



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

ANÁLISE DOS EFEITOS DA OPERAÇÃO DE UMA CENTRAL HIDROELÉTRICA NA DISPONIBILIDADE DE HABITAT A JUSANTE

Aplicação da COSH-Tool

Leonor, CAETANO¹; António, PINHEIRO², Isabel, BOAVIDA³

¹ Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal,
leonor.caetano@tecnico.ulisboa.pt

² Professor catedrático, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa,
Portugal, antonio.pinheiro@tecnico.ulisboa.pt

³ Post-Doc, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal,
isabelboavida@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

A operação de um aproveitamento hidroelétrico em resposta às variações do equilíbrio produção/consumo de eletricidade pode gerar alterações rápidas e frequentes no caudal e na cota da superfície livre do curso de água a jusante. O fenómeno, designado por *hydropeaking*, tem consequências no ecossistema aquático, com especial incidência na fauna piscícola. Para implementar medidas de mitigação apropriadas, é fundamental caracterizar-se não só a magnitude, frequência e duração das referidas alterações do regime hidrológico, como também a sua respetiva influência no habitat. O presente estudo tem como principal objetivo a análise da operação de uma central hidroelétrica e o seu impacto no habitat piscícola de um rio mediterrâneo. O estudo, que analisa o habitat do barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei*) a jusante da barragem de Pracana, divide-se em duas partes: determinação da disponibilidade de habitat em função do caudal; e caracterização estatística das variações rápidas de caudal e cota da superfície livre. A modelação hidrodinâmica bidimensional do escoamento e do habitat foram realizadas com recurso ao modelo River2D. Aplicaram-se curvas de preferência de habitat para juvenis e adultos. A utilização do *software* COSH-Tool para a quantificação das referidas variações rápidas permitiu aferir a influência da introdução de um regime de caudais ecológicos nas mesmas. Adicionalmente avaliaram-se as limitações da aplicação da COSH-Tool a rios mediterrâneos. Os resultados fornecem informação sobre as condições de habitat, consoante o estágio de vida, e defendem a importância da utilização de modelos hidráulicos e de habitat em paralelo com a análise de séries hidrológicas.

Palavras-chave: *hydropeaking*, modelação de habitat, barbo ibérico, análise de séries hidrológicas, caudal ecológico, COSH-Tool.

Tema: 2- Água e energia ou 8 - Qualidade da água e dos ecossistemas

1. INTRODUÇÃO

Os aproveitamentos hidroelétricos em geral procuram garantir a produção através do armazenamento em albufeiras, permitindo assim uma significativa regularização dos caudais durante a estiagem (especialmente no caso dos grandes aproveitamentos). Este procedimento, vantajoso do ponto de vista da produção de energia e de outras utilizações de água, acarreta, no entanto, impactos ao nível do ecossistema ambiental.

As solicitações a que os aproveitamentos hidroelétricos podem estar sujeitos quer em resposta às variações do diagrama de carga em cada momento (variação do consumo) quer às variações da produção no próprio sistema electroprodutor, podem determinar a ocorrência de alterações rápidas no caudal a jusante das centrais. Este regime de escoamento é habitualmente designado por *hydropеaking* (Moog, 1993; Charmasson e Zinke, 2011; Meile et al., 2011).

Para implementar medidas de mitigação apropriadas, é fundamental caracterizar-se não só a magnitude, frequência e duração das referidas alterações do regime hidrológico, como também a respetiva influência no ecossistema aquático. Zolezzi et al. (2010) descrevem um método para identificar eventos de pico baseado na definição de limites para a taxa de variação da cota da superfície livre. Este procedimento foi incorporado na ferramenta computacional utilizada no presente estudo - a COSH-Tool (Sauterleute e Charmasson, 2014), desenvolvida com o objetivo de identificar e quantificar as variações rápidas de caudal e cota da superfície livre de forma possibilitar a avaliação dos impactos no ecossistema fluvial resultantes do *hydropеaking*. A maioria dos estudos sobre *hydropеaking* incide na variabilidade do escoamento a uma escala diária, sazonal, ou ainda a escalas superiores. No entanto, é a análise a curto prazo (escala sub-diária), que possibilita a compreensão dos efeitos do *hydropеaking* nas espécies aquáticas (Alonso et al., 2017; Zimmerman et al., 2010). Note-se que têm sido propostos poucos índices para descrever as variações do escoamento sub-diárias. Neste contexto, Sauterleute e Charmasson (2014), Bevelhimer et al. (2015) e Bejarano et al. (2017) desenvolveram um conjunto de índices para quantificar a magnitude, a frequência e a rapidez dessas variações a uma escala de 15 a 60 min, capaz de representar os sucessivos arranque e paragens das turbinas.

O principal objetivo do presente trabalho consiste na caracterização dos impactos do *hydropеaking* no habitat do barbo ibérico num rio mediterrâneo. Numa primeira fase, efetuou-se a modelação hidrodinâmica bidimensional de um trecho a jusante da central objeto de estudo, de forma a obter a disponibilidade de habitat piscícola em função do caudal. Posteriormente, aplicou-se o *software* COSH-Tool à série de caudais turbinados e descarregados de modo a detetar e quantificar as variações rápidas de caudal e cota da superfície livre no trecho, para um período de 10 anos. Ainda no âmbito deste estudo, analisou-se o impacto da manutenção de um regime de caudais ecológicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Local de estudo

A área de estudo situa-se no rio Ocreza (bacia hidrográfica: 1410 km²; caudal modular: 16,7 m³/s) um dos maiores afluentes da margem direita do rio Tejo, no centro-leste de Portugal. O clima da região é mediterrânico, com mais de 80% de precipitação a ocorrer entre outubro e abril, e um período com caudais reduzidos ou mesmo nulos entre julho e setembro, o que resulta num conjunto isolado de poças no leito do rio.

O aproveitamento hidroelétrico de Pracana localiza-se imediatamente a jusante da confluência da ribeira de Pracana com o rio Ocreza, em Envendos, concelho de Mação. A central de Pracana está equipada com 3 turbinas Francis de eixo vertical sendo a sua potência nominal global de 41 MW. O caudal máximo turbinável total é de 88 m³/s.

O trecho analisado localiza-se imediatamente a jusante da central hidroelétrica de Pracana e a sua extensão é de aproximadamente 107 m e a largura média de 20 m (39°33'50.55"N; 7°48'55,62"W). O leito do rio, que corre num vale aberto, é dominado por xistos e depósitos aluviais. A jusante da barragem verifica-se que o rio é morfologicamente uniforme, com pouca diversidade de habitat, margens lineares instáveis, vegetação ocasional, blocos de rocha e detritos de madeira que originam zonas de abrigo.

A composição do substrato foi avaliada visualmente com recurso à escala modificada de Wentworth (Bovee et al., 1998): [(1) Matéria orgânica; (2) silte, 1–2 mm; (3) areia, 2–5 mm; (4) cascalho, 5–25 mm; (5) seixo, 25–50 mm; (6) calhaus rolados, 50–150 mm; (7) blocos, >150 mm; and (8) rocha]. Do substrato presente no trecho, salienta-se a existência de seixos, calhaus rolados e blocos.

2.2. Recolha de dados

A topografia do leito do rio foi obtida com recurso a uma estação total e a um Sistema de Posicionamento Global (GPS). Foram utilizadas medições hidráulicas (i.e., velocidade e profundidade) de 3 secções transversais e valores de caudal determinados com base na velocidade e nas áreas de cada secção transversal.

As curvas de preferência para o barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei*) consideradas foram determinadas para o rio Ocreza e são referentes à Primavera (Boavida et al., 2015). O estágio de vida, juvenil ou adulto, é determinado pelo comprimento do peixe, respetivamente se inferior ou superior a 10 cm.

2.3. Modelação hidrodinâmica e de habitat

A modelação hidrodinâmica bidimensional do escoamento e a modelação do habitat foram realizadas com recurso ao modelo River2D (Steffler, 2000) de elementos finitos. O modelo foi calibrado para um caudal de 0.7m³/s ajustando a malha de elementos finitos e a rugosidade absoluta do leito (k_s). As simulações hidrodinâmicas foram realizadas em regime permanente para uma gama de caudais entre 0.50 e 90 m³/s. Para determinar as cotas da

superfície livre na fronteira de jusante para os diferentes caudais a simular, foi determinada a curva de vazão com recurso ao HecRAS.

A componente de modelação de habitat do River2D integra os dados de preferência biológica das espécies piscícolas com os outputs do modelo (i.e., profundidade, velocidade e substrato) e baseia-se no cálculo da Superfície Ponderada Útil (Weighted Usable Area, WUA) (Stalnaker et al., 1995). Para determinar o índice de adequação de habitat (Combined Suitability Index, CSI) os índices de preferência de velocidade (Velocity Suitability Index, VSI), profundidade (Depth Suitability Index, DSI), e substrato (Channel Index Suitability Index, CISI) foram multiplicados por se considerar que as três variáveis têm a mesma importância (Steffler and Blackburn, 2002):

$$CSI = VSI \times DSI \times CISI \quad (1)$$

A WUA (m²) total - i.e., a área que pode potencialmente ser utilizada por uma determinada espécie e estágio de vida, é determinada multiplicando a área de cada célula do modelo pelo respetivo CSI:

$$WUA = \sum_{i=1}^i CSI_i \times A_i = f(Q) \quad (2)$$

Os resultados da modelação de habitat para a gama de caudais considerada (0.50 a 90 m³/s) permitiram a definição da curva de WUA, que representa a área de habitat disponível em função do caudal, e ainda obter mapas de adequabilidade de habitat para os dois estágios de vida (juvenil e adulto). Posteriormente determinou-se a relação entre a área de habitat disponível (WUA) resultante para cada caudal simulado e o valor máximo de WUA obtido, para cada estágio de vida. Para efeitos de estudo, considerou-se que os caudais que proporcionam áreas superiores a 80% do valor máximo de WUA constituem uma zona de confiança, em que não se geram condições de stress para a espécie (adaptado de Capra et al., 1995). Complementarmente considerou-se o limite de 50% do valor máximo de WUA para determinar o intervalo de caudais que proporciona condições de habitat particularmente adversas.

2.4. Análise de séries hidrológicas

De modo a quantificar as variações rápidas de caudal e da cota da superfície livre decorrentes da operação da central hidroelétrica aplicou-se o *software* COSH-Tool. Esta ferramenta permite determinar um conjunto de parâmetros que descrevem as variações rápidas de caudal ou de cota da superfície livre segundo as métricas: magnitude, escala temporal, e frequência. Adicionalmente analisou-se a disponibilidade habitat piscícola em função do caudal para o período em estudo.

A COSH-Tool foi aplicada à série de caudais Q [m³/s] e cotas da superfície livre H [m] do rio Ocreza, a jusante da barragem de Pracana. Os dados de base são os caudais médios horários turbinados e descarregados medidos na estação hidrométrica 16k/01A – Albufeira da Pracana (EDP). São referentes a um período de 10 anos, de 1 de Outubro de 2001 a 30 de Setembro de 2011. De forma a analisar o regime hidrológico no local em estudo os caudais turbinados e descarregados foram somados, obtendo-se para cada registo horário um valor total de caudal. Os valores das cotas da superfície livre foram obtidos para cada

caudal da série de dados, pela curva de vazão estabelecida, considerando a sua aplicação viável face à proximidade com a zona de descarga do aproveitamento hidroelétrico.

Considerando uma série genérica $X(t)$, o procedimento de análise da COSH-Tool baseia-se na definição de um limite para a taxa de variação, \dot{X}_{th} , tendo em conta o *threshold* (th), de $X(t)$, permitindo assim a identificação e caracterização de eventos de pico isolados, distinguindo os aumentos rápidos (AR) e as diminuições rápidas (DR). Os eventos são classificados como AR e DR em função do sinal de $\dot{X}(t)$ podendo ser positivo ou negativo, respetivamente. O *software* disponibiliza uma descrição estatística dos parâmetros e uma representação através de diagramas de caixa, histogramas e gráficos das séries temporais. É possível realizar uma análise em função das condições de luz do dia (luz solar, crepúsculo ou escuridão) no momento da ocorrência dos picos. Quando a totalidade, ou apenas parte de um evento ocorre durante um período de crepúsculo o evento será considerado como “evento de crepúsculo”.

A análise acima descrita considera os caudais lançados pelo aproveitamento hidroelétrico de Pracana, que não contemplam qualquer regime de caudais ecológicos, sendo doravante designada por “Análise SE” (sem ecológico). Com o intuito de analisar a influência da implementação de um regime de caudais ecológicos na quantificação das variações rápidas de caudal e cota da superfície livre, procedeu-se a uma segunda análise, designada por “Análise CE” (com ecológico). As fases de preparação de dados de base e posterior análise efetuaram-se de forma análoga à análise anterior (sem consideração de caudal ecológico), de forma a possibilitar uma comparação entre as duas situações.

3. RESULTADOS

Na Figura 1 apresentam-se as curvas WUA obtidas para ambos os estágios de vida no trecho em estudo.

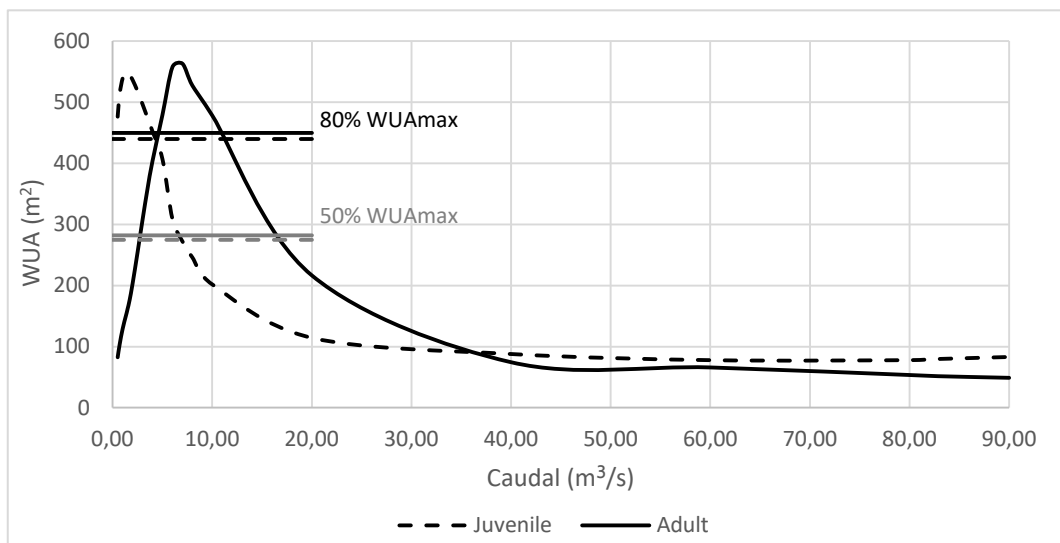


Figura 1. Curvas WUA em função do caudal, para barbos juvenis e adultos. Linhas a cinzento correspondem aos limites de 50% do valor máximo de WUA para juvenis (linha a tracejado) e adultos (linha contínua). Linhas a preto correspondem ao limite de 80% do valor máximo de WUA para os juvenis (linha a tracejado) e adultos (linha contínua).

O comportamento de ambas as curvas é semelhante; verifica-se um aumento inicial da disponibilidade de habitat com o aumento do caudal, até se atingir um valor máximo a partir do qual ocorre um decréscimo acentuado de habitat com o aumento de caudal. Para o estágio de vida juvenil atinge-se o máximo para um caudal de aproximadamente 1,4 m³/s, enquanto que para os adultos o valor de caudal que maximiza a WUA é cerca de 7 m³/s. O ponto de inflexão da curva corresponde a uma disponibilidade de habitat de 550 m² e de 563 m² para juvenis e adultos, respetivamente. De acordo com os resultados obtidos, caudais mais elevados (e.g., 83 m³/s) implicam uma redução de WUA para ambos os estágios de vida, sendo este valor aproximadamente 2% da área molhada.

Os mapas de adequabilidade de habitat apresentados na Figura 2 revelaram que para um caudal de 1,4 m³/s os locais de habitat adequado aos juvenis estão mais uniformemente distribuídos ao longo do canal face aos dos adultos, em que se verifica uma preferência por zonas mais centrais do leito.

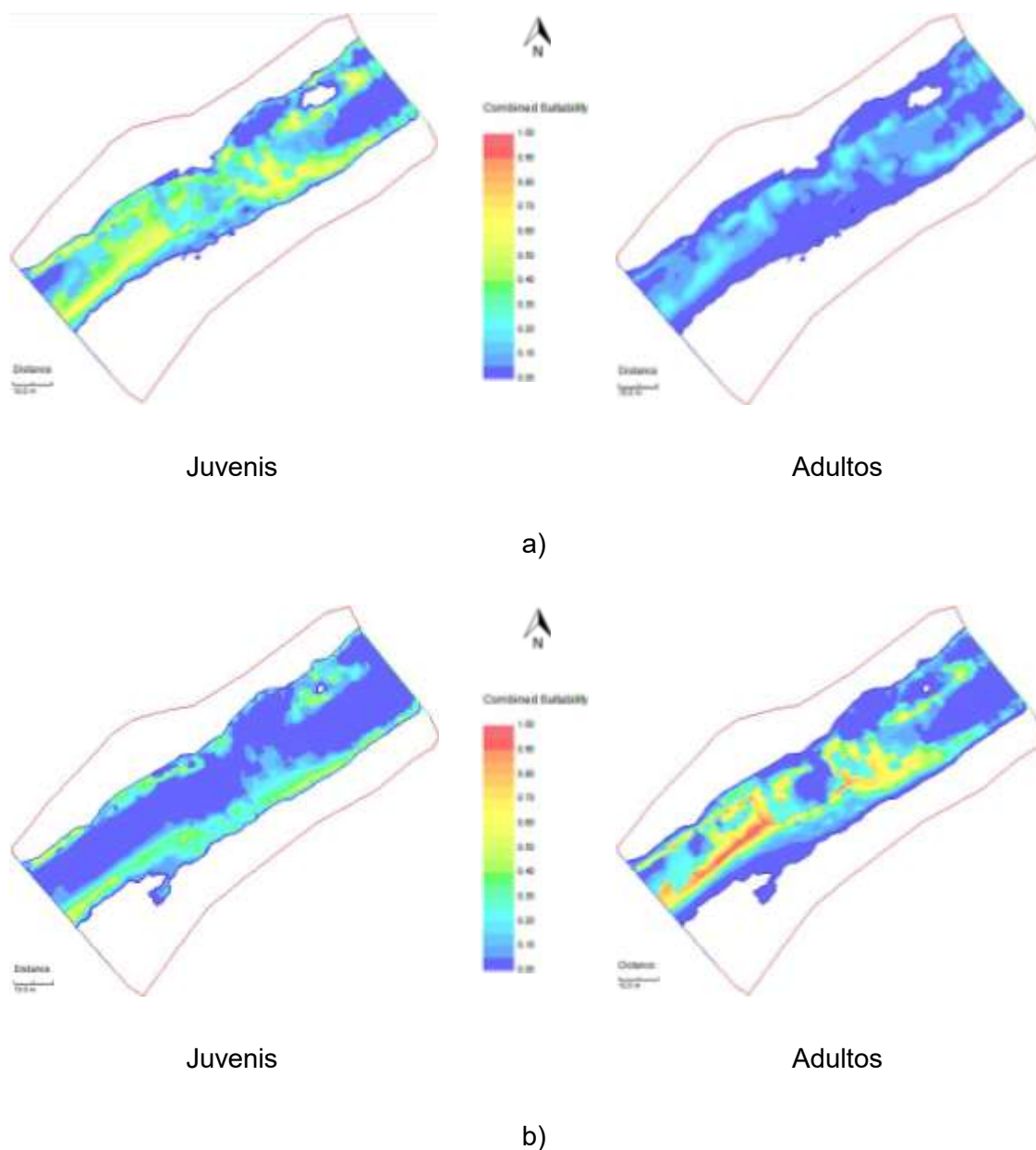


Figura 2. Mapas de disponibilidade de habitat em termos de CSI (Combined Suitability Index) para os juvenis e adultos e para os caudais a) 1,4 m³/s, e b) 7,0 m³/s.

Considerando a identificação de picos de caudal através da aplicação da COSH-Tool, os valores dos parâmetros T e p foram equivalentes aos usados por Sauterleute e Charmasson (2014), nomeadamente 2h e 0,2 para T e p , respetivamente. O valor do parâmetro d , que limita a duração de um evento de pico foi considerado 120 min em vez dos 45 min considerados por Sauterleute e Charmasson (2014) devido à diferença na resolução da série de dados de caudal (60 e 15 min, respetivamente). Foi considerado o valor de 3 para a média móvel a ser aplicada à série de dados horários e os valores de *threshold* para o

caudal e para a cota da superfície livre, designadamente c_{inc} and c_{dec} , foi considerado o valor de 0,06 para ambos.

Os resultados gerados pela COSH-Tool para a Análise SE indicam que em 21% dos dias da série de dados ocorrem variações rápidas (aumentos – AR; ou diminuições - DR). Para a referida análise, apresentam-se nas Tabelas 1 e 2 os resultados para o rácio de caudal, taxa média, máxima e percentis, de caudal e de cota da superfície livre, para eventos de AR e de DR, respetivamente. Os valores mais elevados de AR e DR, aproximadamente 80 picos, verificaram-se em 2003 e 2011. O menor número de AR (35) ocorreu em 2001 e no caso das DR (46) em 2007. Quando ocorrem eventos de pico, tipicamente verifica-se um por dia (18% dos dias num ano), e em alguns casos dois picos por dia (0,9% dos dias do ano). É bastante raro ocorrerem três picos num dia, sendo observáveis apenas em DR.

Tabela 1. Resultados para rácio de caudal, taxa média, máxima e percentis, de variação de caudal, e taxa média, máxima e percentis, de variação de cota da superfície livre, para eventos de AR.

Parâmetro	Rácio de caudal	Taxa média de Q	Taxa máxima de Q	Taxa média de H	Taxa máxima de H
Unidade	-	m ³ /s/h	m ³ /s/h	cm/h	cm/h
Mínimo	2.4	5.4	5.4	8.1	8.1
Média	3969.0	21.4	23.2	29.3	32.8
Mediana	6068.7	22.3	24.6	30.7	36.8
Percentil 90%	7474.0	24.9	25.9	37.4	39.1
Máximo	8168.7	26.4	27.2	39.8	45.5

Tabela 2. Resultados para rácio de caudal, taxa média, máxima e percentis, de variação de caudal, e taxa média, máxima e percentis, de variação de cota da superfície livre, para eventos de DR.

Parâmetro	Rácio de caudal	Taxa média de Q	Taxa máxima de Q	Taxa média de H	Taxa máxima de H
Unidade	-	m ³ /s/h	m ³ /s/h	cm/h	cm/h
Mínimo	1.3	1.7	1.7	2.8	2.8
Média	4753.5	17.4	20.1	26.6	31.5
Mediana	6254.7	18.8	23.7	28.3	36.3
Percentil 90%	7655.9	24.9	25.8	37.7	39.1
Máximo	8211.3	27.1	27.4	40.7	41.0

Comparativamente à Análise SE, a Análise CE originou uma diminuição de 10% da percentagem de dias da série de dados com variações rápidas (AR ou DR) e uma marcada diminuição do número de picos ao longo dos anos. O valor mínimo de eventos por ano para AR e DR diminuiu, respetivamente, 91 e 41%. Em termos de valores médios obteve-se uma diminuição de 22% para AR e 11% para DR. Deixou ainda de se verificar registos de dias com 3 diminuições rápidas. A distribuição mensal dos eventos de pico, embora revele a diminuição dos mesmos, manteve a mesma tendência face à primeira análise. O mesmo se

registou na distribuição segundo a hora do dia, onde não se verificam alterações muito significativas.

Relativamente às reduções nas taxas médias e máximas de cota da superfície livre, os valores médios apresentam, respetivamente, reduções de 13 e 16% para AR, e de 19 e 22% no caso das DR.

As maiores diferenças ao nível das condições de luz são referentes aos AR, com a Análise CE a apresentar diferença relativa de +5% de eventos durante a luz solar, -11% durante o crepúsculo e +37% durante a escuridão, face à Análise SE. Nas DR, a luz solar e crepúsculo apresentam diferenças relativas de +2% e +8%, e verificam-se -2% de eventos ocorridos durante a escuridão.

Com a introdução do regime de caudais ecológicos verifica-se um aumento das condições de habitat para o barbo. No caso dos juvenis é notória a diminuição, na ordem dos 70%, dos períodos que originam valores de WUA inferiores a 50% do valor de WUA máximo. Este regime implica ainda um aumento significativo dos períodos que ultrapassam o limite de 80% do valor de WUA máximo (Figura 3).

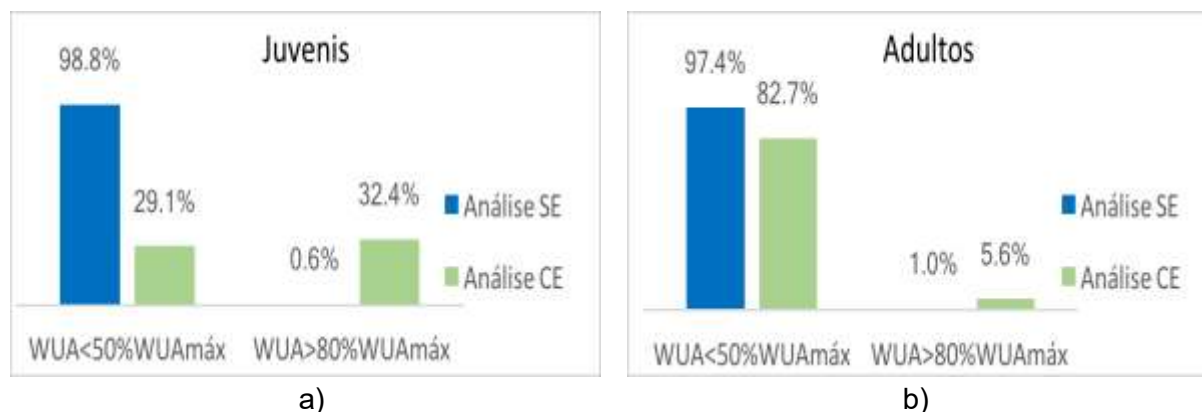


Figura 3. Frações (%) da série de caudais com WUA superior a 80% do valor máximo de WUA e inferior a 50% do valor máximo de WUA, para Análise SE e Análise CE: a) barbo juvenil; e b) barbo adulto.

4. DISCUSSÃO

Os resultados do estudo indicam que os juvenis são mais suscetíveis ao aumento de caudal do que os adultos, que devido à maior capacidade natatória dispõem de uma quantidade de área habitável superior no troço em estudo. Adicionalmente verifica-se que a introdução de um regime de caudais ecológicos implica uma melhoria das condições de habitat do barbo. A alteração mais expressiva verifica-se para os juvenis, com uma redução de 70% dos períodos que proporcionam uma WUA inferior a 50% da máxima WUA possível. A introdução do regime de caudais ecológicos reduziu em 21% a média anual de dias afetados por *hydropedaking*, o que representa um benefício do ponto de vista de redução do impacto

ambiental destes empreendimentos. Refira-se ainda que a subida do nível médio da cota da superfície livre, do valor médio de caudal, e a redução das taxas médias e máximas de diminuição da cota da superfície livre, são efeitos que reduzem o risco de *stranding*, e como tal são benéficos para a espécie piscícola (Saltveit et al., 2001; Bradford, 1997).

A aplicação da COSH-Tool tem diversas vantagens como base para a análise da operação de uma central hidroelétrica e considera-se que foi eficaz na caracterização dos eventos de pico. Pode constituir uma fonte de informação para adequar as operações da central de acordo com o padrão comportamental diário e sazonal das espécies piscícolas. No entanto, tendo sido desenvolvido na Noruega, o *software* baseia-se em pressupostos que não são totalmente adequados para casos em que seja aplicado a outras regiões com regimes hidrológicos marcadamente distintos (Gasith e Resh, 1999). Nomeadamente quando essa distinção se traduz por uma reduzida disponibilidade hídrica característica dos rios mediterrâneos. Neste contexto, verificou-se que a aplicação da COSH-Tool ao tratamento de séries de caudais e cota da superfície livre de um rio com características mediterrâneas carece de adaptação e de uma análise crítica dos resultados. No processo de preparação da série de dados procede-se, por interpolação, ao preenchimento de valores em omissão e à substituição de *outliers*. Contudo, valores nulos são também interpolados linearmente até ao valor seguinte positivo, o que pode alterar significativamente o comportamento da série. Destaca-se assim uma limitação do *software* particularmente notável em determinadas variáveis estatísticas resultantes, como o rácio de caudais. Assim, no presente estudo substituiu-se, previamente à preparação de dados de base, todos os registos nulos por 0,01 m³/s (valor positivo próximo de 0). Desta forma preservou-se o comportamento real da série de dados. Refira-se ainda que a análise segundo as condições de luz em países com uma duração de crepúsculo tão pouco expressiva, como é o caso de Portugal, tem limitações.

Por último, a magnitude dos parâmetros que caracterizam o *hydropeaking* depende de fatores como a morfologia do rio (Hauer et al., 2013), e a resolução temporal da série (Meile et al., 2010). Consequentemente, regimes idênticos de operação de uma central hidroelétrica inserida em diferentes cursos de água podem resultar em diferentes magnitudes dos respetivos parâmetros. A morfologia do rio influencia o retardamento e a atenuação dos efeitos das variações de caudal e cota da superfície livre ao longo da sua propagação para jusante (Hauer et al., 2017).

AGRADECIMENTOS

O estudo faz parte do projecto FIThydro (No 727830) financiado pela European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Isabel Boavida beneficiou de uma bolsa pós-doutoral FCT (SFRH/BPD/90832/2012).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, C. et al., 2017. A graphical approach to characterize sub-daily flow regimes and evaluate its alterations due to hydropeaking. *Science of the Total Environment*, 574, pp.532–543. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.087>.
- Bejarano, M.D. et al., 2017. Charactering effects of hydropower plants on sub-day flow regimes. *Journal of Hydrology*, 550, pp.186–200.
- Bevelhimer, M.S., Mcmanamay, R.A. & Connor, B.O., 2015. Characterizing sub-daily flow regimes: implications of hydrologic resolution on ecohydrology studies. *River research and applications*, 31(7), pp.867–879.
- Boavida, I. et al., 2015. Barbel habitat alterations due to hydropeaking. *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(2), pp.237–247.
- Bovee, K.D. et al., 1998. Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. *U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report*, p.131.
- Bradford, M.J., 1997. An experimental study of stranding of juvenile salmonids on gravel bars and in sidechannels during rapid flow decreases. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13(5), pp.395–401. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/%28SICI%291099-1646%28199709/10%2913%3A5%3C395%3A%3AAID-RRR464%3E3.0.CO%3B2-L>.
- Capra, H., Breil, P. & Souchon, Y., 1995. A new tool to interpret magnitude and duration of fish habitat variations. *Regulated Rivers Research & Management*, 10(March), pp.281–289.
- Charmasson, J. & Zinke, P., 2011. Mitigation measures against hydropeaking effects. SINTEF Energy Research, 1st version, pp. 51.
- Gasith, A. & Resh, V.H., 1999. STREAMS IN MEDITERRANEAN CLIMATE REGIONS: Abiotic Influences and Biotic Responses to Predictable Seasonal Events. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30(1), pp.51–81.
- Hauer, C. et al., 2017. Longitudinal assessment of hydropeaking impacts on various scales for an improved process understanding and the design of mitigation measures. *Science of the Total Environment*, 575, pp.1503–1514.
- Hauer, C., Schober, B. & Habersack, H., 2013. Impact analysis of river morphology and roughness variability on hydropeaking based on numerical modelling. *Hydrological Processes*, 27(15), pp.2209–2224.
- Meile, T., Boillat, J.-L. & Schleiss, A.J., 2010. Hydropeaking indicators for characterization of the Upper-Rhone River in Switzerland. *Aquatic Sciences*, 73(1), pp.171–182.
- Meile, T., Boillat, J.L. & Schleiss, A., 2011. Hydropeaking indicators for characterization of the Upper-Rhone River in Switzerland. *Aquat. Sci.*, 73, pp.171–182.
- Moog, O., 1993. Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers Research & Management*, 8(October 1991), pp.5–14.
- Saltveit, S.J. et al., 2001. Field experiments on stranding in juvenile Atlantic salmon (*Salmo*

- salar) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. *Regulated Rivers: Research & Management*, (17), pp.609–622.
- Sauterleute, J.F. & Charmasson, J., 2014. Environmental Modelling & Software A computational tool for the characterisation of rapid fluctuations in flow and stage in rivers caused by hydropeaking. , 55, pp.266–278.
- Stalnaker, C.B. et al., 1995. *The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM Biological.*,
- Steffler, P., 2000. Software River2D. Two Dimensional Depth Averaged Finite Element Hydrodynamic Model. University of Alberta, Canada.
- Steffler, P. & Blackburn, J., 2002. River2D Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat Introduction to Depth Averaged Modeling and User ' s Manual.
- Zimmerman, J.K.H. et al., 2010. Determining the effects of dams on subdaily variation in river flows at a whole- basin scale. *River research and applications*, 26, pp.1246–1260.
- Zolezzi, G. et al., 2010. Thermopeaking in Alpine streams : event characterization and time scales. *Ecohydrology*, 4, pp.564–576.