

REGIONALIZAÇÃO DE CAUDAIS DE CHEIA EM PORTUGAL CONTINENTAL

Maria M. PORTELA

Professora Auxiliar, IST, Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa, +351-21-8418142, mps@civil.ist.utl.pt

Ana Teresa DIAS

Engenheira Civil, UC

RESUMO

A **análise regional de cheias** permite estimar, de modo consistente, caudais de ponta de cheia em secções da rede hidrográfica que não disponham de registos hidrométricos ou em que o número de tais registos seja insuficiente.

Tal análise compreende normalmente duas etapas, a primeira referente à identificação de **regiões homogéneas** no que respeita a caudais de cheia e, a segunda, ao estabelecimento, para cada uma daquelas regiões, de um **modelo regional de distribuição de frequências**.

O trabalho que se resume teve por objectivo principal o desenvolvimento de uma proposta de delimitação de regiões homogéneas para Portugal Continental e o subsequente estabelecimento, para cada uma daquelas regiões, da curva regional de distribuição de frequências aplicável à estimativa de caudais de ponta de cheia em regime natural, em secções da rede hidrográfica com ausência ou insuficiência de registos hidrométricos.

A identificação de regiões homogéneas utilizou o método proposto por DALRYMPLE, 1960, e a obtenção das curvas regionais de distribuição de frequências, o método do índice de cheias.

Palavras-chave: regionalização de caudais de cheia, índice de cheias, curvas locais de distribuição de frequências, teste de homogeneidade, curva regional de distribuição de frequências.

1 – Introdução

O estabelecimento de caudais de ponta de cheia em secções da rede hidrográfica a partir da análise de registos de caudais instantâneos máximos anuais depara-se frequentemente com séries com dimensão muito reduzida, circunstância que pode comprometer a obtenção de estimativas fiáveis dos caudais pretendidos, especialmente das relativas a períodos de retorno elevados, usualmente requeridos em estudos de planeamento e de gestão dos recursos hídricos e no projecto e dimensionamento de obras hidráulicas e outras. São também frequentes as intervenções em secções da rede hidrográfica não dispendo de informação hidrométrica.

A estimativa de caudais de ponta de cheia em situações de insuficiência ou de ausência de registos de caudais instantâneos máximos anuais pode utilizar, entre outros procedimentos, informação de carácter regional, estabelecida para bacias hidrográficas que apresentem um comportamento hidrológico em cheia afim ao da bacia em menção.

Tal abordagem insere-se no âmbito da **regionalização de caudais de cheia** e compreende, em termos gerais, duas etapas, a primeira das quais referente à identificação das regiões homogéneas e à regionalização de curvas de distribuição de frequências.

Considera-se que uma região é homogénea quando as bacias hidrográficas nela incluídas apresentam um comportamento similar em termos de caudais excepcionais, ou seja, quando as curvas de distribuição de frequências daqueles caudais, após padronização adequada, denotam andamento próximo, dentro de um certo intervalo do erro de amostragem.

O procedimento mais frequentemente aplicado para delimitar regiões homogéneas em termos de caudais de cheia consiste em agrupar bacias hidrográficas geograficamente contíguas. Em alternativa à contiguidade geográfica, podem delimitar-se regiões homogéneas agrupando bacias com base na consideração de valores limiares de uma ou de mais características fisiográficas, eventualmente complementada com a de características climáticas, tais como a precipitação anual média.

A segunda etapa da regionalização de caudais de cheia refere-se aos procedimentos que, a partir da informação obtida na etapa precedente, permitem estimar caudais de ponta de cheia em secções da rede hidrográfica sem informação hidrométrica adequada.

De entre os trabalhos antecedentes no âmbito da regionalização de caudais de ponta de cheia em Portugal Continental (GONÇALVES, 1993, SOUSA, 1998 e LOUREIRO, 1984), refere-se brevemente o de LOUREIRO, 1984, pelo seu carácter pioneiro, de que resultou uma utilização frequente, não obstante o formalismo simplificado subjacente ao mesmo. Tendo por base as séries de caudais instantâneos máximos anuais registadas em 55 estações hidrométricas localizadas em Portugal Continental, aquele autor apresenta expressões regionais do tipo $Q_p = CA^Z$, em que Q_p é o caudal de ponta de cheia (m^3/s) com período de retorno T (anos) na bacia hidrográfica com área A (km^2) e C e Z são parâmetros regionais, dependendo, o primeiro, do período de retorno. LOUREIRO, 1984, apresenta os valores daqueles parâmetros para as onze regiões esquematicamente apresentadas na **Figura 1**.



Figura 1 – Regionalização proposta por LOUREIRO, 1984 (adaptada de LOUREIRO, 1984).

Anota-se que os limites das regiões propostas por LOUREIRO, 1984, não coincidem com limites de bacias hidrográficas, do que podem resultar acentuadas discrepâncias entre caudais de ponta de cheia fornecidos pelas expressões propostas por aquele autor para duas secções próximas de um mesmo curso de água, mas inseridas em regiões diferentes, o que se julga constituir uma aproximação pouco aceitável.

2 – Procedimentos e modelos aplicados na regionalização de caudais de cheia

2.1 – Considerações prévias

A proposta de regionalização de caudais de cheia em Portugal Continental que se apresenta fundamenta-se no método do **índice de cheias** (na designação inglesa *index-flood method*), desenvolvido por DALRYMPLE, 1960.

Tal método baseia-se no pressuposto de que a distribuição de frequências dos caudais instantâneos máximos anuais num conjunto de bacias pertencentes a uma região homogénea é idêntica, diferindo apenas de um factor de escala específico de cada bacia, designado por **índice de cheias**. Este índice pode ser a média ou outro parâmetro de localização da distribuição de frequências das séries daqueles caudais.

De acordo com o método em consideração, se as estações hidrométricas, a que correspondem bacias hidrográficas incluídas numa região homogénea, registam caudais instantâneos máximos anuais resultantes de um mesmo tipo de factores meteorológicos, então a adequada combinação desses registos poderá fornecer informação adicional relevante para a estimação de quantis daqueles caudais (DALRYMPLE, 1960).

Com base neste pressuposto, a combinação dos registos disponíveis de caudais instantâneos máximos anuais e o posterior relacionamento de uma curva de distribuição de frequências, entretanto estimada para a região, com as características fisiográficas das bacias hidrográficas nela inseridas, permitem estimar quantis daqueles caudais em qualquer secção da rede de drenagem a que corresponda uma bacia hidrográfica integrada na região homogénea.

As etapas compreendidas pelo método, objecto dos itens 2.2 a 2.6, podem ser resumidas por:

- i) constituição das séries dos caudais instantâneos máximos anuais registados num conjunto de estações hidrométricas e identificação de um **período de registos comum**;
- ii) estabelecimento, para cada série de caudais instantâneos máximos anuais, da correspondente **curva local de distribuição de frequências**;
- iii) identificação preliminar e delimitação de regiões previsivelmente homogéneas, por agrupamento de bacias hidrográficas que, por serem contíguas, se espera exibirem comportamentos hidrológicos semelhantes e conseqüente confirmação ou não da homogeneidade da região, mediante aplicação de um **teste de verificação da homogeneidade**;
- iv) para cada região reconhecida como homogénea, combinação adequada das curvas locais de distribuição de frequências de modo a obter uma **curva regional** aplicável à região;
- v) relacionamento de um índice característico de cada curva regional de distribuição de frequências – **índice de cheias** – com as características fisiográficas das bacias hidrográficas inseridas na região homogénea a que aquela curva se refere.

A três primeiras fases conduzem à **delimitação de regiões homogéneas** e as duas últimas, aos **modelos** aplicáveis, em cada região, à **estimação de caudais de ponta de cheia** com dados períodos de retorno em secções da rede de drenagem com insuficiência ou ausência de registos hidrométricos.

2.2 – Recolha de registos e identificação do período comum

De acordo com DALRYMPLE, 1960, a delimitação de regiões homogéneas deve ser realizada com base em séries de caudais instantâneos máximos anuais com cinco ou mais anos de registos, obtidas em estações hidrométricas a que correspondam bacias hidrográficas em condições próximas das naturais.

A verificação da homogeneidade de uma região é efectuada a partir das séries daqueles caudais relativos a bacias hidrográficas integradas na região. Para o efeito, é necessário adoptar um **período de registos comum**, entendido como o período em que maior número de estações hidrométricas possuem registos de caudais instantâneos máximos anuais. Em conformidade com DALRYMPLE, 1960, os caudais resultantes do preenchimento de falhas no período de registos comum não devem ser directamente utilizados no processo de delimitação de regiões homogéneas, embora possam sê-lo indirectamente, para esclarecer alguma eventual ambigüidade na interpretação de registos.

2.3 – Curvas locais de distribuição de frequências

As curvas de distribuição de frequências relativas às séries de caudais instantâneos máximos anuais registadas num conjunto de estações hidrométricas, quando devidamente adimensionalizadas e representadas num mesmo gráfico, exibem alguma dispersão. O teste de homogeneidade proposto por DALRYMPLE, 1960, averigua se tal dispersão é devida ou não a causas fortuitas. Sendo-o, admite que as bacias hidrográficas daquele conjunto de estações integram uma região homogénea no que respeita a caudais instantâneos máximos anuais.

Assim, para apreciar a homogeneidade da região torna-se necessário determinar a curva de distribuição de frequências referente a cada estação hidrométrica nela inserida, também designada por **curva local de distribuição de frequências**.

Tal curva é obtida mediante a representação gráfica dos registos de caudais instantâneos máximos anuais, Q , em ordenadas e numa escala linear, e dos correspondentes períodos de retorno (avaliados empiricamente pela fórmula de Weibull, RAO e HAMED, 2000, p.7), T , em abcissas e na escala transformada definida POWEL, 1943, dada por:

$$y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1)$$

Não obstante o reconhecimento de alguma subjectividade no processo, DALRYMPLE, 1960, propõe que as curvas locais de distribuição de frequências de caudais sejam obtidas por ajustamento visual e manual de uma curva aos anteriores pares de valores do caudal e do período de retorno, conforme se esquematiza na **Figura 2**.

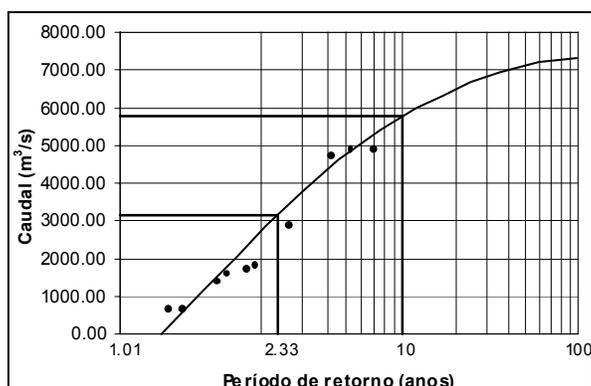


Figura 2 – Exemplo de uma curva local de distribuição de frequências obtida por ajustamento visual e manual.

2.4 – Teste de homogeneidade

Tendo por base as séries de caudais instantâneos máximos anuais registadas em estações hidrométricas que integram uma região previsivelmente homogénea, admite-se que 95% das estimativas daqueles caudais em função do período de retorno, Q_T , obtidas com base naquelas séries, apresentem uma diferença máxima de 2σ em relação aos valores mais prováveis dessas estimativas, sendo:

$$2\sigma = \frac{2e^y}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{T-1}} \quad (2)$$

em que n é a dimensão da série de caudais instantâneos máximos anuais e σ , o desvio-padrão da variável reduzida y .

O teste de homogeneidade deve ser efectuado com base na estimativa do caudal com período de retorno de dez anos, Q_{10} , na medida em que, na generalidade das situações, os períodos de registos são de tal modo reduzidas que não permitem a definição adequada da curva de distribuição de frequências para períodos de retorno mais elevados.

De acordo com o teste de homogeneidade, as curvas de distribuição de frequências dos caudais instantâneos máximos anuais registados num grupo de estações hidrométricas, quando devidamente adimensionalizadas por um índice de cheias e representadas num mesmo gráfico, com o eixo das ordenadas graduado numa escala linear de caudais e o das abcissas, referente ao período de retorno, na escala

deduzida por POWEL, 1943, baseada em y , tendem a apresentar alguns troços sensivelmente rectilíneos e próximos, embora exibindo alguma variação de inclinação. Para um grupo de estações hidrométricas que integram uma região homogénea, aquela variação da inclinação deverá estar compreendida entre o valor máximo de $y+2\sigma$ e o valor mínimo e $y-2\sigma$. O Quadro 1, apresentado em GUMBEL, 1942, e POWEL, 1943, fornece os valores de 2σ em função de n , bem como os respectivos valores das curvas limite superior, TU, e limite inferior, TL, obtidos por explicitação de T na Eq. (1).

Quadro 1 – Valores de y e correspondentes períodos de retorno, T .

n (anos)	y para T=10 anos	$2\sigma \approx \frac{6.33}{\sqrt{n}}$	Curvas limite			
			Superior		Inferior	
			$y+2\sigma$	TU	$y-2\sigma$	TL
5	2.25	2.84	5.09	160	-0.59	1.20
10		2.00	4.25	70	0.25	1.85
20		1.42	3.67	40	0.83	2.80
50		0.90	3.15	24	1.35	4.40
100		0.63	2.88	18	1.62	5.60
200		0.45	2.70	15.5	1.80	6.50
500		0.28	2.53	13	1.97	7.70
1000		0.20	2.45	22	2.05	8.30

Na **Figura 3** exemplificam-se curvas limite superior, TU, e inferior, TL, considerando amostras com períodos ajustados de registos até 60 anos. Para cada série de caudais instantâneos máximos anuais, o período ajustado de registos é igual à dimensão da série (antes do preenchimento das falhas), adicionado de metade do número de anos com falhas objecto de preenchimento (DALRYMPLE, 1960).

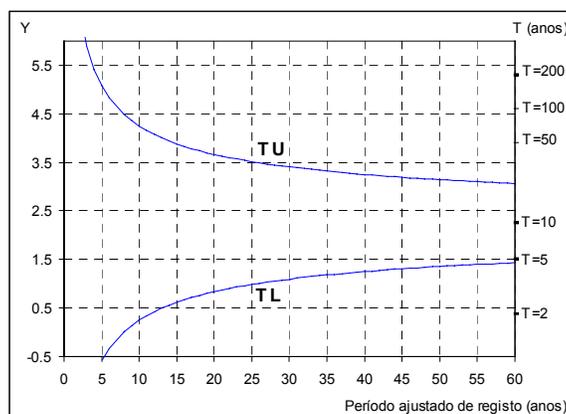


Figura 3 – Representação gráfica das curvas TU e TL do teste de homogeneidade.

Tendo por base as curvas locais de distribuição de frequências dos caudais instantâneos máximos anuais registados num conjunto de estações hidrométricas definindo bacias hidrográficas integradas numa região previsivelmente homogénea, a fase subsequente de aplicação do teste de homogeneidade consiste na adimensionalização dessas curvas.

Para tal, mediante leitura directa em cada curva local de distribuição de frequências de caudais, estima-se a média do caudal máximo anual assimilando-a ao período de retorno de 2.33 anos, ou seja, estima-se $Q_{2.33}$. De acordo com DALRYMPLE, 1960, a média obtida graficamente deverá ser mais estável do que a média determinada analiticamente.

O passo seguinte consiste em estimar o caudal Q_{10} , mais uma vez, mediante leitura directa em cada curva local de distribuição de frequências. Para as estações hidrométricas inseridas numa região previsivelmente homogénea obtêm-se, assim, pares de valores de $(Q_{10}; Q_{2.33})$. À média dos quocientes entre estes caudais, associa-se o factor de escala $\Delta = \overline{Q_{10}/Q_{2.33}}$.

Seguidamente e por leitura directa em cada curva local de distribuição de frequências, retira-se o período de retorno, T , que, nessa curva, corresponde ao caudal definido pelo produto de Δ por $Q_{2.33}$. Por associação ao anterior valor de T do correspondente período ajustado de registos, $n_{ajustado}$, obtêm-se, no

conjunto das estações hidrométricas analisadas, pares de valores ($n_{ajustado}$; T) que são representados no gráfico do teste de homogeneidade.

Para que a bacia hidrográfica referente a uma dada estação hidrométrica possa ser considerada como fazendo parte de uma região previsivelmente homogênea, a representação no gráfico do teste de homogeneidade do par de valores ($n_{ajustado}$; T) que lhe corresponde deverá situar-se no interior da área delimitada pelas curvas TU e TL e pelo eixo das ordenadas – **Figura 4**.

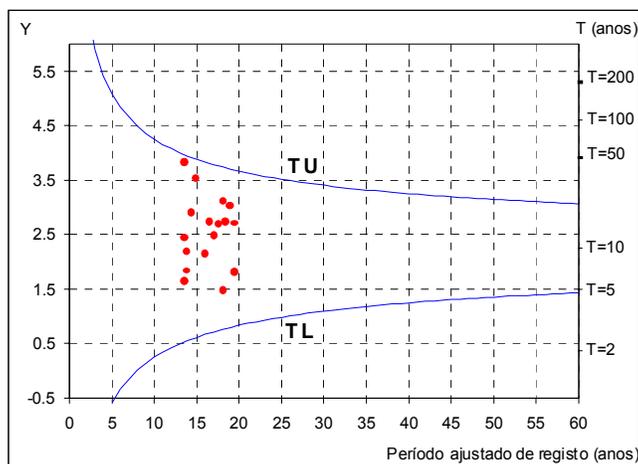


Figura 4 – Teste de homogeneidade.

2.5 – Curva regional de distribuição de frequências

As estimativas de quantis dos caudais instantâneos máximos anuais mediante a utilização de uma curva regional de distribuição de frequências são tanto mais precisas quanto maior for o número de curvas locais de distribuição de frequências utilizadas no estabelecimento da curva regional.

Resume-se, seguidamente, a sequência de cálculo conducente à obtenção da curva regional de distribuição de frequências relativa a uma região reconhecida como homogênea.

Como anteriormente se referiu, a primeira fase do estabelecimento da curva em menção corresponde à adimensionalização da curva local de distribuição de frequências relativa a cada uma das estações hidrométricas a que correspondem bacias hidrográficas inseridas na região homogênea, mediante a divisão das sucessivas ordenadas daquela curva local por um índice de cheias, igual à média, avaliada por $Q_{2.33}$, dos caudais instantâneos máximos anuais registados na estação.

Nas curvas regionais adimensionalizadas são seguidamente lidos valores de $Q_T/Q_{2.33}$, considerando, para o efeito, sucessivos valores de T. O número de pontos $Q_T/Q_{2.33}$ assim obtido para cada estação hidrométrica deverá ser o suficiente para permitir o posterior traçado gráfico de curva regional em vista.

Aos valores de $Q_T/Q_{2.33}$ fornecidos para um mesmo T pelas curvas locais de distribuição de frequências relativas às estações hidrométricas inseridas na região associa-se, então, a correspondente mediana.

A curva de distribuição de frequências regional resulta do ajustamento manual de uma curva aos pontos representativos dos pares de valores (período de retorno; mediana de $Q_T/Q_{2.33}$) referentes às estações hidrométricas inseridas na região. Em tal curva o eixo das abcissas, relativo a períodos de retorno, é graduado na escala transformada proposta por POWEL, 1943, e o eixo das ordenadas, numa escala linear – **Figura 5**.

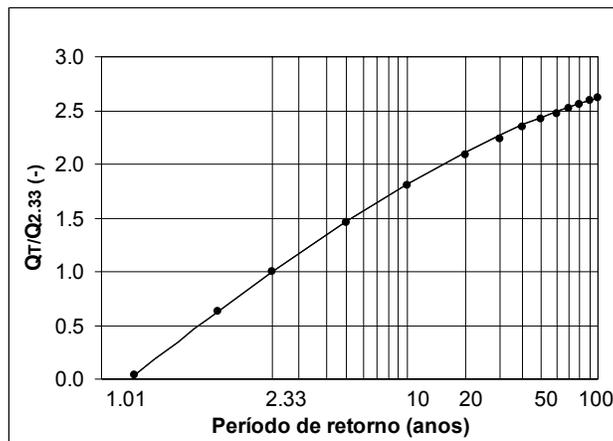


Figura 5 – Curva regional de distribuição de frequências.

2.6 – Relações entre índices de cheias e factores fisiográficos

A curva regional de distribuição de frequências aplicável a uma região homogênea só permite obter quantis dos caudais de cheia em bacias hidrográficas inseridas naquela região se for possível dispor, para tais bacias, dos correspondentes valores de $Q_{2.33}$. Conclui-se, assim, que a utilização de curvas regionais de distribuição de frequências na análise de cheias carece de procedimentos adicionais conducentes à estimativa dos valores de $Q_{2.33}$ em situações de ausência ou de insuficiência de registos hidrométricos.

De entre tais procedimentos, destaca-se o estabelecimento de relações entre médias dos caudais instantâneos máximos anuais registados em estações hidrométricas e características fisiográficas (ex., área da bacia hidrográfica, capacidade de armazenamento na rede de drenagem e área adjacente ou ocupação do solo) ou climáticas (ex., precipitação, designadamente em curtos intervalos de tempo) das bacias hidrográficas definidas por aquelas estações.

Vários autores identificam a área da bacia hidrográfica como factor fisiográfico determinante na génese de cheias, dependência aliás expressa pela fórmula de Meyer, *in* QUINTELA, 1984, p. 675:

$$Q = c A^\alpha \quad (3)$$

em que Q é o caudal (m^3/s), A , a área da bacia hidrográfica (km^2), c , um coeficiente que depende das características da bacia hidrográfica, e o expoente α toma valores inferiores a 1, em geral próximos de 0.5, mas variando entre 0.4 e 0.8.

Identificadas as regiões homogêneas e estabelecidas as correspondentes curvas regionais de distribuição de frequências, a associação a tais regiões de uma relação do tipo da expressa pela Eq. (3), mas fazendo intervir $Q_{2.33}$, torna possível obter caudais instantâneos máximos anuais com diferentes períodos de retorno numa secção da rede hidrográfica com ausência ou insuficiência de registos hidrométricos. Para o efeito, basta determinar a área da bacia hidrográfica definida por aquela secção e estimar o correspondente índice de cheias por aplicação da mencionada relação. Com base neste índice e na curva regional de distribuição de frequências relativa à região em que se insere a bacia hidrográfica definida por aquela secção procede-se, então, à avaliação dos caudais de ponta de cheia com diferentes períodos de retorno. Concretiza-se, assim a aplicação do método do índice de cheias proposto por DALRYMPLE, 1960.

3 – Aplicação à regionalização de caudais de cheia em Portugal Continental

3.1 – Recolha de registos e Identificação do período comum

As estações hidrométricas utilizadas nos estudos de regionalização foram seleccionadas de modo a assegurar que as séries de caudais instantâneos máximos anuais nelas registadas se referissem a condições sensivelmente naturais, ou seja, não alteradas, pelo menos significativamente, pela acção humana, e apresentassem pelo menos seis registos no período comum adoptado nos estudos. Tendo por base a sistematização da informação hidrométrica em Portugal Continental, adoptou-se para período comum (entendido como o intervalo de tempo em que maior número de estações hidrométricas apresentam registos, embora de modo eventualmente descontínuo) o período de 20 anos compreendido entre 1970/71 e 1989/90, inclusive. A qualidade das séries em tal período foi testada em termos de homogeneidade e de independência

temporal, mediante a aplicação de testes não paramétricos. As falhas de caudais instantâneos máximos anuais no período comum foram preenchidas por análise de regressão linear simples aplicada às séries daqueles caudais em duas estações hidrométricas, em que uma delas necessariamente apresenta registos, se não em todos, pelo menos em alguns dos anos em que a outra estação exhibe falhas.

Anota-se que, não obstante a dimensão mínima de seis registos exceder em uma unidade a proposta DALRYMPLE, 1960, foi adoptada nos estudos por se ter verificado que, face aos registos disponíveis, a consideração de mais um ano praticamente não acarretava a diminuição do número de séries de caudais instantâneos máximos anuais susceptíveis de serem utilizadas na análise de regionalização.

Como resultado dos anteriores factores, de um universo de 227 estações hidrométricas pré-seleccionadas, concluiu-se que apenas as 120 esquematicamente localizadas na **Figura 6** podiam ser utilizadas nos estudos de regionalização. De facto, 19 não transcreviam condições naturais, 69 não apresentavam pelos menos seis anos de registos no período comum e noutras 19 não foi possível efectuar o preenchimento de falhas naquele período comum.

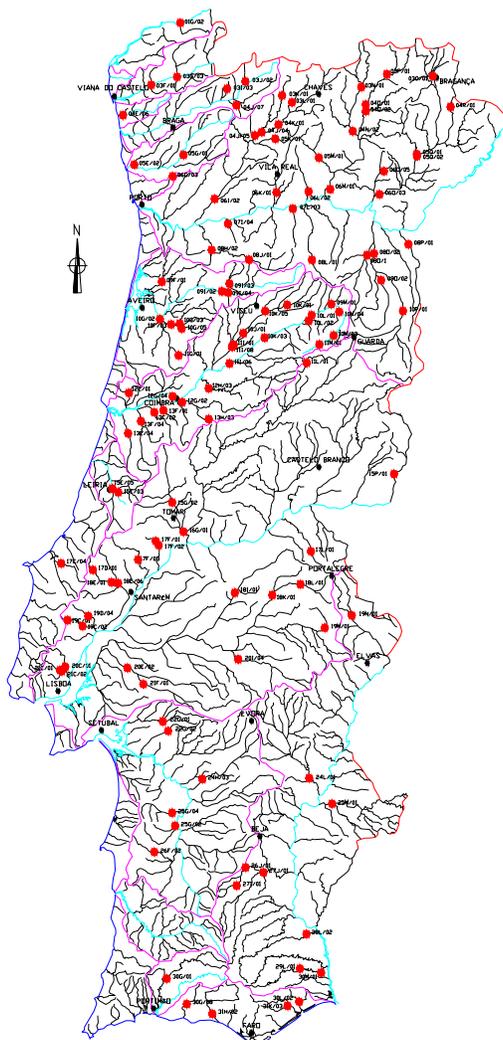


Figura 6 – Localização esquemática das 120 estações hidrométricas utilizadas na análise de regionalização de caudais instantâneos máximos anuais.

3.2 – Curvas locais distribuição de frequências

Na **Figura 7** exemplificam-se duas das 120 curvas locais de distribuição de frequências relativas às estações hidrométricas utilizadas nos estudos.

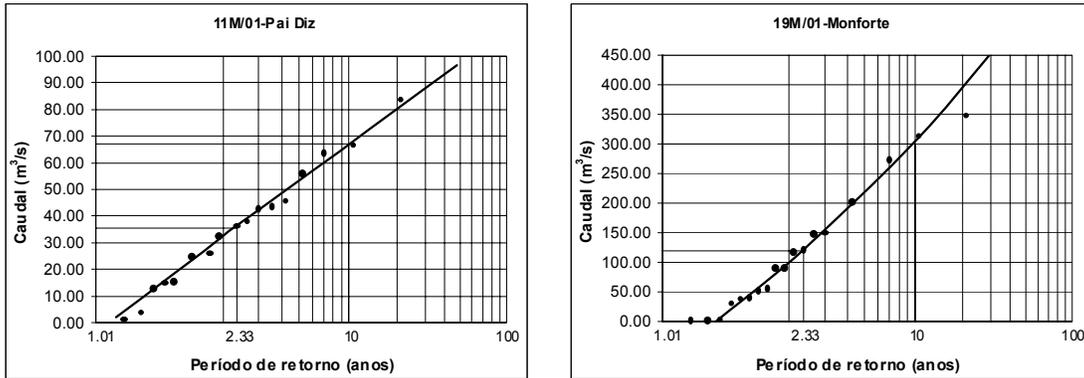


Figura 7 – Curvas locais de distribuição de frequências relativas às estações hidrométricas de Pai Diz (11M/01) e de Monforte (19M/01) (bacias hidrográficas dos rios Mondego e Tejo, respectivamente).

3.3 – Teste de homogeneidade

Tendo por base as curvas locais de distribuição de frequências, ensaiaram-se diferentes divisões de Portugal Continental em regiões homogéneas no que respeita a caudais instantâneos máximos anuais.

Numa primeira etapa, averiguou-se se o território continental poderia constituir uma única região homogénea. A **Figura 8** contém o gráfico do correspondente teste de homogeneidade. Em tal figura, TU e TL são as curvas limites superior e inferior que, conjuntamente com o eixo das ordenadas, definem a área no interior da qual se devem localizar os pontos representativos de bacias hidrográficas com séries de caudais instantâneos máximos anuais conformes com a hipótese de homogeneidade da região para a qual o gráfico foi estabelecido (no caso da figura, Portugal Continental). No mesmo gráfico, o eixo das abcissas refere-se ao período de registos ajustado e o das ordenadas, ao período de retorno na escala transformada y, proposta por POWEL, 1943. A segunda escala das ordenadas, representada do lado direito do gráfico, estabelece a correspondência entre os valores de y e do período de retorno, T.

Regista-se que não houve preocupação em especificar os períodos de retornos associados a caudais $\Delta Q_{2.33}$ quando tais períodos se revelaram superiores aos máximos valores das escalas das ordenadas, uma vez que esta circunstância conduz necessariamente a pontos na **Figura 8** localizados acima da curva TU e, como tal, não conformes com a hipótese de homogeneidade regional da série que representa. Na **Figura 8** tais pontos foram, assim, ficticiamente assinalados com uma cor diferente.

A anterior figura indica que o território continental não pode ser considerado uma única região homogénea. Ensiaram-se, deste modo, sucessivas hipóteses de constituição de regiões homogéneas, mas sempre por forma a que nunca ocorressem bacias hidrográficas compartilhadas por duas ou mais das regiões. Tentou-se, ainda, tirar o maior partido possível da informação hidrométrica disponível, evitando a concentração de estações hidrométricas em dadas regiões, mas antes tentando agrupá-las de modo a dispor-se de informação nas zonas do país menos monitorizadas.

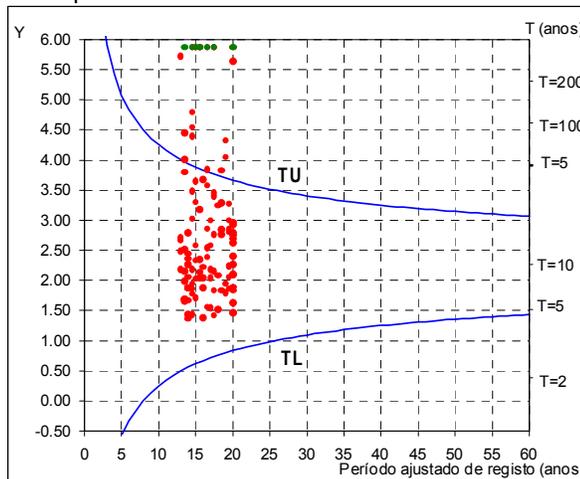


Figura 8 – Teste de verificação da homogeneidade para a totalidade do território continental.

Como resultado após sucessivas tentativas, estabeleceram-se as seis regiões esquematizadas representadas na **Figura 9** e identificadas por: i) **região litoral a norte do rio Tejo**; ii) **bacia hidrográfica do rio Douro**; iii) **bacia hidrográfica do rio Mondego**; iv) **bacia hidrográfica do rio Tejo**; v) **região litoral a sul do rio Tejo** e vi) **região interior a sul do rio Tejo**. Das 120 estações hidrométricas analisadas as inseridas nas anteriores regiões são em número de, respectivamente, 38, 30, 17, 15, 9 e 11.

Para simplificação, adoptaram-se designações abreviadas para as regiões ii), iii) e iv). De facto, a região ii) engloba apenas as bacias hidrográficas da margem direita do rio Douro, a montante da confluência do rio Tâmega, incluindo a bacia hidrográfica deste rio, e as bacias hidrográficas da margem esquerda do rio Douro imediatamente a montante da confluência com o rio Paiva. A região iii) respeita à bacia hidrográfica do rio Mondego na estação hidrométrica de Pt. de Sta. Clara (Coimbra) (12G/04), excluindo, contudo, o curso principal do rio. A região iv) engloba a margem esquerda do rio Tejo em conformidade com os limites estabelecidos no respectivo Plano de Bacia Hidrográfica (INAG, 2001) e a margem direita do mesmo rio sensivelmente a montante de Santarém. Os resultados da aplicação do teste de homogeneidade são apresentados na **Figura 10**.

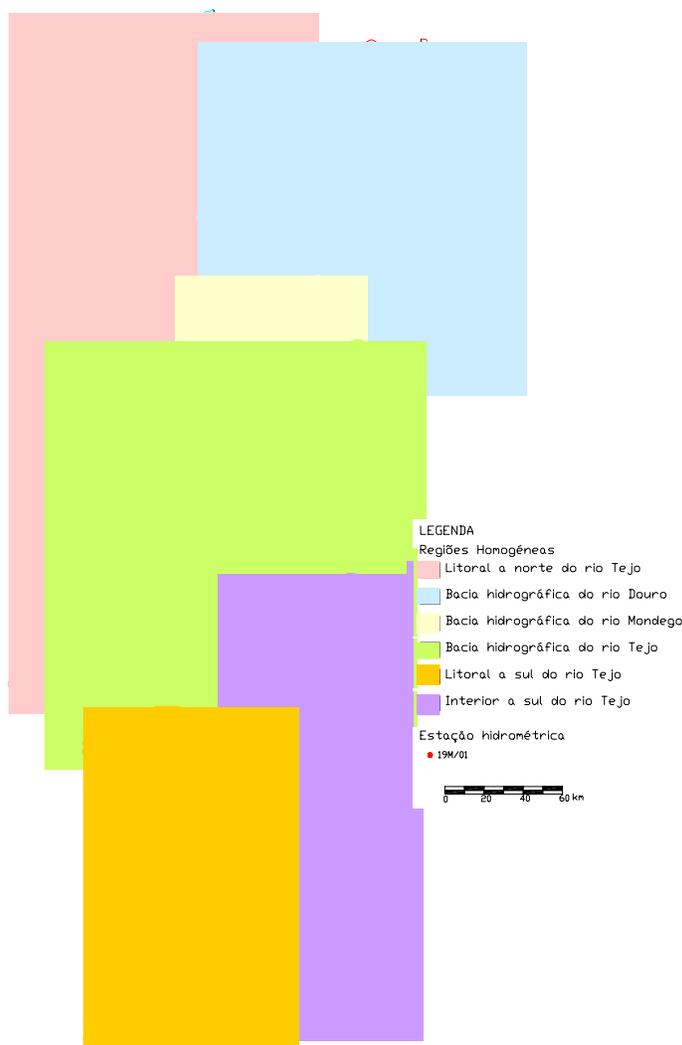
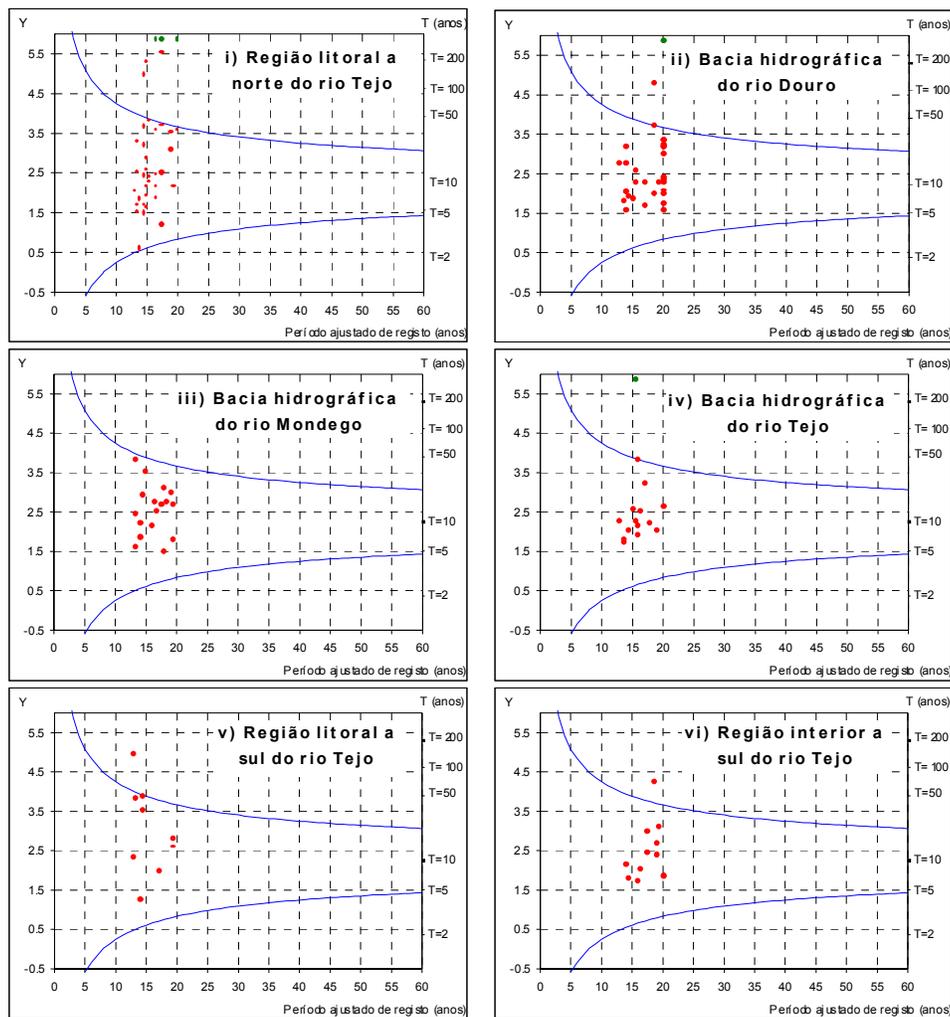


Figura 9 – Proposta de regionalização de Portugal Continental no que se refere a caudais instantâneos máximos anuais.



● - Ponto fictício correspondente a um período de retorno superior a 400 anos ($Y > 6.00$) e, consequentemente, fora dos limites do gráfico.

Figura 10 – Testes de homogeneidade.

Tendo por base os gráficos **Figura 10**, constata-se que 109 das 120 séries de caudais instantâneos máximos anuais utilizadas na análise dão consistência à proposta de regionalização e apenas onze séries não são conformes com tal proposta. Para além de este último número de séries ser muito reduzido, verifica-se que correspondem a bacias geograficamente dispersas pelo que não tem sentido considerar o seu agrupamento de modo a constituírem uma sétima região. Acresce que, em comparação com o pressuposto de região única (**Figura 8**), se reduziram de 27 para onze as ocorrências de séries de caudais instantâneos máximos anuais não conformes com a hipótese de homogeneidade. Regista-se ainda que o número de séries não conformes com aquela hipótese nos demais cenários de regionalização equacionados foi sempre superior a onze.

Considera-se, assim, que a divisão de Portugal Continental proposta na **Figura 9** conduz, de facto, ao reconhecimento, em cada uma das seis regiões aí representadas, de homogeneidade das séries de caudais instantâneos máximos anuais, pelo que se prosseguiu a análise de regionalização com base em tal divisão.

3.4 – Curvas regionais de distribuição de frequências

As curvas regionais de distribuição de frequências relativas às seis regiões da **Figura 9**, obtidas a partir das curvas locais de distribuição de frequências referentes às 120 estações hidrométricas inseridas naquelas regiões homogêneas, estão representadas na **Figura 11**.

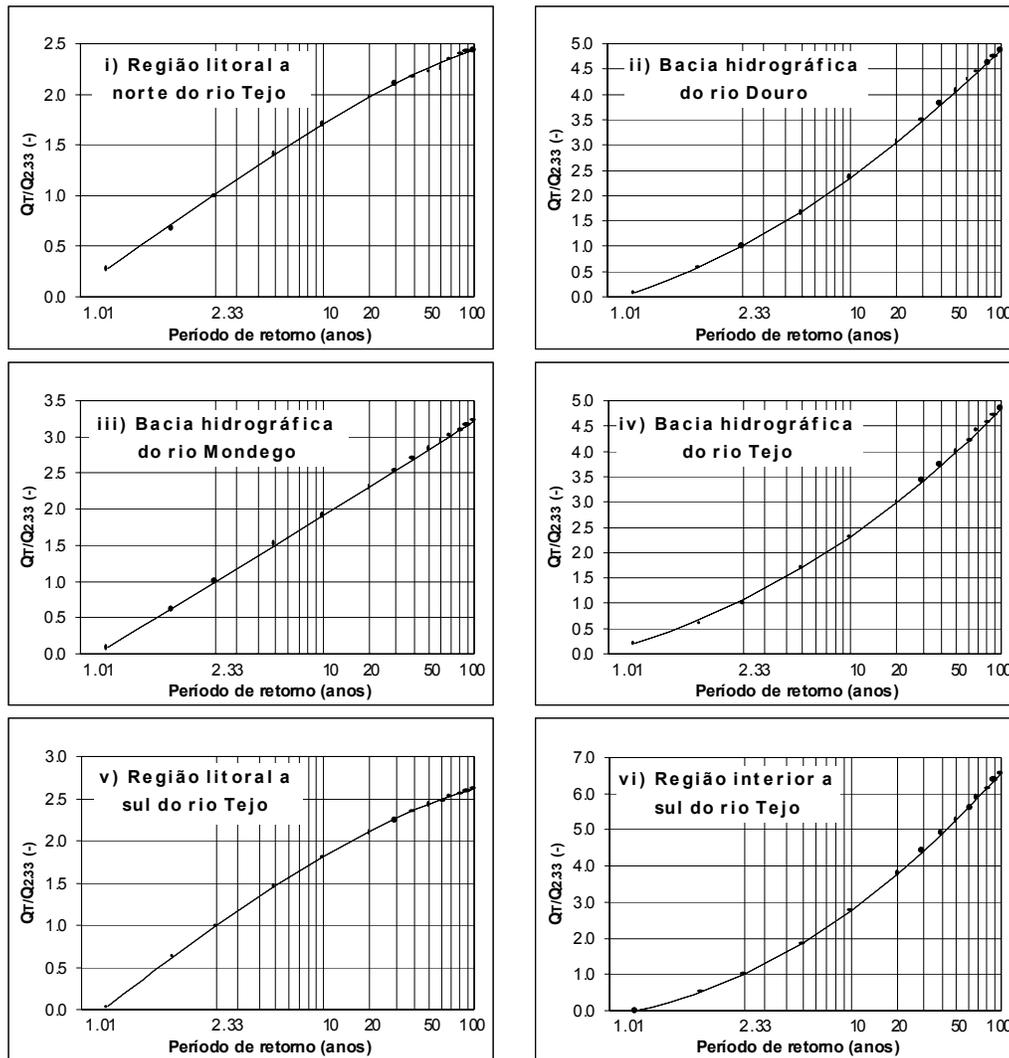


Figura 11 – Regionalização proposta. Curvas regionais de distribuição de frequências.

3.5 – Relações entre índices de cheias e áreas das bacias hidrográficas

De modo a permitir estimar os índices de cheias, $Q_{2.33}$, nas situações, previsivelmente mais frequentes, de insuficiência ou indisponibilidade de registos hidrométricos, averiguou-se a possibilidade de estabelecer relações entre aqueles índices e as áreas das bacias hidrográficas a que os mesmos se referem. Para o efeito, ensaiaram-se expressões do tipo $Q_{2.33} = D A^C$, em que $Q_{2.33}$ (m^3/s) é a média de caudais instantâneos máximos anuais, A (km^2), a área de bacia hidrográfica a que corresponde tal média e D e C são parâmetros a estimar mediante análise de regressão linear simples no campo das transformadas logarítmicas de $Q_{2.33}$ e A . Anote-se que é também do anterior tipo a relação proposta por DALRYMPLE, 1960, na análise de regionalização que efectuou.

Na Figura 12 indicam-se os resultados obtidos, incluindo os valores estimados para os parâmetros das equações de regressão linear, bem como os pontos (A , $Q_{2.33}$) referentes às estações hidrométricas inseridas nas diferentes regiões e utilizadas na análise de regressão.

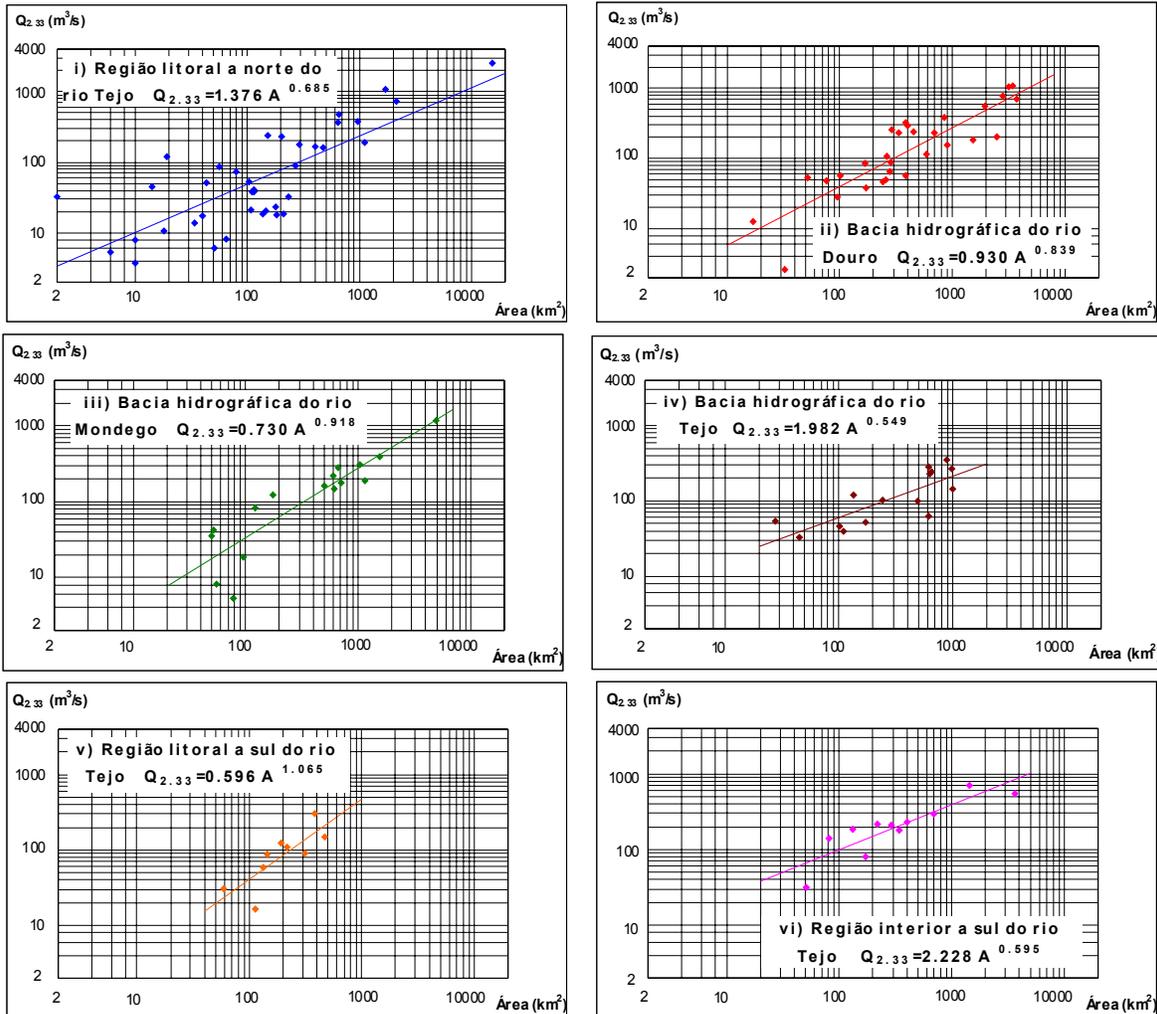


Figura 12 – Regionalização proposta. Relações entre a área de bacia hidrográfica e o índice de cheias, $Q_{2.33}$.

4 – Síntese

O estudo de **regionalização de caudais instantâneos máximos anuais**, brevemente apresentado, permite estimar caudais de ponta de cheia com dados períodos de retorno em secções da rede de drenagem de Portugal Continental em regime natural, na ausência ou insuficiência de registos hidrométricos.

Como resultado da aplicação da metodologia de DALRYMPLE, 1960, e do método do índice de cheias às séries de caudais instantâneos máximos anuais em 120 estações hidrométricas portuguesas, propõem-se, assim, as **seis regiões homogéneas**, em termos de caudais de ponta de cheia, esquematizadas na Figura 9. Para cada região foram estabelecidas duas relações:

- uma expressa pela **curva regional de distribuição de frequências (Figura 11)** que, em função do período de retorno, T , fornece o quociente, $Q_T / Q_{2.33}$, entre o caudal de ponta de cheia com aquele período, Q_T , e o **índice de cheias**, $Q_{2.33}$;
- outra que, entrando em conta apenas com a área, A , da bacia hidrográfica objecto da análise de cheias, permite obter o **índice de cheia**, $Q_{2.33}$ (**Figura 12**).

Conforme se esquematiza na **Figura 13**, a sequência de cálculo que, baseada nas relações precedentes, conduz à estimativa de caudais de ponta de cheia em secções não monitorizadas da rede hidrográfica de Portugal Continental efectua-se de acordo com as seguintes etapas:

- definição da bacia hidrográfica relativa à secção de cálculo e obtenção da respectiva área, A ;
- identificação da região homogénea em que tal bacia se insere;

- iii) leitura, na curva regional de distribuição de frequências referente à anterior região, do valor da relação $Q_T/Q_{2.33}$ correspondente ao período de retorno, T , para o qual se pretende estimar o caudal de ponta de cheia, Q_T ;

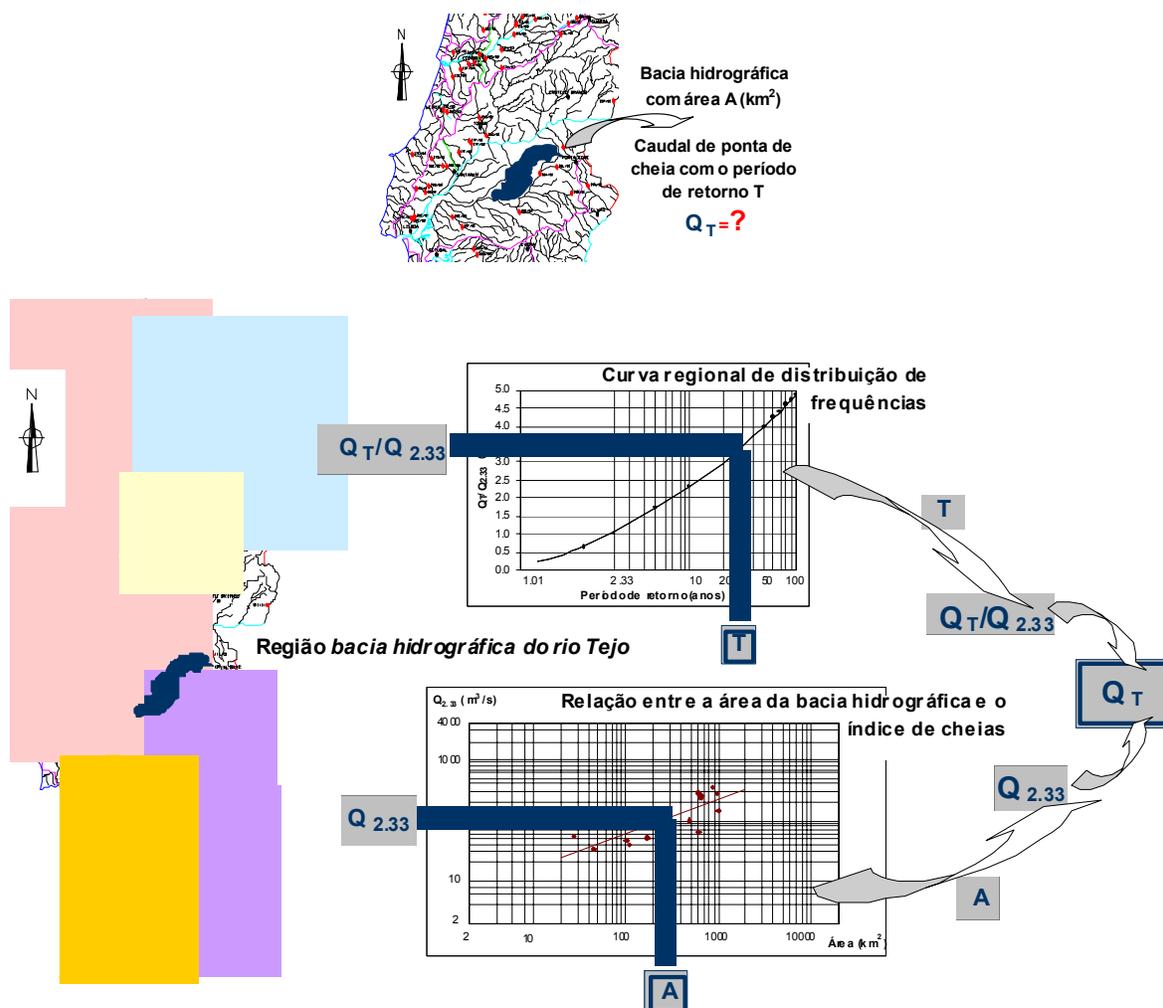


Figura 13 – Representação esquemática dos procedimentos propostos para a obtenção de caudais de ponta de cheia em Portugal Continental.

- iv) leitura, na curva que, para a região, relaciona áreas de bacias hidrográficas com índices de cheias, do valor deste índice, $Q_{2.33}$, correspondente à área A obtida em i);
 v) obtenção do caudal de ponta de cheia pretendido, Q_T , por multiplicação dos valores de $Q_T/Q_{2.33}$ e de $Q_{2.33}$, respectivamente obtidos em iii) e iv).

Referências bibliográficas

- DALRYMPLE, T., 1960. *Flood Frequency Analysis*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1543-A., Reston, Va.
 GONÇALVES, M. I., 1993. Regionalização da Distribuição Generalizada de Extremos. Aplicação à Previsão de Caudais de Cheia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
 GUMBEL, E. J., 1942. *Statistical Control-Curves for Flood-Discharges*. Am. Geophys. Union Trans., pt. 2, pp., 489-509.
 INAG, 2001. Plano de bacia hidrográfica do rio Tejo.
 LOUREIRO, J. M., 1984. Expressão para o Cálculo do Caudal de Cheia em Cursos de Água de Portugal, Recursos Hídricos, 5(1), pp. 53-78.
 POWEL, R. W., 1943. *A Simple Method of Estimating Flood Frequencies*. Civil Eng., 13 (2), pp. 105-106.
 QUINTELA, A. C., 1984. "Hidrologia de águas superficiais", in *Curso Internacional de Hidrologia Operativa*, MES, STOP, DGRAH, 1984, vol. 2, pp. 505-716.
 RAO, A. R. e HAMED, K. H., 2000. *Flood Frequency Analysis*. CRC Press LLC, N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida, U.S.A.
 SOUSA, P. C., 1998. Contribuição para a Análise Regional da Distribuição de Caudais de Cheia em Portugal Continental. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Rega e dos Recursos Agrícolas. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.