



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

MODELAÇÃO NÃO-PARAMÉTRICA DAS FREQUÊNCIAS DE ACONTECIMENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS EM PORTUGAL CONTINENTAL

Maria Manuela PORTELA¹; Rui Adriano Vitorino GOMES²; Artur Tiago SILVA³

¹ Professora Associada, Instituto Superior Técnico, CERIS, Lisboa, Portugal, maria.manuela.portela@tecnico.ulisboa.pt

² MSc, Instituto Superior Técnico, rui.adriano.vitorino.gomes@gmail.com

³ PhD, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, artur.tiago.silva@gmail.com

Resumo

Os fenómenos hidrológicos extremos podem ser analisados na ótica da sua magnitude ou da sua frequência. O facto de se esperar que a mudança climática altere o comportamento daqueles fenómenos confere especial relevância à consideração da estacionaridade daquelas duas características. No caso da magnitude, a análise da estacionaridade centra-se na deteção de tendências nos valores de variáveis hidrológicas, enquanto no da frequência se pretende, por regra, averiguar se, independentemente de eventuais alterações na magnitude, tais fenómenos se tornaram mais frequentes ou não.

De entre os fenómenos hidrológicos extremos, o estudo que se resume centrou-se exclusivamente na frequência das cheias e das precipitações intensas com o objetivo único de concluir sobre a sua estacionaridade em Portugal Continental. Para tanto foram analisadas 35 estações hidrométricas dominando bacias hidrográficas naturais e com séries longas de registos de caudais médios diários. A cada uma dessas bacias associou-se pelo menos um posto udométrico, com uma série igualmente longa de precipitações diárias e desejavelmente localizado no interior da bacia, de modo a ser representativo do regime das precipitações intensas geradoras de cheias aí ocorrentes. Para além da análise da frequência dos acontecimentos extremos, a associação entre postos udométricos a estações hidrométricas teve por objetivo confirmar que as bacias hidrográficas consideradas se encontram em regime natural, designadamente, no que respeita à génese das cheias.

A seleção dos eventos de cheia e de precipitação extrema utilizou a técnica das séries de duração parcial aplicada a registos diários. A análise da frequência desses eventos extremos recorreu a uma modelação não-paramétrica combinada com a formulação de bandas de confiança.

Os resultados obtidos sugerem que a frequência das cheias e das precipitações extremas apresenta, ao longo do tempo, um comportamento não-estacionário, com valores mínimos ou próximos desses mínimos em anos recentes, associados a uma tendência decrescente.

Palavras-chave: Fenómenos hidrológicos extremos, frequência dos fenómenos hidrológicos extremos, estacionaridade hidrológica, séries de duração parcial, *kernel*, reamostragem aleatória de *bootstrap*.

Tema: Hidrologia, hidráulica fluvial e obras hidráulicas.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

A generalidade dos estudos hidrológicos assenta no princípio da estacionaridade. Contudo hoje em dia crê-se que as mudanças climáticas resultarão numa intensificação do ciclo hidrológico conducente, entre outras manifestações, a acontecimentos hidrológicos extremos mais frequentes (Trenberth, 2012).

Para averiguar se a frequência da ocorrência das cheias em Portugal Continental exhibe sinais de não-estacionaridade, aplicou-se a metodologia desenvolvida por Silva et al. (2012a) às bacias hidrográficas de um número considerável de estações hidrométricas, presumivelmente em regime natural e dispondo de séries longas de registos diários. Com o intuito de confirmar se, de facto, as bacias seleccionadas se encontram em regime natural, mas também de analisar a frequência das precipitações extremas associou-se a cada bacia pelo menos um posto udométrico, localizado no interior da bacia ou nas suas proximidades, de modo a ser relevante em termos da génese das cheias aí ocorrentes (Gomes, 2017).

A seleção dos eventos de cheia e de precipitação extrema utilizou a técnica das séries de duração parcial aplicada aos registos diários e a análise da frequência desses eventos, uma a uma modelação não-paramétrica, baseada num estimador de *kernel*, combinado com a formulação de bandas de confiança, através de uma técnica de reamostragem aleatória de *bootstrap*, conforme se descreve brevemente nos itens subsequentes.

Os resultados obtidos sugerem que a frequência dos eventos de cheia e de precipitações extremas apresenta, ao longo do tempo, um comportamento não-estacionário, caracterizado por uma tendência decrescente, com valores mínimos ou próximos desses mínimos em anos recentes.

2. MODELOS

2.1 Bacias hidrográficas em regime natural

Para averiguar se uma bacia hidrográfica dispondo de albufeiras evidencia sinais de alteração antropogénica, no que respeita à génese de cheias, concretamente, devidos ao amortecimento de cheias naquelas albufeiras, aplicou-se o índice adimensional *RI* proposto por Lopez e Francés (2013) dado por:

$$RI = \sum_{i=1}^N \frac{A_i C_i}{A_g C_g} \quad (1)$$

em que N é o número total de albufeiras localizadas na bacia hidrográfica, A_g , a área dessa bacia e C_g , o volume do escoamento anual médio na mesma. Para cada albufeira identificada pelo índice i , A_i , é a área da bacia hidrográfica e C_i , a capacidade total do reservatório. De acordo com os autores em menção, valores de RI , inferiores a 0.25 indicam pouca alteração do regime das cheias, tendo sido esta a circunstância, quando aplicável, dos casos de estudo a que se refere o presente artigo.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

2.2 Preenchimento de falhas diárias

Para que a seleção dos acontecimentos hidrológicos extremos utilizasse séries de registos diários tão longas quanto possível foi necessário proceder ao preenchimento de falhas.

No que respeita a caudais médios diários tal preenchimento utilizou o modelo de regionalização desenvolvido por Portela e Quintela (2005) o qual assenta na constatação de que a altura do escoamento anual médio é um descritor preciso da variabilidade temporal relativa do escoamento de tal modo que bacias hidrográficas em regime natural com alturas de escoamento anual médio próximas exibem escoamentos adimensionais às diferentes escalas temporais igualmente próximos. Nesse entendimento, face a duas bacias hidrográficas, identificadas pelos índices 1 e 2, com alturas de escoamento anual médio próximas, $\bar{H}_1 \approx \bar{H}_2$, o preenchimento das falhas de registo nesta última estação pode processar-se de acordo com:

$$Q_{i,j}^2 = Q_{i,j}^1 \frac{Q_{mod_2}}{Q_{mod_1}} \quad (2)$$

em que $Q_{i,j}^k$ é o caudal médio diário no dia j do ano i na estação hidrométrica k e Q_{mod_k} , o caudal modular nessa mesma estação.

Para preencher a falha de precipitação no dia j do ano i num dado posto $P1$, identificou-se um posto $P2$: (i) que dispusesse de registo nesse mesmo dia; e (ii) tal que a série de precipitações simultâneas em $P1$ e $P2$ no dia j dos restantes n anos (com $n \neq i$) tivesse pelo menos 15 elementos. De entre todos os postos $P2$ nestas condições selecionou-se o que conduzia ao maior coeficiente de correlação entre registos simultâneos no dia j , desde que tal coeficiente fosse superior ou igual a 0.7, com exceção dos meses de junho a setembro, em que se admitiu 0.6 (“relaxamento” do critério de desempenho do preenchimento por não se esperar a ocorrência de acontecimentos extremos nestes meses). Estando reunidas as anteriores condições, o preenchimento utilizou regressão linear simples (sem termo aleatório) com parâmetros estimados a partir das duas séries de precipitações simultâneas no dia j , do que resulta uma equação de regressão distinta para cada falha diária.

2.3 Técnica de amostragem por séries de duração parcial

A técnica de amostragem mais frequentemente utilizada na análise de frequência de extremos hidrológicos recorre a séries de máximos anuais (SMA) constituídas por um valor por ano, o máximo desse ano, e com dimensão igual ao número de anos com registos. Como tal, quando se dispõe de registos temporalmente contínuos, a utilização de séries de máximos anuais pode limitar a informação utilizada na análise, pois não considera valores que, sendo também extremos, são inferiores ao valor máximo do ano em que ocorreram. Adicionalmente, podem ser incorporados na amostra valores máximos anuais inferiores a valores que, não sendo máximos noutros anos, não foram selecionados.

Em alternativa à constituição de séries de máximos anuais existem outras técnicas de amostragem em que se inclui a das séries de duração parcial (SDP) (*partial duration series*, PDS, ou *peaks-over-threshold*, POT) que consiste em reter de uma série hidrológica



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

temporalmente contínua todos os “picos” ou excedências que excedem um determinado limiar ou *threshold*, u , desde que tais picos consubstanciem acontecimentos independentes entre si. Deste modo, as SDP não estão limitadas a um acontecimento extremo por ano, facto que permite uma seleção mais ampla e representativa daqueles acontecimentos.

Os “picos” que compõem uma SDP são passíveis de serem modelados por um processo estocástico bivariado que atenda, tanto às magnitudes das excedências, como aos tempos/instantes de ocorrência dessas excedências. Para tanto é necessário que se verifiquem as seguintes duas hipóteses: (i) o número de excedências num dado intervalo de tempo (por exemplo, o ano) é uma variável aleatória discreta que segue a distribuição de Poisson com parâmetro λ (número médio de excedências naquele intervalo de tempo, ou seja, frequência dessas excedências nesse intervalo de tempo); (ii) as excedências são variáveis aleatórias independentes. De acordo com o objetivo do estudo que se resume – análise da frequência de acontecimentos hidrológicos extremos –, das SDP interessa apenas reter os instantes de ocorrência daqueles acontecimentos, com o objetivo de caracterizar ao longo do tempo a respetiva frequência.

Não obstante as vantagens das SDP, a sua utilização reveste-se de alguma complexidade para a qual contribuem aspetos subjetivos, designadamente, relacionados com a constituição das respetivas amostras. Acresce que, desde os trabalhos pioneiros de Shane e Lynn (1964) e Todorovic e Zelenhasic (1970), a literatura técnica produzida sobre o tema permaneceu escassa e, por vezes, incoerente, razão pela qual se considerou pertinente levar a cabo a sistematização apresentada em Silva et al. (2012b).

Nas aplicações efetuadas considerou-se que, para tirar partido do acréscimo de informação proporcionado pela técnica das SDP, o número anual médio de excedências deveria ser superior a pelo menos 1.65 (Cunnane, 1973).

Para assegurar “picos” previsivelmente independentes pré-selecionaram-se: (i) no caso das séries de caudais médios diários, os “picos” separadas no tempo por pelo menos o triplo dos tempos para a ponta das bacia hidrográficas, desde que entre dois picos sucessivos o caudal decrescesse até pelo menos 2/3 do primeiro pico (NERC, 1975, Cunnane, 1979); (ii) no caso das precipitações diárias os “picos” separados por pelo menos um dia sem precipitação (Silva et al., 2012a). A independência temporal entre picos foi avaliada com base na autocorrelação de incremento 1 e 2.

2.4 Frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos

A análise da frequência das ocorrências dos eventos extremos utilizou uma modelação não-paramétrica, baseada num estimador de *kernel*, desenvolvido por Diggle (1985) aplicado aos instantes de ocorrência dos acontecimentos hidrológicos extremos, identificados a partir das SDP. O estimador de *kernel* realiza a suavização/alisamento de uma série discreta de dados de acordo com:

$$\hat{\lambda}(t) = h^{-1} \sum_{i=1}^m K\left(\frac{t-T_i}{h}\right) \quad (3)$$



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

Nas aplicações efetuadas tendo por base dados diários (de caudais médios e de precipitações), $\hat{\lambda}(t)$ representa a estimativa, em cada instante t , do número de eventos por dia acima do limiar (d^{-1}), m é o número total de excedências resultante da aplicação das séries de duração parcial, $T_i(d)$ é a diferença entre cada instante atual, t , e os instantes de ocorrência das excedências, $h(d)$ é a largura da banda e K , uma função *kernel* para o que adotou um *kernel* gaussiano dado (Mudelsee et al., 2003, 2004, 2006):

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{y^2}{2}\right)} \quad (3)$$

Como sugerido por Silverman (1986), para um *kernel* gaussiano, h deve ser calculado através de:

$$h = 0.9 \min \left\{ s, \frac{AIQ}{1.34} \right\} m^{-\frac{1}{5}} \quad (4)$$

onde s é o desvio-padrão da amostra dos instantes de ocorrência das excedências, $\{T_i\}$, AIQ , a amplitude inter-quartis dessa amostra e m , tem o significado antes explicitado.

A largura de banda, h , atua como um fator de suavização/alisamento que esbate tanto mais os resultados quanto maior o seu valor, por fazer intervir mais instantes de ocorrência no cálculo do *kernel* (Silva et al., 2016). Segundo Silva et al. (2012a), para atenuar o efeito da elevada sazonalidade intra-anual do regime hidrológico em Portugal Continental, na caracterização do comportamento inter-anual $\hat{\lambda}(t)$, a largura de banda deve ser claramente superior a 365 dias.

Para evitar o enviesamento decorrente da inexistência de dados antecedendo e sucedendo-se à série temporal contínua utilizada em cada aplicação do modelo, o qual resulta na subestimação da frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos, previamente a essa aplicação procedeu-se à geração de pseudodata (Mudelsee et al., 2004). Para o efeito aplicou-se o método de reflexão a dois períodos de tempo, um anterior ao instante inicial, e, outro, sucedendo-se ao instante final, cada com a duração tripla de h .

Para quantificar as incertezas associadas ao cálculo de $\hat{\lambda}(t)$ construíram-se bandas de confiança obtidas com recurso à técnica de *bootstrap* (Cowling et al., 1996; Mudelsee, 2011) a qual não é mais do que um método de re-amostragem com reposição dos dados originais. Para o efeito, procedeu-se à caracterização de $\hat{\lambda}(t)$ baseada, por um lado, na amostra histórica dos instantes de ocorrência de eventos extremos, e, por outro lado, em 2000 séries re-amostradas com dimensão igual à daquela amostra, acrescida dos pseudo dados (Silva et al., 2012a).

3. CASOS DE ESTUDO E DADOS

Com o objetivo de concluir sobre o comportamento da frequência das cheias em Portugal Continental, identificaram-se inicialmente um número tão elevado quanto possível de estações hidrométricas: (i) previsivelmente em condições naturais no que respeita ao

controlo de cheias; (ii) dispondo de séries longas de caudais médios diários com poucas falhas suscetíveis de serem preenchidas; (iii) relativamente às quais fosse possível associar postos udométricos, igualmente com séries longas com poucas falhas, também suscetíveis de serem preenchidas, e tais que, dado o seu posicionamento relativamente às bacias hidrográficas daquelas estações, se admitia estarem na génese das cheias naturais que aí ocorrem. Os registos diários de caudais médios e de precipitações foram obtidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, SNIRH, da responsabilidade da Agência Portuguesa do Ambiente, APA.

Das anteriores condições resultaram, após várias iterações, as 35 estações hidrométricas identificadas no **Quadro 1** (incluído na página seguinte), às quais se atribuíram os 33 postos udométricos também aí identificadas. O conjunto de uma estação hidrométrica e do posto ou postos que previsivelmente estão associados à génese das cheias na bacia hidrográfica daquela estação foi identificado por um código, conforme explicitado na primeira coluna do **Quadro 1**. Além da anterior informação, indicam-se no quadro os períodos analisados, bem como os limiares adotados na constituição das séries de duração parcial. A localização esquemática das anteriores estações e postos consta da **Figura 1**. Realça-se que o preenchimento de falhas utilizou dados diários num elevadíssimo número de estações hidrométricas e de postos udométricos, muito para além dos que vieram a ser adotados como casos de estudo e que constam do **Quadro 1** e da **Figura 1**.

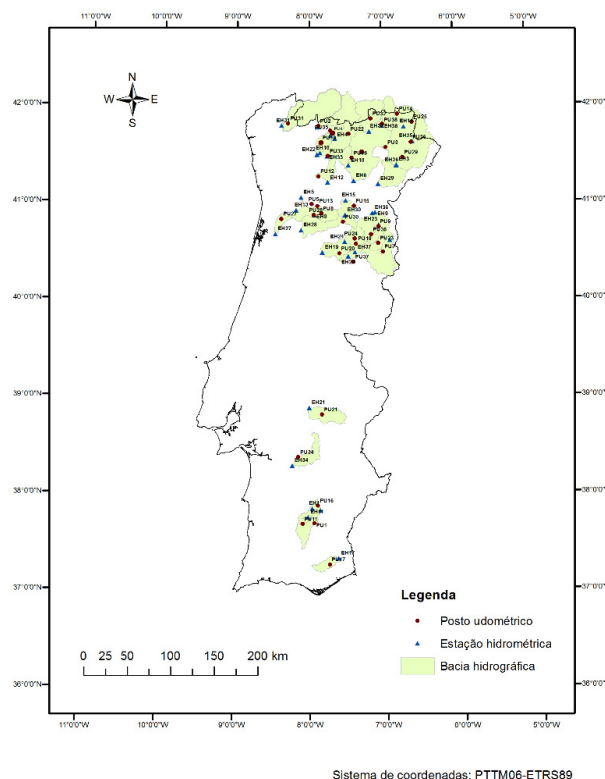


Figura 1. Localização esquemática dos casos de estudo (reproduzida de Gomes, 2017).



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

Quadro 1. Casos de estudo. Identificação dos grupos de estações hidrométricas e postos udométrico associados (adaptado de Gomes, 2017).

Código	Estação hidrométrica				Posto udométrico				Número de anos com registos simultâneos
	Código	Nome	Período contínuo de registos (após preenchimento)	Limiar (m ³ /s)	Código	Nome	Período contínuo de registos (após preenchimento)	Limiar (mm)	
C1	EH1	Albernoa	1969.10.01 a 1997.09.30	9.0	PU1	São Marcos da Ataboeira	1956.10.01 a 2010.09.30	20.0	28
					PU11	Castro Verde	1930.10.01 a 2016.09.30	19.6	28
C2	EH2	Alto Cávado (Rio)	1966.10.01 a 2011.09.30	23.1	PU2	Sezelhe	1949.10.01 a 2016.09.30	59.1	45
C3	EH3	Azibo (Rio)	1976.10.01 a 2011.09.30	19.0	PU3	Lamas de Podence	1974.10.01 a 2016.09.30	30.8	35
C4	EH4	Boticas	1970.10.01 a 2011.09.30	11.2	PU4	Cervos	1956.10.01 a 2016.09.30	42.0	41
C5	EH5	Cabriz	1966.10.01 a 2011.09.30	2.9	PU5	Gralheira	1945.10.01 a 1996.09.30	65.1	30
C6	EH6	Castanheiro	1958.10.01 a 2006.09.30	302.3	PU6	Rio Torto	1913.10.01 a 2016.09.30	23.1	48
					PU18	Jou	1956.10.01 a 2016.09.30	36.5	48
					PU32	Gestosa	1931.10.01 a 2016.09.30	34.4	48
					PU38	Vinhais	1913.10.01 a 2016.09.30	38.9	48
C7	EH7	Castelo Bom	1956.10.01 a 2011.09.30	64.9	PU7	Miuzela	1956.10.01 a 2010.09.30	28.8	54
C8	EH8	Castro Daire	1945.10.01 a 2011.09.30	46.7	PU8	Pendilhe	1943.10.01 a 2007.09.30	56.1	62
C9	EH9	Cidadelhe	1955.10.01 a 2011.09.30	106.8	PU7	Miuzela	1956.10.01 a 2010.09.30	28.8	54
					PU9	Pinhel	1932.10.01 a 2016.09.30	23.4	56
					PU23	Pinzio	1955.10.01 a 2010.09.30	25.0	55
C10	EH10	Cunhas	1949.10.01 a 2011.09.30	75.4	PU4	Cervos	1956.10.01 a 2016.09.30	42.0	55
					PU10	Couto de Dornelas	1931.10.01 a 2010.09.30	64.4	61
					PU35	Barracão	1944.10.01 a 2009.09.30	45.6	60
C11	EH11	Entradas	1971.10.01 a 2000.09.30	2.0	PU11	Castro Verde	1930.10.01 a 2016.09.30	19.6	29
C12	EH12	Ermida Corgo	1956.10.01 a 2011.09.30	57.0	PU12	Campeã	1958.10.01 a 2016.09.30	63.4	53
C13	EH13	Fragas da Torre	1946.10.01 a 2011.09.30	145.0	PU8	Pendilhe	1943.10.01 a 2007.09.30	56.1	61
					PU13	Mezio (Paiva)	1943.10.01 a 2007.09.30	59.7	61
					PU28	Castro Daire	1915.10.01 a 2001.09.30	58.2	55
C14	EH14	Gimonde	1966.10.01 a 2011.09.30	44.9	PU25	Deilão	1931.10.01 a 2016.09.30	28.6	45
C16	EH16	Monte da Ponte	1959.10.01 a 1997.09.30	20.4	PU1	São Marcos da Ataboeira	1956.10.01 a 2010.09.30	20.0	38
					PU11	Castro Verde	1930.10.01 a 2016.09.30	19.6	38
					PU16	Trindade	1931.10.01 a 2015.09.30	19.0	38
C17	EH17	Monte dos Fortes	1965.10.01 a 1993.09.30	15.6	PU17	Mercador	1959.10.01 a 2010.09.30	25.1	28
C18	EH18	Murça	1970.10.01 a 2011.09.30	23.2	PU18	Jou	1956.10.01 a 2016.09.30	36.5	41
C19	EH19	Nelas	1974.10.01 a 2011.09.30	85.6	PU19	Mourilhe	1980.10.01 a 2012.09.30	32.4	31
C20	EH20	Pai Diz	1973.10.01 a 2011.09.30	10.3	PU24	Celorico da Beira	1941.10.01 a 2010.09.30	31.0	36
C21	EH21	Pavia	1959.10.01 a 1990.09.30	17.9	PU37	Valhelhas	1937.10.01 a 2010.09.30	50.4	37
C22	EH22	Ponte Cavez	1957.10.01 a 2011.09.30	224.3	PU21	Vimieiro	1950.10.01 a 2015.09.30	20.6	31
					PU4	Cervos	1956.10.01 a 2016.09.30	42.0	54
					PU10	Couto de Dornelas	1931.10.01 a 2010.09.30	64.4	53
					PU22	Chaves	1931.10.01 a 2016.09.30	28.3	54
					PU35	Barracão	1944.10.01 a 2009.09.30	45.6	52
C23	EH23	Ponte Figueira	1981.10.01 a 2010.09.30	11.6	PU9	Pinhel	1932.10.01 a 2016.09.30	23.4	29
					PU23	Pinzio	1955.10.01 a 2010.09.30	25.0	29
					PU19	Mourilhe	1980.10.01 a 2012.09.30	32.4	21
C24	EH24	Ponte Juncals	1918.10.01 a 2001.09.30	61.7	PU24	Celorico da Beira	1941.10.01 a 2010.09.30	31.0	60
C25	EH25	Ponte Pinelo	1967.10.01 a 2011.09.30	30.1	PU25	Deilão	1931.10.01 a 2016.09.30	28.6	44
					PU26	Argozelo	1931.10.01 a 2016.09.30	29.6	44
C26	EH26	Ponte Remondes	1955.10.01 a 2011.09.30	173.0	PU3	Lamas de Podence	1974.10.01 a 2016.09.30	30.8	56
					PU25	Deilão	1931.10.01 a 2016.09.30	28.6	56
					PU26	Argozelo	1931.10.01 a 2016.09.30	29.6	56
					PU29	Mogadouro	1913.10.01 a 2016.09.30	30.0	56
C28	EH28	Ponte Vouzela	1928.10.01 a 2002.09.30	94.6	PU28	Castro Daire	1915.10.01 a 2001.09.30	58.2	73
					PU30	Aguiar da Beira	1930.10.01 a 2016.09.30	45.0	72
					PU3	Lamas de Podence	1974.10.01 a 2016.09.30	30.8	37
C29	EH29	Qta das Laranjeiras	1941.10.01 a 2011.09.30	189.1	PU25	Deilão	1931.10.01 a 2016.09.30	28.6	70
					PU26	Argozelo	1931.10.01 a 2016.09.30	29.6	70
					PU29	Mogadouro	1913.10.01 a 2016.09.30	30.0	70
					PU30	Aguiar da Beira	1930.10.01 a 2016.09.30	45.0	35
C30	EH30	Quinta Rape	1976.10.01 a 2011.09.30	25.9	PU32	Gestosa	1931.10.01 a 2016.09.30	34.4	56
C32	EH32	Rebordelo	1955.10.01 a 2011.09.30	105.9	PU33	Santa Marta da Montanha	1938.10.01 a 2016.09.30	48.3	56
C33	EH33	Sta Marta do Alvão	1955.10.01 a 2011.09.30	10.6	PU34	Alcáçovas	1931.10.01 a 2016.09.30	25.0	39
C34	EH34	Torrão do Alentejo	1961.10.01 a 2000.09.30	14.3	PU4	Cervos	1956.10.01 a 2016.09.30	42.0	54
C35	EH35	Vale Giestoso	1957.10.01 a 2011.09.30	12.0	PU35	Barracão	1944.10.01 a 2009.09.30	45.6	52
C36	EH36	Vale Trevo	1957.10.01 a 2011.09.30	18.1	PU36	Freixedas	1956.10.01 a 2003.09.30	29.3	46
C37	EH37	Videmonte	1975.10.01 a 2011.09.30	20.9	PU37	Valhelhas	1937.10.01 a 2010.09.30	50.4	35
C38	EH38	Vinhais (Qta Ranca)	1956.10.01 a 2011.09.30	80.1	PU38	Vinhais	1913.10.01 a 2016.09.30	38.9	55

4. RESULTADOS

Na **Figura 2** apresentam-se os resultados da análise de frequência das cheias nas 35 estações hidrométricas do **Quadro 1**. Ao longo dos eixos horizontais indicam-se os instantes de ocorrência dos “picos” decorrentes das SDP, utilizados naquela análise.

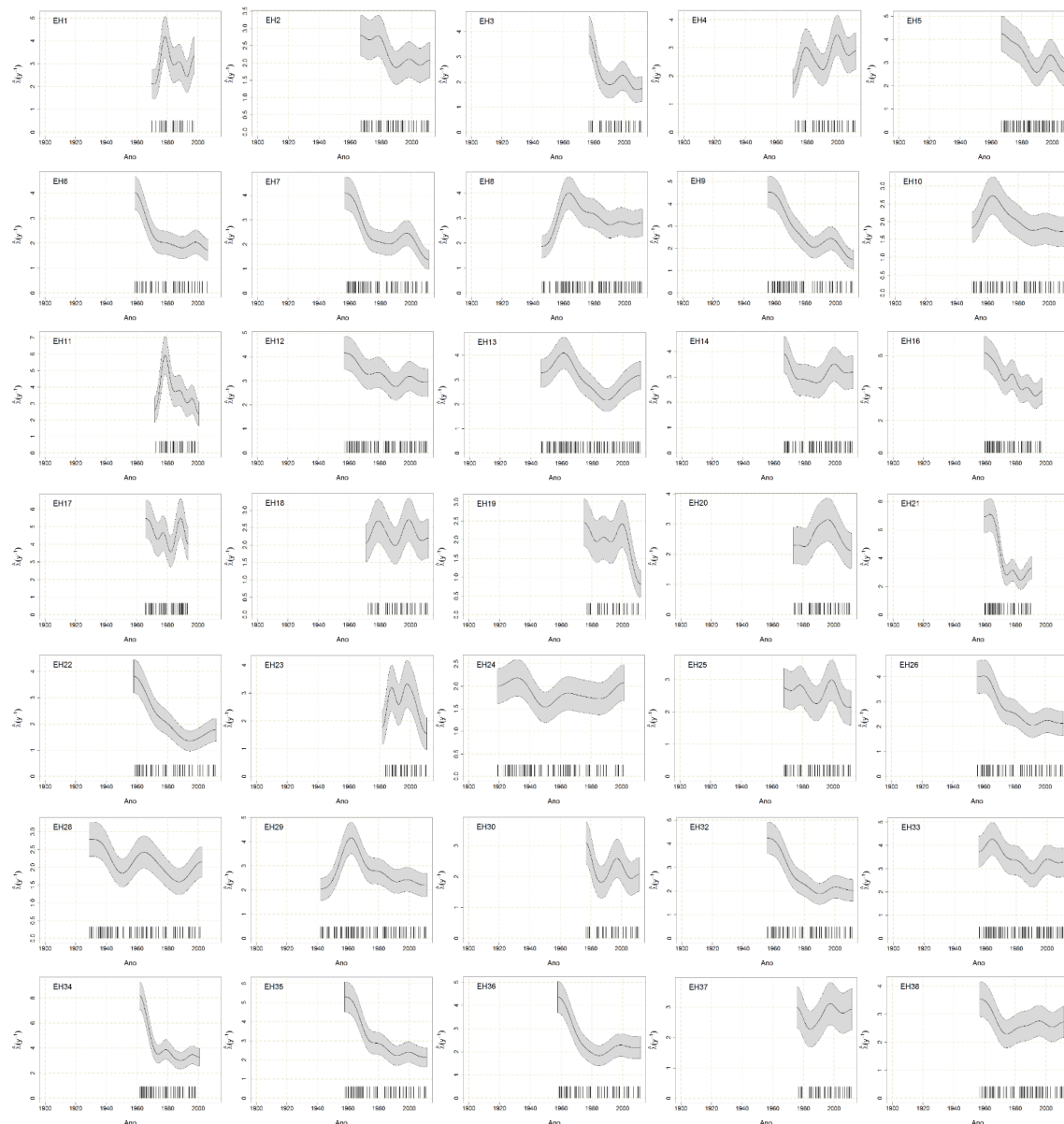


Figura 2. Frequência de ocorrência das cheias (curvas a negro) e respetivas bandas de confiança a 95% (áreas sombreadas) nas 35 estações hidrométricas do **Quadro 1** (adaptada de Gomes, 2017).

Na **Figura 3** exemplificam-se os resultados da análise da frequência das precipitações extremas com base nos 13 postos udométricos do **Quadro 1** com mais de 80 anos de dados diários (após preenchimento). Os instantes de ocorrência dos “picos” decorrentes das SDP estão também assinalados por traços verticais posicionados ao longo dos eixos do tempo.

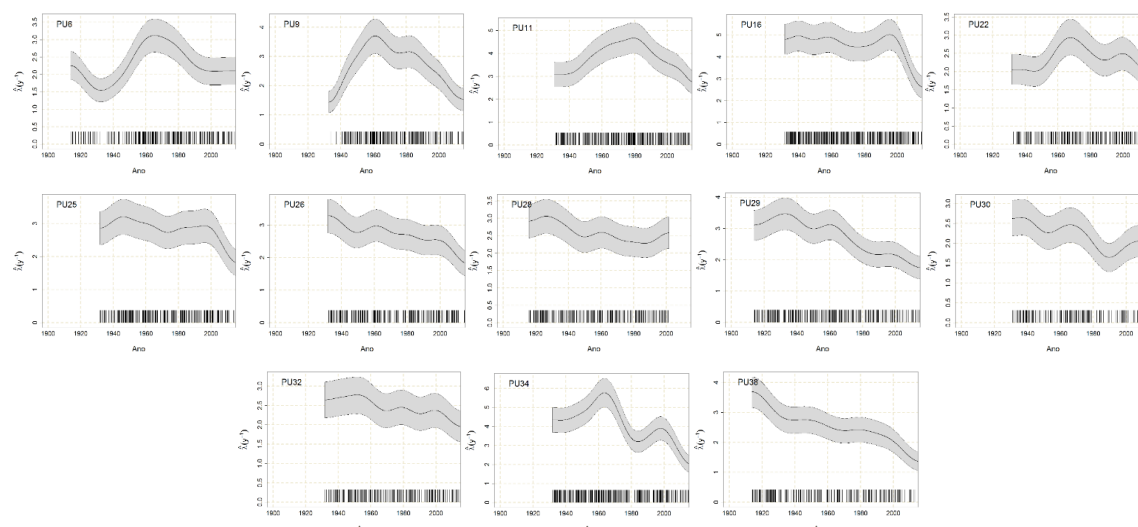


Figura 3. Frequência de ocorrência das cheias (curvas a negro) e respetivas bandas de confiança a 95% (áreas sombreadas) em 13 postos udométricos (adaptada de Gomes, 2017).

Na **Figura 4** exemplificam-se os resultados da análise conjunta de cheias e de precipitações extremas tendo por as 18 bacias hidrográficas sob influência de um ou mais postos, desde que tais postos não tenham sido objeto da **Figura 3**, de modo a ilustrar o maior número possível de situações distintas relacionadas com a frequência das precipitações extremas.

Em qualquer das anteriores figuras o eixo vertical quantifica a frequência dos acontecimentos extremos, $\hat{\lambda}(t)$. De modo a tornar mais perceptível o significado dessa frequência, referiu-se a mesma ao ano (acontecimentos por ano), para o que os valores de $\hat{\lambda}(t)$ fornecidos pelos modelos foram multiplicados por 365.25.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A **Figura 2** sugere consistentemente cheias menos frequentes em anos mais recentes, o mesmo se aplicando às precipitações extremas objeto das **Figuras 3** e **4**. Anota-se que a apreciação de resultados nesta última figura está de algum modo dificultada pelo facto de estarem aí representados dois fenómenos hidrológicos distintos e de se terem omitido as bandas de confiança.

A variação do longo do tempo da frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos, que culmina em frequências mínimas ou perto das mínimas em anos recentes, sugere, por regra, uma tendência decrescente dessa frequência. O traçado geral das curvas de $\hat{\lambda}(t)$

associado a este facto indica claramente que a frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos objeto de análise apresenta um comportamento não estacionário. Dada a mais frequente concordância entre andamentos gerais das curvas de $\hat{\lambda}(t)$ referentes a cheias e a precipitações extremas, concluiu-se que a causa da não estacionaridade não será antropogénica, estando muito provavelmente relacionada com as mudanças climáticas.

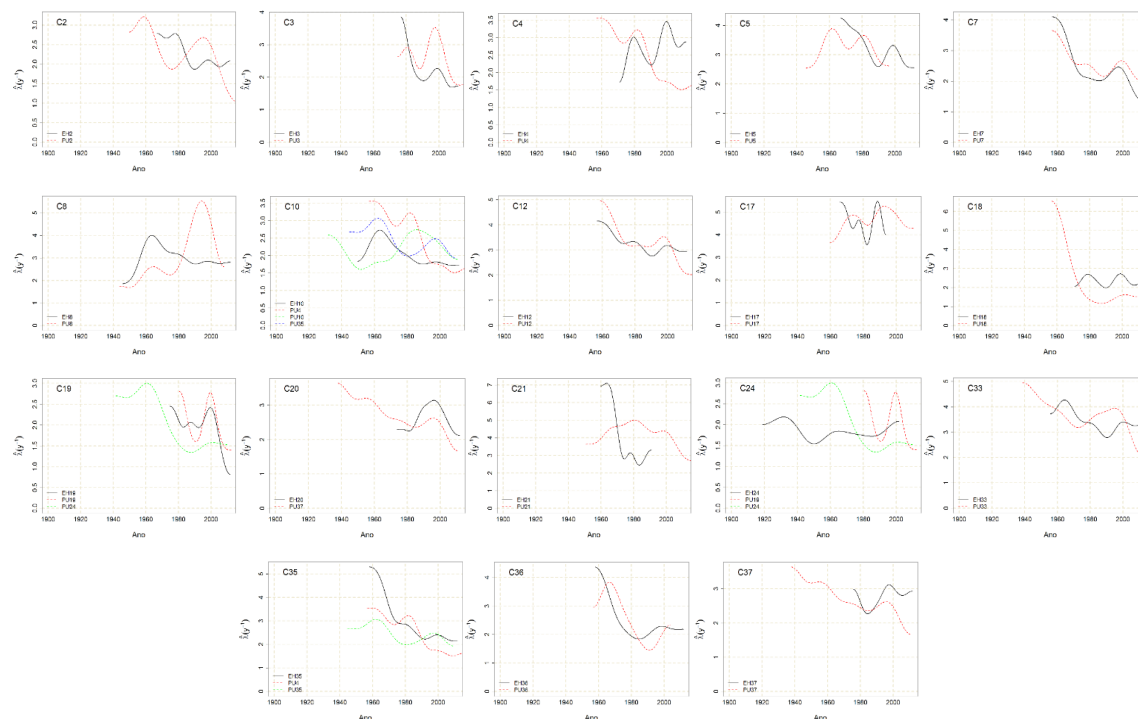


Figura 4. Associação entre estações hidrométricas e postos udométricos. Frequência das cheias (curvas a negro) e das precipitações extremas (restantes curvas) (adaptada de Gomes, 2017).

Julga-se que a maneira simplista como se associaram postos udométricos a estações hidrométricas – por mero critério de proximidade geográfica, sendo que, frequentemente, por limitação das amostras disponíveis, apenas foi possível atribuir um posto udométrico a uma bacia hidrográfica, mesmo quando está última apresentava uma área considerável – pode explicar o facto de nem sempre haver concordância entre curvas de $\hat{\lambda}(t)$ referentes a caudais e a precipitações, aspeto este que, contudo, carece de investigação adicional.

REFERÊNCIAS

- Cowling, A., Hall, P., & Phillips, M. J. (1996). Bootstrap confidence regions for the intensity of a Poisson point process. *Journal of the American Statistical Association*, 91(436):1516-1524.
- Cunnane, C. (1973). A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction. *Journal of hydrology*, 18(3-4): 257-271.

- Cunnane, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resources Research*, 15(2):489-494.
- Diggle, P. (1985). A kernel method for smoothing point process data. *Applied statistics*, 138-147.
- Gomes, R.A. (2017). Modelação não-paramétrica das frequências dos eventos hidrológicos extremos (cheias e precipitações). Aplicação generalizada a Portugal Continental. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST/UTL
- López, J., & Francés, F. (2013). Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8):3189.
- Mudelsee, M. (2011). The Bootstrap in Climate Risk Analysis, in *Extremis: Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology*. Edited by: Kropp, J. P. and Schellnhuber, H. J., 45-58, Springer.
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., & Grünewald, U. (2003). No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature*, 425(6954):166-169.
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., & Grünewald, U. (2004). Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway “Zugstrasse Vb”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D23).
- Mudelsee, M., Deutsch, M., Börngen, M., & Tetzlaff, G. (2006). Trends in flood risk of the River Werra (Germany) over the past 500 years. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5):818-833.
- NERC (1975). *Flood Studies Report*, vol. I. Natural Environment Research Council.
- Portela, M., & Quintela, A. (2005). Regionalization of hydrologic information: establishment of flow series at ungauged watersheds. *Water Resources Management III (Carvoeiro, Portugal)* (pp. 11-20). Southampton, Boston: Wessex Institute, WITPress, ISBN 1-84564-007-1.
- Shane, R.M. & LYNN, W.R. (1964). Mathematical model for flood risk evaluation, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 90 (HY6), pp. 1-20.
- Silva, A. T., Portela, M. M., & Naghettini, M. (2012a). Nonstationarities in the occurrence rates of flood events in Portuguese watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1):241-254.
- Silva, A. T., Portela, M. M., & Naghettini, M. (2012b). Aplicação da técnica de séries de duração parcial à análise de frequência de variáveis hidrológicas aleatórias. 11º Congresso da Água, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Porto.
- Silva, A. T., Portela, M. M., & Naghettini, M. (2016). Cheias em bacias hidrográficas de Portugal Continental. Comportamento não estacionário e dependência entre a frequência do fenómeno e a oscilação do Atlântico Norte (NAO). 13º Congresso da Água, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Lisboa, Portugal.



Silverman, B. W. (1986). Density estimation for statistics and data analysis (Vol. 26). CRC press.

Trenberth, K.E. (2012). Framing the way to relate climate extremes to climate change. Clim. Change 115:283–290.

Todorovic, P., & Zelenhasic, E. (1970). A stochastic model for flood analysis. Water Resources Research, 6(6):1641-1648.