
**DA REGIONALIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO HIDROMÉTRICA AO
DIMENSIONAMENTO DE ALBUFEIRAS DE REGULARIZAÇÃO E À
ANÁLISE DE INCERTEZAS**

Maria Manuela Portela
Correia dos Santos Ramos da Silva

Lição correspondente ao Sumário a que se refere a alínea c) do Artigo 5º do Decreto-Lei
n.º 239/2007, de 19 de Junho

IST, DECIVIL, JUNHO DE 2014



**DA REGIONALIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO HIDROMÉTRICA
AO DIMENSIONAMENTO DE ALBUFEIRAS E À ANÁLISE DE INCERTEZAS**

ÍNDICE DO TEXTO

1. ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO	1
2. ETAPAS FUNDAMENTAIS NO ESTABELECIMENTO DE UM MODELO DE REGIONALIZAÇÃO COM VISTA À ESTIMAÇÃO DE ESCOAMENTOS	7
3. A ALTURA DO ESCOAMENTO ANUAL MÉDIO COMO PARÂMETRO DE REGIONALIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO HIDROMÉTRICA	8
3.1. A DEPENDÊNCIA ENTRE A ALTURA DO ESCOAMENTO ANUAL MÉDIO E VARIABILIDADE TEMPORAL RELATIVA DO ESCOAMENTO	8
3.2. O MODELO DE REGIONALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS	15
4. A ALTURA DO ESCOAMENTO ANUAL MÉDIO COMO PARÂMETRO DE ESTIMAÇÃO DE CAPACIDADES ÚTEIS DE ALBUFEIRAS DE REGULARIZAÇÃO	21
4.1. CONCEITOS DE BASE	21
4.2. DIMENSIONAMENTO DE ALBUFEIRAS NUMA ÓPTICA DETERMINÍSTICA	28
4.3. DIMENSIONAMENTO DE ALBUFEIRAS NUMA ÓPTICA PROBABILÍSTICA, BASEADA EM SÉRIES SINTÉTICAS DE ESCOAMENTOS	31
5. APONTAMENTO FINAL. PERSPECTIVAS	43

ÍNDICE DOS QUADROS

- Quadro 1** Problemas de natureza hidrológica e respostas proporcionadas pela estimação de escoamento em bacias hidrográficas não monitorizadas ou fracamente monitorizadas (adaptado de Bloschl *et al.*, 2013).
- Quadro 2** Princípios que devem orientar o desenvolvimento de um modelo (adaptado de Hillel, 1987, *in* Silva, 1996).
- Quadro 3** Estações hidrométricas localizadas em Portugal Continental e adoptadas nos estudos de regionalização de informação hidrométrica e de dimensionamento de albufeiras de regularização (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

- Quadro 4** Coeficientes de correlação entre séries de escoamento anual, mensal e diário registadas e obtidas por regionalização/transposição em seis grupos de duas estações (adaptado de Portela & Quintela, 2005).
- Quadro 5** Coeficiente σ e expoente β das curvas definidas pela **equação (15)** para regularizações específicas de albufeiras, C/V expressas em percentagem e alturas dos escoamentos anuais médios, H, em milímetros. Garantias de 80, 90, 95 e 100% e pedidos uniformes correspondentes a graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% (adaptada de Silva, 2010).
- Quadro 6** Coeficiente σ e expoente β das curvas definidas pela **equação (15)** para regularizações específicas de albufeiras, C/V, expressas em percentagem e alturas dos escoamentos anuais médios, H, em milímetros. Garantias, G, de 80, 90, 95 e 100%, garantias probabilísticas, G_p , de 80, 90, 95 e 99% e pedidos uniformes correspondentes a graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% (adaptado de Silva, 2010).

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** Estações hidrométricas activas, excluindo as da EDP. Caracterização da dimensão das séries de registos anuais e mensais (anos hidrológicos temporalmente contínuos ou não).
- Figura 2** Investigação orientada para a mudança de paradigma: dos modelos baseados na calibração para os modelos baseados num conhecimento acrescido (reproduzida de Sivapalan *et al.*, 2003).
- Figura 3** Modelos hidrológicos matemáticos (reproduzida de Quintela & Portela, 2002).
- Figura 4** Hipotético esquema conceptual de um modelo complexo de estimação de escoamentos.
- Figura 5** Representação esquemática do processo de estabelecimento de um modelo de regionalização (adaptada de Wagener & Wheater, 2006).
- Figura 6** Equações de regressão entre o coeficiente de variação do escoamento anual, C_v , e a altura do escoamento anual médio, H, e pontos representativos dos pares de valores (H; C_v) (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).
- Figura 7** Equações de regressão entre a altura do escoamento anual com probabilidade de não excedência α , H_α , e a altura do escoamento anual médio, H, e pontos representativos dos pares de valores (H; H_α) (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

- Figura 8** Curvas adimensionais de duração média anual do caudal médio diário: nas a) 54 estações hidrométricas do **Quadro 3** e nas b) 26 e c) 28 estações desse quadro com alturas anuais médias do escoamento, H , respectivamente superiores e inferiores a 400 mm (adaptada de Portela & Quintela, 2005).
- Figura 9** Representação da duração anual média do módulo em função de H (adaptada de Portela & Quintela, 2005).
- Figura 10** Representação das equações que traduzem a dependência, em relação a H , das médias, MED , e dos desvios padrão, DSV , das séries dos desvios quadráticos médios, DQM , dos escoamentos mensais e diários adimensionais (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).
- Figura 11** Estações hidrométricas: a) Monte da Ponte e Entradas; b) Torrão do Alentejo e Moinho do Bravo; c) Amieira e Odiveiras; d) Monte dos Fortes e Vascão; e) Cidadelhe e Castanheiro; f) Castro Daire e Vinhais-Qta. da Ranca. Escoamentos anuais em volume e adimensionais nos períodos comuns de registos (adaptada de Portela & Quintela, 2005).
- Figura 12** Estações hidrométricas: a) Monte da Ponte e Entradas; b) Torrão do Alentejo e Moinho do Bravo; c) Amieira e Odiveiras; d) Monte dos Fortes e Vascão; e) Cidadelhe e Castanheiro; f) Castro Daire e Vinhais-Qta. da Ranca. Escoamentos mensais em volume e adimensionais num período comum de 5 anos de registos (adaptado de Portela & Quintela, 2005).
- Figura 13** Mapa de isolinhas do escoamento anual médio em Portugal Continental.
- Figura 14** Representação esquemática das variáveis intervenientes na **equação (9)**.
- Figura 15** Problemas a equacionar no dimensionamento de albufeiras de regularização.
- Figura 16** Volume ΔD_k^* associado à definição da vulnerabilidade, η , de uma albufeira de regularização.
- Figura 17** Relação entre vulnerabilidade e resiliência para quatro albufeiras hipotéticas com escoamentos afluentes resultantes de dados históricos (*Historical data*) e obtidos por geração (*Stochastic data*) (reproduzida de McMahon *et al.*, 2006).
- Figura 18** Relação entre vulnerabilidade, η , e resiliência, φ , para hipotéticas albufeiras coincidentes com as estações hidrométricas do **Quadro 3**. Simulação baseada nos escoamentos afluentes às estações hidrométricas. Pedidos variáveis entre 20 e 90 das aflúncias anuais médias e garantias de 80, 90 e 95% (reproduzida de Silva, 2010).

- Figura 19** Curvas representativas das relações entre regularizações específicas de albufeiras, C/V , e alturas dos escoamentos anuais médios, H . Garantias de 80, 90 e 95% e pedidos uniformes correspondentes a graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).
- Figura 20** Curvas representativas das relações entre regularizações específicas de albufeiras, C/V , e alturas dos escoamentos anuais médios, H , obtidas tendo por base as amostras de escoamentos mensais e as médias dos valores de C/V decorrentes das séries sintéticas. Garantias de 80, 90, 95% e 100% e pedidos uniformes correspondentes aos graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 90, 50 e 20% (adaptada de Silva, 2010).
- Figura 21** Representação esquemática do procedimento aplicado à análise das capacidades úteis a dispor em albufeiras de regularização nas ópticas determinística e probabilística (adaptada de Silva, 2010).
- Figura 22** Garantias, G , de 80% (em cima) e de 95% (em baixo) e pedidos uniformes correspondentes ao grau de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 40%. Curvas representativas das relações entre regularizações específicas, C/V , e alturas do escoamento anual médio, H , obtidas tendo por base as amostras de escoamento mensais e os 1200 valores de C/V decorrentes das séries sintéticas desses escoamentos, neste último caso, caracterizadas em termos de médias e para as garantias probabilísticas, G_p , de 80 e de 95% (adaptada de Silva, 2010).
- Figura 23** Resultados da **Figura 22** para a garantia, G , de 80% e pedidos uniformes correspondentes aos graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 40%. Pontos exemplificativos da leitura da **Figura 22** para uma hipotética albufeira dominando uma bacia hidrográfica com a altura do escoamento anual médio de cerca de 250 mm.
- Figura 24** Albufeiras dominando bacias hidrográficas com alturas do escoamento anual médio, H , de cerca de 250 e 1750 mm. Aumento da amplitude do intervalo de valores de C/V em consequência: separadamente para cada gráfico, da diminuição da altura do escoamento anual médio (maior irregularidade temporal relativa do escoamento); do gráfico superior para o gráfico inferior, para um mesmo valor de H , do aumento da garantia G .



1. Âmbito e justificação

Na generalidade das regiões do Globo a caracterização dos recursos hídricos, no sentido lato, e a estimação de escoamentos, em particular, confrontam-se mais frequentemente com a inexistência ou insuficiência de informação hidrométrica em termos, quer temporais (séries com dimensão insuficiente e/ou exibindo falhas), quer espaciais (bacias hidrográficas não monitorizadas) (Sivapalan *et al.*, 2003, Hrachowitz *et al.*, 2013). Especificamente no que respeita a Portugal Continental, não obstante o elevado número de estações hidrométricas que constam do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, SNIRH – 717 estações¹ – são muito frequentes as estações extintas, desactivadas, suspensas ou não instaladas. Concretamente, das 619 estações hidrométricas que não são da responsabilidade de EDP, apenas 273 estão activas. Destas estações, 81 dispõem, quanto muito, de registos de nível hidrométrico e somente 97 apresentam registos de caudal médio diário em secções da rede de drenagem não coincidentes com aproveitamentos hidráulicos. A dimensão média das séries anuais completas de escoamentos diários nessas 97 estações é de somente 13 anos (**Figura 1**), mais frequentemente temporalmente descontínuos. Acresce que, recentemente, deixaram de estar asseguradas as “condições financeiras e técnicas”¹ necessárias à exploração e à manutenção continuadas de algumas das redes de monitorização que, deste modo, se têm vindo a degradar.

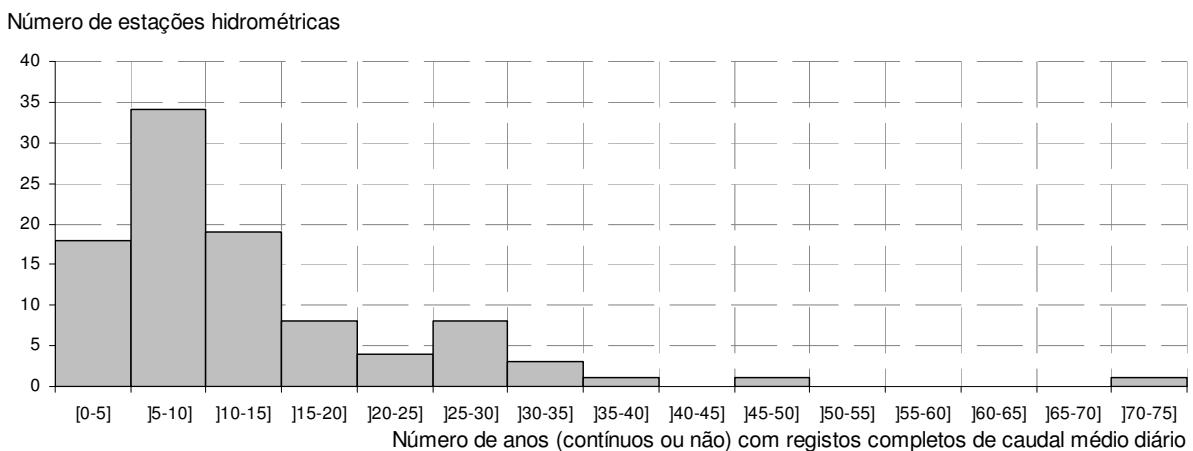


Figura 1 – Estações hidrométricas activas, excluindo as da EDP. Caracterização da dimensão das séries anuais com registos completos de caudal médio diário (anos hidrológicos temporalmente contínuos ou não).

Concluiu-se, assim, que a estimação de escoamentos em Portugal Continental apresenta um amplo domínio de aplicação que, para além dos casos de estudos inseridos em bacias hidrográficas não monitorizadas, inclui muito pertinentemente a extensão de séries de

¹ Informação recolhida em Março de 2014 em snirh.pt.

escoamentos, com ênfase para as estações hidrométricas entretanto extintas, desactivadas ou suspensas, e o preenchimento de falhas exibidas pela generalidade das séries de escoamentos.

Independentemente da situação específica identificada para Portugal Continental, reconhece-se que a estimação de escoamentos em bacias hidrográficas não monitorizadas ou fracamente monitorizadas constitui um objectivo sempre actual na modelação hidrológica uma vez que proporciona um conhecimento indispensável ao projecto de infra estruturas, hidráulicas e outras, e às acções de planeamento e de gestão de recursos hídricos. No **Quadro 1** indicam-se os problemas recentemente sistematizados por Bloschl *et al.*, 2013, requerendo a estimação de escoamentos no âmbito da gestão integrada dos recursos hídricos, incluindo a gestão do risco.

Quadro 1 – Problemas de natureza hidrológica e respostas proporcionadas pela estimação de escoamento em bacias hidrográficas não monitorizadas ou fracamente monitorizadas (adaptado de Bloschl *et al.*, 2013).

Problema de natureza hidrológica	Objectivo, em termos de gestão da água
De quanta água se dispõe?	Afectação do recurso, planeamento a médio e longo prazos, recarga de aquíferos.
Quando está essa água disponível?	Abastecimento de água e produção de energia, medidas de planeamento e de recuperação/reabilitação.
Durante quanto tempo haverá água?	Objectivos ambientais, produção de energia, abastecimento urbano e industrial, rega.
Quão seco poderá ser o período?	Caudais ambientais para manutenção do estado ecológico dos cursos de água, gestão de secas, recuperação/reabilitação fluvial, estudo da diluição de efluentes.
Quão significativa poderá ser a cheia?	Projecto de descarregadores e de passagens hidráulicas, de barragens e de diques, gestão de reservatórios, recuperação/reabilitação fluvial, gestão do risco.
Qual é a dinâmica do escoamento?	Modelação dos aspectos antecedentes, acrescida do estudo e da previsão da qualidade da água (sedimentos e nutrientes).

Exemplifica a actualidade do tema a iniciativa lançada pela *International Association of Hydrological Science (IAHS)* para o decénio 2003–2012, sob a designação de *Decade on predictions in ungauged basins (PUB)*, com o objectivo de contribuir para a formulação e implementação de programas científicos que, de modo coordenado, mobilizassem e potenciassem a comunidade científica no sentido de um efectivo avanço na capacidade de previsão e de modelação em bacias hidrográficas não monitorizadas (Sivapalan *et al.*, 2003, Hrachowitz *et al.*, 2013). A *IAHS* entendeu dinamizar assim o desenvolvimento de novas e mais potentes ferramentas capazes de proporcionar um mais completo e profundo conhecimento do “funcionamento hidrológico” das bacias hidrográficas a diferentes escalas temporais. Para o efeito, lançou um desafio no sentido de uma mudança de paradigma, com progressiva substituição dos modelos hidrológicos existentes, mais frequentemente concebidos para a modelação em bacias hidrográficas monitorizadas, mediante recurso a técnicas de calibração, por modelos inovadores,

baseados na compreensão acrescida dos fenómenos em presença e, como tal, mais capacitados para a modelação em bacias hidrográficas com ausência ou escassez de informação hidrométrica (Sivapalan *et al.*, 2003, Hrachowitz *et al.*, 2013) – **Figura 2**.

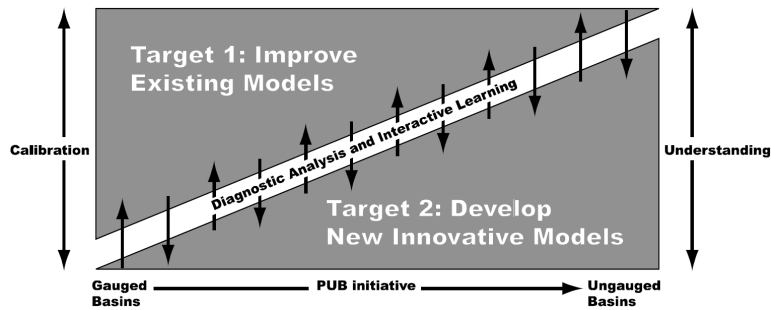


Figura 2 – Investigação orientada para a mudança de paradigma: dos modelos baseados na calibração para os modelos baseados num conhecimento acrescido (reproduzida de Sivapalan *et al.*, 2003).

Existe um amplo número de diferentes modelos de estimação de escoamentos fluviais. De entre as igualmente numerosas classificações dos modelos hidrológicos (Jajarmizadeh *et al.*, 2012) a **Figura 3** contém uma proposta de classificação dos de natureza matemática.



Figura 3 – Modelos hidrológicos matemáticos (reproduzida de Quintela & Portela, 2002).

A lição que se apresenta não aborda, contudo, a estimação de escoamentos fluviais na sua conceptualização geral, mas foca-se em modelos de regionalização, decorrentes de parte da actividade de investigação da signatária, no sentido da interpretação e da sistematização das características fundamentais do regime fluvial em Portugal Continental, com vista à conseqüente estimação de escoamentos em bacias hidrográficas não monitorizadas ou fracamente monitorizadas. Afigurando-se que tais modelos capacitam significativamente os futuros profissionais especialistas em hidráulica e recursos hídricos, julgou-se de interesse proceder à sua sistematização sob a forma de lição, correspondente a matéria a incluir no âmbito da unidade curricular proposta de Modelação e de Planeamento de Recursos Hídricos, inserida no 1º ano do

2º ciclo do Mestrado Integrado em Engenharia Civil do IST, na área de especialização de Hidráulica e Recursos Hídricos.

Com efeito e como antes mencionado, em Portugal Continental, os estudos hidrológicos a realizar no âmbito, quer do planeamento da utilização e do domínio das águas superficiais, quer do projecto das infra-estruturas para tanto requeridas confrontam-se muito frequentemente com a inexistência de informação hidrométrica, por a generalidade das intervenções ocorrerem em bacias hidrográficas não coincidentes com as de estações de monitorização.

Para aquele território, Quintela & Portela, 2002, apresentam uma síntese da actividade desenvolvida, no essencial, nos últimos 25 anos do século XX, por mais de cinquenta autores, com vista a propor modelos matemáticos no âmbito da estimação de escoamentos (incluindo em condições de cheia e de seca) em secções não monitorizadas da rede hidrográfica. Tais modelos revestiram-se de diferentes graus de complexidade que dependeram, em grande parte, do escoamento objecto de avaliação, da escala temporal e espacial para a qual se pretendia estimar esse escoamento e da aproximação adoptada na descrição das componentes do balanço hidrológico, ao nível da bacia hidrográfica. Foram, assim, identificados modelos de tipos distintos, com ênfase para os determinísticos, quer agregados, quer distribuídos destinados à estimação de escoamentos a partir de precipitações e de outras variáveis climatológicas e da consideração das características fisiográficas das bacias hidrográficas.

Julga-se, contudo, que o recurso a tais modelos na prática profissional ligada aos recursos hídricos não é muito comum, pelo menos a uma escala temporal inferior ao ano. De facto, os processos que ocorrem na bacia hidrográfica são bastante complexos e nem sempre passíveis de descrição matemática simples e precisa, conforme se sugere na **Figura 4**. Acresce que, mesmo alguns dos modelos determinísticos mais simplificados, exigem apreciável quantidade de informação, pressupondo frequentemente a estimação de parâmetros baseada na comparação entre escoamentos estimados pelos modelos e escoamentos observados, estimação que só é possível se existirem registos destes últimos escoamentos. Quanto mais complexo é o modelo, mais imprecisos poderão ser os seus resultados se forem insuficientes os dados disponíveis para calibrar os parâmetros nele intervenientes e para o validar.

A propósito da conceptualização de um modelo e não obstante o longo intervalo de tempo entretanto decorrido, afigurou-se interessante apresentar, no **Quadro 2**, os quatro princípios que Hillel, 1987 (*in* Silva, 1996) considerou que deveriam orientar o desenvolvimento de um modelo, dada a inclusive maior actualidade desses princípios, em virtude de a capacidade acrescida de cálculo permitida pelos actuais meios informáticos ter potenciado formalismos matemáticos progressivamente mais complexos.

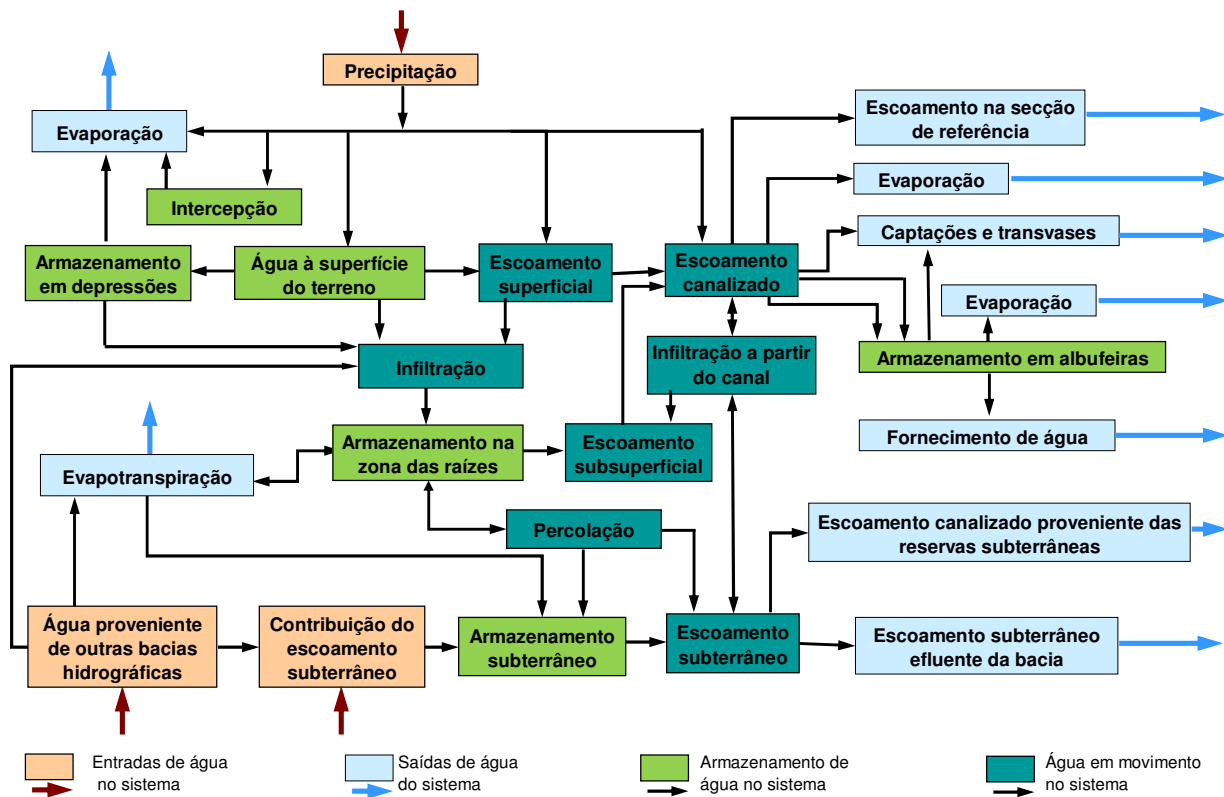


Figura 4 – Hipotético esquema conceptual de um modelo complexo de estimação de escoamentos.

Quadro 2 – Princípios que devem orientar o desenvolvimento de um modelo (adaptado de Hillel, 1987, in Silva, 1996).

Parcimónia	Um modelo não deve ser mais complexo do que o necessário e deve incluir o menor número de parâmetros possível com valores a obter dos dados.
Modéstia	Um modelo não deve pretender fazer demais; não existe tal coisa como "O Modelo".
Precisão	Um modelo não deve descrever o fenómeno com uma precisão superior à capacidade de o medir.
Verificabilidade	Um modelo tem de ser verificável e é necessário saber se é válido ou não e quais são os limites da sua validade.

No anterior contexto e face a uma muito pertinente necessidade de capacitar os profissionais com respostas técnica e cientificamente sustentadas, foi levada a cabo uma investigação com vista a estimar o escoamento em secções não monitorizadas da rede hidrográfica de Portugal Continental mediante a aplicação de técnicas de regionalização/transposição espacial dos escoamentos registados em estações hidrométricas.

Por **regionalização** no contexto da estimação de escoamentos entende-se, o **modelo/procedimento de transferência de informação hidrométrica de uma bacia**

hidrográfica onde essa informação está disponível para outra bacia hidrográfica não monitorizada ou dispo de escassa informação hidrométrica.

A transferência de informação enquanto modelo regional tem sido amplamente utilizada na estimação de escoamentos, como demonstra a revisão bibliográfica apresentada em Razavi & Coulibaly, 2013, onde são identificados cerca de 70 trabalhos desenvolvidos no período de 1990 a 2011 no âmbito do tema e incidindo sobre as mais diversas regiões do Globo (América do Norte, Ásia, Austrália, África e Europa) e sobre bacias hidrográficas com áreas (de 0.04 km² a 823 000 km²) e constrangimentos topográficos e climáticos, entre outros, muito distintos. De entre os atributos das bacias hidrográficas que sustentaram os modelos de regionalização identificados por aqueles autores incluem-se a localização geográfica, características fisiográficas (área, forma, declive, altitude, cotas extremas), geológicas e relativas ao uso e ocupação do solo, características da rede de drenagem (comprimento, densidade de drenagem, declives) e características hidrológicas (evapotranspiração potencial, temperatura, precipitação a diferentes escalas temporais, coeficiente de escoamento).

Os modelos de regionalização tendo em vista a obtenção de séries contínuas de escoamento em bacias hidrográficas não monitorizadas podem ser classificados em dois grupos consoante recorrem ou não a modelos hidrológicos naquelas bacias (Razavi & Coulibaly, 2013): “dependentes” de modelos hidrológicos (*hydrologic model-dependent*) e “independentes” daqueles modelos (*hydrologic model-independent*).

Os modelos incluídos no primeiro grupo procedem à transferência de parâmetros dos modelos de precipitação-escoamento, com conseqüente utilização desses parâmetros em modelos de estimação de escoamentos na bacia não monitorizada. Os modelos do segundo grupo utilizam a transferência, para a bacia não monitorizada, de dadas equações e dos correspondentes parâmetros, não recorrendo à modelação hidrológica nesta segunda bacia. Incluem, por exemplo, modelos baseados em regressão e em relações de escala e ainda modelos de séries temporais (por exemplo AR), o que os torna mais expeditos e com menores requisitos de dados, quando comparados com os do primeiro grupo (Razavi & Coulibaly, 2013).

O modelo de regionalização desenvolvido para Portugal Continental, objecto da presente lição, insere-se neste segundo grupo e utiliza a altura do escoamento anual médio, H, como parâmetro de regionalização da informação hidrométrica, como oportunamente se retomará.

A constatação da relevância da altura do escoamento anual médio na explicação da variabilidade temporal relativa dos escoamentos em Portugal Continental levou a explorar a possibilidade de integrar essa altura também como parâmetro do pré-dimensionamento de albufeiras de regularização.

O alargamento da análise baseada na altura do escoamento anual médio a um problema de natureza intrinsecamente estocástica – o dimensionamento de albufeiras de regularização – exigiu o desenvolvimento de técnicas de cálculo, baseadas em séries sintéticas de escoamento, que permitissem dispor de sequências de escoamentos tão prováveis quanto as registadas mas que, de algum modo, traduzissem a variabilidade temporal do regime fluvial em Portugal Continental.

A conjugação dessas técnicas com a consideração dos modelos de regionalização baseados na altura do escoamento anual médio proporcionou novas perspectivas no âmbito da análise de incerteza e, conseqüentemente do risco, decorrentes da variabilidade temporal do regime fluvial. Tais perspectivas, que permitiram equacionar de modo distinto do tradicional o dimensionamento de albufeiras de regularização, adequam-se ainda e muito pertinentemente à introdução de incerteza no dimensionamento hidrológico de outras infra-estruturas hidráulicas cujo desempenho seja intrinsecamente dependente do valor e do padrão temporal do escoamento, como seja o caso do dimensionamento de aproveitamentos hidroeléctricos, com ênfase para os com exploração a fio-de-água.

2. Etapas fundamentais no estabelecimento de um modelo de regionalização com vista à estimação de escoamentos

Numa forma conceptual simples, um modelo de regionalização pode utilizar uma equação do seguinte tipo geral (Wagener & Wheeler, 2006):

$$\hat{\theta} = F(\theta^* | \Phi^*) + v \quad (1)$$

em que $\hat{\theta}$ designa as estimativas das variáveis/parâmetros aplicáveis à bacia hidrográfica não monitorizada; F , uma relação funcional estabelecida com base no conjunto Φ^* de atributos fisiográficos e/ou hidro-climatológicos de bacias hidrográficas, Φ_i ; θ^* , o conjunto de parâmetros relativos a dessas bacias, θ_i ; e v , o erro – **Figura 5**.

Em linhas gerais, pode considerar-se que o estabelecimento de um modelo de regionalização destinado à avaliação de escoamentos em bacias hidrográficas não monitorizadas ou fracamente monitorizadas envolve cinco etapas, para além da aplicação do modelo em si (Razavi & Coulibaly, 2013, Wagener & Wheeler, 2006).

A primeira etapa respeita à especificação das variáveis a estimar através do modelo de regionalização e à recolha de informação sobre as mesmas, disponível em bacias hidrográficas monitorizadas próximas ou afins. A segunda etapa, refere-se à identificação dos atributos das bacias hidrográficas que se afiguram relevantes para a transposição de informação (por exemplo e como antes exemplificado, a área da bacia hidrográfica, o comprimento do curso de água

principal ou a precipitação a uma dada escala temporal). A terceira etapa envolve o estabelecimento de uma relação entre os atributos das bacias e o escoamento, ou índices relacionados com esse escoamento ou, ainda, parâmetros do modelo regional. Tal relação concretiza o modelo de regionalização propriamente dito. A quarta etapa corresponde à análise do desempenho do modelo de regionalização e à sua validação, por exemplo, aplicando-o a bacias hidrográficas monitorizadas e comparando os resultados obtidos com os efectivamente registados, mediante o recurso a medidas de erro ou de desempenho. A quinta etapa envolve a inclusão de incertezas no modelo de regionalização.

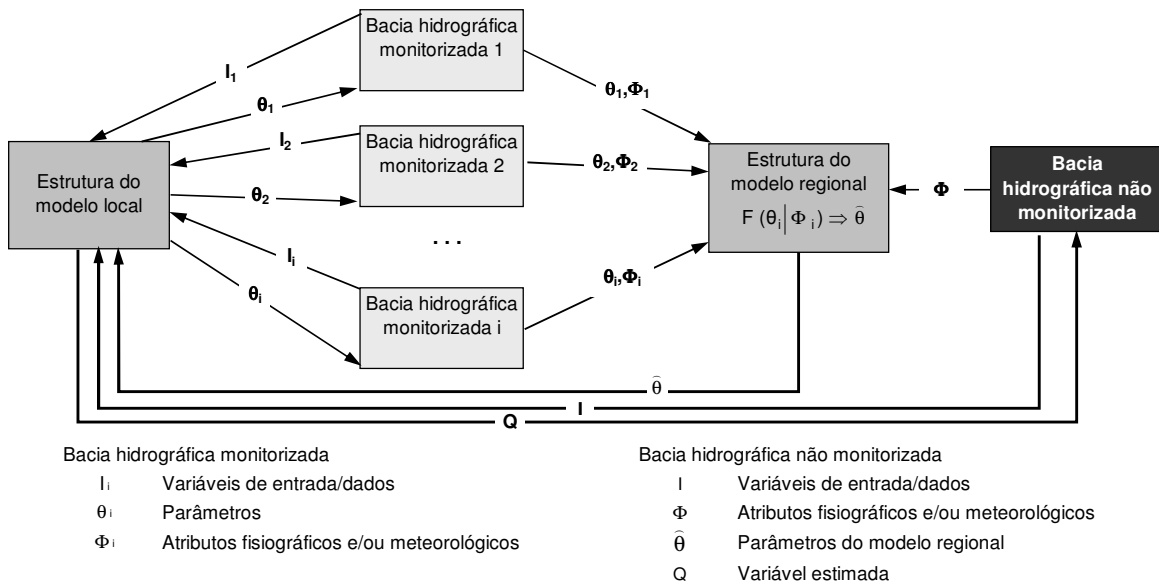


Figura 5 – Representação esquemática do processo de estabelecimento dos parâmetros de um modelo de regionalização (adaptada de Wagener & Wheeler, 2006).

3. A altura do escoamento anual médio como parâmetro de regionalização de informação hidrométrica

3.1. A dependência entre a altura do escoamento anual médio e variabilidade temporal relativa do escoamento

Como antes mencionado, o modelo proposto utiliza a altura do escoamento anual médio como parâmetro de regionalização de informação hidrométrica. Com efeito, de longa data que existe a percepção de que o escoamento anual médio numa secção de um curso de água de Portugal Continental, quando expresso em altura de água sobre a correspondente bacia hidrográfica, H , é capaz de fornecer indicação sobre a variabilidade temporal do escoamento. Espera-se, assim, que quanto mais baixo for H (ou seja, quanto mais árida for a bacia) maior seja a variabilidade temporal relativa do escoamento, quer inter anualmente, quer no interior dos anos. Este facto foi

abordado por Quintela, 1967, embora uma perspectiva muito restrita, condicionada pela pouca informação à data disponível. No essencial, foram então apresentadas relações destinadas a avaliar, em função da altura do escoamento anual médio, o desvio-padrão e o coeficiente de variação do escoamento anual e ainda o escoamento anual com probabilidades de não excedência de 5% e de 20% e foram propostas doze curvas adimensionais de duração média anual do caudal médio diário (Quintela 1967, p. 158, 163 e 187, respectivamente).

Face à percepção de que o parâmetro H permitia uma caracterização muito mais abrangente e consistente do regime hidrológico, procedeu-se a uma ampla investigação no sentido de averiguar a possibilidade de a altura do escoamento anual médio caracterizar plenamente o regime fluvial em cursos de água de Portugal Continental. Para tanto foram utilizadas séries razoavelmente longas de registos de escoamento a diferentes escalas temporais num elevado número de estações hidrométricas dispersas pelo território de Portugal Continental, concretamente, numa primeira fase em 24 estações hidrométricas (Portela & Quintela, 2000a,b) e posteriormente nas 54 estações identificadas no **Quadro 3** (Portela & Quintela, 2005, 2006a,b) que, salvo raras excepções, incluíram as 24 estações hidrométricas inicialmente seleccionadas.

A possibilidade de utilizar a altura do escoamento anual médio para estimar escoamentos em secções não monitorizadas da rede fluvial de Portugal Continental requer, contudo, a evidência prévia de que tal altura permite, de facto, caracterizar a variabilidade temporal relativa do escoamento a diferentes escalas temporais.

A nível anual, o papel da altura do escoamento anual médio, H, pode ser demonstrado pela dependência que se verifica nas séries do escoamento anual entre o coeficiente de variação, C_v , e a grandeza H, conforme se apresenta na **Figura 6**, que inclui a representação da equação originalmente obtida por Quintela, 1967, p. 158, e das equações posteriormente propostas com base nos registos em 24 e em 54 estações hidrométricas. Tanto nesta figura, como em algumas das que lhe sucedem, r designa o coeficiente de correlação da regressão linear, estabelecida, quando necessário, no campo das transformadas logarítmicas das variáveis em presença.

Partindo da dependência evidente entre C_v e H expressa pela **Figura 6**, obtiveram-se os elementos apresentados na **Figura 7** os quais, no pressuposto de aplicação da lei de Pearson III, possibilitam estimar a altura do escoamento anual, H_α para as probabilidades de não-excedência, α , de 0.05, 0.20, 0.95 e 0.99, em função de H.

Quadro 3 – Estações hidrométricas localizadas em Portugal Continental e adoptadas nos estudos de regionalização de informação hidrométrica e de dimensionamento de albufeiras de regularização (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

Estação hidrométrica			Área da bacia hidrográfica (km ²)	Período de registos (número de anos)	Amostra de escoamentos anuais	
Código	Designação	Bacia hidrográfica / curso de água			Média, H (mm)	Desvio-padrão (mm)
26J/01	Albernoa	Guadiana/Terges	177	1970/71 a 1989/90 (20)	105	111
27I/01	Entradas	Guadiana/Terges	52	1971/72 a 1989/90 (19)	124	121
24H/01	S. Domingos	Sado/Rib ^a Algalé	59	1934/35 a 1958/59 (25)	131	96
27J/01	Monte da Ponte	Guadiana/Cobres	707	1959/60 a 1989/90 (31)	137	124
24H/03	Torrão do Alentejo	Sado/Xarrama	465	1961/62 a 1989/90 (29)	148	121
19D/04	Pte.da Ota	Tejo/Rib ^a de Ota	56	1979/80 a 1989/90 (11)	150	119
24L/01	Amieira	Guadiana/Degebe	1474	1947/48 a 1964/65 (18)	154	139
18L/01	Couto de Andreiros	Tejo/Rib ^a de Seda	244	1978/79 a 1989/90 (12)	158	144
19C/02	Pte.Barnabé	Tejo/Alenquer	114	1979/80 a 1989/90 (11)	165	130
25G/02	Moinho do Bravo	Sado/Rib ^a Corona	218	1977/78 a 1989/90 (13)	175	140
24I/01	Odivelas	Sado/Rib ^a de Odivelas	431	1934/35 a 1966/67 (33)	178	135
12E/01	Pte. Azenha Nova	Mondego/Rib ^a de Foja	51	1975/76 a 1986/87 (12)	201	116
19M/01	Monforte	Tejo/Rib ^a de Avis	136	1961/62 a 1976/77 (16)	222	178
30F/02	Vidigal	Algarve/Rib ^a do Farelo	19	1938/39 a 1963/64 (26)	227	138
31K/03	Bodega	Algarve/Rib ^a de Alportel	132	1975/76 a 1988/89 (14)	235	196
29L/01	Monte dos Fortes	Guadiana/Rib ^a Odeleite	288	1968/69 a 1989/90 (22)	251	188
23I/01	Flor da Rosa	Sado/Xarrama	278	1934/35 a 1964/65 (31)	258	193
28L/02	Vascão	Guadiana/Rib ^a Vascão	428	1960/61 a 1982/83 (23)	279	216
06O/03	Qta.das Laranjeiras	Douro/Sabor	3464	1961/62 a 1981/82 (21)	298	233
13E/04	Pte. Casal Rola	Mondego/Pranto	138	1975/76 a 1988/89 (14)	325	222
30G/01	Monte dos Pachecos	Algarve/Rib ^a de Odelouca	386	1962/63 a 1982/83 (21)	330	295
10P/01	Castelo Bom	Douro/Côa	897	1960/61 a 1995/96 (36)	332	205
05M/01	Murça	Douro/Tinhela	265	1974/75 a 1996/97 (23)	341	235
18E/01	Pte.Freiria	Tejo/Maior	184	1976/77 a 1989/90 (14)	343	239
08O/02	Cidadelhe	Douro/Côa	1685	1956/57 a 1973/74 (18)	360	177
13F/02	Pte. Casével	Mondego/Ega	146	1977/78 a 1989/90 (13)	362	196
06M/01	Castanheiro	Douro/Tua	3718	1958/59 a 1995/96 (38)	366	216
21C/01	Pte.Pinhal	Tejo/Rib ^a de Loures	79	1977/78 a 1988/89 (12)	376	268
11I/06	Pte. Tábua	Mondego/Mondego	1550	1937/38 a 1978/79 (42)	421	217
10K/01	Pte. Sta Clara-Dão	Mondego/Dão	177	1921/22 a 1972/73 (52)	454	312
10J/01	Caldas S. Gemil	Mondego/Dão	617	1956/57 a 1989/90 (34)	480	272
10L/01	Pte. Juncais	Mondego/Mondego	606	1918/19 a 1966/67 (49)	504	302
03N/01	Rebordelo	Douro/Rabaçal	857	1955/56 a 1995/96 (41)	582	322
08L/01	Quinta do Rape	Douro/Távora	170	1976/77 a 1987/88 (12)	601	316
12H/03	Pte. Mucela	Mondego/Alva	666	1960/61 a 1989/90 (30)	630	349
10G/02	Pte. Águeda	Vouga/Águeda	405	1934/35 a 1953/54 (20)	674	369
06I/02	Pte. Canavezes	Douro/Tâmega	3135	1955/56 a 1986/87 (32)	709	339
03K/01	Vale Giestoso	Douro/Beça	77	1957/58 a 1996/97 (40)	717	398
10M/03	Videmonte	Mondego/Mondego	121	1975/76 a 1996/97 (22)	736	388
08J/01	Castro Daire	Douro/Pavia	291	1945/46 a 1987/88 (43)	738	362
03P/01	Vinhais-Qt. Ranca	Douro/Tuela	455	156/57 a 1995/96 (40)	784	354
07I/04	Cabriz	Douro/Rib ^a S. Paio	17	1966/67 a 1987/88 (22)	808	353
04J/04	Cunhas	Douro/Beça	338	1949/50 a 1995/96 (47)	860	362
11M/01	Pai Diz	Mondego/Mondego	50	1973/74 a 1994/95 (22)	876	377
06K/01	Ermida-Corgo	Douro/Corgo	291	1956/57 a 2001/02 (46)	908	436
13H/03	Louçainha	Mondego/Simonte	4	1960/61 a 1983/84 (24)	959	367
09H/01	Pedre Ribeiradio	Vouga/Vouga	928	1962/63 a 1979/80 (18)	972	508
05K/01	S.Marta do Alvão	Douro/Louredo	52	1955/56 a 1987/88 (33)	986	394
08H/02	Fragas da Torre	Douro/Pavia	660	1946/47 a 1995/96 (50)	997	470
09F/01	Pte. Minhoteira	Vouga/Antuã	114	1976/77 a 1989/90 (14)	1105	462
17F/02	Pte.Nova	Tejo/Almonda	102	1976/77 a 1985/86 (10)	1122	550
09G/01	Pte. Vale Maior	Vouga/Caima	188	1974/75 a 1988/89 (15)	1183	513
11L/01	Manteigas	Tejo/Zêzere	28	1978/79 a 1995/96 (18)	1898	724
03H/04	Covas	Cávado/Homem	116	1955/56 a 1973/74 (19)	2212	936

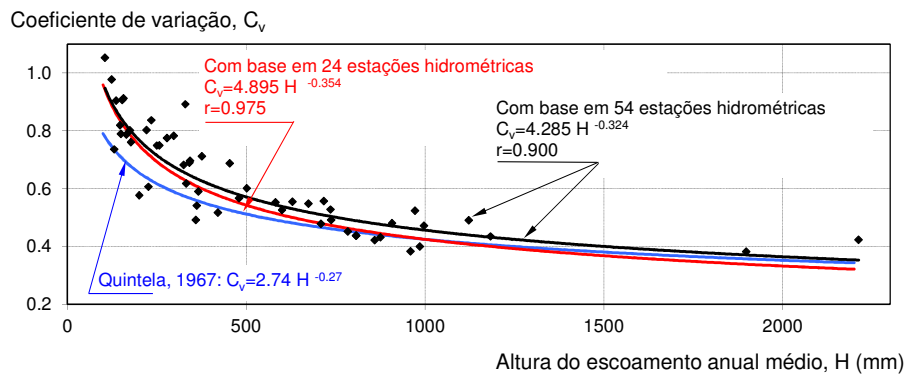


Figura 6 – Equações de regressão entre o coeficiente de variação do escoamento anual, C_v , e a altura do escoamento anual médio, H , e pontos representativos dos pares de valores $(H; C_v)$ (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

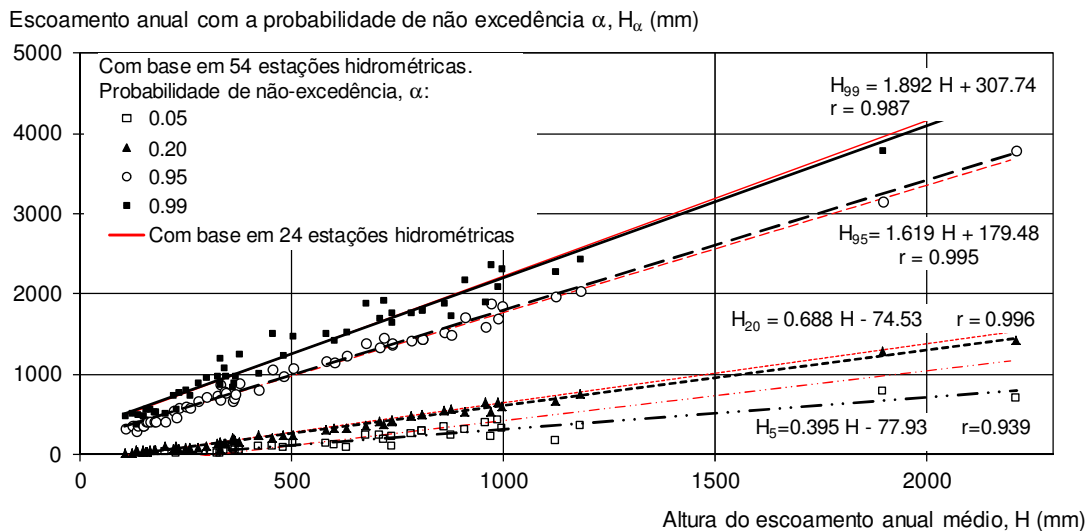


Figura 7 – Equações de regressão entre a altura do escoamento anual com probabilidade de não excedência α , H_α , e a altura do escoamento anual médio, H , e pontos representativos dos pares de valores $(H; H_\alpha)$ (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

As **Figuras 6 e 7** demonstram que as curvas obtidas com base em informação hidrológica progressivamente em mais estações de monitorização e mais extensa apresentam andamentos muito próximos, facto que aponta no sentido de ser consistente a dependência por elas expressa. O maior desvio verificado na **Figura 7** entre os segmentos de recta relativos a $\alpha = 0.05$ resulta do facto de os pares de valores $(H; H_\alpha)$ utilizados na correspondente análise de regressão serem em menor número, especialmente para valores de H inferiores a 300 mm, em que aquela probabilidade de não excedência conduz frequentemente a estimativas negativas dos escoamentos anuais que não foram consideradas no estabelecimento das equações de regressão.

O efeito na altura do escoamento anual médio na “explicação” da variabilidade temporal relativa dos escoamentos diários está expresso, embora em termos qualitativos, nas curvas adimensionais de duração média anual dos caudais médios diários apresentadas **Figura 8**, quer para a totalidade das 54 estações do **Quadro 3**, quer para o agrupamento de tais estações por alturas do escoamento superiores ou inferiores a 400 mm. Na figura, Q designa o caudal médio diário e Qmod, o módulo plurianual ou simplesmente módulo.

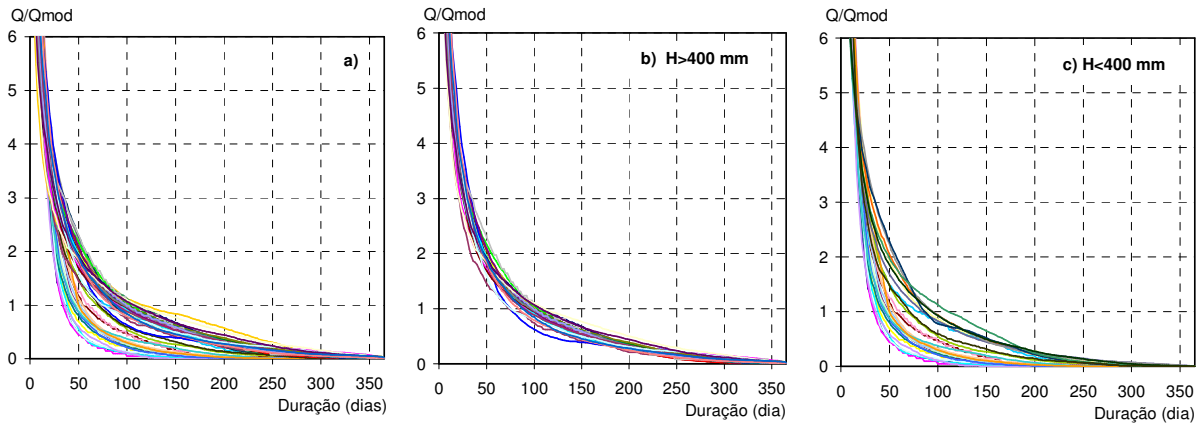


Figura 8 – Curvas adimensionais de duração média anual do caudal médio diário: nas a) 54 estações hidrométricas do **Quadro 3** e nas b) 26 e c) 28 estações desse quadro com alturas do escoamento anual médio, H, respectivamente superiores e inferiores a 400 mm (adaptada de Portela & Quintela, 2005).

A acentuada proximidade entre as 26 curvas de duração referentes a valores de H superiores a 400 mm indica uma nítida regularidade do regime fluvial diário, enquanto que o afastamento exibido pelas 28 curvas relativas a valores de H inferiores a 400 mm indica evidente irregularidade do regime àquele nível temporal.

O comportamento observado na **Figura 8** sugere muito claramente a possibilidade de a duração anual média do módulo, quando expressa em função de H, ser também um descritor da variabilidade temporal relativa do regime fluvial diário. Tal possibilidade foi confirmada na **Figura 9** para 52 das 54 estações hidrométricas do **Quadro 3**, uma vez que foram excluídas as estações de Manteigas (11L/01) e de Covas (03H/04), por lhes corresponderem valores de H de algum modo espúrios.

A **Figura 9** contém ainda a representação, a traço contínuo a preto, de dois segmentos de recta relativos às equações de regressão linear simples entre durações do módulo e alturas anuais médias do escoamento, estabelecidas com base nas estações com valores daquela altura inferiores a 400 mm (em número de 28) e superiores a 400 mm (em número de 24). Existe um terceiro segmento de recta vertical, representado a tracejado vermelho, que divide a área do gráfico em alturas anuais médias do escoamento inferiores e superiores a 400 mm.

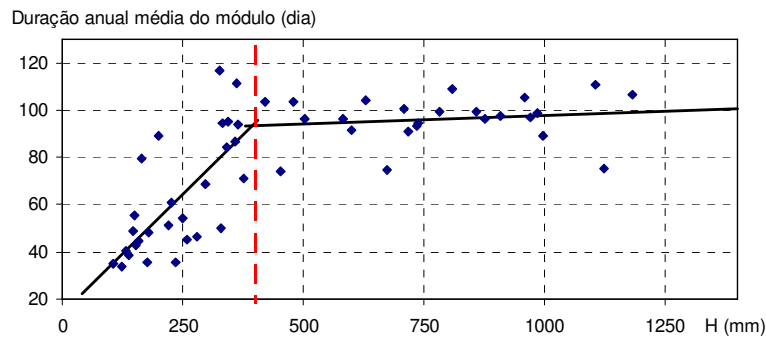


Figura 9 – Representação da duração anual média do módulo em função de H (adaptada de Portela & Quintela, 2005).

A anterior figura sugere que a duração anual média do módulo aumenta consistentemente com a altura do escoamento anual médio até valores desta altura de cerca de 400 mm, sendo que para alturas superiores se torna praticamente independente de H. Não obstante a dispersão dos pontos representados na figura e o menor significado, desse modo, conferido às duas rectas de regressão nela representadas, tais rectas indicam para H=400 m praticamente a mesma duração do módulo, ou seja, sensivelmente 90 dias.

Tendo em atenção que a duração anual média do módulo constitui, por si só, uma medida da variabilidade do escoamento diário – sendo tanto menor, quanto maior é essa variabilidade – reforçam-se, assim, as conclusões apresentadas a propósito das **Figura 6 a 8**.

Embora saindo do âmbito desta lição, regista-se que os resultados expressos pela **Figura 9** foram fundamentais para o desenvolvimento de uma proposta de método hidráulico-hidrológico para estabelecimento de regimes de caudais ecológicos em cursos de água do Sul de Portugal Continental que atende também à variabilidade temporal do regime fluvial (Portela, 2005, 2007).

Para caracterizar, em termos que não meramente qualitativos, a variabilidade relativa dos escoamentos diários e mensais calcularam-se, em cada ano dispondo de registos contínuos, os desvios quadráticos médios das correspondentes alturas do escoamento, definidos, em termos adimensionais, por:

$$DQM_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{\lambda} [(H_{i,j} - H_i) / H]^2}{\lambda}} \quad (2)$$

em que, para o nível mensal, $\lambda = 12$ e i e j são índices que representam, respectivamente, o ano e o mês; as restantes variáveis, para além de H, têm os significados seguintes:

DQM_i desvio quadrático médio (adimensional) dos escoamentos mensais no ano i;

H_i média das alturas dos escoamentos mensais no ano i (média das alturas H_{i,j});

$H_{i,j}$ altura do escoamento no mês j do ano i .

Para o nível diário, $\lambda=365$, i permanece o índice de ano e j é o índice de dia, sendo:

DQM_i desvio quadrático médio (adimensional) dos escoamentos diários no ano i ;

H_i média das alturas dos escoamentos diários no ano i (média das alturas $H_{i,j}$);

$H_{i,j}$ altura do escoamento no dia j do ano i .

A aplicação da anterior equação aos registos disponíveis numa dada estação hidrométrica conduz a tantos valores do desvio quadrático médio quanto o número de anos, N , desses registos ($i = 1, 2, \dots, N$). A caracterização desses valores foi efectuada em termos da correspondente média, MED DQM (média dos desvios quadráticos médios), e desvio-padrão, DSV DQM (desvio-padrão dos desvios quadráticos médios).

O facto de H constituir também uma medida da variabilidade relativa do escoamento, quer mensal, quer diário é demonstrado pela existência de correlações estatisticamente significativas entre os valores de MED DQM ou de DSV DQM referentes a cada um daqueles níveis temporais e os valores da altura do escoamento anual médio H , conforme se apresenta na **Figura 10**, mais uma vez tendo por base as 24 estações hidrométricas originalmente analisadas, embora apenas a nível mensal, e as 54 que lhes sucederam, aos níveis mensal e diário.

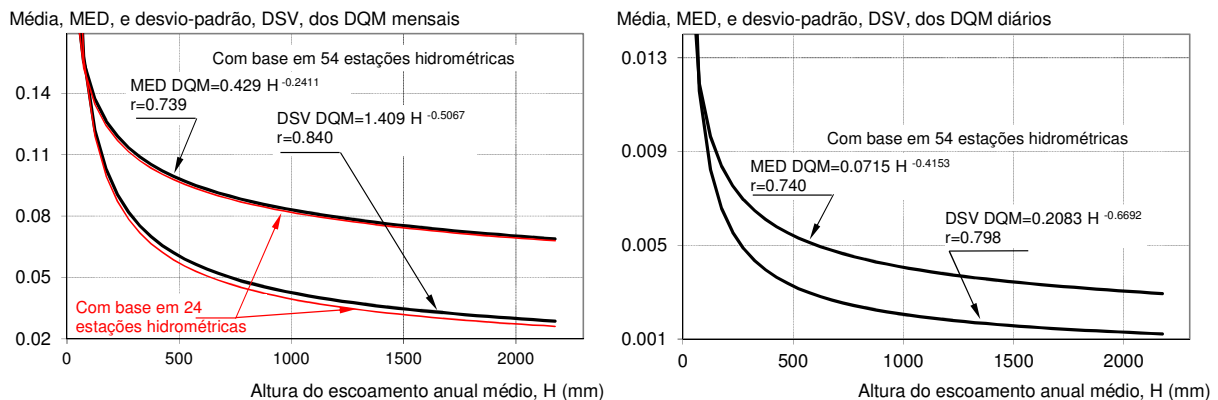


Figura 10 – Representação das equações que traduzem a dependência, em relação a H , das médias, MED, e dos desvios-padrão, DSV, das séries dos desvios quadráticos médios, DQM, dos escoamentos mensais e diários adimensionais (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

Atendendo a que o desvio quadrático em cada ano, DQM_i , é tanto maior quanto mais irregular for a distribuição temporal dos escoamentos a que respeita (escoamentos mensais ou diários), verifica-se que, em média, a variabilidade relativa desses escoamentos diminui à medida que H

aumenta (diminuição de MED DQM com o aumento de H). A dispersão dos desvios quadráticos médios em torno das respectivas médias diminui também com o aumento de H (diminuição de DSV DQM com o aumento de H).

Deste modo, conclui-se que a altura do escoamento anual médio, H, constitui também uma medida da irregularidade relativa do escoamento, não só anual, como fundamentalmente abordado por Quintela, 1967, mas também mensal e diário, atenuando-se tal irregularidade à medida que H aumenta.

3.2. O modelo de regionalização de escoamentos

A dependência entre a altura do escoamento anual médio, H, e a variabilidade temporal relativa do escoamento em cursos de água de Portugal Continental é de tal modo forte e consistente que, por assim dizer, “habilita” H como “medida” da variabilidade temporal relativa do escoamento. Deste modo, H constitui-se como o parâmetro apto a suportar o modelo de regionalização de escoamentos anuais, mensais ou diários em regime natural.

Tal modelo concretiza-se muito simplesmente através da transposição das séries adimensionais de escoamentos a uma dada escala temporal numa secção de um curso de água onde estejam disponíveis e a que corresponda a altura do escoamento anual médio, H_1 (mm), para outra secção sem informação hidrométrica para a qual tenha sido obtida uma estimativa da altura do escoamento anual médio, H_2 (mm), próxima de H_1 ($H_1 \approx H_2$). As equações que, necessariamente no pressuposto de bacias hidrográficas em regime natural, concretizam a transposição aos níveis mensal e diário são dadas por:

$$H_{i,j}^2 = H_{i,j}^1 \frac{H_2}{H_1} \quad (3)$$

$$Q_{i,j}^2 = Q_{i,j}^1 \frac{\nabla_2}{\nabla_1} \quad (4)$$

$$Q_{i,j}^2 = Q_{i,j}^1 \frac{Q_{\text{mod}_2}}{Q_{\text{mod}_1}} \quad (5)$$

$$\nabla_{i,j}^2 = \nabla_{i,j}^1 \frac{\nabla_2}{\nabla_1} \quad (6)$$

$$\nabla_{i,j}^2 = \nabla_{i,j}^1 \frac{Q_{\text{mod}_2}}{Q_{\text{mod}_1}} \quad (7)$$

Nas anteriores equações as secções de cálculo são identificadas pelos índices 1 e 2, admitindo-se que na secção 1 existem registos hidrométricos e, conseqüentemente, é conhecida a altura do escoamento anual médio, H_1 , e que na secção 2 se dispõe apenas da estimativa, H_2 , da

correspondente altura. As restantes variáveis têm os seguintes significados, com o índice k igual a 1 ou a 2:

- $H_{i,j}^k$ altura do escoamento no mês j ou no dia j do ano i na secção k (mm);
- $Q_{i,j}^k$ caudal médio no mês j ou no dia j do ano i na secção k (m³/s);
- $\nabla_{i,j}^k$ volume afluente no mês j ou no dia j do ano i na secção k (m³);
- ∇_k volume anual médio afluente à secção k (m³);
- Q_{mod_k} módulo na secção k (m³/s).

Para aplicar as anteriores equações à transposição de escoamentos anuais basta substituir o conjunto dos dois índices i,j por um índice único respeitante ao ano.

As **equações (3) a (7)** exprimem o **modelo de regionalização** desenvolvido para Portugal Continental, o qual utiliza uma transposição, tendo como “parâmetro de escala” a altura do escoamento anual médio ou grandezas directamente com ela relacionadas (valores médios de volumes e de caudais médios diários afluentes).

É oportuno registar que alguns autores propõem modelos também por simples transposição mas unicamente na proporção das áreas das bacias hidrográficas (Loucks & van Beek, 2005, p. 340) os quais, no contexto de Portugal Continental, só seriam válidos se as alturas do escoamento anual médio nas bacias hidrográficas em presença fossem exactamente iguais.

Para assegurar que as séries obtidas por transposição para uma secção não monitorizada de um curso de água de Portugal Continental se adequam às especificidades do regime hidrológico na correspondente bacia hidrográfica, tal transposição deve processar-se a partir dos registos relativos a uma bacia hidrográfica tão próxima quanto possível daquela outra e com análogas condições geomorfológicas e de ocupação, condicionalismo aliás, já expresso por Quintela, 1967, a propósito da adopção de curvas de duração média anual do caudal médio diário adimensionais.

As **Figuras 11 e 12** exemplificam a aplicação dos procedimentos de transposição de escoamentos anuais e mensais (expressos em volumes e adimensionalizados) tendo por base os seis conjuntos de duas estações hidrométricas identificados no **Quadro 4**. As duas estações que compõem cada conjunto foram seleccionadas por apresentarem escoamentos em regime natural e por terem alturas do escoamento anual médio próximas. Anota-se que não são apresentadas figuras ao nível diário dada a sua previsível menor legibilidade gráfica, sendo que a nível mensal os resultados foram restringidos a um período de cinco anos de modo a conferir leitura aos correspondentes diagramas cronológicos.

Quadro 4 – Coeficientes de correlação entre séries de escoamento anual, mensal e diário registadas e obtidas por regionalização/transposição em seis grupos de duas estações (adaptado de Portela & Quintela, 2005).

Estação hidrométrica	Área (km ²)	Período comum de registos				
		Período (número de anos)	Altura do escoamento anual médio (mm)	Correlação entre escoamentos obtidos por regionalização e registados		
				Anuais	Mensais	Diários
Monte da Ponte	707	1971/72-1989/90 (19)	116	0.989	0.986	0.893
Entradas	52		124			
Torrão do Alentejo	465	1977/78-1989/90 (13)	131	0.970	0.969	0.887
Moinho do Bravo	218		175			
Amieira	1474	1947/48-1964/65 (18)	154	0.925	0.854	0.611
Odivelas	431		175			
Monte dos Fortes	288	1968/69-1982/83 (15)	215	0.949	0.908	0.817
Vascão	428		254			
Cidadelhe	1685	1958/59-1973/74 (16)	382	0.953	0.937	0.865
Castanheiro	3718		417			
Castro Daire	291	1956/57 a 1987/88 (32)	772	0.963	0.957	0.865
Vinhais-Qt. Ranca	455		804			

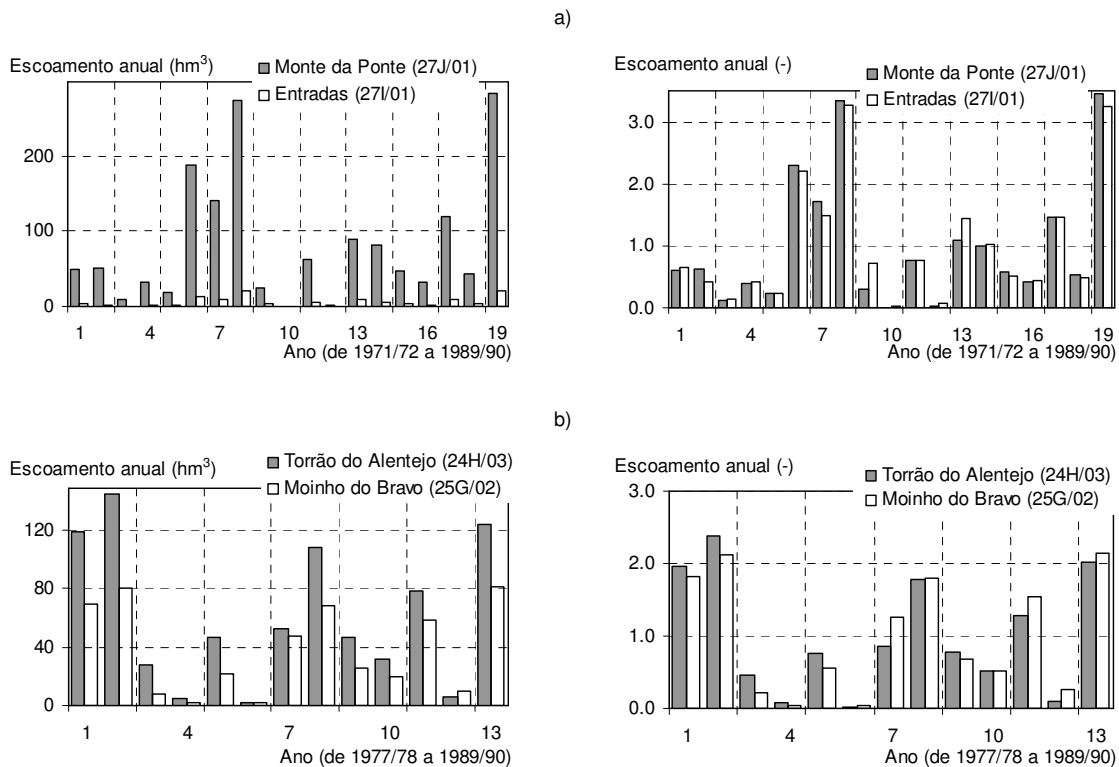


Figura 11 – Estações hidrométricas: a) Monte da Ponte e Entradas; b) Torrão do Alentejo e Moinho do Bravo; c) Amieira e Odivelas; d) Monte dos Fortes e Vascão; e) Cidadelhe e Castanheiro; f) Castro Daire e Vinhais-Qta. da Ranca.

Escoamentos anuais em volume e adimensionais nos períodos comuns de registos
(adaptada de Portela & Quintela, 2005).

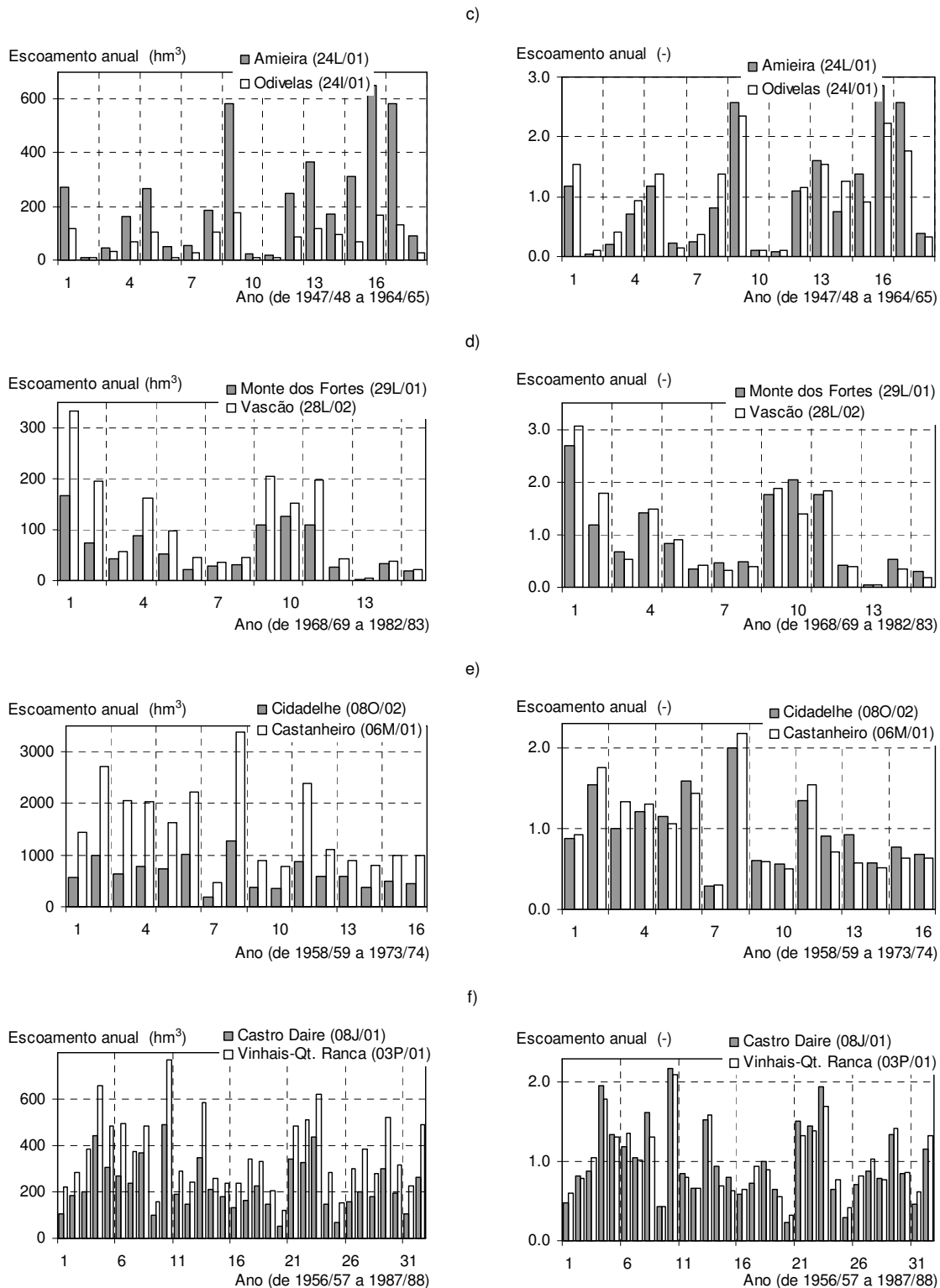


Figura 11 (continuação) – Estações hidrométricas: a) Monte da Ponte e Entradas; b) Torrão do Alentejo e Moinho do Bravo; c) Amieira e Odiveiras; d) Monte dos Fortes e Vascão; e) Cidadelhe e Castanheiro; f) Castro Daire e Vinhais-Qta. da Ranca. Escoamentos anuais em volume e adimensionais nos períodos comuns de registos (adaptada de Portela & Quintela, 2005).

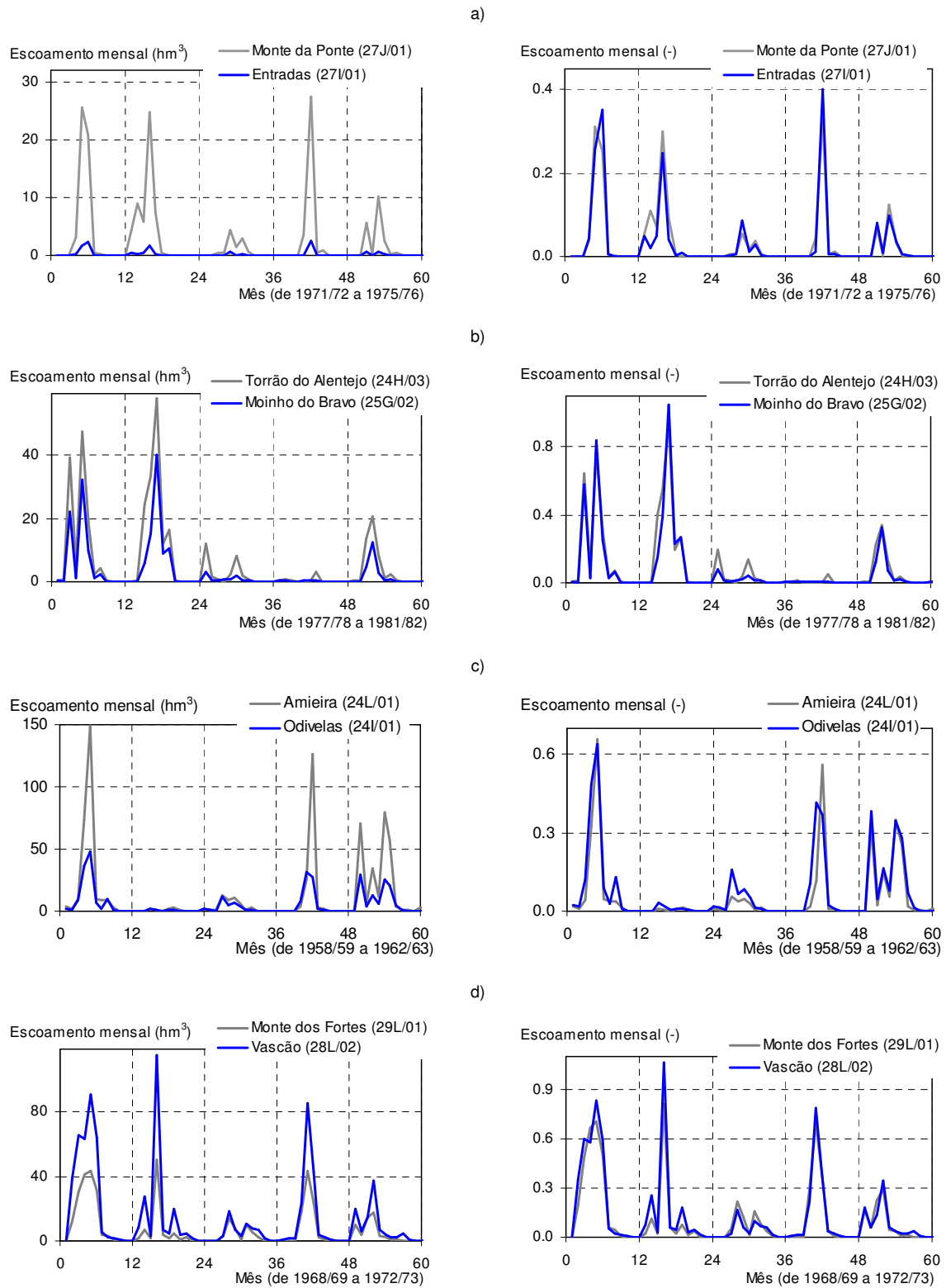


Figura 12 – Estações hidrométricas: a) Monte da Ponte e Entradas; b) Torrão do Alentejo e Moinho do Bravo; c) Amieira e Odivelas; d) Monte dos Fortes e Vascão; e) Cidadelhe e Castanheiro; f) Castro Daire e Vinhais-Qta. da Ranca. Escoamentos mensais em volume e adimensionais num período comum de 5 anos de registos (adaptado de Portela & Quintela, 2005).

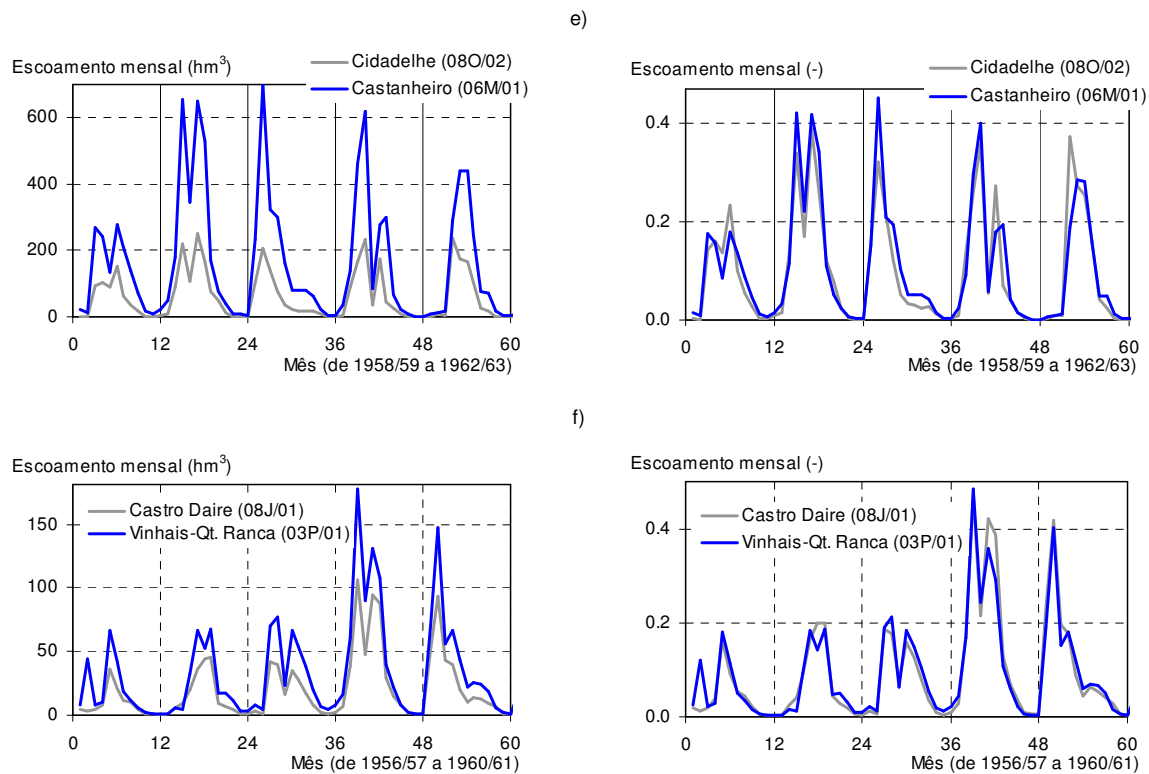


Figura 12 (continuação) – Estações hidrométricas: a) Monte da Ponte e Entradas; b) Torrão do Alentejo e Moinho do Bravo; c) Amieira e Odivelas; d) Monte dos Fortes e Vascão; e) Ciudadelhe e Castanheiro; f) Castro Daire e Vinhais-Qta. da Ranca. Escoamentos mensais em volume e adimensionais num período comum de 5 anos de registos (adaptada de Portela & Quintela, 2005).

Na interpretação dos resultados das **Figuras 11 e 12** importa ter presente que, em cada conjunto de duas estações hidrométricas, a série adimensional a um dado nível temporal, por exemplo, relativa à primeira das estações desse conjunto representa a série igualmente adimensional que, àquele nível temporal, resulta da transposição de escoamentos dessa estação para a segunda estação do mesmo conjunto, e reciprocamente. Deste modo, o coeficiente de correlação entre as duas séries adimensionais referentes às estações hidrométricas de um dado conjunto é exactamente igual ao coeficiente de correlação entre escoamentos registados em qualquer uma dessas estações e obtidos por transposição a partir da outra estação, mediante aplicação de uma das **equações (3) a (7)**. Tais coeficientes estão explicitados no **Quadro 4** que inclui também os coeficientes relativos ao nível diário.

As **Figura 11 e 12** e o **Quadro 4** evidenciam nitidamente o bom ajustamento, em qualquer um dos casos analisados, entre escoamentos observados e obtidos por transposição. Com efeito e com a excepção dos níveis mensal e diário nas duas estações hidrométricas de Amieira e de Odivelas, as correlações entre escoamentos obtidos por transposição e efectivamente registados são, aos

níveis anual e mensal, superiores a 90% e ao nível diário, superiores a 80% e frequentemente mais próximas de 90%. As correlações entre escoamentos mensais e diários naquelas duas estações são ligeiramente inferiores, mas igualmente significativas. Importa realçar que os anteriores resultados assumem tanto mais significado quanto podem ser significativamente diferentes as áreas das duas bacias hidrográficas para a qual foram transpostos escoamentos e a partir da qual se efectuou a transposição, conforme se sistematiza no **Quadro 4**.

Fica, assim, documentado o modelo de regionalização por transposição, tendo em vista estimar escoamentos em regime natural em secções da rede hidrográfica de Portugal Continental não monitorizadas ou escassamente monitorizadas.

A finalizar, registam-se duas notas. A primeira diz respeito ao facto de ser fundamental assegurar que são próximas as alturas do escoamento anual médio na bacia hidrográfica em que se pretende estimar escoamentos e na bacia hidrográfica a partir da qual é efectuada a transposição de escoamentos, para que a transposição resulte suficientemente precisa. Importa ter presente que a inexistência de registos de caudais numa secção de um rio não é impeditiva da determinação da altura do escoamento anual médio na respectiva bacia hidrográfica. Com efeito, essa altura pode ser estimada, por exemplo, mediante o recurso à equação de regressão entre valores anuais do escoamento e da precipitação (expressos em altura de água) que tenha sido determinada para uma bacia hidrográfica cujas características fisiográficas e climáticas se não afastem das que apresenta a bacia em estudo. Um outro processo pode recorrer à carta de isolinhas do escoamento anual médio expresso em altura de água – **Figura 13**.

A segunda nota prende-se com o facto de se julgar que os procedimentos apresentados não se restringem a Portugal Continental, devendo, antes pelo contrário, adequar-se a outras regiões, nomeadamente, do Sul da Europa.

4. A altura do escoamento anual médio como parâmetro de estimação de capacidades úteis de albufeiras de regularização

4.1. Conceitos de base

A evidência do papel determinante da altura do escoamento anual médio na descrição da variabilidade temporal relativa do escoamento em cursos de água em Portugal Continental, sugere, por si só, a possibilidade de esse parâmetro permitir também estimar, ainda que preliminarmente, a capacidade útil de uma albufeira em função do volume de água a fornecer (em termos quantitativos e do respectivo padrão temporal) e da garantia associada a esse fornecimento. Para tanto, podem adoptar-se duas ópticas distintas, uma primeira determinística (Portela & Quintela, 2000b, 2006a,b) e uma segunda, de algum modo, probabilística e que

estabelece a ponte para a consideração de incerteza hidrológica (Silva, 2010, Silva & Portela, 2010a, 2013).

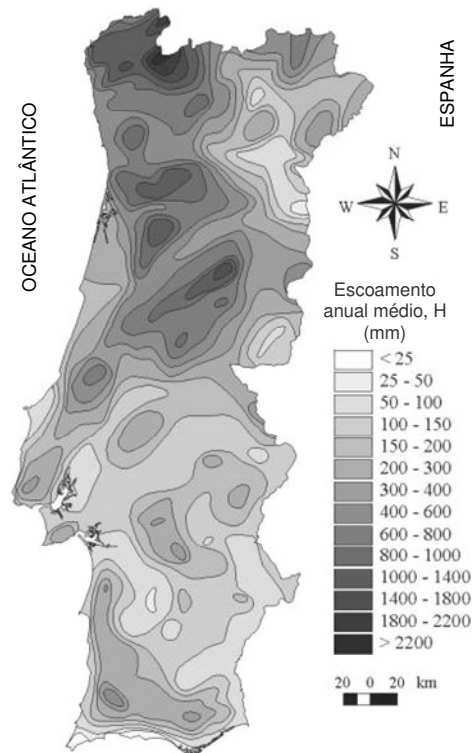


Figura 13 – Mapa de isolinhas do escoamento anual médio em Portugal Continental

Em países, como Portugal Continental, caracterizados por acentuada irregularidade dos caudais fluviais, a utilização dos recursos hídricos superficiais requer, em geral, a existência de albufeiras de regularização que permitam adaptar o regime natural das aflúncias ao regime dos volumes de água a fornecer ao longo do tempo (O'Reilly & Silberblatt, 2009). Nas fases iniciais do planeamento de sistemas de recursos hídricos é frequente a necessidade de avaliar expeditamente a viabilidade de assegurar um dado pedido, sendo que alguns autores desenvolveram critérios baseados em estatísticas do escoamento (média, desvio-padrão e coeficiente de variação), e não propriamente nos valores desse escoamento, com o objectivo de proceder ao pré-dimensionamento de albufeiras de regularização (Vogel & Stedinger 1987, Bayazit & Öñöz 2000, Adeloye *et al.* 2003, Adeloye 2009a,b).

A regularização promovida por uma albufeira é assegurada pela respectiva **capacidade útil**, C , que, no essencial, depende do regime das aflúncias à albufeira (no que respeita aos volumes afluentes e à sua irregularidade temporal), das características do fornecimento de água a satisfazer a partir da albufeira (traduzidas pelos volumes de água requeridos e pela sua

distribuição temporal) e da fiabilidade com que deve ser assegurada a satisfação desse fornecimento.

A fiabilidade do fornecimento de água a partir de albufeiras pode ser expressa em termos de grau de garantia ou simplesmente **garantia**, G , conceito para o qual não existe, contudo, uma definição única, sendo frequente assimilá-lo à percentagem (ou à fracção) do número total de períodos de um intervalo de tempo (necessariamente bastante longo, dada a natureza estocástica do problema) em que o volume de água solicitado é integralmente assegurado; nos restantes períodos ocorrerão, portanto, restrições parciais ou totais ao fornecimento (McMahon & Adeloie, 2005, p. 13; McMahon *et al.*, 2007a). A anterior noção de garantia, G , pode ser expressa por:

$$G = \left(1 - \frac{N_r}{N}\right) \times 100 \quad (8)$$

em que N designa o número total de períodos do intervalo de tempo em análise (cada com duração Δt constante) e N_r o número desses períodos em que o pedido não foi integralmente satisfeito, ou seja, em que ocorreram restrições (parciais ou totais) ao fornecimento. O quociente N_r/N representa, portanto, a **probabilidade empírica de ocorrer uma falha parcial ou total**.

O dimensionamento da capacidade útil de uma albufeira utiliza frequentemente técnicas de simulação da exploração da albufeira, baseadas na aplicação da equação da continuidade. Tais técnicas, não obstante a simplicidade do seu formalismo, permitem incorporar factores determinantes do dimensionamento, tais como a irregularidade do regime de aflúncias, a sazonalidade dos consumos, o efeito do estado inicial da albufeira, as perdas por evaporação e outras perdas a partir da albufeira e as características geométricas do armazenamento de água na albufeira. Permitem, ainda, incorporar de modo muito expedito as não linearidades, quer do próprio sistema hidrológico, quer associadas aos constrangimentos e às condições de fronteira do problema, como sejam as decorrentes das curvas de volumes armazenados e de áreas inundadas na albufeira.

A simulação é efectuada em sucessivos períodos ou passos de cálculo constantes, Δt , no início de cada um dos quais se supõe conhecido o volume, S_t , armazenado na albufeira acima do nível mínimo de exploração. Em cada passo de cálculo, constituem também dados do problema os volumes afluentes à albufeira provenientes, quer de caudais fluviais, Q_t , quer da precipitação directamente nela caída, P_t , e os volumes efluentes da albufeira, correspondentes ao fornecimento, D_t , às perdas por evaporação, E_t , e a outras perdas, L_t (**Figura 14**). Nas anteriores condições, a equação que, em cada Δt , traduz o balanço hídrico da albufeira é expressa por:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t + P_t - L_t \quad (9)$$

sujeita à restrição

$$0 \leq S_{t+1} \leq C \quad (10)$$

em que S_{t+1} representa o volume armazenado na albufeira no fim do passo de cálculo, tendo sido atrás apresentados os significados das demais variáveis intervenientes.

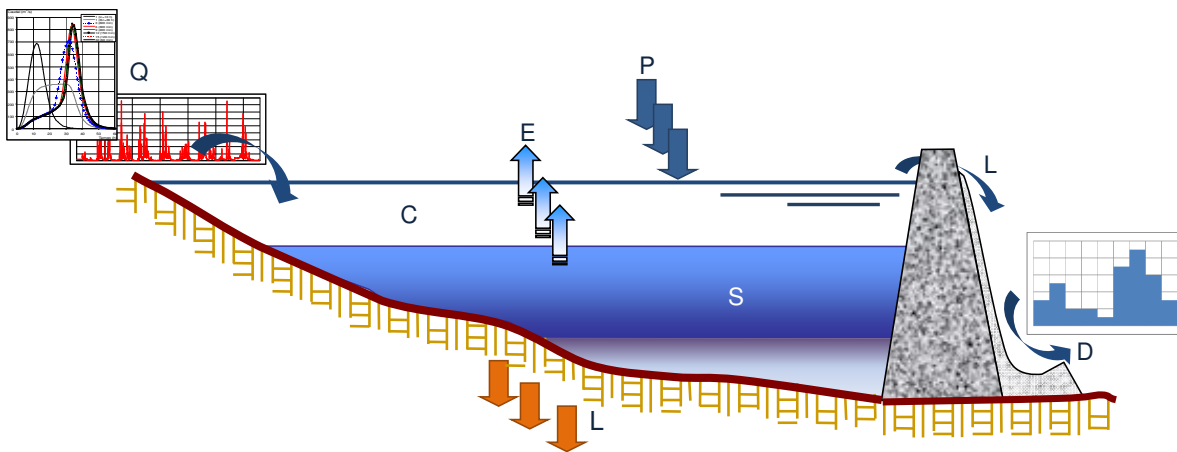


Figura 14 – Representação esquemática das variáveis intervenientes na **equação (9)**.

Em cada passo de cálculo, Δt , ocorre uma restrição, total ou parcial, à satisfação do fornecimento D_t , sempre que da aplicação da **equação (9)** resultar $S_{t+1} < 0$. Neste caso, a simulação prossegue para o passo de cálculo seguinte considerando que, no seu início, é nulo o volume armazenado na albufeira acima do nível mínimo de exploração ($S_t = 0$). Quando resultar $S_{t+1} > C$, a albufeira está cheia no início do passo de cálculo seguinte ($S_{t+1} = C$), tendo sido descarregados os volumes afluentes em excesso relativamente à sua capacidade útil, C .

Como mencionado, a aplicação da **equação (9)** ao dimensionamento de albufeiras é efectuada em sucessivos intervalos de tempo, com resolução directa ou requerendo um processo iterativo de minimização de erro, consoante a grandeza a determinar, de entre as seguintes três hipóteses, esquematicamente representadas na **Figura 15**:

- (i) determinação da capacidade útil da albufeira que assegura o fornecimento de um dado volume anual com uma dada garantia;
- (ii) determinação do volume anual que, para uma dada capacidade útil, é possível fornecer com uma dada garantia;

- (iii) determinação da garantia associada ao fornecimento de um dado volume anual a partir de uma albufeira com uma dada capacidade útil.

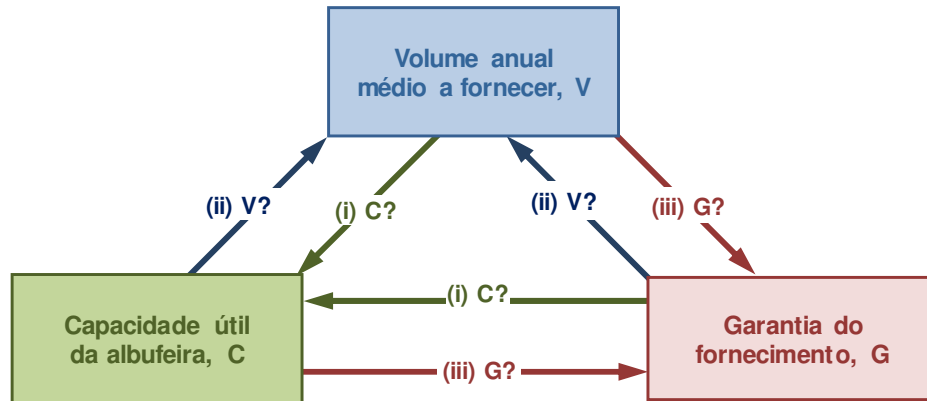


Figura 15 – Problemas a equacionar no dimensionamento de albufeiras de regularização.

A par com a noção de garantia, G, antes apresentada, existem outros critérios para avaliar o desempenho de albufeiras de regularização, com ênfase para a **garantia volumétrica** e para a **vulnerabilidade** e a **resiliência** (McMahon & Adeloje, 2005, p. 15-18). Com efeito, a informação que resulta da **equação (8)** é incompleta, essencialmente por não facultar qualquer indicação quanto ao volume efectivamente em falta e quanto à duração dos períodos com falhas de fornecimento.

No que respeita ao primeiro dos anteriores aspectos e não obstante a **equação (8)** ponderar do mesmo modo todos os períodos com falhas, independentemente do volume efectivamente em falta em cada um desses períodos, é fácil admitir que o efeito, por exemplo, de um intervalo de tempo relativamente longo com falhas de fornecimento sistemáticas, mas muito pouco significativas (que, eventualmente, até poderiam ser facilmente “absorvidas” através de pequenas adaptações na exploração do sistema, como sejam ligeiras restrições ao fornecimento), é totalmente distinto do associado à ocorrência num intervalo de tempo curto mas com um volume em falta igual ao acumulado daquelas falhas pouco significativas. Surge, assim, a garantia volumétrica, dada por:

$$G_V = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^N (D_t - D'_t)}{\sum_{t=1}^N D_t} \right) \times 100 \quad (11)$$

em que N e D_t têm os significados antes apresentados e D'_t representa o volume efectivamente fornecido no intervalo de tempo t.

Relativamente aos outros dois indicadores de desempenho antes mencionados, a vulnerabilidade, η , mede a severidade ou extensão da falha de fornecimento de água sendo dada por:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^{N^*} \frac{\Delta D_k^*}{D_k^*}}{N^*} \quad (12)$$

em que, no conjunto dos N^* períodos de tempo consecutivos com falhas contínuas de fornecimento, ΔD_k^* representa o máximo volume de água em falta durante o k -ésimo desses períodos (**Figura 16**) e D_k^* o pedido acumulado durante o mesmo, sendo que a divisão de ΔD_k^* por D_k^* se destina apenas a adimensionalizar o indicador de desempenho. A vulnerabilidade representa, portanto, a média, devidamente adimensionalizada, dos máximos volumes de água em falta ao longo dos sucessivos períodos de tempo com carência total ou parcial de água em contínuo.

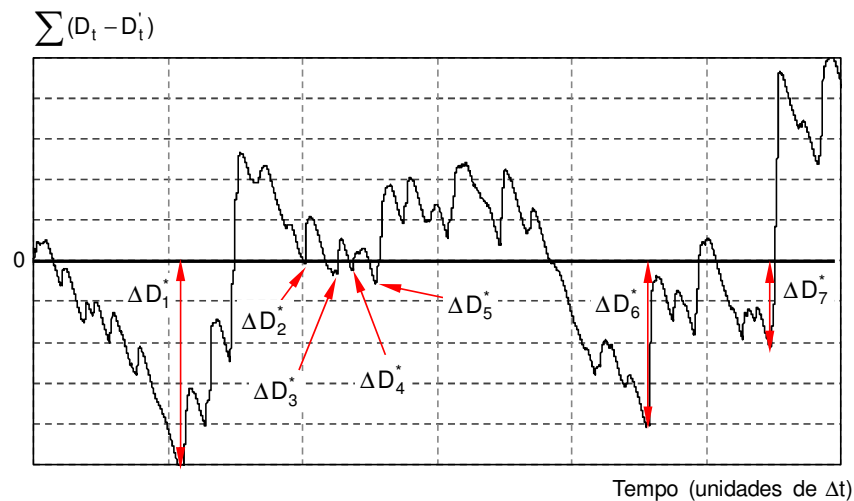


Figura 16 – Volume ΔD_k^* associado à definição da vulnerabilidade, η , de uma albufeira de regularização.

A resiliência, φ , é, por sua vez, um indicador da capacidade de recuperação de uma albufeira de regularização após uma sequência contínua de falhas, sendo definido pela seguinte equação, em que as variáveis têm os significados antes apresentados:

$$\varphi = \frac{1}{\left(\frac{N_r}{N^*}\right)} = \frac{N^*}{N_r} \quad (13)$$

A resiliência é, portanto, o inverso da duração média (em unidades de Δt) dos períodos de tempo consecutivos com falhas contínuas de fornecimento (N_r/N^*), sendo que quanto maior for essa duração média, mais difícil será a albufeira recuperar após uma falha de fornecimento.

Na **Figura 17** reproduzem-se os resultados obtidos por McMahon *et al.*, 2006, relativos à relação entre a vulnerabilidade, η , e a resiliência, φ , de albufeiras de regularização. Tais resultados tiveram por base séries, quer históricas, quer sintéticas de escoamentos afluentes a hipotéticas albufeiras inseridas em quatro cursos de água distintos, localizados em Inglaterra, nos Estados Unidos da América, na Austrália e na África do Sul, e admitiram diferentes capacidades de regularização e diferentes pedidos, num total de 31 combinações. A figura sugere uma complementaridade entre a vulnerabilidade e a resiliência das albufeiras de regularização, diminuindo aquela à medida que aumenta a última e reciprocamente. Importa esclarecer que trabalhos posteriores do mesmo autor sugerem que tal complementaridade poderá não ser tão consistente quanto a **Figura 17** sugere (McMahon *et al.*, 2007b).

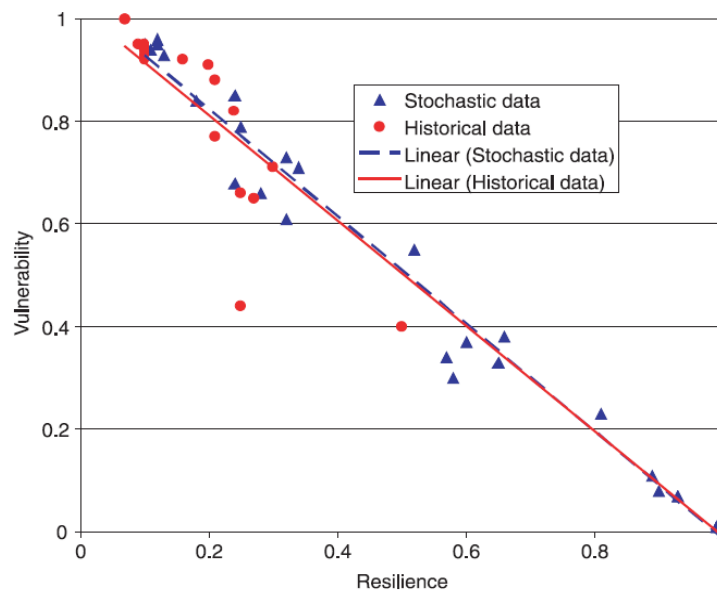


Figura 17 – Relação entre vulnerabilidade e resiliência para quatro albufeiras hipotéticas com escoamentos afluentes resultantes de dados históricos (*Historical data*) e obtidos por geração (*Stochastic data*) (reproduzida de McMahon *et al.*, 2006).

A **Figura 18** caracteriza a relação entre vulnerabilidade, η , e resiliência, φ , obtida por simulação baseada nos escoamentos afluentes às estações hidrométricas do **Quadro 3**, no pressuposto de execução em cada uma dessas estações de uma hipotética albufeira destinada à satisfação de

pedidos uniformes de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% do correspondente volume anual médio afluente, para garantias do fornecimento de 80, 90 e 95% (Silva, 2010). A figura contém a equação de regressão decorrente dos pares de valores (φ, η) nela representados, bem como o correspondente coeficiente de correlação, identificado na figura por c.c.

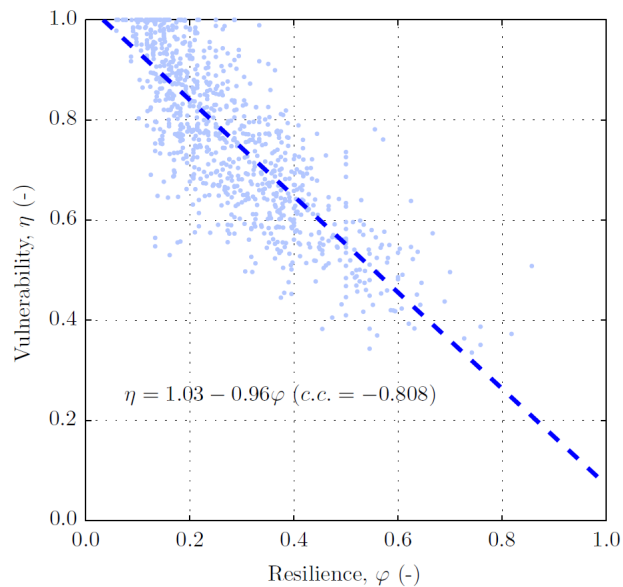


Figura 18 – Relação entre vulnerabilidade, η , e resiliência, φ , para hipotéticas albufeiras coincidentes com as estações hidrométricas do **Quadro 3**. Simulações baseadas nos escoamentos afluentes às estações hidrométricas. Pedidos variáveis entre 20 e 90 das aflúncias anuais médias e garantias de 80, 90 e 95% (reproduzida de Silva, 2010).

4.2. Dimensionamento de albufeiras numa óptica determinística

Com o objectivo de averiguar a possibilidade de estabelecer relações entre a capacidade útil a dispor numa albufeira, C , e a altura do escoamento anual médio na correspondente bacia hidrográfica, H , susceptíveis de serem utilizadas no dimensionamento daquela capacidade na ausência de informação hidrométrica, procedeu-se à aplicação, a nível mensal, do algoritmo de simulação antes descrito, numa primeira fase, aos registos em 24 estações hidrométricas (Portela & Quintela, 2000a,b) os quais, numa segunda fase, foram actualizados para as 54 estações identificadas no **Quadro 3** (Portela & Quintela, 2005b, 2006a,b).

Com efeito, no pressuposto de: (i) bacia hidrográfica em regime natural (excluindo, portanto, também a existência de transvases); (ii) um dado estado da albufeira no início da simulação da exploração (albufeira cheia ou vazia); (iii) não existirem outras saídas de água da albufeira para

além do volume a fornecer; e (iv) serem desprezáveis a precipitação directamente caída na albufeira e a água dela evaporada, espera-se ser válida uma relação do seguinte tipo:

$$\Theta \left(\frac{C}{V}, \frac{V_f}{V}, G, H \right) = 0 \quad (14)$$

em que C/V representa a **regularização específica** (razão entre a capacidade útil da albufeira e a afluência anual média à mesma) e V_f/V , o **grau de utilização do escoamento anual médio** (razão entre o volume anual a fornecer e aquela afluência anual média).

A regularização específica, C/V , traduz a “potencialidade” de a albufeira transferir caudais de épocas húmidas para épocas secas. Tal grandeza cresce com o aumento, quer do grau de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , quer da garantia, G ; cresce também com a diminuição da altura do escoamento anual médio, H , por lhe corresponder maior irregularidade temporal do caudal afluente à albufeira.

Para averiguar a possibilidade de estabelecer uma relação do tipo da expressa pela **equação (14)** considerou-se que nas secções dos cursos de água relativas às diferentes estações hidrométricas analisadas seriam executadas hipotéticas barragens para criar albufeiras destinadas a satisfazer diferentes fornecimentos com diferentes garantias. Considerou-se que no instante inicial cada hipotética albufeira estaria cheia e que o volume anual de água a fornecer a partir da mesma, V_f , representaria uma dada percentagem (que se fez variar) da afluência anual média à albufeira, V . Admitiu-se que a tal volume corresponderiam pedidos uniformes ao longo do ano, tendo-se também feito variar as garantias, G , exigidas no fornecimento desses pedidos.

Concluiu-se, assim, que para valores constantes da garantia, G , e do grau de utilização do escoamento anual médio, V_f/V a **equação (14)** dá lugar à seguinte equação, em que o coeficiente σ é positivo e o expoente β , negativo:

$$\frac{C}{V} = \sigma H^\beta \quad (15)$$

A anterior equação traduz o aumento da regularização específica, C/V , à medida que diminui a altura do escoamento anual médio, H , ou seja, à medida que o regime de afluências é temporalmente mais irregular em consequência da maior aridez da região.

A **Figura 19** contém a representação das curvas definidas pela **equação (15)**, para garantias, G , de 80, 90 e 95% e graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , expressos em percentagem, de 20, 40, 50, 60, 80 e 90%. Os valores dos parâmetros σ e de β que correspondem a tais curvas foram avaliados por análise de regressão linear simples aplicada às transformadas logarítmicas dos pares de valores (H ; C/V) referentes àquelas estações

hidrométricas. No **Quadro 5** especificam-se os valores, actualizados por Silva, 2010, daqueles parâmetros e dos correspondentes coeficientes de correlação, r , da análise de regressão linear, os quais passaram a incluir a curva relativa à garantia de 100 %.

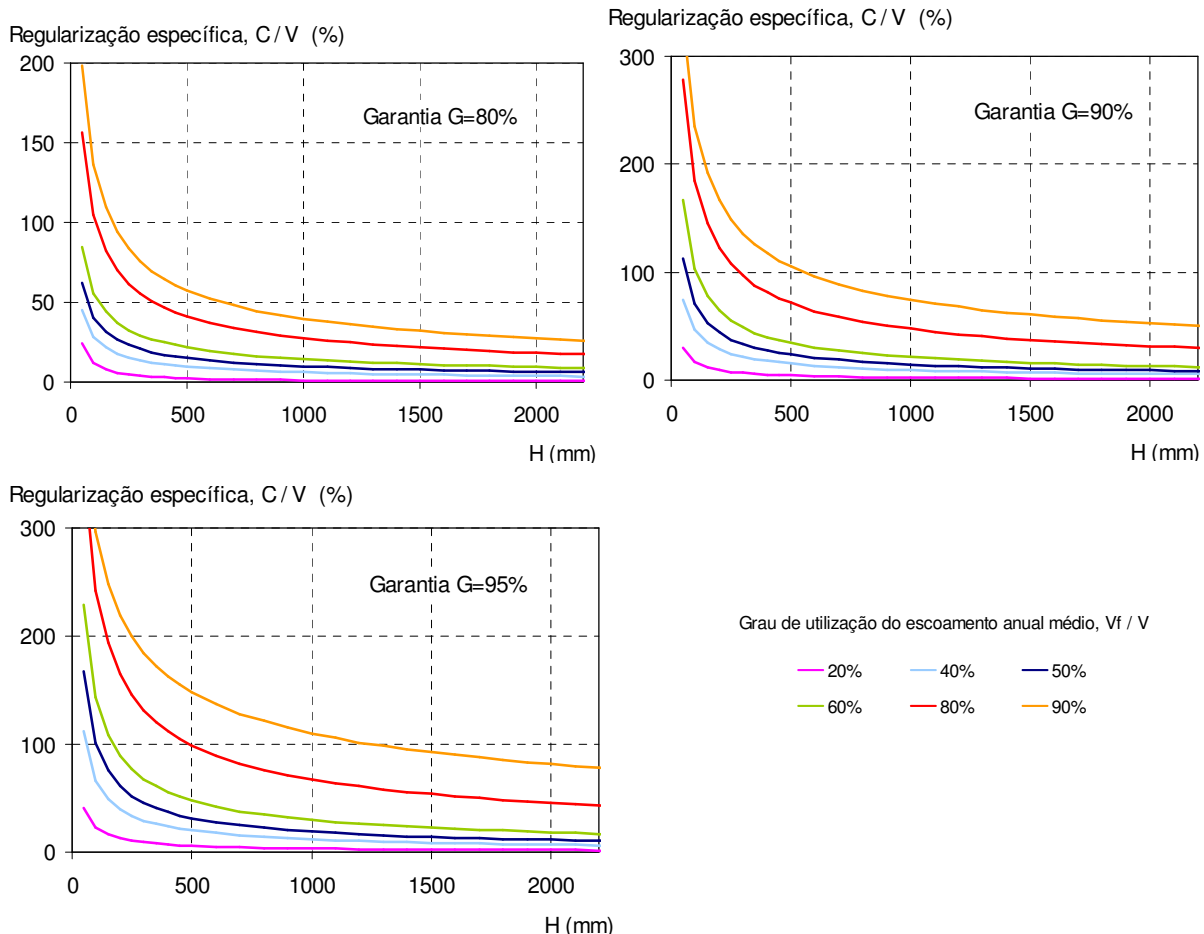


Figura 19 – Curvas representativas das relações entre regularizações específicas de albufeiras, C/V , e alturas dos escoamentos anuais médios, H . Garantias de 80, 90 e 95% e pedidos uniformes correspondentes a graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% (adaptada de Portela & Quintela, 2006b).

Os valores dos coeficientes de correlação, r , apresentados no **Quadro 5** demonstram que existe uma dependência estatisticamente significativa entre C/V e H . Admite-se, assim, que os resultados apresentados na **Figura 19** e sistematizados no **Quadro 5** possam ser directamente aplicados no planeamento da utilização de recursos hídricos, designadamente, no estudo prévio de albufeiras de pequena e média dimensão, localizadas em cursos de água em regime natural de Portugal Continental e destinadas a fornecimentos uniformes de água ao longo do tempo, com o objectivo de avaliar preliminarmente qualquer um dos problemas esquematizados na **Figura 15**, obviamente para as garantias e graus de utilização do escoamento anual médio aí considerados.

Quadro 5 – Coeficiente σ e expoente β das curvas definidas pela **equação (15)** para regularizações específicas de albufeiras, C/V, expressas em percentagem e alturas dos escoamentos anuais médios, H, em milímetros. Garantias de 80, 90, 95 e 100% e pedidos uniformes correspondentes a graus de utilização do escoamento anual médio, V_i/V , de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% (adaptada de Silva, 2010).

		Grau de utilização do escoamento anual médio, V_i/V					
		20%	40%	50%	60%	80%	90%
Garantia G=80%	σ	1387.2	557.3	663.0	787.1	1208.9	1409.4
	β	-1.026	-0.647	-0.606	-0.577	-0.544	-0.515
	r	-0.830	-0.887	-0.888	-0.874	-0.861	-0.848
Garantia G=90%	σ	685.6	1109.1	1542.6	2207.0	2286.6	1831.0
	β	-0.811	-0.689	-0.671	-0.668	-0.557	-0.457
	r	-0.861	-0.882	-0.860	-0.860	-0.811	-0.744
Garantia G=95%	σ	1024.3	2065.2	2687.8	3084.7	2333.9	1759.8
	β	-0.823	-0.739	-0.710	-0.668	-0.503	-0.390
	r	-0.867	-0.863	-0.851	-0.838	-0.761	-0.672
Garantia G=100%	σ	1576.0	2086.2	2054.7	2124.0	1702.3	1367.4
	β	-0.789	-0.635	-0.565	-0.515	-0.374	-0.281
	r	-0.815	-0.635	-0.785	-0.760	-0.658	-0.548

4.3. Dimensionamento de albufeiras numa óptica probabilística, baseada em séries sintéticas de escoamentos

Não obstante a relevância dos resultados precedentes, eles suscitam uma “inquietação”: mesmo que o pedido a satisfazer a partir de uma albufeira de regularização possa ser conhecido com algum rigor e que sejam igualmente conhecidos outros constrangimento do dimensionamento, tais como a geometria do vale, ou as perdas de água a partir da albufeira, uma sequência temporal de escoamentos afluentes a essa albufeira conduz a uma única capacidade útil que, para uma dada garantia, exprime necessariamente um resultado intrínseco do padrão de variabilidade temporal daquela sequência. Por outras palavras, outras possíveis sequências de caudais afluentes, mesmo que exibissem características estatísticas (ao nível dos escoamentos anual e em cada uma dos meses do calendário) próximas das verificadas na única série histórica disponível, conduziriam muito provavelmente a capacidades úteis distintas da resultante daquela outra.

Está-se, portanto, perante um problema de natureza intrinsecamente estocástica para cuja solução contribui o valor do escoamento em si, mas muito determinantemente o padrão temporal da ocorrência desse escoamento ao longo de uma sequência de anos. Tal sequência concretiza, portanto, um único acontecimento hidrológico do qual resulta apenas uma solução – consoante o problema em equacionamento, de entre os considerados na **Figura 15** –, sendo difícil de admitir o dimensionamento de uma origem de água com base em tão escassa informação.

A necessidade de dispor de outras sequências de escoamentos que consubstanciassem outros acontecimentos hidrológicos tratar-se-ia, aparentemente, de um problema com solução difícil uma

vez que em cada origem de água apenas se dispõe de uma série de caudais fluviais, quer registada na secção dessa origem, quer obtida por transposição a partir de uma estação hidrométrica.

Para analisar o problema seria, assim, necessário dispor de séries de escoamentos afluentes que pudessem ser consideradas tão prováveis quanto a série de que se dispõe e que preservassem as correspondentes características e utilizar essas novas séries no dimensionamento das albufeiras. Tal possibilidade encontrou resposta no recurso a séries sintéticas de escoamentos as quais permitiram equacionar a natureza intrinsecamente estocástica dos escoamentos mensais e associar critérios probabilísticos aos indicadores de desempenho de albufeiras de regularização (Silva, 2010, Silva & Portela, 2010a,b, 2012, 2013).

A utilização de séries sintéticas de escoamentos é uma ferramenta importante no planeamento de sistemas de recursos hídricos. Com efeito, no entendimento de que uma amostra de registos consubstancia apenas um acontecimento hidrológico, designadamente, o histórico, as séries sintéticas de escoamentos obtidas a partir dessa amostra representam acontecimentos alternativos com probabilidade de ocorrência que se admite similar à do acontecimento histórico. A utilização de séries sintéticas permite, assim, quantificar a incerteza associada aos fenómenos naturais, em geral, e ao regime de escoamento, em particular. Mediante o tratamento estatístico dos resultados a que conduzem, torna-se ainda possível associar critérios probabilísticos ao cumprimento das metas traçadas para os sistemas em cuja análise se recorreu à geração de séries sintéticas.

A geração de séries sintéticas pode processar-se de modo combinado a diferentes intervalos de tempo, ou níveis temporais, mediante o recurso a técnicas de desagregação. Estas técnicas consistem, em linhas gerais, na repartição de cada valor referente a um dado intervalo de tempo, dito superior, em valores referentes a intervalos de tempo menores, ditos inferiores, com preservação das características estatísticas exibidas pelas amostras relativas aos diferentes níveis temporais em presença, tais como médias, desvios-padrão e coeficientes de assimetria. A geração de séries sintéticas de escoamentos mensais ou diários utiliza normalmente um modelo de geração ao nível anual combinado com um modelo de desagregação para escoamentos mensais ou diários.

A selecção do modelo de geração anual atende às características dos dados disponíveis. No caso de estar em causa uma variável intrinsecamente aleatória pode ser utilizado um modelo probabilístico, baseado na identificação da função de distribuição de probabilidade que melhor se ajusta à amostra daquela variável. Havendo correlação temporal, importa não só considerar a aleatoriedade do fenómeno, mas também preservar a estrutura de dependência, sendo necessário recorrer a modelos estocásticos de geração, por exemplo, do tipo auto regressivo, AR.

Na aplicação de séries sintéticas ao dimensionamento de albufeiras visando a generalização dos resultados expressos pelas **equações (14) e (15)**, a geração ao nível temporal superior – anual – baseou-se na amostragem aleatória da lei log-Pearson III e a desagregação dos escoamentos anuais em escoamentos mensais utilizou o método dos fragmentos.

Tal método, originalmente apresentado por Svanidze em 1964 (Svandize, 1964, *in* Santos, 1983, p. 19), adopta como pressuposto fundamental que a distribuição dos escoamentos ao nível temporal inferior é idêntica em anos com escoamentos anuais próximos.

Na aplicação do método dos fragmentos à obtenção de séries sintéticas de escoamento mensais a partir de uma amostra de N anos de escoamentos, os escoamentos mensais registados em cada ano, i, são divididos pelo correspondente escoamento anual, resultando doze escoamentos mensais adimensionais cuja soma é igual a 1 e que constituem um fragmento, λ_i . No conjunto dos N anos com registos são assim constituídos N fragmentos, de acordo com:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_i \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\nabla_{1,1}}{\nabla_1} & \dots & \frac{\nabla_{1,12}}{\nabla_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\nabla_{i,1}}{\nabla_i} & \dots & \frac{\nabla_{i,12}}{\nabla_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\nabla_{N,1}}{\nabla_N} & \dots & \frac{\nabla_{N,12}}{\nabla_N} \end{bmatrix} \quad \wedge \quad \sum_{j=1}^{12} \frac{\nabla_{i,j}}{\nabla_i} = 1 \quad \text{com } i = 1, \dots, N \quad (16)$$

em que $[\lambda]$ designa o vector dos fragmentos, λ_i o fragmento relativo ao ano i, com $i = 1, \dots, N$, ∇_i o escoamento nesse ano, após ordenação da amostra dos N escoamentos anuais, mais frequentemente, por valores crescentes, e $\nabla_{i,j}$ o escoamento no mês j do ano i (também após aquela ordenação).

O método concretiza-se mediante a geração de sucessivos escoamentos anuais que são repartidos em escoamento mensais por aplicação dos fragmentos que, para o efeito, têm de ser criteriosamente seleccionados de modo a assegurar a preservação das características estatísticas das séries anuais e mensais.

De acordo com Santos, 1983, pp. 19 e 20, a maneira como se atribui um fragmento a cada escoamento anual gerado constitui o aspecto mais importante do método e, por ventura, o mais limitativo, sendo objecto de discussão entre autores (Svanidze, 1964, *in* Santos, 1983, Santos, 1983, Arsénio, 2003, Silva, 2010). Santos, 1983, sugere que os fragmentos sejam agrupados em classes e que após a geração de cada escoamento anual seja escolhido aleatoriamente um fragmento da classe a que aquele escoamento pertence. Arsénio, 2003, adoptou tal técnica considerando uma selecção aleatória de fragmentos sem reposição. Sempre que uma dada

classe fica vazia, Arsénio, 2003, procede à reposição dos fragmentos nela originalmente incluídos. Após ensaio de diferentes critérios de constituição das classes, Arsénio, 2003, sugere que essa constituição utilize um procedimento de tentativa e erro até que seja identificado o conjunto de classes que assegura a preservação mais efectiva das características estatísticas das séries históricas mensais. Tal sugestão introduz, sem dúvida, ambiguidade na aplicação do método dos fragmentos, inibindo-a muito consideravelmente ou mesmo interditando-a.

Na tentativa de aplicar amplamente o método dos fragmentos, libertando-o, por assim dizer, da ambiguidade antes mencionada, concebeu-se um procedimento de definição das classes baseado num critério determinístico. Concretamente, considerou-se que os dois escoamentos que, ao nível anual, definem os limites de qualquer uma das classes seriam tais que lhes corresponderia uma amplitude de probabilidade (definida de acordo com o modelo probabilístico aplicado àquele nível) fixa e constante. Tratam-se, portanto de classes definidas por intervalos de probabilidade dos escoamentos anuais limítrofes com amplitude constante, mantendo-se a extracção dos fragmentos de cada classe sem reposição, sendo que os fragmentos iniciais dessa classe são repostos uma vez que a mesma fique vazia.

Tal procedimento foi testado e validado através da aplicação intensiva à geração de séries sintéticas de escoamentos mensais (Silva, 2010) e diários (Pinto, 2013), em ambos os casos por desagregação directa de escoamentos anuais obtidos, como antes mencionado, por amostragem aleatória da lei log-Pearson III. A amplitude, em termos de probabilidade ao nível anual, das classes de fragmentos foi fixada em 10%.

Especificamente no que respeita ao equacionamento da incerteza associada ao dimensionamento de albufeiras, os resultados obtidos para cada uma das estações hidrométricas do **Quadro 3** utilizaram 1200 séries sintéticas de escoamentos mensais, com dimensão igual à da correspondente série histórica. O anterior número foi fixado de acordo com as indicações expressas por Guimarães, 2005, p. 175.

Na **Figura 20** reproduzem-se alguns dos resultados apresentados por Silva, 2010, referentes à aplicação da **equação (15)** aos pares de valores de H e das regularizações específicas, C/V, obtidos por simulação tendo por base as amostras de escoamentos mensais nas estações hidrométricas do **Quadro 3** e as correspondentes séries sintéticas, para o que, neste último caso, se adoptaram as médias nas diferentes estações dos quocientes C/V. Na obtenção da figura consideraram-se pedidos uniformes, graus de utilização do escoamento anual médio, V_f / V , de 20, 50 e 90% e garantias, G, de 80, 90, 95 e 100%. Importa esclarecer que as amostras de escoamentos mensais adoptadas por Silva, 2010, apresentam ligeiras diferenças em relações às utilizadas nos trabalhos antecedentes citados no decurso deste texto, por incorporarem ligeiramente mais informação e pelo facto de na estação hidrométrica de Moinho do Bravo

(25G/02) aquele autor ter constituído uma segunda amostra, relativa ao período inicial de funcionamento da estação com registos contínuos, entre 1934/35 e 1958/59, ao qual se sucedeu um longo período com falhas após o qual foi retomada a exploração continuada da estação.

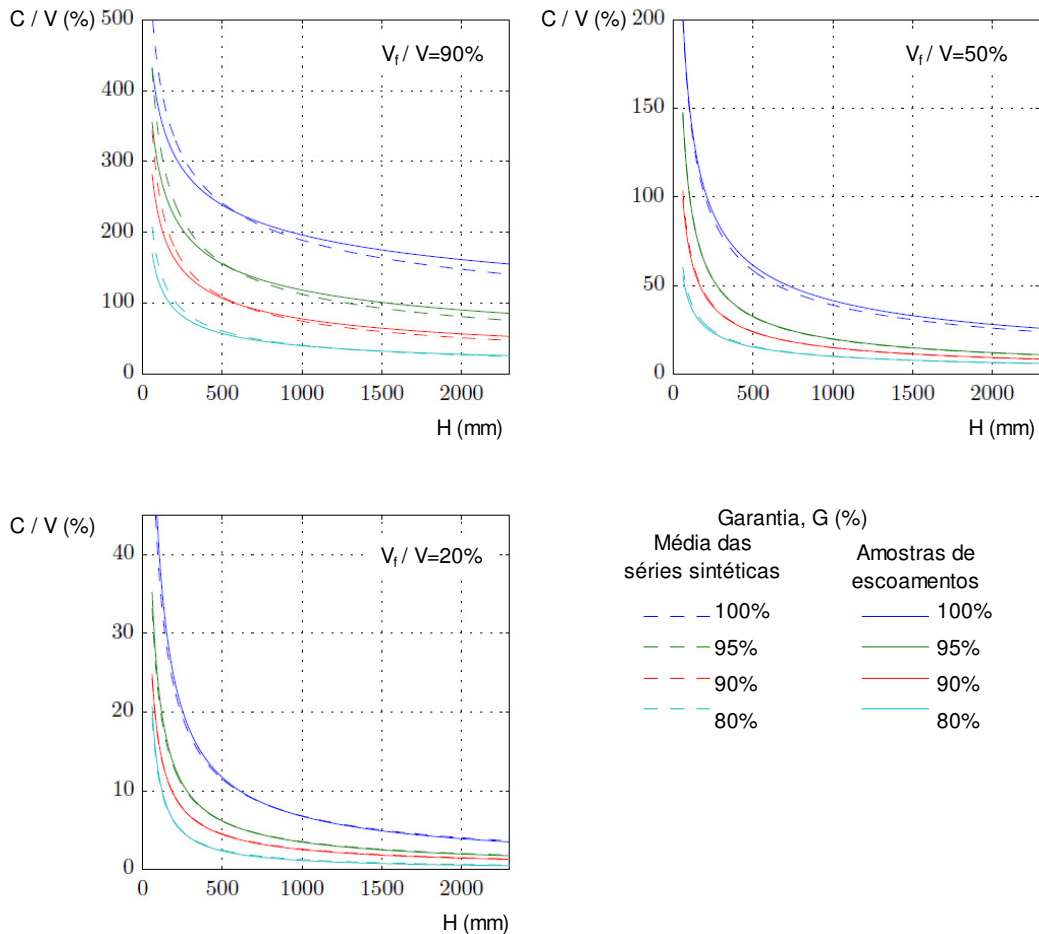


Figura 20 – Curvas representativas das relações entre regularizações específicas de albufeiras, C/V , e alturas dos escoamentos anuais médios, H , obtidas tendo por base as amostras de escoamentos mensais e as médias dos valores de C/V decorrentes das séries sintéticas daqueles escoamentos. Garantias de 80, 90, 95% e 100% e pedidos uniformes correspondentes aos graus de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 90, 50 e 20% (adaptada de Silva, 2010).

A **Figura 20** confirma, no essencial, a coincidência entre resultados decorrentes das amostras históricas e resultados médios no conjunto das 1200 séries sintéticas relativas a cada estação hidrométrica. Contudo, tais resultados continuam a revestir-se de uma natureza intrinsecamente determinística, pois fazem corresponder a cada pedido e garantia uma de duas capacidades de regularização, que, no essencial, são praticamente coincidentes: a capacidade que resulta da amostra histórica ou a média das capacidades decorrentes das séries sintéticas.

Dado que, em cada hipotética origem de água se dispõe, para cada pedido a satisfazer e garantia a ele associada, de 1200 valores de C/V obtidos por simulação baseada em igual número de séries sintéticas, é possível proceder ao tratamento estatístico dessa amostra de regularizações específicas, associando-lhe probabilidades de cumprimento do objectivo a que se destinam, ou seja, probabilidades de cumprimento da garantia e do fornecimento que lhes foram associados. Nesse entendimento, a **equação (14)**, dá lugar à seguinte equação mais geral:

$$\Theta\left(\frac{C}{V}, \frac{V_f}{V}, G, G_p, H\right) = 0 \quad (17)$$

na qual G_p representa uma garantia que, por oposição à garantia G de natureza intrinsecamente empírica e determinística, vai ser designada por **garantia probabilística**, mantendo-se os significados das restantes variáveis. Mais especificamente, fixado o pedido e a garantia G a ele associada, G_p identifica a capacidade de regularização que, para a probabilidade de não excedência identificada pelo índice P , assegura a satisfação daquele pedido com a garantia G . Na implementação do anterior conceito ajustou-se uma distribuição teórica de probabilidades aos 1200 valores de C/V referentes, em cada estação hidrométrica, a um dado pedido e garantia, para o que foi adoptada a lei de Gumbel, identificada como a mais adequada ao tratamento estatístico de capacidades úteis (Ribeiro, 1996, p. 79, Guimarães, 2005, p. 83, Silva, 2010, p. 45).

A **Figura 21** esquematiza o procedimento global adoptado por Silva, 2010, na aplicação das **equações (17)** e **(15)** e na obtenção e comparação dos resultados assim alcançados. Tais resultados são exemplificados na **Figura 22** para dois valores da garantia G – 80 e 95% – e para o pedido uniforme correspondente ao grau de utilização do escoamento anual médio, V_f/V , de 40%. A figura contém a representação das estimativas da regularização específica, C/V , e as curvas ajustadas a essas estimativas tendo por base as amostras históricas. Tais curvas confirmam os resultados antecedentes a Silva, 2010, não obstante a menor informação então utilizada.

No que respeita à exemplificação de resultados decorrentes das séries sintéticas, foi incluída na **Figura 22** a representação das curvas ajustadas, quer às médias dos 1200 valores da regularização específica, C/V , relativas ao conjunto das estações hidrométricas analisadas, quer às estimativas de C/V para as garantias probabilísticas, G_p , de 80 e 95% obtidas mediante tratamento estatístico, em cada das estações, daqueles 1200 valores por aplicação de lei de Gumbel, como antes especificado.

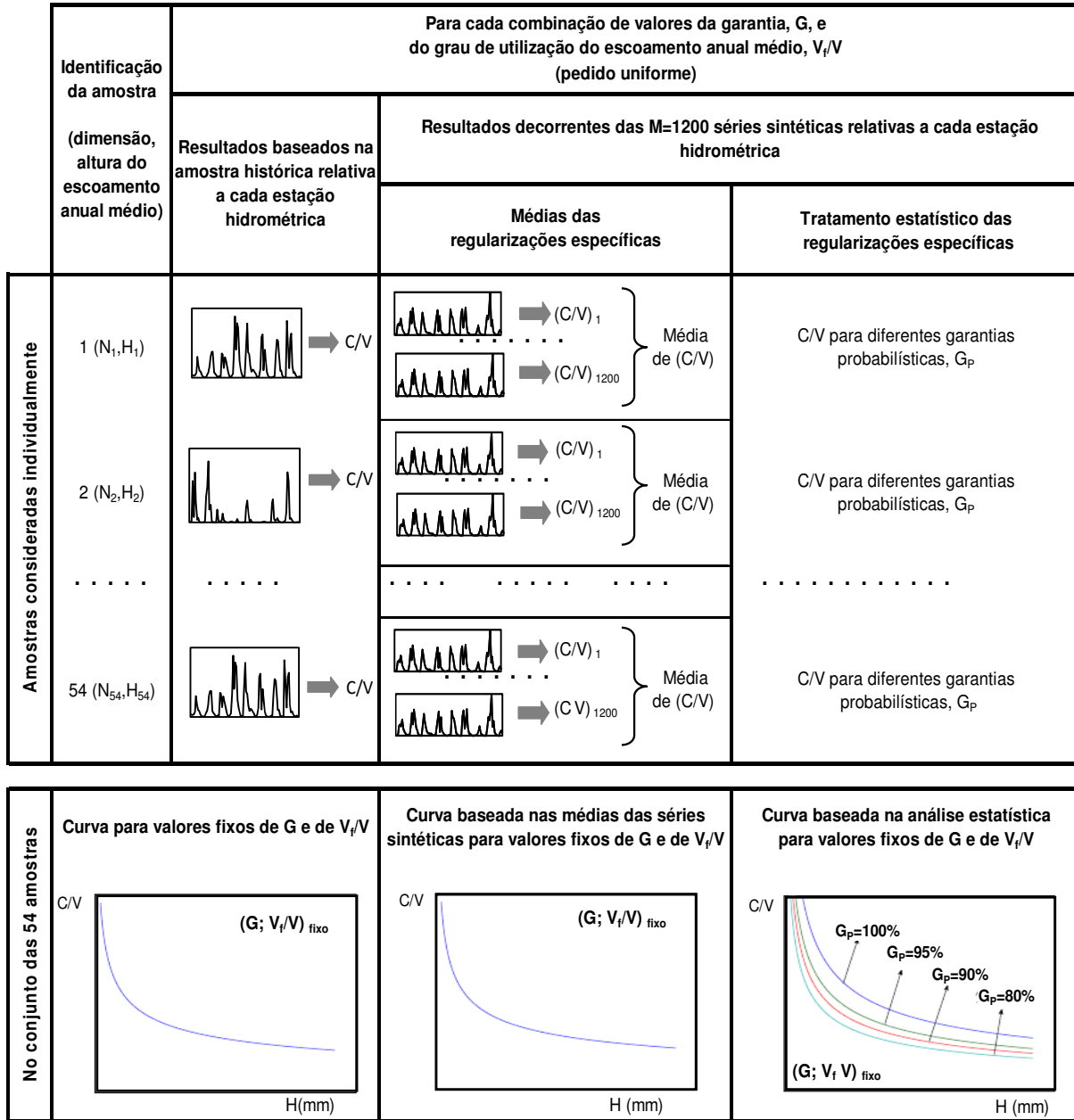


Figura 21 – Representação esquemática do procedimento aplicado à análise das capacidades úteis a dispor em albufeiras de regularização nas óticas determinística e probabilística (adaptada de Silva, 2010).

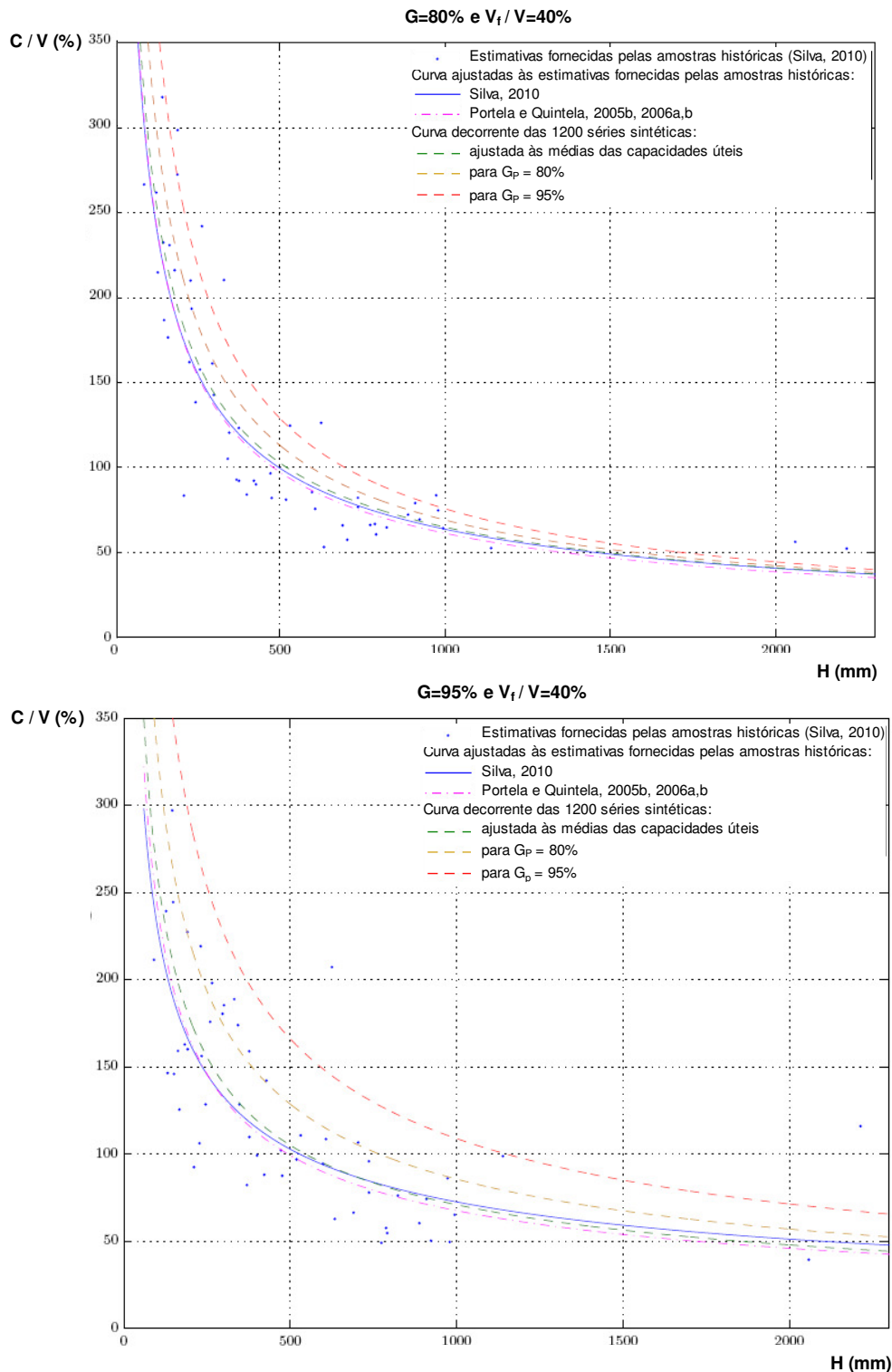


Figura 22 – Garantias, G , de 80% (em cima) e de 95% (em baixo) e pedidos uniformes correspondentes ao grau de utilização do escoamento anual médio, V_t/V , de 40%. Curvas representativas das relações entre regularizações específicas, C/V , e alturas do escoamento anual médio, H , obtidas tendo por base as amostras de escoamento mensais e os 1200 valores de C/V decorrentes das séries sintéticas desses escoamentos, neste último caso, caracterizadas em termos de médias e para as garantias probabilísticas, G_p , de 80 e de 95% (adaptada de Silva, 2010).

Para exemplificar a leitura das curvas da **Figura 22** reproduziram-se na **Figura 23** os resultados referentes à garantia, G , de 80% e destacaram-se quatro pontos, assinalados de (1) a (4) relativos ao pré-dimensionamento de uma albufeira de regularização dominando uma bacia hidrográfica com a altura do escoamento anual médio de cerca de 250 mm.

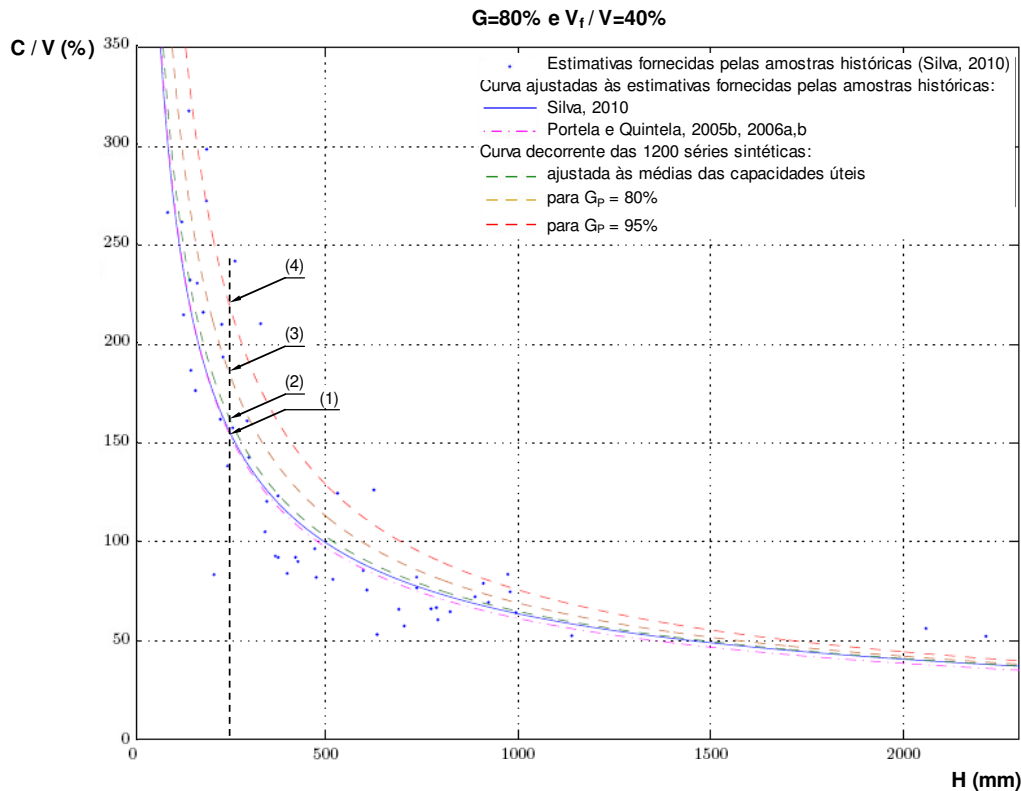


Figura 23 – Resultados da **Figura 22** para a garantia, G , de 80% e pedidos uniformes correspondentes aos graus de utilização do escoamento anual médio, V_t/V , de 40%. Pontos exemplificativos da leitura da **Figura 22** para uma albufeira dominando uma bacia hidrográfica com a altura do escoamento anual médio de cerca de 250 mm.

O ponto (1) da **Figura 23** indica que, em conformidade com os resultados da simulação baseada em amostras de escoamentos, a capacidade útil a dispor na albufeira em menção para assegurar o pedido uniforme de 40% da afluência anual média com a garantia de 80% é de cerca de 1.6 vezes a afluência anual média na respectiva bacia hidrográfica ($C/V \approx 160\%$). É também esta a informação que, em média, sensivelmente decorre das séries sintéticas – ponto (2).

Contudo, em consequência da variabilidade intrínseca do escoamento, que pode englobar em si sequências de escoamentos mensais com padrões temporais distintos dos registados pelas amostras disponíveis, para assegurar o cumprimento do objectivo definido por $V_t/V= 40\%$ e $G = 80\%$ em $G_p = 80\%$ das ocorrências, a capacidade útil a dispor já deverá ser de cerca de 1.85 vezes aquela afluência – $C/V \approx 185\%$, ponto (3) –, valor que aumenta para cerca de 2.2

($C/V \approx 220\%$) para a probabilidade de não excedência de $G_p = 90\%$, ou seja, ao pretender-se minorar a probabilidade de o sistema não assegurar a meta pretendida – ponto (4).

Como conclusões importantes associadas à **Figura 22** sistematizam-se as seguintes:

1. A inquestionável concordância entre curvas relacionando C/V e H ajustadas a estimativas daquela regularização decorrentes de diferentes amostras históricas (em termos do número dessas amostras e das suas dimensões) indicam a consistência entre resultados obtidos por diferentes autores.
2. A igualmente inquestionável concordância entre as anteriores curvas e as obtidas a partir das médias dos valores de C/V fornecidos pelas séries sintéticas indicam muito claramente a adequação do modelo de geração de escoamento mensais, facto já antes constatado a propósito da **Figura 20**.
3. A posição relativa das curvas decorrentes das médias dos valores de C/V fornecidos pelas séries sintéticas e as curvas para garantias probabilísticas, G_p , de 80 e 95% mostram muito claramente que, em termos relativos, a amplitude associada às estimativas de C/V é tanto maior quanto menor é a altura do escoamento anual médio, como se evidencia na **Figura 24** obtida a partir da **Figura 22** e na qual foram destacados, a título de exemplo, os resultados relativos às alturas do escoamento anual médio de 250 e 1750 mm. O aumento da amplitude das estimativas de C/V com a diminuição de H decorre mais uma vez do facto de a variabilidade relativa do escoamento ser tanto maior quanto menor é o valor da altura do escoamento anual médio, com conseqüente maior variabilidade nas estimativas de C/V e, logo, maior incerteza associada a essas estimativas.
4. Obviamente que a amplitude relativa das estimativas de C/V e, logo, a incerteza a elas associadas, são tanto maiores quanto maior for a garantia, G , como evidenciam os resultados da **Figura 24** quando se comparam amplitudes para igual valor de H e para as duas garantias, G , de 80 e 95% consideradas na figura.

Por fim, apresentam-se no **Quadro 6** valores equivalentes aos do **Quadro 5** mas com mais uma variável de entrada relativa à garantia probabilística, G_p , para a qual foram considerados valores de 80, 90, 95 e 99%.

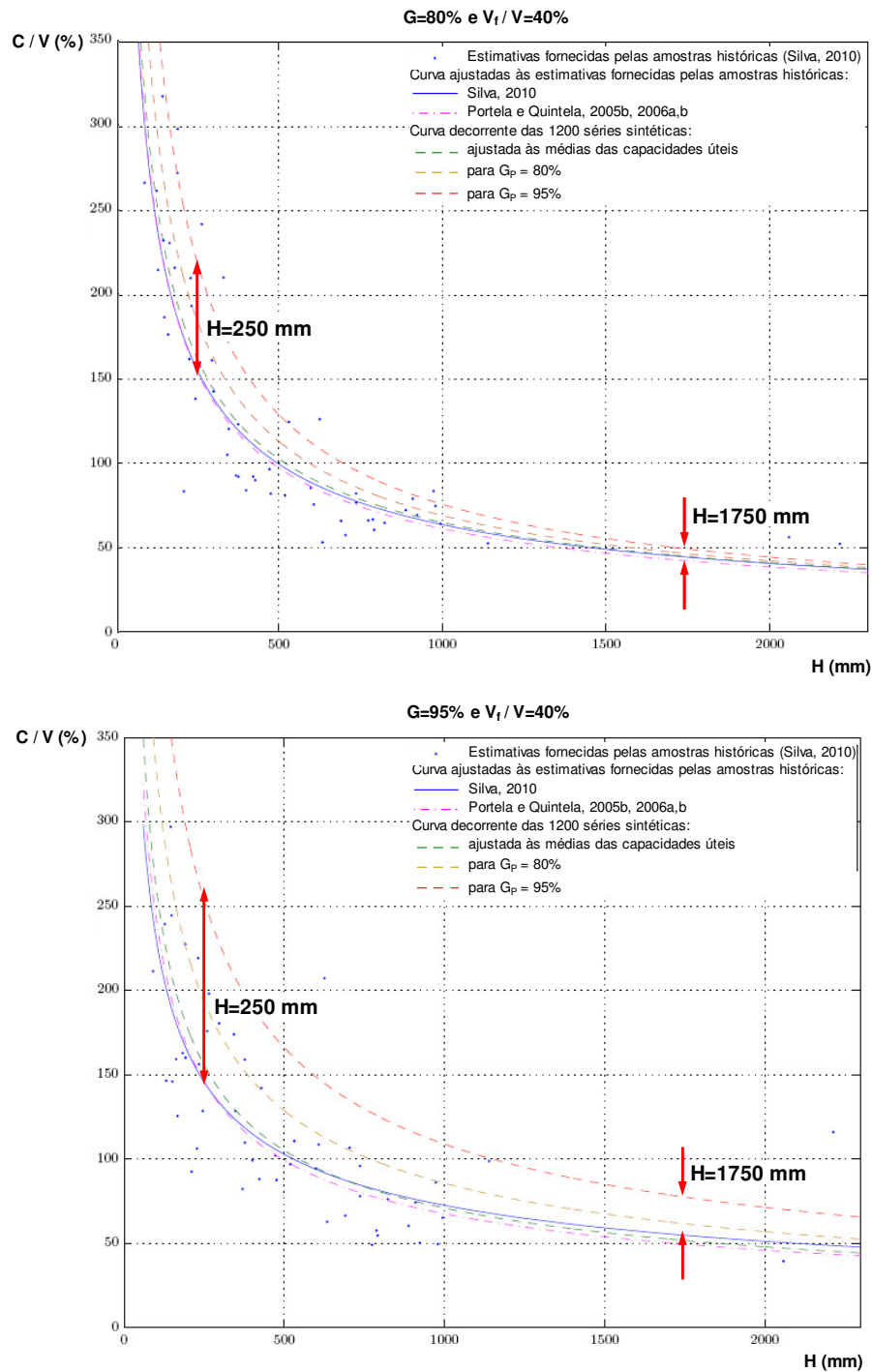


Figura 24 – Albufeiras dominando bacias hidrográficas com alturas do escoamento anual médio, H , de cerca de 250 e 1750 mm. Aumento da amplitude relativa do intervalo de valores de C/V em consequência: separadamente para cada gráfico, da diminuição da altura do escoamento anual médio (maior irregularidade temporal relativa do escoamento); do gráfico superior para o gráfico inferior, para um mesmo valor de H , do aumento da garantia G .

Quadro 6 – Coeficiente σ e expoente β das curvas definidas pela **equação (15)** para regularizações específicas de albufeiras, C/V, expressas em percentagem e alturas dos escoamentos anuais médios, H, em milímetros. Garantias, G, de 80, 90, 95 e 100%, garantias probabilísticas, G_p , de 80, 90, 95 e 99% e pedidos uniformes correspondentes a graus de utilização do escoamento anual médio, V_i/V , de 20, 40, 50, 60, 80 e 90% (adaptado de Silva, 2010).

			Grau de utilização do escoamento anual médio, V_i/V					
			20%	40%	50%	60%	80%	90%
Garantia G=80%	G _p =80%	σ	1132.8	947.7	1296.9	1821.5	3085.2	3534.3
		β	-0.967	-0.712	-0.694	-0.689	-0.663	-0.628
		r	-0.857	-0.896	-0.896	-0.899	-0.899	-0.893
	G _p =90%	σ	1226.9	1239.6	1776.5	2546.8	4276.8	4753.7
		β	-0.966	-0.744	-0.732	-0.730	-0.700	-0.658
		r	-0.865	-0.895	-0.896	-0.898	-0.898	-0.892
	G _p =95%	σ	1318.6	1551.0	2305.9	3356.1	5575.8	6039.8
		β	-0.966	-0.770	-0.764	-0.763	-0.729	-0.681
		r	-0.870	-0.894	-0.894	-0.897	-0.897	-0.890
	G _p =99%	σ	1528.1	2360.4	3744.0	5580.6	9018.7	9302.5
		β	-0.966	-0.818	-0.821	-0.823	-0.780	-0.721
		r	-0.875	-0.890	-0.890	-0.894	-0.893	-0.885
Garantia G=90%	G _p =80%	σ	942.3	2058.5	3099.4	4206.5	5073.1	4546.8
		β	-0.843	-0.766	-0.761	-0.746	-0.651	-0.568
		r	-0.871	-0.893	-0.899	-0.905	0.900	-0.881
	G _p =90%	σ	1241.1	3007.2	4526.1	5986.7	6677.3	5735.1
		β	-0.875	-0.814	-0.808	-0.786	-0.675	-0.583
		r	-0.874	-0.894	-0.900	-0.905	-0.900	-0.881
	G _p =95%	σ	1559.6	4106.2	6166.1	7969.8	8329.4	6917.6
		β	-0.901	-0.853	-0.845	-0.818	-0.694	-0.595
		r	-0.875	-0.894	-0.900	-0.904	-0.899	-0.881
	G _p =99%	σ	2384.8	7280.8	10841.6	13376.6	12391.6	9705.9
		β	-0.948	-0.922	-0.911	-0.874	-0.725	-0.614
		r	-0.873	-0.892	-0.898	-0.901	-0.896	-0.879
Garantia G=95%	G _p =80%	σ	1476.7	3532.5	4622.2	5333.1	4960.2	3912.1
		β	-0.863	-0.803	-0.772	-0.728	-0.588	-0.483
		r	-0.876	-0.895	-0.900	-0.903	-0.886	-0.843
	G _p =90%	σ	2107.9	5085.9	6436.7	7148.4	6151.8	4641.1
		β	-0.907	-0.845	-0.808	-0.755	-0.600	-0.487
		r	-0.877	-0.895	-0.899	-0.902	-0.887	-0.844
	G _p =95%	σ	2821.4	6845.3	8419.0	9055.9	7326.1	5344.1
		β	-0.942	-0.879	-0.835	-0.777	-0.609	-0.490
		r	-0.877	-0.894	-0.898	-0.901	-0.887	-0.844
	G _p =99%	σ	4813.6	11760.8	13688.7	13872.6	10064.7	6944.7
		β	-1.004	-0.940	-0.884	-0.813	-0.625	-0.495
		r	-0.875	-0.891	-0.893	-0.898	-0.887	-0.845
Garantia G=100%	G _p =80%	σ	1736.0	2578.2	2871.6	3116.8	3070.2	2634.8
		β	-0.778	-0.648	-0.597	-0.550	-0.436	-0.355
		r	-0.874	-0.882	-0.879	-0.871	-0.808	-0.717
	G _p =90%	σ	2173.4	3055.0	3406.8	3710.4	3572.5	3019.3
		β	-0.794	-0.655	-0.604	-0.557	-0.439	-0.356
		r	-0.878	-0.884	-0.882	-0.875	-0.813	-0.720
	G _p =95%	σ	2617.1	3518.9	3925.3	4285.4	4055.5	3388.1
		β	-0.807	-0.660	-0.609	-0.563	-0.442	-0.357
		r	-0.879	-0.885	-0.884	-0.878	-0.816	-0.722
	G _p =99%	σ	3692.7	4586.1	5112.2	5601.7	5151.9	4223.6
		β	-0.830	-0.669	-0.618	-0.572	-0.446	-0.358
		r	-0.879	-0.885	-0.887	-0.882	-0.821	-0.725

5. Apontamento final. Perspectivas

A finalizar a presente lição, menciona-se que a combinação dos resultados antecedentes – referentes à capacidade de a altura do escoamento anual médio funcionar como um descritor preciso da variabilidade temporal relativa do escoamento em cursos de água de Portugal Continental e, por assim dizer, à “generalização” do método dos fragmentos e ao excelente desempenho da aplicação desse método à geração de séries sintéticas de escoamentos mensais (Silva, 2010) e diários (Pinto, 2013) – abriram perspectivas de investigação adicionais no domínio da incerteza hidrológica. De entre essas perspectivas refere-se a aplicação à quantificação do risco hidrológico-energético em aproveitamentos hidroeléctricos, com ênfase para os com exploração a fio-de-água.

Com efeito, para esse tipo de aproveitamentos é particularmente relevante quantificar a sua vulnerabilidade a sequências de caudais distintas das efectivamente verificadas, com evidente consequência nas receitas assim alcançadas ao longo do tempo com a venda da energia produzida. Para, de algum modo, quantificar o risco hidrológico-energético associado ao investimento naquele tipo de aproveitamentos é fundamental analisar o efeito da variabilidade dos escoamentos à luz de critérios de análise económica pois as contribuições para a mais-valia económica dos empreendimentos das receitas geradas por aqueles escoamentos dependem intrinsecamente dos instantes em que ocorrem (André, 2007, Portela & André, 2008).

Bibliografia

- Adeloye, A., 2009a, Multiple linear regression and artificial neural networks models for generalized reservoir storage–yield–reliability function for reservoir planning”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 14(7), 731–738.
- Adeloye, A., 2009b, The relative utility of regression and artificial neural networks models for rapidly predicting the capacity of water supply reservoirs, *Environmental Modelling and Software*, 24(10), 1233–1240.
- Adeloye, A., Lallemand, F., McMahon, T., 2003, Regression models for within-year capacity adjustment in reservoir planning, *Hydrological Sciences Journal*, 48(4), 539–552.
- André, S., 2007, *O risco hidrológico-económico associado à produção de energia em pequenos aproveitamentos hidroeléctricos em regime de produção independente*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST/UTL, Lisboa.
- Arsénio, J.J.G., 2003, *Gestão de albufeiras: avaliação do potencial dos sistemas com recurso a séries sintéticas de escoamentos*. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, IST/UTL, Lisboa.
- Bayazit, M., & Önöz, B., 2000, Conditional distributions of ideal reservoir storage variables, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(1), 52–58.
- Bloschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H. (eds), 2013, *Runoff prediction in ungauged basins. Synthesis across processes, places and scales*, Cambridge University Press, ISBA 978-1-107-02818-0.
- Guimarães, R.C.P.C., 2005, *Simulação no dimensionamento e gestão de sistemas de recursos hídricos. Geração de séries sintéticas de escoamento*, Tese de Doutoramento. Universidade de Évora, Évora.
- Hillel, D., 1987, Modeling in soil physics: A critical review, in Boersma, L.I. (ed.): *Future developments in soil science research*. 1936-1986 Golden Anniversary contributions, Soil Science Society of America, Madison, Wis., 35-42.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H.V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., Cudennec, C., 2013, A decade of predictions in ungauged basins (PUB) – a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (6), 1198-1255, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., Salarpour, M., 2012, A review on theoretical consideration and types of models in hydrology, *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5): 249-261, ISSN 1994-7887. DOI 10.3923/jest.2012.249.261
- Loucks, D.P., & van Beek, E. (eds.), 2005, *Water Resources Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, The Netherlands, ISBN: 92-3-103998-9.
- McMahon, T., & Adeloye, A., 2005, *Water resources yield*, Water Resources Publications, Denver.
- McMahon, T., Adeloye, A., Zhou, S., 2006, Understanding performance measures of reservoirs, *Journal of Hydrology*, 324 (2006) 359–382.
- McMahon, T., Pegram, G., Vogel, R., Peel, M., 2007a, Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database, *Advances in Water Resources*, 30(8), 1858-1872.
- McMahon, T., Vogel, R., Pegram, G., Peel, M., Etkin, D., 2007b, Global streamflows. Part 2. Reservoir storage-yield performance, *Journal of Hydrology*, 347, 260-271.

- O'Reilly, C., & Silberblatt, R., 2009, *Reservoir management in Mediterranean climates through the European water framework directive*, Water Resources Center Archives, Univ. of California Water Resources Center, Univ. of California, Berkeley, CA.
- Pinto, J.D.S., 2013, *Aplicação do método dos fragmentos à geração de séries sintéticas de escoamentos diários. Casos de estudo em Portugal Continental*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, UBI.
- Portela, M.M., 2005, Proposta de procedimento hidrológico hidráulico para definir caudais ecológicos em cursos de água do Sul de Portugal Continental, *Recursos Hídricos*, Vol. 26 (1), pp. 17-36, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), ISSN 0870-1741, Lisboa.
- Portela, M.M., 2007, Definition of ecological flows downstream dams located in the South of Portugal. A new method, *Sixth International Conference on Ecosystems and Sustainable Development*, ECOSUD 2007, (Coimbra, Portugal), pp. 303-312, Wessex Institute, Wessex Institute of Technology (UK), University of Coimbra (Pt), University of Siena (It), Coimbra, Portugal, ISBN 978-1-84564-116-0, Southampton, WOS:000257427600030, doi:10.2495/SI080301.
- Portela, M.M., & André, S., 2008, Risco hidrológico-económico da produção de energia em pequenas centrais hidroeléctricas, *VIII Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano*, SEREA 2008, IST, Lisboa, Portugal, in Ramos, H.; Covas, D., Gonçalves, F., Soares, A. (eds), 2008, *Alterações climáticas e gestão da água e energia em sistemas de abastecimento e drenagem*, pp. 269-277, IST, CEHIDRO, ISBN 978-989-95838-1-8, Lisboa, Portugal.
- Portela, M.M., & Quintela, A.C., 2000a, A altura do escoamento anual médio numa bacia hidrográfica como parâmetro de regionalização de informação hidrométrica, *1º Congresso sobre Aproveitamentos e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português*, pp. 218-227, Rio de Janeiro, Brasil.
- Portela, M.M., & Quintela, A.C., 2000b, Estudo regional de volumes de água garantidos por albufeiras em rios portugueses, *Recursos Hídricos*, Vol. 21 (3), pp. 97-106, Edição comemorativa do 5º Congresso da Água, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), ISSN 0870 1741, Lisboa.
- Portela, M. M., & Quintela, A.C., 2005, Regionalization of hydrologic information: establishment of flow series at ungauged watersheds, *Water Resources Management III* (Carvoeiro, Portugal), pp. 11-20, Wessex Institute, WITPress, ISBN 1-84564-007-1, Southampton, Boston, WOS:000230111500002, doi:10.2495/WRM050021.
- Portela, M.M., & Quintela, A.C., 2006a, Preliminary design of the storage capacity of reservoirs based on a flow regionalization parameter, *BALWOIS 2006, International Conference on "Water Observation and Information System for Decision Support"*, 12 pp., Ohrid, Macedonia.
- Portela, M.M. & Quintela, A.C., 2006b, Estimação em Portugal Continental de escoamentos e de capacidades úteis de albufeiras de regularização na ausência de informação, *Recursos Hídricos*, Vol 27(2), pp. 7-18, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Número Temático: Hidrologia e Modelação Hidrológica, ISSN 0870-1741, Lisboa.
- Quintela, A.C., 1967, *Recursos de águas superficiais em Portugal Continental*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Quintela, A.C., & Portela, M.M., 2002, A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica, *Recursos Hídricos*, Vol. 23 (2), pp. 7-22, Edição comemorativa dos 25 Anos da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), ISSN 0870-1741, Lisboa.

- Razavi, T., & Coulibaly, P., 2013, Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods, *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958–975, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690.
- Ribeiro, P.J.S.F., 1996, *Dimensionamento do volume útil de albufeiras*. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, IST/UTL, Lisboa.
- Santos, E.G., 1983, *Disaggregation modeling of hydrologic time series*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado (EUA), Tese de Doutoramento.
- Silva, A.T., 2010, *Design of the storage capacity of artificial reservoirs*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, IST/UTL, Lisboa.
- Silva, A.T. & Portela, M.M., 2010a, Estudo regional sobre o dimensionamento de volumes úteis de albufeiras em Portugal Continental, *XXIV Congresso LatinoAmericano de Hidráulica*, 14 pp., Punta del Este, Uruguay.
- Silva, A. & Portela, M.M., 2010b, Geração de séries sintéticas de escoamentos anuais e mensais. Aplicação extensiva a Portugal Continental, *Recursos Hídricos*, Vol. 31(2), pp. 27–42 Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Lisboa (disponível em <http://www.aprh.pt/rh/v31n2.html>).
- Silva, A.T. & Portela, M.M., 2012, Disaggregation modeling of monthly streamflows using a new approach of the method of fragments (Modèle de désagrégation des débits mensuels utilisant une nouvelle approche de la méthode des fragments), *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, Iss. 5:942–955, ISSN:0262-6667, WOS:000306111300008, doi:10.1080/02626667.2012.686695.
- Silva, A.T. & Portela, M.M., 2013, Stochastic Assessment of Reservoir Storage - Yield Relationships in Portugal: A Case Study, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 18(5), p. 567–575, ASCE, ISSN=1084-0699/2013/5-567-575/, WOS:000317420600009, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000650.
- Silva, M.M.P., 1996. *Modelo distribuído de simulação do escoamento superficial*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, IST/UTL, Lisboa.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S., Gupta, V., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiola, E., O'Connell, P., O'Kill, T., Pomeroy, J., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., Zehe, E., 2003, IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences, *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857–880.
- Svanidze, G.G., 1964, *Osnovy rascheta regulirovaniya rechnogo stoka metodom Monte-Karlo*. Izd. Akad. Nauk GSSR, Tbilisi (em Russo).
- Vogel, R., & Stedinger, J., 1987, Generalized storage-reliability-yield relationships, *Journal of Hydrology*, 89(3–4), 303–327.
- Wagener, T., & Wheeler, H. S., 2006, Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty, *Journal of Hydrology*, 320(1–2), 132–154.

