



Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA

**Mensuração de alteração espectral dual para reconstituição dos sinais de vazões regularizadas e não regularizadas**

TARSSIO BRITO BARRETO

Salvador

2018



## ESCOLA POLITÉCNICA

Mensuração de alteração espectral dual para reconstituição dos sinais de vazões regularizadas e não regularizadas

Tarssio Brito Barreto

Dissertação apresentada ao Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Karla Patrícia Santos

Salvador

2018



Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo autor.

Barreto, Tarssio Brito  
Mensuração de alteração espectral dual para reconstituição dos  
sinais de vazões regularizadas e não regularizadas / Tarssio  
Brito Barreto. -- Salvador, 2018.  
113 f. : il

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Karla Patrícia Santos Oliveira  
Rodrigues Esquerre.  
Dissertação (Mestrado - Mestrado em Meio Ambiente, Águas e  
Saneamento) -- Universidade Federal da Bahia, Escola  
Politécnica, 2018.

1. Séries Temporais. 2. Hidrologia. 3. Transformadas  
Wavelets. 4. Mensuração de Alteração Espectral. I. Patrícia  
Santos Oliveira Rodrigues Esquerre, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Karla. II.  
Titulo.





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITECNICA



Társsio Brito Barreto

**Mensuração de alteração espectral dual para reconstituição do  
sinal de vazões regularizadas e não regularizadas**

Banca Examinadora:

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Karla Patrícia S. O. Rodrigues Esquerre Karla Patricia (elliviana) Esquerre  
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz Luciano Matos Queiroz  
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Adonias Magdiel Silva Ferreira Adonias M. S. Ferreira  
Universidade Federal da Bahia

Salvador  
25 de janeiro de 2018

Rua Aristides Novis, 02 - 4º andar, Federação - Salvador-BA - CEP. 40210-630  
Contato: (71) 3283-9785/3283-9454 E-mail: [maasa@ufba.br](mailto:maasa@ufba.br)  
Site: [www.maasa.eng.ufba.br](http://www.maasa.eng.ufba.br)



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, é necessário e urgente agradecer à mainha, D. Ana, para quem ouvira em algum momento Mano Brow é permitida a expansão da frase que não caberia dentro do escopo acadêmico. Agradecer, antes que eu perca o foco, por aceitar minhas ausências, por entender os momentos ruins e por quase que verbalmente falar: "Se eu pudesse faria por você", mas mãe sabe que a gente é quem tem que fazer por nós mesmos e sofrem caladas por isto. Lene, você merece o mesmo parágrafo.

Em seguida, agradeço a professora Karla, minha orientadora, que me deu bastante oportunidades, me fez crescer e me apaixonar pela carreira acadêmica. A partir dela, também, aprendi o quão é difícil e prazeroso trabalhar em ambiente colaborativo e o quanto estamos sempre aprendendo, errando, consertando, mas indo em frente. Deixo minha gratidão, neste parágrafo, também, para a banca avaliadora que me incentivou a melhorar o texto, a procurar novas soluções e aprimorar aquelas que conseguiram serem feitas.

Aproveito o ensejo e agradeço ao Gamma, começando por Isabela e Adelmo que foram dois grandes irmãos para mim e me emprestaram muitas vezes o ouvido ou um tempo para tomar um café para pensar melhor. Felipe, Plínio e Eduardo pelos momentos divertidos, pelas histórias, pela partida sagrada de Magic e pela injeção de ânimo. Brenner e Lucas pelos debates sobre Calcinha Preta e pela nova sensação do RAP, respectivamente. E Ícaro e Robson pelos debates que não levaram a lugar algum ou pelas novas palavras sempre adicionadas ao vocabulário, ou pelas noites sem dormir tentando aprimorar algo.

Logo e de forma depressa, sem causar ciúme agradeço a família, como é de praxe, a meus tios e meus pais pela compreensão, pelo sorriso amigo, pelos convites que já nasceram rejeitados. Aos meus irmãos e primos, pelas histórias sem nexos, pelo humor "Krusiano" e pelos filmes (Suecos, Albanês, Lituano) que nada acontecem, servem só para corroborar o que Albert Camus falara: "Agora, ao contrário, ficou evidente que ela (vida) será vivida melhor se não tiver significado".

Agradeço a Patrícia, minha eterna orientadora, uma grande mãe que ganhei na engenharia e que poderia estar em qualquer capítulo, mas fora colocada a parte. Obrigado pelo incentivo acadêmico, por ter me chamado para conversar sobre entrar no mestrado e por me acompanhar, me dar dicas e me aconselhar tantas vezes que se eu fosse relatar, talvez, e só talvez, fosse maior que a própria dissertação.

Aos meus amigos que me acompanham desde de quando fazia Engenharia Ambiental e Sanitária(Vinicius, Eduardo, Fred, Daniel, Caio, Ícaro e Vitor) , Marcus Mello, Vitor Radesh, Ualisson, Zé Neto, João Costa e Eric, pelas discussões, pelos dias que me forçaram a sair de casa ou pela companhia sincera. É muito bom ter amigos que te obrigam a tomar um ar fresco, falar, ouvir, ou apenas tocar uma nova canção, compartilhar um novo álbum, ou ouvir a orquestra. A Tom Zé, por Menina Jesus. A Ed por ter sempre uma palavra a dizer, um rumo a seguir, um exemplo ético a ser espelhado. Aos meus colegas de mestrado.

Ao se passar a timidez, por que a gente fala, fala, fala, e ela se esvai, agradeço muito à Vivian por ter aturado este tempo ao meu lado, por entender as ausências, por basicamente não contar comigo, mas por mesmo assim oferecer companheirismo, carinhos e broncas.

*"A imaginação oferece às pessoas consolação por aquilo que não podem ser e humor por aquilo que efetivamente são".*





## AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome do Autor: Tarssio Brito Barreto

Assinatura do autor: Tarssio Brito Barreto

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador, BA

Endereço: Rua Aristides Novis, 02 - 4º andar, Federação - Salvador-BA

CEP: 40210-630

E-mail: tarssioesa@gmail.com



## RESUMO

O estudo de séries temporais na hidrologia tem como alguns dos seus principais intuitos a análise de características como homogeneidade, estacionaridade, tendência, periodicidade, sazonalidade e persistência. Estas análises são feitas, geralmente, através de suposições nas quais tenta se aproximar a série hidrológica a uma série ideal: homogênea, não-estacionária e não persistente. Uma vez que se assume estas premissas, por vezes, pode se perder a confiabilidade dos resultados obtidos. Dentre estas análises, é de singular interesse nesta pesquisa, a inferência sobre periodicidades, sazonalidades e tendência, bem como os transientes ocorridos ao longo do tempo. Para isto, vale-se de técnicas de processamento de sinais nas quais se busca, através de transformadas, realizar o estudo deste sinal em outro domínio que não seja o tempo. Neste estudo, é predominante o uso das transformadas de Fourier que transforma um sinal no domínio do tempo em outro no domínio da frequência, porém esta técnica se mostra limitada a sinais estacionários. Para análise de sinais não estacionários, destaca-se o uso das transformadas *wavelets* que convertem o domínio do tempo no domínio do tempo-frequência, sendo de grande utilidade para a detecção de transientes em uma série. Tendo como plano de fundo a questão hídrica e a operação dos reservatórios de múltiplos usos, amplamente implantados pelo mundo e de grande importância para a matriz energética brasileira, esta pesquisa tem como objetivo comparar técnicas de mensuração da alteração dual espectral provocadas pela regularização da vazão afluente a reservatórios de múltiplos usos, especificamente Três Marias - MG e Sobradinho. Os resultados encontrados, primeiramente, puderam caracterizar e identificar os efeitos da seca que iniciou no ano de 2012, encontrando como resultado a diferenciação da distribuição de probabilidade das vazões afluentes, a partir deste ano. As transformadas *wavelets*, tendo como *wavelet* mãe a *wavelet* Morlet, foram pertinentes para as análises periódicas, encontrando o período anual como dominante, aquele que concentra maior variabilidade, e para corroborar o transiente observado pelas análises descritivas. Fora possível também, buscar a compreensão sobre a sincronização entre a vazão afluente e defluente para cada um dos reservatórios que apontam para inexistência de correlação entre a vazão afluente e defluente para faixas de períodos menores que o semanal, porém com a intensificação da seca, observou-se, também, a não sincronização para períodos intra-mensais. Por fim, ao se comparar as técnicas de mensuração de alteração espectral dual, ISA (Índice de Alteração Espectral), GPWS (Média Global do Espectro de Energia), GDPWS (Desvio entre os Espectros de Energia), percebeu-se melhor adequação da última, por esta diferenciar de forma clara o momento anterior e posterior a seca, sugerindo um maior impacto da operação dos reservatórios para períodos infra-anuais, quando em momento crítico. Foi possível concluir que as transformadas *wavelets* são ferramentas pertinentes para análise de séries hidrológicas, justamente pela sua capacidade de representar fenômenos não estacionários. Através desta, foi possível, também, investigar sobre a coerência entre as vazões afluentes e defluentes dos reservatórios, bem como mensurar esta diferença no espectro temporal e frequencial. Observando, ainda, a intensificação destes efeitos em momentos de extremos climáticos.

**Palavras-chave:** Séries Hidrológicas, Processamento de Sinais e Transformadas Wavelets



## ABSTRACT

The time series study in hydrology has as its main purpose the analysis of characteristics such as homogeneity, stationarity, trend, periodicity, seasonality and persistence. These analyzes are usually made through assumptions in which the hydrological series is approached to an ideal series: homogeneous, non-stationary and non-persistent. Once it assumes these premises, sometimes the reliability of the obtained results can be lost. Among these analyzes, it is of singular interest in this research the inference about periodicities, seasonality and trends, as well as the transients occurring along the time. For this, it uses techniques of signal processing in which it is sought, through transformations, to carry out the study of this signal in another domain than time. In this study the use of Fourier transform is predominant, transforming one signal in the time domain into another in the frequency domain, but this technique is limited to stationary signals. For the analysis of non-stationary signals, the use of wavelet transforms that convert the time domain in the time-frequency domain, is of great use for the detection of transients in a series. With the water issue background and the operation of multiple use reservoirs, widely deployed throughout the world and of great importance to the Brazilian energy matrix, this research aims to compare techniques for measuring the spectral dual alteration caused by the regularization of the tributary flow to multi-use reservoirs, specifically Três Marias - MG and Sobradinho. The firstly results found could characterize and identify the effects of the drought that began in the year 2012, finding as a result the differentiation of the probability distribution of the tributary flows after this year. The wavelet transform, using the Morlet wavelet as the primary wavelet, was pertinent to the periodic analysis, with the annual period as dominant being the one with the greatest variability, and to corroborate the transient observed by the descriptive analyzes. It was also possible to obtain an understanding of the synchronization between the inflow and the defluent flow for each of the reservoirs, which indicate that there is no correlation between the inflow and the defluent flow for bands of less than weekly periods, but with the intensification of the drought it was observed the non-synchronization for intra-monthly periods. Finally, when comparing the techniques of measurement of dual spectral change, ISA (Spectral Change Index), GPWS (Global Energy Spectrum), GDPWS (Energy Spectrum Deviation), it was observed that the last one was the best, because it clearly differentiates the pre and post drought moment, suggesting a greater impact of the operation of the reservoirs for infra-annual periods when at a critical moment. It was possible to conclude that wavelet transformations are relevant tools for the analysis of hydrological series, precisely because of their capacity to represent non-stationary phenomena. Through this, it was also possible to investigate the coherence between the tributaries and the defluents of the reservoirs, as well as to measure this difference in the temporal and frequency spectrum. Observing as well the intensification of these effects in times of extreme weather.

**Key-words:** Hydrologic Time Series, Signal Processing, Wavelets Transform.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Níveis e volumes característicos de um reservatório de múltiplos usos.

Fonte: Donato (2003)

Figura 2 – Os reservatórios da Bacia do Rio São Francisco. Fonte: ONS (2017).

Figura 3 - Vazões afluentes ao reservatório de Três Marias de 2005 a 2016

Figura 4 - Boxplot das vazões afluentes ao reservatório Três Marias de 2005 a 2015

Figura 5 - Distribuição da densidade de probabilidade das vazões afluentes ao reservatório de Três Marias de 2005 a 2016

Figura 6 - Distribuição da densidade de probabilidade das vazões afluentes ao reservatório de Três Marias divididas por ano hidrológico de 2005 a 2015

Figura 7 - Percentis de vazão afluente ao reservatório de Três Marias em momento anterior e posterior a 2012

Figura 8 - Reconstrução da wavelet que representa às vazões afluentes ao reservatório de Três Marias

Figura 9 - Espectro de energia das wavelets que representam a vazão afluente ao reservatório de Três Marias

Figura 10 - Amplitude das Wavelets que representam a vazão afluente ao reservatório de Três Marias seguindo os períodos de interesse

Figura 11 - Reconstrução das Wavelets que representam a vazão afluente ao reservatório de Três Marias seguindo os períodos de interesse

Figura 12 - Vazões defluentes do reservatório de Três Marias de 2005 a 2015

Figura 13 - Vazões defluentes do reservatório de Três Marias (2005-2015) para momento anterior e posterior a 2012

Figura 14 - Densidade de probabilidade das vazões defluentes do reservatório de Três Marias de 2005 a 2015

Figura 15 - Reconstrução usando wavelets das vazões defluentes de Três Marias de 2005 a 2015

Figura 16 - Espectro de energia das wavelets das vazões defluentes de Três Marias

Figura 17 - Amplitude das wavelets das vazões defluentes de Três Marias, seguindo determinados períodos

Figura 18 - Reconstrução das wavelets das vazões defluentes de Três Marias seguindo determinados períodos

Figura 19 - Espectro das Coerências entre a Vazão Afluente e Vazão Defluente de Três Marias

Figura 20 - Coerências seguindo determinados períodos entre a vazão afluente e a vazão defluente de Três Marias

Figura 21 - Vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho de 2005 a 2016

Figura 22 - Boxplot das vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho de 2005 a 2015

Figura 23 - Distribuição de probabilidade das vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho de 2005 a 2015

Figura 24 - Distribuição de Probabilidade das Vazões Afluentes a Sobradinho ano a ano de 2005 a 2015

Figura 25 - Distribuição de Probabilidade das Vazões Afluentes a Sobradinho ano a ano de 2005 a 2015

Figura 26 - Reconstrução da série de vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho usando wavelets

Figura 27 - Reconstrução da série de vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho usando wavelets

Figura 28 - Reconstrução das Amplitudes referentes a períodos determinados para a Série de Vazões Afluentes a Sobradinho

Figura 29 - Reconstrução das wavelets referentes a períodos determinados para as Vazões Afluentes a Sobradinho

Figura 30 - Vazões defluentes do reservatório de Sobradinho de 2005 a 2016

Figura 31 - Vazões defluentes do reservatório Sobradinho de 2005 a 2016

Figura 32 - Vazões defluentes de Sobradinho (2005-2016), agrupadas para os anos anteriores a 2012 (acima) e posteriores a 2012 (abaixo)

Figura 33 - Reconstrução das vazões defluentes do reservatório de Sobradinho utilizando wavelets

Figura 34 - Espectro de energia das wavelets que representam a vazão defluente do reservatório de Sobradinho

Figura 35 - Amplitudes das wavelets que representam a vazão defluente do reservatório de Sobradinho

Figura 36 - Reconstrução das wavelets que representam determinados períodos e sua vazão defluente para o reservatório de Sobradinho

Figura 37 - Espectro de Coerência entre a Vazão Afluente e Vazão Defluente do reservatório de Sobradinho

Figura 38 - Coerências seguindo determinados períodos entre a Vazão Afluente e Vazão Defluente de Sobradinho

Figura 39 - Valor de ISA para o reservatório de Três Marias períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Figura 40 - Valor de ISA para o reservatório de Três Marias mediante os períodos selecionados

Figura 41 - Valor de ISA para o reservatório de Três Marias para os períodos em destaque divididos em dois intervalos de tempo

Figura 42 - Espectro dos valores de ISA referentes a transformada *wavelet* que representam a vazão afluente e defluente do reservatório de Três Marias.

Figura 43 - Valor de ISA para o reservatório de Sobradinho para períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Figura 44 - Valor de ISA para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque entre 2006 e 2016

Figura 45 - Valor de ISA para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque entre 2006 e 2016 (ONS, 2017)

Figura 46 : Espectograma gerada pela medida ISA para a análise de vazões afluentes e defluentes do reservatório de múltiplos usos de Sobradinho.

Figura 47 - Valor de GPWS para o reservatório de Três Marias períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Figura 48 - Valor de GPWS para o reservatório de Três Marias para os períodos em destaque entre os anos de 2006 e 2016

Figura 49 - Valor de GPWS para o reservatório de Três Marias para os períodos em destaque para dois intervalos de tempo centrados em 2012

Figura 50 – Espectro de GPWS para as transformadas wavelets que representam as vazões afluentes e defluentes do reservatório de múltiplos usos de Sobradinho.

Figura 51 - Valor de GPWS para o reservatório de Sobradinho para períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Figura 52 - Valor de GPWS para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque entre 2006 e 2016

Figura 53 - Valor de GPWS para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque divididos em momento anterior e posterior a 2012

Figura 54 : Espectro de GPWS para as *wavelets* que representam a vazão afluente e defluente do reservatório de Sobradinho.

Figura 55 - Valor de GDPWS para o reservatório de Três Marias períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Figura 56 - Valor de GDPWS para o reservatório de Três Marias para os períodos determinados entre 2006 e 2016

Figura 57 - Valor de GDPWS para o reservatório de Três Marias para períodos maiores que 1 mês e menores que 6 meses entre 2005 e 2015

Figura 58 - Espectograma do GDPWS para o reservatório de Três Marias

Figura 59 - Valor de GDPWS para o reservatório de Sobradinho períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Figura 60 - Valor de GDPWS para o reservatório de Sobradinho para os períodos em questão entre 2006 e 2016

Figura 61 - Valor de GDPWS para o reservatório de Sobradinho para períodos maiores que 1 mês e menores que 6 meses entre 2005 e 2015

Figura 62 - Espectograma do GDPWS do reservatório de Sobradinho



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentis das vazões afluentes a Três Marias e seus respectivos anos hidrológicos

Tabela 2 - Mediana da vazão afluente ao reservatório de Três Marias agrupada por mês

Tabela 3 - Percentis de vazão afluente ao reservatório de Sobradinho agrupados por ano

Tabela 4 - Medianas da vazão afluente ao reservatório de Sobradinho por mês (m<sup>3</sup>/s)

Tabela 5 - Medianas da Vazão Afluente a Sobradinho Agrupadas por Mês





## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Relação entre os riscos relacionados a água na segurança hídrica e energética



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA- Agência Nacional da Água

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica

ASCE- American Society of Civil Engineers

BR- Buishand Range

CBHSF- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

CEMIG- Companhia Energética do Estado de Minas Gerais

CHESF- Companhia Hidroelétrica do São Francisco

DWPS- Desvio Entre os Espectros de Energia

GWPS- Média Global do Espectro de Energia

IRENA- Internacional Renewable Energy Agency

ISA- Índice de Alteração Espectral

MSSA- Main Series Spectral Analysis Method

ONS- Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN- Sistema Interligado Nacional

SNHT- Standard Normal Homogeneity Test

VNR- von Neumann Range



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b>xix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xxv</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b>	<b>xxvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO DE PESQUISA</b>	<b>3</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>4</b>
<b>3.1 O estudo das séries temporais na hidrologia</b>	<b>4</b>
<b>3.2 A transformada wavelet na hidrologia</b>	<b>8</b>
3.2.1 Análise de características multi-temporais e identificação de componentes determinísticos	9
3.2.2 Redução ou remoção de ruídos	12
3.2.3 Quantificação de complexidade em séries hidrológicas	13
3.2.4 Crosswavelets	14
3.2.5 Previsão	16
3.2.1 Comparação entre dois espectros de vazões	17
<b>3.3 Reservatórios de múltiplos usos</b>	<b>19</b>
3.3.1 Operação de reservatórios de múltiplos usos	21
<b>4 Estudo de caso</b>	<b>25</b>
<b>5 METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
<b>5.1 Coleta de dados</b>	<b>28</b>
<b>5.2 Tratamento e Análise dos Dados</b>	<b>29</b>
<b>5.3 Análise Descritiva dos Dados</b>	<b>29</b>
<b>5.4 Análise da Transformada Wavelet Contínua</b>	<b>30</b>

5.4.1	Propriedades das Transformadas Wavelets Contínuas	31
5.4.2	Wavelet Morlet	33
5.4.3	Energia	34
5.4.4	Cone de Influência	35
5.4.5	Nível de Significância e Intervalo de Confiança	36
5.4.6	Cross-Wavelets	37
<b>5.5</b>	<b>Ferramentas de mensuração das diferenças entre espectros de energia de wavelets</b>	<b>38</b>
5.5.1	Índice de Alteração Espectral (ISA)	39
5.5.2	Média Global do Espectro de Energia (GWPS)	39
5.5.3	Desvio entre os espectros de energia (DWPS)	41
5.5.4	Teste de Kolmogorov-Smirnov	42
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>Análise Descritiva da Operação do Reservatório de Três Marias.</b>	<b>43</b>
6.1.1	Análise Descritiva das Vazões Afluentes	43
6.1.2	Análise das Vazões Afluentes utilizando Wavelets	49
6.1.3	Análise Descritiva das Vazões Defluentes	54
6.1.4	Análise das Vazões Defluentes utilizando Wavelets	57
6.1.5	Análise da Relação entre as Vazões Afluentes e Vazões Defluentes de Três Marias utilizando Crosswavelets	61
<b>6.2</b>	<b>Análise Descritiva da Operação do Reservatório de Sobradinho.</b>	<b>63</b>
6.2.1	Análise Descritiva das Vazões Afluentes a Sobradinho	63
6.2.2	Análise das Vazões Afluentes a Sobradinho utilizando Wavelets	69
6.2.3	Análise Descritiva das Vazões Defluentes	73
6.2.4	Análise das Vazões Defluentes de Sobradinho utilizando Wavelets	77

6.2.5	Análise da Relação entre as Vazões Afluentes e Vazões Defluentes de Sobradinho utilizando Crosswavelets	80
<b>6.3</b>	<b>Mensuração da diferenciação entre os regimes de vazão</b>	<b>82</b>
6.3.1	Índice de Alteração Espectral (ISA)	82
6.3.2	Média Global do Espectro de Energia (GWPS)	88
6.3.3	Desvio entre os espectros de energia (GDPWS)	94
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIA</b>	<b>105</b>





## 1 INTRODUÇÃO

Dentro do escopo da hidrologia, o estudo de características de séries temporais como as séries de precipitação, vazão e temperatura são assuntos recorrentes na literatura. Porém, observa-se que estas análises partem de pressupostos por vezes não presentes nestas séries como a homogeneidade, estacionariedade, não tendência e não persistência (Machiwal e Jha, 2006).

Comumente, para o entendimento de características como periodicidade, sazonalidade e persistência são utilizadas técnicas de processamento de sinais que objetivam a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência ou do tempo-frequência.

Destaca-se, nestas análises o uso da transformada de Fourier, sendo a mais utilizada, que é uma transformada pautada na soma ponderada entre senos e cossenos. Contudo, ela se mostra limitada quanto a análise de sinais não-estacionários.

No processamento de sinais não estacionários, o uso das transformadas wavelets se apresenta como técnica de grande êxito, uma vez que está se baseia na transformação de uma série no domínio temporal para outra no domínio temporal e frequencial. Sendo possível assim, observar periodicidades, sazonalidades e persistências, bem como os seus transientes.

Esta abordagem se mostra com potencial quanto ao estudo de vazões regularizadas e não regularizadas por meio da operação de reservatórios de múltiplos usos, amplamente construídos pelo mundo.

No Brasil, os reservatórios ocupam uma posição estratégica fundamental no que tange a geração da energia, interligada por um sistema nacional denominado de SIN, e a garantia aos múltiplos usos, destacando-se em determinadas áreas, o abastecimento humano e em outras a produção agrícola.

Ressalta-se que estes diversos usos estão interligados, a produção energética influencia na produção agrícola, uma vez que são necessárias bombas para a irrigação, fora que, indiretamente, o preço dos insumos, como fertilizantes, tende a

subir de preço nos momentos que a energia elétrica está mais cara. Em contradição, quanto maior a produção energética menor a disponibilidade desta água para a irrigação.

O abastecimento humano, também, é influenciado pela alta da energia elétrica que é considerado como um dos maiores custos para a adução, tratamento e distribuição de água na rede urbana. Enquanto isto, esta disponibilidade de água para a captação e distribuição é influenciada seja em volume, uma vez que para maior geração de energia são necessários maiores níveis na barragem, seja em qualidade, uma vez que a diminuição das vazões a montante pode ocasionar a degradação desta qualidade.

Deve-se pontuar, também, que a regularização das vazões com os seus diversos intuitos acaba por promover a dessincronização entre as vazões naturais, afluentes ao reservatório, e as vazões defluentes. Fato este que pode ocasionar impactos nos ecossistemas.

Desta forma, o uso das transformadas wavelets e técnicas que possam avaliar a sincronização entre a vazão afluente e a vazão regularizado, bem como a mensuração da alteração nas características frequencias e temporais causadas pela operação dos reservatórios e agravadas durante o momento de seca.

Sendo, uma ferramenta capaz de fornecer informações acerca do atual estado do sistema, quanto as vazões e sua dessincronização, servindo de subsidio na tomada de decisões que forneçam uma operação mais segura, quanto a garantia dos usos múltiplos, enquanto promove um menor impacto ao ecossistema local.

## **2 OBJETIVO DE PESQUISA**

Esta pesquisa tem como objetivo analisar comparativamente métodos que visem mensurar o efeito da regularização da vazão, por meio dos reservatórios de múltiplos usos de Três Marias e Sobradinho sobre as características temporais e frequenciais do regime de vazão a jusante, tendo como objetivos específicos:

- Análise temporal e frequencial das vazões afluentes e defluentes aos reservatórios de Três Marias e Sobradinho.
  
- Análise da sincronização entre os espectros de vazão afluente e defluente dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho
  
- Comparação entre as técnicas de mensuração do efeito da regularização dos reservatórios sobre o regime de vazões a jusante.

## **3 REVISÃO DA LITERATURA**

### **3.1 O estudo das séries temporais na hidrologia**

Uma série temporal pode ser entendida como um conjunto de observações tomadas em sequência no tempo. Destaca-se, dentre suas características, a dependência entre observações adjacentes e natureza destas dependências.

Um método comum de análise destas séries temporais é a decomposição destas em três componentes: Tendência, Sazonalidade e Ruído (Equação 1):

$$z_t = T_t + S_t + N_t \quad (1)$$

Onde:

- $z_t$  → Série temporal;
- $T_t$  → Tendência;
- $S_t$  → Sazonalidade
- $N_t$  → Ruído ou componente aleatório

Quanto as suas aplicações, o presente documento exibe singular interesse nos processos hidrológicos.

Segundo Machiwal e Jha (2008), inicialmente as aplicações de séries temporais em hidrologia foram focadas nas questões das águas superficiais e na análise de extremos hidrológicos como secas e enchentes.

Ainda, segundo os mesmos autores, usualmente os dados são analisados em escalas mensais e usuais e, corriqueiramente, baseiam-se em quatro pressupostos: homogeneidade da série temporal, estacionaridade, inexistência de tendências ou troca de padrões e ausência de fenômenos de persistência.

Homogeneidade implica que determinada série temporal provém de uma mesma população estatística com média invariante. Segundo Kang e Yusof (2012), o teste de homogeneidade tem como função detectar se determinado conjunto dados foram obtidos a partir de instrumentos e ambientes semelhantes.

Entre os métodos utilizados está a curva de dupla massa. Esta curva se apresenta como uma ferramenta simples para verificação da consistência de uma base de dados hidrometeorológica, a sua teoria se baseia em um gráfico de acumulação de

eventos que são relacionados, como chuva-vazão. Espera-se que em processos homogêneos a curva obtida seja uma reta (Eris e Agiraliloglu, 2015).

Além desta técnica, na literatura são encontradas outras cuja a base é pautada em testes estatísticos. A título de exemplo destes testes, pode-se citar a pesquisa desenvolvida por Kang e Yusof (2012).

Nesta pesquisa, os autores supracitados, se utilizam de quatro testes estatísticos para identificar homogeneidade em uma série de dados de precipitação. Sendo estes testes: *Standard normal homogeneity test (SNHT)*, *Buishand range (BR) test*, *Pettitt test* e *von Neumann ratio (VNR)*. Independente do teste utilizado, estabeleceu-se como hipótese nula que a série é homogênea e seus valores são independentes entre si.

Kang e Yusof (2012) puderam concluir, a partir dos métodos citados acima, que cada uma das estações selecionadas na Malásia representava processos homogêneos quando se utilizava como variável a precipitação média e máxima anual.

Quanto a estacionaridade, uma série é dita estritamente estacionaria quando suas características temporais não variam desde de seu princípio, uma forma menos estrita de estacionaridade é chamada de estacionaridade fraca ou de segunda ordem. Nesta, os momentos de primeira e segunda ordem dependem apenas das diferenças temporais da série (Chen e Rao, 2002 e Machiwal e Jha, 2008).

Deve-se, a título complementar, evidenciar que uma série estacionaria não possui, também, componentes que representam tendências e periodicidade.

Quanto a sua aplicação, um bom exemplo é a pesquisa realizada por Machiwal e Jha (2009). Estes autores, se valeram de três testes de estacionaridade (*Student's t test*, *simple t test* e *Mann-Whitney test*) para verificar se as séries temporais de precipitação de Kharagpur, Índia, estavam em processo estacionarias. Encontrou-se resultados que apontavam para a estacionaridade em todas as sete séries de precipitação estudadas.

Segundo Chen et al (2017), o estudo de estacionaridade em séries hidrológicas é de grande valia nos estudos acerca das mudanças climáticas, uma vez que este

fenômeno está normalmente associado a presença de tendência ou divergências de comportamento nestas séries temporais.

A pesquisa realizada pelos autores anteriormente citados, apontam para a existência de não-estacionaridade quanto às precipitações máximas anuais nas estações de Keelung, Taitung e Hualien. Sendo que estas três estações se localizam nas áreas mais susceptíveis a tornados, mostrando, segundo Chen et al (2017), efeitos mais pronunciados das mudanças climáticas.

No estudo de séries temporais, se faz necessário, também, analisar mudanças de comportamento de uma determinada variável no tempo, fato este evidenciado por tendências lineares ou não-lineares nas séries hidrológicas em questão.

Como método para a análise de tendências, Burn e Elnur (2002) se utilizaram do teste de Mann-Kendall não paramétrico no estudo de uma rede de 248 bacias hidrográficas canadenses. Estes autores puderam concluir, através deste, que um grande número de bacias analisadas apresentava tendências diversas, não distribuídas de forma homogênea no espaço.

A análise de tendência destaca-se, também, o contexto do aquecimento global, no qual se exhibe como oportunidades de estudo as mudanças de tendências de precipitação e vazão e a predição de possíveis secas e enchentes (Yu et al 2010).

No contexto de análise de tendências de séries temporais hidrológicas e aquecimento global, cita-se a pesquisa apresentada em Madsen et al (2014). Estes autores realizaram o estudo sobre as tendências de precipitações extremas e ocorrência de enchentes na Europa pautadas em observações climáticas projetadas para o futuro.

O acréscimo de precipitações extremas fora observado por estes autores, porém não há fortes indícios de tendências significativas, em escalas regionais ou nacionais, do incremento dos eventos de enchentes.

A periodicidade em séries temporais hidrológicas é encontrada, geralmente, para intervalos de ano menores que um ano, mais especificamente, comumente, encontra-se períodos semestrais e anuais nestas séries (Machiwal e Jha, 2008).

Uma das formas de analisar as periodicidades se dá através de séries de Fourier que por sua vez são definidas como funções periódicas que são combinações lineares de senos e cossenos.

Dentro das possibilidades de representação das séries de Fourier está o periodograma. O periodograma se configura como um gráfico capaz de identificar frequências importantes que definem a oscilação para uma determinada série temporal (Marques et al. 2006).

Incluso na análise de periodicidades, há a pesquisa apresentada em De Rose et al (2015). Estes autores, através da abordagem dos periodogramas puderam identificar, em uma série reconstruída e calibrada de 1200 anos, como períodos significativos para esta reconstrução: 7 a 8 anos (período próximo a década), 30 anos (multi-decadal) e escalas superiores a 50 anos (centenárias).

Para os autores supracitados, o estudo de periodicidade, levando em conta as variações que ocorrem de forma milenar é bastante pertinente no processo de gestão da futura oferta de água.

Por fim, a persistência é definida como a não independência dos termos consecutivos de uma série hidrológica. Matematicamente, Kendall (1973) define persistência como a dependência correlacional entre cada  $i$ -ésimo e  $(k-i)$ -ésimo elementos de uma série, onde  $k$  é corriqueiramente denominado de *lag* temporal.

No que tange a existência da persistência em uma série, destaca-se o fenômeno de Hurst, presente em diversos processos naturais, como os hidrológicos em questão (Koutsoyiannis, 2005). Para o autor anteriormente citado, o fenômeno de Hurst é especialmente observado como dependências de longos períodos em uma série temporal, fato este que aumenta a incerteza sobre o processo estudado.

Como exemplo de análise sobre persistência e o fenômeno de Hurst, cita-se a pesquisa desenvolvida em Markonis et al (2018). Estes autores estudaram a persistência de longo prazo em quase 700 bacias globalmente distribuídas. A partir deste foi possível concluir que os a persistência de longo prazo se apresenta mais fraca que a encontrada em outros estudos, porém, sugere-se que este efeito de persistência é mais pronunciado em grandes bacias hidrográficas onde o efeito de agregação espacial é maior.

### 3.2 A transformada wavelet na hidrologia

Ainda, entre os tópicos das séries temporais, este estudo apresenta especial interesse no processamento e entendimento das dinâmicas que representam um determinado sinal hidrológico.

A análise de sinais se baseia, tipicamente, na transformação de uma determinada série no domínio do tempo em outro domínio, a exemplo do domínio das frequências, afim de extrair características que não facilmente observadas na série original (Gao e Ian, 2011).

As séries de Fourier são as ferramentas mais utilizadas para o processamento de sinais, esta técnica busca a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência através da soma ponderada de uma série de funções senos e cossenos (Gao e Ian, 2011).

As séries de Fourier são ferramentas adequadas para o estudo de sinais estacionários, uma vez que sua formulação consiste em uma superposição linear de senos e cossenos com periodicidade linear, independente e não evolutiva (Labat, 2005).

Desta forma, uma vez que se trate de processos transitórios, como acontece em fenômenos hidrológicos sujeitos a flutuações e periodicidades na escala de dias a centenas de anos, o seu uso é bastante limitado (Labat, 2005).

Afim de contornar esta limitação, as séries de Fourier janeladas (SFTF) foram propostas por Dennis Gabor. Esta transformada parte do princípio de produzir janelas de tempo de análise onde são aplicadas as transformadas de Fourier, localizando-as no tempo.

Como grande limitação, a necessidade de selecionar uma janela de tempo fixa e adequada para a decomposição do sinal estudado. Além disto a boa representação de altas e baixas frequências em uma mesma transformada é comprometida, uma vez que a relação entre o comprimento das janelas de tempo e a resolução da frequência são regidas pelo princípio da incerteza (Equação 2) (Gao e Ian, 2011):

(2)

$$\Delta t * \Delta f = \frac{1}{4\pi}$$

Por fim, a fim de se analisar processos não-estacionários, contendo características transitórias ou estruturas fractais, uma técnica de grande valia são as transformadas *wavelets*. Diferentemente das transformadas de Fourier e da transformada janela de Fourier, as transformadas *wavelets* possuem tamanhos de janelas variáveis que permite a análise de diferentes componentes das frequências (Labat, 2005 e Gao e lan, 2011).

Desta forma, um dos objetivos básicos da aplicação das transformadas *wavelets* é possibilitar a análise de uma determinada frequência e determinar a sua variação temporal, sendo de particular utilidade na análise de sinais que caracterizam eventos de alta frequência ou quando estes sinais são caracterizados por inúmeros processos variáveis em escala (Labat, 2005).

Aplicações das transformadas *wavelets* para análise de sinais hidrológicos, como as séries temporais de vazão e precipitação, foram sintetizadas em Sang (2013) e divididas em seis grandes grupos: Análise de wavelets contínuas para o entendimento de características multi-temporal; Identificação de componentes determinísticos, tendência e período; Redução de ruídos; Estimação da evolução temporal e quantificação de graus de complexidade de um sistema hidrológico utilizando, por exemplo, entropia de wavelets; Relação entre variáveis hidrológicas como uso de crosswavelets e simulações e previsões baseados nas ondaletas que representam a série temporal.

### **3.2.1 Análise de características multi-temporais e identificação de componentes determinísticos**

Quando o objetivo é a análise de wavelets contínuas para o entendimento de características multi-temporais e a identificação de componentes determinísticos, usualmente, objetiva-se como resultados encontrar atributos temporais de uma dada série hidrológica e a sua variação tanto no tempo quanto na frequência sinal (Sang, 2013).

Dentro destas análises se destaca o estudo dos coeficientes das wavelets e dos espectogramas que são utilizados para o entendimento de padrões de tendência, periodicidade, transientes e estruturas fractais existentes em um dado sinal.

Em pesquisa realizada por (Torrence e Compo, 1998) pode ser visto, claramente, uma aplicação que visa a identificação de características multi-temporais em séries hidrológicas, mais especificamente fora analisada as séries de amplitudes dos fenômenos El-Niño, buscando observar características cíclicas e transientes que ocorreram ao longo do tempo neste fenômeno natural.

Deste estudo, os autores, através do espectro da transformada wavelet, puderam observar que as amplitudes nos fenômenos de El-Niño eram modificadas em escalas inter-decais, com baixa variância entre 1940 e 1960, e possuíam periodicidades entre 2 a 8 anos.

Outra aplicação das transformadas wavelets para a identificação de características frequenciais fora apresentado em Jay et al. (2014) com o intuito de analisar características ao longo do nível de água em um canal localizado no rio Columbia.

Este autor, buscou através da análise de sinais, compreender como os níveis de água neste rio são influenciados pelas marés, vazão do rio, processos de precipitação e infiltração, além das operações dos reservatórios para geração de energia

Através deste estudo, os autores em questão, puderam contribuir metodologicamente para o melhor entendimento das relações que ocorrem em ambientes estuarinos decorrente dos efeitos de maré e das vazões fluviais modificadas por reservatórios de geração de eletricidade, utilizando para isto a interpretação do espectograma das transformadas wavelets

Um exemplo desta utilização é a pesquisa realizada por Adamowski et al. (2008). Para estes autores, as técnicas de detecção de tendências, vide capítulo anterior, são eficientes desde que estas sejam suaves e monotônicas, fato pouco observado em séries hidrológicas que contém sinais múltiplos e tendências que simultaneamente podem indicar sinais crescentes e decrescentes no tempo.

Adamowski et al (2008), se utilizou da transformada wavelet contínua para extrair e reconstruir tendências hidrológicas de longo prazo a partir de dados de vazões mínimas mensais de cinco ecozonas no Canadá.

As tendências foram observadas a partir do espectrograma destas wavelets, que como visto anteriormente, são localizados tanto no tempo, janelas variáveis, quanto nas frequências, podendo assim ser observadas periodicidades multianuais, localizadas entre 5 e 10 anos, e transientes na série temporal em questão.

Como conclusão, os autores supracitados puderam observar a redução das sazonalidades das vazões mínimas ao longo do último século no sudeste do Canadá e o acréscimo, no centro-sul, das variabilidades multi-aneais.

Como oportunidade, ainda, Adamowski et al (2008) apontam a necessidade de identificar condições antropogênicas e naturais que provocaram os transientes observados nestas séries, facilitando, assim, o processo de previsão de secas e enchentes e sua correlação com outras variáveis como ocupação do solo e ciclos climatológicos diversos.

Outra pesquisa de relevância no sentido de identificação de características multi-temporais e tendências em séries hidrológicas fora realizada por Sang et al (2012). Nesta pesquisa, estes autores, propõem um método para, através das transformadas wavelets discretas, identificar tendências dada uma série em questão.

Para isto estes autores propõem uma metodologia baseada primeiramente nos espectrogramas de energias que representam a série hidrológica e o ruído existente nesta e a separação dos componentes que representam a tendência, a periodicidade e o ruído da série. A partir disto, testes estatísticos de tendência, como o Mann-Kendall, podem ser aplicados, fato este que permite a identificação de um intervalo de confiança e consideração das incertezas.

Sang et al (2012) aplicou esta técnica em uma série de temperaturas sintéticas e observou melhorias no método quanto ao uso do teste de Mann-Kendall para identificação de tendências. Os mesmos autores salientam, ainda, a necessidade de se aplicar esta metodologia a dados reais onde as complexidades do sistema são maiores.

### **3.2.2 Redução ou remoção de ruídos**

Ao se analisar uma série hidrológica, percebe-se, como visto na Equação 2, a existência de componentes determinísticos, tendência e periodicidade, e componentes aleatórios, ruído. Os primeiros são consequências de fenômenos físicos, enquanto que o ruído, que contamina os verdadeiros dados hidrológicos, provém de diversos fatores não controláveis (Sang et al 2009 e Sang, 2012a).

É interessante salientar que as características observadas para o ruído diferem quanto ao espectro no qual se realiza a análise. Quanto é verificado o espectro temporal, o ruído se difere dos componentes determinísticos por não apresentar boas características de autocorrelação, uma vez que se configuram como processos independentes e aleatórios (Sang et al, 2009).

Quanto ao domínio da frequência, o espectro do ruído tem como característica apresentar oscilações complexas em todo o domínio, apresentando picos espectrais, porém sem apresentar um pico espectral dominantes (Sang et al, 2009).

A redução ou remoção destes ruídos são imprescindíveis no processo de identificação de períodos dominantes ou de modelagem para a previsão de futuros resultados (Sang et al, 2009; Sang, 2012a; Sang, et al 2014 e Nourani et al 2014).

Inicialmente, ao se debater ferramentas para a redução ou remoção de ruídos em séries hidrológicas utilizando transformadas wavelets, é pontuar Yan-Fang Sang como um colaborador bastante presente no desenvolvimento destas análises.

Em Sang et al (2009), é proposto um método de redução de ruídos que tem como base teórica o uso de transformadas wavelets e a teoria da entropia. Este método fora denominado de MSSA (*Main Series Spectral Analysis Method*).

O MSSA é pautado na identificação dos limites dos coeficientes adequados da transformada wavelet discreta, a partir desta identificação é realizado a diferenciação e a reconstrução do sinal que representa os componentes determinísticos e aleatórios (Sang et al, 2009)

Um guia prático para a sua aplicação é apresentado em Sang et al. (2012a). Em artigo denominado, em livre tradução, como: “Um guia prático de decomposição de wavelets discretas para uma série hidrológica”.

Neste, o autor busca descrever de forma prática o processo de decomposição de uma série temporal, componentes determinísticos *versus* componentes aleatórios. Para isto o autor sugere como passo-a-passo: Escolha de uma wavelet mãe adequada e que seja capaz de manter as características da série original; Escolha de um nível de decomposição adequado; Remoção do ruído baseado na metodologia apresentada em Sang et al. (2009) e realização de testes de significância para a transformada wavelet discreta comparando a série sem ruídos com a de referência.

Em Sang et al. (2014), apresenta-se como proposta um método de redução de ruídos pautado na distribuição das energias de uma transformada wavelet, método este que se diferencia do primeiro por não ser pautado nos limites dos coeficientes da transformada wavelet discreta.

Estes autores apontam que este método possui uma base física mais robusta que o anterior, justamente por ser baseado na distribuição das energias. Também, neste mesmo artigo, fora concluído sobre a redução de fatores que influenciam uma boa remoção de ruído, sendo agora apenas três: Escolha adequada da wavelet mãe; Escolha do nível de decomposição e característica do ruído.

### **3.2.3 Quantificação de complexidade em séries hidrológicas**

Um uso potencial de grande importância das wavelets, ainda pouco explorado na literatura, é a quantificação da complexidade em séries hidrológicas, este tipo de estudo busca compreender processos hidrológicos, bem como sua evolução e seu impacto no meio natural, o método mais utilizado diz respeito ao estudo da entropia das wavelets cujos resultados são bastante influenciados pela escolha da wavelet mãe e da remoção ou redução do ruído presente na série (Sang, 2013).

Destacam-se, dentro deste contexto, estudos de regionalização de vazões ou a busca por agrupamento de características hidrológicas semelhantes. Uma destas pesquisas fora realizada por Agarwal et al. (2016).

Estes autores tiveram como objetivo realizar a regionalização das bacias hidrográficas dos Estados Unidos utilizando para isto cerca de 530 estações fluviométricas. O modelo proposto por Agarwal et al. (2016) se configura como um

modelo híbrido onde são somados modelos pautadas na transformada wavelet contínua e sua entropia e técnicas estatísticas de agrupamento.

Os resultados apontaram para a existência de 14 agrupamentos pautados na entropia de cada uma das escalas obtidas através da transformada wavelet contínua.

Outra questão inclusa na metodologia proposta por Agarwal et al. (2016) fora a divisão da escala em três bandas de frequências: Menor que dois meses; Entre 3 e 8 meses e entre 9 e 14 meses. A partir disto, foi possível relacionar cada um dos agrupamentos ao valor de entropia normalizado encontrada para cada uma das bandas de frequência.

Outra pesquisa que busca encontrar semelhanças entre características hidrológicas através da entropia foi apresentada em Sang (2012b). Esta pesquisa teve como objetivo analisar a variabilidade diária das precipitações no Rio Azul, China, entre os anos de 1958 e 2007.

Como resultado, Sang (2012b) observou agrupamentos de alta entropia próximos as cidades mais urbanizadas e de mais baixas entropias próxima a barragem do Lago de Taiku, indicando, assim, como estas estruturas antrópicas podem influenciar as características naturais de circulação atmosférica.

Por fim, no que tange ao uso da abordagem de entropia e o uso de transformadas wavelets, Sang (2012b) indica que a entropia das transformadas wavelets é uma boa métrica para identificação de mudanças climáticas devido a sua capacidade de reprodução de transientes nas escalas espaciais e temporais.

#### **3.2.4 Crosswavelets**

O uso de crosswavelets em séries hidrológicas possui como vantagem, quando comparado a outros métodos de correlação, a não limitação a séries lineares e ergódicas, fato bastante observado em testes estatísticos.

Uma outra grande motivação para o uso das crosswavelet versa sobre a possibilidade deste método apresentar a correlação entre as séries temporais para uma determinada escala de frequências (Sang, 2013). Apesar disto, segundo estudo do mesmo autor, este é o método menos aplicado a séries hidrológicas, indicando

oportunidades para o melhor desenvolvimento da aplicação desta técnica no campo da hidrologia.

A título de exemplificação cita-se Yu et al. (2014). O autor supracitado se utilizou da transformada de crosswavelets e da coerência da transformada de wavelets para estudar a coerência, comparação que revela a correlação entre duas variáveis transformadas nas escalas de frequência, e o atraso temporal, determinado pela diferença de fase entre as duas variáveis transformadas, existente entre as dinâmicas hidrológicas de diferentes rios ao longo da Bacia do Rio Azul.

Através da metodologia citada acima, Yu et al. (2014) identificaram o impacto de múltiplos fatores na dinâmica estuarina do Rio Azul, encontrando, após a identificação das correlações entre as variáveis, um modelo de regressão que contribuiu para o entendimento das influências do ciclo de marés e da vazão defluente do reservatório das Três Gargantas.

Estes resultados apontaram que o maior impacto, quanto a questão da salinidade do Rio Azul, é provocado pelas flutuações das marés estuarinas e o nível do mar, enquanto que em segundo plano aparece as vazões defluentes do reservatório de Três Gargantas. Os autores supracitados sugerem também um esquema de vazão mínima defluente para os reservatórios existentes neste corpo hídrico com a finalidade de evitar o fenômeno da intrusão salina.

Outra busca de compreender se há correlação entre fenômenos, através do uso das crosswavelets, fora apresentado em Martic-Bursac et al.(2017).

Estes autores tiveram como objetivo, no artigo em questão, compreender as relações entre as temperaturas do rio Nisava e oscilação mediterrânea regional, além disto foi possível também identificar periodicidades referentes a anomalia desta oscilação regional.

Os resultados encontrados em Martic-Bursac et al.(2017) apontam para uma sincronização entre as variáveis citadas acima a partir de 1980, momento no qual percebe-se uma mudança na tendência das temperaturas e sua correlação com a oscilação mediterrânea regional.

A última aplicação levantada em Sang (2012) diz respeito a simulação e previsão em séries hidrológicas a partir do uso de wavelets. Segundo levantamento deste autor, estudos recentes têm apontado para um bom desempenho para metodologias híbridas que unem o uso de wavelets a outros métodos caixa-preta, como redes neurais.

### **3.2.5 Previsão**

A última aplicação levantada em Sang (2013) diz respeito a simulação e previsão em séries hidrológicas a partir do uso de wavelets. Segundo levantamento deste autor, estudos recentes têm apontado para um bom desempenho para metodologias híbridas que unem o uso de wavelets a outros métodos caixa-preta, como redes neurais.

Como primeiro exemplo, cita-se a pesquisa apresentada em Adamowski e Sun (2010). Estes autores tiveram como objetivo criar um modelo híbrido de previsão que se valia das técnicas de transformadas wavelets acopladas a modelos de redes neurais. Modelo, este, que possuía a finalidade de prever as vazões de 1 a 3 dias em rios intermitentes em bacias hidrográficas de regiões semiáridas.

Os resultados obtidos por Adamowski e Sun (2010) apontam para a melhoria na precisão do modelo híbrido, transformadas wavelets somadas a modelos de redes neurais, quando comparado ao modelo de redes neurais. Sendo este acréscimo de acurácia bastante relevante para as previsões referentes ao dia seguinte, quanto as previsões com horizonte de dois ou três dias foi possível obter também alguma melhora.

Por fim, os autores supracitados, apontam estes resultados como bastante promissores no que tange às outras metodologias que buscam a previsão em pequenas janelas de tempo em bacias semiáridas e rios intermitentes.

Em Badrzadeh et al (2015) são debatidos alguns modelos hidrológicos pautados na inteligência computacional para a previsão de vazões horárias em uma barragem localizada em Nova Gales do Sul, Austrália.

As previsões, independentemente se a técnica utilizada é híbrida entre transformadas wavelets e redes neurais ou se é apenas baseada em redes neurais, acabam por perder confiabilidade quando se tenta aumentar o horizonte de previsão. Neste intuito Badrzadeh et al (2015) pôde concluir acerca da contribuição dos modelos híbridos de transformadas wavelets e redes neurais.

Neste estudo, os resultados para previsões de 1, 6 e 12 horas foram altamente satisfatório e apresentam grande precisão independentemente do método utilizado, como fora comentado no parágrafo anterior. Porém, quando se buscou horizontes de previsão maiores que 12 horas, as diferenças entre os modelos híbridos e aqueles pautados apenas em redes neurais foram bastante significativos.

Adamowski e Sun (2010) e Badrzadeh et al (2015) apontaram para a necessidade de se criar modelos multivariados que sejam capazes de incluir outras características como temperatura, precipitação, velocidade do vento, entre outros para que observe o acréscimo da acurácia dos modelos de previsão para horizontes de tempos maiores.

### ***1.1.1 Comparação entre dois espectros de vazões***

Ainda, quanto as aplicações das transformadas wavelets nos estudos hidrológicos é importante citar as pesquisas realizadas por Shiau e Huang (2014) e Wu et al (2015). Nestas pesquisas os autores propuseram índices apropriados para a comparação entre os espectros de energia de vazão afluente, não regularizada, e vazão defluente, vazão regularizada pelos reservatórios de múltiplos usos.

Em Shiau e Huang (2014) é apresentado o Índice de Alteração Espectral (ISA) definido como a média dos desvios absolutos para uma determinada escala, ou faixa de escala, em uma janela de tempo.

Nesta pesquisa foi possível identificar padrões de operação que indicavam a presença de um ano úmido ou seco, resultados estes que podem influenciar, segundo os autores, na tomada de decisões que permitam a mitigação do impacto da operação dos reservatórios que levem em conta o trade-off entre o atendimento as necessidades humanas e ambientais.

Em Wu et al (2015) fora proposto como indicador o GDPWS (Desvio entre os espectros de energia). Nesta pesquisa, observou-se que a operação do reservatório de Feitsui (Taiwan) basicamente eliminou as oscilações das vazões nas escalas inferiores a uma semana, foram fortemente afetadas, também, as escalas sub-mensais.

Wu et al (2015) sugere, ainda, que esta abordagem pode ser utilizada como uma ferramenta útil para a segregação do impacto de diversos afluentes de um determinado rio principal. Busca-se, através desta abordagem, modificar regras de operação dos reservatórios de múltiplos usos, existentes nestes afluentes, no intuito de mitigar os efeitos desta operação conjunta nas características temporais e espaciais da bacia hidrográfica estudada.

### 3.3 Reservatórios de múltiplos usos

Reservatórios foram amplamente construídos ao redor do mundo devido a necessidade de acumulação e regularização das vazões de forma a garantir o abastecimento humano, o abastecimento industrial, a irrigação, a geração de energia e o controle de cheias (Satarri et al., 2011; Ahmad et al., 2014 e Tsai et al., 2015).

Atualmente, enfrenta-se um grande dilema no que tange a urgência na implementação destes reservatórios, de um lado há motivações para críticas que perpassam por questões ambientais, econômicas, financeiras e de direitos humanos, enquanto que na outra face há a necessidade da garantia da segurança hídrica, alimentar e energética que por vezes se aliam a outros problemas de ordem política e econômica, como guerras civis e pobreza (Shah e Kumar, 2008; Choo et al., 2016).

Ainda, é importante salientar, segundo Shah e Kumar (2008), que estes ganhos podem ser comprometidos quando as agências de água, energia e desenvolvimento não possuem capacidade institucional para promover a negociação entre os atores e transferir parte das externalidades negativas para os beneficiários das barragens.

Segundo Fang et al. (2014), em um reservatório de múltiplos-usos, as regras de operação respondem a três questões básicas que se inter-relacionam:

- a) Quantidade de água armazenada;
- b) Quantidade de água utilizada para atendimento às demandas e
- c) Quantidade de água a ser liberada pelo reservatório.

Estes, uma vez que se baseie um sistema de gestão de recursos hídricos em sua existência, se apresentam fundamentais na disponibilização da água para consumo humano, atendendo necessidades sociais como o abastecimento humano, a geração de energia, a irrigação, além de necessidades culturais.

Necessidades estas que estão interligadas, em IRENA (2015) é apresentado o seguinte quadro resumo trazendo as relações entre a segurança hídrica e energética, deve-se salientar o papel central dos reservatórios de múltiplos usos, onde estes estão presentes, sendo reguladores das vazões, geradores de eletricidades e acumuladores de água para o abastecimento humano e a irrigação (Quadro 1).

Dentro deste contexto, segundo Choo et al. (2016), os reservatórios, principalmente em países em desenvolvimento, são, por vezes, essenciais para a gestão da água para o abastecimento humano, para a produção agrícola e consequente segurança alimentar e para o acesso à energia, tornando-se parte deste equilíbrio complexo entre diversas demandas e anseios sociais.

Quadro 1 - Relação entre os riscos relacionados a água na segurança hídrica e energética

	<b>Riscos</b>	<b>Impactos</b>
Riscos hídricos e a geração de energia	Mudanças nos Padrões de Quantidade e Qualidade de Água	Aumento dos riscos quanto a não disponibilidade hídrica para a geração de energia e, conseqüentemente, aumento do preço de produção e distribuição desta.
	Aumento da Quantidade de energia associada ao processo de abastecimento humano de água potável	Pressão sobre os sistemas de produção de energia e redução da eficiência do processo, relacionada a diferenciação das demandas
Riscos energéticos aos recursos hídricos.	Acesso Limitado ou não seguros a energia necessária para extração de água ou realocação de água de outras finalidades para suprir a necessidade energética	Interrupção no fornecimento de água para os usuários finais somada ao aumento do preço da energia elétrica devido à flutuação dos custos marginais
	Contaminação dos recursos hídricos devido a extração e transformações envolvidas no processo de geração de energia	Inadequação ou aumento do custo de tratamento de água para que se cumpra os múltiplos usos destinados a elas

Fonte: Adaptado de IRENA (2015)

### 3.3.1 Operação de reservatórios de múltiplos usos

Antes de se debater as regras de operação de reservatórios de múltiplos usos, se faz pertinente uma breve explanação acerca de níveis e volumes característicos.

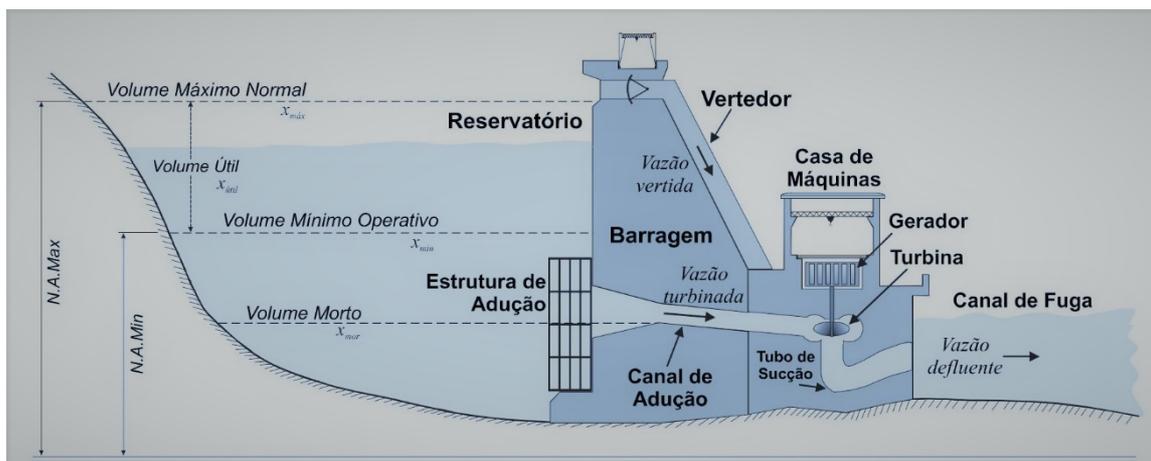


Figura 1 – Níveis e volumes característicos de um reservatório de múltiplos usos. Fonte: Donato (2003)

O primeiro destes é o nível de água mínimo operacional. Segundo Costa (2014), este nível corresponde a cota mínima de operação adequada do reservatório, sendo, então, o limite superior do volume morto e o limite inferior do volume útil. Sendo essencial, ainda, para a prevenção da formação de vórtices na entrada das tomadas que levam ao turbinamento da água e determinantes no bom rendimento da geração elétrica (Donato, 2003) (Figura 1).

O volume morto, segundo Costa (2014), é aquele que corresponde ao nível mínimo de captação dos reservatórios, representando uma parcela que, em operações normais, está indisponível para uso (Figura 1).

O nível máximo operacional ou máximo normal, segundo Costa (2014), corresponde ao volume útil máximo, sendo, na maioria das vezes, definido pela cota da crista do extravasor ou a borda superior das comportas do vertedouro (Figura 1).

O volume útil, por sua vez, é aquele compreendido entre o nível mínimo e máximo operacional (Costa, 2014). O volume útil é aquele disponível para o atendimento das diversas demandas para as quais o reservatório fora destinado (Figura 1).

O volume de espera, ou volume para controle das cheias, corresponde a uma parcela do volume útil do reservatório destinado ao amortecimento das cheias, atendendo, assim, as restrições máximas, que poderiam causar inundações a jusante, e garantir, também, a segurança estrutural da barragem (Costa, 2014) (Figura 1).

Acima do nível máximo normal, se encontra, ainda, o nível máximo maximorum e o nível de segurança. O nível máximo maximorum representa a sobrelevação máxima do nível da água, considerando como nível de referência o máximo normal, sendo particularmente útil para o amortecimento das cheias (Costa, 2014) (Figura 1).

O nível de segurança corresponde ao volume entre o máximo normal e o máximo maximorum, é um volume não aproveitado que tem sua existência atrelada ao sobre armazenamento, persistindo, apenas, durante os períodos de cheia (Costa, 2014) (Figura 1).

Uma vez apresentado, de forma breve, os níveis e volumes característicos de um reservatório de múltiplo uso de água, serão debatidas algumas regras de operação destes reservatórios.

A determinação de regras de operação dos reservatórios é um processo que agrega bastante complexidade, uma vez que os conflitos entre a produção energética e o atendimento aos outros usos é latente. Complexidade agravada, no Brasil, por se ter um sistema de grande escala, não linear e de grande interdependência (Mendes et al. 2015).

Em se tratando do sistema brasileiro de produção energética, destaca-se a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

A ANEEL é a agência reguladora no que tange a questão energética, sendo fiscalizadora e regulamentadora do sistema elétrico, buscando, assim, equilibrar os desejos dos usuários e das companhias (ANEEL, 2018).

Por sua vez, o ONS é uma entidade autônoma que coordena as operações das usinas e redes do Sistema Interligado Nacional (SIN). O ONS tem como objetivo a promoção da produção elétrica visando o menor custo para o sistema, sem que com isto haja a perda de confiabilidade do sistema. Além disto, o ONS busca garantir o

acesso a transmissão a todos agentes do setor elétrico e a expansão do Sistema Interligado Nacional (ONS, 2018).

O SIN, por sua vez, oferece como benefícios a possibilidade de troca de energia entre as regiões interligadas, cerca de 96,6% da energia produzida nacionalmente, podendo mitigar o efeito de secas existente em alguma das diversas bacias hidrográficas que geram energia no Brasil (ANEEL, 2008).

Entre os tópicos de planejamento da operação deste sistema integrado, destaca-se a maximização da produção da energia hidrelétrica, minimizando, assim, o uso das termoelétricas que possuem maior custo financeiro e ambiental (Zambon, 2012).

Porém, deve se ter em questão que em um processo onde as vazões afluentes são aleatórias e dependentes da precipitação, o controle operacional é possível apenas através do volume estocado nestes reservatórios.

Possuir grandes volumes acumulados é benéfico a geração de energia, porém, reduz as possibilidades de operação do reservatório frente aos momentos de cheia, onde se objetiva ter um volume de espera para evitar o transbordamento da barragem (Mendes et al., 2015).

É importante salientar, também, que por outro lado, a operação em níveis baixos de volume estocado, é prejudicial a geração de energia, uma vez que se há determinada a prioridade para o abastecimento humano. Fato este, que em momentos de seca e de pouca disponibilidade hídrica, agrava os conflitos entre as atividades de geração de energia e da produção agrícola.

Este balanço entre o controle de cheias e o atendimento das demandas consutivas e de geração de energia fora abordada em Xin Li et al (2010). Nesta pesquisa os autores buscaram formular através de modelos matemáticos que consideram dados em tempo real para determinar o melhor volume de espera para o reservatório de Três Gargantas.

Os resultados apontam para uma maior segurança quanto ao amortecimento de enchentes e maior geração de energia hidroelétrica. Estes autores, porém, não abordaram o atendimento as demandas, uma vez que o uso principal desta represa é a geração de energia e controle de enchentes.

A presente pesquisa tem enfoque nas relações entre as vazões afluentes e defluentes, buscando, assim, compreender o efeito da regularização das vazões, em consequência das necessidades de atingir níveis superior ao volume morto e atender as demandas, agravadas em períodos secos, nas características temporais e periódicas do regime de vazão a jusante dos reservatórios.

## 4 AS TRANSFORMADAS WAVELETS CONTÍNUAS

### 4.1 Análise da Transformada Wavelet Contínua

Antes de adentrar às propriedades das transformadas wavelets contínuas, é necessário abordar alguns aspectos básicos do processamento de sinal.

O processamento de sinal busca transformar um sinal no domínio temporal em outro no domínio da frequência ou no domínio temporal-frequencial, a fim de extrair informações que não são perceptíveis apenas no domínio do tempo como periodicidade, sazonalidade e persistência.

Matematicamente, esta transformação pode ser sintetizada como uma operação de comparação de similaridade entre o um sinal  $x(t)$  e funções cujo modelo são conhecidas,  $\{\Psi_n(t)\}$ , e é obtida através do produto interno entre eles (Equação 3) (Gao e Ian, 2011):

$$c_n = \langle x, \psi_n \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_n^*(t) dt \quad (3)$$

Onde:

$\Psi^*$  → Função complexa conjugada

Na transformada de Fourier, que se apresenta como a mais amplamente utilizada para o processamento de sinais, esta transformada é representada pelo produto interno entre um sinal  $x(t)$  e uma função modelo composta pela soma ponderada de uma série de senos e cossenos (Gao e Ian, 2011) (Equação 4):

$$X(f) = \langle x, e^{i2\pi ft} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (4)$$

A transformada de Fourier, como visto anteriormente, é limitada quando é processado um sinal não-estacionário, devido a sua incapacidade de representar transientes.

Uma solução encontrada para isto foram as transformadas janeladas de Fourier, neste caso, busca-se determinar janelas fixas nas quais são realizadas as transformadas de Fourier. Porém, como também fora visto anteriormente, trata-se de uma solução com limitações de resolução, dificultando a capturar do sinal para baixas e altas frequências, vide Equação (2).

Usando a mesma notação do produto interno, a transformada janelada de Fourier pode ser escrita como o produto interno entre o sinal  $x(t)$  e uma função modelo com janela de tempo fixo e frequência modulada (Equação 5):

$$STFT(\tau, g_{\tau,f}) = \langle x, g_{\tau,f} \rangle = \int x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

Para contornar as limitações existentes na transformada janelada de Fourier, uma das soluções encontradas foram as transformadas wavelets por serem funções de janelas variáveis e frequências moduladas, aumentando, assim, a capacidade de processamento de sinais não-estacionários (Gao e Ian, 2011).

#### 4.1.1 Propriedades das Transformadas Wavelets Contínuas

A transformada *wavelet* é uma ferramenta de grande utilidade ao se tratar da análise de séries temporais não-estacionárias sob diversas escalas periódicas (Daubechies, 1990). Uma transformada *wavelet* contínua, referente a um sinal  $x(t)$  é definida como (Equação 5).

$$C_{wf}^{\Psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi^*\left(\frac{t - \tau}{s}\right) dt \mid s, \tau \in \mathbb{Z}, s \neq 0 \quad (5)$$

Onde:

- $s$  → Parâmetro de dilatação de wavelets;
- $\tau$  → Parâmetro de translação das wavelets;
- $\frac{1}{\sqrt{|s|}}$  → Fator de normalização da energia;
- $\Psi^*$  → Função complexa conjugada da ondaleta-mãe utilizada.

O fator de normalização da energia é de tal forma para que a energia da seja a mesma para diferentes valores de escala <sup>s</sup> (Komowroski & Pietraszek, 2015). Para uma função ser classificada como *wavelet*, deve possuir os critérios matemáticos de finitude da energia e admissibilidade. A finitude da energia é representada pela Equação (6).

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (6)$$

Desta condição, surge dois resultados. O primeiro versa sobre a existência da função inversa, condição necessária à análise e reconstrução do sinal. O segundo resultado diz respeito a imagem da função que deve possuir valores iguais a zero quando a frequência for nula, desta afirmativa se conclui, também que a *wavelet* é uma função que descreve um fenômeno oscilatório onde os valores positivos e negativos se anulam. A admissibilidade é representada pela Equação (7).

$$C_w = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (7)$$

Sendo (Equação 8):

$$\hat{\Psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)e^{-i\omega t} dt = 0 \quad (8)$$

Onde:

- $\psi(t)$  → Transformada de Fourier;
- $\omega$  → Frequência circular;
- $C_w$  → Coeficiente de admissibilidade (depende das características da ondaleta-mãe utilizada).

A condição descrita pelas equações  $|\hat{\Psi}^2|$  supracitadas pode ser interpretada como um requerimento de que decaia a zero mais rápido que  $1/\omega$ . Para ondaletas complexas a transformada de Fourier deve ser real e deve inexistir para valores

negativos. Por fim, a série original pode ser reconstruída utilizando transformada inversa da função (Equação 9).

$$x(t) = \frac{1}{C_w} \iint_{-\infty}^{\infty} T(s, \tau) \psi_{ab}(t) \frac{dsd\tau}{s^2} \quad (9)$$

Uma vez que a transformada wavelet dada pela equação (9) é a convolução de um sinal com uma função wavelet, pode-se expressar esta integral como um produto no espaço de Fourier (Equação 10).

$$T(s, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\omega) \psi_{ab}^*(\omega) d(\omega) \quad (10)$$

Onde o espectro de Fourier da wavelet analisada na escala<sup>s</sup> e na localização<sup>τ</sup> é dada por (Equação 11):

$$\tilde{\psi}_{x,z}^*(\omega) = \sqrt{s} \psi^*(s\omega) e^{-i\omega\tau} \quad (11)$$

#### 4.1.2 Wavelet Morlet

A *wavelet Morlet* é uma das ondaletas mães complexas de maior popularidade e de grande utilização. A *wavelet Morlet* pode ser entendida, também, como uma função periódica cuja amplitude é modulada por uma gaussiana (Torrence & Compo, 1998). Define-se a *wavelet* Morlet como (Equação 12):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \left( e^{i\omega_0 t} - e^{-\frac{\omega_0^2}{2}} \right) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (12)$$

Onde:

- $\omega_0$  → Frequência não dimensional (estimada afim de satisfazer a equação de admissibilidade).

Quando  $\omega_0 = 6$ , o erro é reduzido a níveis menores que os erros de arredondamento (Addison, 2005; Komowroski & Pietraszek, 2015 e Torrence & Compo, 1998). Uma vez que se assume  $\omega_0 = 6$ , o segundo termo dos parênteses da equação (8), o qual representa a correção, pode ser negligenciado, assim representa-se a *wavelet Morlet* pela Equação (13):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} (e^{i\omega_0 t}) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (13)$$

Os resultados da reconstrução utilizando a *Wavelet Morlet* são avaliados qualitativamente, objetivando-se identificar que esta reconstrução seja capaz de acompanhar as tendências observadas na série temporal original. Seguindo a lógica de pré-seleção dos períodos anuais, semestrais, trimestrais, mensais e semanais, busca-se representar a distribuição das vazões ao longo do tempo e nestes períodos, levando em conta, também, a suavidade desta representação. Evita-se, portanto, a seleção de períodos que representem variações apenas momentâneas em relação ao montante total.

#### 4.1.3 Energia

Outro resultado de grande interesse no estudo de transformadas *wavelets* é a confecção do escalograma que se refere à distribuição de energia dos sinais para as escalas  $s$  e posição  $\tau$ . Esta energia representa uma função bidimensional e é definida pela Equação (14):

$$E(s, \tau) = |Cw(s, \tau)|^2 \quad (14)$$

Para séries temporais com ruídos brancos, espera-se que os valores da energia da transformada *wavelet* sejam iguais à variância dos dados para todos os valores de  $s$  e  $\tau$ .

Outra propriedade de grande importância refere-se à relação entre os picos de  $E(s, \tau)$ , que representa a distribuição da energia em determinada escala, e a dominância energética desta escala para o sinal estudado. Outra possibilidade é a

conversão desta escala para um espectro de *wavelets* dependente da frequência. Esta frequência associada a uma determinada escala  $s$  é dada pela Equação 15:

$$f = \frac{f_c}{s} \quad (15)$$

Onde:

- $f_c$  → Frequência característica da ondaleta-mãe utilizada.

A análise de energia favorece, também, o estudo das amplitudes da transformada *wavelet* utilizada. Esta análise contribui, como as outras apresentadas, para a averiguação de como determinado fenômeno se desenvolve no tempo, sendo de particular interesse em bacias com represamento por evidenciar maiores ou menores impactos da regularização da vazão ao longo do tempo e da escala  $s$  que pode ser convertida para frequência ou período através da Equação (16). Define-se esta amplitude como:

$$Amp(\tau, s) = |Cw(s, \tau)| \quad (16)$$

#### **4.1.4 Cone de Influência**

Assumindo uma série de comprimento finito, erros, devido à transformada de Fourier e a premissa desta que os dados são cíclicos, são esperados no início e no fim do espectro de energia das *wavelets*.

O Cone de Influência é definido por Komowroski & Pietraszek (2015) como a região do espectro de energias de *wavelets* onde os efeitos de borda se tornam relevantes e é definido como o intervalo de tempo para o decaimento exponencial da autocorrelação destas energias para cada escala  $s$ .

#### **4.1.5 Nível de Significância e Intervalo de Confiança**

Torrence & Compo (1998) definem a hipótese nula para o espectro de energia de uma *wavelet* a partir da comparação com o espectro médio de energia definido pela Equação 17:

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} \quad (17)$$

Onde:

- $k$  → Índice de frequências;
- $\alpha$  → Autocorrelação de um determinado termo com o seguinte (*lag-1 autocorrelation*).

Sendo assim, segundo os mesmos autores, se os picos do espectro de energias de *wavelets* estão significativamente acima do espectro de fundo, observa-se uma característica verdadeira, ou estatisticamente significativa, sob um determinado nível de confiança.

Torrence & Compo (1998), a partir da demonstração de que a distribuição local do espectro de energia de *wavelets* segue a média do espectro de Fourier, concluiu que este espectro de *wavelets* pode ser analisado a partir de uma distribuição  $\chi_2^2$ . Sendo assim, o espectro de energia wavelets local é definido pela Equação (18):

$$\frac{|Cw(s, \tau)|^2}{\sigma^2} \Rightarrow \frac{1}{2} P_k \chi_2^2 \quad (18)$$

Os mesmos autores definem, ainda, o intervalo de confiança para o verdadeiro valor de energia de *wavelets*,  $W(s, \tau)$ , como (Equação 19):

$$\frac{2}{\chi_2^2\left(\frac{p}{2}\right)} |Cw(s, \tau)|^2 \leq W(s, \tau) \leq \frac{2}{\chi_2^2\left(1 - \frac{p}{2}\right)} |Cw(s, \tau)| \quad (19)$$

Onde:

- $p$  → Significância desejada (assumida 0.01 para o trabalho em questão).

A partir dos períodos pré-selecionados, citados acima, foram examinadas as energias e amplitudes das *wavelets* para a identificação e análise dos períodos mais energéticos, bem como a inferência das variações de comportamento ao longo das séries temporais

Ressalta-se, ainda, que a significância estatística a nível confiança de 99% e o cone de influência, análises embasadas nos capítulos a seguir, são levados em conta na reconstrução e apresentação destes dados.

#### 4.2 Cross-Wavelets

Dado duas séries temporais  $x(t)$  e  $y(t)$ , define-se como o espectro da transformada *crosswavelet* (Equação 20):

$$Cw_{x,y}(s,\tau) = Cw_x(s,\tau)Cw_y^*(s,\tau) \quad (21)$$

Onde:

- $Cw_x(s,\tau)$  → Coeficiente da série contínua  $x(t)$ ;
- $Cw_y^*(s,\tau)$  → Conjugado complexo do coeficiente wavelet da série contínua  $y(t)$ .

Uma vez que se trata de um espectro complexo, define-se  $|Cw_{x,y}(s, \tau)|$  como energia da *crosswavelet*.

Outra medida importante versa sobre a coerência entre wavelets, a qual é bastante semelhante ao coeficiente de correlação. Segundo Torrence & Compo (1998), o coeficiente de correlação é definido como o quadrado do espectro da *crosswavelet* normalizado pelo espectro das energias anuais, ou seja (Equação 22):

$$WC(s,\tau) = \frac{|Cw_{x,y}(s,\tau)|}{\sqrt{|Cw_x(s,\tau)|^2 |Cw_y(s,\tau)|^2}} \quad (22)$$

Analisando-se a equação (17), em Yu & Lin (2015) é afirmado que o intervalo dos resultados, 0 a 1, indica uma relação não necessariamente linear entre  $x(t), y(t)$  e a escala<sup>5</sup>.

Outra característica importante de ser pontuada diz respeito a distribuição teórica de probabilidade da energia da *crosswavelet* dos espectros de energias de *background* de duas séries temporais, definida como (Equação 23):

$$P\left(\frac{|Cw_{x,y}(s,\tau)|}{\sigma_x\sigma_y} < p\right) = \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^x P_k^y} \quad (23)$$

Onde:

- $Z_v(p)$  → Nível de confiança associado à probabilidade  $p$  com densidade de probabilidade qui-quadrado;
- $v$  → Grau de liberdade;
- $P_k^x$  e  $P_k^y$  → Espectros de Fourier das séries temporais  $x(t)$  e  $y(t)$ , respectivamente, na escala  $k$ ;
- $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  → Variância das respectivas séries.

Sendo, segundo Torrence & Compo (1998) (Equação 19):

$$p = \int_0^{Z_v(p)} f_v(z) dz \quad (24)$$

## 5 ESTUDO DE CASO

A Bacia Rio São Francisco abrange uma área de aproximadamente 640000 km<sup>2</sup>, correspondente a 8% do território nacional. Nesta bacia hidrográfica estão localizados seis Estados Federativos Brasileiros (Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás) e o Distrito Federal (ANA, 2017).

Ao longo do curso principal do Rio São Francisco há os seguintes reservatórios: Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó (Figura 2).

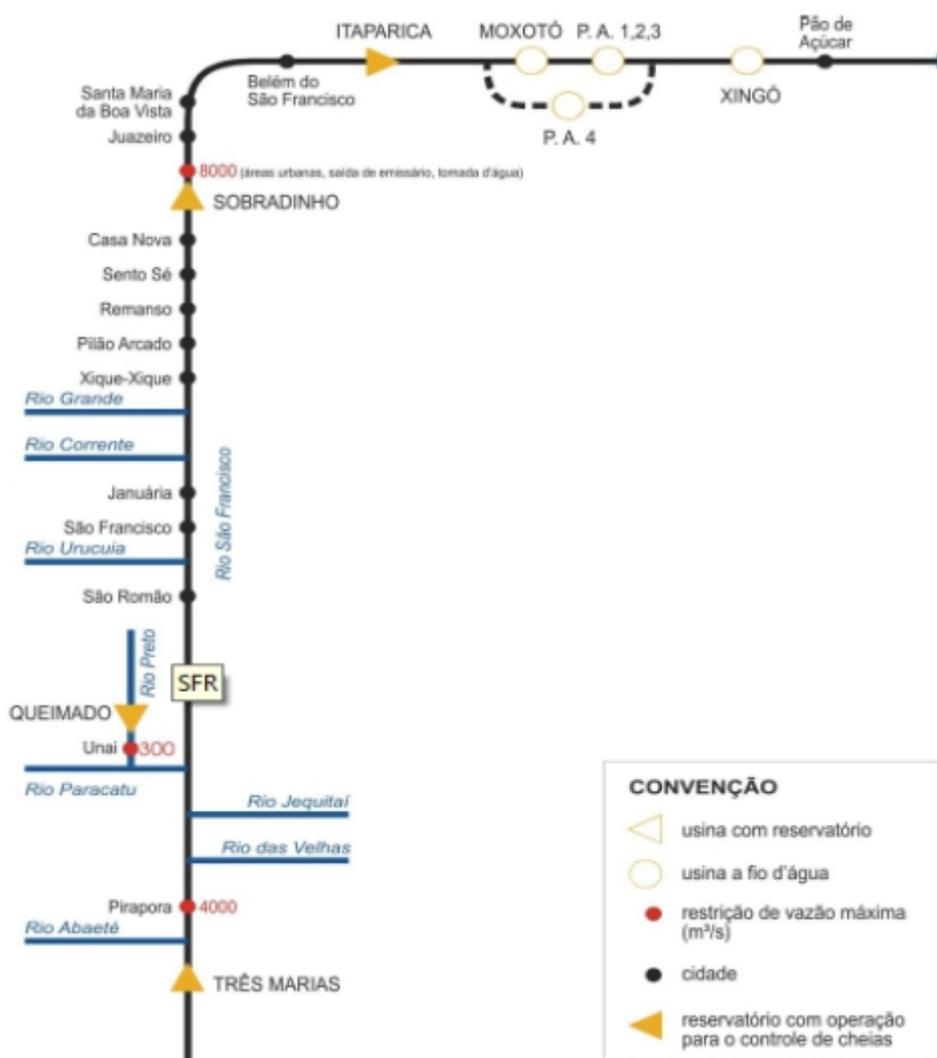


Figura 2 – Os reservatórios da Bacia do Rio São Francisco. Fonte: ONS (2017).

O reservatório de Três Marias, localizada no estado de Minas Gerais, tem como função a regularização de vazão para beneficiar as atividades econômicas, favorecendo a navegação, a agricultura e a geração de energia. Coordenada pela Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG), está em uma região onde o clima se caracteriza como tropical úmido, com índices pluviométricos que variam entre 1000 e 2000 mm (Vieira, 2015 e CHESF, 2015).

Sobradinho, além de regular a vazão, tem como objetivo realizar o controle das cheias, gerar energia e atender as demandas exigidas. Entre suas características está a presença de seis turbinas com o total de 1050 MW de potência, operada pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e localizada em uma região de clima semiárido com regime pluviométrico que variam entre 300 e 800 mm (Vieira, 2015 e CHESF, 2018). Ainda, devido a sua extensão de, aproximadamente, 4200 km<sup>2</sup>, o reservatório de Sobradinho é considerado um dos maiores lagos artificiais do mundo.

Sugere-se que a operação destes dois reservatórios deva ser analisada em conjunto, uma vez que a operação de Três Marias é fator determinante na vazão afluente a Sobradinho (ASFORA & CIRILO, 2005).

Por fim, os demais reservatórios apresentam como finalidade principal a geração de energia. Sendo, então, diretamente influenciados pela operação de Três Marias e Sobradinho, uma vez que Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó possuem baixa capacidade de reservar água, sendo considerados como reservatórios de aproveitamento a fio d'água.

Observa-se que há a sobre-exploração dos recursos hídricos disponíveis, fatos como a escassez hídrica e o momento de seca na região tem acirrados conflitos, principalmente, entre os usos consuntivos e a geração de energia (CBHSF, 2016).

Segundo Ramina (2014), a escassez hídrica vivida na bacia do Rio São Francisco tem ocasionado, sistematicamente, o não atendimento a vazão mínima a jusante que por sua vez tem causado impacto nos outros usuários da bacia. O autor supracitado, ainda, apresenta como conflito proveniente da operação dos

reservatórios a falta de sincronia entre a operação do reservatório e as condições naturais do rio, fato, este, que tem causado impactos ambientais importantíssimos.

No ano de 2016, a ANA criou um grupo de trabalho para determinar normas de operação dos reservatórios do Rio São Francisco, inclusive debatendo assuntos que dizem respeito à redução da vazão defluente.

**6**

## **METODOLOGIA**

### **6.1 Coleta de dados**

Define-se primariamente, como volume de controle, os dados coletados referentes aos reservatórios de Três Marias e Sobradinho, localizados na Bacia do São Francisco.

Para tanto, uma questão fundamental é a definição da escala temporal com a qual os dados são selecionados. Na presente pesquisa, optou-se pela escala diária, uma vez que está se apresenta como a maior discretização dos dados disponíveis, gerando, assim, maior poder de análise e resolução através das transformadas wavelets contínuas.

Os dados selecionados correspondem ao intervalo de tempo diário entre 01/10/2005 e 01/10/2016, objetivando-se uma representação que se alinhe à definição de anos hidrológicos, definidos como o intervalo anual compreendido entre duas estações de chuva seguidas.

As variáveis selecionadas foram: vazão afluente naturalizada ( $m^3/s$ ), vazão defluente ( $m^3/s$ ) e volume (%). Pretende-se, a partir destas variáveis, a caracterização da operação dos reservatórios nas múltiplas escalas temporais e periódicas possíveis, valendo-se, para isto, dos dados gerados pelos próprios operadores e disponibilizados pela ONS.

Os dados foram coletados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, fomentado pela Agência Nacional da Água (ANA, 2017). Estes dados fazem parte do centro de gestão denominado de Sala de Situação.

A Sala de Situação tem como foco o monitoramento de bacias hidrográficas, sistemas de reservatórios, sistemas de alerta hidrológicos e decretações de Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública, tendo parte das funções da sua Diretoria Colegiada associada à tomada de decisões referentes a operação de curto prazo dos reservatórios (ANA, 2017).

Para isto, vale-se de um banco de dados de acompanhamento das condições hidrológicas dos principais sistemas hídricos nacionais, como por exemplo, a Rede Hidrometeorológica Nacional.

## **6.2 Tratamento e Análise dos Dados**

Uma vez determinado o volume de dados utilizado na pesquisa, bem como as variáveis em estudo e o recorte temporal, faz-se necessária a realização do tratamento dos dados e da sua análise estatística.

A seguir, com o intuito de analisar as características temporais da operação dos reservatórios, bem como a sua variação em múltiplos períodos, é proposta uma metodologia de tratamento e análise dos dados pautada na em três etapas, a saber: a) Análise descritiva de variáveis que representem a operação dos reservatórios; b) Análise da transformada wavelet contínua; c) Utilização de ferramentas que possibilitem a mensuração das variações das características da operação ao longo do tempo e dos múltiplos períodos que definem a transformada wavelet correspondente.

## **6.3 Análise Descritiva dos Dados**

Nesta etapa foram realizadas análises de posições centrais, quartis e densidades de probabilidade a fim de observar a existência de algum indício de diferenciação entre os anos apresentados. Para tal, leva-se em conta, também, a afirmativa da ANA (2017), trazendo-se que, a partir de 2012, há um período de seca, o qual é percebido pela redução das vazões afluentes aos reservatórios.

Ainda sob o mesmo objetivo, foram realizadas análises gráficas para averiguar a variação de características temporais a exemplo do próprio gráfico que relacionava as variáveis no tempo, bem como a sua distribuição, avaliada através do gráfico de densidade de probabilidade.

Esta avaliação objetivou, também, uma primeira aproximação tornando visíveis padrões temporais, como variações intra-anuais, principalmente as relações entre os momentos úmidos e secos, e interanuais, a fim de observar tendências ou surgimento de novos padrões nas variáveis estudadas.

## **6.4 Transformadas Contínuas Wavelets**

A aplicação deste método e das análises apresentadas no capítulo 4 foi realizada pelo pacote WaveletComp disponível no ambiente R e se dá através das transformadas rápidas de Fourier.

Os coeficientes ( $C_w$ ) obtidos foram operados em matrizes para obtenção das amplitudes e das energias que guiaram parte dos resultados. A partir da operação destes coeficientes foi possível aplicar e comparar as ferramentas de mensuração das diferenças entre espectros de energias *wavelets*.

## **6.5 Ferramentas de mensuração das diferenças entre espectros de energia de wavelets**

São apresentadas, ao longo deste capítulo, metodologias para mensuração das diferenças entre os espectros de energia de *wavelets* ao longo do tempo e dos períodos, anteriormente definidos. Objetiva-se, portanto, mensurar a alteração dos regimes de vazões promovidos pela operação dos reservatórios e favorecer o uso de ferramentas analíticas capazes de auxiliar processos de tomada de decisão, como, por exemplo, a definição ou ajuste de regras de operação dos reservatórios que por sua vez podem afetar a diversidade dos ecossistemas ribeirinhos (Shiau & Huang, 2014; Zolezzi et al. 2009, Wu et al. 2015).

Para todas as técnicas empregadas, foram selecionadas três faixas de períodos: 1) Menor que 1 mês; 2) Entre 1 mês e 6 meses e 3) de 6 meses a 1 ano, estes períodos foram replicadas nos demais estudos para os reservatórios em questão. Desta forma, objetiva-se elucidar qual a eficácia de determinada medida, diante estas faixas, diferenciar um período marcado pela seca e o momento anterior a este.

### **6.5.1 Índice de Alteração Espectral (ISA)**

Proposto em Shiau & Huang (2014), o índice de alteração espectral representa a média dos desvios absolutos ao longo dos períodos para determinado intervalo de tempo. Valores nulos ou próximos a zero representam pouca ou nenhuma variação do regime natural por parte da operação dos reservatórios, enquanto valores

maiores significam grandes alterações do regime de vazão. Esta medida, segundo os autores supracitados, é dependente das magnitudes da sazonalidade, das políticas de operação e da capacidade de estoque destes e é definida pela Equação 25.

$$ISA = \frac{1}{(\tau_1 - \tau_2 + 1)(J + 1)} \sum_{j=0}^J \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \left| |C_{w_A}(\tau, s_j)|^2 - |C_{w_D}(\tau, s_j)|^2 \right| \quad (25)$$

Onde:

- $|C_{w_A}(\tau, s_j)|^2$  e  $|C_{w_D}(\tau, s_j)|^2 \rightarrow$  Espectros de energia das vazões afluentes e defluentes ao reservatório, respectivamente.

### 6.5.2 Média Global do Espectro de Energia (GWPS)

A média global do espectro de energia (GWPS) é definida, segundo Wu et al. (2015), pela Equação 26:

$$GWPS(s) = \frac{1}{\tau} \sum_{\tau=0}^{N-1} |C_{w_\tau}(s)|^2 \quad (26)$$

A Equação (27) pode ser utilizada ao longo de intervalos de tempos e a partir desta pode ser analisada tendências de variações anuais ou sazonais. Afim de comparar as séries de vazões afluentes e defluentes, aplica-se a razão entre os GWPS(s) de cada uma destas séries (Zolezzi et al., 2009):

$$p(s) = \frac{GWPS_A(s)}{GWPS_D(s)} \quad (27)$$

Onde:

- $GWPS_A(s)$  e  $GWPS_D(s) \rightarrow$  Média global do espectro de energia das vazões afluentes e defluentes, respectivamente.

Para valores de  $p(s) > 1$  têm-se que, na escala  $s$ , a operação do reservatório intensifica as oscilações no regime de vazão, para  $p(s) < 1$  observa-se que a

operação atenua estas oscilações. Por fim, para valores de  $p^{(s)}$  próximos a 1, especula-se que a operação pouco modifica, dada uma escala  $s$ , as oscilações presentes no regime natural de vazão.

Porém, este método, segundo Wu et al. (2015), limita-se a boa identificação qualitativa da intensificação ou atenuação das oscilações no regime de vazão a partir das médias de longo prazo, não sendo efetivo para quantificar os graus de modificação do regime ou explicitar diferenças em medidas individuais da comparação entre duas séries.

Para isto os autores propõem, ainda, o uso do desvio entre os espectros de energia de *wavelets* (*DWPS*).

### 6.5.3 Desvio entre os espectros de energia (*DWPS*)

Para mensurar as diferenças entre as séries hidrológicas de vazão afluente e defluente, Wu et al. (2015) formula o desvio entre os espectros de energia (*DWPS*) pela Equação (28) :

$$DWPS(\tau, s) = \log \left( \frac{|C_{W_A}(\tau, s_j)|^2}{|C_{W_D}(\tau, s_j)|^2} \right) \quad (28)$$

Onde:

- $|C_{W_A}(\tau, s_j)|^2$  e  $|C_{W_D}(\tau, s_j)|^2 \rightarrow$  Espectros de energia das vazões afluentes e defluentes ao reservatório, respectivamente.

No *DWPS*, os valores próximos a 1 representam pouca alteração da oscilação no regime das vazões, enquanto que valores superiores a este valor caracterizam o aumento destas oscilações e valores inferiores são indícios da regularização da vazão.

Associada a esta medida, Wu et al. (2015) propõem a média global dos desvios entre os espectros de energia (*GDPWS*). O *GDPWS* é apresentado como uma possível métrica capaz de explicitar o grau de desvio de espectro entre as séries de

vazão afluyente e defluente sem distinguir, com isto, entre a atenuação ou amplificação das oscilações da vazão.

Esta medida, ainda, por se basear no desvio médio quadrado, se apresenta com alto valor numérico positivo quando a razão entre os espectros de energia se distinguem muito, sendo maior que a unidade. Por outro lado, quando os valores desta razão são próximos a unidade, observa-se que o *GDPWS* se aproxima de 0.

O *GDPWS* fora formulado por Wu et al. (2015) pela Equação (29):

$$GDPWS(s) = RMS_{\tau}^{-1}(DWPS(\tau,s)) \quad (29)$$

#### **6.5.4 Teste de Kolmogorov-Smirnov**

O teste de Kolmogorov-Smirnov tem como objetivo testar se há diferença entre uma distribuição empírica e uma distribuição teórica, ou entre duas distribuições empíricas (Massey Jr., 1951).

Para isto, define-se as funções  $F_0(x)$  e  $S_n(x)$  que representam as funções de densidade de probabilidade que se deseja testar a igualdade, hipótese nula. Para a realização deste teste, se estabelece, primeiramente, “d”, Equação (30).

$$d = \max|F_0(x) - S_n(x)| \quad (30)$$

Uma vez determinado “d”, Massey Jr. (1951), propôs um valor máximo para esta variável em função do nível de significância.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Análise Descritiva da Operação do Reservatório de Três Marias.

#### 7.1.1 Análise Descritiva das Vazões Afluentes

A primeira análise versa sobre a análise temporal das vazões afluentes a Três Marias. A Figura 3 representa as vazões diárias afluentes a Três Marias que sugere a existência de tendência e sazonalidade na série. Observa-se tendências de redução da vazão afluente mais expressivas a partir de 2012, intervalo que coincide com aquele citado pela Agência Nacional de Águas (2017) como crítico na região.

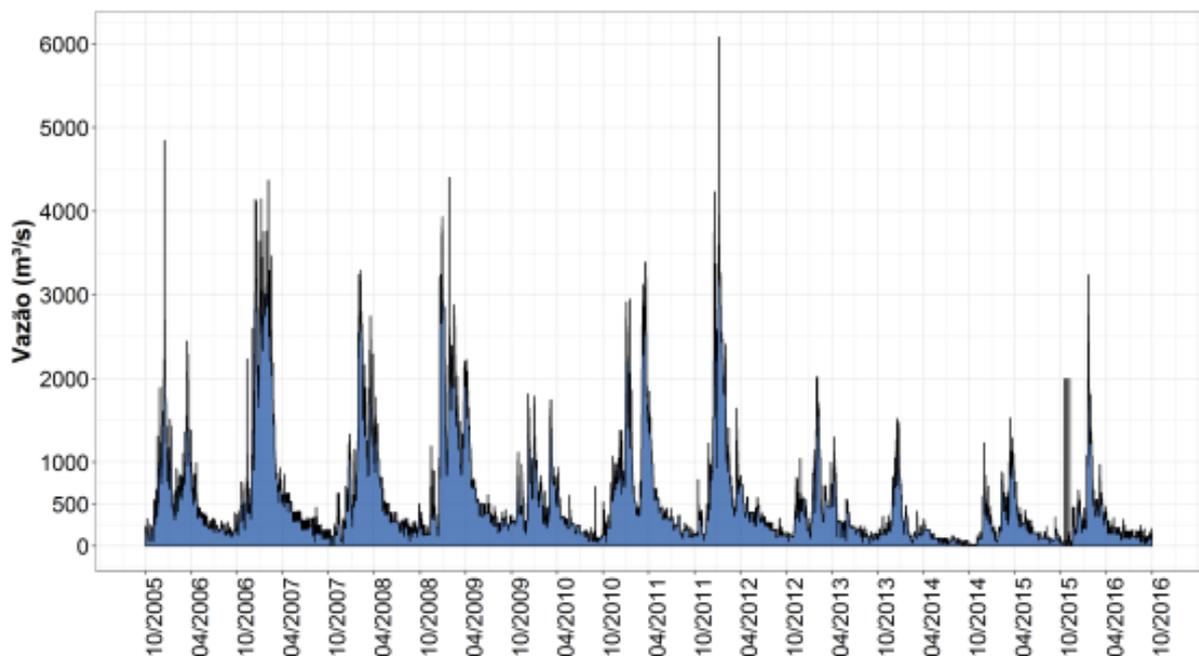


Figura 3 - Vazões afluentes ao reservatório de Três Marias de 2005 a 2016

Na Figura 4 está representado o gráfico de *boxplot* das vazões afluentes a Três Marias; é importante ressaltar que no eixo x os anos são correspondentes aos anos hidrológicos, período de 12 meses compreendido entre duas estações de chuva consecutivas, diferentemente da Figura 3.

O *boxplot* é um gráfico que tem como utilidade analisar ou comparar distribuição empírica dos dados, uma vez que neste são representados o primeiro e terceiro quartil e a mediana.

Assim como na Figura 3 é possível na Figura 4, *boxplot*, primeiramente, observar que ocorre uma redução sensível na vazão afluente a partir do ano hidrológico de 2012, chegando a menor mediana no ano hidrológico de 2013. Acrescenta-se que nestes anos, nos quais os valores da medianas foram menores, anos hidrológicos de 2012 a 2015, a dispersão dos dados entre o 1º e 3º quartis também foi menor, visto pelo achatamento do gráfico.

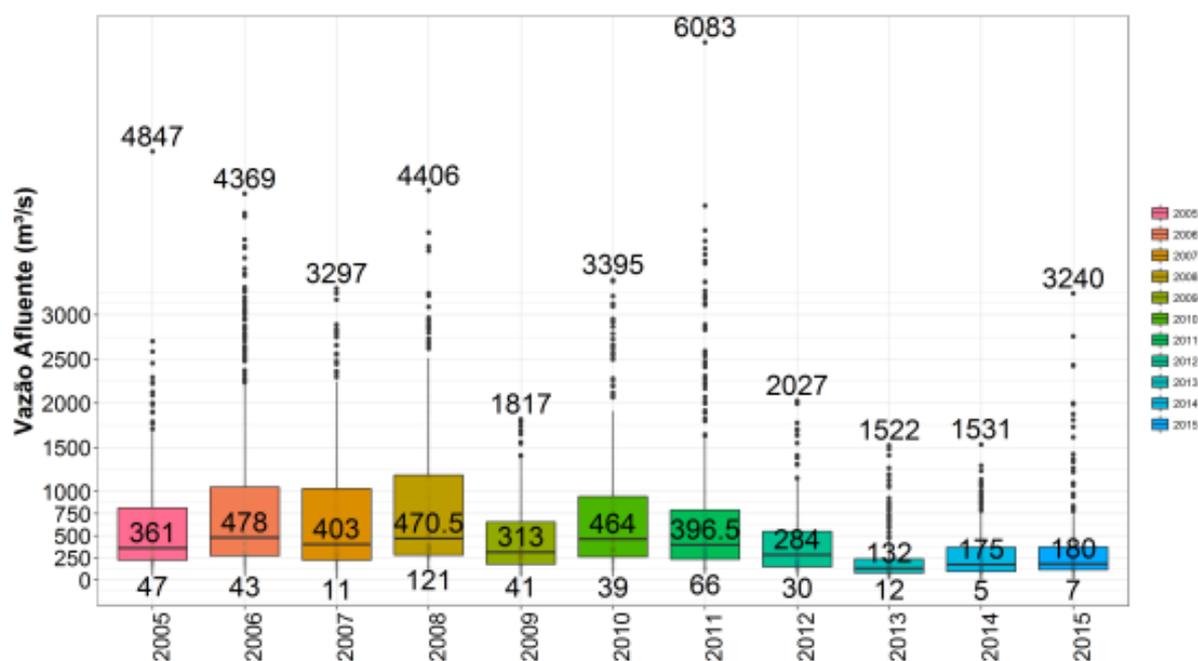


Figura 4 - Boxplot das vazões afluentes ao reservatório Três Marias de 2005 a 2015

Quanto à distribuição dos dados, a análise gráfica sugere uma distribuição de probabilidade do tipo Gama, onde os valores de vazão afluente estão concentrados na faixa de valores inferiores no gráfico de densidade de probabilidade.

A distribuição, apresentada na Figura 5, pode ser entendida como uma versão suavizada de um histograma, realizado através da estimativa de densidade Kernel, servindo assim, para a visualização de uma distribuição de densidade de probabilidade e sua modificação ao longo dos anos hidrológicos.

Na Figura 5 pode ser visto, além da distribuição comentada, que entre os anos hidrológicos de 2012 e 2015, representados por tons mais próximos do azul, os dados de vazão afluente estiveram concentrados em valores inferiores a 300 m<sup>3</sup>/s.

Esta diferença, citada anteriormente, entre os períodos correspondentes aos anos hidrológicos de 2005 a 2012 e de 2012 a 2015 pode ser observada também através da sobreposição das suas densidades de probabilidades (Figura 5). Neste gráfico fica claro a redução das vazões afluentes a partir do ano hidrológico de 2012, fato que pode ser visto graficamente pela compressão da curva no referido período.

Ainda quanto a concentração dos dados, a Tabela 1 traz valores que representam alguns percentis da vazão afluente (m<sup>3</sup>/s) dos dados. Primeiramente, observa-se que a partir de 2013, o valor de 300 m<sup>3</sup>/s representa um valor superior a mediana das vazões afluentes, como fora sugerido pela Figura 6. É pertinente, também, observar a redução da magnitude das vazões mínimas (vazões menores que 1% das observações) e valores de máximo (valores superiores a 99% do histórico de vazões) do ano hidrológico em questão em pelo menos metade.

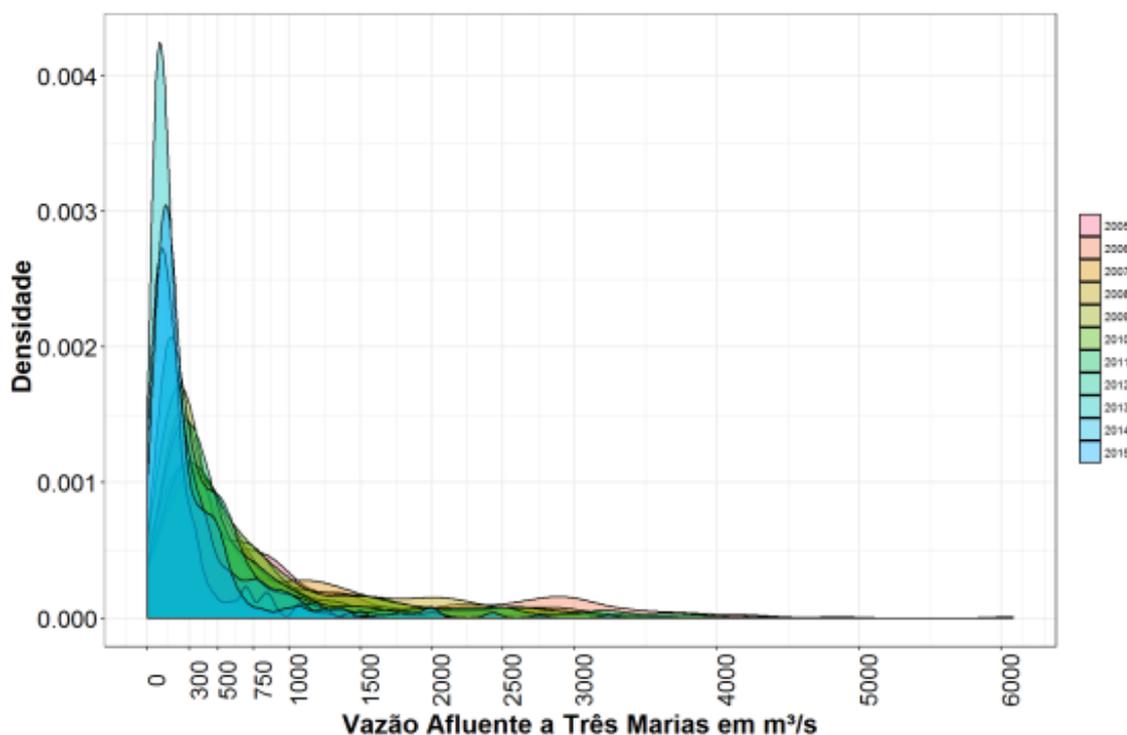


Figura 5 - Distribuição da densidade de probabilidade das vazões afluentes ao reservatório de Três Marias de 2005 a 2016

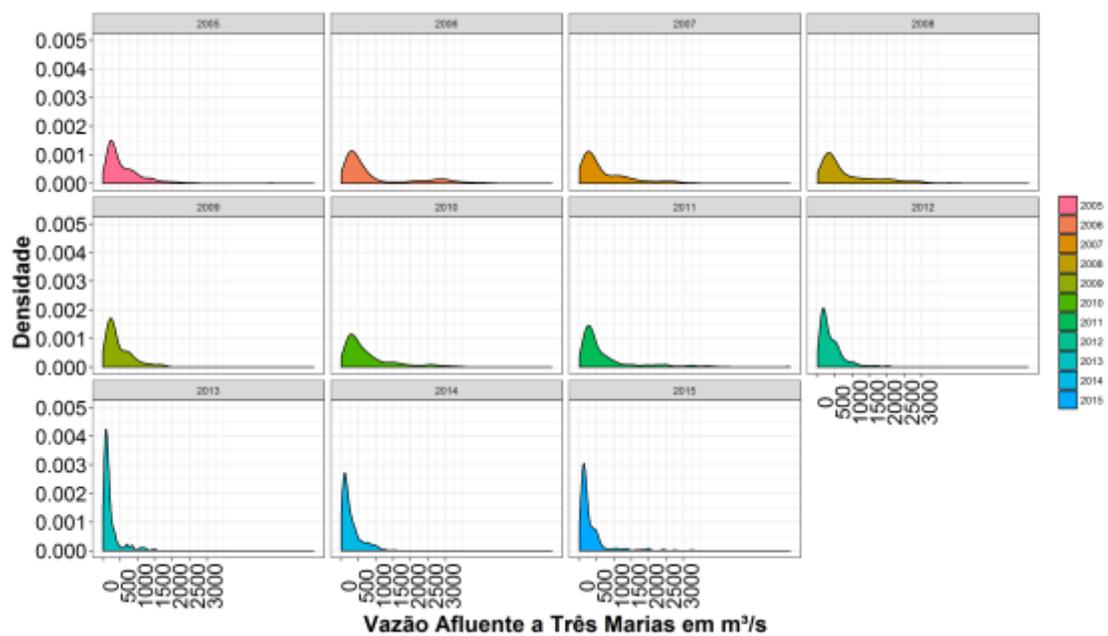


Figura 6 - Distribuição da densidade de probabilidade das vazões afluentes ao reservatório de Três Marias divididas por ano hidrológico de 2005 a 2015

Tabela 1 - Percentis das vazões afluentes a Três Marias e seus respectivos anos hidrológicos

%	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	99%
Q(2005)	65.95	140.25	170	223.5	395.5	812.5	1304	2347.3
Q(2006)	90.51	145	178.7	267.5	482.5	1053.75	2858.1	3979.89
Q(2007)	41.27	99.95	136.9	222.25	403	1033.75	1759.7	2872.16
Q(2008)	125	147.1	209.6	281	470.5	1187.5	2132.9	3527
Q(2009)	54.56	71.2	101	177	313	654	957	1710.36
Q(2010)	97	128	166.6	261	464	943	1756.2	3106.08
Q(2011)	103	126	136	234.5	396.5	791.25	2007	3779
Q(2012)	56.56	97	109.4	148	284	548	837.4	1732.84
Q(2013)	12.64	26	37.4	76	132	235	480.6	1265.72
Q(2014)	8	15	50.7	94.75	175	370.5	703.2	1112.95
Q(2015)	10.65	42.25	54	113.25	180	372.5	608.5	2147.7

Fonte: ONS (2017)

Quanto às sazonalidades e as características anuais das vazões afluentes a Três Marias, destaca-se como estação seca os meses de maio a outubro e como estação chuvosa os meses de novembro a abril. Verifica-se uma maior assimetria à esquerda da curva de densidade de probabilidade da vazão afluente para o período seco, verifica-se, também, que na estação mais seca a variabilidade das vazões é menor, inclusive, para estes, é observado uma redução sensível na vazão afluente (Figura 7 e Tabela 2).

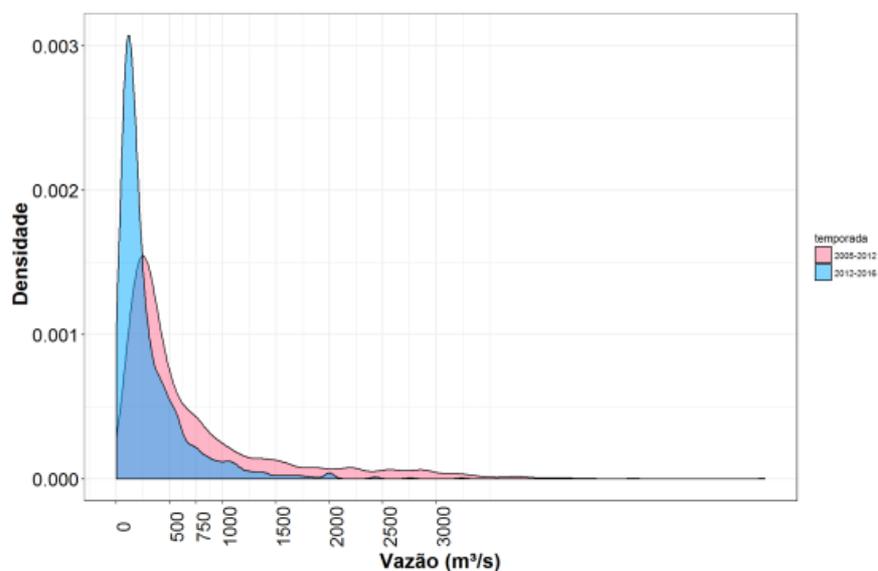


Figura 7 - Percentis de vazão afluente ao reservatório de Três Marias em momento anterior e posterior a 2012

Tabela 2 - Mediana da vazão afluente ao reservatório de Três Marias agrupada por mês

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
2005	193	534	1389	668	712,5	1195	637	351	250	207	175	180,5
2006	381	498,5	2279,5	2941	2476	776	536	406	304,5	229	244	178
2007	107	252	620,5	684	2170	1416,5	1034	510	396,5	278	221,5	200,5
2008	158	377	882,5	1956	2008	1193,5	1231	559	393	357	267	270,5
2009	301	377,5	1026	739	355	836	355,5	303	246	154	101	94
2010	221	753	943	1658	468,5	2280	993	459	335	260	193	135
2011	234	244	1499	2554	968	618	577	399	356,5	268	190	135,5
2012	126	484	412	548	886	549	576	284	235	184	120	104,5
2013	154	240,5	864	340	117	137	193,5	91	88	66	70	26
2014	13	124	413	171	498,5	932	380	272	155	97	94	78
2015	50	101	352	1077	496	433	218,5	157	167	117	116	108
Desvio Padrão	106,7	195,4	576,1	929,8	815,0	578,6	341,3	142,6	101,5	88,1	66,2	67,1

Fonte: ONS (2017)

O conjunto das análises descritivas, mostradas acima, apontam para o entendimento que, a partir do ano hidrológico de 2012, há uma visível redução das vazões afluentes, agravadas no ano hidrológico de 2013. Esta redução de vazão influenciou, também, outros padrões na distribuição de probabilidade das vazões, achatando a

distribuição de probabilidade para valores inferiores. Ou seja, fora observado menores valores de vazões afluentes nos momentos secos e úmidos, bem como a redução do desvio padrão destas vazões.

Porém, esta análise não permite que sejam observados padrões periódicos e sazonais com clareza. Por isto, e por se tratar de uma série não homogênea, fora realizado a transformação do sinal que estava no domínio do tempo para um sinal no domínio temporal e frequencial.

### **7.1.2 Análise das Vazões Afluentes utilizando Wavelets**

Em primeira instância é apresentado o resultado da reconstrução dos dados, Figura 8, a partir do uso de *wavelets*, seguindo a metodologia anteriormente apresentada. O modelo se apresenta se ajustar às tendências observadas na série histórica em questão.

Outra oportunidade criada pelo uso de *wavelets* para reconstrução das vazões observadas no sistema diz respeito a investigação do efeito do momento hidrológico crítico nas sazonalidades naturais vinculadas a um período.

A Figura 9 diz respeito a relação entre o período e o intervalo de tempo a partir da análise do espectro de energia das *wavelets*, proporcional ao quadrado da amplitude. Desta forma, a redução das amplitudes, observadas pelo decréscimo da energia, sugere menor variância das vazões afluentes a Três Marias.

Esta redução é mais pronunciada a partir de 2012, reduzindo as energias, principalmente, dos períodos inferiores a 0,5, ou seja, períodos semestrais. Este decréscimo é perceptível, também, para o período com maior amplitude que representa as variações intra-anuais das vazões.

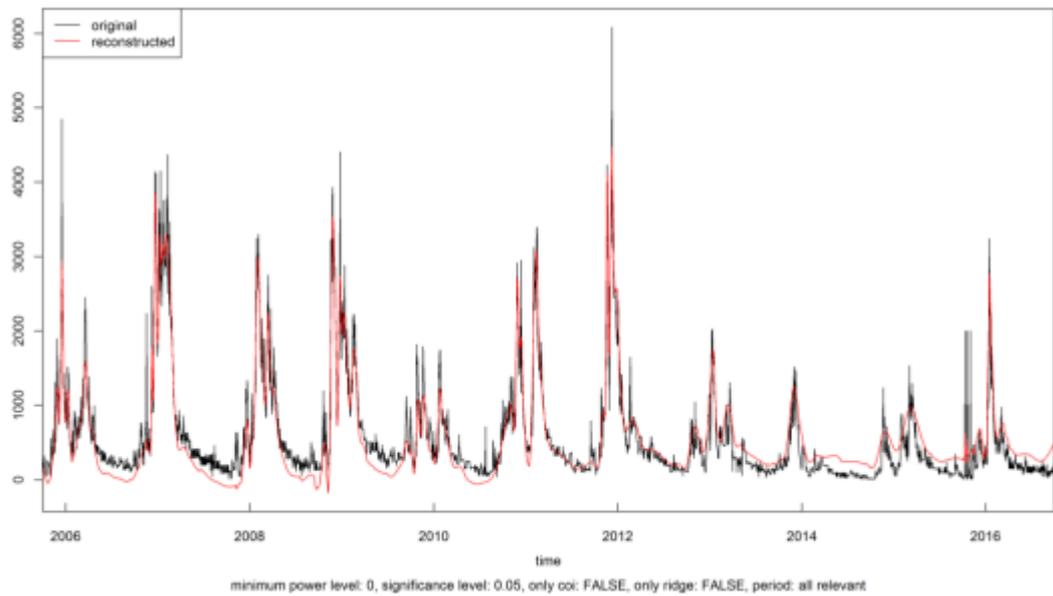


Figura 8 - Reconstrução da wavelet que representa às vazões afluentes ao reservatório de Três Marias

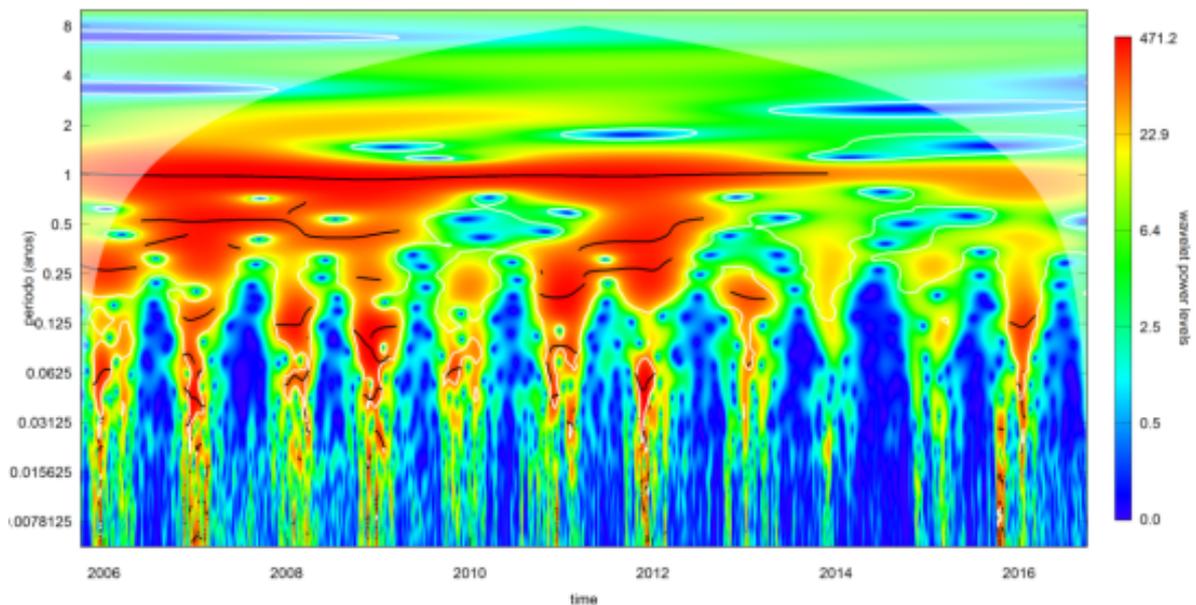


Figura 9 - Espectro de energia das wavelets que representam a vazão afluente ao reservatório de Três Marias

Ao ser comparado com a pesquisa desenvolvida em Shiau e Huang (2014), se percebe que as baixas energias se concentram nos menores períodos, indicando

que nestas escalas as alterações ocorrem por conta de eventos de enchentes que elevam a vazão bruscamente.

Quanto as altas energias, estas se concentram próximas aos períodos de um ano, mostrando uma distribuição energética onde se predomina as relações entre o período úmido e seco, cujo ciclo se aproxima a um ano. Porém, segundo White et al. (2005), a inclusão de dados referentes as variações menores que um dia contribui para a identificação de outras faixas de períodos que dominam a distribuição das energias e conseqüentemente da variabilidade do processo, principalmente quando se trata de um reservatório alimentado por vários afluentes ou quando se busca compreender as relações temporais e periódicas das vazões defluentes.

Por outro lado, é importante, ainda, observar que há redução mais sensível da amplitude nos momentos que são caracterizados como estação seca, a partir do ano de 2012, percebida pelo aparecimento de grandes manchas cuja a energia é próxima a zero.

Uma forma de melhorar a visualização da distribuição das amplitudes na análise das variabilidades das vazões é representá-las seguindo os períodos anteriormente citados como de interesse (Figura 10). Esta representação sugere que as amplitudes semanais são naturalmente baixas, independente do período analisado, apresentando picos apenas nos momentos que provavelmente ocorrem as precipitações. As amplitudes mensais seguem um padrão menos sensível a variações do que a representação semanal. Ao observá-las, é possível visualizar a boa distinção entre as estações úmidas e secas, tendo as últimas amplitudes próximas a zero. Acrescenta-se ainda a esta análise que a partir do período mensal já se torna notável a redução das amplitudes a partir do ano de 2012.

As amplitudes que representam tanto a variação trimensal, estações do ano, e a variação semestral, referente as estações chuvosas e seca, são bastante semelhantes. Isto pode ser entendido como uma consequência climatológica da não presença de quatro estações do ano bem definidas. Para estes períodos, as reduções das amplitudes são bastante marcantes para o mesmo intervalo de tempo observado para os períodos semanais e mensais.

Por fim, apresenta-se a redução das amplitudes intra-anuais, que é aquela na qual é mais notável a redução das amplitudes. Ao se representar o fenômeno com este período são amenizadas as variações bruscas, consequência de precipitações concentradas em intervalos curtos de tempo. Por outro lado, é posto em destaque questões climáticas como, por exemplo, a existência do fenômeno como o *El Niño* e *La Niña*.

Ao representar as vazões reconstruídas a partir dos períodos, focou-se naquelas que representassem na maior parte do tempo um fenômeno que sugerisse uma variação ao longo do tempo. Para isto, é importante pontuar que a reconstrução das vazões nos períodos inferiores ao semestre possui destaque apenas para fenômenos ocorridos em pequenas janelas de tempo.

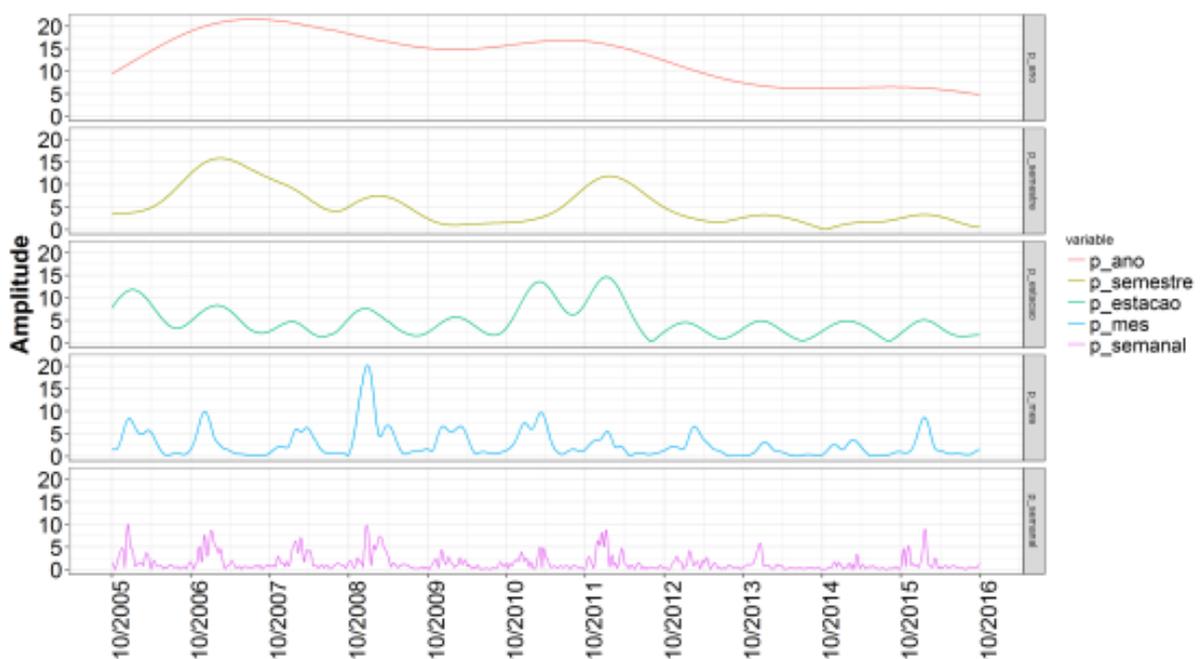


Figura 10 - Amplitude das Wavelets que representam a vazão afluente ao reservatório de Três Marias seguindo os períodos de interesse

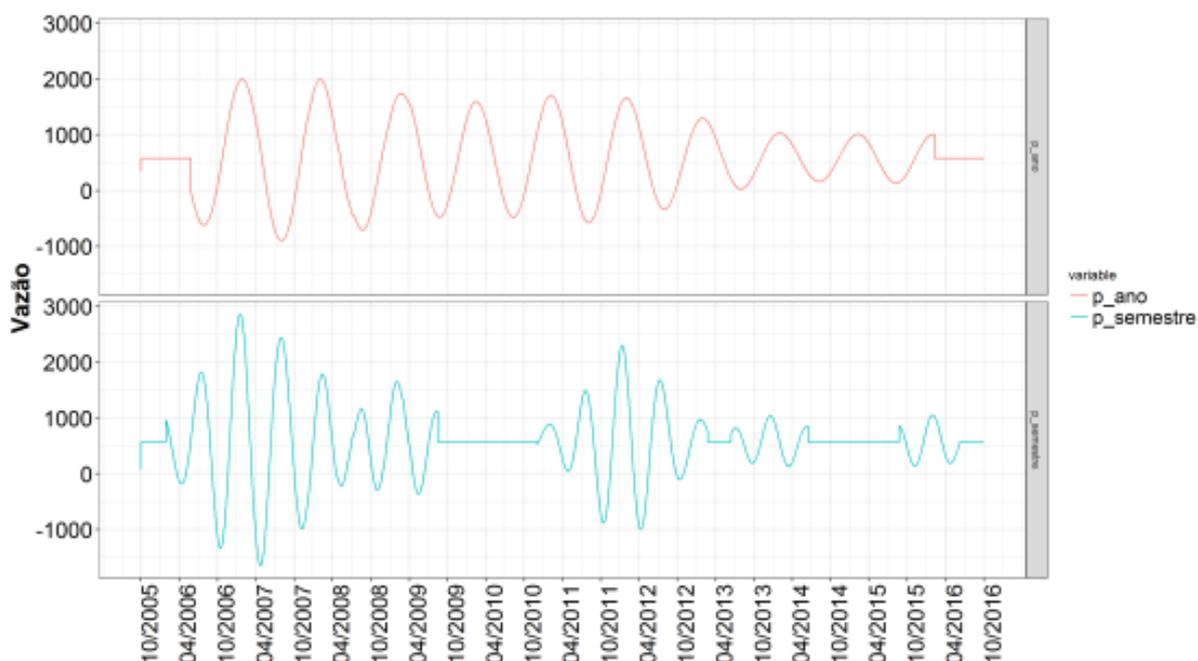


Figura 11 - Reconstrução das Wavelets que representam a vazão afluyente ao reservatório de Três Marias seguindo os períodos de interesse

Na Figura 11 podem ser visualizadas as reconstruções anuais e semestrais, das vazões afluentes a Três Marias. Na primeira, é possível observar a redução das vazões, bem como da amplitude. Deve-se ressaltar que as amplitudes para o período de um ano são as maiores e que são aquelas que em maior parte do tempo apresentam maiores valores em termos de vazão; a redução sensível da vazão neste período tem grande destaque ao se pensar na redução total da vazão e da amplitude do montante total.

Através da análise da transformada wavelet contínua foi possível adicionar outras camadas de entendimento do fenômeno. Podendo compreender que o período anual, estação úmida e seca, é aquele que possui a maior variabilidade do sistema, representado pelas altas energias, enquanto que para baixos períodos, diários ou intra-semanais, a variabilidade do sistema só é afetada nos momentos chuvosos.

Também, foi possível perceber o início de um transiente entre os anos de 2012 e 2013, representados pela redução das energias no espectro das frequências. Fato este que corrobora com o apresentado por ANA (2017) que pontua estes anos como o início de uma forte seca na região deste reservatório.

O uso das transformadas wavelets contínuas possibilitaram, também, a observação deste transiente de energia, observado pela redução das vazões, amplitudes e energias para as diversas frequências analisadas, fato este que não seria possível de ser observado através da análise descritiva ou de outras transformadas como a Fourier.

### **7.1.3 Análise Descritiva das Vazões Defluentes**

Primeiramente, é preciso compreender que as vazões defluentes estão sujeitas a uma restrição de valor mínimo e que, desde 2014, devido ao momento crítico enfrentado, têm se observado a flexibilização destas vazões, a fim de amenizar a depleção dos níveis dos reservatórios (ANA, 2017).

Segundo ANA (2017), a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) vem reduzindo a vazão mínima desde março de 2014, quando esta restrição caiu de 350 m<sup>3</sup>/s para 220 m<sup>3</sup>/s. Outras duas reduções ocorreram em seguida, uma em julho de 2014, quando a vazão passou de 220 m<sup>3</sup>/s para 180 m<sup>3</sup>/s e outra em fevereiro de 2015, quando a vazão mínima estabelecida foi de 80 m<sup>3</sup>/s.

Em 2015 ocorreram dois acréscimos nas vazões mínimas defluentes, uma em maio de 2015 quando este valor foi definido como 300 m<sup>3</sup>/s, afim de equilibrar a taxa de deplecionamento de Sobradinho, e outra em setembro do referido ano, momento no qual a vazão foi acrescida para 500 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2017).

Por fim, em janeiro de 2016, depois de sucessivas reduções, estipulou-se 150 m<sup>3</sup>/s como vazão mínima. O impacto das restrições de vazões afluente mínima pode ser observado na Figura 12 (ANA, 2017).

A análise gráfica da densidade de probabilidade dos dados de vazão defluente (Figura 13) corroboram a existência de padrões diferentes, antes e depois do ano de 2012, causados pela redefinição da vazão mínima defluente, como citado acima.

Observa-se que o valor de restrição de 500 m<sup>3</sup>/s, no período anterior ao ano hidrológico de 2012, é superior a apenas cerca de 25% dos dados, porém ao se tratar do período posterior a 2012 a vazão de 500 m<sup>3</sup>/s está acima de 90% dos valores.

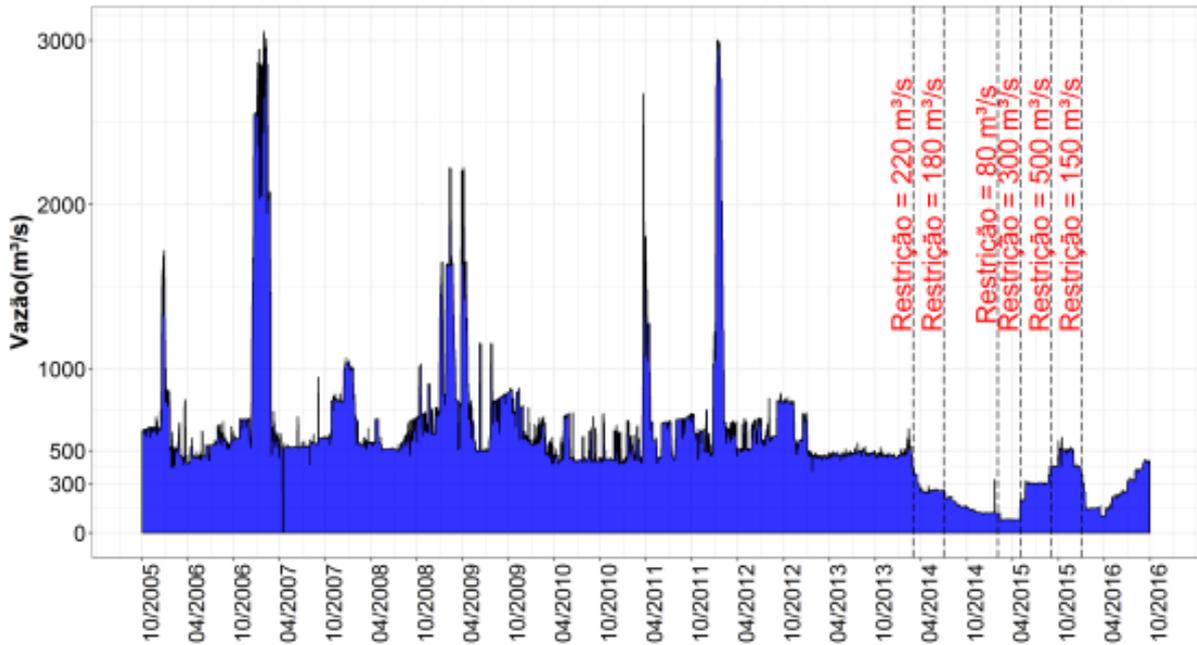


Figura 12 - Vazões defluentes do reservatório de Três Marias de 2005 a 2015

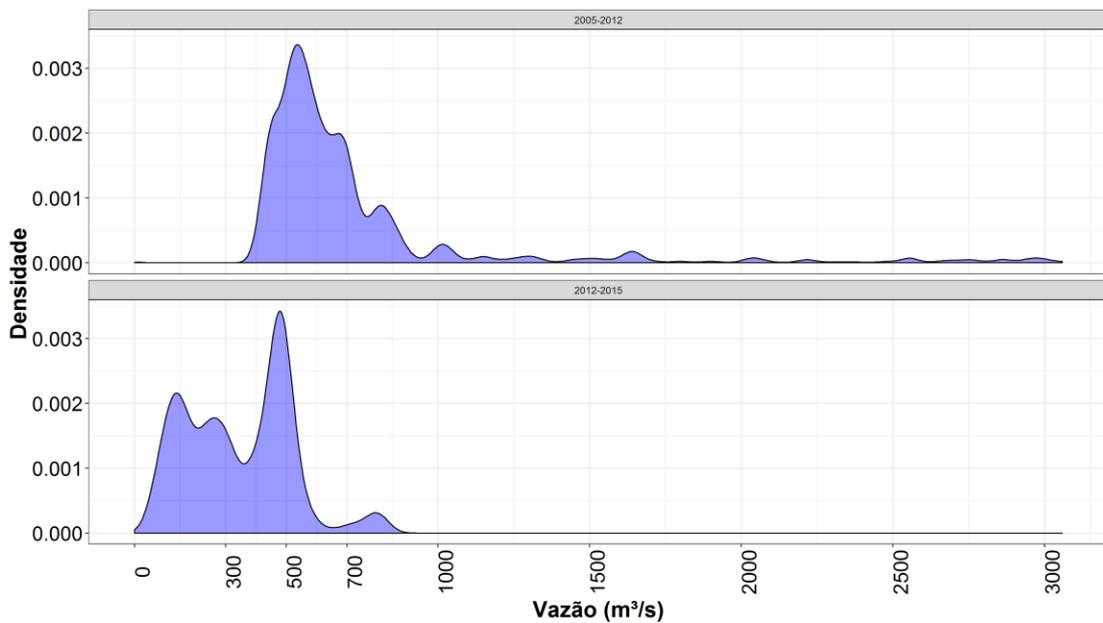


Figura 13 - Vazões defluentes do reservatório de Três Marias (2005-2015) para momento anterior e posterior a 2012

Deve-se ressaltar que a vazão defluente de 500 m<sup>3</sup>/s, que prevaleceu em setembro de 2015, perdurou sobre um pequeno intervalo de tempo. Este valor havia, entretanto, sido definido como vazão mínima em período anterior a 2012.

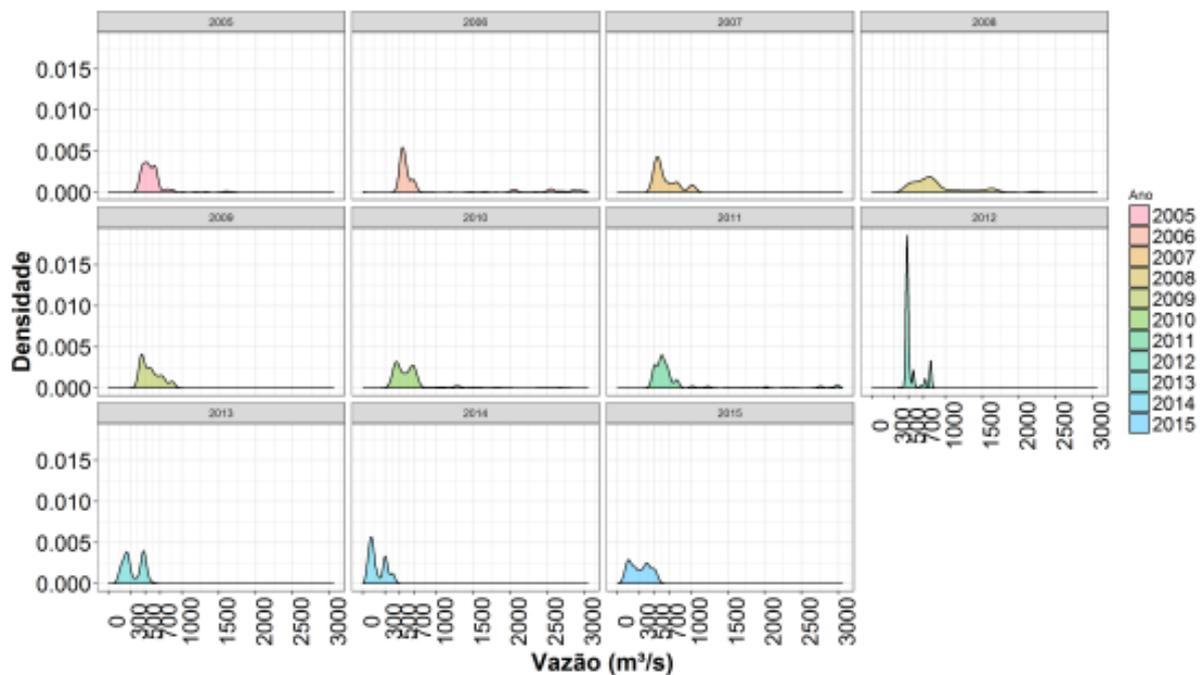


Figura 14 - Densidade de probabilidade das vazões defluentes do reservatório de Três Marias de 2005 a 2015

Ao dividir as vazões defluentes do reservatório de Três Marias, por ano hidrológico, torna-se nítido o efeito da situação crítica presente (Figura 14). Desta representação gráfica é percebido que, a partir do ano hidrológico de 2012 e de forma mais notável a partir de 2013, as vazões defluentes raramente chegam ao valor de 500 m<sup>3</sup>/s, situando-se em patamares inferiores a 300 m<sup>3</sup>/s na maior parte do tempo. Ressalta-se que no ano hidrológico de 2012, observa-se uma distribuição atípica de valores, marcando, justamente, a transição para um período de menores vazões afluentes.

A análise descritiva da regularização das vazões afluentes a Três Marias apontam para o entendimento das regras operacionais após o momento de redução da disponibilidade hídrica, observado pela redução drástica das vazões defluentes destes.

Esta nova operação sugere também uma nova sazonalidade no sistema que passou a acumular mais água no momento úmido, através de uma menor liberação das vazões, enquanto que nos momentos secos as vazões liberadas aumentaram no intuito de suprir as demandas.

Porém, a análise descritiva não permite a visualização deste transite, por isto adota-se a transformada wavelet para buscar compreender as consequências da

seca na operação do reservatório de Três Marias, levando em conta o domínio do tempo e da frequência

#### 7.1.4 Análise das Vazões Defluentes utilizando Wavelets

Como feito anteriormente, primeiramente é apresentado o resultado da modelagem utilizando transformadas wavelets (Figura 15). A modelagem apresenta-se, novamente, satisfatória, porém deve-se ressaltar que as variações bruscas da vazão mínima defluente a partir de 2014 não são tão precisamente representadas. Esta situação é explicada pela própria característica da variação destas vazões, que ocorre a partir da fixação de valores que variam em pequenas janelas de tempo, formando uma representação gráfica que lembra uma “função escada”.

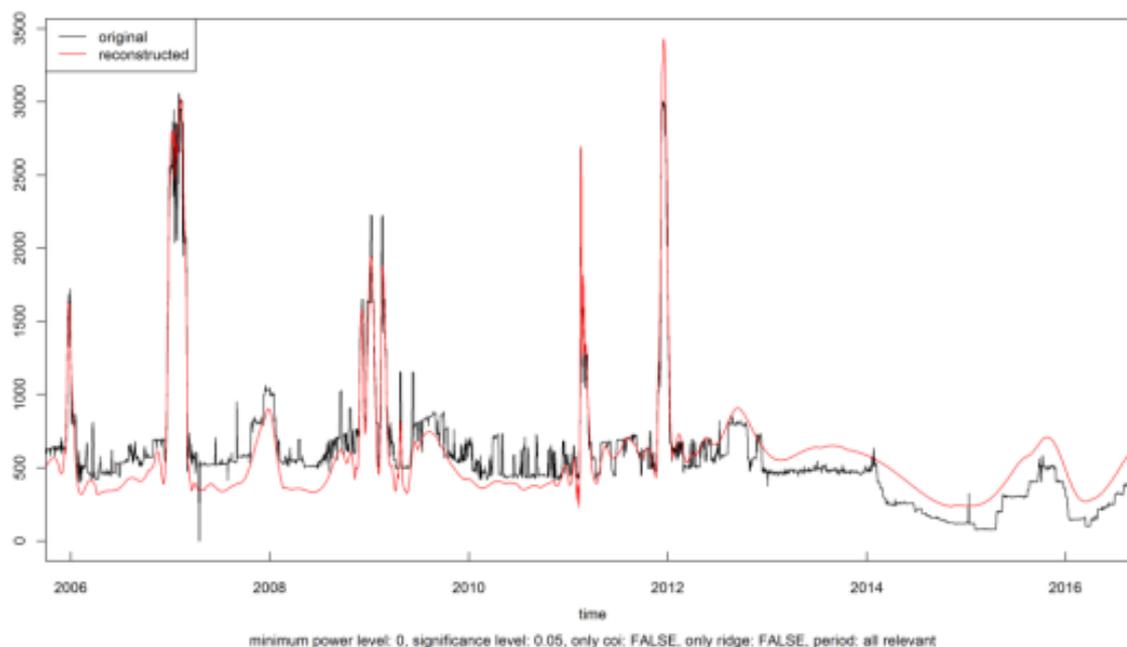


Figura 15 - Reconstrução usando wavelets das vazões defluentes de Três Marias de 2005 a 2015

Ao se observar o espectro de energia das *wavelets*, é notável a redução da amplitude que implica em maior regularização das vazões e atendimento a apenas o valor mínimo pré-fixado. Do espectro das wavelets das vazões defluentes, destaca-se a redução drástica das energias a partir de 2012 para qualquer um dos períodos

representados, principalmente para aqueles menores que 0,25 (trimestral) onde as amplitudes são valores majoritariamente próximos a zero (Figura 16).

Ao se representar graficamente as amplitudes associadas aos períodos analisados, se torna mais notável a redução destas amplitudes para valores próximos a zero a partir de 2013, exceto para o período anual, onde ocorre, também, grande redução das amplitudes (Figura 17).

Estes resultados refletem de forma interessante a situação existente na Bacia do Rio São Francisco. A redução das vazões afluentes e dos volumes armazenados, a ser visto em momento posterior, têm promovido a atenuação sucessiva das vazões defluentes dos reservatórios e observa-se, com isto, uma tendência de regularização mais intensa das vazões, representadas na Figura 17 pelas amplitudes se aproximando de zero.

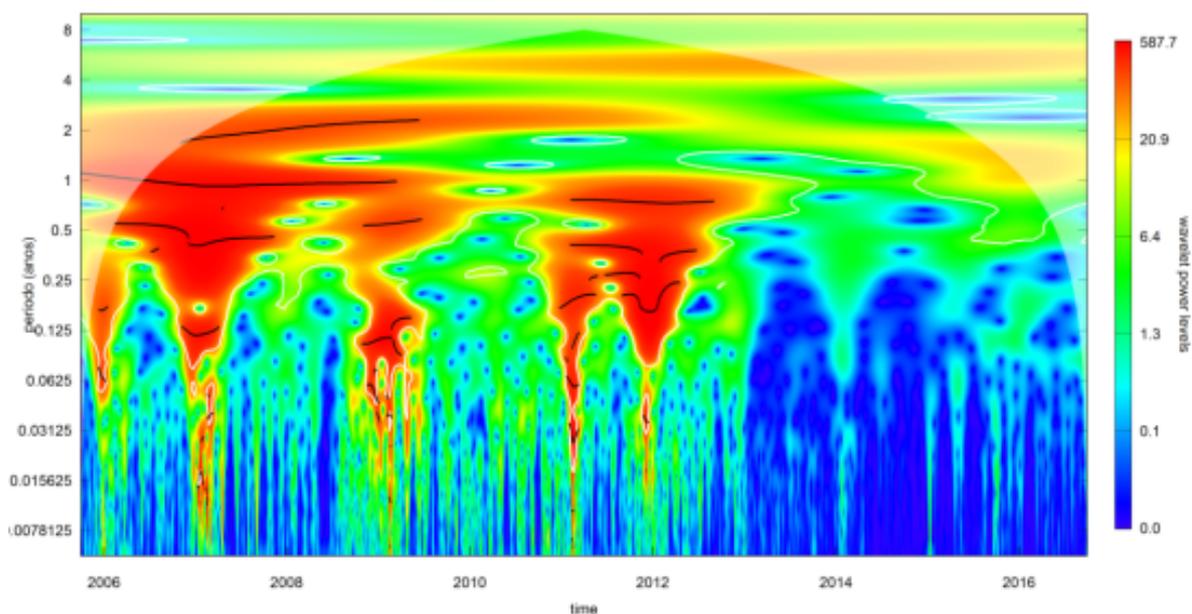


Figura 16 - Espectro de energia das wavelets das vazões defluentes de Três Marias

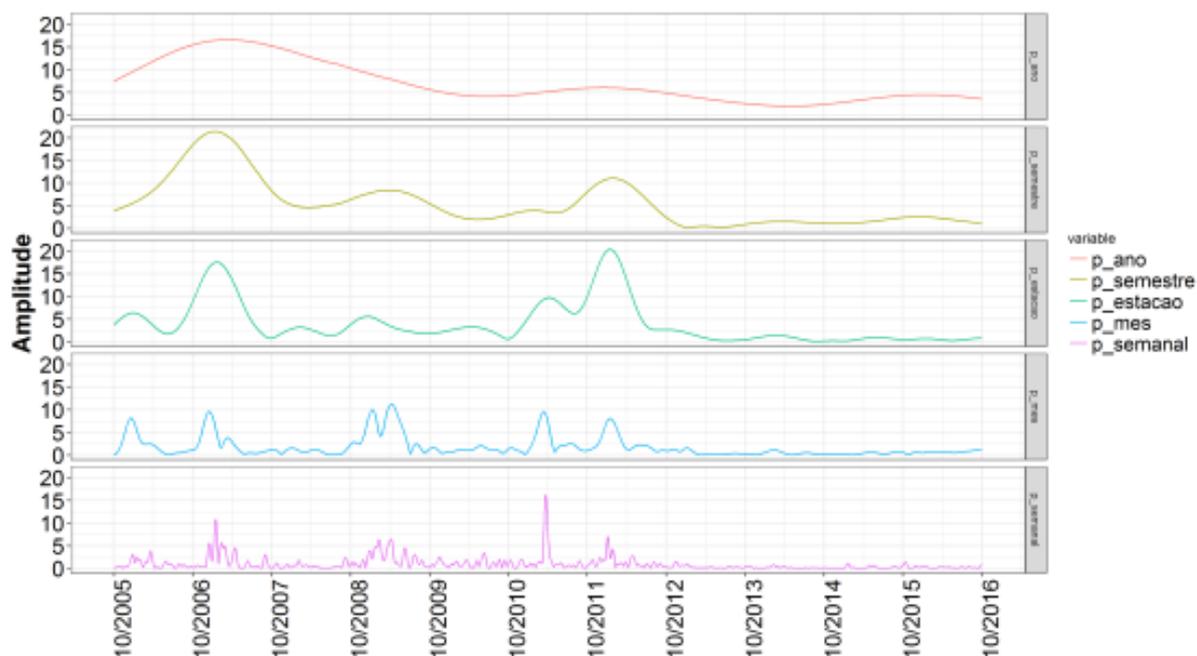


Figura 17 - Amplitude das wavelets das vazões defluentes de Três Marias, seguindo determinados períodos

A reconstrução das vazões defluentes atrelada aos períodos pertinentes, respectivamente: período anual, período semestral, período trimestral e período mensal é apresentada na Figura 18. No período mensal, a amplitude se destaca em pequenas janelas de tempo que se referem aos momentos de cheia, entre outubro e março, nos quais as vazões defluentes são maiores afim de garantir o não transbordamento do reservatório. Para os demais períodos têm se observado uma tendência geral de aproximação a um valor de vazão regularizado com amplitude nula.

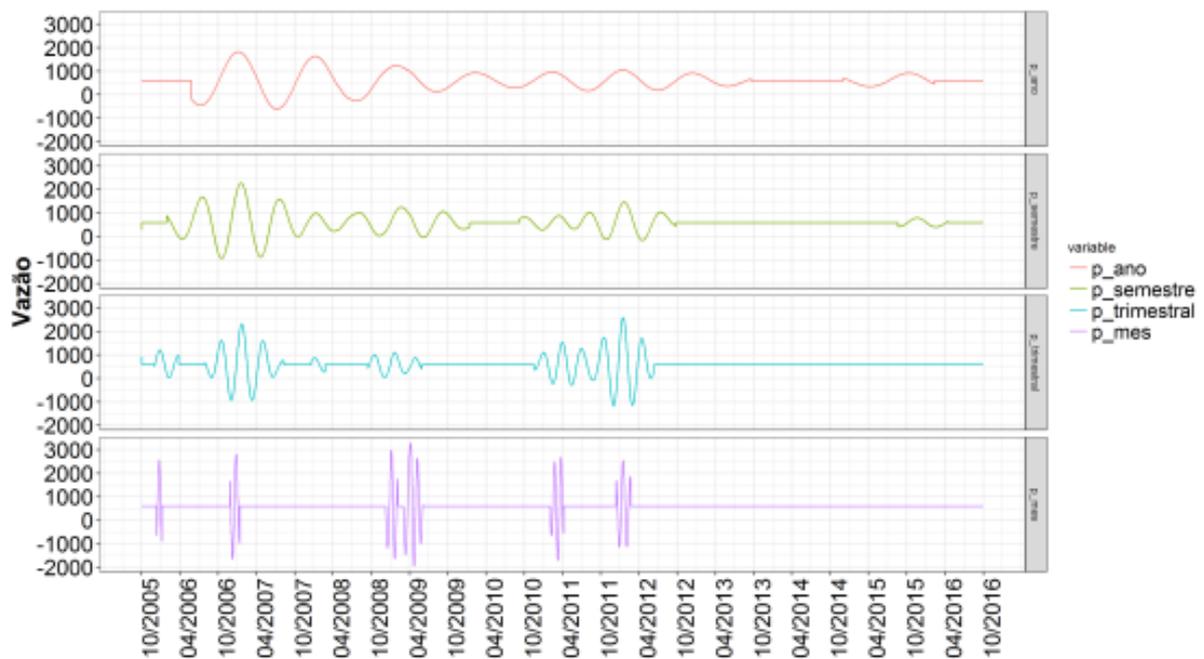


Figura 18 - Reconstrução das wavelets das vazões defluentes de Três Marias seguindo determinados períodos

A partir das transformadas wavelets foi possível observar o transiente ocorrido na operação a partir de 2012, observada, principalmente, pelo aumento de períodos cujas amplitudes se encontraram perto de zero, demonstrando pouca variabilidade no sistema. Redução da variabilidade, esta, que afeta os ecossistemas a jusante deste reservatório.

Até o ano de 2012, foi possível observar, também, a despeito de ser uma decisão humana, que o período anual é dominante, apresentando maior variabilidade que os demais. Isto se deve ao fato que para que uma melhor eficiência do reservatório é necessária que haja sincronização entre os períodos secos e chuvosos e a operação dos reservatórios. Para períodos diários ou intra-semanais, variabilidades são observadas, principalmente, nos períodos chuvosos, nos quais se busca equilibrar a quantidade de água no reservatório através do volume de espera.

Porém, a transformada wavelet contínua não permite correlacionar as vazões afluentes, não regularizadas, e as defluentes, regularizadas. Para isto, são utilizadas as *crosswavelets*, tendo intuito de compreender sobre a sincronização entre estas vazões.

### 7.1.5 Análise da Relação entre as Vazões Afluentes e Vazões Defluentes de Três Marias utilizando Crosswavelets

A primeira medida analisada nesta sessão é a coerência que remete a correlação cruzada entre duas séries temporais em função do período. Do espectro de valores da coerência se observa uma queda brusca entre 2013 e 2015, neste período ocorreram sucessivas reduções nas vazões defluentes mínimas do reservatório de Três Marias, fato que pode explicar a falta de sincronicidade entre a vazão afluente e a vazão defluente de Três Marias (Figura 19).

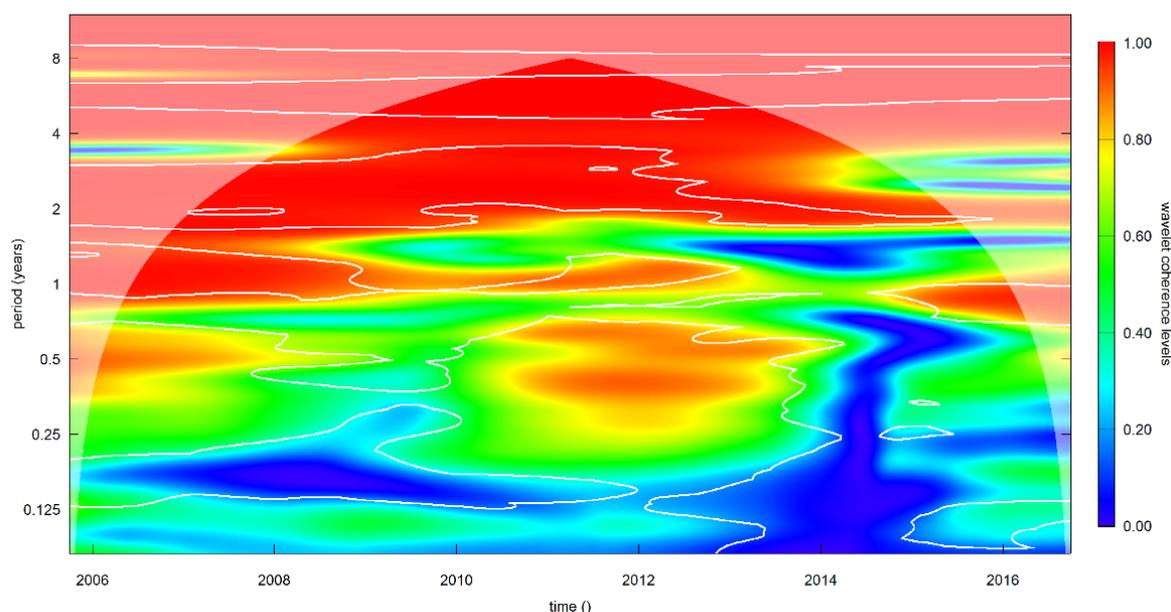


Figura 19 - Espectro das Coerências entre a Vazão Afluente e Vazão Defluente de Três Marias

Ao se aproximar dos períodos anuais, semestrais, trimestrais e mensais, têm-se que nos dois últimos a coerência, apesar da redução, é pouco significativa, apresentando valores de no máximo 0,6, indicando moderada correlação, e chegando a valores menores que 0,25, indicando fraca correlação, a partir de 2014 (Figura 20).

Para os períodos anuais e semestrais, a coerência se faz maior. Deve-se ressaltar que o próprio planejamento da operação dos reservatórios contempla justamente a

totalidade anual, tendo um período chuvoso onde é armazenado um certo volume para que se supra os múltiplos usos da água no período seco (Figura 20).

Porém, enquanto que no período anual se mantém uma coerência maior que 0,7, a despeito de uma redução significativa em 2013 que logo voltara ao mesmo patamar, na análise trimestral e mensal são observados baixos valores de coerência e grande redução destes valores a partir de 2013.

Esta falta de sincronização, porém, acaba por ser amenizada em períodos mais longos como o anual, uma vez que o ciclo de operação é relacionado aos períodos naturais das baixas vazões, período que ocorre a redução dos níveis do reservatório, e os períodos de cheias onde ocorrem a elevação destes níveis.

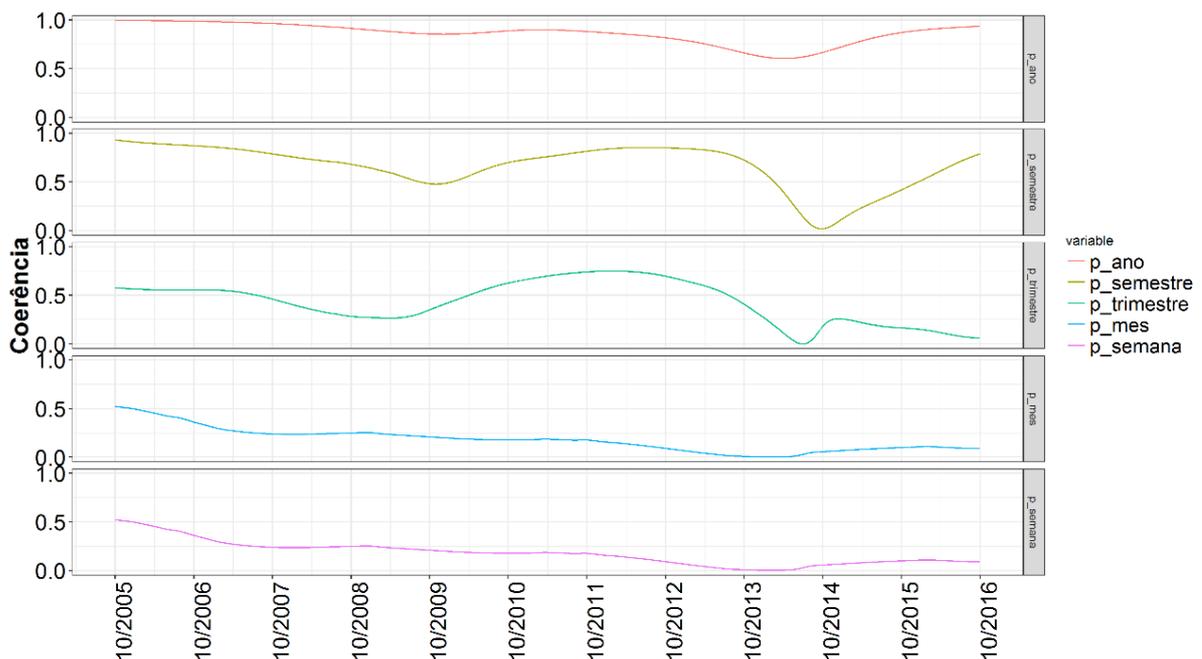


Figura 20 - Coerências seguindo determinados períodos entre a vazão afluyente e a vazão defluente de Três Marias

Assim, como a pesquisa desenvolvida em Shiau e Huang (2014), encontra-se um padrão no qual há maiores correlações para períodos superiores ao semanal. Deve-se ressaltar, porém, que a sincronização do reservatório apresentado em Shiau e Huang (2014) se faz notável a partir dos períodos semanais, enquanto que para o reservatório de Três Marias uma melhor sincronização se faz presente para períodos entre seis meses e um ano.

O aumento na complexidade na análise dos resultados permitiu que se fosse caracterizada e compreendidas algumas relações e consequências da seca enfrentada na região a partir de 2012.

Estas análises permitiram, primeiramente, a ilustração do momento, através das análises descritivas, pontuando, principalmente, a diferença de distribuição das vazões, afluentes e defluentes, a partir do ano de 2012.

As sazonalidades e períodos dominantes bem como os seus transientes, puderam ser observados através da análise wavelet contínua. Nesta, pode-se perceber que o período anual domina tanto a variabilidade das vazões afluentes, quanto defluentes. Porém, a partir de 2012, é observado uma forte redução desta variabilidade, principalmente para a vazão regularizada, uma vez que se trata de um processo de decisão humana.

Por fim, fora observado a dessincronização ocasionada pela regularização da vazão, principalmente no período anual, onde anteriormente a 2012 havia uma boa correlação entre estas variáveis, observada pela aplicação das crosswavelets.

## **7.2 Análise Descritiva da Operação do Reservatório de Sobradinho.**

### ***7.2.1 Análise Descritiva das Vazões Afluentes a Sobradinho***

Assim como visto no reservatório de Três Marias, as vazões afluentes a Sobradinho apresentam reduções após 2012, sendo estas mais perceptivas a partir do ano de 2014 (Figura 21).

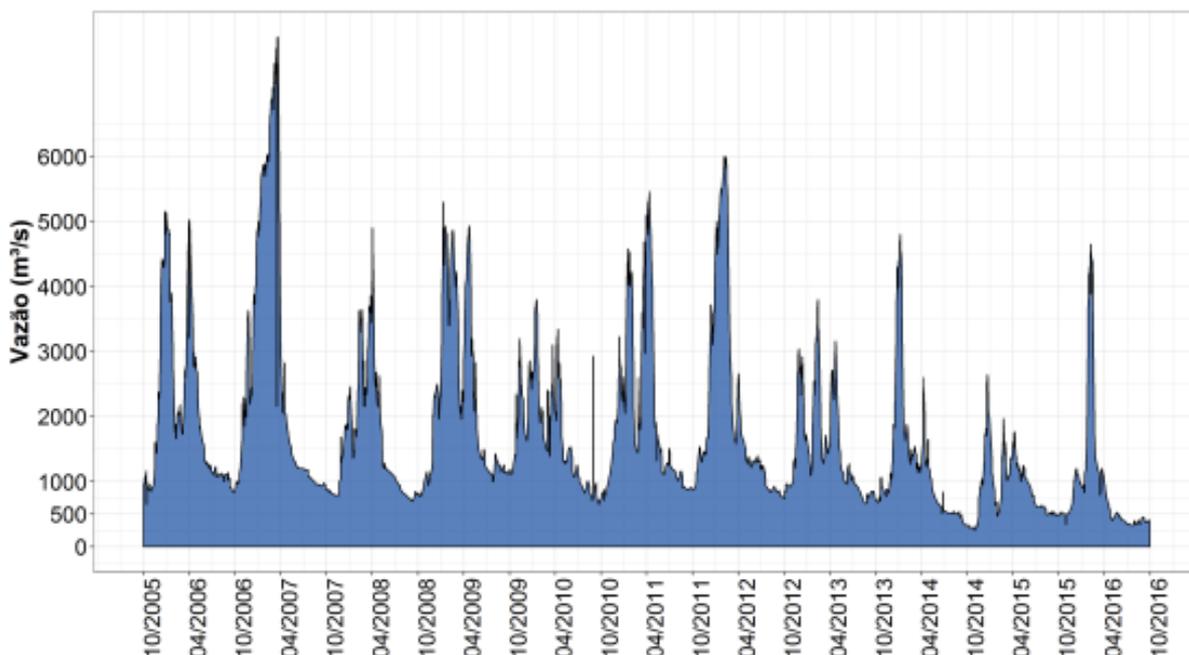


Figura 21 - Vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho de 2005 a 2016

Uma forma de corroborar as observações feitas acima, quanto a redução de vazões afluentes, se faz através da análise dos *boxplots* correspondentes aos anos hidrológicos estudados (2005 a 2015). Os *boxplots* (Figura 22) sugerem, assim como a Figura 23, que a redução de vazão se apresenta bastante notável a partir do ano hidrológico de 2013, tomando valores medianos bastante reduzidos em 2015.

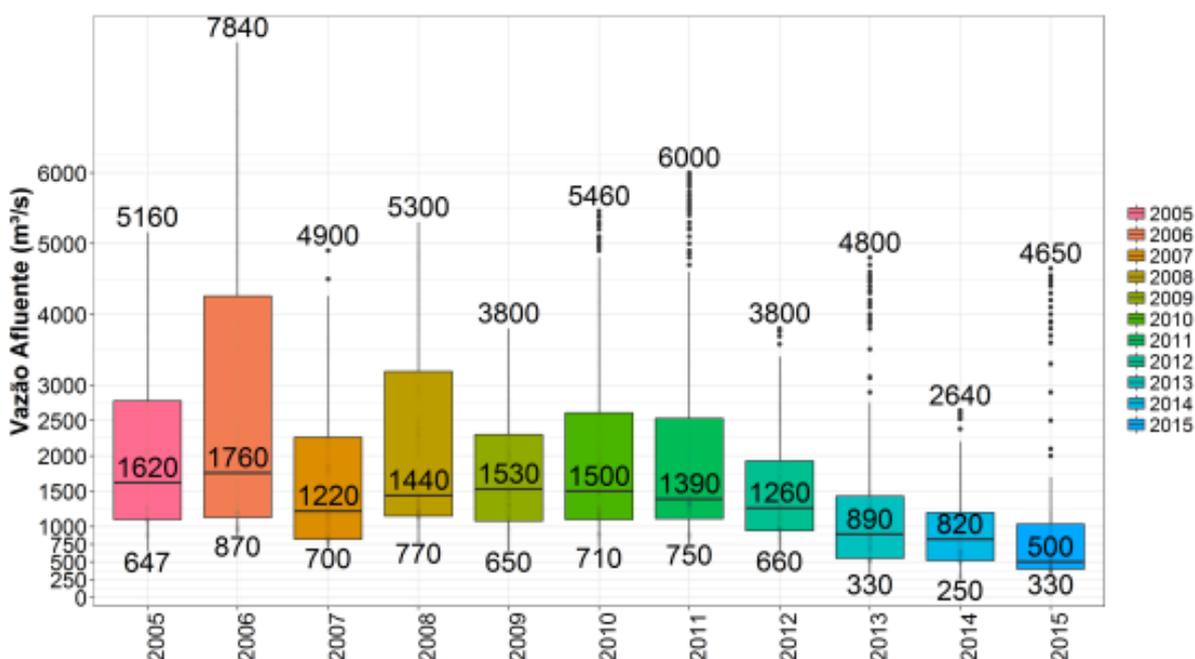


Figura 22 - Boxplot das vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho de 2005 a 2015

Observando de forma mais próxima as densidades de probabilidade das vazões, nota-se a redução da vazão pela diferenciação da relação entre a moda e média em momento anterior e posterior a 2013. No intervalo de tempo após 2013, a distribuição das densidades de probabilidade aponta para uma moda inferior à média, vista pelo achatamento da curva que significa, em termos práticos, a concentração das vazões em níveis inferiores, quando comparado ao momento anterior a 2012 (Figura 23 e Figura 24).

Quanto à distribuição dos dados, também se vale da distribuição destes em percentis característicos (Tabela 3). Observa que as vazões para os percentis de 1% a 90% nos anos hidrológicos de 2013 a 2015 correspondem a cerca da metade das vazões, para as mesmas percentagens, observadas antes de 2013. Porém, nas vazões acima de 95% as diferenças observadas entre estes dois períodos são mínimas.

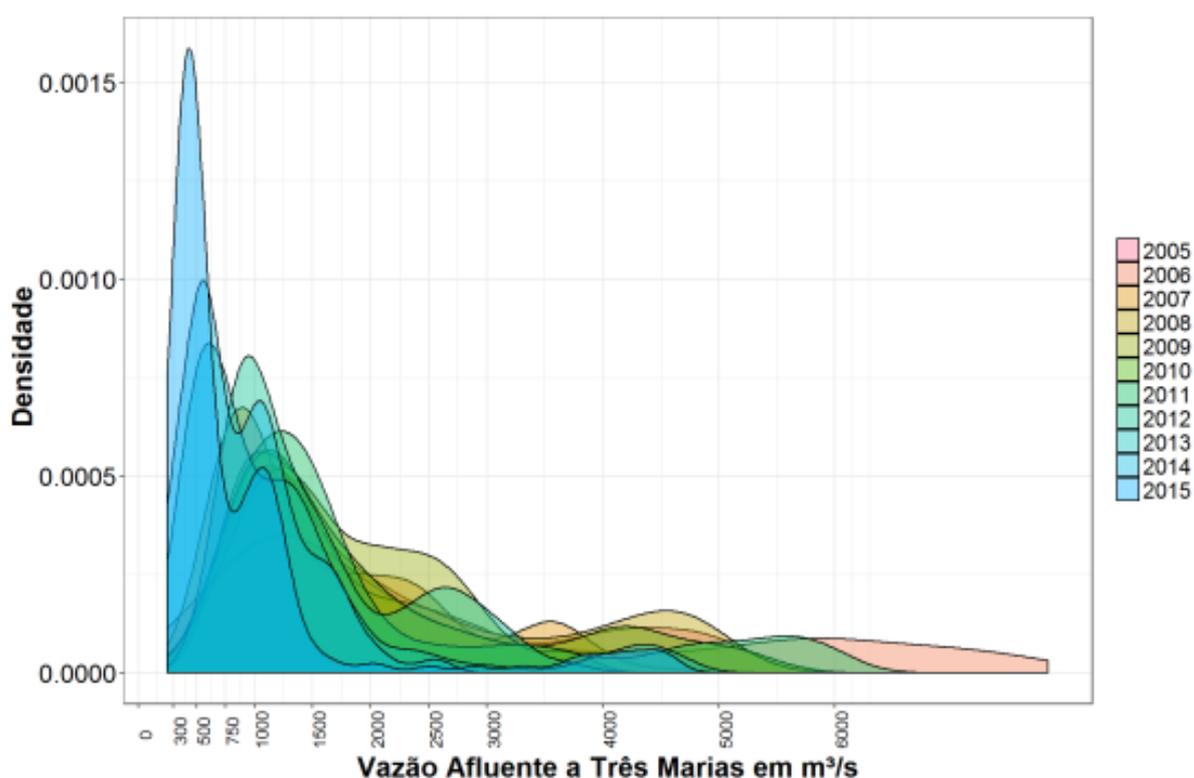


Figura 23 - Distribuição de probabilidade das vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho de 2005 a 2015

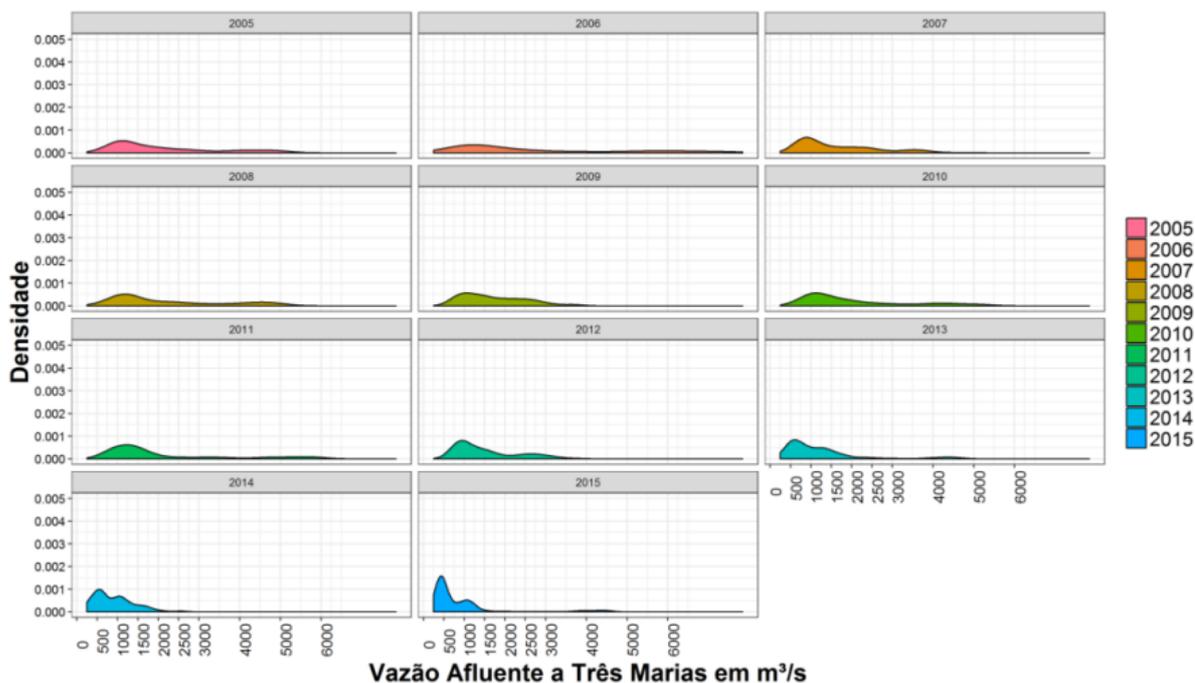


Figura 24 - Distribuição de Probabilidade das Vazões Afluentes a Sobradinho ano a ano de 2005 a 2015

Desta forma, apresenta-se a Figura 25 que infere sobre a diferença nas densidades de probabilidades no período anterior ao ano hidrológico de 2012 e em momento posterior. Sugere-se uma mudança nestas distribuições, sendo que no primeiro momento observa-se como moda valores próximos a 1250 m<sup>3</sup>/s, no segundo período se apresenta como moda valores próximos a 500 m<sup>3</sup>/s.

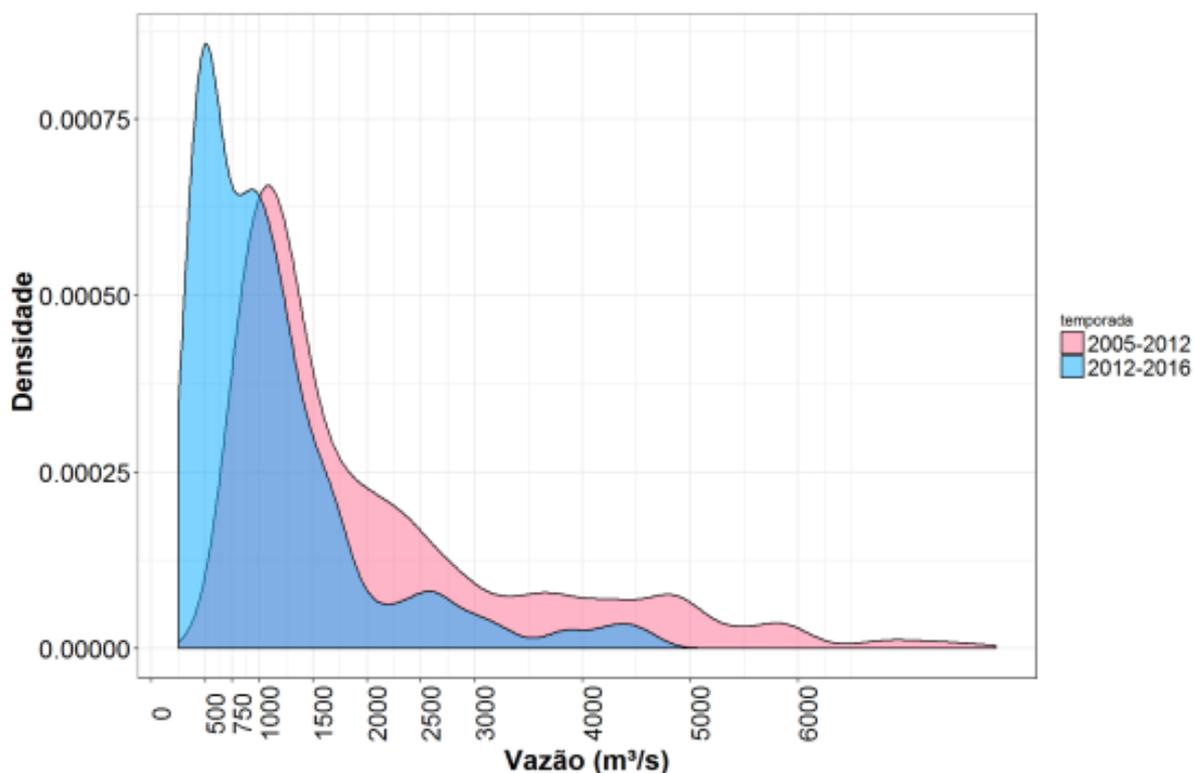


Figura 25 - Distribuição de Probabilidade das Vazões Afluentes a Sobradinho ano a ano de 2005 a 2015

A relação das medianas, mês a mês, sugere um padrão mais complexo do que aquele analisado em Três Marias devido, justamente, a natureza desta vazão que é composta pela vazão defluente de Três Marias e pela alimentação do leito principal do Rio pelas bacias regionais (Tabela 3).

Os maiores desvios padrões se encontram nos meses com as maiores vazões, ou seja, de janeiro a abril, representando a variabilidade diária da chuva. No momento que as vazões de base se tornam mais influentes têm-se características de períodos secos no qual as os desvios são menores.

Tabela 3 - Percentis de vazão afluente ao reservatório de Sobradinho agrupados por ano

%	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	99%
Q(2005)	840	870	911.6	1100	1620	2780	4350	5058.4
Q(2006)	900	950	960	1127.5	1760	4257.5	6071	7601.7
Q(2007)	700	740	784	820	1220	2265	3378	4052.6
Q(2008)	790	850.5	1021	1150	1440	3195	4600	4900
Q(2009)	686.4	740	834	1080	1530	2300	2800	3718
Q(2010)	760	852	880	1100	1500	2610	4210	5274.4
Q(2011)	756.5	832.5	860	1110	1390	2530	5000	5960.5
Q(2012)	660	740	794	940	1260	1930	2748	3464.8
Q(2013)	330	422	500.8	550	890	1430	2236	4568
Q(2014)	272.8	290	330	520	820	1200	1606	2430.4
Q(2015)	330	340	350	400	500	1037.5	1385	4500

Fonte: ONS (2017)

Porém, diferentemente de Três Marias, a Tabela 4 indica uma mudança no padrão de vazões afluentes nos períodos secos, indicando uma possível redução na vazão de base que pode ter como motivo o aumento da exploração da água subterrânea nesta região principalmente no aquífero Urucuia.

Tabela 4 - Medianas da vazão afluente ao reservatório de Sobradinho por mês (m<sup>3</sup>/s)

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
2005	920	1306.5	4320	3860	2020	2690	3231	1814	1260	1120	1100	500
2006	1000	2295	3780	5700	6050	7140	2140	1410	1200	1180	965	905
2007	840	790	1840	1790	3180	3140	2590	1260	1130	940	775	950
2008	830	1120	2350	4500	4400	2400	4450	2280	1375	1130	1280	765
2009	1260	2320	2420	2800	1680	2300	2455	1330	1195	940	880	1150
2010	830	1450	2450	4080	1800	3440	4850	1640	1235	1180	1040	735
2011	1000	1430	3300	5100	5580	1850	1690	1320	1315	1160	860	885
2012	940	1370	2328	1500	3115	1480	2590	1250	1080	940	740	795
2013	720	860	2220	3120	1415	1230	1395	880	635	520	520	825
2014	290	440	1780	930	800	1200	1330	1070	830	610	520	375
2015	920	555	1160	3860	3880	1140	675	490	405	340	370	495
Desvio-Padrão	333.5	742.76	1038.41	1599.92	1687.97	1632.51	1262	548.9	307.76	286.61	267.18	265.97

Fonte: ONS (2017)

Através da análise descritiva dos dados foi possível perceber uma diferenciação no comportamento das vazões afluentes a partir do ano hidrológico de 2013, se agravando com valores medianos de vazões menores no ano de hidrológico de 2014.

A distribuição dos dados de vazão aponta para a redução, principalmente, nos extremos, momentos de seca e enchentes. Porém, esta análise não permite avaliações no espectro de frequência que possibilitaria a observação de transientes na periodicidade e sazonalidade do sistema. Para isto, utiliza-se, a seguir, a transformada wavelet contínua.

### 7.2.2 Análise das Vazões Afluentes a Sobradinho utilizando Wavelets

Assim como nas demais variáveis, primeiramente será introduzido a reconstrução da série temporal das vazões afluentes a Sobradinho a partir de wavelets (Figura 26). Deve-se observar que, novamente, são obtidos resultados satisfatórios por esta técnica, com afastamentos mais pronunciados apenas nas depressões.

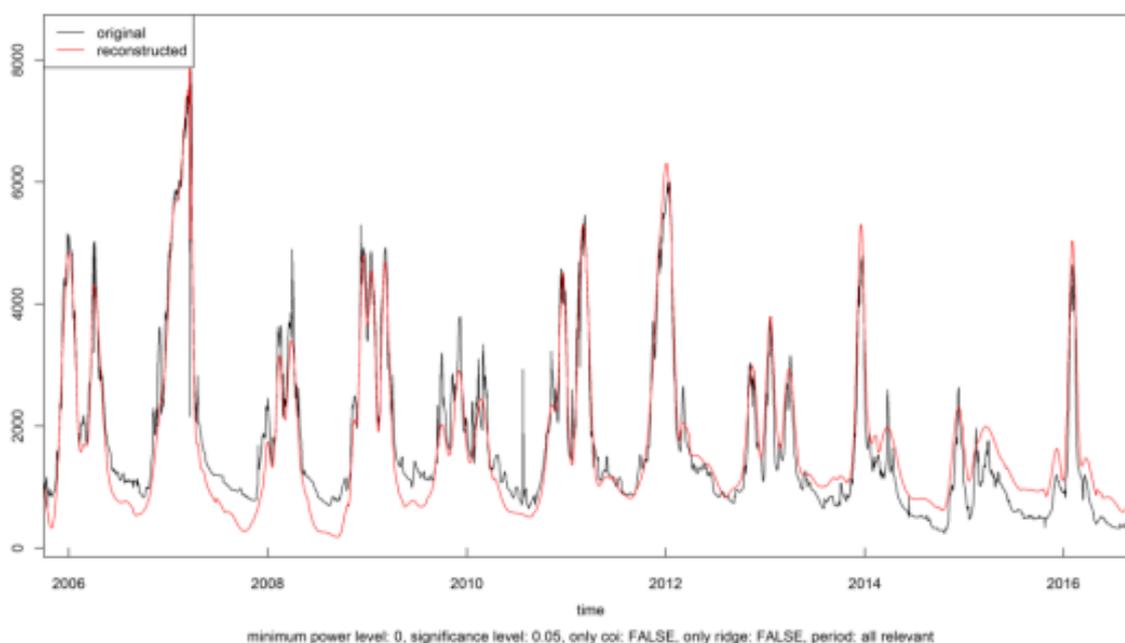


Figura 26 - Reconstrução da série de vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho usando wavelets

Outra análise pertinente diz respeito ao espectro de energia das *wavelets* que compõem a reconstrução da série temporal de vazões afluentes a Sobradinho. Desta análise, se observa a diminuição das amplitudes, porém de forma mais suave

que a ocorrida em Três Marias, principalmente para o período mais energético, anual (Figura 27).

Por outro lado, a análise das amplitudes referentes a cada período e seu intervalo de tempo indicam que as reduções nas amplitudes se tornaram mais notável a partir de meados de 2013. Deve-se ressaltar, porém, que esta redução se destaca pouco ao observar o fenômeno no período semanal ou mensal e se torna mais perceptível quando se analisa as *wavelets* de período próximos a um ano (Figura 28).

Desta investigação, pode-se inferir que fenômenos climáticos que acontecem em pequenas janelas de tempo influenciam pouco as amplitudes do sistema, sendo, então, os eventos que acontecem em maior escala temporal aqueles mais determinantes para a variação das amplitudes, a exemplo das estações do ano e a variação anual entre o período seco e o período chuvoso.

Quanto aos valores propriamente ditos de vazão afluente a Sobradinho, destaca-se na reconstrução deste os valores atribuídos aos períodos anuais e semestrais, sendo os demais representativos apenas em pequenas janelas de tempo, simbolizando fenômenos curtos como fortes precipitações (Figura 29).

Da Figura 29 é possível observar que a partir de meados de 2013, concordando com a redução das amplitudes, ocorre uma diminuição sensível da contribuição da parcela da vazão periódica anual para a composição das vazões afluentes a Sobradinho, período que pode ser considerado como mais afetado pela redução das vazões afluentes.

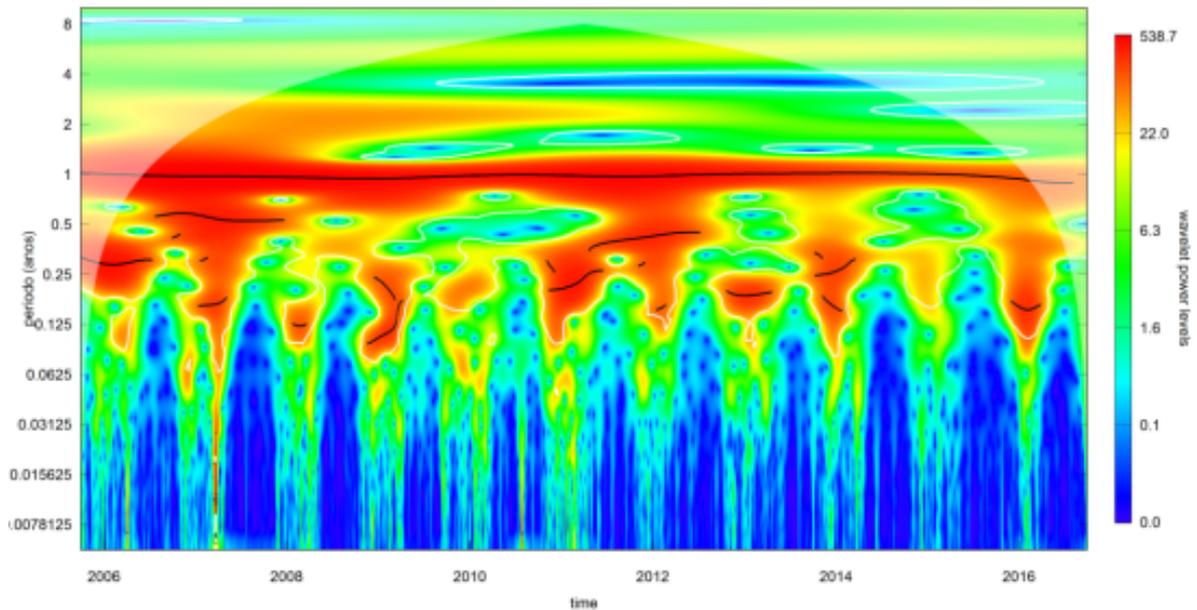


Figura 27 - Reconstrução da série de vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho usando wavelets

Assim, como observado para o reservatório de Três Marias e o relatado em Shiau e Huang (2014), se exibe um padrão no qual ocorre baixas energias para os períodos menores. Para os baixos períodos, as altas energias indicam momentos de enchentes. Diferentemente de Shiau e Huang (2014), para o reservatório de Sobradinho as maiores energias se fazem presentes a partir de períodos superiores a seis meses, enquanto que para o reservatório estudado pelos autores supracitados, as grandes energias se apresentam a partir de frequências superiores a dois dias.

Quanto as altas energias, o resultado concorda com o obtido em Zollezi et al. (2009), neste, o supracitado autor, obtém que os períodos mais energéticos são próximos a um ano, representando a periodicidade das altas no período chuvoso e das baixas vazões no período seco.

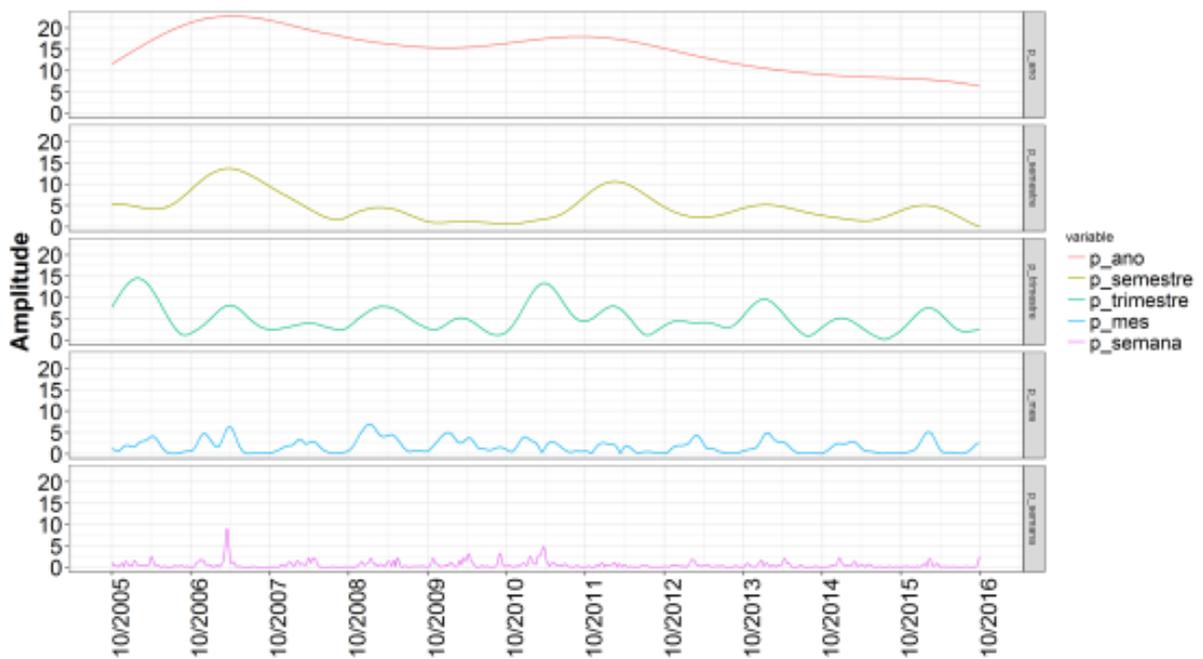


Figura 28 - Reconstrução das Amplitudes referentes a períodos determinados para a Série de Vazões Afluentes a Sobradinho

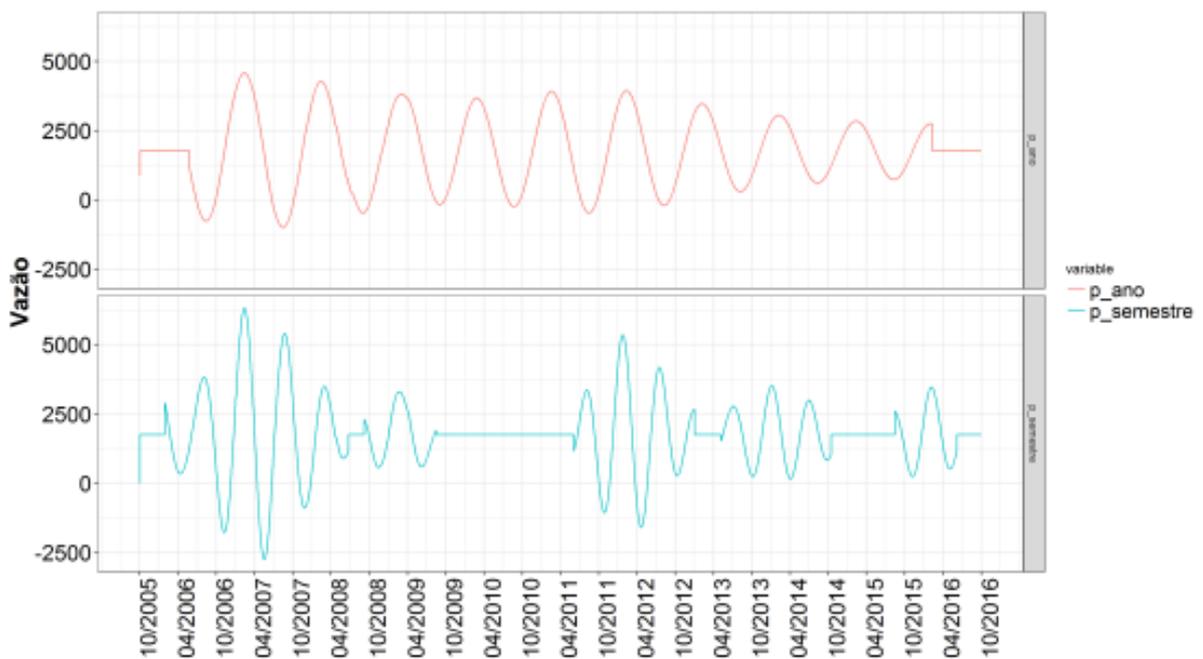


Figura 29 - Reconstrução das wavelets referentes a períodos determinados para as Vazões Afluentes a Sobradinho

O uso das transformadas wavelets possibilitaram a análise do transiente ocorrido entre 2013 e 2014, observado, principalmente, pela redução das energias, amplitudes e vazões a partir deste momento. Deve-se, porém, ressaltar que as reduções das energias foram menores que aquelas observadas para o reservatório de Três Marias, para o melhor entendimento desta situação seria necessário um estudo voltado para os diversos afluentes e suas periodicidades.

Quanto a periodicidade, assim como vista anteriormente para as vazões afluentes de Três Marias, se apresentou como dominante aquela correspondente ao período anual. Para os períodos diários e inferiores a uma semana, o padrão exibido é de pequenas amplitudes, afetadas principalmente nos momentos de cheia.

### **7.2.3 Análise Descritiva das Vazões Defluentes**

Diante deste cenário hidrológico crítico, a ONS têm solicitado a ANA a autorização para a flexibilização das vazões mínimas do reservatório de Sobradinho.

A primeira redução do valor mínimo de vazão defluente foi autorizada pela Resolução ANA nº 442/2013 que estabeleceu como patamar mínimo foi decrescido de 1300 m<sup>3</sup>/s para 1100 m<sup>3</sup>/s.

A seguir, através da Resolução ANA nº 206/2015, o piso foi mantido, porém foi permitida a redução da vazão para 1000 m<sup>3</sup>/s em períodos de carga leve. Ainda neste mesmo ano fora emitida a Resolução ANA nº 713/2015 que fixava 900 m<sup>3</sup>/s como patamar mínimo de vazão defluente.

Por fim, dentro do período de trabalho fora autorizada a redução da vazão mínima para 800 m<sup>3</sup>/s, seguindo a Resolução ANA nº 66/2016.

Uma vez apresentadas as reduções das vazões mínimas defluentes, é possível observar a série temporal que as representa (Figura 30).

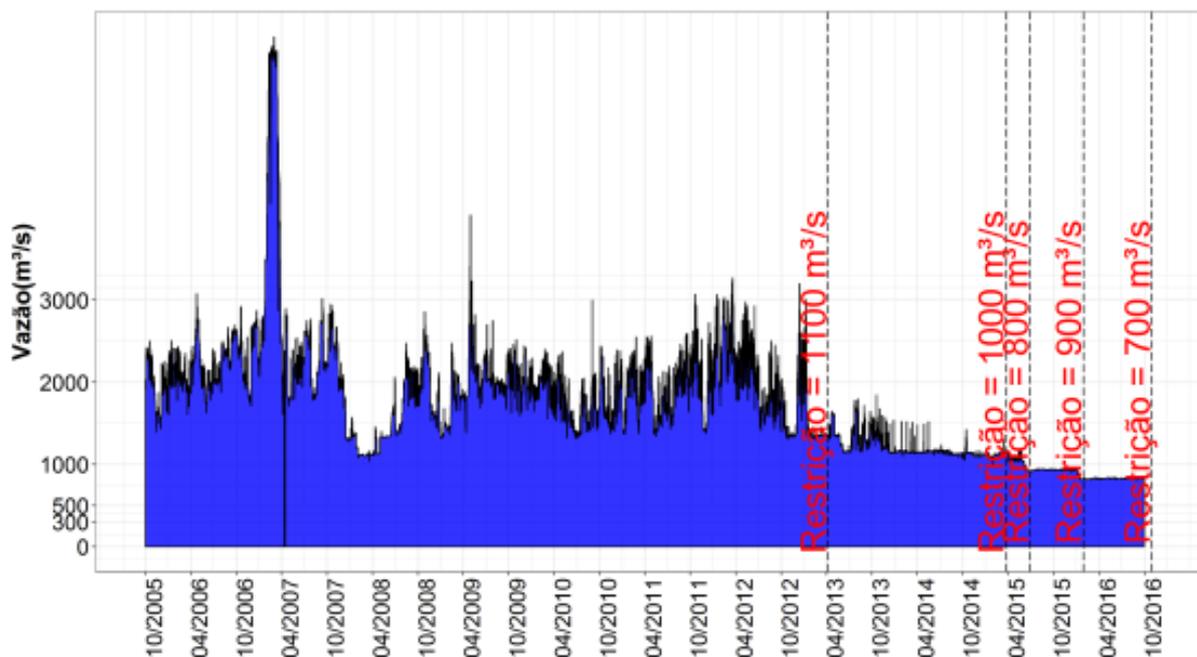


Figura 30 - Vazões defluentes do reservatório de Sobradinho de 2005 a 2016

Nesta representação gráfica se faz bastante marcante a regularização da vazão defluente, a partir da primeira redução, onde estas vazões pouco variaram em torno do valor mínimo permitido (Figura 31). Fato este que compromete as sazonalidades e as características físicas e biológicas do trecho a jusante.

Esta falta de variabilidade, a partir do ano hidrológico de 2012, pode ser facilmente observada nos gráficos de densidade. Desta representação gráfica, se percebe um fenômeno tanto de redução das vazões quanto da concentração destes valores em um patamar inferior a 1000 m<sup>3</sup>/s.

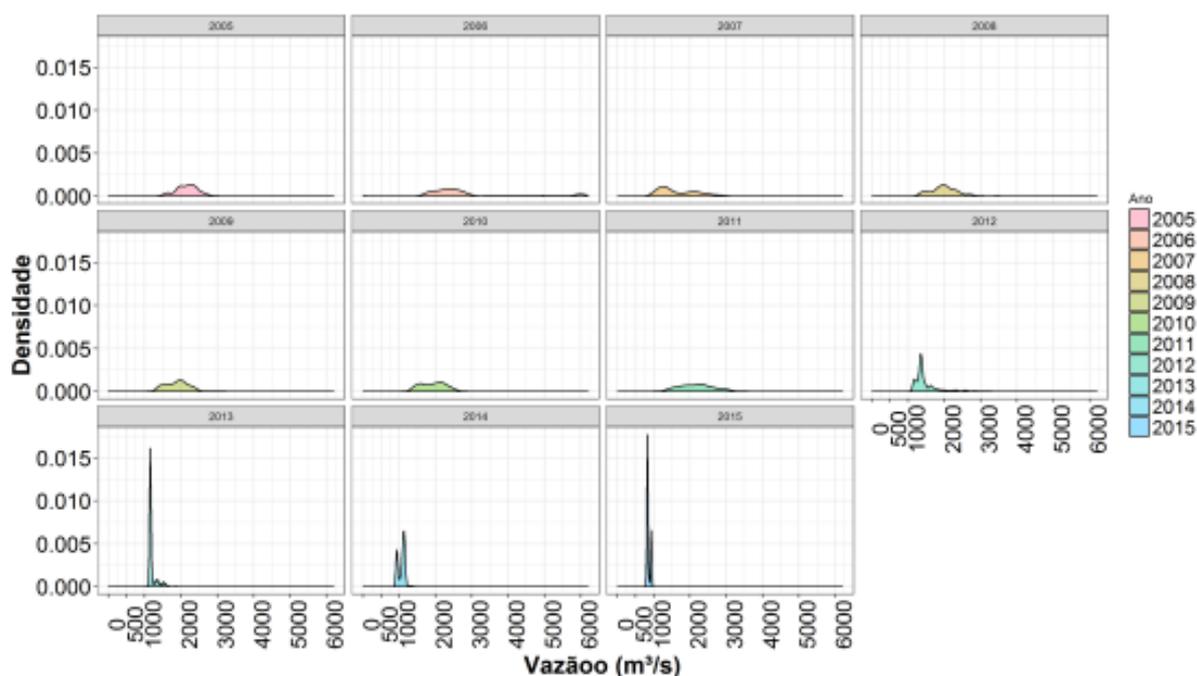


Figura 31 - Vazões defluentes do reservatório Sobradinho de 2005 a 2016

Ao separar a série das vazões defluentes em duas fases, uma anterior ao ano hidrológico de 2012 e a outra a partir deste ano, percebe-se duas diferentes densidades de probabilidade para estes períodos (Figura 32).

No primeiro momento, têm-se uma distribuição que sugere que os valores da moda são próximos a  $1500\text{m}^3/\text{s}$ , obtendo-se raros valores inferiores a  $1300\text{ m}^3/\text{s}$ . No segundo momento, a moda é próxima a  $1100\text{ m}^3/\text{s}$  e em segundo plano próxima  $800\text{ m}^3/\text{s}$ , deve-se ressaltar que estes valores são as restrições de vazões mínimas realizadas por maior duração.

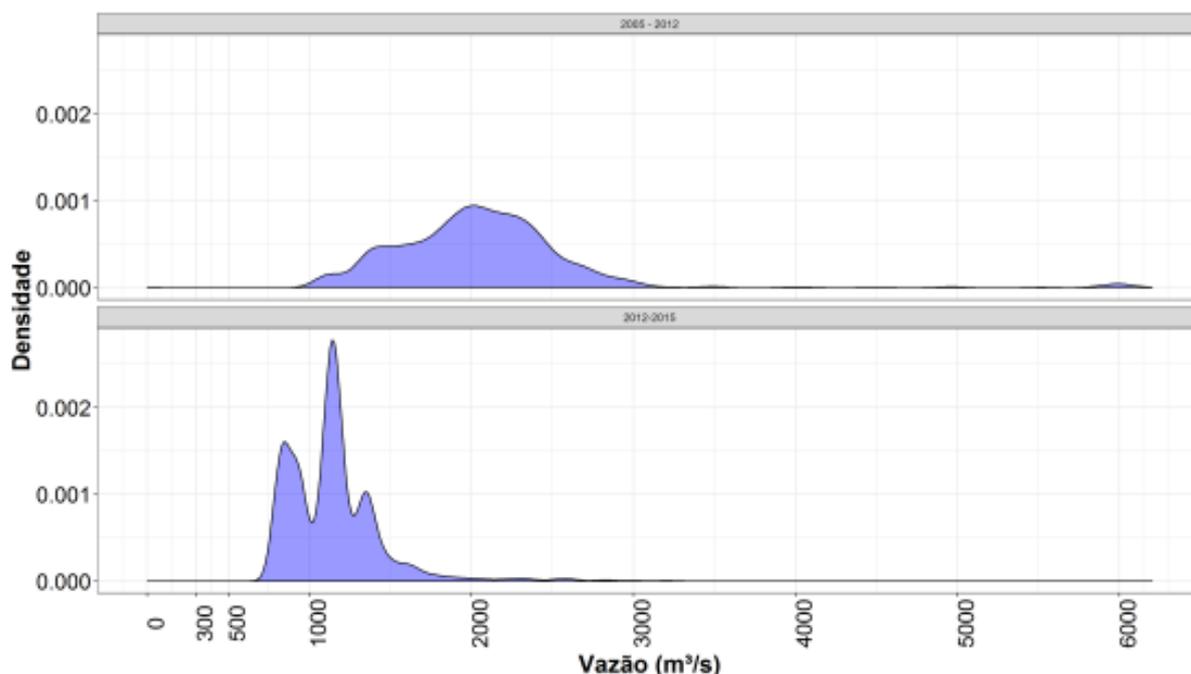


Figura 32 - Vazões defluentes de Sobradinho (2005-2016), agrupadas para os anos anteriores a 2012 (acima) e posteriores a 2012 (abaixo)

A Tabela 5, onde estão expostos os dados referentes aos quantis representados na Figura 33, acima, demonstra o mesmo perfil de mudança de comportamento dos dados, ou seja, de concentração dos dados em uma faixa menor de valores. A partir destes dados pode ser observado que o valor da mediana, para o período posterior ao ano hidrológico de 2012, é próximo a 1100 m<sup>3</sup>/s.

Outro fato a ser considerado é que no período anterior ao ano hidrológico de 2012, o valor de 1100 m<sup>3</sup>/s correspondia a menos de 1% das vazões defluentes ao reservatório de Sobradinho, porém no segundo período, devido a redução das vazões afluentes, esta vazão corresponde a cerca de 50% dos dados.

Tabela 5 - Medianas da Vazão Afluente a Sobradinho Agrupadas por Mês

Período	1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	99%
2005-2012	1112.91	1332.10	1415.00	1723.00	2031.50	2318.25	2606.90	2921.81
2012-2015	817.00	823.00	829.00	932.00	1141.00	1252.00	1425.00	2357.00

Fonte: ONS (2016)

#### **7.2.4 Análise das Vazões Defluentes de Sobradinho utilizando Wavelets**

A utilização de wavelets para a reconstrução da série de vazões defluentes de Sobradinho foi vista como satisfatória, apesar do visível afastamento da curva aos dados a partir de 2013. Note que nos últimos três anos analisados (2014 - 2016), as vazões mínimas foram reduzidas sucessivamente por efeito de Resoluções, o que pode ser uma das causas da perda gradativa da precisão da modelagem devido à natureza dos dados (Figura 34).

Quanto ao espectro de energia das ondaletas, percebe-se que antes mesmo das reduções naturais das vazões afluentes, já se havia uma forte regularização da vazão, observada na Figura 34 através das baixas energias para todos os períodos a partir de 2010. Esta regularização se tornou ainda mais forte a partir de 2014, com o lançamento de sucessivas resoluções, quando as amplitudes para qualquer um dos períodos inferiores a um ano se tornam próximas a zero.

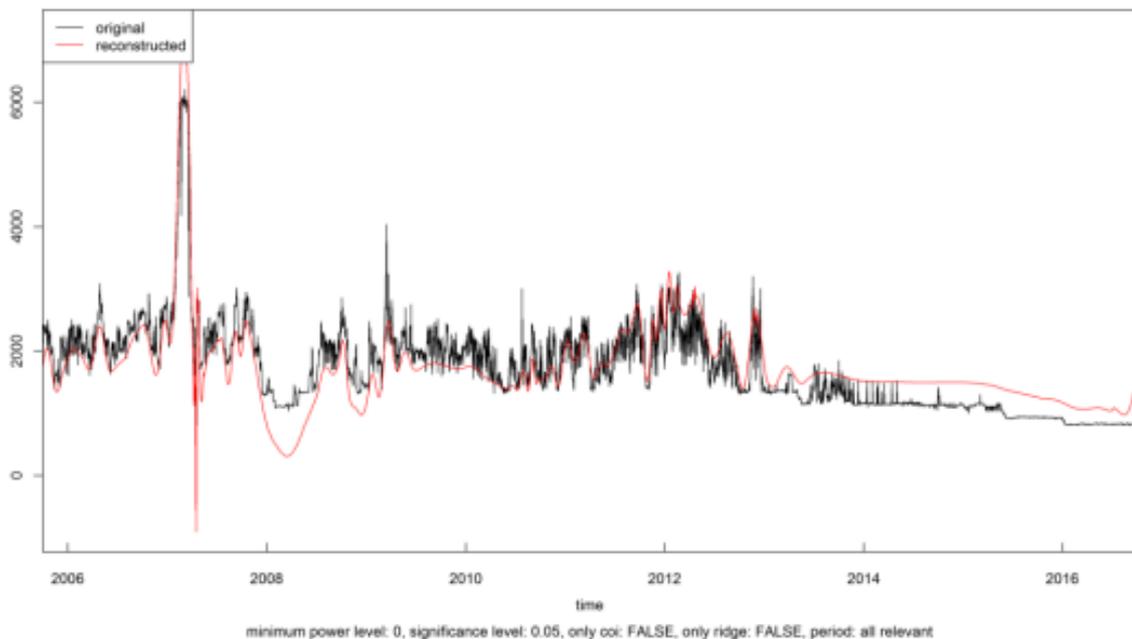


Figura 33 - Reconstrução das vazões defluentes do reservatório de Sobradinho utilizando wavelets

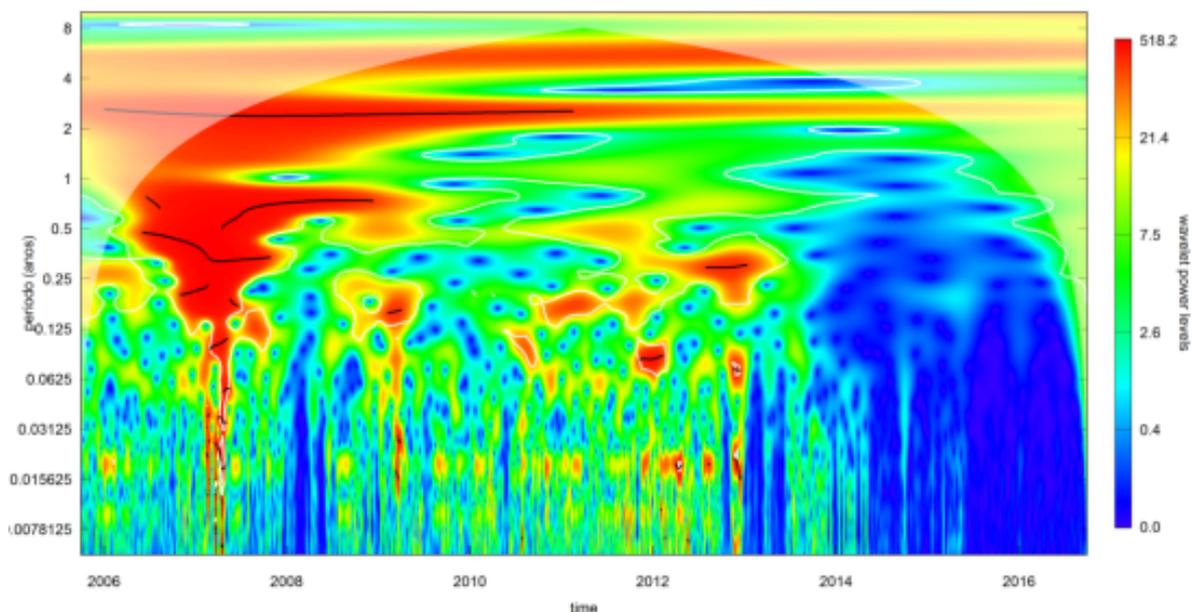


Figura 34 - Espectro de energia das wavelets que representam a vazão defluente do reservatório de Sobradinho

Ao observar mais de perto as amplitudes referentes ao intervalo de tempo em destaque, fica mais perceptíveis que reduções ocorreram também nos outros anos analisados, sendo mais expressivo no ano de 2016, onde a regularização da vazão se tornou mais intensa e se observa pouca variação da vazão defluente, centrada no valor mínimo estabelecido por Resolução.

Ao se observar o efeito da regularização das vazões na reconstrução das *wavelets* nos períodos anteriormente trabalhados, têm-se vazões fixas em patamares com amplitudes próximas a zero a partir de 2013 (Figura 35 e Figura 36). É pertinente, também, acrescentar que, mesmo antes do atual momento crítico, as amplitudes para períodos menores ao mensal se apresentavam perto do valor nulo. As amplitudes das vazões defluente são observadas, principalmente, nas estações úmidas úmidos anteriores a 2013, retratando operações diferenciadas de defluência para garantir o volume de espera para as cheias que poderiam vir a seguir.

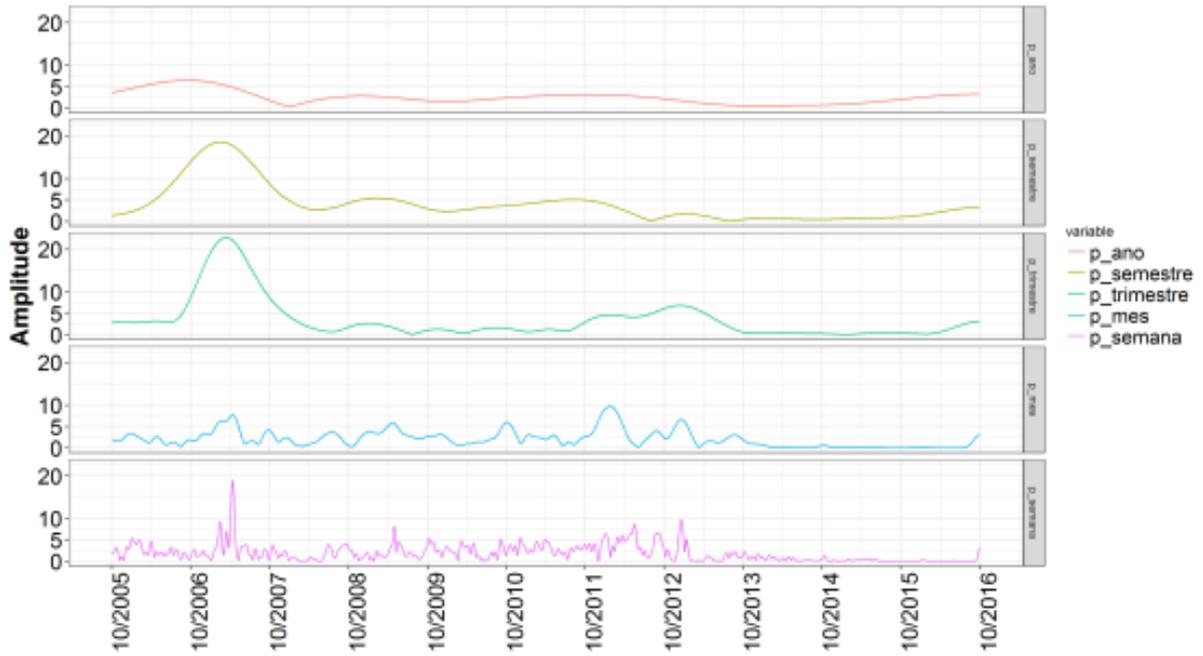


Figura 35 - Amplitudes das wavelets que representam a vazão defluente do reservatório de Sobradinho

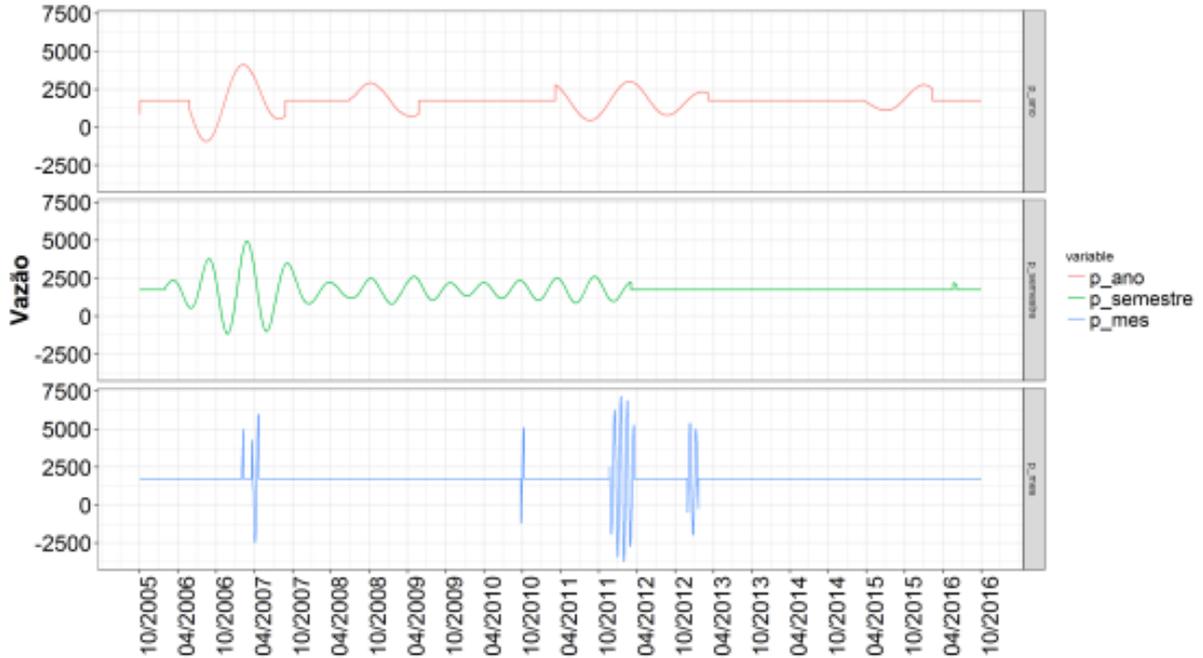


Figura 36 - Reconstrução das wavelets que representam determinados períodos e sua vazão defluente para o reservatório de Sobradinho

Os resultados das transformadas wavelets para o sinal correspondente a vazão regularizada de Sobradinho, se apresentam como um típico caso onde o sistema perde a sua variabilidade nos momentos de seca.

A partir de 2013, o transiente, demonstrado no espectograma, aponta para uma predominância de amplitudes próximas a zero para uma faixa de frequência que corresponde ao período diário até o período anual.

A despeito deste resultado demonstrar um forte impacto da operação deste reservatório nas características temporais e frequenciais do sistema, ele não é capaz de exibir a sincronização entre a vazão afluyente e defluyente, para isto são aplicadas as transformadas de crosswavelets a seguir.

#### ***7.2.5 Análise da Relação entre as Vazões Afluentes e Vazões Defluentes de Sobradinho utilizando Crosswavelets***

Quanto ao espectro da coerência entre as vazões afluentes e defluentes de Sobradinho, percebe-se pouca congruência para períodos inferiores a um ano (Figura 37).

Na Figura 38 são representadas as coerências a partir dos períodos anuais, semestrais, trimestrais e mensais. Desta representação se encontra um padrão de baixos valores de coerência para os dois últimos períodos, mostrando a não sincronicidade da operação do reservatório, para estes, e as condições naturais a jusante.

O período semestral é aquele que apresenta as maiores coerências, porém a estas estão atreladas grandes variações. Estes valores mais altos de coerência são relacionados justamente a sincronia da elevação e redução do nível do reservatório a condições hidroclimáticas que são observadas, por exemplo, pela distinção entre o período chuvoso e outro seco.

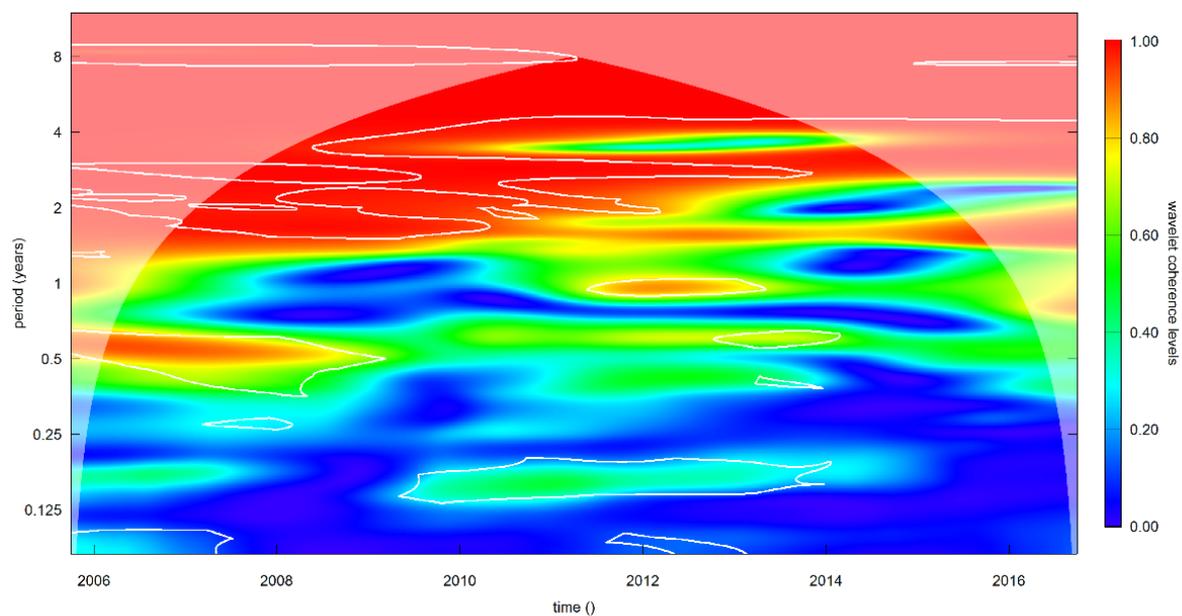


Figura 37 - Espectro de Coerência entre a Vazão Afluente e Vazão Defluente do reservatório de Sobradinho

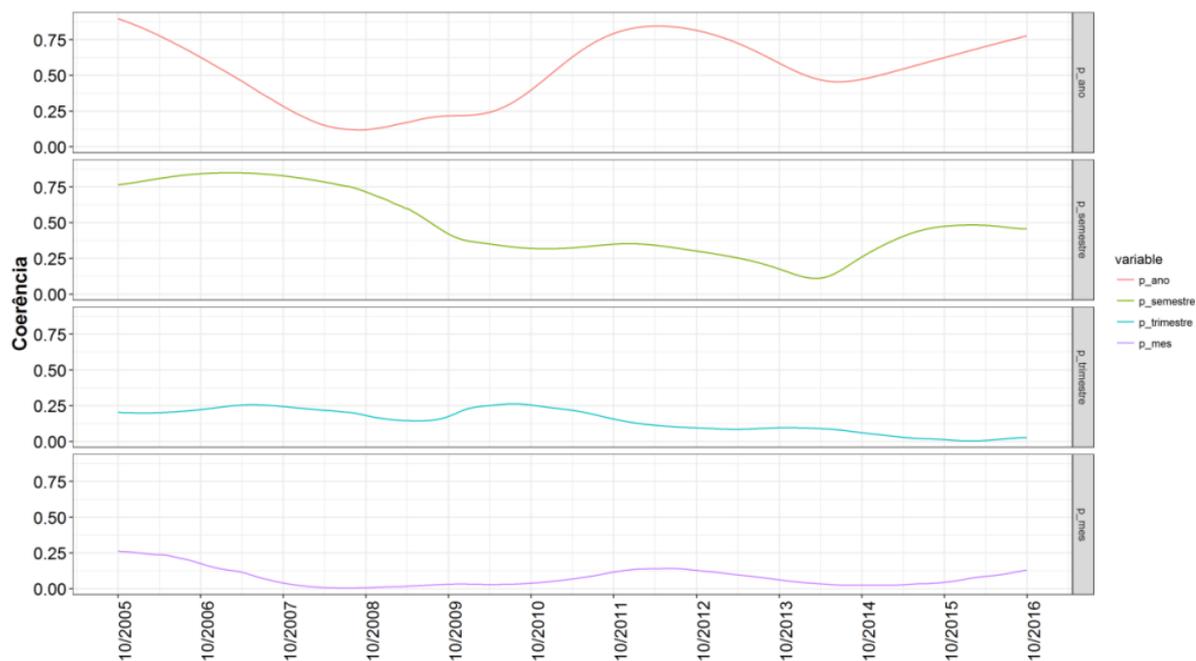


Figura 38 - Coerências seguindo determinados períodos entre a Vazão Afluente e Vazão Defluente de Sobradinho

É importante pontuar que diferentemente dos resultados obtidos anteriormente, em análise ao reservatório de Três Marias, a coerência entre as vazões afluentes e

defluentes de Sobradinho possuem uma variação suave entre os anos de 2013 e 2014.

Porém, a coerência encontrada diverge do apresentado em Shiau e Huang (2014), no qual a sincronicidade entre a vazão afluente e defluente se apresentavam para períodos maiores que uma semana, enquanto que para o reservatório de Sobradinho, este valor se faz apresentável para períodos semestrais.

Uma das hipóteses é que, de forma distinta ao reservatório de Três Marias, no reservatório de Sobradinho as reduções de vazão defluente, em série, só ocorreram a partir de 2015. Outra interpretação a este fato, se deve à relação entre o grande volume total de Sobradinho e a vazão defluente deste, esta característica garante maior resiliência ao período seco, podendo assim manter um nível de vazão defluente sem grandes variações por um tempo mais longo.

### **7.3 Mensuração da diferenciação entre os regimes de vazão**

#### ***7.3.1 Índice de Alteração Espectral (ISA)***

Partindo do pressuposto que há uma seca a partir de 2012, divide-se a análise em dois intervalos de tempo, centrados no ano em questão, a fim de averiguar se a técnica de mensuração proposta possui alguma efetividade na diferenciação entre os períodos e como isto pode ser interpretado.

Para o reservatório de Três Marias, o índice de Alteração Espectral (ISA) apresentou maiores valores em momento anterior ao ano de 2012, com exceção de 2005. Nesta técnica as diferenças absolutas entre as energias são privilegiadas, com isto a mensuração das diferenças de operação em períodos secos assume pequenos valores, em decorrência da diminuição do espectro de energia da vazão afluente e defluente ao reservatório (Figura 39).

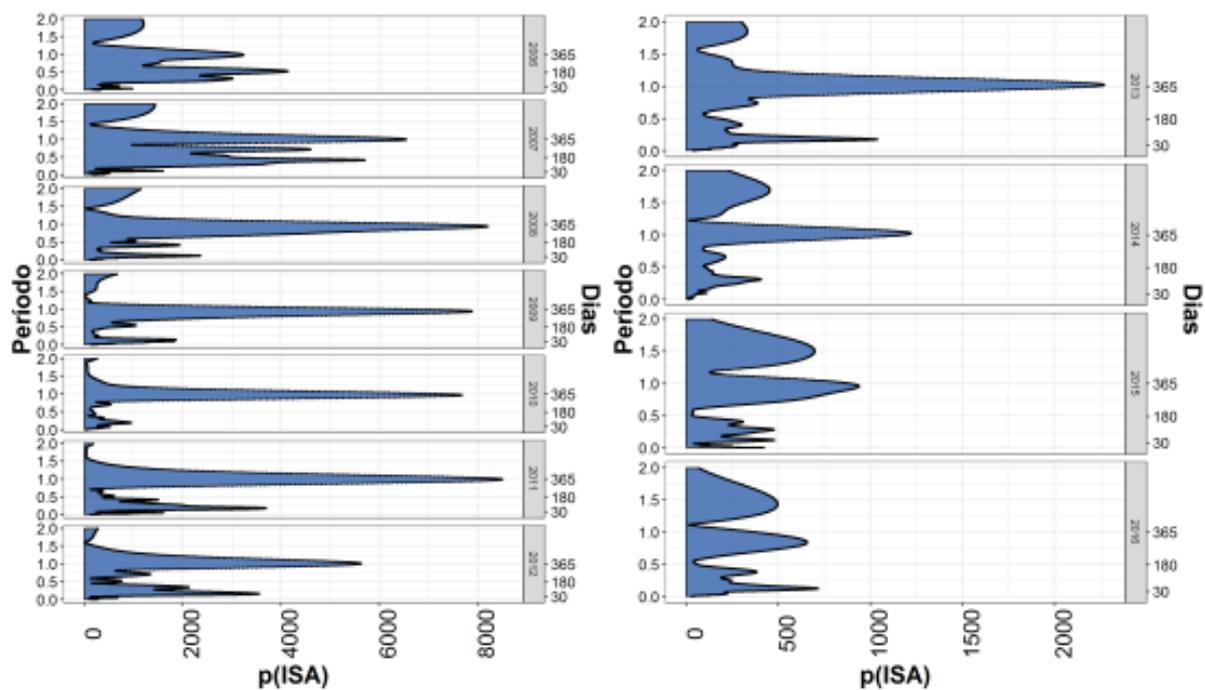


Figura 39 - Valor de ISA para o reservatório de Três Marias períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Adiciona a esta primeira avaliação, é feita uma análise dos valores do ISA perante a faixas de períodos, a fim de se observar em quais destes as diferenças antes e depois de 2012 são mais notáveis.

Observando as Figura 40 e Figura 41, percebe-se que, para a primeira, há diferenciação entre os valores do ISA para os anos do estudo. É possível pontuar, também que em momento posterior a 2012 não são observados valores do ISA superior a 500.

Deve-se, portanto, acrescentar que esta medida, por considerar o módulo das diferenças entre os espectros de energia, acaba por dar menores valores de modificação do regime hídrico para as épocas de seca. Isto é justificável a partir da percepção da redução das amplitudes das *wavelets* que representam a vazão afluente e a vazão defluente nestes momentos.

Por outro lado, é imprescindível interpretar estes resultados à luz da realidade enfrentada. Os impactos causados no regime de vazões no momento de seca se apresentam mais notórios do que em outros regimes de vazão mais úmidos, uma

vez que, neste contexto de menor disponibilidade hídrica, os conflitos pelo uso da água para os diversos fins são acirrados.

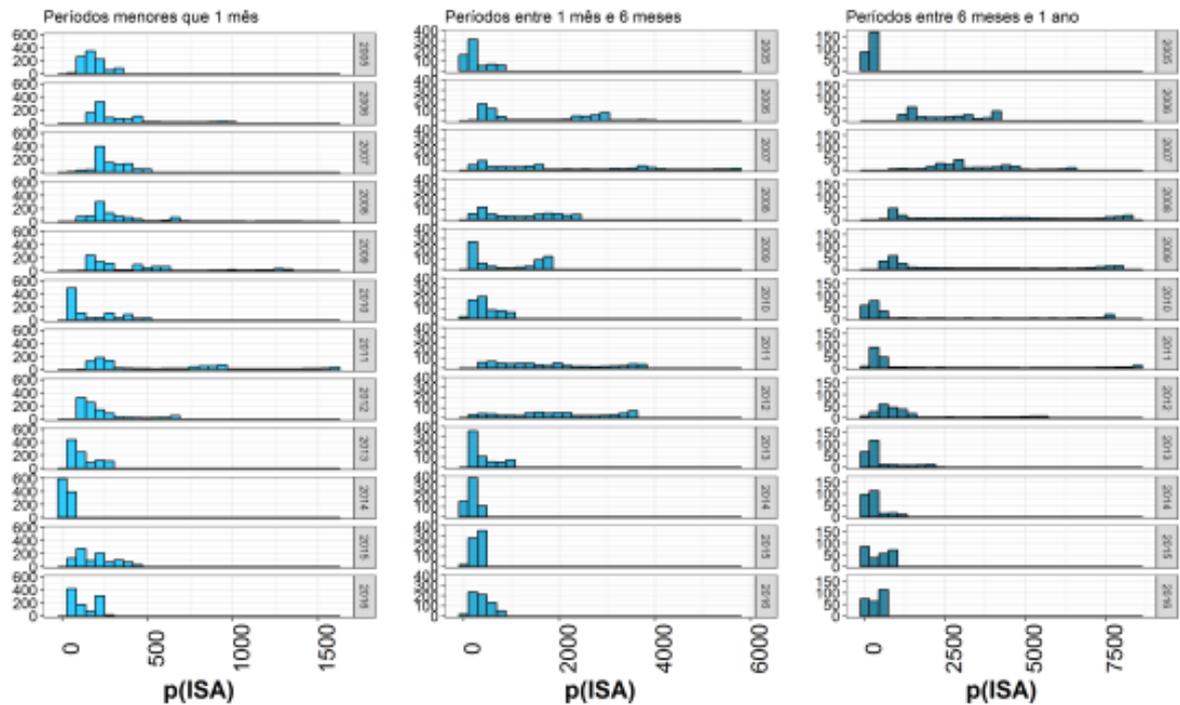


Figura 40 - Valor de ISA para o reservatório de Três Marias mediante os períodos selecionados

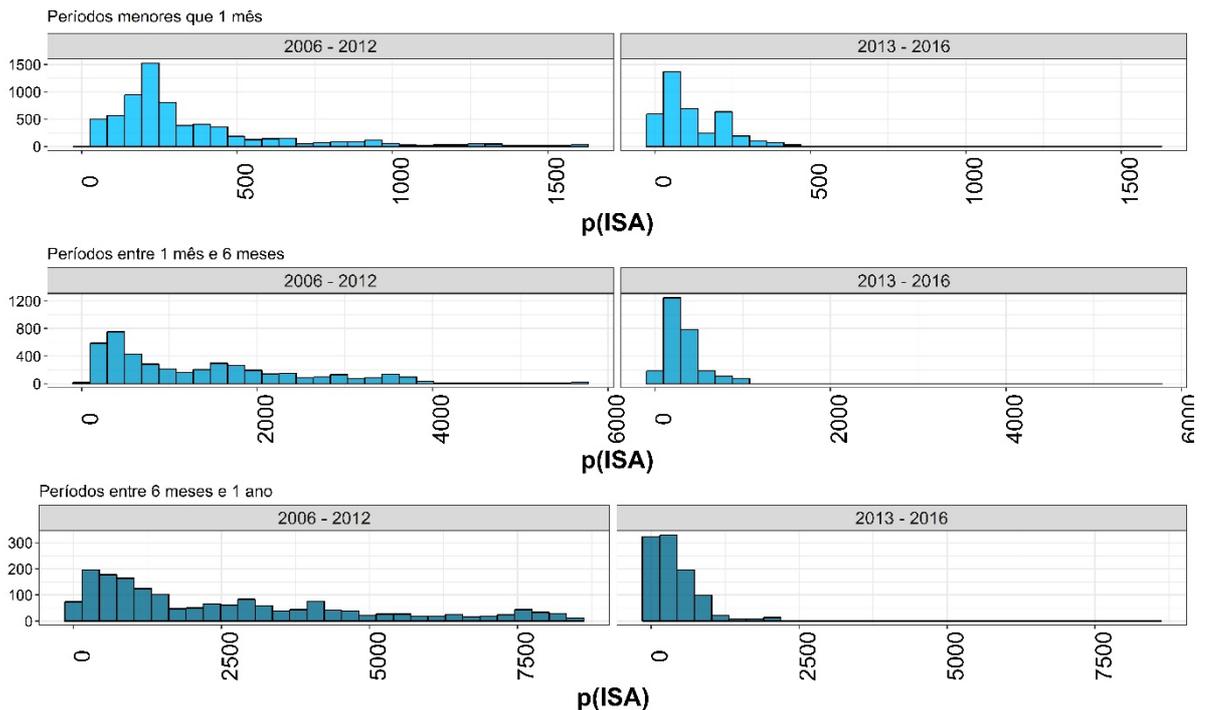


Figura 41 - Valor de ISA para o reservatório de Três Marias para os períodos em destaque divididos em dois intervalos de tempo

A incongruência entre os valores obtidos pelo ISA e a realidade observada, que fora citado acima, é visto também na análise do espectograma desta medida para o reservatório de Três Marias. Nesta se observa claramente que a partir de 2012 se observar relações mais favoráveis entre a vazão afluente e defluente, quanto que o contexto aponta para uma direção oposta, demonstrado inclusive pela não sincronicidade entre estas vazões (Figura 42).

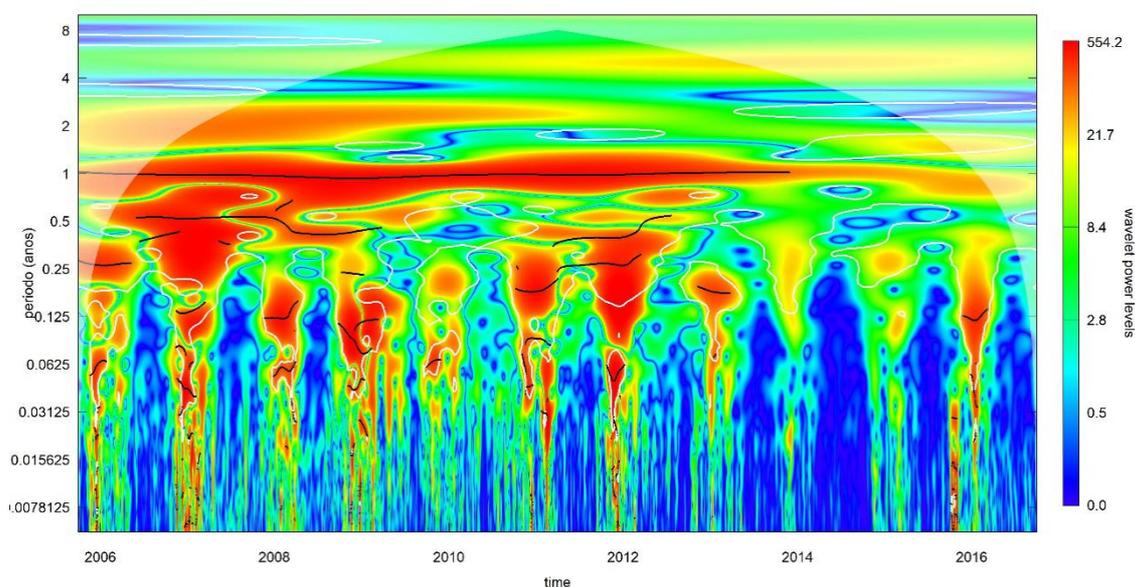


Figura 42 – Espectro dos valores de ISA referentes a transformada *wavelet* que representam a vazão afluente e defluente do reservatório de Três Marias.

Para o reservatório de Sobradinho, observa-se o mesmo padrão encontrado para o reservatório de Três Marias, onde nos momentos mais secos os valores do ISA são menores (Figura 43).

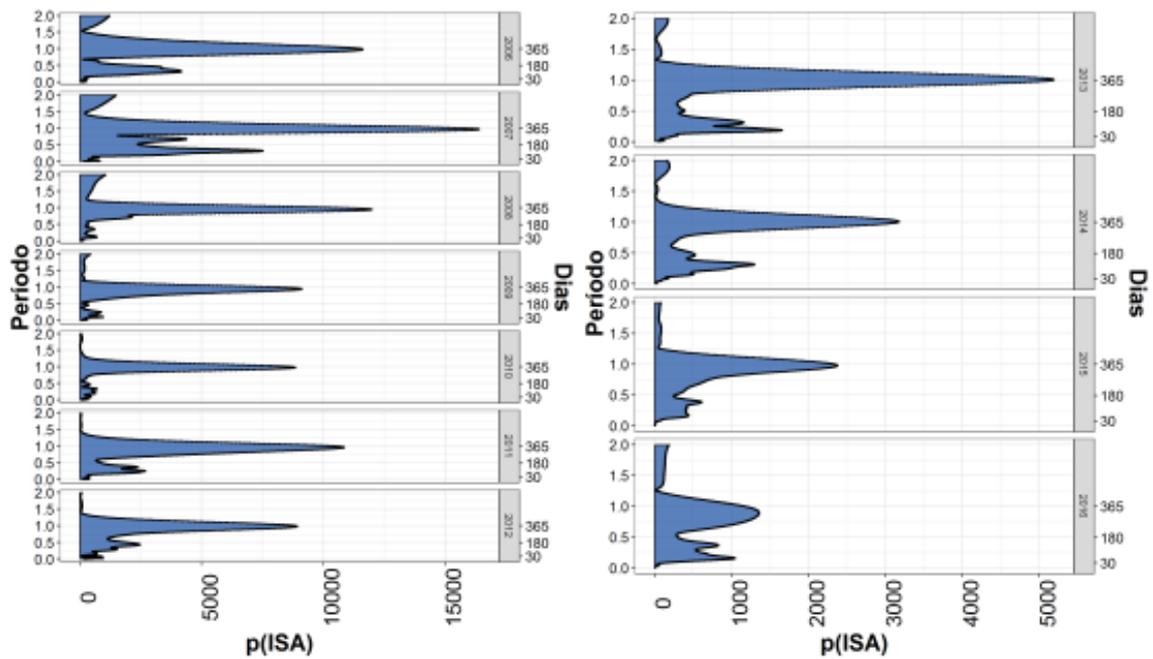


Figura 43 - Valor de ISA para o reservatório de Sobradinho para períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

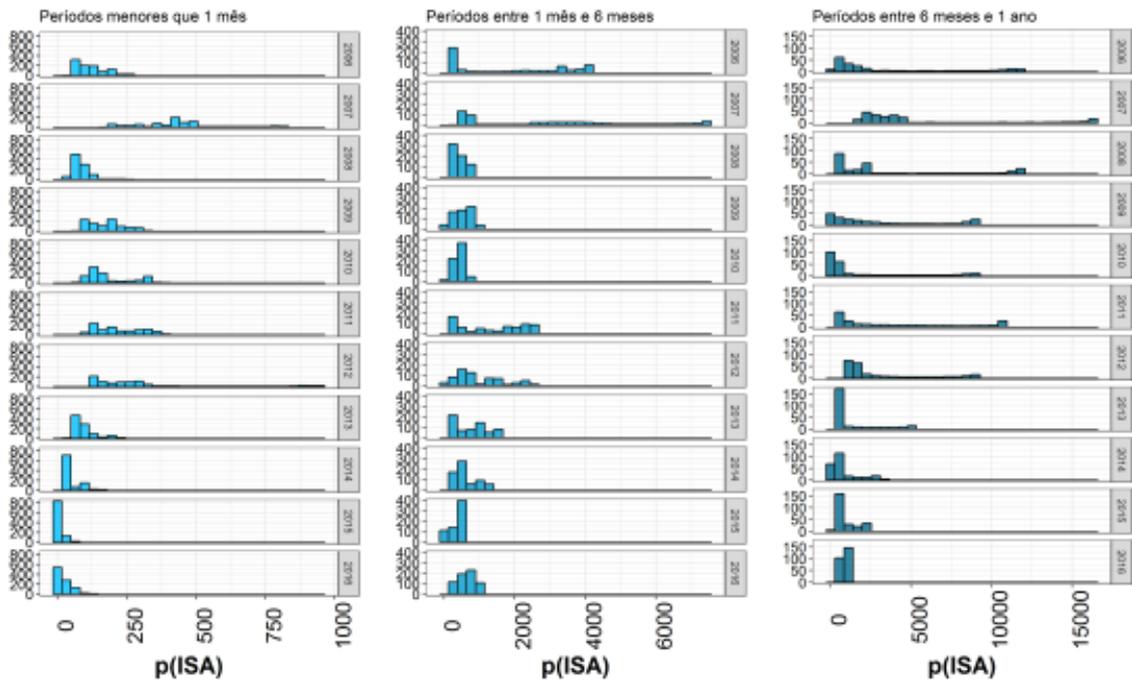


Figura 44 - Valor de ISA para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque entre 2006 e 2016

As diferenças entre os valores de ISA, divididas por faixas de períodos, para o reservatório de Sobradinho, são notáveis em todas as faixas pela distribuição dos

valores inferior do ISA. Resultado semelhante ao observado para o reservatório de Três Marias ( Figura 44 e Figura 45).

É importante notar, como citado acima, que a despeito desta técnica ser capaz de elucidar diferenças entre os períodos analisados, é observado, frente a realidade, que sua mensuração representa os anos secos como aqueles nos quais os impactos sobre o regime de vazão são menores, fato que contradiz a realidade.

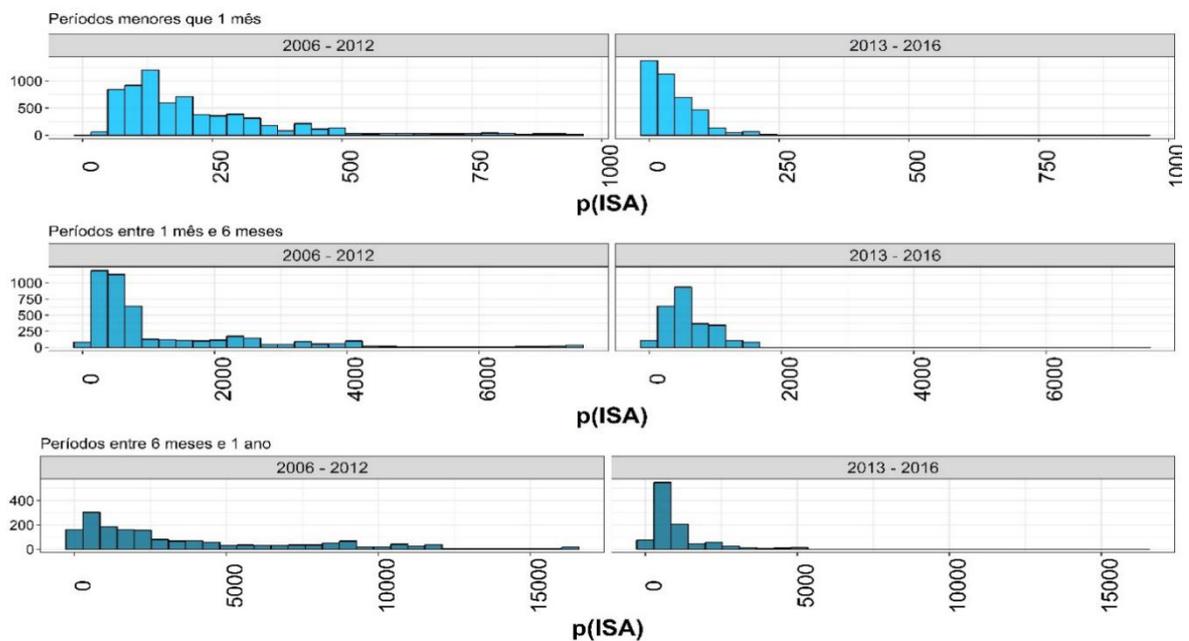


Figura 45 - Valor de ISA para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque entre 2006 e 2016 (ONS, 2017)

Ao se observar o espectro gerado pela medida ISA, Figura 46, observa-se o que fora comentado anteriormente quanto a sua resposta frente ao período de seca, na qual esta metodologia aponta para a redução do efeito, quando o que se ocorre na realidade é o agravamento destes.

Deve-se salientar que originalmente esta medida fora proposta de forma a agregar um intervalo de tempo, como semestral, e criar um indicador pautado nas relações entre suas energias, por isto este resultado destoa do apresentado por Shiau e Huang (2014).

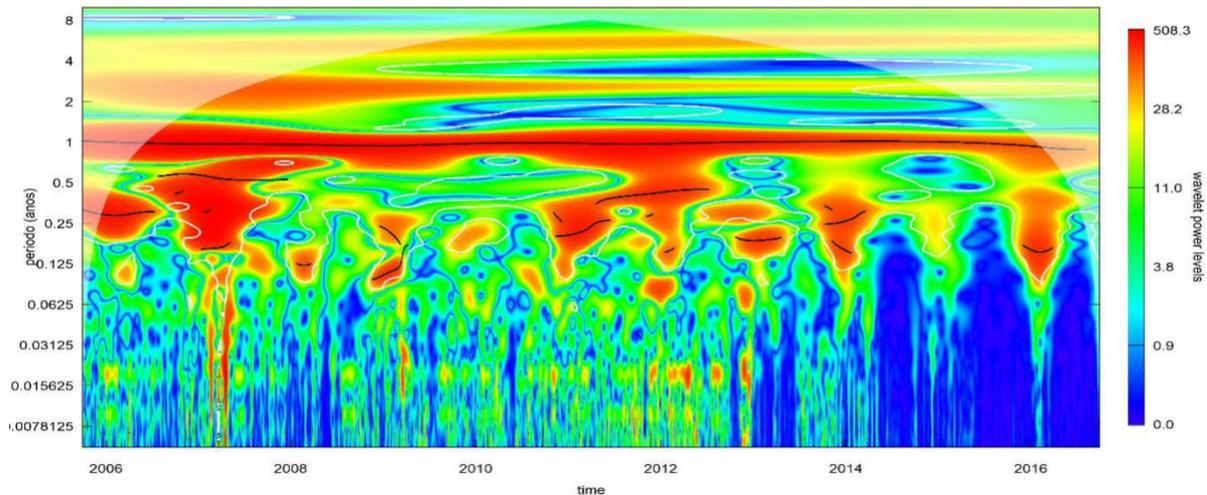


Figura 46: Espectograma gerada pela medida ISA para a análise de vazões aflentes e defluentes do reservatório de múltiplos usos de Sobradinho.

Deve-se ressaltar que em Shiau e Huang (2014), foi possível observar um padrão para os valores do ISA, onde para valores maiores que 5 se tinha características hidrológicas úmidas e para valores inferiores a 5 se relacionavam a características hidrológicas secas, padrão não encontrado na dissertação em questão.

Pontua-se, também, que a presente dissertação não teve o intuito de resumir as energias e suas frequências a ponto de obter um valor único para mensurar a modificação promovida pela operação dos reservatórios em um regime de vazão afluente.

Ressalta-se, também, que o teste de Kolmogorov - Smirnov para a diferença das funções de densidades de probabilidade apontam, com p valor menor que 0,5, que as distribuições, para todos os períodos utilizados, são distintas para período anterior e posterior a 2012, considerando cada reservatório separadamente.

### **7.3.2 Média Global do Espectro de Energia (GWPS)**

No GPWS, as diferenças, entre o intervalo de ano anterior a 2012 e posterior a este, se concentram nas faixas inferiores dos períodos, evidenciando o impacto da operação no momento de seca nos processos de baixo período, ou seja, aqueles

que ocorrem com periodicidade inferior a um mês; ressalta-se, porém, que esta ferramenta tem, segundo Wu et al. (2015), limitada capacidade de diferenciar graus de diferenciação.

Para o reservatório de Três Marias esta não semelhança é muito clara, principalmente, para períodos inferiores a um mês, a partir de 2012. Como limitante, desta ferramenta, devida a sua formulação matemática, surge a sua baixa capacidade de evidenciar diferenças para períodos maiores, nos quais a relação entre as amplitudes é menor (Figura 47).

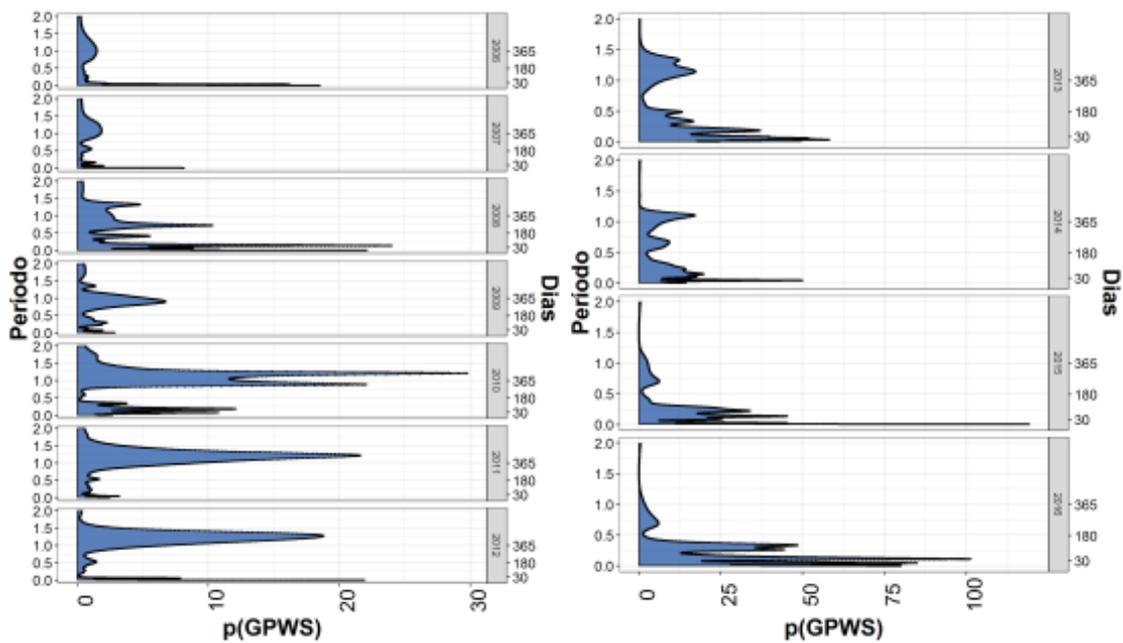


Figura 47 - Valor de GPWS para o reservatório de Três Marias períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

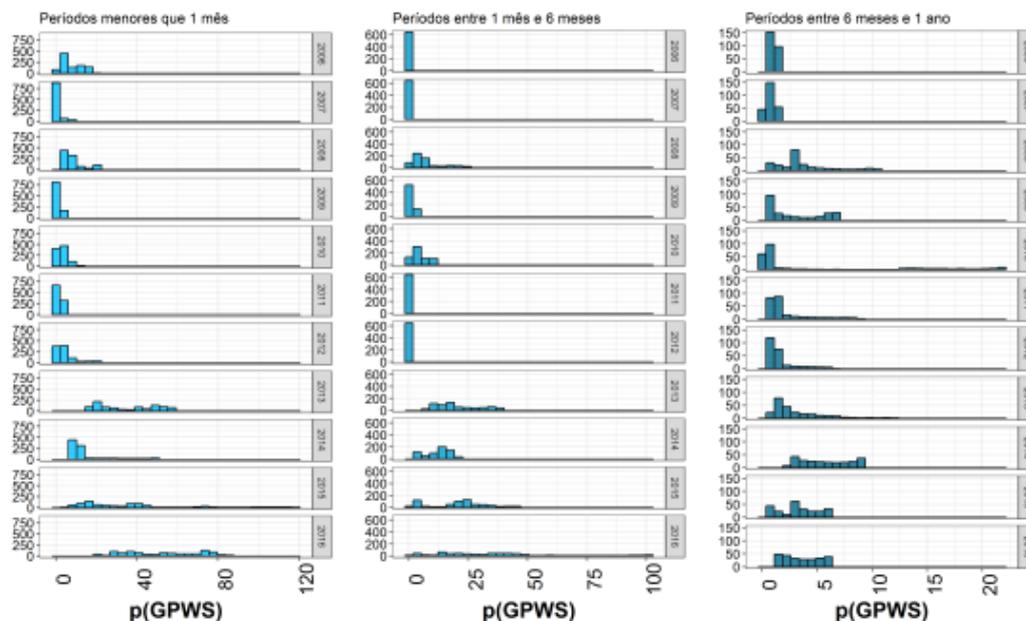


Figura 48 - Valor de GPWS para o reservatório de Três Marias para os períodos em destaque entre os anos de 2006 e 2016

A divisão por faixa de períodos corrobora com a questão posta acima, na qual este instrumento de mensuração de diferenciação entre regimes se apresenta satisfatório para períodos baixos, faixa no qual se trabalhou, porém com pouca capacidade de representar as reais diferenças entre estes períodos (Figura 48 e Figura 49).

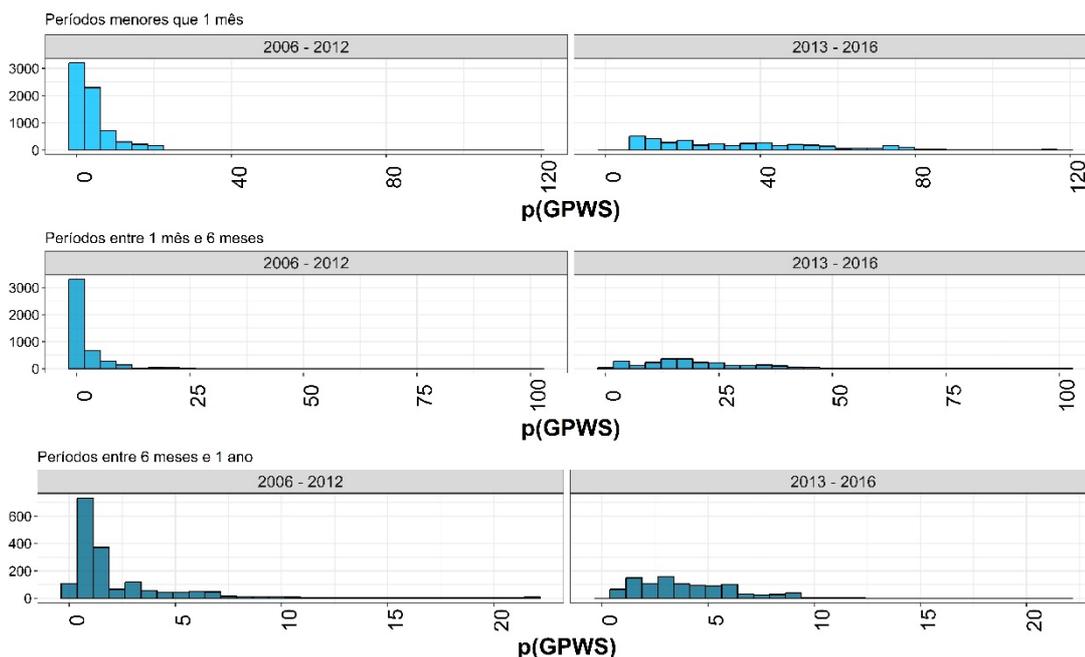


Figura 49 - Valor de GPWS para o reservatório de Três Marias para os períodos em destaque para dois intervalos de tempo centrados em 2012

Ao se observar o espectro de GPWS, Figura 50, referentes a transformada wavelet que representam as vazões afluentes e defluentes de Três Marias, percebe-se que para frequências maiores que a de interesse deste estudo, se observa uma grande discrepância na valoração destas razões de energias, como fora comentado em Wu et al. (2015)

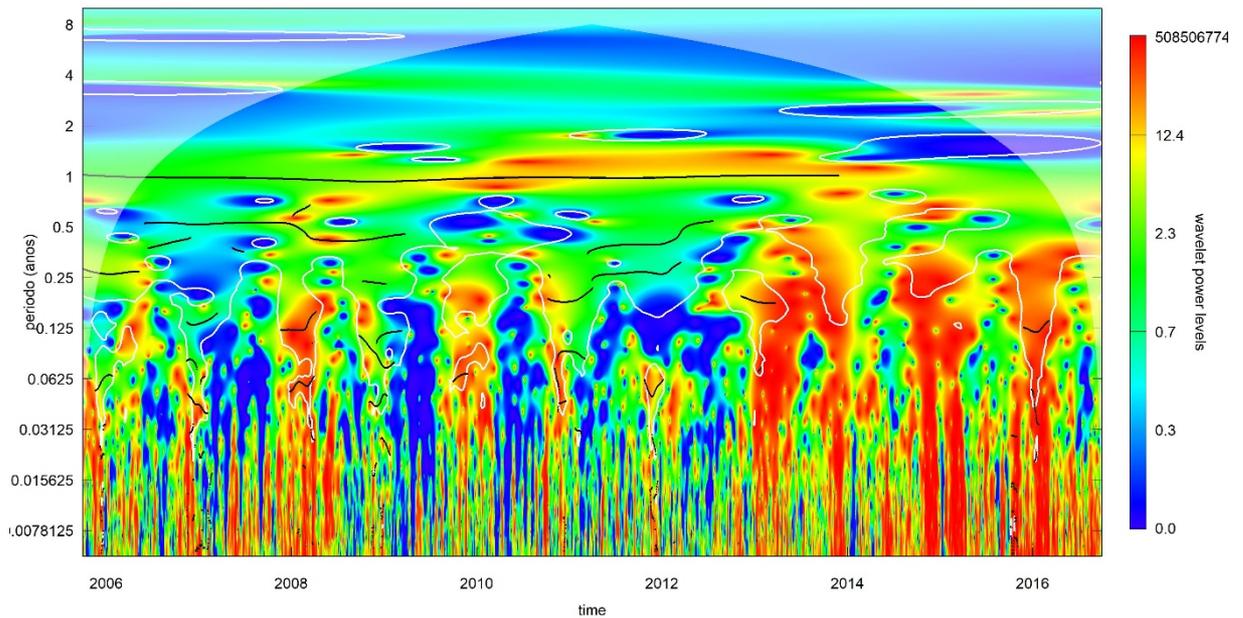


Figura 50 – Espectro de GPWS para as transformadas wavelets que representam as vazões afluentes e defluentes do reservatório de múltiplos usos de Sobradinho.

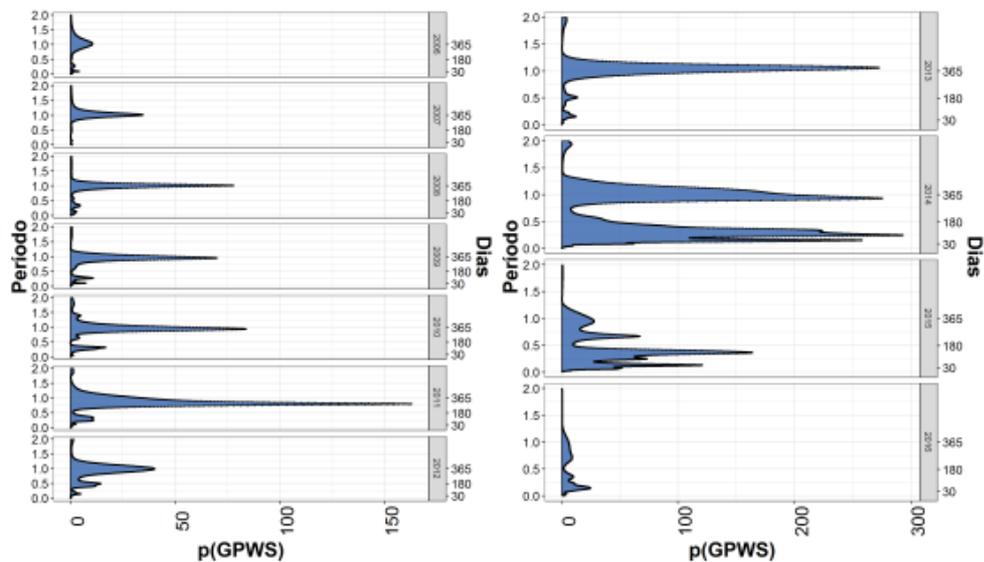


Figura 51 - Valor de GPWS para o reservatório de Sobradinho para períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

No caso do reservatório de Sobradinho, a distribuição do GPWS por ano contribui muito pouco para a diferenciação no impacto da operação dos reservatórios ano a ano, tendo em vista o período seco após 2012 (Figura 51). Deve-se, novamente, pontuar que esta ferramenta de mensuração tem limitada capacidade de diferenciar graus de modificação deste regime.

Ao se observar os GPWS por faixa de período e por ano (Figura 52 e Figura 53), encontra-se que existe apenas diferenciação nos anos de 2014 e 2015, enquanto que nos outros, independente do período, pouco pode ser concluído.

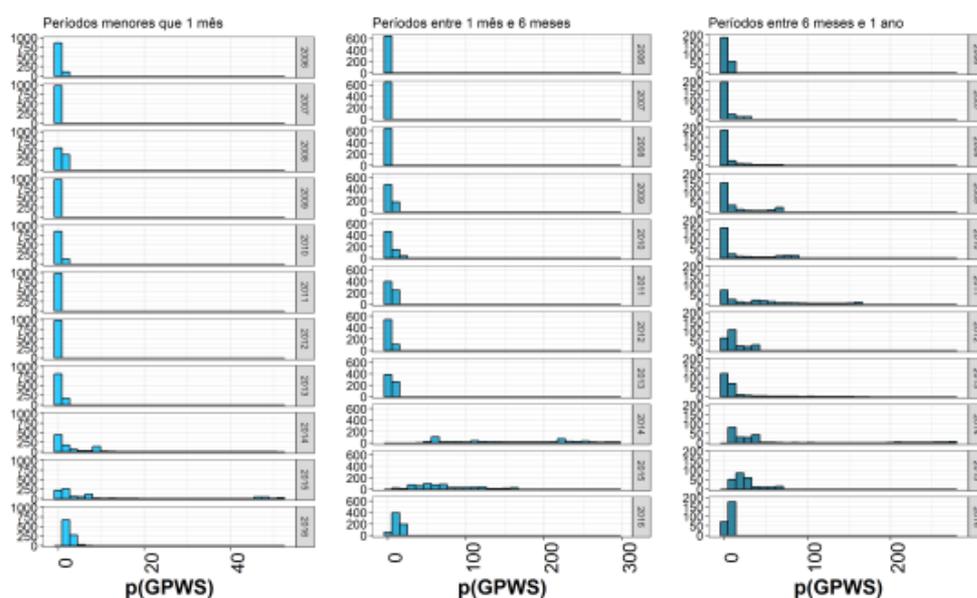


Figura 52 - Valor de GPWS para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque entre 2006 e 2016

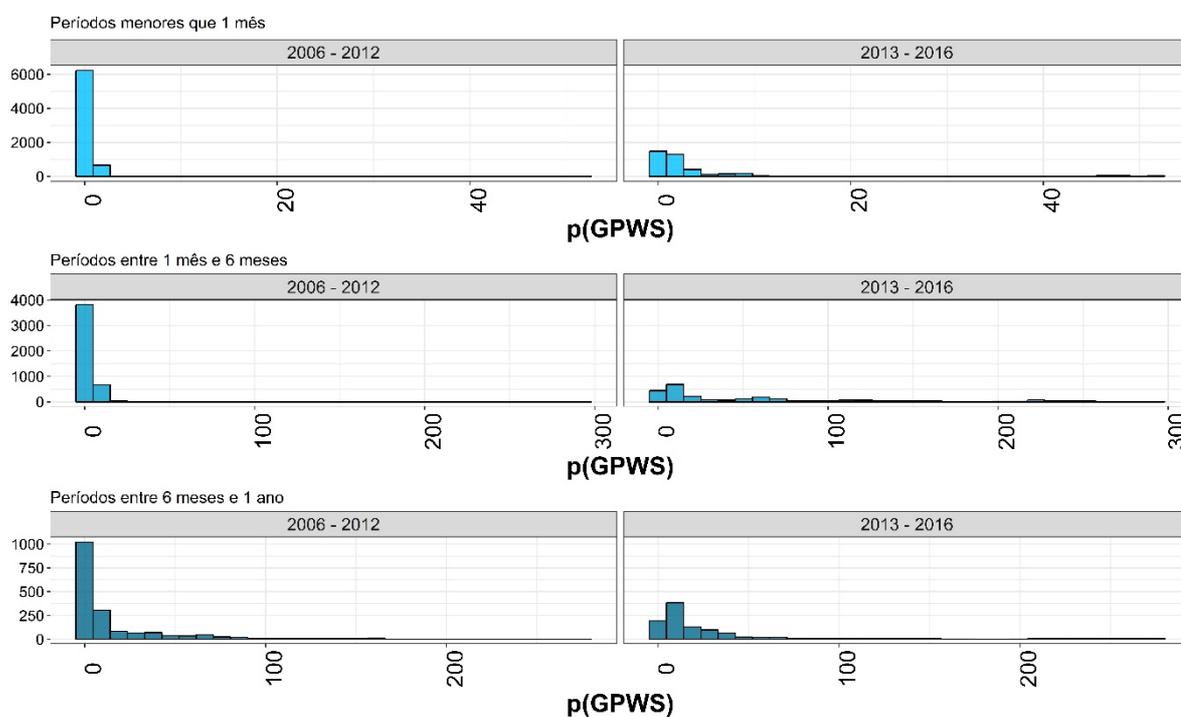


Figura 53 - Valor de GPWS para o reservatório de Sobradinho para os períodos em destaque divididos em momento anterior e posterior a 2012

Segundo Wu et al (2017) o GPWS exibe como um fator limitante a sua incapacidade de representar os níveis de diferenças entre os espectros das *wavelets*, que no caso em questão representam a vazão afluente e defluente, de Sobradinho. Esta afirmativa fica mais evidente, ao se observar o espectrograma gerado pelo GWPS, onde a amplitude dos 80% maiores valores, topo da escala de cores, exibe uma ordem infinitamente superior em comparação a representação das outras faixas de valores (Figura 54).

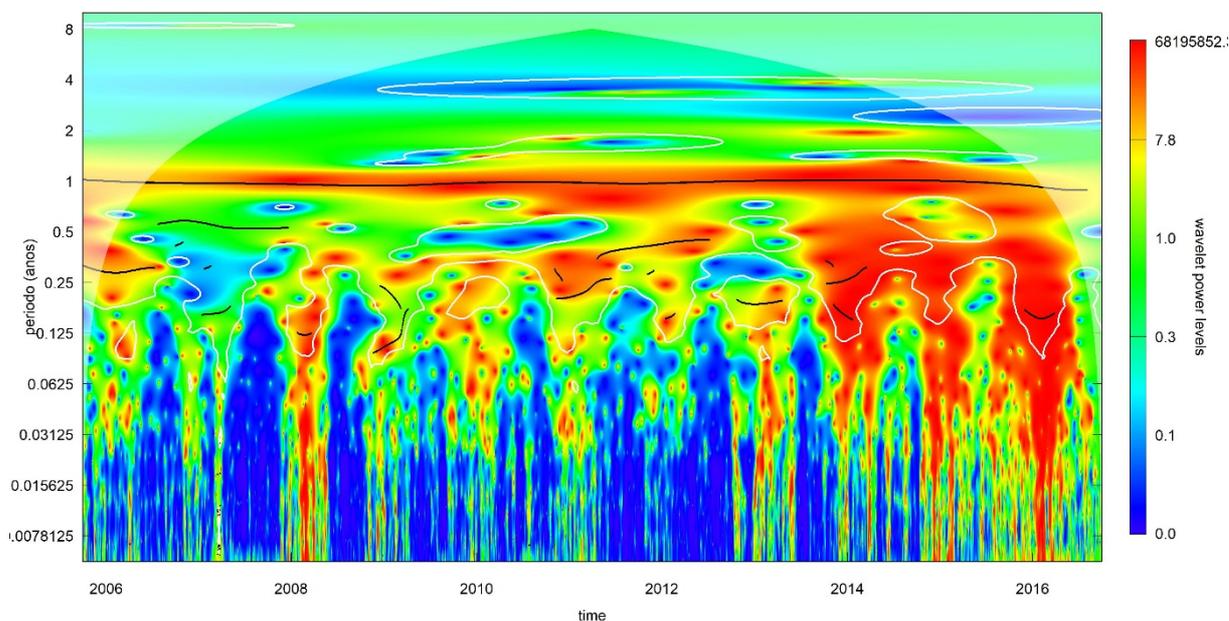


Figura 54: Espectro de GPWS para as *wavelets* que representam a vazão afluente e defluente do reservatório de Sobradinho.

Assim como o observado por Wu et al (2015), o GPWS se apresenta como um rápido indicador de alteração de um regime de vazões, porém, se limita por ser uma espécie de razão entre duas médias. No estudo apresentado em Wu et al (2015), encontrou-se como um dos limitantes da aplicação desta metodologia o grande desvio padrão da série de vazões, principalmente das vazões defluentes, realidade encontrada, também, nos dados analisados nesta dissertação.

Quanto ao uso do teste estatístico de Komolgorov - Smirnov, observa-se que para todos os períodos estudados existem diferenças significativas, p valor menor que 0,5, entre o período anterior e posterior a seca, corroborando que este é um bom indicador expedito para a situação em análise, porém não é capaz de representar, como proposto por Wu et al (2015), os diferentes níveis de diferença entre os espectros de energia da vazão afluente e defluente.

### **7.3.3 Desvio entre os espectros de energia (GDPWS)**

O GDWPS se mostrou eficiente para diferenciar os intervalos pré-seca e pós-seca (2012) em diversos períodos. Isto se deve à capacidade do GDPWS de comparar e

evidenciar diferentes graus de alteração no regime de vazões pela comparação entre estas.

Ao se analisar o reservatório de Três Marias, observa-se uma boa diferenciação com maior resolução que os anteriores e que é capaz de dar valores maiores ao período pós-seca, ao mesmo tempo em que é possível notar alterações do regime sob diversos períodos (Figura 55).

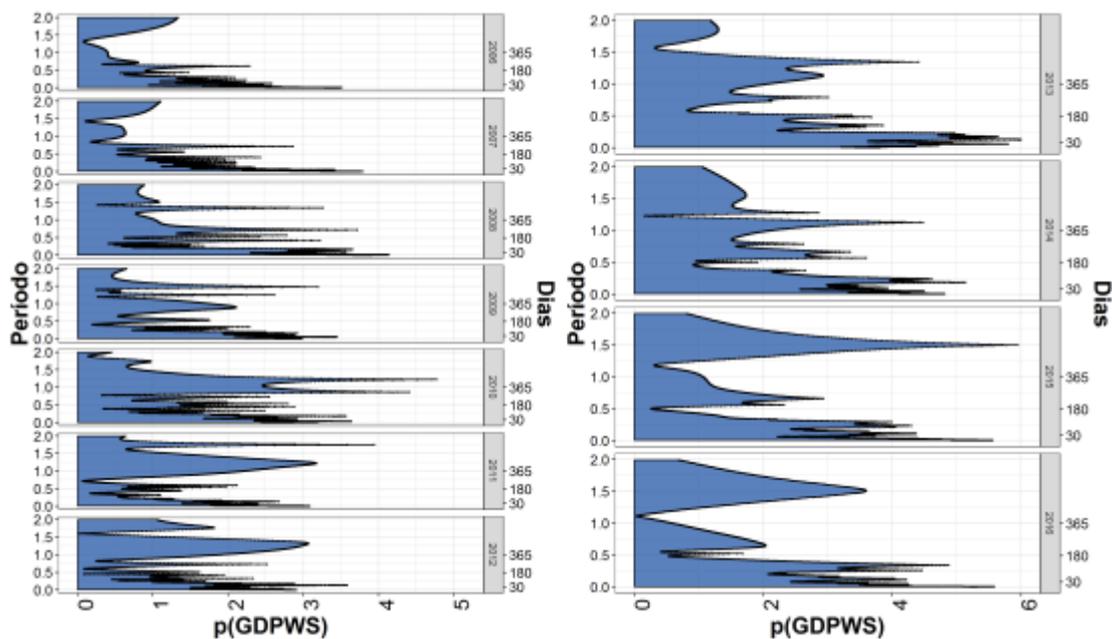


Figura 55 - Valor de GDPWS para o reservatório de Três Marias períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

A diferenciação por faixa de períodos facilita a observação da alteração dos regimes. Desta, nota-se que, para os períodos maiores que um mês, a alteração do regime de vazões se tornou mais intensa a partir de 2012, resultado que concorda com a realidade apresentada (Figura 56 e Figura 57).

No reservatório de Três Marias, ainda, é perceptível que para faixas de período entre 1 mês e 6 meses as diferenças entre o período seco, após 2012, e o período anterior são maiores. Uma possível explicação diz respeito a sazonalidade com a qual as variações da vazão defluente em Três Marias são definidas, apresentando, uma faixa de valores para a época úmida e outra para a época seca, a partir de 2014.

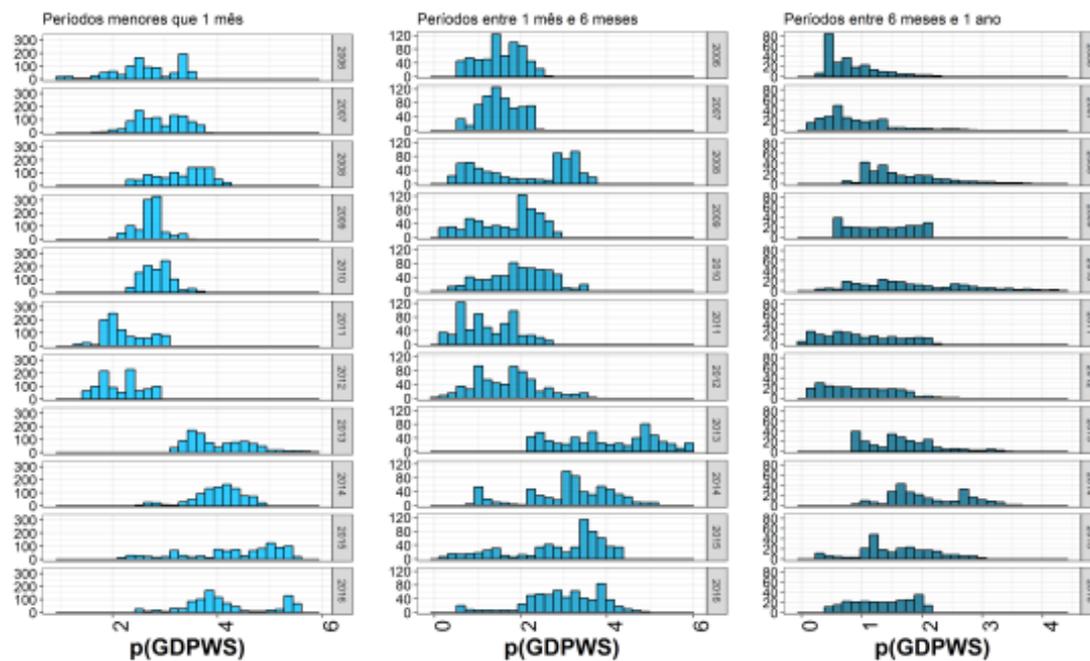


Figura 56 - Valor de GDPWS para o reservatório de Três Marias para os períodos determinados entre 2006 e 2016

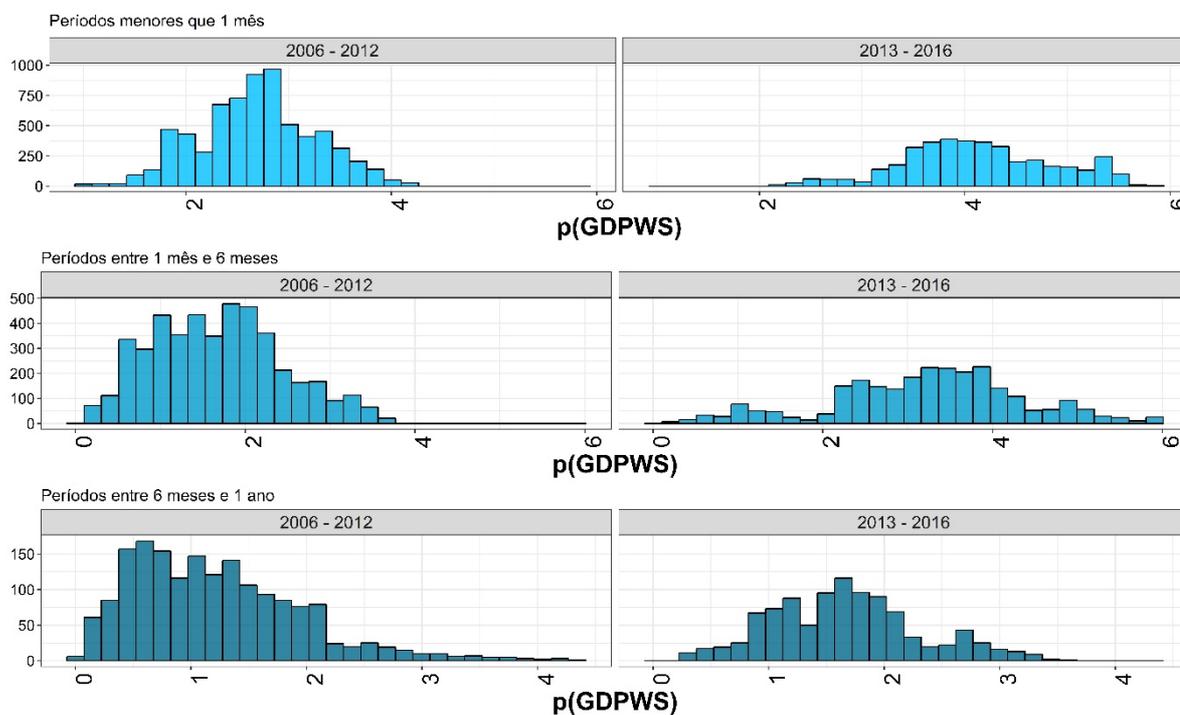


Figura 57 - Valor de GDPWS para o reservatório de Três Marias para períodos maiores que 1 mês e menores que 6 meses entre 2005 e 2015

Neste processo de análise é interessante se pontuar que uma medida ideal para diferenciação dos efeitos da operação dos reservatórios nas vazões a jusante destes, deve ter a capacidade de gerar resultados que se apresentem distintos. Fato este que fora confirmado pelo uso do teste de Kolmogorov-Smirnov, no qual foi

possível aceitar a hipótese alternativa que as funções de distribuição de probabilidade dos valores obtidos pelo GDPWS no momento anterior a 2012 e posterior a mesma data são distintos.

Outra forma de representar esta relação se faz através do escalograma do GDPWS, através deste é possível observar o maior efeito da operação dos reservatórios sobre o regime de vazão a jusante, a partir de 2014, afetando, drasticamente, períodos inferiores a três meses (Figura 58). Fato este, que intensificou o impacto da operação para eventos de pequena ordem de período.

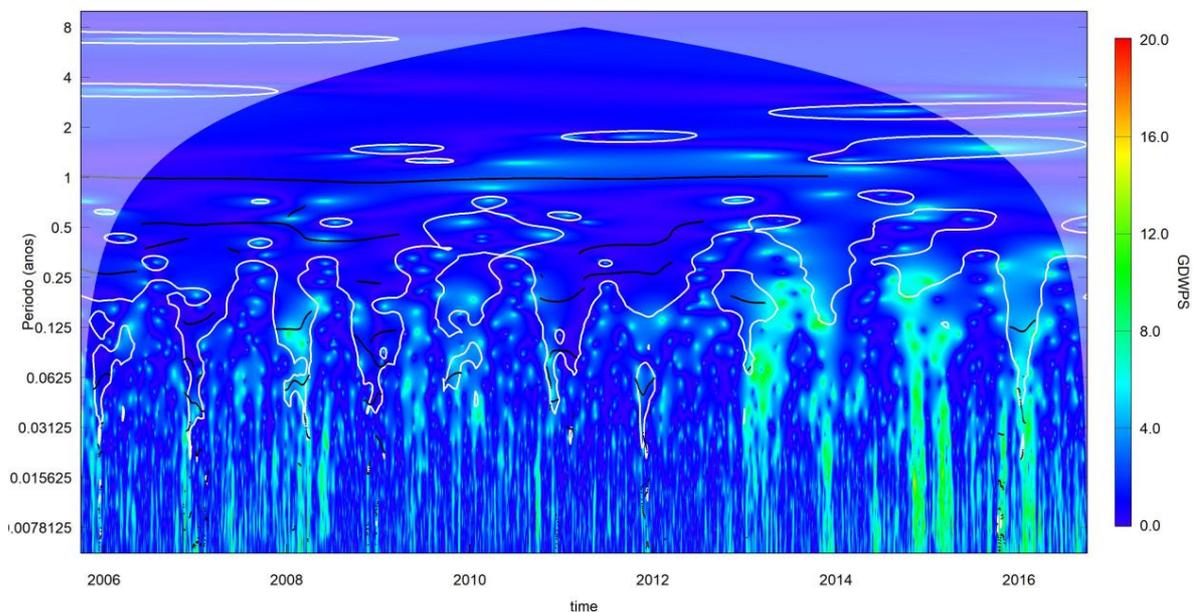


Figura 58 - Espectrograma do GDPWS para o reservatório de Três Marias

Ao se analisar a aplicação do GDPWS para os dados do reservatório de Sobradinho, as diferenças se apresentam de forma menos clara devido especialmente à capacidade de estoque de volume, a qual permite mais resiliência ao reservatório (Figura 59).

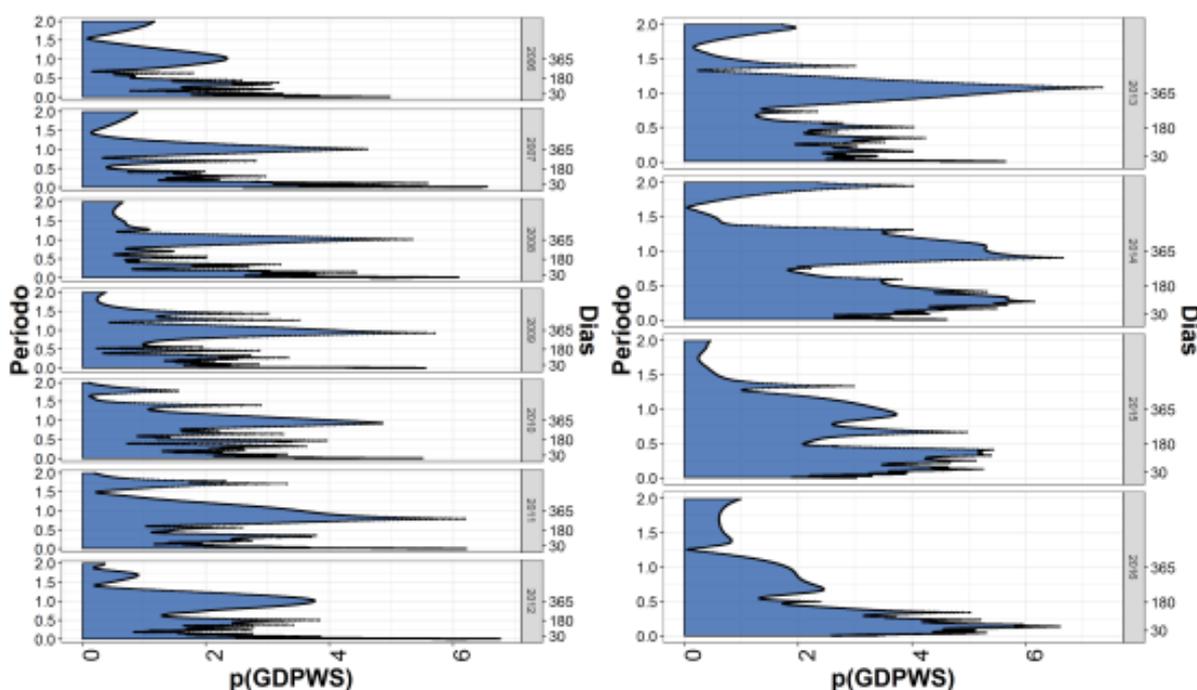


Figura 59 - Valor de GDPWS para o reservatório de Sobradinho períodos menores que 2 anos entre 2006 e 2016

Uma forma de melhor avaliar a eficiência da medida GDPWS, se faz pelo entendimento da distribuição dos seus valores por faixas de períodos. Para o reservatório de Sobradinho, as diferenciações são distintas para cada uma das faixas escolhidas (Figura 60 e Figura 61).

Para as faixas menores que um mês, se observa uma redução do índice utilizado, representando maior sincronia entre o espectro de energia das vazões afluentes e defluentes. Fato este é decorrente da redução das amplitudes em ambas.

Para períodos entre um mês e seis meses, é observado, a partir de 2014, um aumento neste índice, demonstrando maior alteração do regime de vazão a partir deste ponto, para esta região de período. É importante salientar que, a partir de 2014, houve reduções sequenciais da vazão mínima defluente, o que promove a menor sincronização entre esta e a vazão afluente.

Mais uma vez, ao se considerar o teste de Kolmogorov-Smirnov se obtém um p-valor inferior a 0,05, corroborando a diferenciação entre a distribuição de probabilidade do GDPWS considerando o reservatório de Sobradinho, nas escalas periódicas apresentadas Figura 62, e na divisão temporal vista nesta figura.

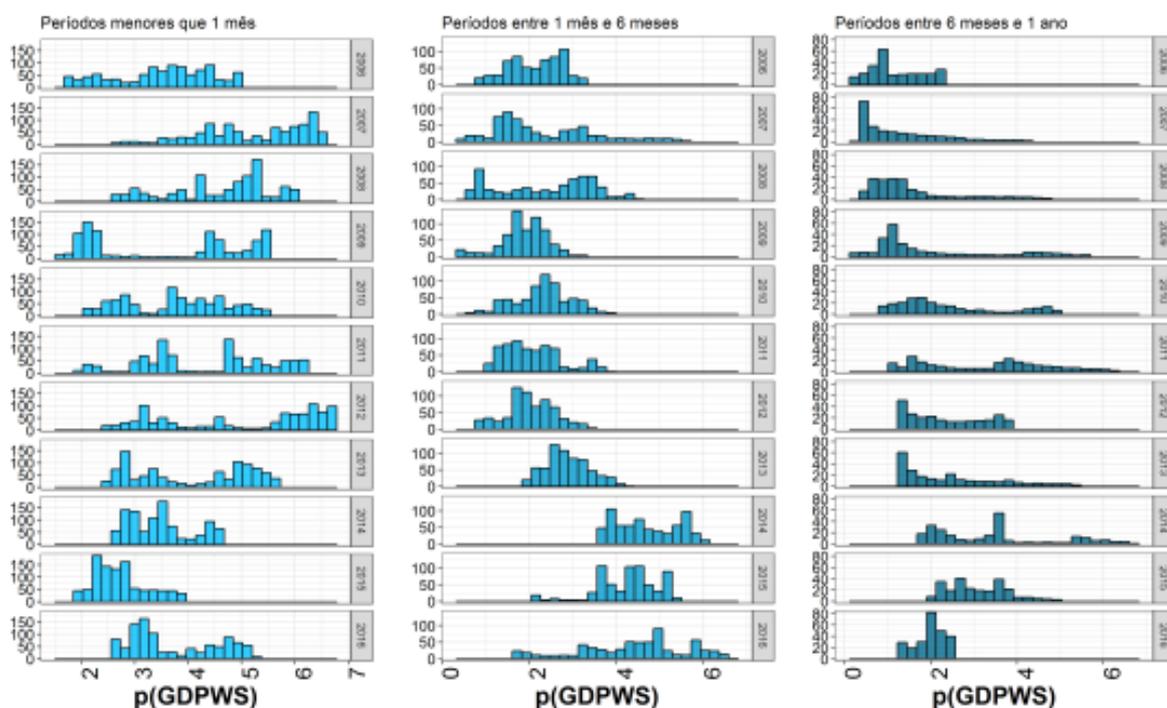


Figura 60 - Valor de GDPWS para o reservatório de Sobradinho para os períodos em questão entre 2006 e 2016

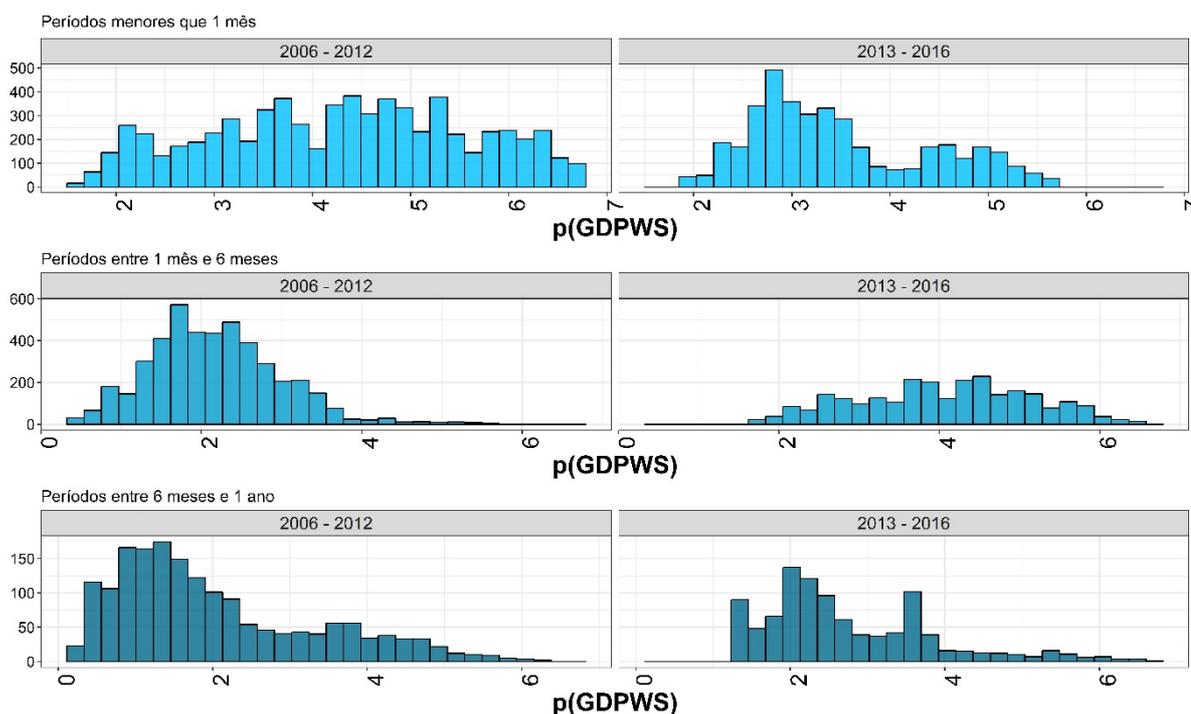


Figura 61 - Valor de GDPWS para o reservatório de Sobradinho para períodos maiores que 1 mês e menores que 6 meses entre 2005 e 2015

A partir do espectrograma do GDPWS de Sobradinho, observa-se que os maiores efeitos, que predominaram para os baixos períodos até 2012, sofrem uma mudança de padrão a partir de 2014. A partir de 2014, o maior impacto da operação do reservatório de Sobradinho fora percebido para períodos maiores, entre o trimestral e anual.

Fato este, que representa uma falta de sincronia entre a vazão afluente e defluente para períodos grandes, isto pode ter sido efeito das manobras de operação que visaram o maior armazenamento possível de água durante as cheias, tendo baixas vazões afluentes, nestes momentos, para compensar os momentos onde as vazões afluentes eram menores ainda.

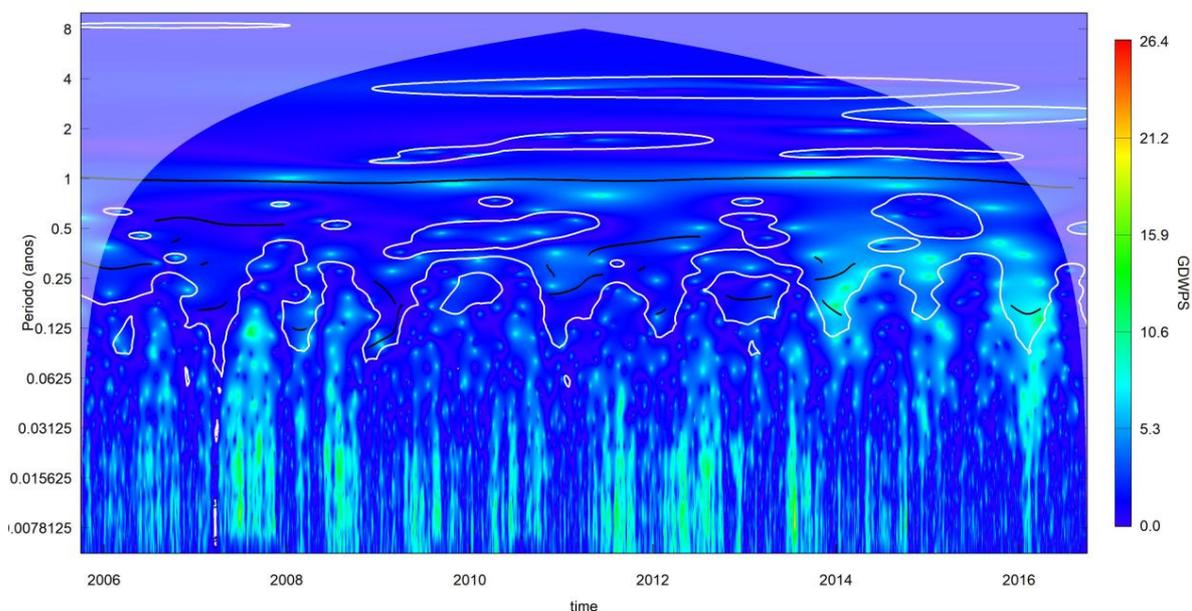


Figura 62 - Espectrograma do GDPWS do reservatório de Sobradinho

Quando estes resultados são comparados aos obtidos por Wu et al (2015), se encontra, para o período úmido, congruências que colocam os períodos próximos a um dia como aqueles mais modificados. Porém, a quebra de padrão, existente, a partir de 2014 em decorrência do agravamento da seca, se apresenta com uma característica diferente, onde os períodos mais modificados são próximos a um ano.

Fato este que, assim como preconizado por Wu et al (2015), necessita de uma investigação que busque encontrar as relações entre esta modificação do regime e os impactos no ecossistema a jusante.

## 8 CONCLUSÃO

Esta pesquisa debruça-se na análise histórica de dados de vazões afluentes e defluentes dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho visando a identificação, mensuração dos efeitos de regularização das vazões afluentes a estes reservatórios na vazão a jusante, considerando as características periódicas e temporais, focando na diferenciação entre os momentos anteriores e posteriores a seca que vem ocorrendo na região a partir de 2012 (ANA 2017).

A partir da análise descritiva dos dados, é possível perceber a consonância destes resultados com o que fora observado em ANA (2017), no qual se conclui sobre a redução das vazões afluentes de ambos reservatórios por volta dos anos a partir do ano de 2013, sendo o ano de 2012 um ano com padrões únicos e indicado aqui como um divisor de comportamentos. É interessante notar, também, que a partir de 2013 ocorre uma mudança no formato da distribuição de probabilidade destas vazões afluentes.

Analisando as vazões defluentes, se torna perceptível a dinâmica de equilíbrio de volume nos reservatórios, onde nos momentos mais úmidos ocorre maiores vazões defluentes a fim de garantir um volume de espera para cheias

O uso da transformada contínua wavelet, tendo como wavelet mãe a wavelet Morlet, se mostrou bastante pertinente na análise de padrões temporais das variáveis selecionadas para representar a regularização das vazões por parte dos reservatórios em questão, principalmente por conseguir tratar de sinais não estacionários.

Com o uso desta ferramenta, foi possível atingir o primeiro objetivo específico proposto nesta dissertação, através da distinção dos padrões periódicos dominantes, mais energéticos e conseqüentemente mais representativo quanto à variabilidade, e aos processos transitórios que concordam com o obtido através da análise descritiva. Também fora possível entender os processos que ocorrem em períodos próximos ao diário ou semanal, no qual as variações de energia são menores e afetadas, principalmente, pelos momentos mais úmidos.

Este processo transitório que configura um período de crise, segundo a ANA (2017), fora observado nas vazões afluentes e defluentes a partir de 2012. A análise do espectro de energia destas wavelets foram de especial valor na identificação da redução das amplitudes que por sua vez representa por uma menor variação da vazão afluente e uma maior regularização da vazão defluente.

Esta maior regularização da vazão defluente têm se mostrado, na literatura, como citado anteriormente, de grande impacto na redução da biodiversidade dos ecossistemas ribeirinhos, além dos seus impactos sociais.

O segundo objetivo específico deste trabalho versa sobre a sincronização entre a vazão afluente e a vazão regularizada de cada um dos reservatórios. O uso das crosswavelets se mostraram bastante pertinente, evidenciando a redução da sincronização entre as vazões afluentes e defluentes, para ambos reservatórios no período de seca vivido.

Em Três Marias e Sobradinho o efeito das secas foram sentidos, principalmente, em 2013 quando a correlação entre a vazão afluente e a regularizada chegaram próximas a zero. A partir deste momento, as novas regras de operação, marcadas, por exemplo, por novos patamares mínimos de vazão, fizeram elevar esta coerência entre estas vazões para os períodos maiores que seis meses, pouco afetando os períodos inferior a este que, mesmo sem seca, são marcados por forte dessincronização.

Quanto às ferramentas de mensuração de alteração do regime de vazão, por meio do espectro de energia das wavelets que as representam, terceiro objetivo específico, destaca-se o uso do GDPWS por ser à medida que foi capaz de distinguir o efeito da seca nas diversas faixas de períodos de interesse.

Os resultados, através desta medida, apontaram para uma intensificação dos efeitos da operação dos reservatórios nas características temporais e frequenciais do regime de vazão a jusante, principalmente no período após a seca, onde o índice apresentou resultados maiores. Fato este que corrobora com a realidade encontrada nesta região.

A metodologia proposta nesta dissertação se apresentou bastante promissora para a análise de vazões regularizadas e não-regularizadas. Inicialmente, fora possível

identificar periodicidades e sazonalidades existentes, bem como transientes nestes padrões, possibilitando, assim, a apreensão de características de uma série não estacionária.

O entendimento destas características temporais e periódicas também podem ser utilizadas para comparar a sincronidade, coerência, entre as vazões afluentes e defluentes. Podendo, assim, ser um indicador operacional que aponte para uma melhor ou pior adesão de determinada regra de operação de reservatórios de múltiplos usos às características naturais.

Por fim, o uso de um indicador de mudança espectral dual, frequência-tempo, se apresenta como uma ferramenta que abre oportunidades para a busca de regras de operações mais síncronas com o meio ambiente, preservando, assim, algumas características naturais, representados pelo espectro de energia da vazão afluente.

## REFERÊNCIA

ADAMOWSKI, K.; PROKOPH, A.; ADAMOWSKI, J. Development of a new method of wavelet aided trend detection and estimation. *Hydrological Processes*, v. 23, n. 18, p.2686-2696, 30 ago. 2009. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7260>.

ADAMOWSKI, J; SUN, K. Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. *Journal Of Hydrology*, v. 390, n. 1-2, p.85-91, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.033>.

ADDISON, P. S. Wavelet transforms and the ECG: a review. *Physiological Measurement*, v.26, n.5, p.155-199, 8 ago. 2005. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0967-3334/26/5/r01>.

AGARWAL, A; MAHESWARAN, R; SEHGAL, V; KHOSA, R; SIVAKUMAR, B e BERNHOFER, C. Hydrologic regionalization using wavelet-based multiscale entropy method. *Journal Of Hydrology*, v. 538, p.22-32, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.023>.

Agência Nacional de Águas (ANA) (Brasil). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial*. -- Brasília: ANA, 2015.

Agência Nacional de Águas (ANA). Disponível em: <https://www.conservationgateway.org/Documents/Brisbane-Declaration-English.pdf> >. Acesso em 7 de setembro de 2017.

ANA. Sistema de Acompanhamento de Reservatórios Nacional da Água. Disponível em: <http://sar.ana.gov.br>>. Acesso em 2017.

ANEEL. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em 2017.

AHMAD, A; EL-SHAFIE, A; RAZALI, S.F.M; MOHAMAD, Z.S. Reservoir Optimization in Water Resources: a Review. *Water Resource Manage*, v. 28, n. 11, p.3391-3405, 19 jun. 2014. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0700-5>.

ASFORA, M. C ; CIRILO, J. A. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. *REGA*, v. 2, n. 2, p. 27-38, jul./dez. 2005.

BADRZADEH, H; SARUKKALIGE, R; JAYAWARDENA, A.W. Hourly runoff forecasting for flood risk management: Application of various computational intelligence models. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 529, p.1633-1643, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.057>.

BURN, D.H.; ELNUR, Mohamed A. H. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, v. 255, n. 1-4, p. 107-122, 2002.

CBHSF - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2016-2025), Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional, 2016.

CHEN, P; WANG, Y; YOU, G e WEI, C. Comparison of methods for non-stationary hydrologic frequency analysis: Case study using annual maximum daily precipitation in Taiwan. *Journal Of Hydrology*, v. 545, p.197-211, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.001>.

CHEN, H e RAO, A. Testing Hydrologic Time Series for Stationarity. *Journal Of Hydrologic Engineering*, v. 7, n. 2, p.129-136, mar. 2002. American Society of Civil Engineers (ASCE).[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:2\(129\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:2(129)).

CHOO, T.H; HUH, J.Y; YOON, H.C; YUN, G.W; SON, J.K. Method for new conceptual securing water resources: a case study of the Miryang multipurpose dam in Korea.

Environmental Earth Sciences, v. 75, n. 10, p.1-18, maio 2016. Springer Nature.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-016-5598-1>.

COSTA, Carlos Antonio Severino. AVALIAÇÃO DO CUSTO HIDROENERGÉTICO DA MANUTENÇÃO DE VOLUMES DE ESPERA PARA O CONTROLE DE CHEIAS NOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO GRANDE POR MEIO DO MODELO COOPERMAX. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 2014.

DAUBECHIES, I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. IEEE transactions on information theory, v. 36, n. 5, p. 961-1005, 1990.

DEROSE, R.J; BEKKER, M.F; WANG, S.Y; BUCKLEY, B.M; KJELGREN, R.K; BARDSLEY, T; RITTENOUR, T.M e ALLEN, E.B. A millennium-length reconstruction of Bear River stream flow, Utah. Journal Of Hydrology, v. 529, p.524-534, out. 2015. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.014>.

ERIS, L; MU, X; ZHAO, G e GAO, P. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Streamflow in the Yellow River Basin, China. Water, v. 7, n. 12, p.1670-1686, 17 abr. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w7041670>.

FANG, H; HU, T.; ZENG, X.; WU, F. Simulation-optimization model of reservoir operation based on target storage curve. Water Science and Engineering, v. 4, n. 7, p.433 a 435, 27 out. 2014. Water Science and Engineering.

GAO, R X.; YAN, R. From Fourier transform to wavelet transform: a historical perspective. In: Wavelets. Springer, Boston, MA, 2011. p. 17-32.

IRENA. RENEWABLE ENERGY IN THE WATER, ENERGY & FOOD NEXUS. : IRENA, 2015.

JAY, D. A; LEFFLER, K; DIEFENDERFER, H.L. Tidal-Fluvial and Estuarine Processes in the Lower Columbia River: I. Along-Channel Water Level Variations, Pacific Ocean to Bonneville Dam. *Estuaries And Coasts*, v. 38, n. 2, p.415-433, 7 jun. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12237-014-9819-0>.

KANG, H.M ; YUSOF, F. Homogeneity tests on daily rainfall series. *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, v. 7, n. 1, p. 9-22, 2012.

KOMOROWSKI, D; PIETRASZEK, S. The Use of Continuous Wavelet Transform Based on the Fast Fourier Transform in the Analysis of Multi-channel Electrogastrography Recordings. *Journal Of Medical Systems*, v. 40, n. 1, p.1-15, 29 out. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-015-0358-4>.

KOUTSOYIANNIS, Demetris. Hydrologic persistence and the Hurst phenomenon. *Water Encyclopedia*, 2005.

LABAT, David. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. *Journal Of Hydrology*, v. 314, n. 1-4, p.275-288, nov. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.003>.

LI, X; GUO, S; LIU, P e CHEN, G. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 391, n. 1-2, p.124-132, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.011>.

MACHIWAL, D; JHA, M.K. Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: application to hydrological time series / Evaluation comparative de tests statistiques pour l'analyse de séries temporelles. *Hydrological Sciences Journal*, v. 53, n. 2, p.353-366, abr. 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.53.2.353>.

MACHIWAL, D JHA, M. K. Time series analysis of hydrologic data for water resources planning and management: a review. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v. 54, n. 3, p. 237-257, 2009.

MADSEN, H; LAWRENCE, D; LANG, M; MARTINKOVA, M e KJELDSEN, T.S. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 519, p.3634-3650, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>.

MARKONIS, Y. et al. Global estimation of long-term persistence in annual river runoff. *Advances in Water Resources*, 2018.

MARTIĆ-BURSAĆ, N M; BURSAĆ, B.L; DUCIC, V.D; RADIVOJEVIC, A.R; ZIKVOVIC, N, L; IVANOVIC, R.D; DJOKIC, M.M; STRICEVIC, L.S e GOCIC, M.J. THE IMPACT OF MEDITERRANEAN OSCILLATIONS ON PERIODICITY AND TREND OF TEMPERATURE IN THE VALLEY OF THE NISAVA RIVER-A Fourier and Wavelet Approach. *Thermal Science*, v. 21, n. 3, 2017.

MARQUES, C.A.F; FERREIRA, J.A; ROCHA, A; CASTANHEIRA, J.M, MELO-GONÇALVES, P; VAZ, N e DIAS, J.M. Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series. *Physics And Chemistry Of The Earth* v. 31,n. 18, p.1172-1179, jan. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.061>.

MASSEY JR, Frank J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.

MENDES, Ludmilson A Britta et al. Trade-Off Analysis among Multiple Water Uses in a Hydropower System: Case of São Francisco River Basin, Brazil. *Journal Of Water Resources Planning And Management*, v. 141, n. 10, out. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000527](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000527).

NOURANI, V; BAGHANAM, A.H; ADAMOWSKI, J e KISI, O. Applications of hybrid wavelet–Artificial Intelligence models in hydrology: A review. *Journal Of Hydrology*, v. 514, p.358-377, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.057>.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Séries históricas de vazões. Período 1931-2013. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/operacao/vazoes\\_naturais.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx)> Acesso em: setembro 2017.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>> Acesso em: setembro 2017.

RAMINA, R. Concepção de uma estratégia robusta para a gestão dos usos múltiplos das águas na bacia hidrográfica do rio São Francisco – Os Condicionantes Estruturais – Produto 1. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Outubro de 2014.

ROESCH, A; SCHMIDBAUER, H. (2014). WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.0.

SANG, Y; . The relation between periods' identification and noises in hydrologic series data. *Journal Of Hydrology*, WANG, D; WU, J; ZU, Q e WANG, L. v. 368, n. 1-4, p.165-177, abr. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.042>.

SANG, Y; WANG, Z; LIU, C. Period identification in hydrologic time series using empirical mode decomposition and maximum entropy spectral analysis. *Journal Of Hydrology*, v. 424-425, p.154-164, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.044>.

SANG, Y. A Practical Guide to Discrete Wavelet Decomposition of Hydrologic Time Series. *Water Resources Management*, v. 26, n. 11, p.3345-3365, 30 maio 2012a. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0075-4>.

SANG, Y. Wavelet entropy-based investigation into the daily precipitation variability in the Yangtze River Delta, China, with rapid urbanizations. *Theoretical And Applied Climatology*,

v. 111, n. 3-4, p.361-370, 16 maio 2012b. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-012-0671-5>.

SANG, Y. A review on the applications of wavelet transform in hydrology time series analysis. *Atmospheric Research*, v. 122, p.8-15, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.11.003>.

SANG, Y; LIU, C; WANG, Z; WEN, J e SHANG, L. Energy-based wavelet de-noising of hydrologic time series. *PloS one*, v. 9, n. 10, p. e110733, 2014.

SATTARI, M. T; YUREKLI, K; PAL, M. Performance evaluation of artificial neural network approaches in forecasting reservoir inflow. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 6, p.2649-2657, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.048>.

SEHGAL, V; LAKHANPAL, A; MAHESWARAN, R; KHOSA, R e SRIDHARD, V. Application of multi-scale wavelet entropy and multi-resolution Volterra models for climatic downscaling. *Journal Of Hydrology*, v. 556, p.1078-1095, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.048>

SHAH, Z; KUMAR, M. D. In the Midst of the Large Dam Controversy: Objectives, Criteria for Assessing Large Water Storages in the Developing World. *Water Resources Management*, v. 22, n. 12, p.1799-1824, 9 fev. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-008-9254-8>.

SHIAU, J; HUANG, C.. Detecting Multi-Purpose Reservoir Operation Induced Time-Frequency Alteration Using Wavelet Transform. *Water Resources Management*, v. 28, n. 11, p.3577-3590, 29 maio 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0688-x>.

TSAI, W ; CHANG. F; CHANG.L ; HERRICKS, E.E. AI techniques for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands. *Journal Of Hydrology*, v. 530, p.634-644, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.024>.

TORRENCE, C; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological society, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.

VIEIRA, Nayara Paula Andrade. Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA. 2015. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

WU, F ; CHANG, C ; SHIAU, J. Assessment of flow regime alterations over a spectrum of temporal scales using wavelet-based approaches. Water Resources Research, v. 51, n. 5, p.3317-3338, maio 2015. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/2014wr016595>.

YU, H; LIN, Y. Analysis of space–time non-stationary patterns of rainfall–groundwater interactions by integrating empirical orthogonal function and cross wavelet transform methods. Journal Of Hydrology, v. 525, p.585-597, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.057>.

YU, T; LIYA, M; XIAOHUI, L e YUNZHONG, J. Analysis of runoff change trend using hydrological time series method. In: Geoscience and remote sensing (IITA-GRS), 2010 Second IITA International Conference on. IEEE, 2010. p. 263-267.

YU, S; YANG, J; LIU, G. Impact assessment of Three Gorges Dam's impoundment on river dynamics in the north branch of Yangtze River estuary, China. Environmental Earth Sciences, v. 72, n. 2, p.499-509, 3 jan. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2971-1>.

Zambon, R. C., Barros, M. T. L., Lopes, J. E. G., Barbosa, P. S. F., Francato, A. L., and Yeh, W. W. G. (2012). "Optimization of Large Scale Hydrothermal System Operation." Journal of Water Resources Planning and Management, 138(2), 135–143.

ZOLEZZI, G. BELLIN, A; BRUNO, M.C; MAIOLINI, B; SIVIGLIA, A. Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy. *Water Resources Research*, v. 45, n. 12, p.1-15, dez. 2009. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1029/2008wr007266>.