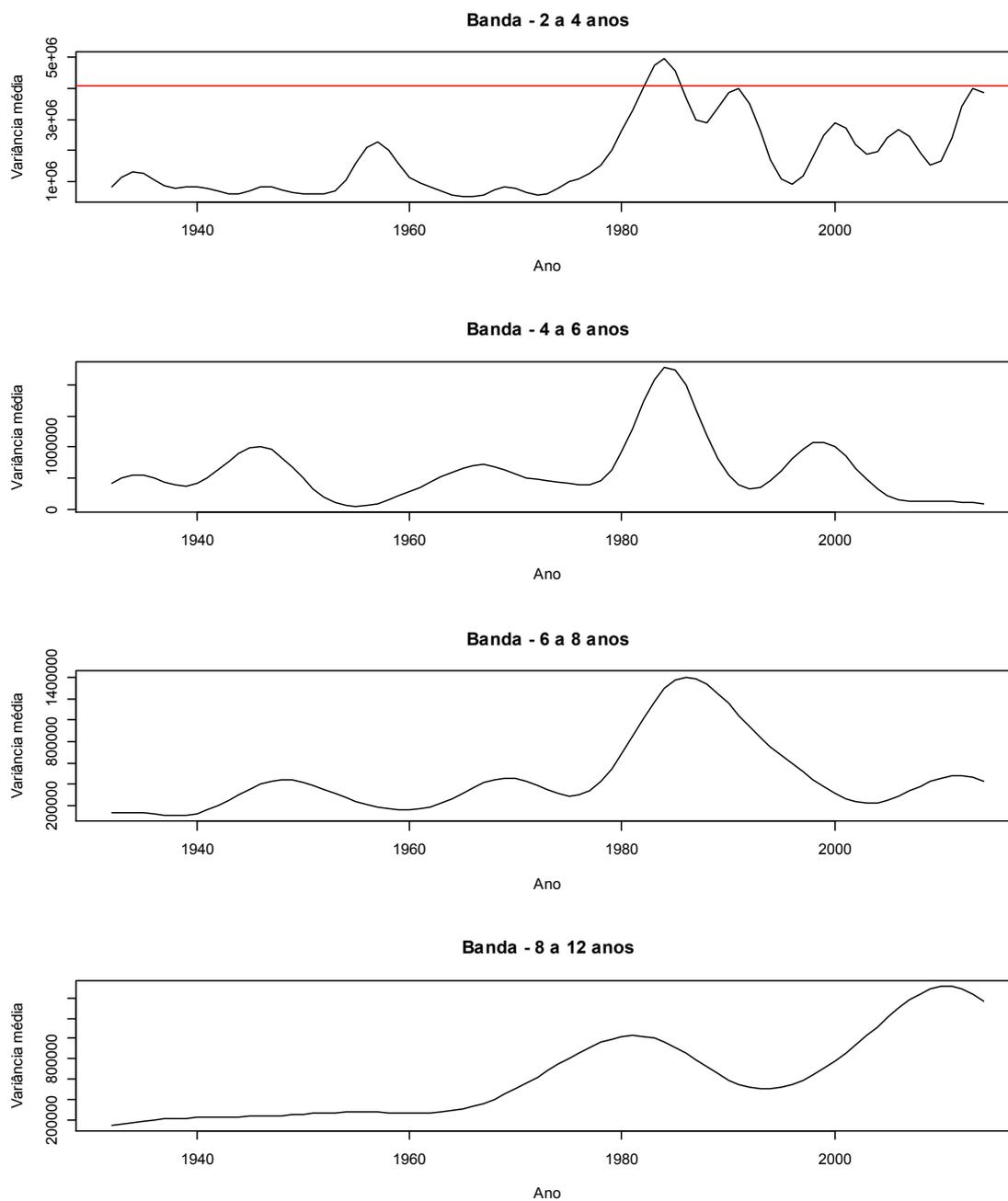


Figura D.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluências anuais da região Sul do SIN.

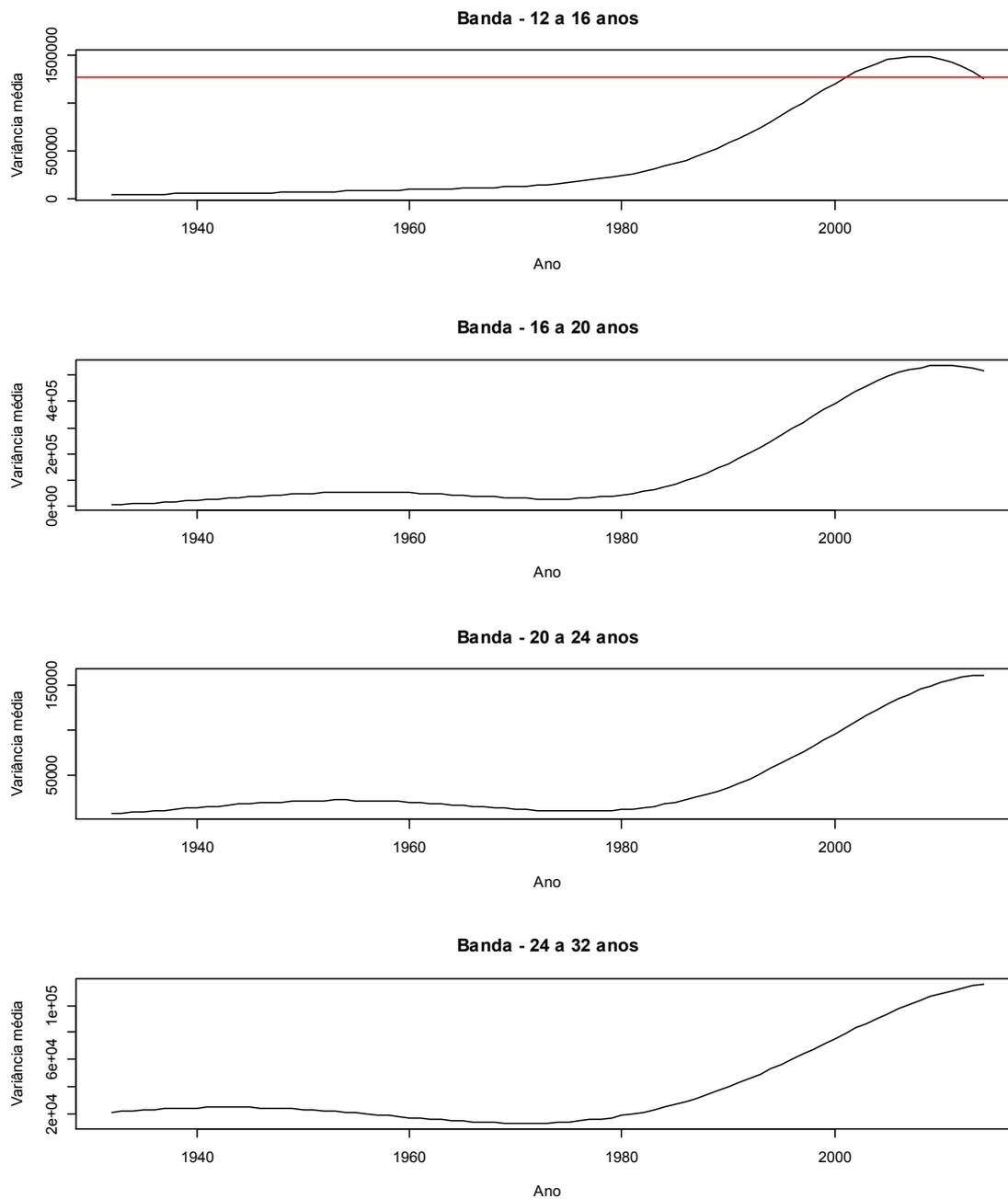


Figura D.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluências anuais da região Sul do SIN.

E – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A REGIÃO SUDESTE DO SIN

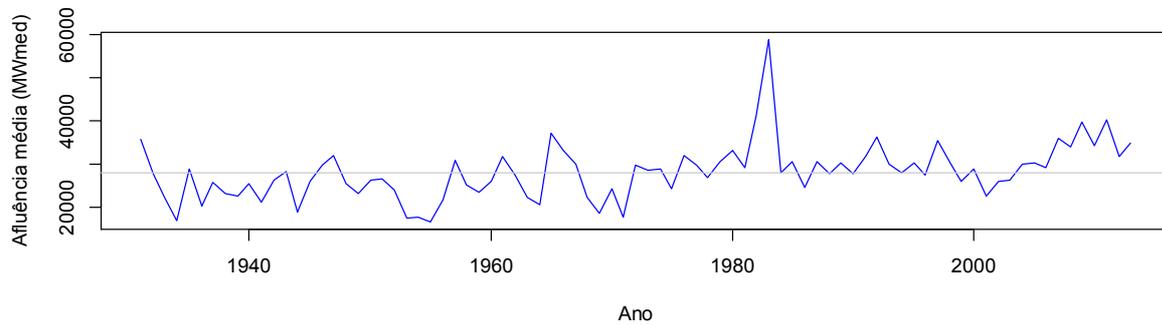


Figura E.1 – Série de afluições da região Sudeste do SIN (1931 a 2013).

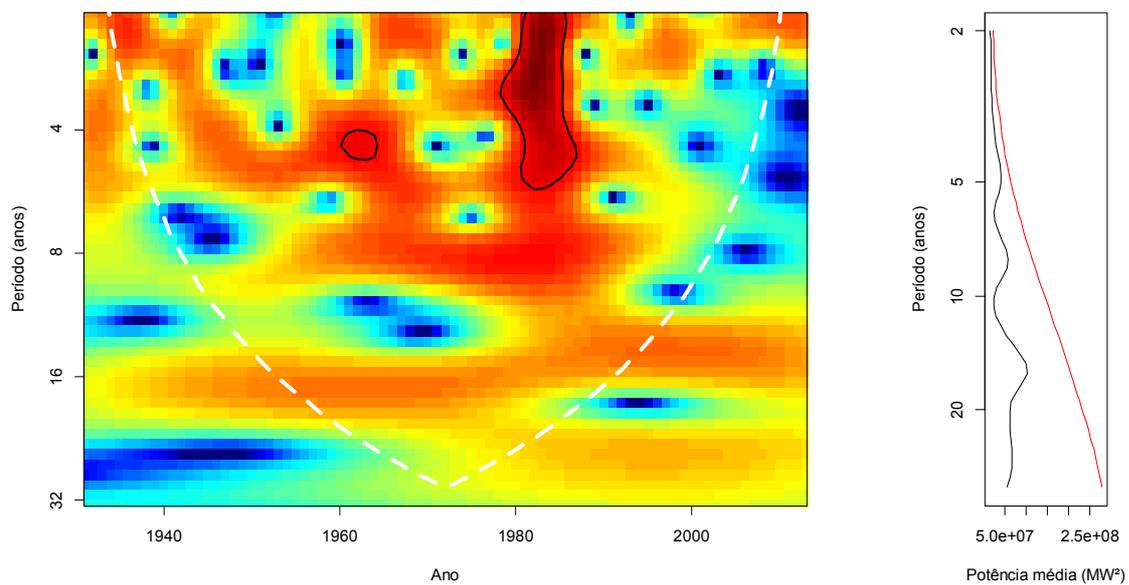


Figura E.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as afluições anuais da região Sudeste do SIN.

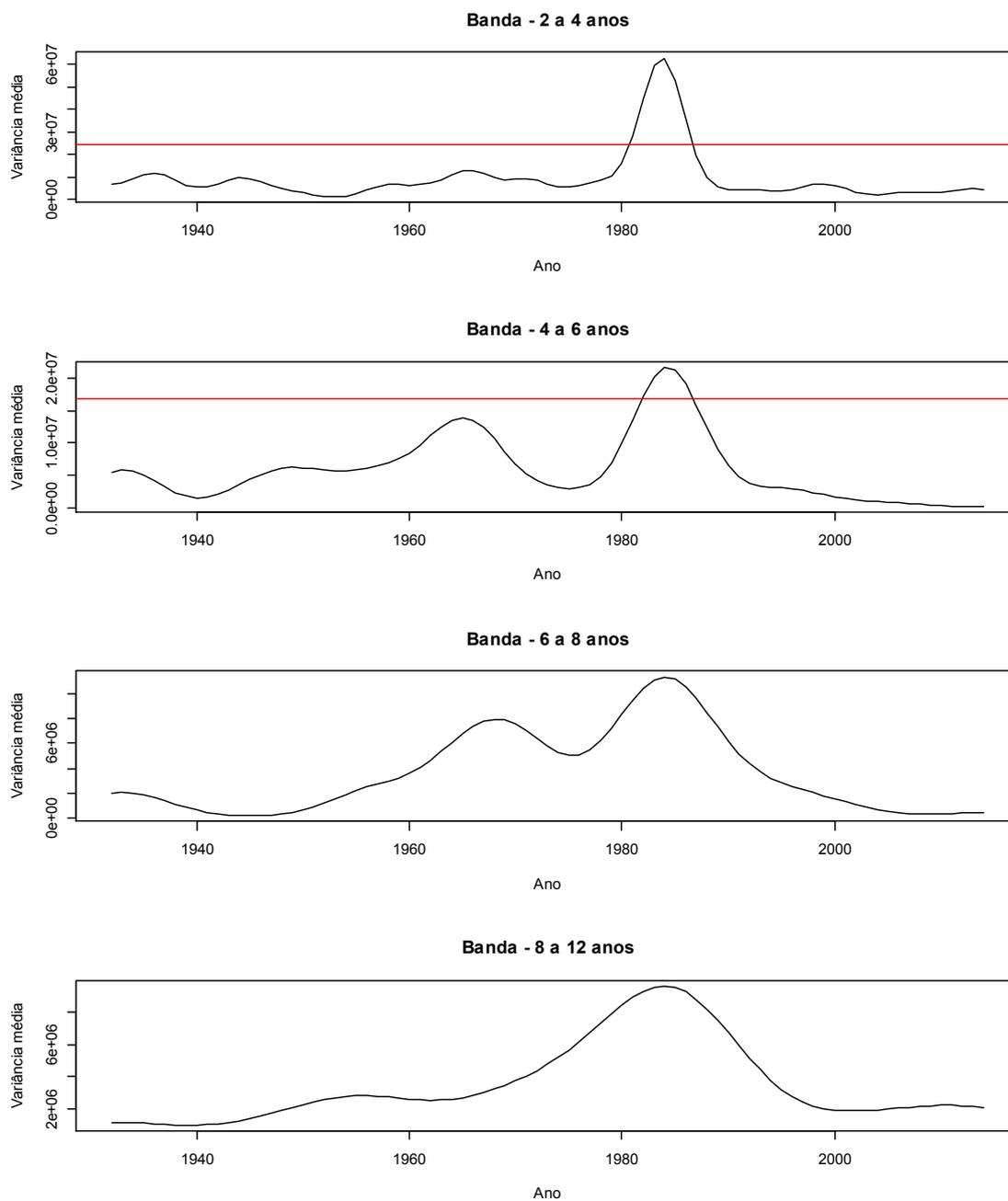


Figura E.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 8 anos, 8 a 16 anos e 16 a 32 anos para as afluências anuais da região Sudeste do SIN.

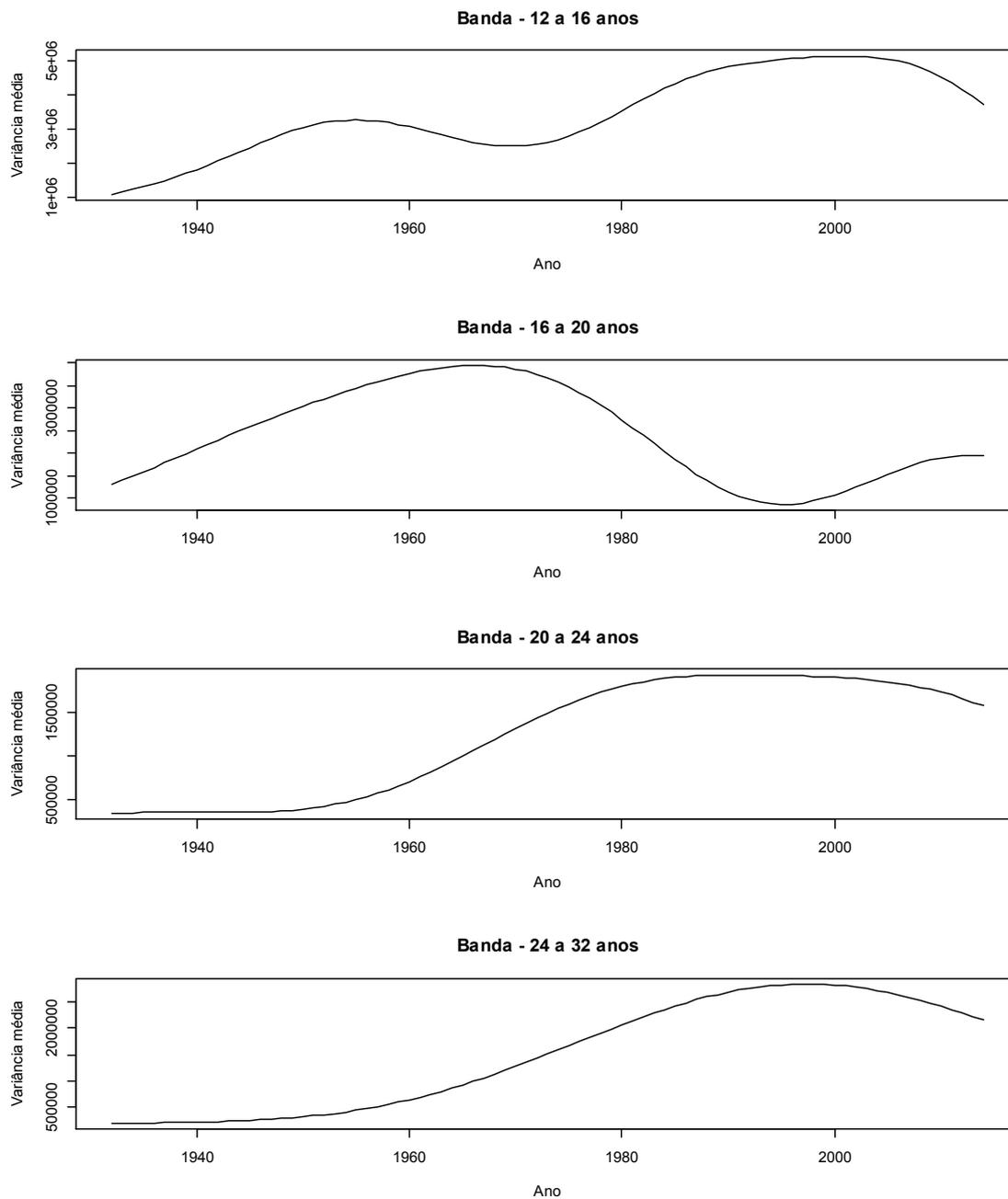


Figura E.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as afluências anuais da região Sudeste do SIN.

F – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A UHE FURNAS

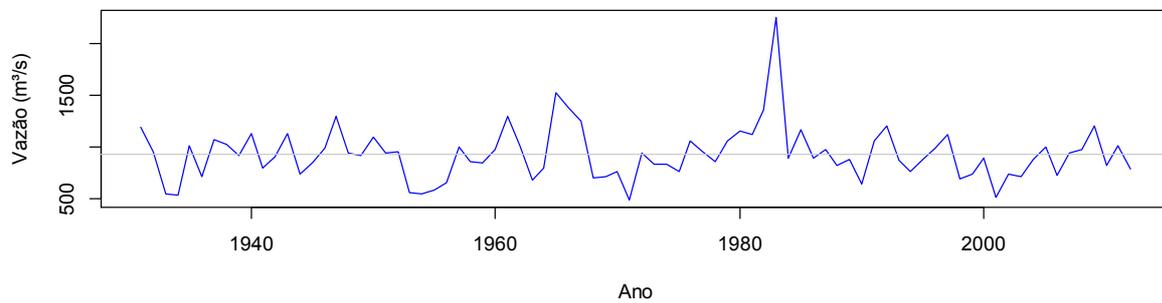


Figura F.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Furnas (1931 a 2012).

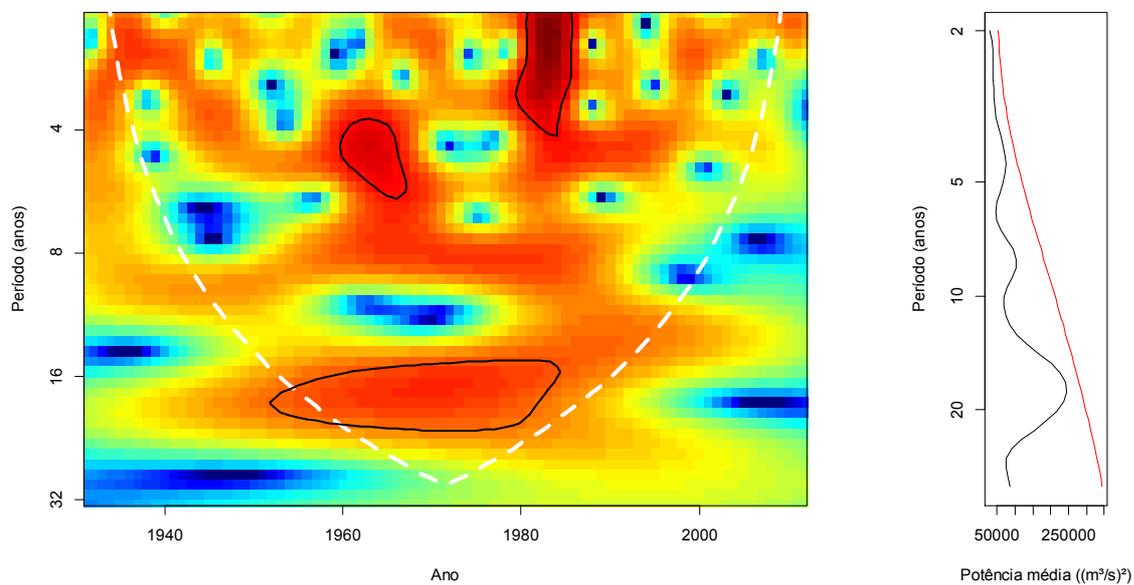


Figura F.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Furnas.

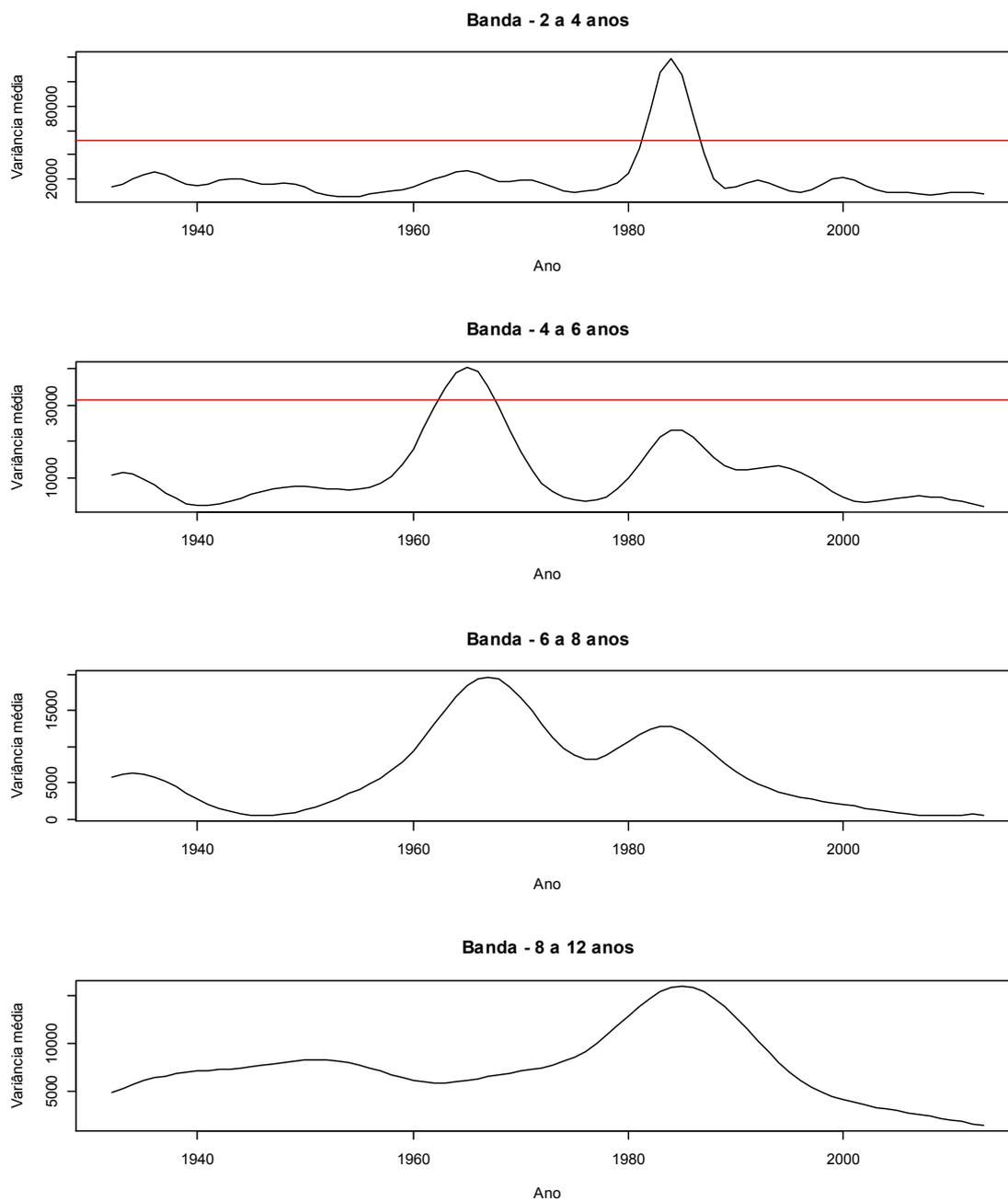


Figura F.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Furnas.

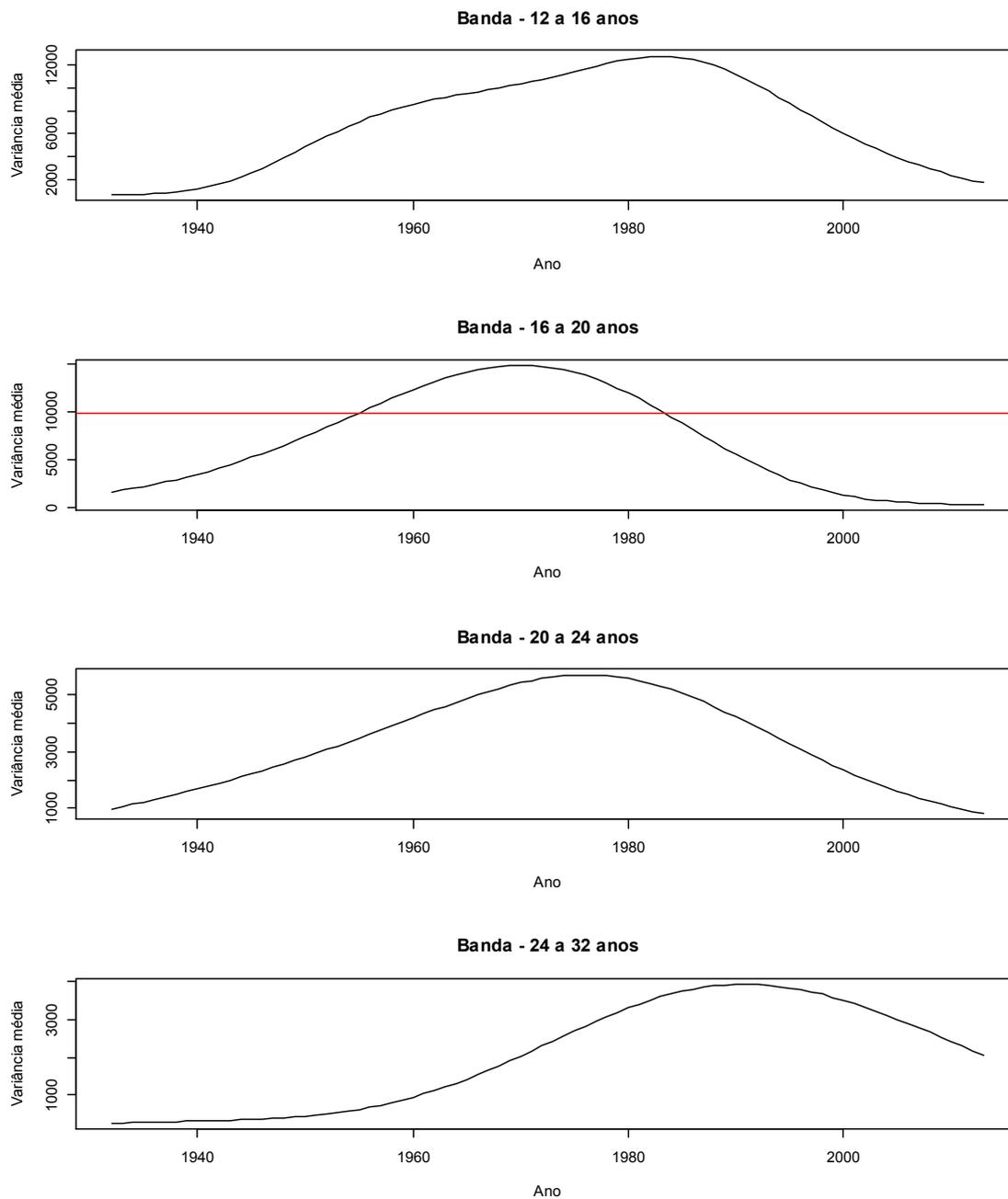


Figura F.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Furnas.

G – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA A UHE ITAIPU

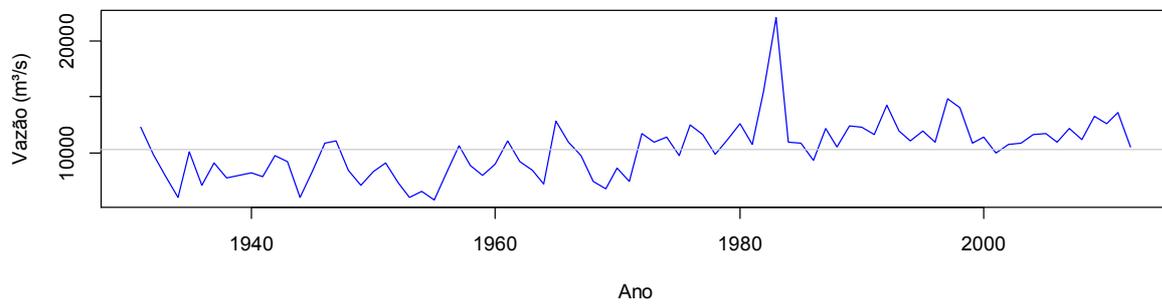


Figura G.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Itaipu (1931 a 2012).

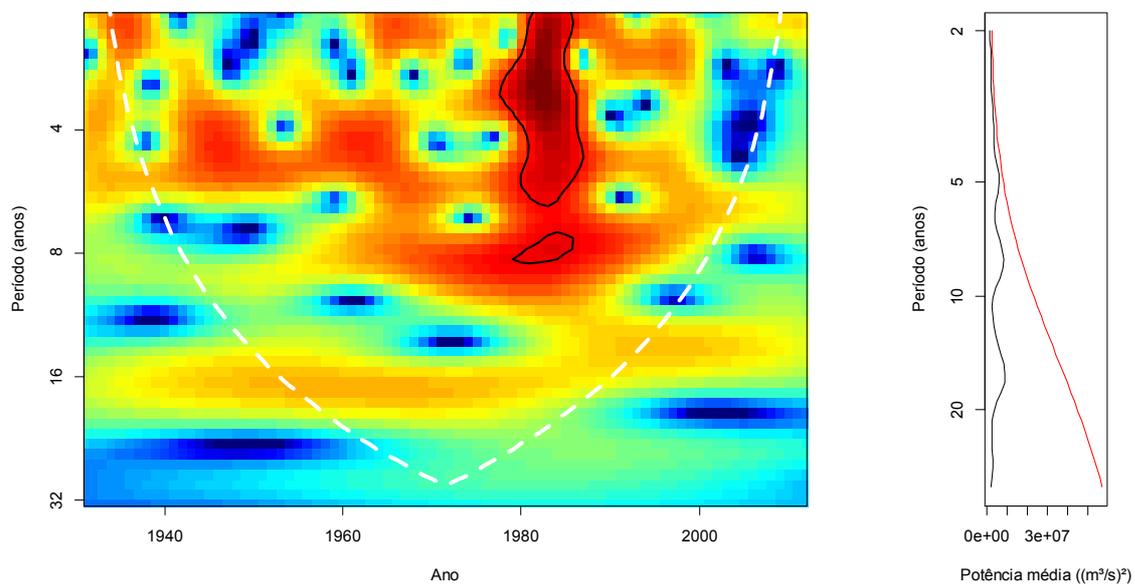


Figura G.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Itaipu.

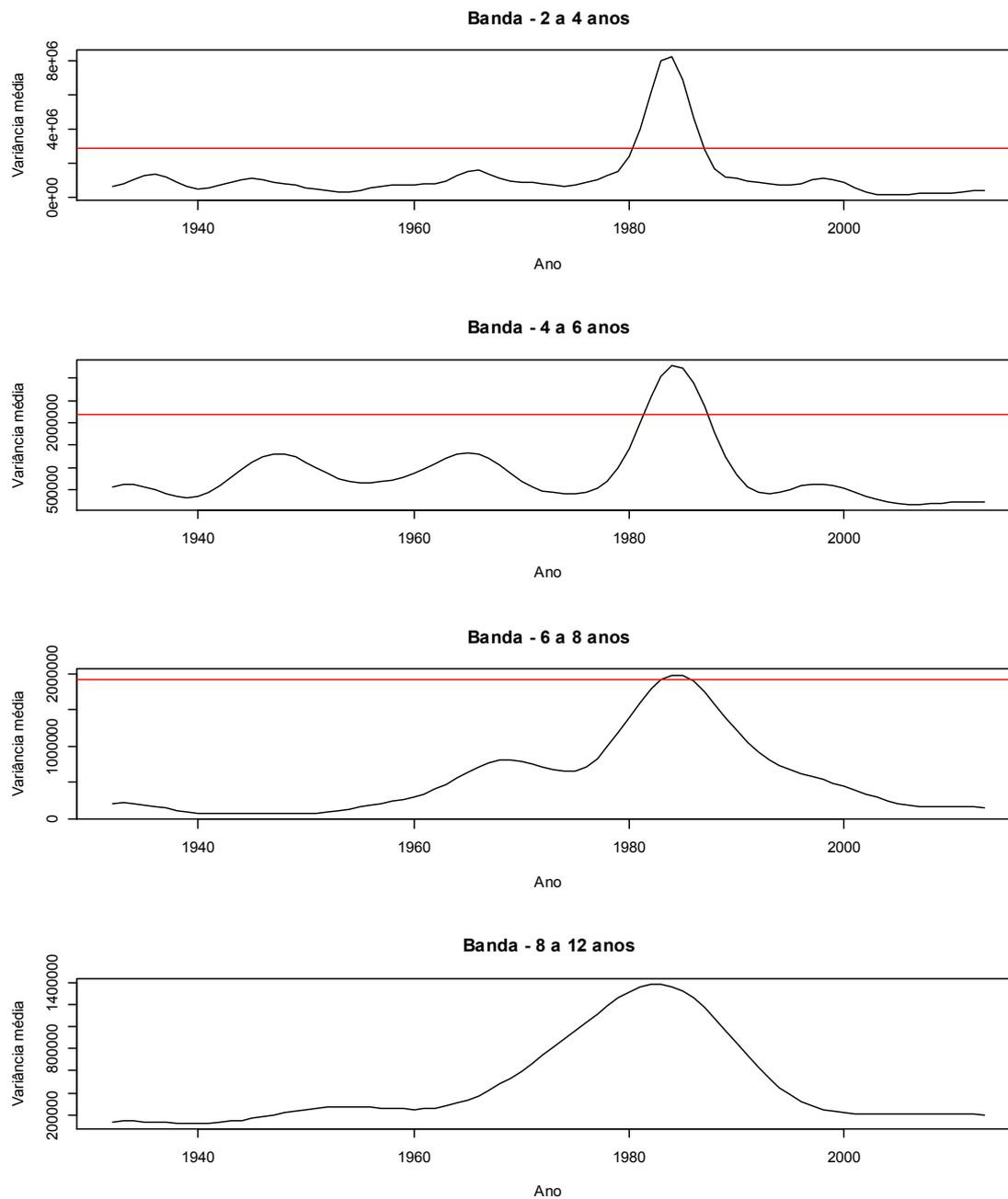


Figura G.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Itaipu.

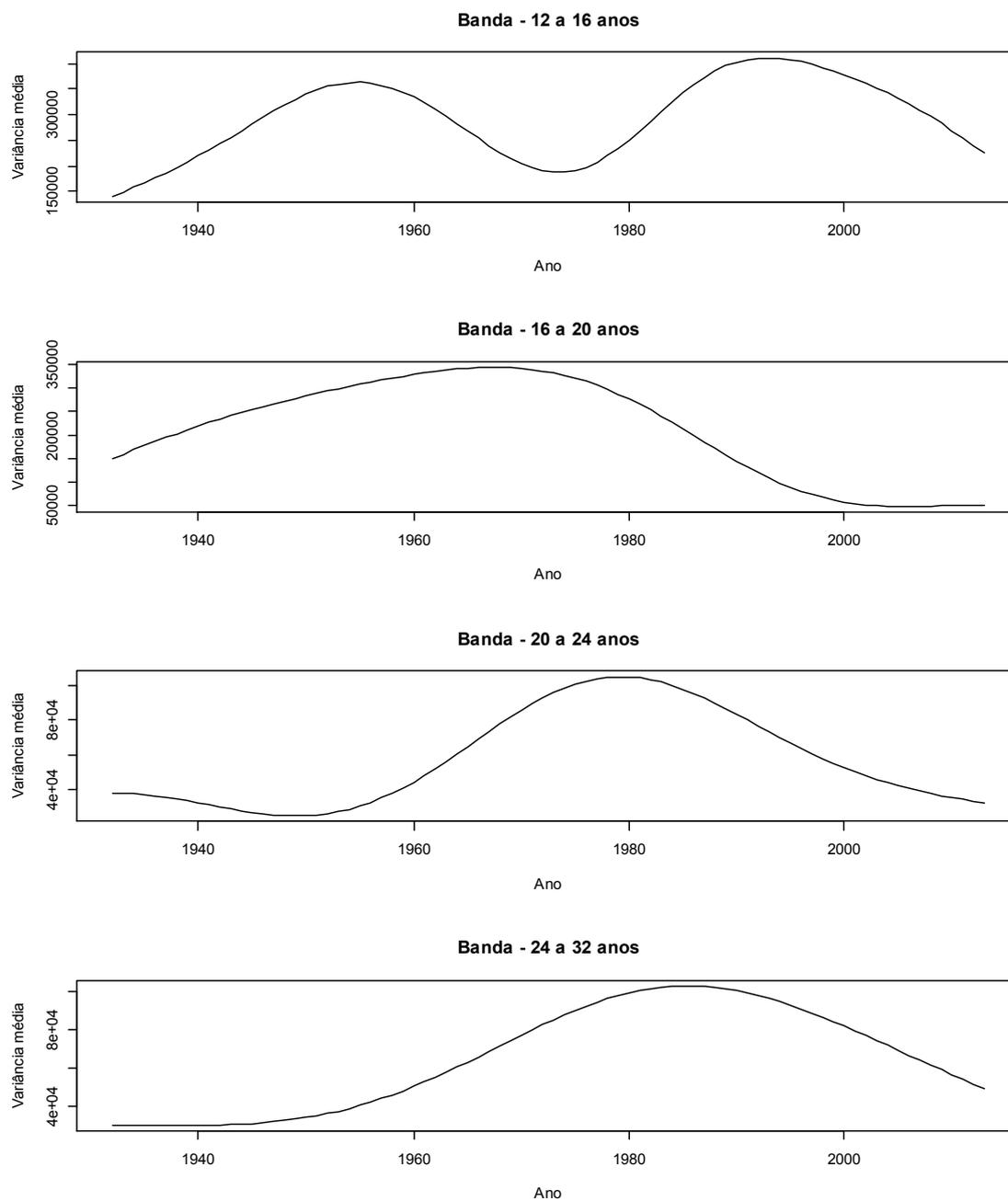


Figura G.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Itaipu.

H – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA TUCURUÍ

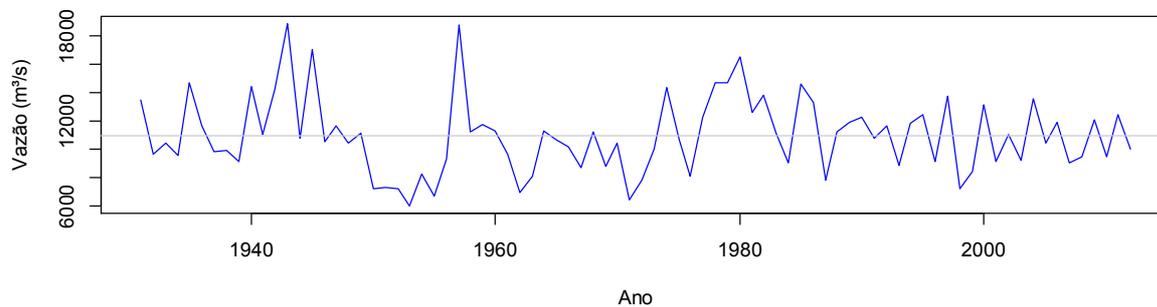


Figura H.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Tucuruí (1931 a 2012).

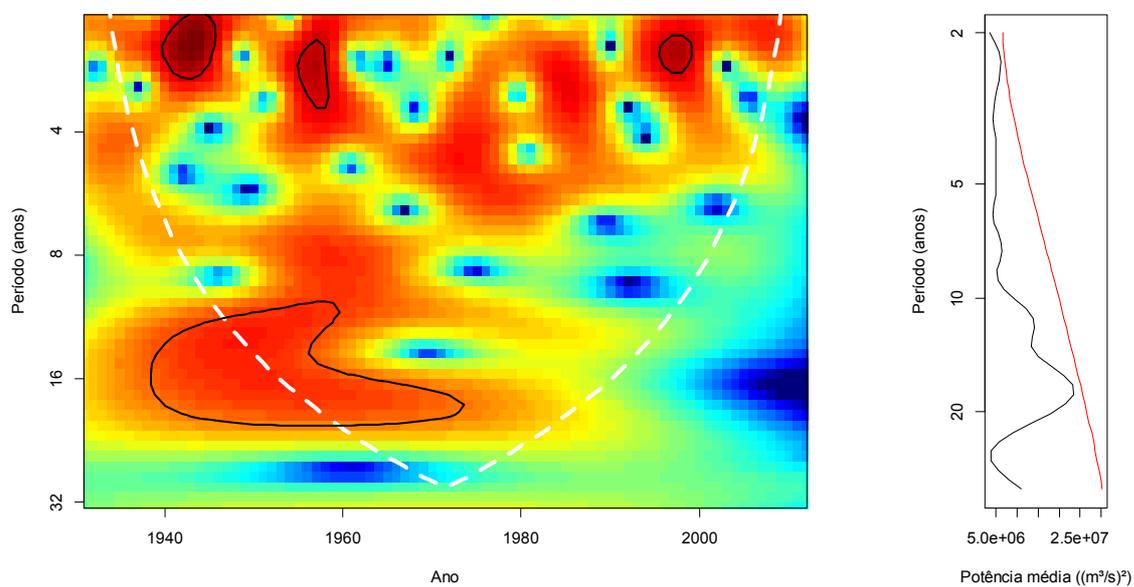


Figura H.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Tucuruí.

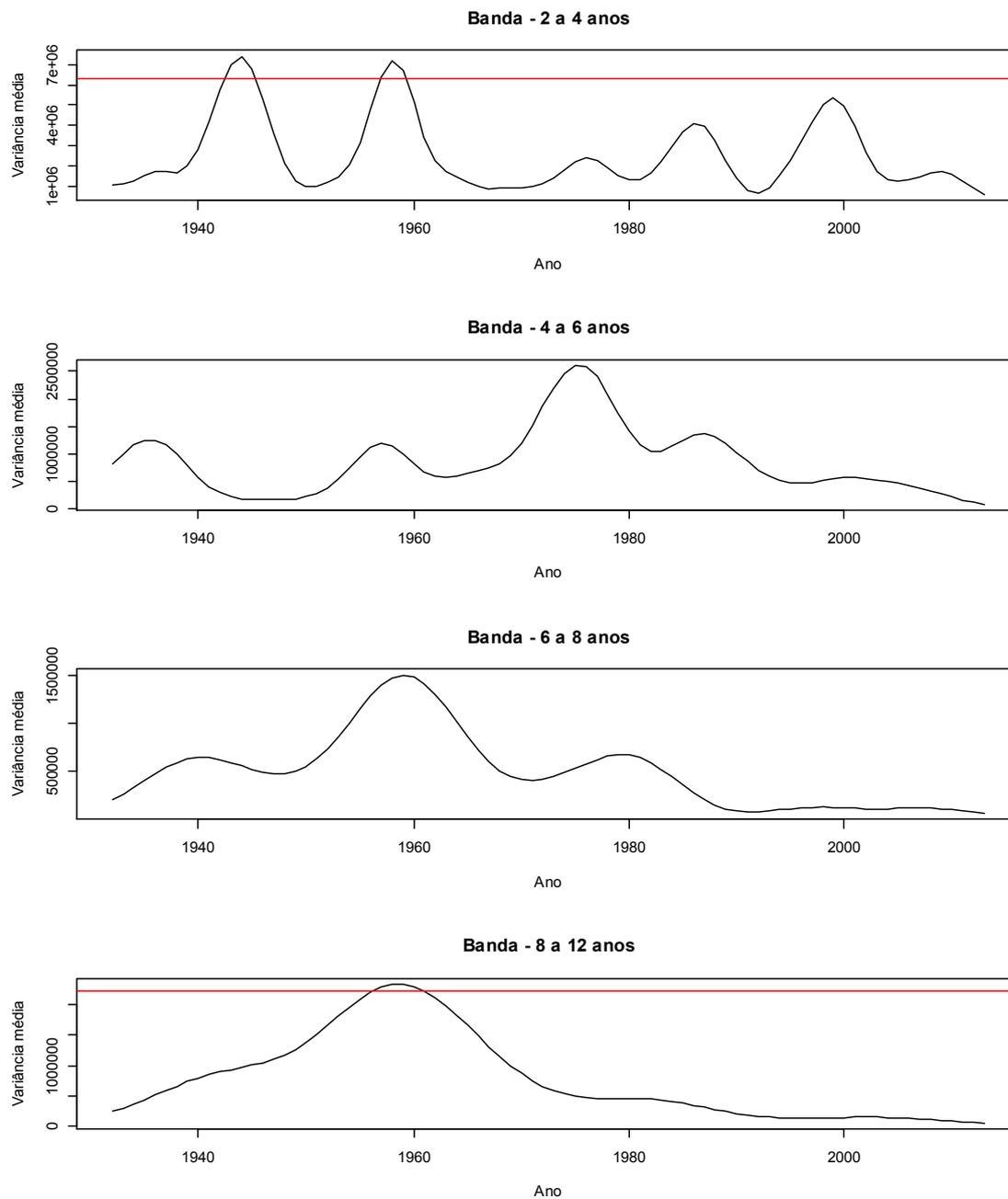


Figura H.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Tucuruí.

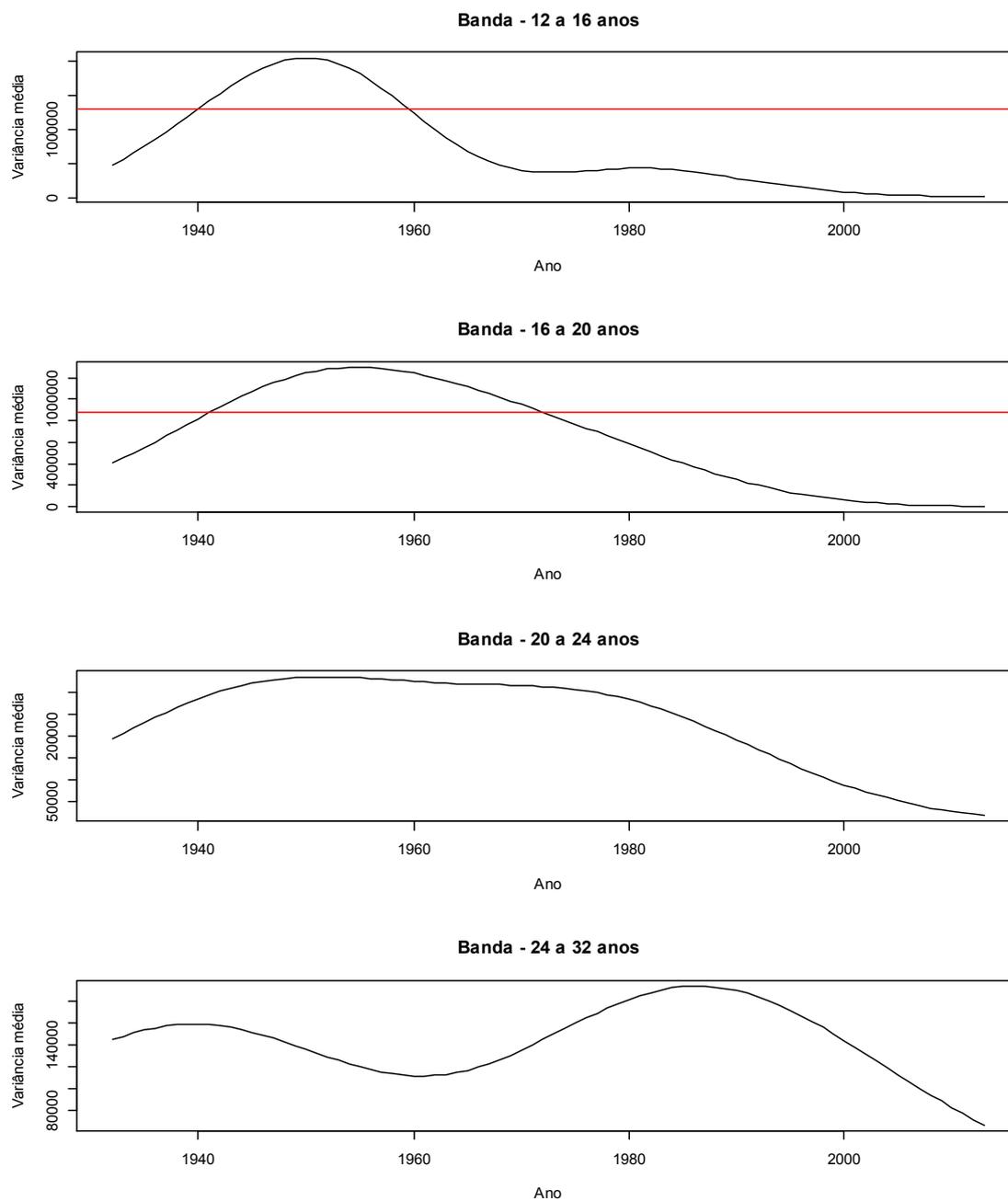


Figura H.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Tucuruí.

I – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA SOBRADINHO

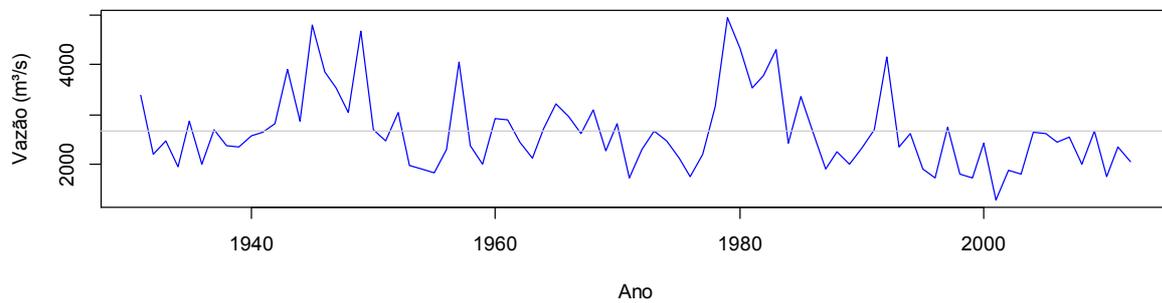


Figura I.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Sobradinho (1931 a 2012).

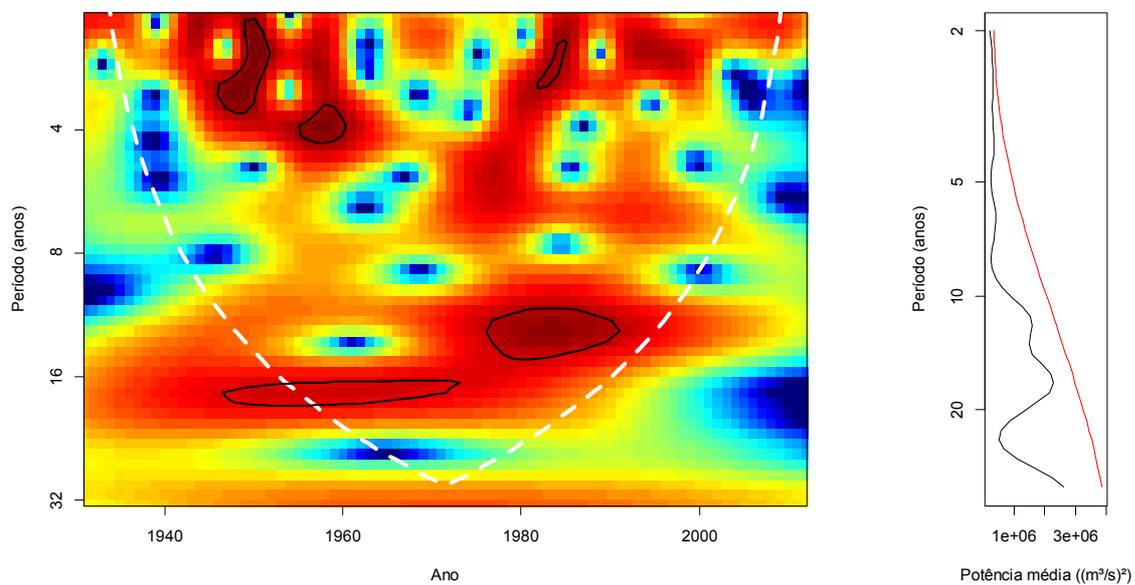


Figura I.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Sobradinho.

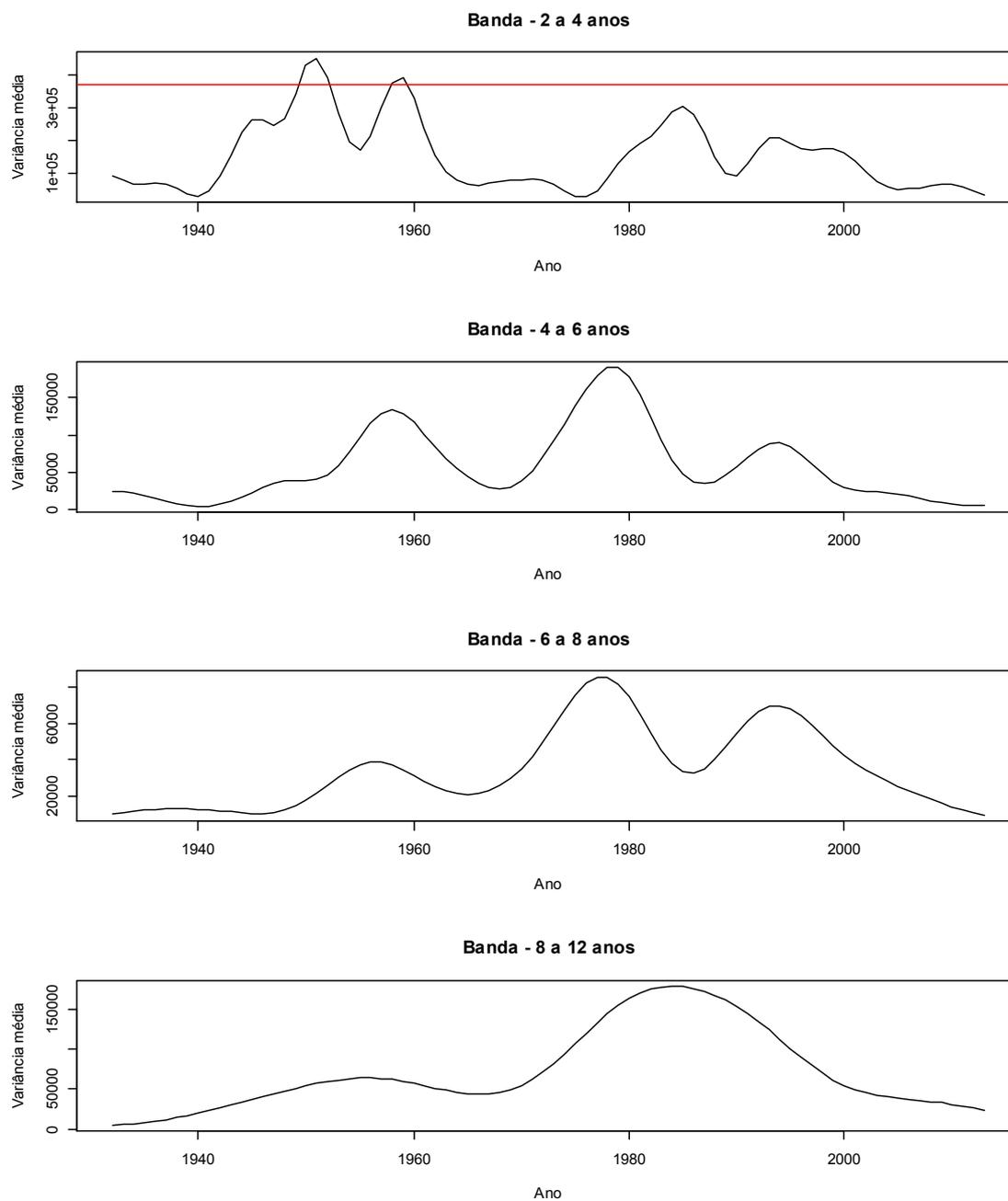


Figura I.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para as vazões da UHE Sobradinho.

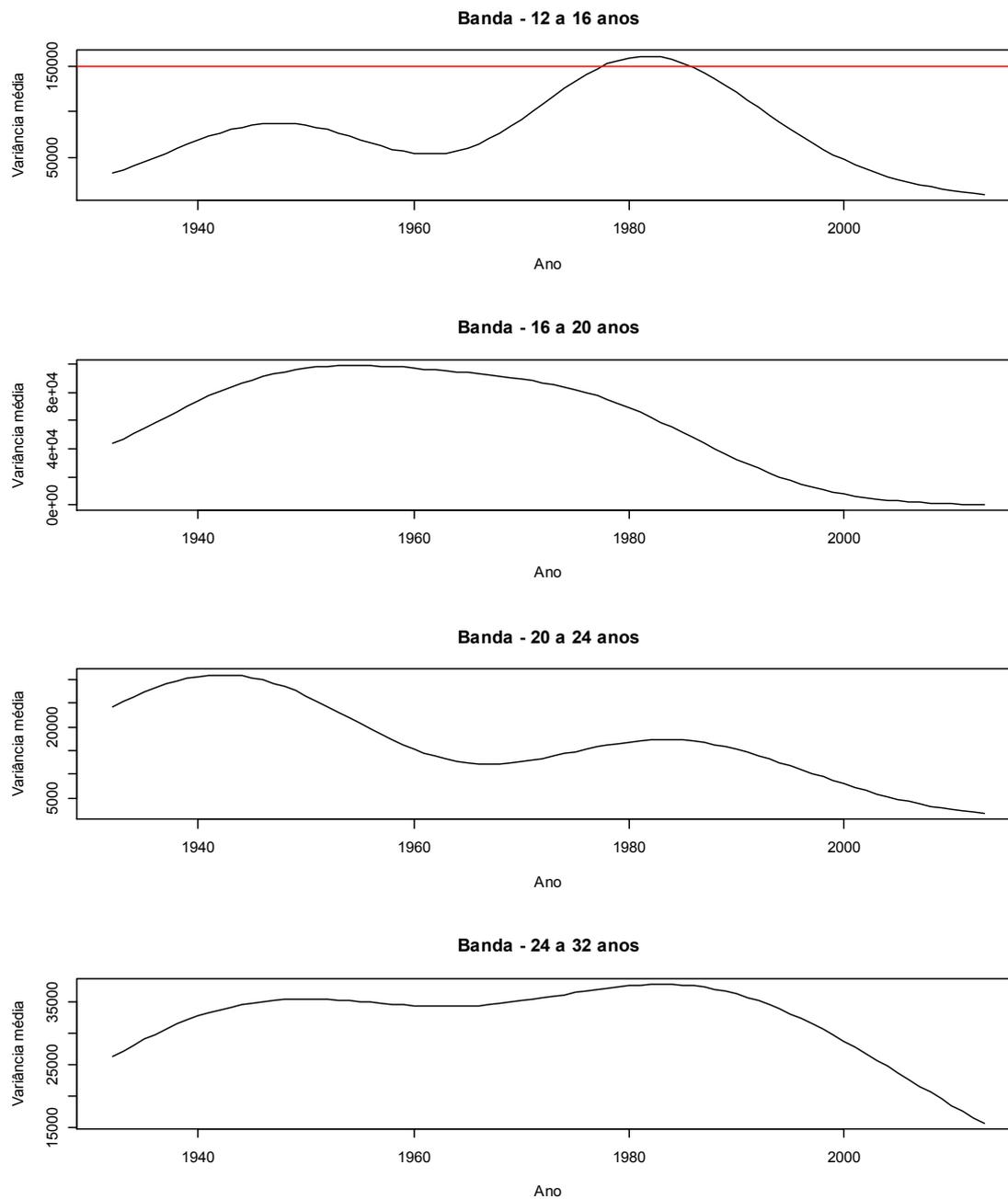


Figura I.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Sobradinho.

J – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA SERRA DA MESA

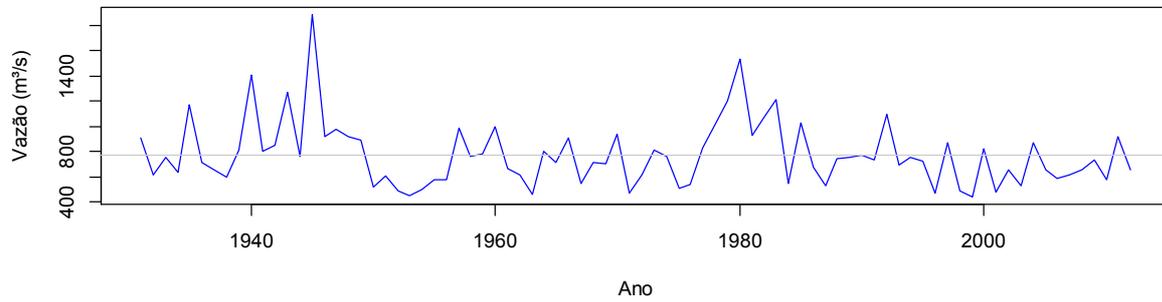


Figura J.1 – Série de vazões médias anuais da UHE Serra da Mesa (1931 a 2012).

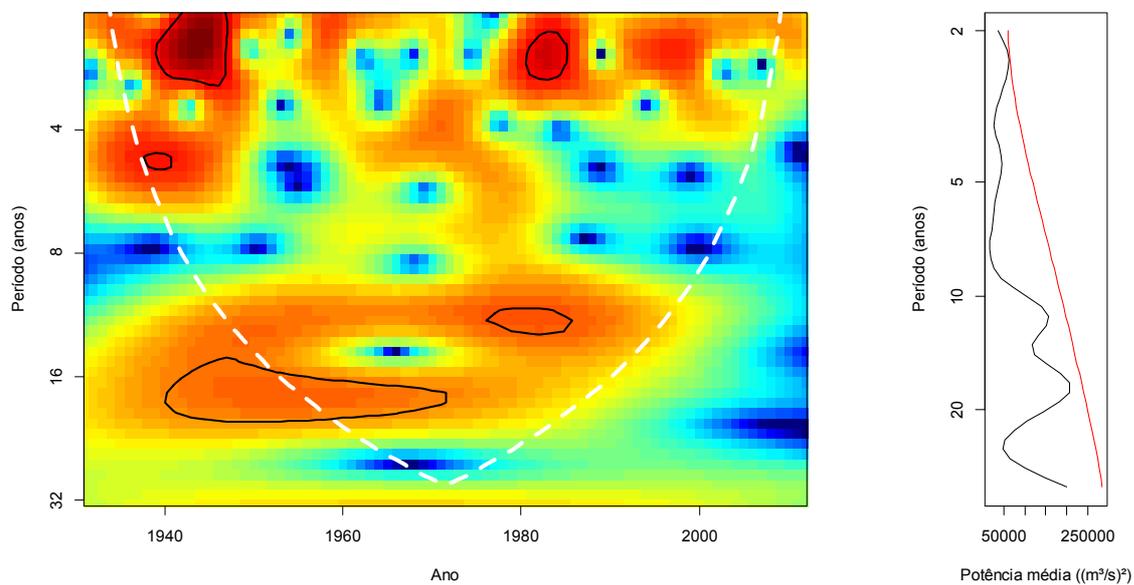


Figura J.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para as vazões anuais da UHE Serra da Mesa.

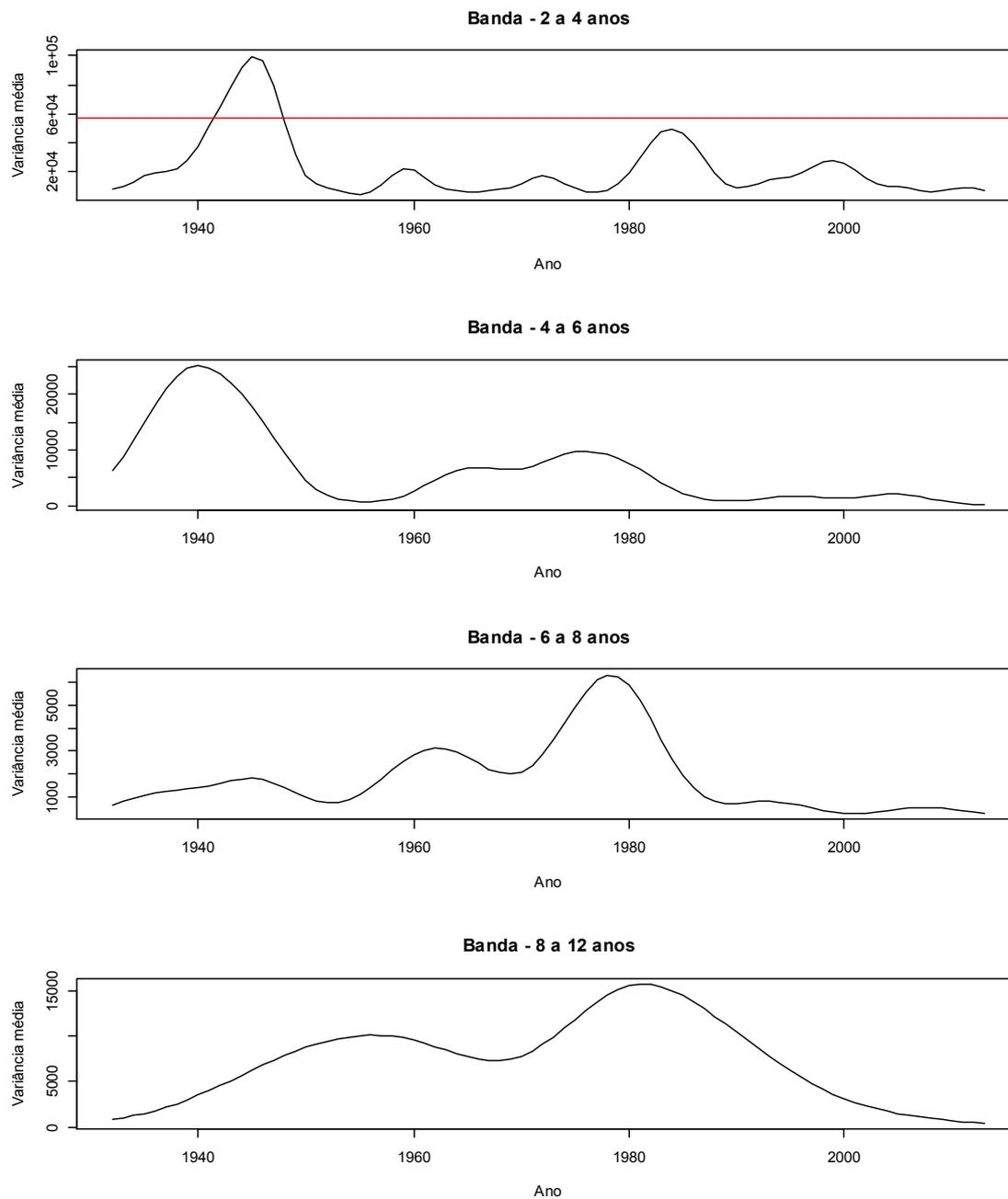


Figura J.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12anos para as vazões da UHE Serra da Mesa.

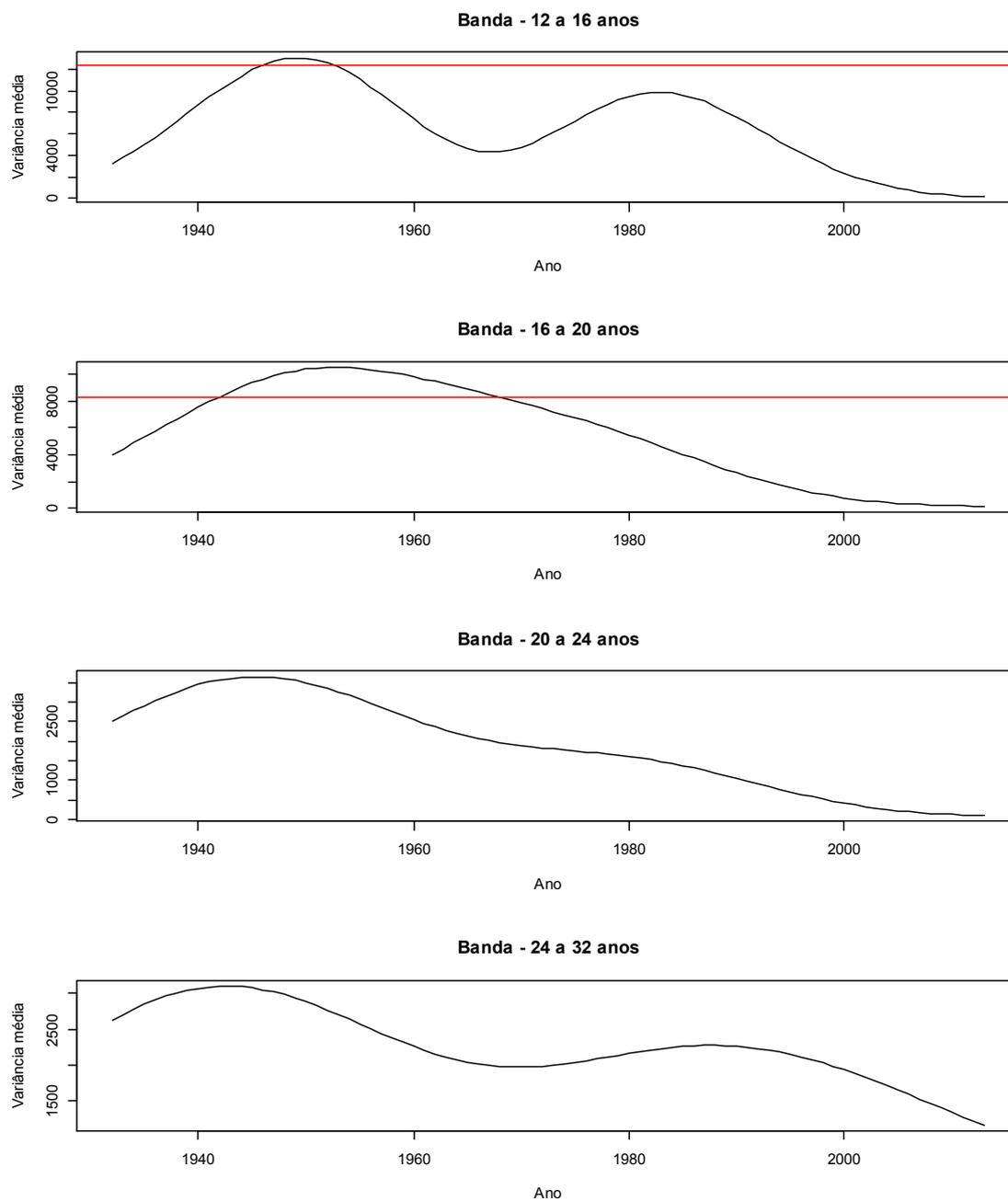


Figura J.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para as vazões da UHE Serra da Mesa.

K – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE NIÑO 3.4

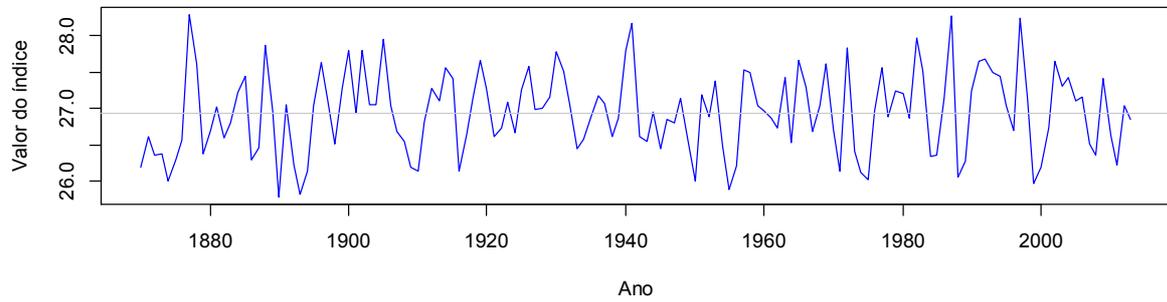


Figura K.1 – Série histórica do índice NIÑO 3.4 (1870 a 2013).

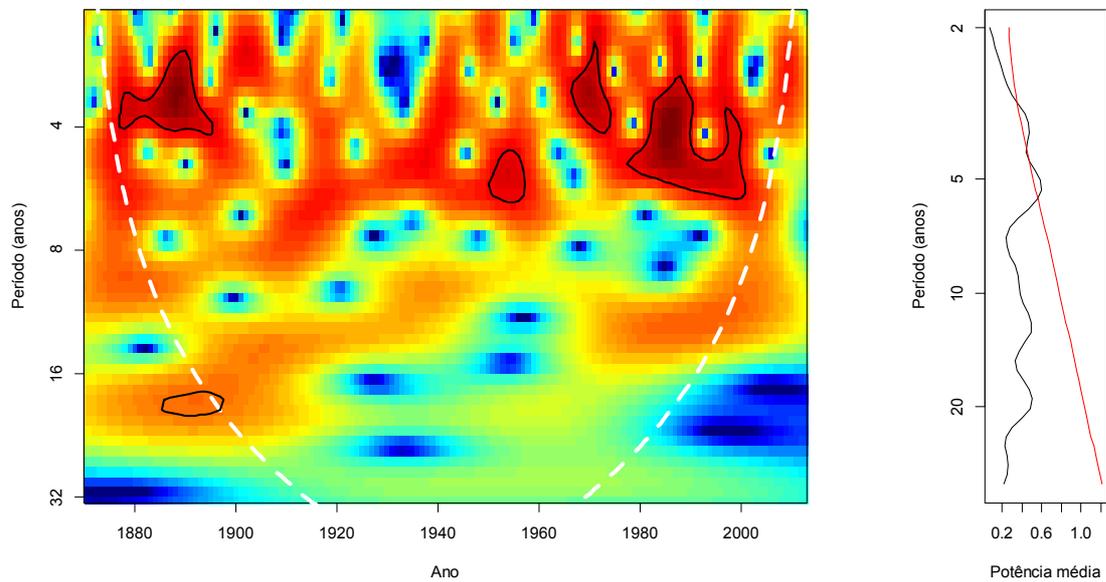


Figura K.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice NIÑO 3.4.

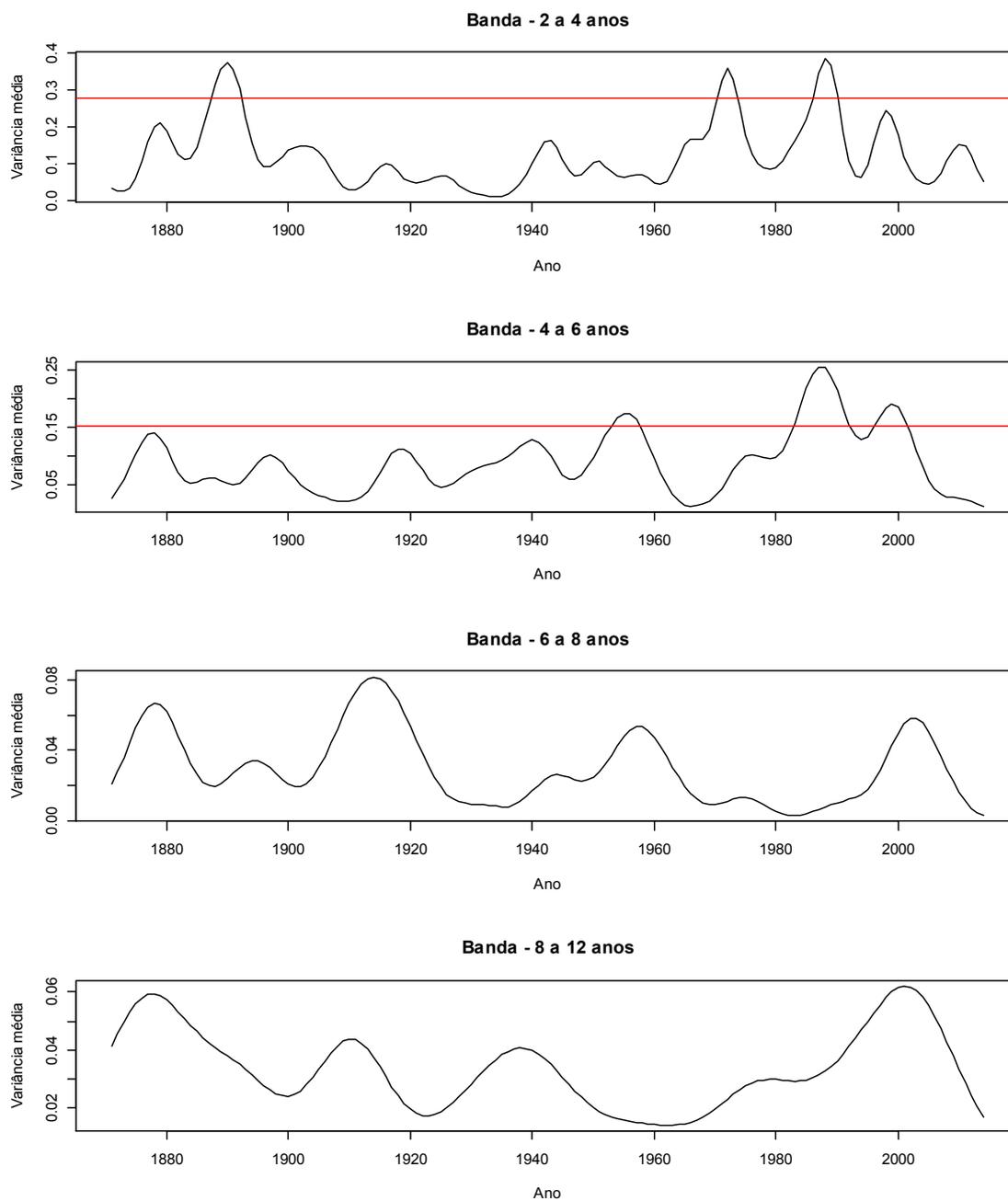


Figura K.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice NIÑO 3.4.

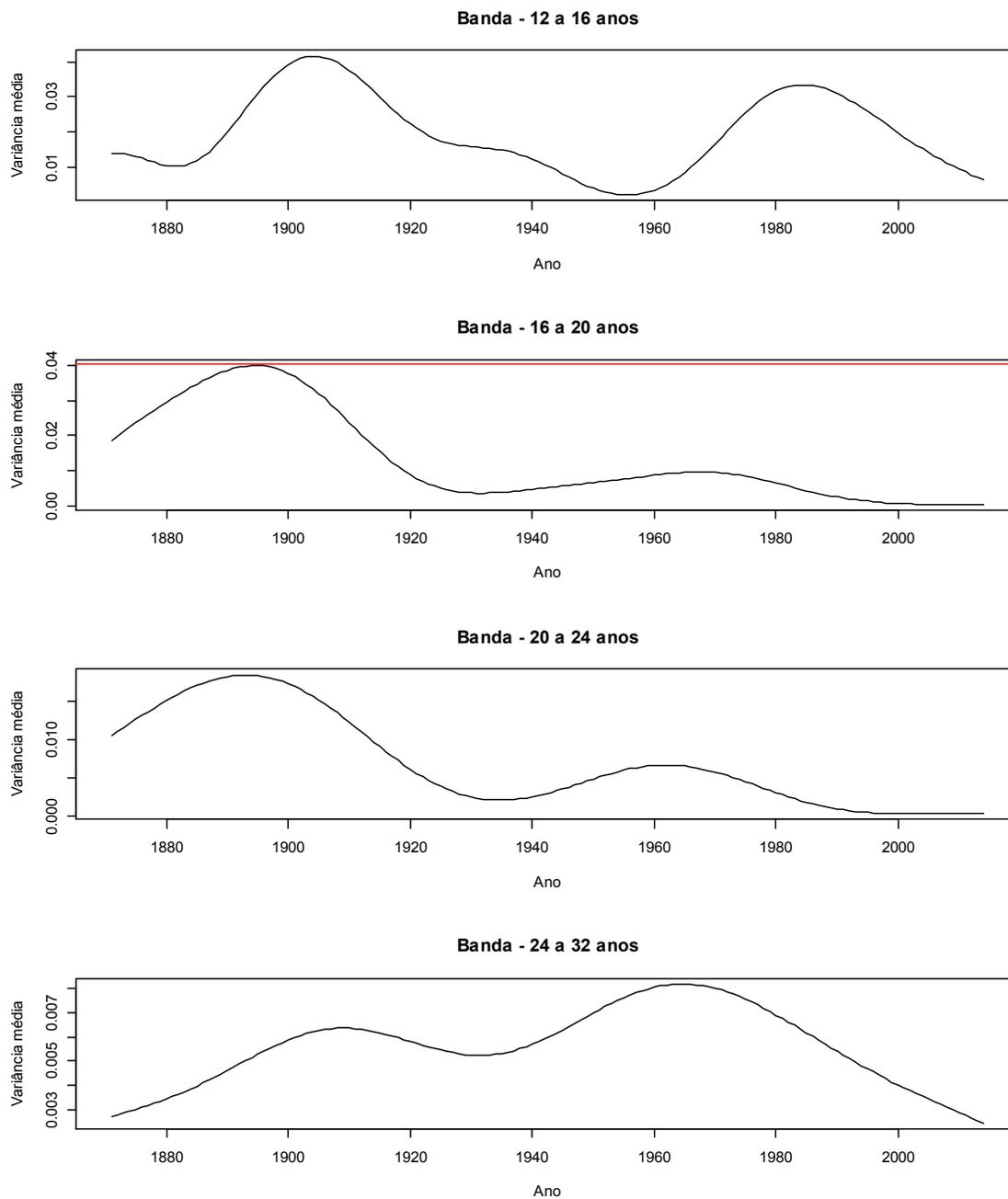


Figura K.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice NIÑO 3.4.

L – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE PDO

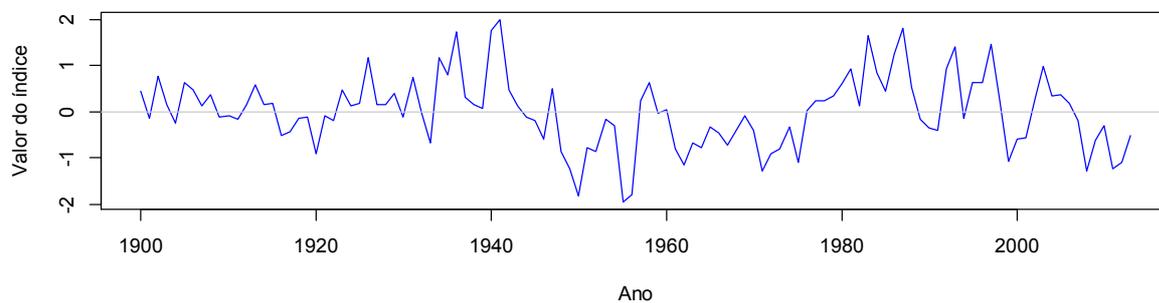


Figura L.1 – Série histórica do índice PDO (1900 a 2013).

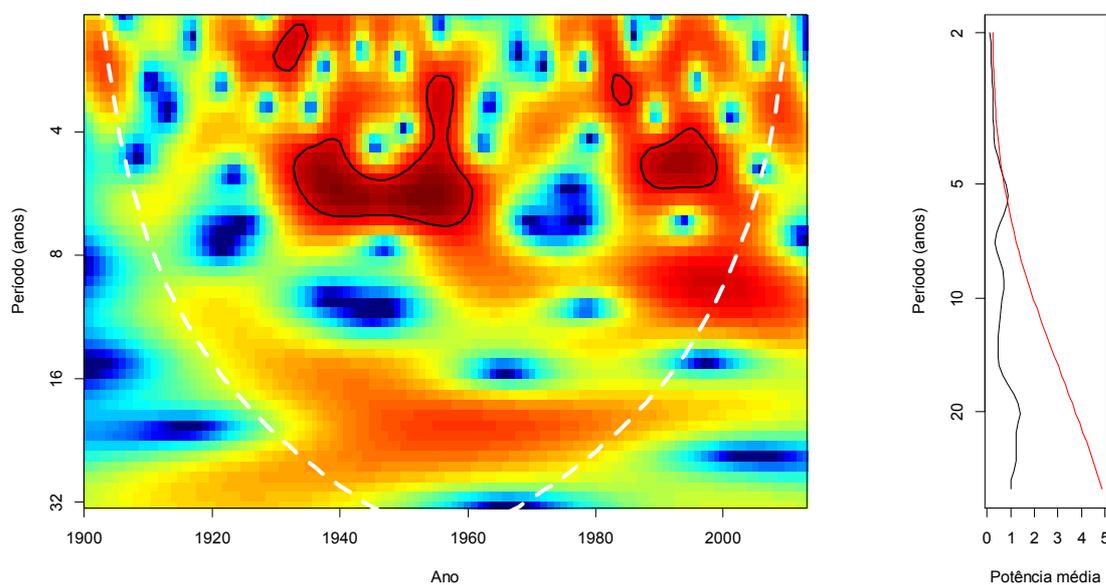


Figura L.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice PDO.

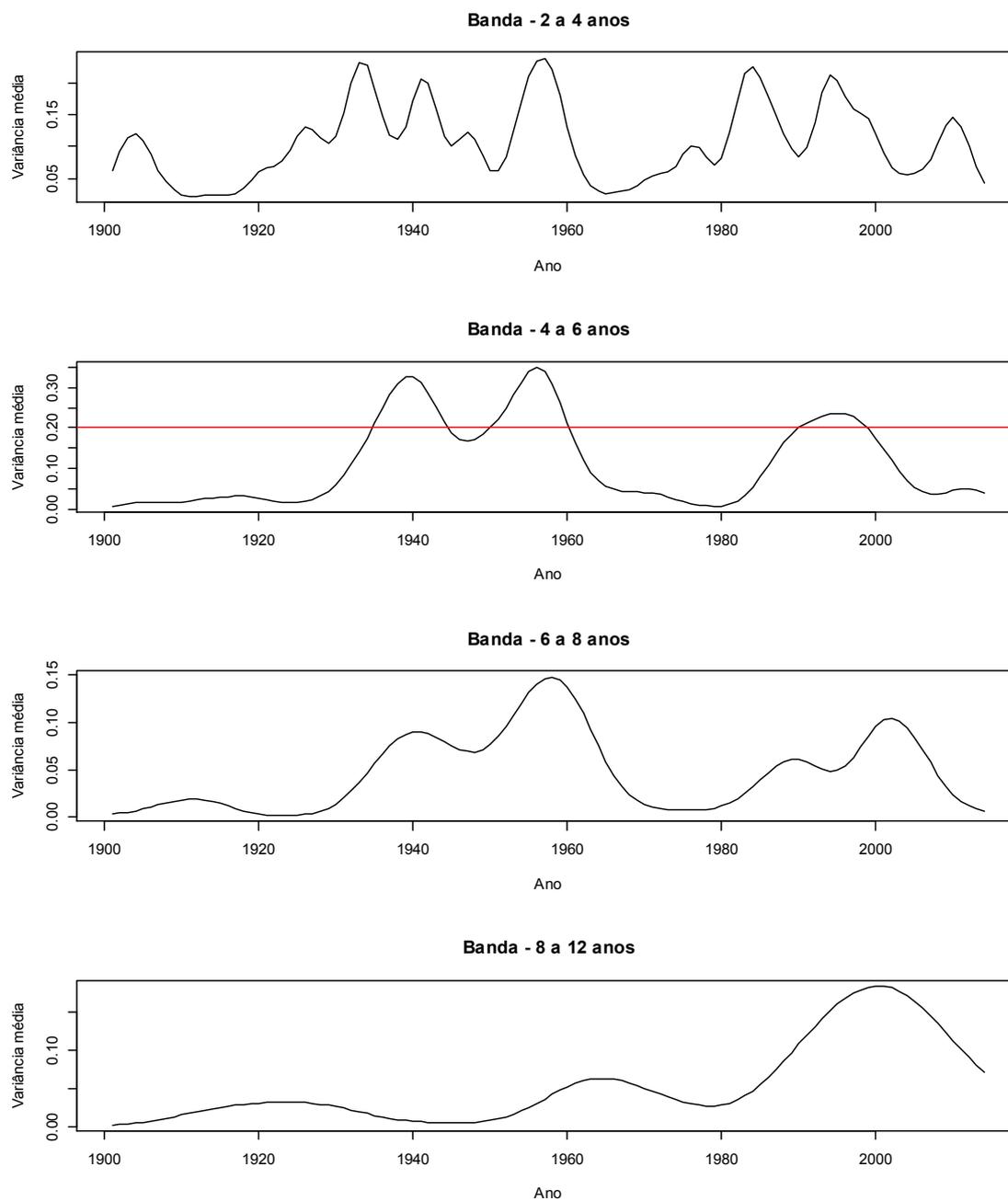


Figura L.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice PDO.

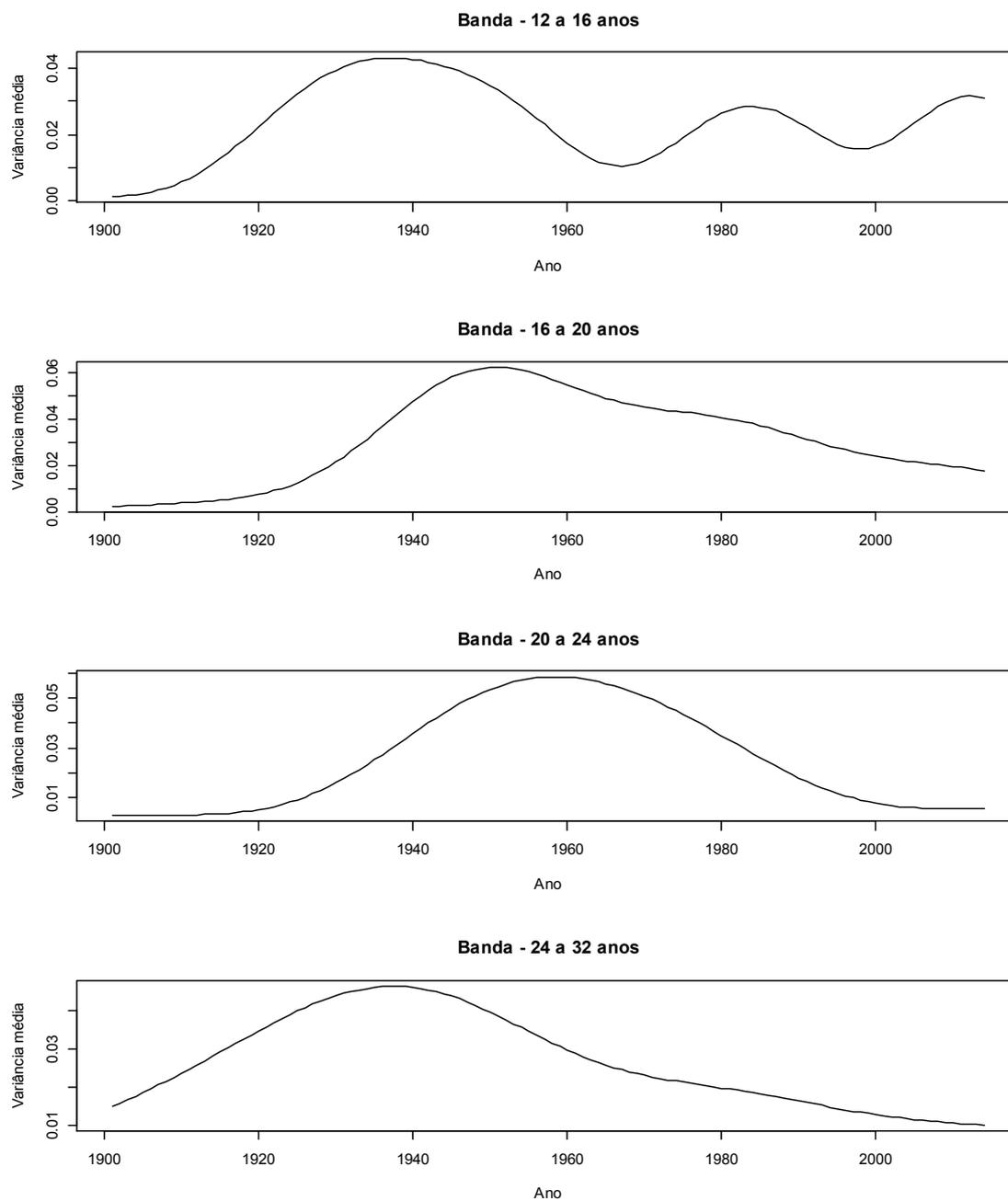


Figura L.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice PDO.

M – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE AMO

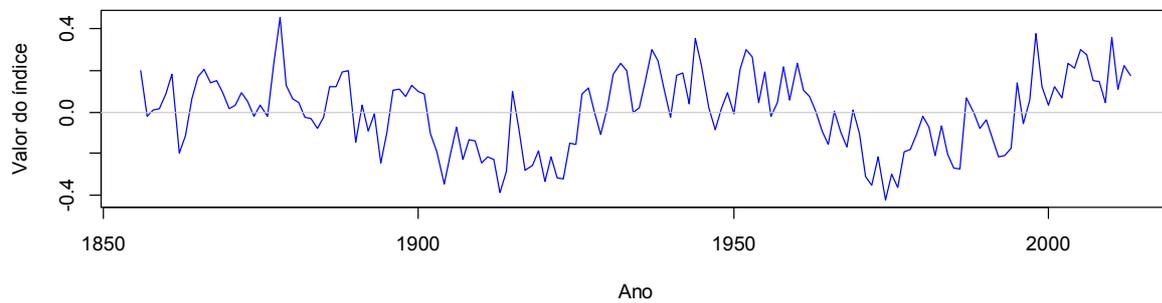


Figura M.1 – Série histórica do índice AMO (1856 a 2013).

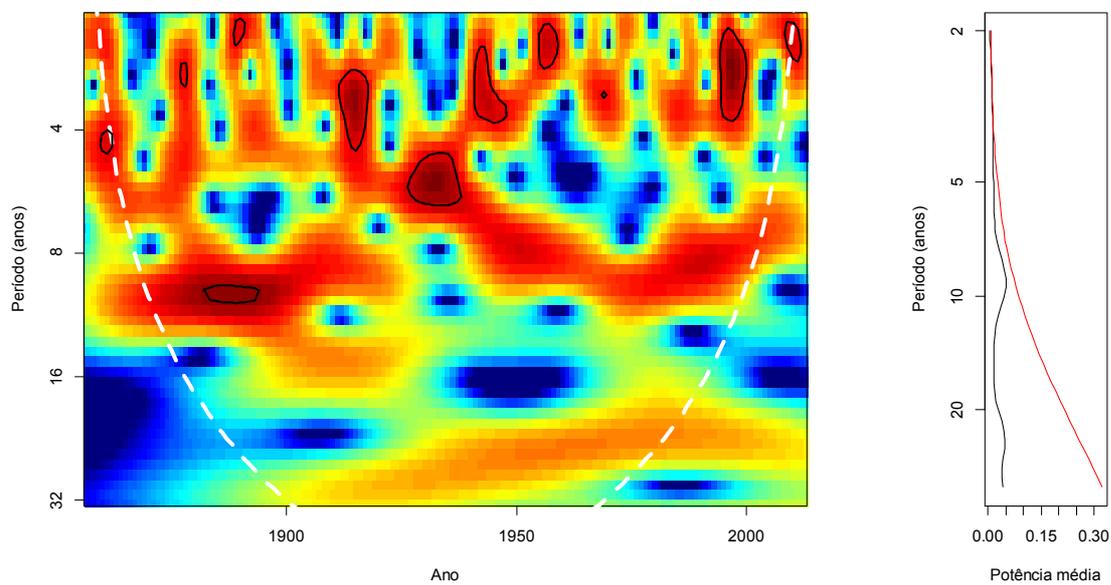


Figura M.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice AMO.

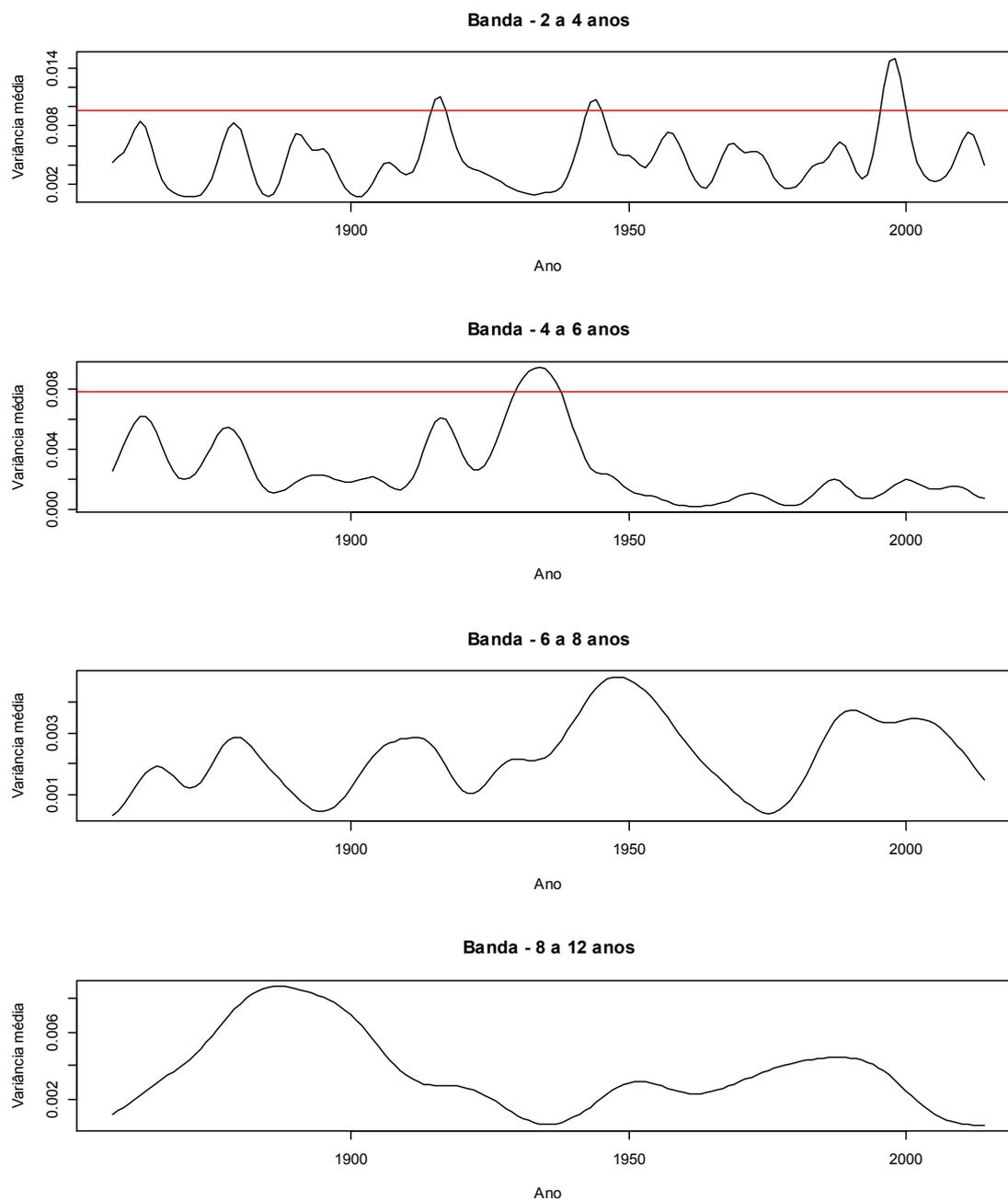


Figura M.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice AMO.

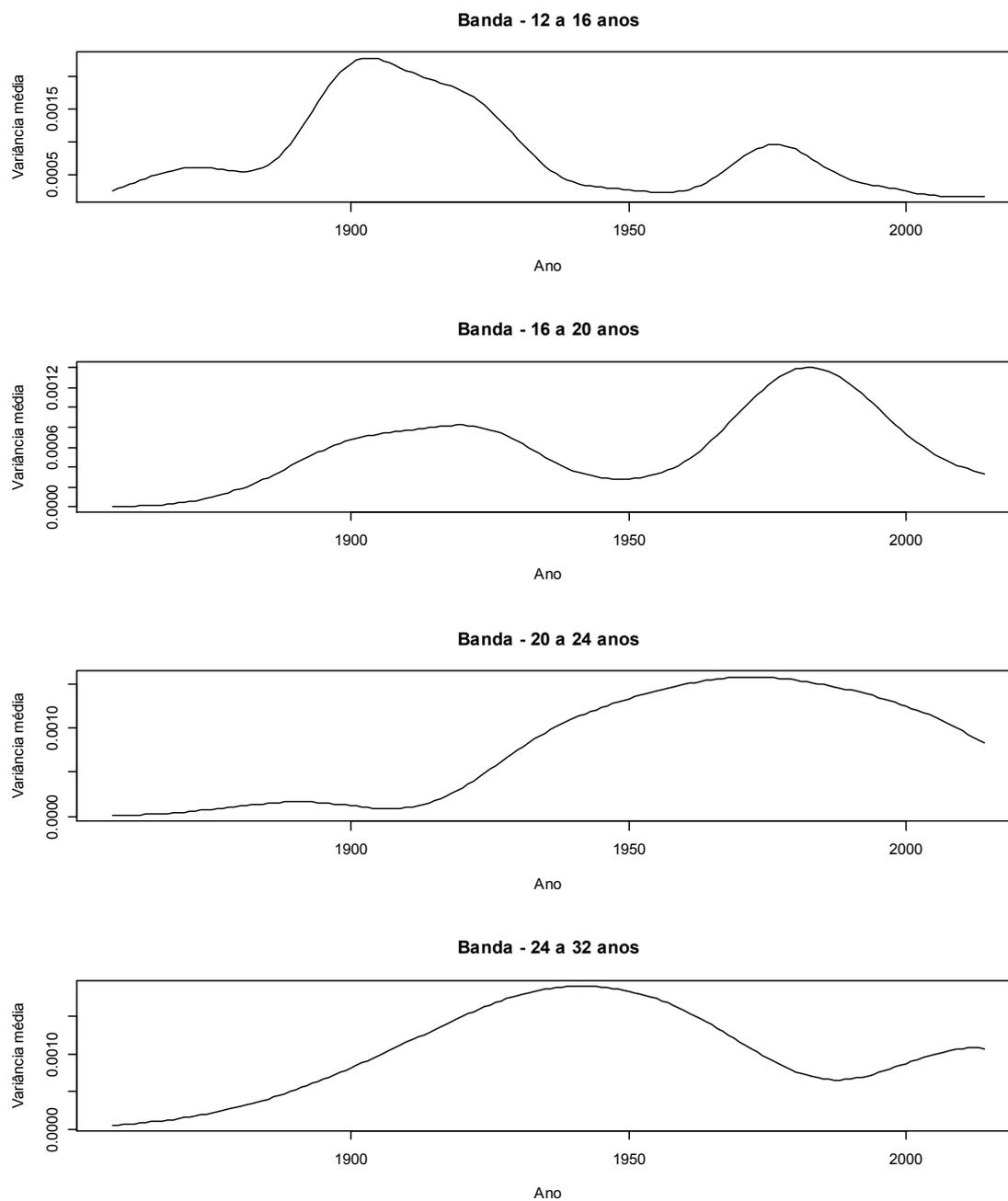


Figura M.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice AMO.

N – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE SOI

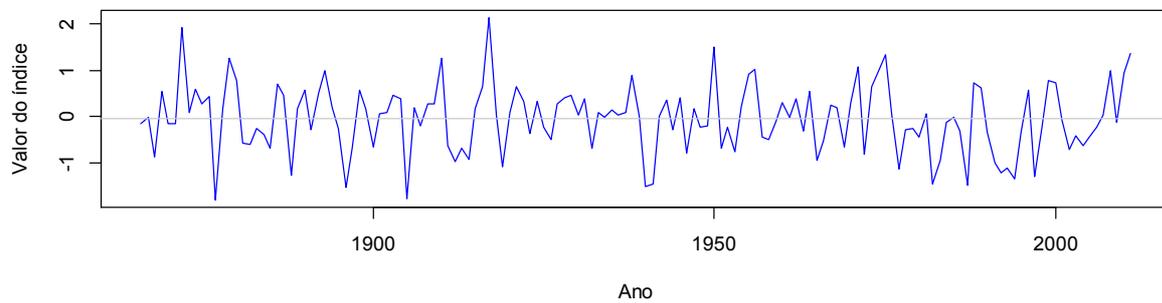


Figura N.1 – Série histórica do índice SOI (1866 a 2011).

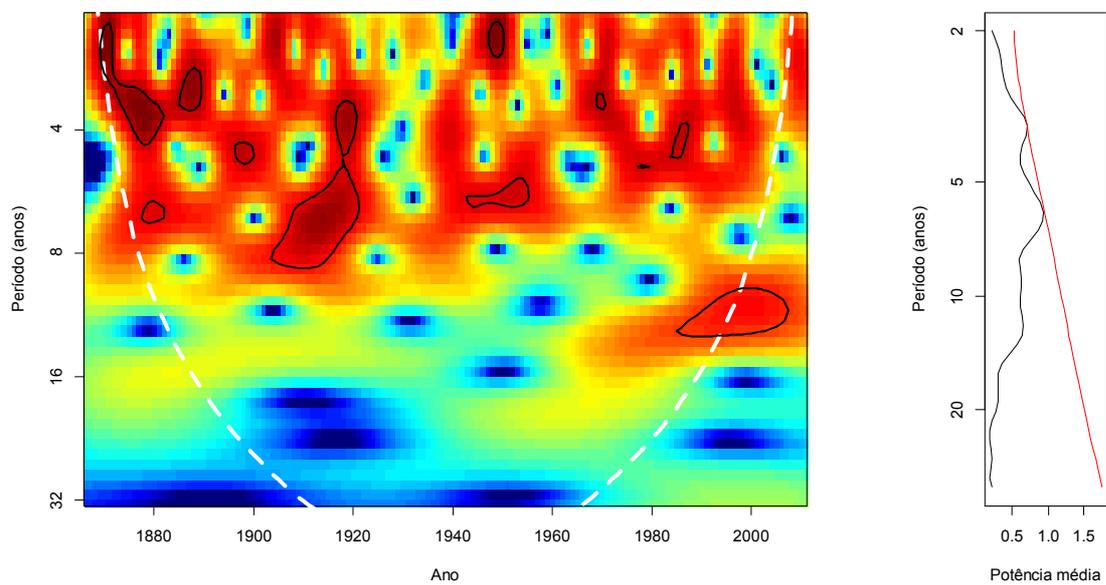


Figura N.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice SOI.

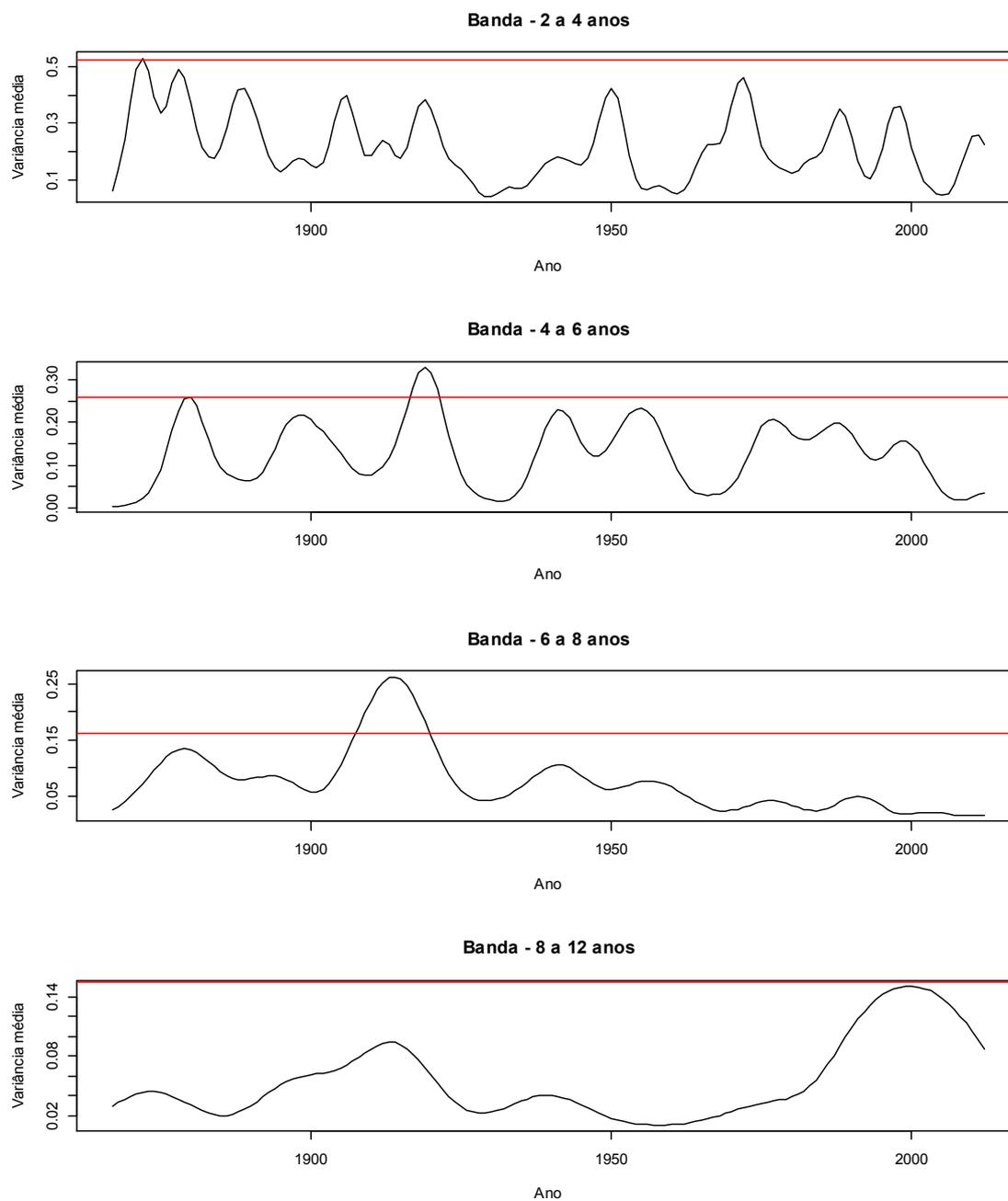


Figura N.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice SOI.

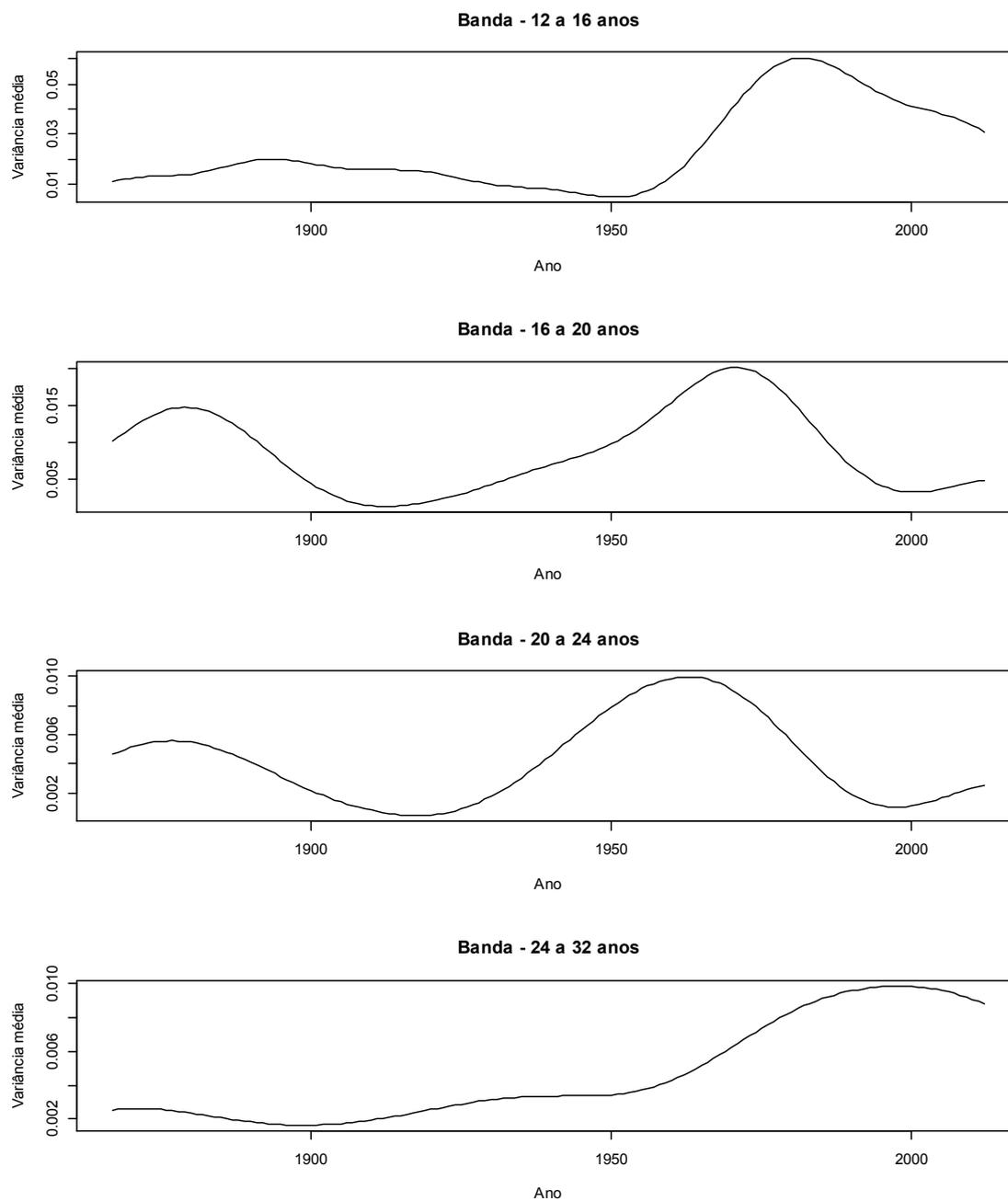


Figura N.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice SOI.

O – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE MEI

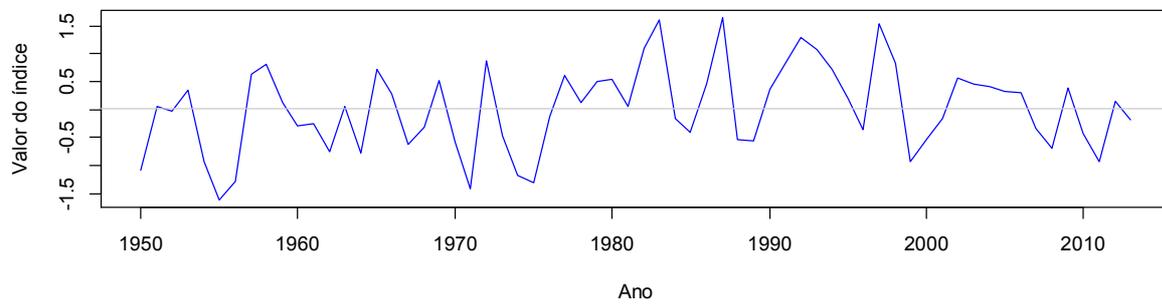


Figura O.1 – Série histórica do índice MEI (1950 a 2013).

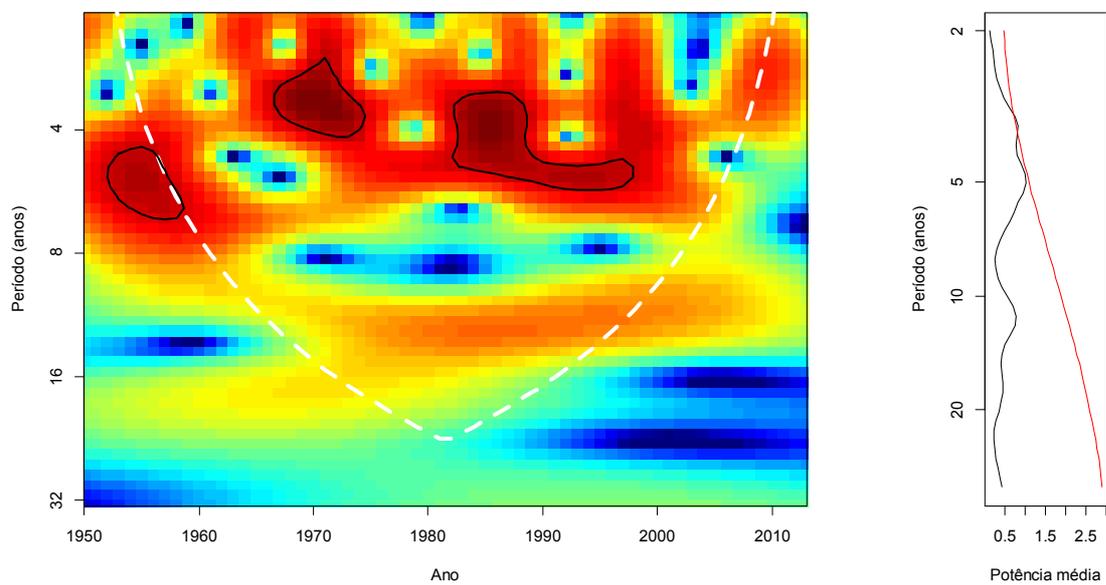


Figura O.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice MEI.

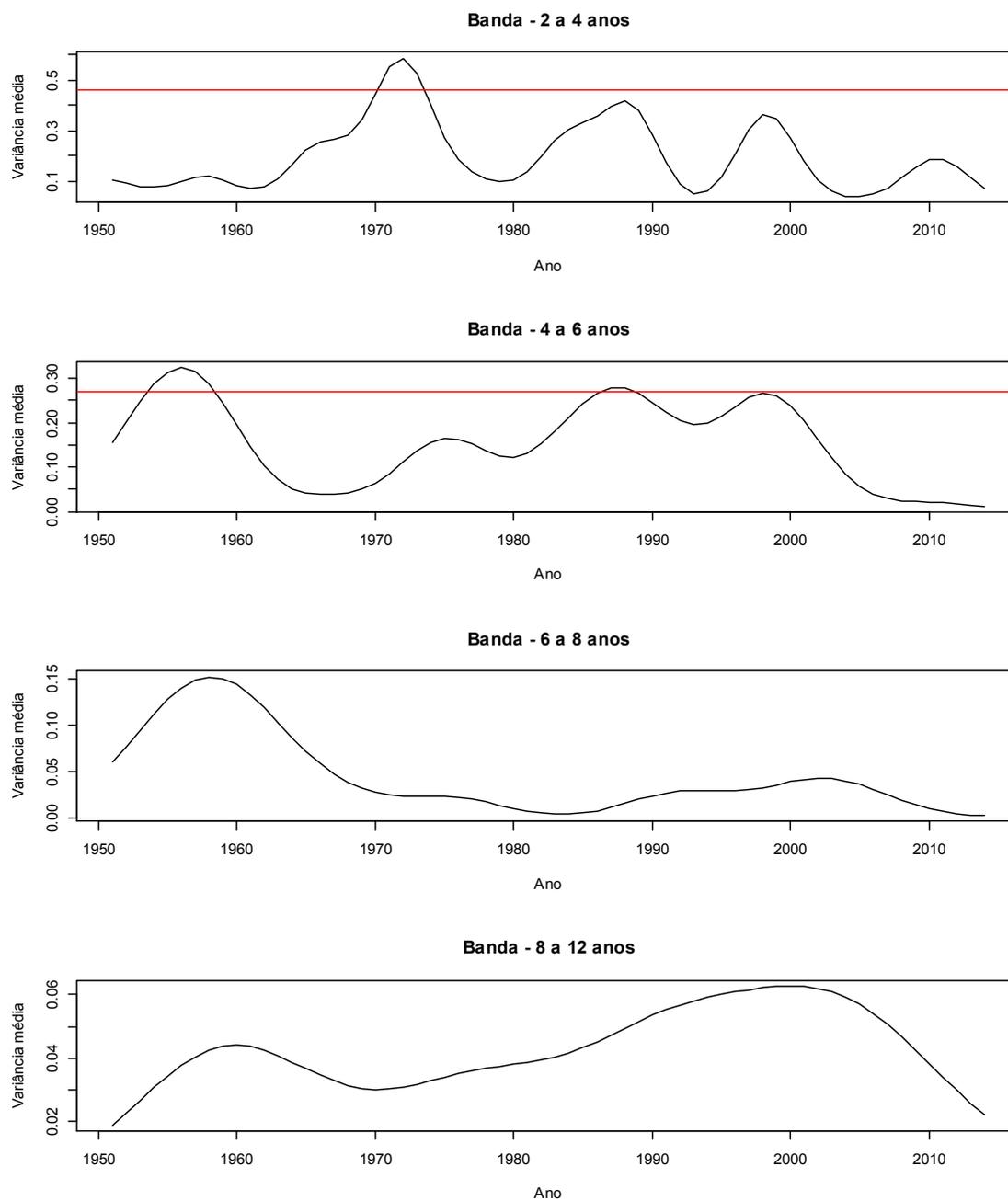


Figura O.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice MEI.

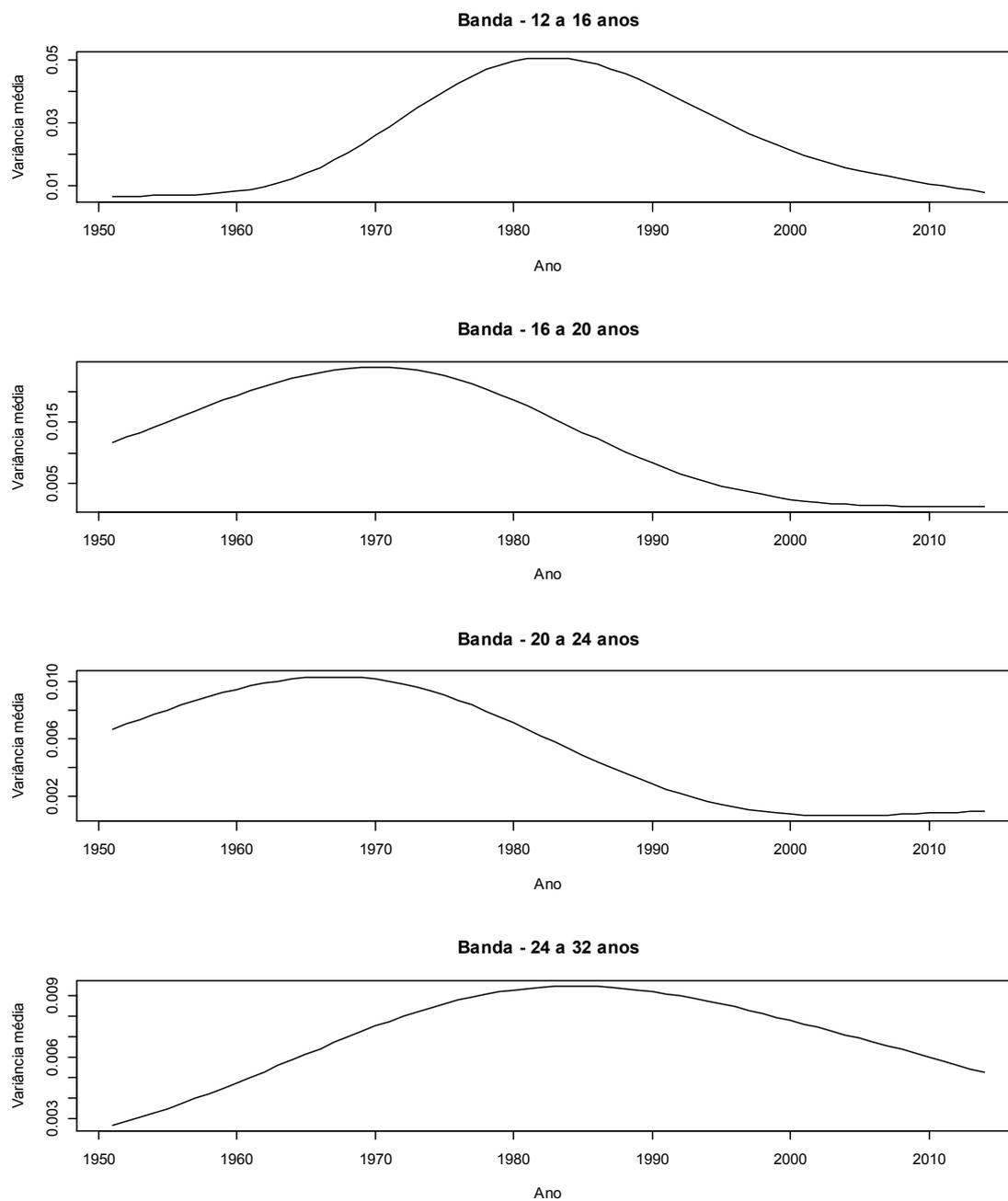


Figura O.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice MEI.

P – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE ONI

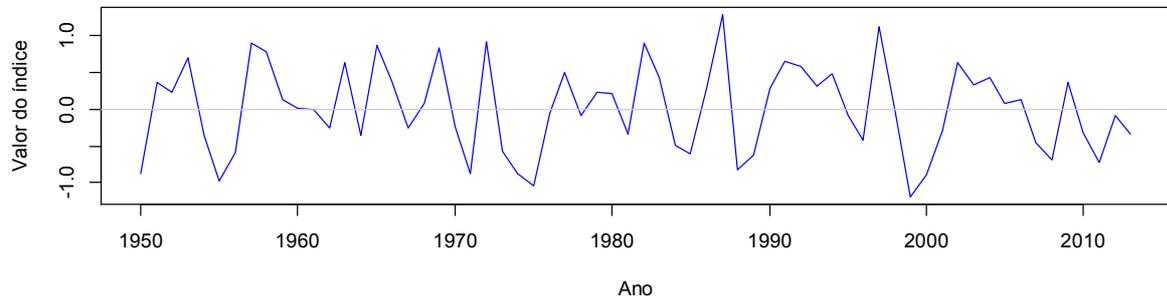


Figura P.1 – Série histórica do índice ONI (1950 a 2013).

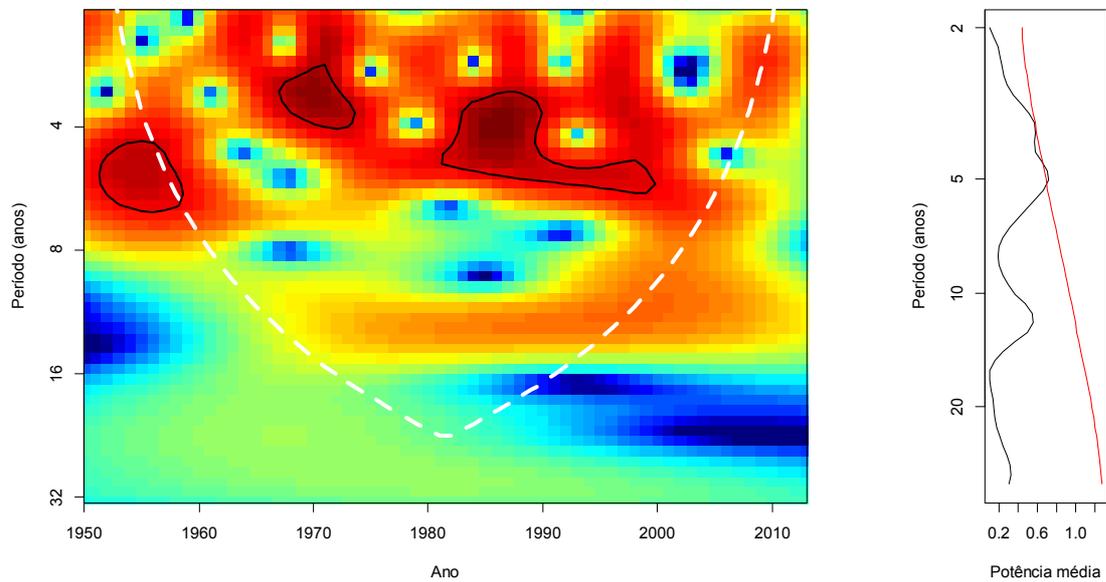


Figura P.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice ONI.

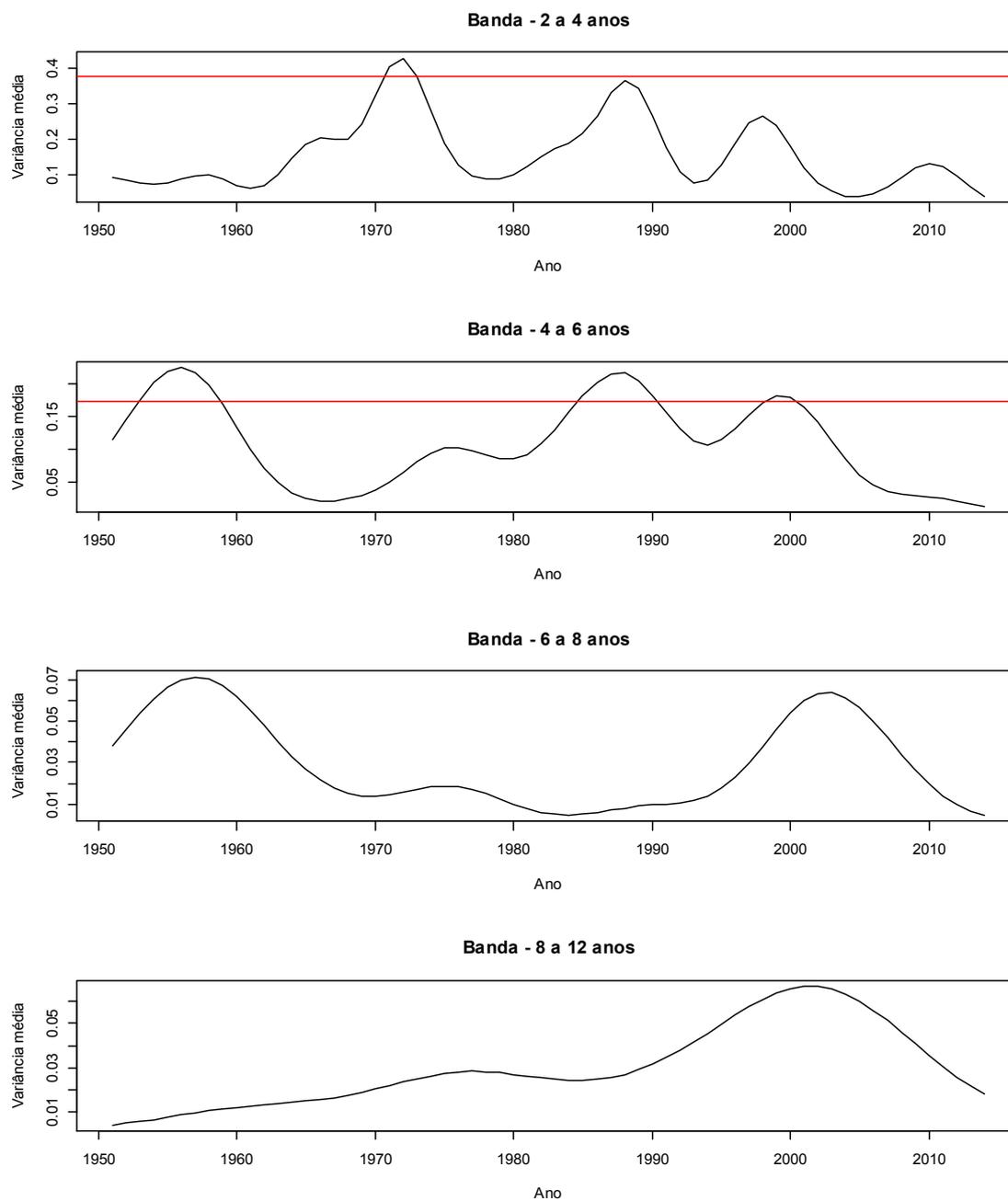


Figura P.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice ONI.

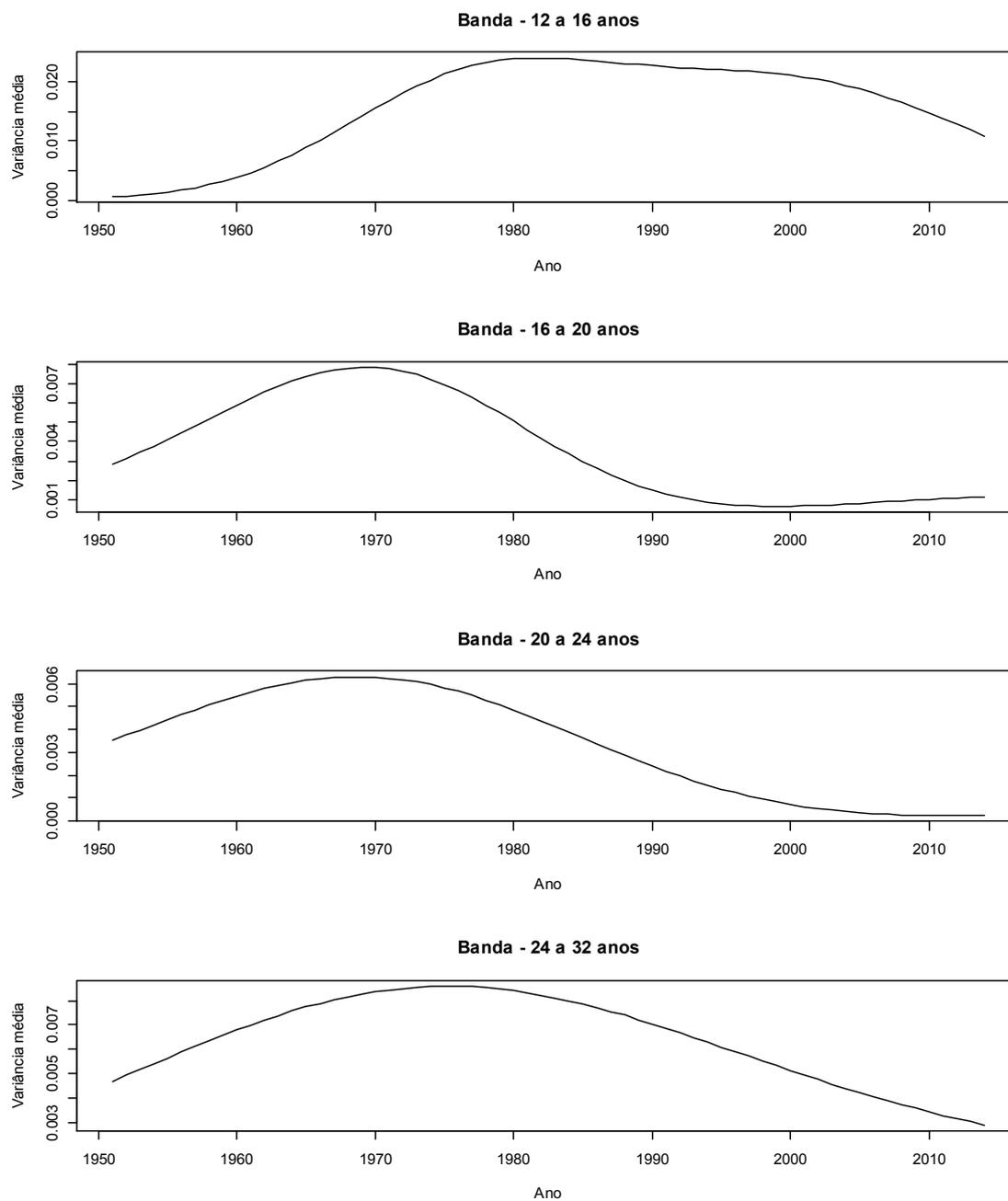


Figura P.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice ONI.

Q – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE NAO

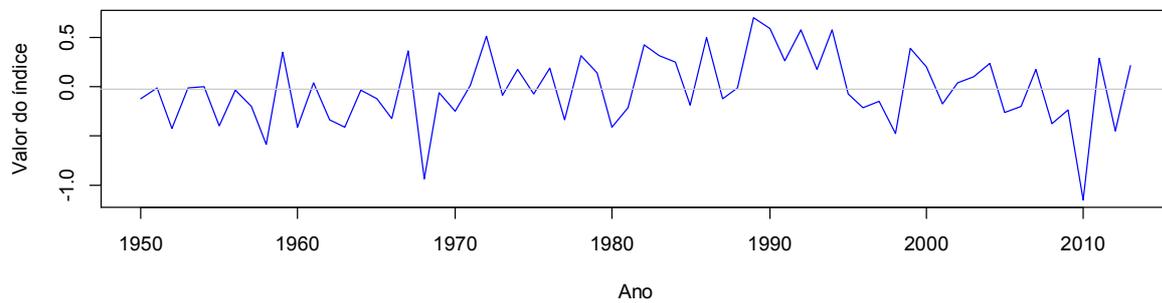


Figura Q.1 – Série histórica do índice NAO (1950 a 2013).

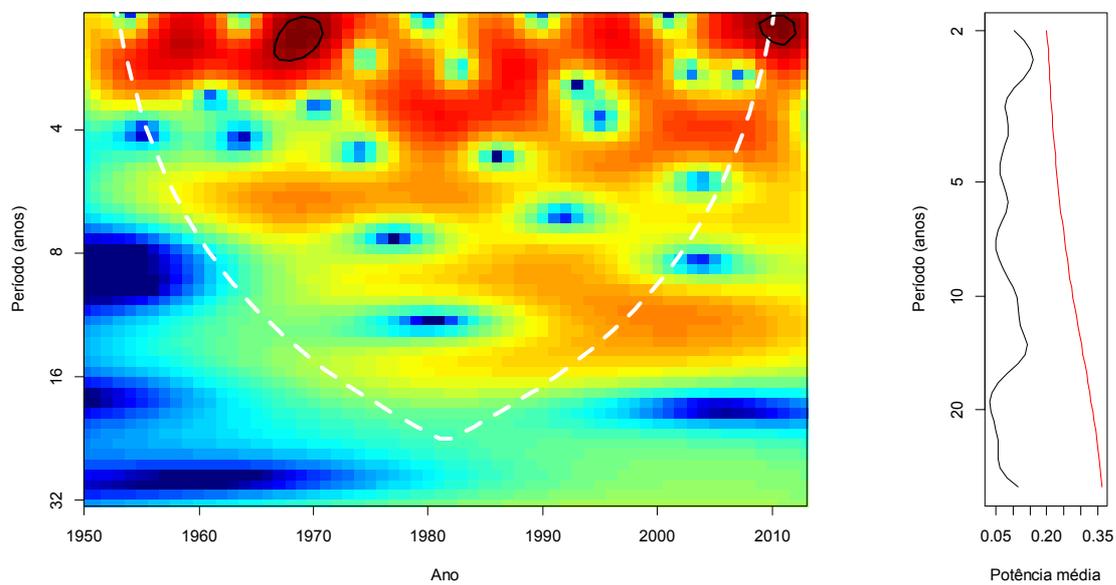


Figura Q.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice NAO.

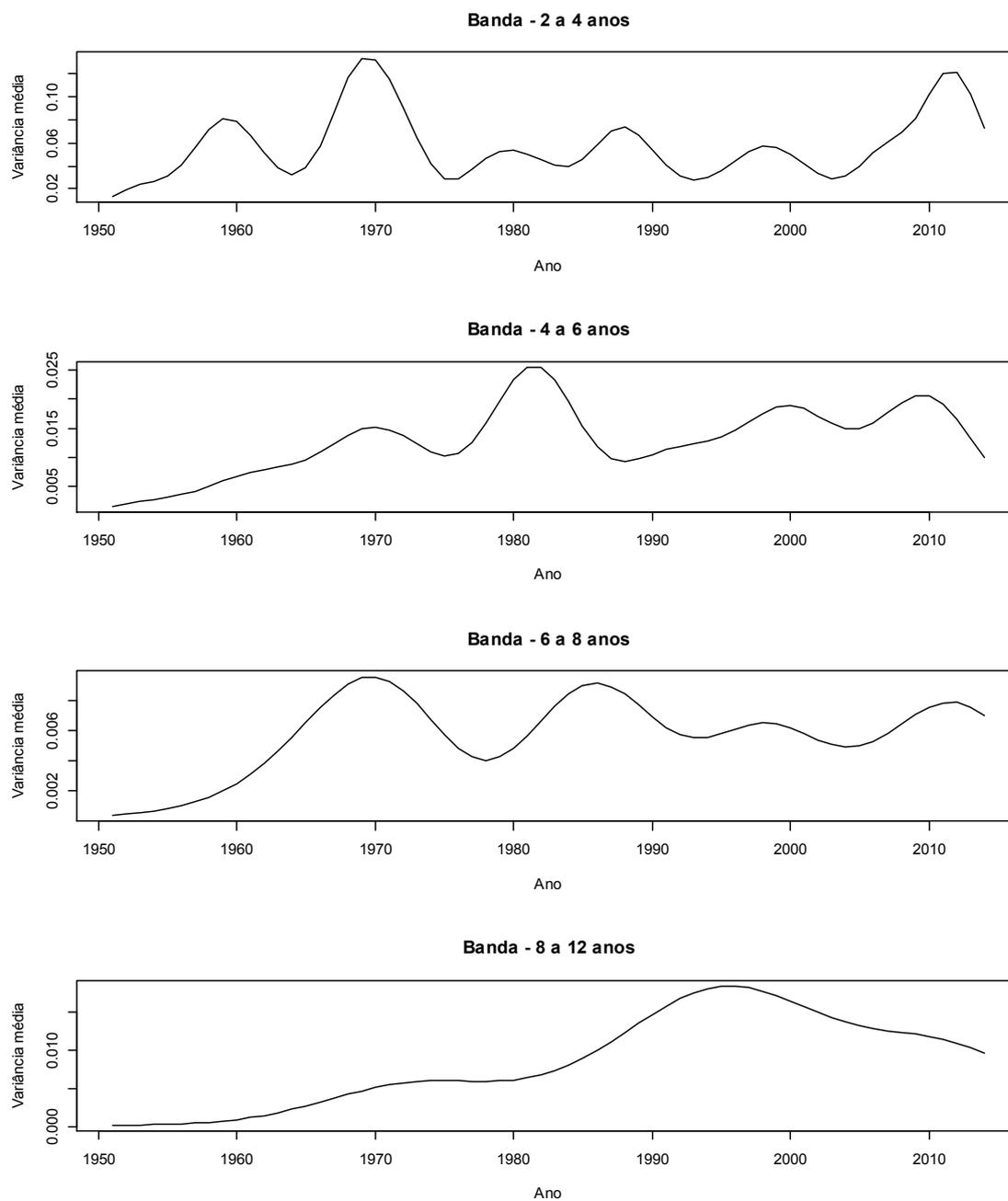


Figura Q.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice NAO.

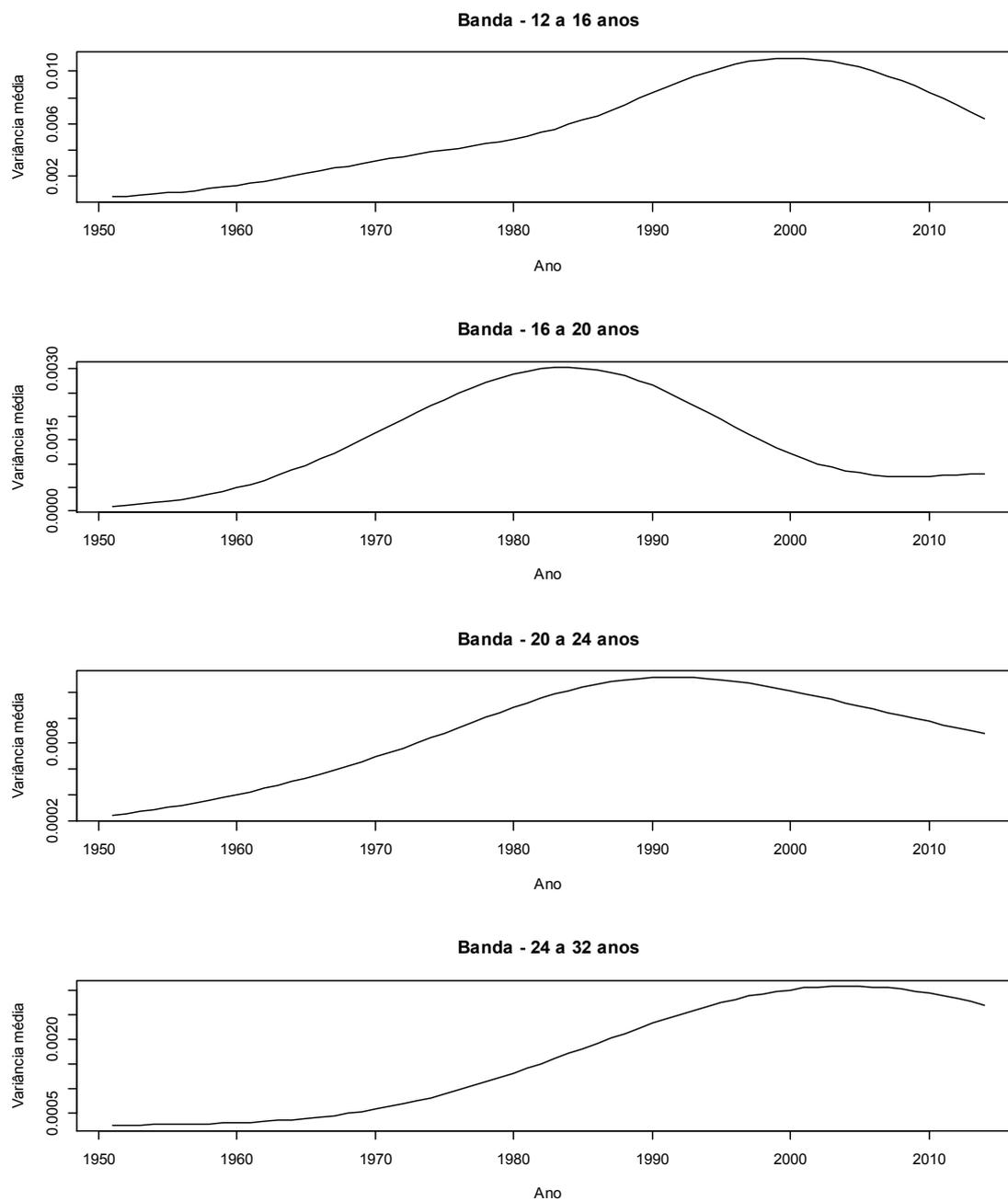


Figura Q.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice NAO.

R – ANÁLISE DE ONDALETAS PARA O ÍNDICE AO

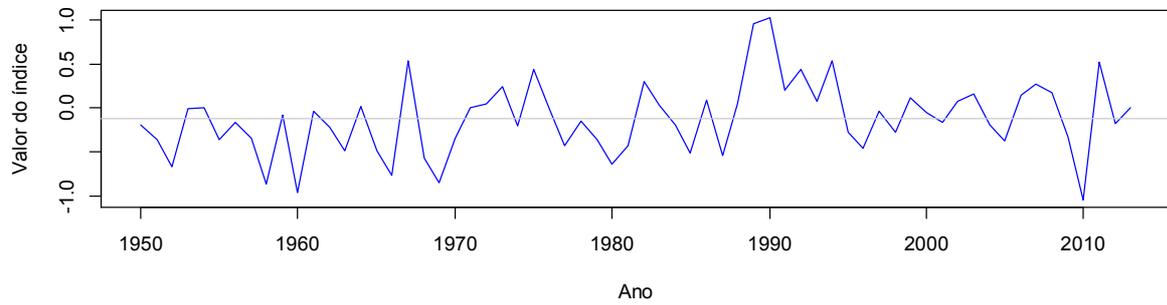


Figura R.1 – Série histórica do índice AO (1950 a 2013).

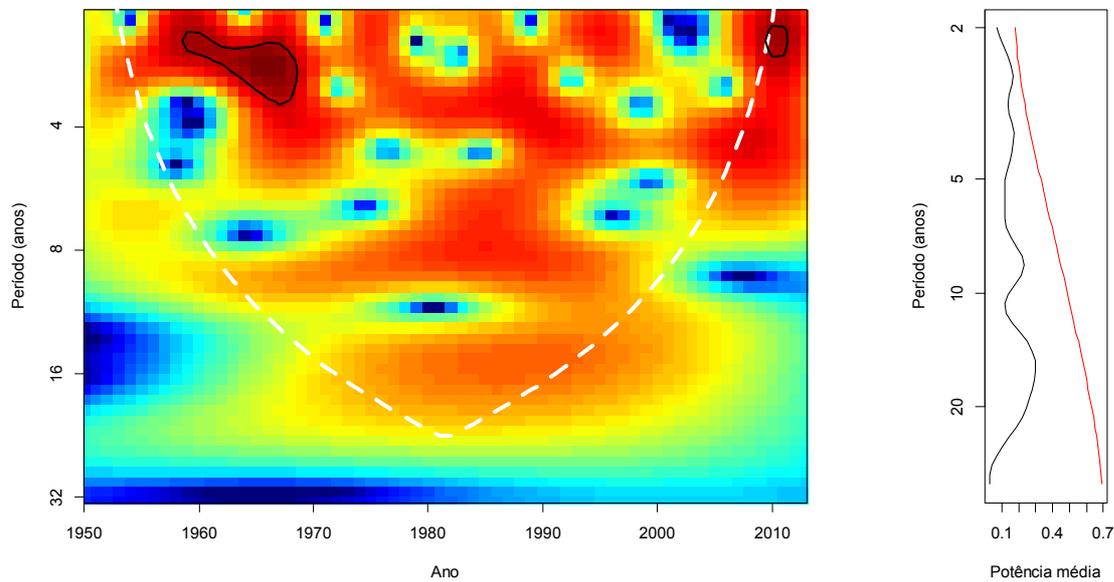


Figura R.2 – Espectro de potência e espectro global de potências da ondaleta de Morlet para o índice AO.

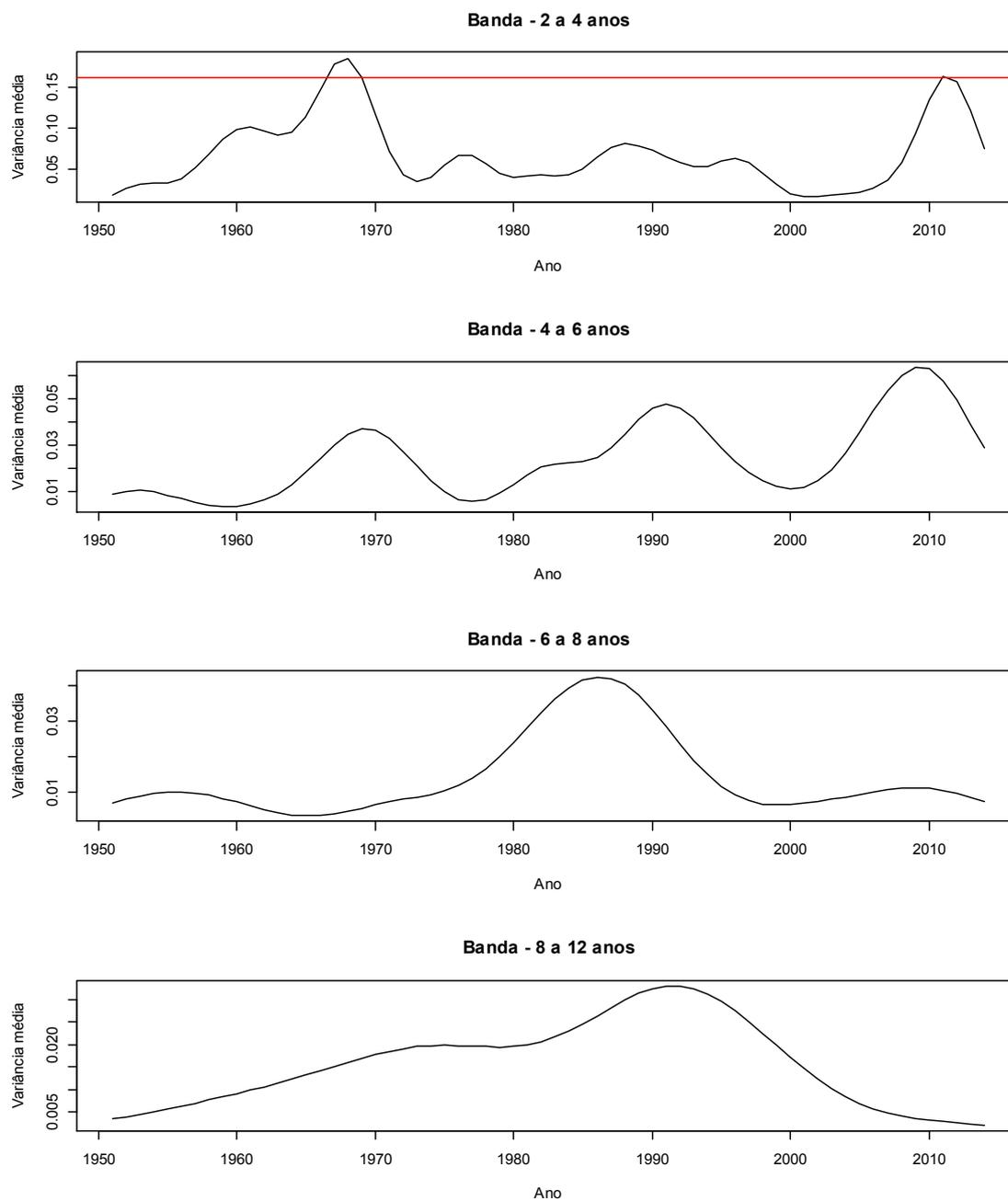


Figura R.3 – Série temporal da escala-média nas bandas 2 a 4 anos, 4 a 6 anos, 6 a 8 anos e 8 a 12 anos para o índice AO.

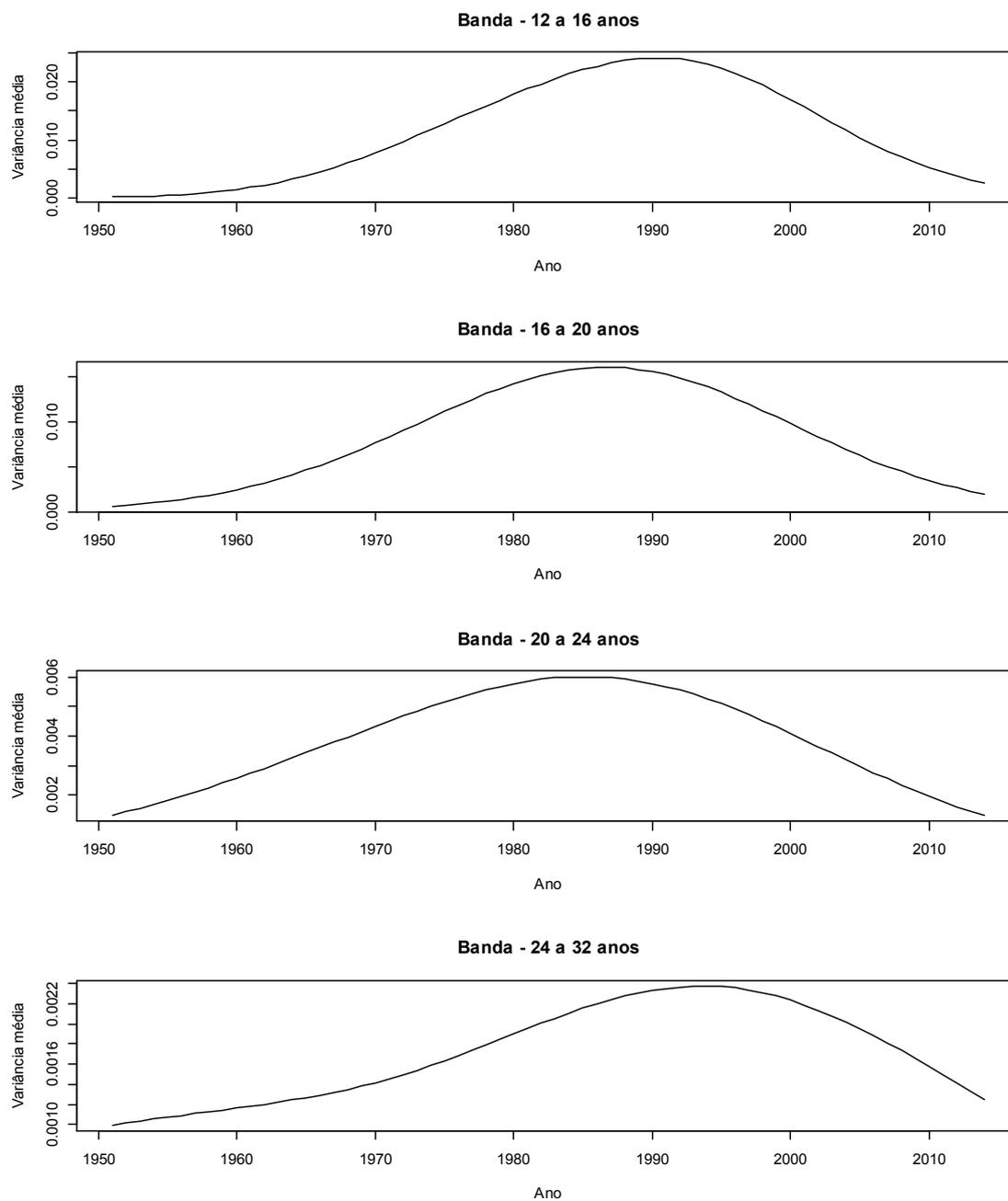


Figura R.4 – Série temporal da escala-média nas bandas 12 a 16 anos, 16 a 20 anos, 20 a 24 anos e 24 a 32 anos para o índice AO.