SELEÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO EM PORTUGAL CONTINENTAL

SELECTION OF HYDROLOGIC PARAMETERS FOR ASSESSING CHANGES IN THE FLOW REGIME IN CONTINENTAL PORTUGAL

Fernanda FIÚZA
Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

Rodrigo Proença de OLIVEIRA
Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

Maria Teresa FERREIRA
Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal

RESUMO: A utilização de indicadores para caracterizar o regime hidrológico de um sistema fluvial permite avaliar o grau de alteração desse regime em resultado da construção de barragens ou de alterações climáticas. Em conjunto com as informações sobre o impacto da alteração do regime de caudais nas condições de habitat, é também útil para definir condições de escoamento que assegurem o bom estado ecológico do sistema fluvial. Sendo elevado o número de parâmetros hidrológicos que é possível adotar, apresenta-se uma metodologia que identifica os parâmetros mais adequados para descrever as principais características do regime hidrológico e a sua eventual alteração. O presente artigo analisa 66 parâmetros hidrológicos, calculando-os para 36 estações hidrométricas com mais de 15 anos de registo em regime natural. Recorrendo a uma análise de componentes principais reconhecem-se padrões de redundância entre os diferentes parâmetros e apresentam-se recomendações para a seleção de um conjunto parcimonioso de parâmetros que caracteriza adequadamente o regime hidrológico. Com base neste conjunto é possível definir indicadores de alteração hidrológica que avaliam o grau de alteração do regime de escoamentos.

Palavras-chave: caudal ambiental, ecossistema fluvial, indicadores de alteração hidrológica, parâmetros hidrológicos, regime natural, regime modificado.

ABSTRACT: The use of indicators to characterize the hydrological regime of a river system allows evaluating the degree of alteration of that regime as a result of dam construction or climate change. Together with information about the impact of changing the flow regime in habitat conditions, it is also useful to define the flow conditions that ensure good ecological status of the river system. Being high the number of hydrological parameters that can be adopted, we present a methodology that identifies the most appropriate parameters to describe the main characteristics of the hydrological regime and its possible alteration. This article analyzes 66 hydrological parameters, measuring them for 36 gauging stations with more than 15 years of record in natural regime. Using a principal components analysis are recognized patterns of redundancy between the different parameters, and are presents recommendations for selecting a parsimonious set of parameters that adequately characterizes the hydrological regime. Based on this set it is possible to define indicators of hydrologic alteration that assess the degree of alteration of the flow regime.

Keywords: environmental flow, river ecosystem, indicators of hydrologic alteration, hydrological parameters, natural regime, modified regime.

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão decorrente da construção de barragens, alterações climáticas e aumento do consumo tem vindo a alterar o regime hidrológico de muitos cursos de água e a comprometer a preservação dos ecossistemas fluviais e a sua biodiversidade, sobretudo em regiões semiáridas. Estima-se que existam atualmente cerca de 45 000 grandes barragens em 140 países (World Commission on Dams, 2000) e 800 000 pequenas barragens em todo o mundo (McCully, 1996), sendo expectável que este número de barragens aumente consideravelmente num futuro próximo. O aumento da temperatura e a alteração do regime de precipitação resultante das alterações climáticas poderá também conduzir a alterações no regime hidrológico e desencadear transformações geomorfológicas e ecológicas nos rios e seus ecossistemas (Poff e Ward, 1989; Walker *et al.*, 1995; Richter *et al.*, 1996).

A utilização de parâmetros para caracterizar um dado regime hidrológico tem, por isso, interesse para quantificar as alterações no regime de caudais e apoiar o estudo da relação entre a alteração hidrológica e a qualidade ecológica nas massas de água. Existe também um claro potencial na utilização destes parâmetros para definir o regime de caudais que assegurem a qualidade do ecossistema fluvial (Arthington *et al.*, 2010; Poff *et al.*, 2010; Belmar *et al.*, 2011; Alexandre *et al.*, 2012; Martins, 2012).

Em Portugal Continental, não é consensual o entendimento sobre quais os parâmetros mais relevantes para avaliar e quantificar a alteração do regime hidrológico. Os estudos existentes focam-se principalmente no desenvolvimento de metodologias para avaliação de caudais ecológicos (Alves *et al.*, 2002; Portela, 2006; Marmelo, 2007), utilizando parâmetros que não resultaram de um processo de seleção abrangente e sistemático.

O presente artigo pretende identificar um conjunto adequado de parâmetros hidrológicos que caracterizam o regime hidrológico (Poff e Ward, 1989; Walker *et al.*, 1995; Richter *et al.*, 1996) e que podem ser utilizados para avaliar e definir regimes de caudais ecológicos que minimizem os impactos das pressões nos ecossistemas fluviais. Através da análise de registos de séries cronológicas de caudais médios diários (QMD) identificam-se os parâmetros hidrológicos relevantes e não redundantes que caracterizam o regime hidrológico de Portugal Continental, e que podem constituir a base de Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH). Espera-se que este estudo possa auxiliar a justificação de decisões por parte das entidades gestoras de recursos hídricos que visem preservar, restaurar e promover a biodiversidade e funcionalidade dos ecossistemas fluviais.

2. METODOLOGIA

2.1. Estações hidrométricas consideradas

Analisaram-se as estações hidrométricas com mais de 15 anos de registo de caudal médio diário em regime natural, assumindo-se que registos desta dimensão asseguram a representatividade dos cálculos das estatísticas das séries (Gan *et al.*, 1991). Do processo de seleção resultaram 36 estações hidrométricas localizadas em sete das oito Regiões Hidrográficas de Portugal Continental (Lei n.º 58/2005) (Figura 1, Tabela 1). A exceção é a Região Hidrográfica 1 (Minho e Lima), onde não foi possível identificar nenhuma estação com mais de 15 anos de registo em regime natural.

Os valores de caudal médio diário foram obtidos na base de dados do Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNIRH) (http://snirh.pt/). A dimensão do registo das estações consideradas varia entre 15 a 60 anos, com valores entre 1921/22 a 2005/06. O período entre 1959/60 e 1985/86 é aquele onde se concentram o maior número de valores.

Oito das 14 estações apresentam registos com algumas falhas que foram preenchidas por interpolação sempre que a sua duração fosse de apenas um dia por ano. As falhas mais longas, que ocorrem em seis das oito estações acima referidas, não foram preenchidas, o que resultou na exclusão dos anos com falhas. No entanto, estas seis estações possuem registos com mais de 19 anos, pelo que esta decisão não teve impacto significativo no conjunto de dados analisados.

As 36 estações consideradas distribuem-se da seguinte forma considerando-se a tipologia de rios resultante da aplicação do Sistema B do artigo 5º da Diretiva-Quadro-Água (INAG I.P., 2008). Existem 23 estações que pertencem à região Norte, em concreto aos rios do Norte de pequena, média-grande dimensão (6), rios do Alto Douro de média dimensão (15), rios do Alto Douro de pequena dimensão (2). As 13 estações que pertencem à região Sul estão tipificadas como rios do sul de média-grande dimensão (8), depósitos sedimentares do Tejo e Sado (4), e calcários do Algarve (1). A Tabela 1 identifica cada uma destas estações.

Este artigo foi apresentado no 12º Congresso da Água e selecionado para submissão e possível publicação na *Recursos Hídricos*, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em 30 de maio de 2014. Este artigo é parte integrante da Revista *Recursos Hídricos* , Vol. 35, Nº 2, 5-18, novembro de 2014.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh35n2-1

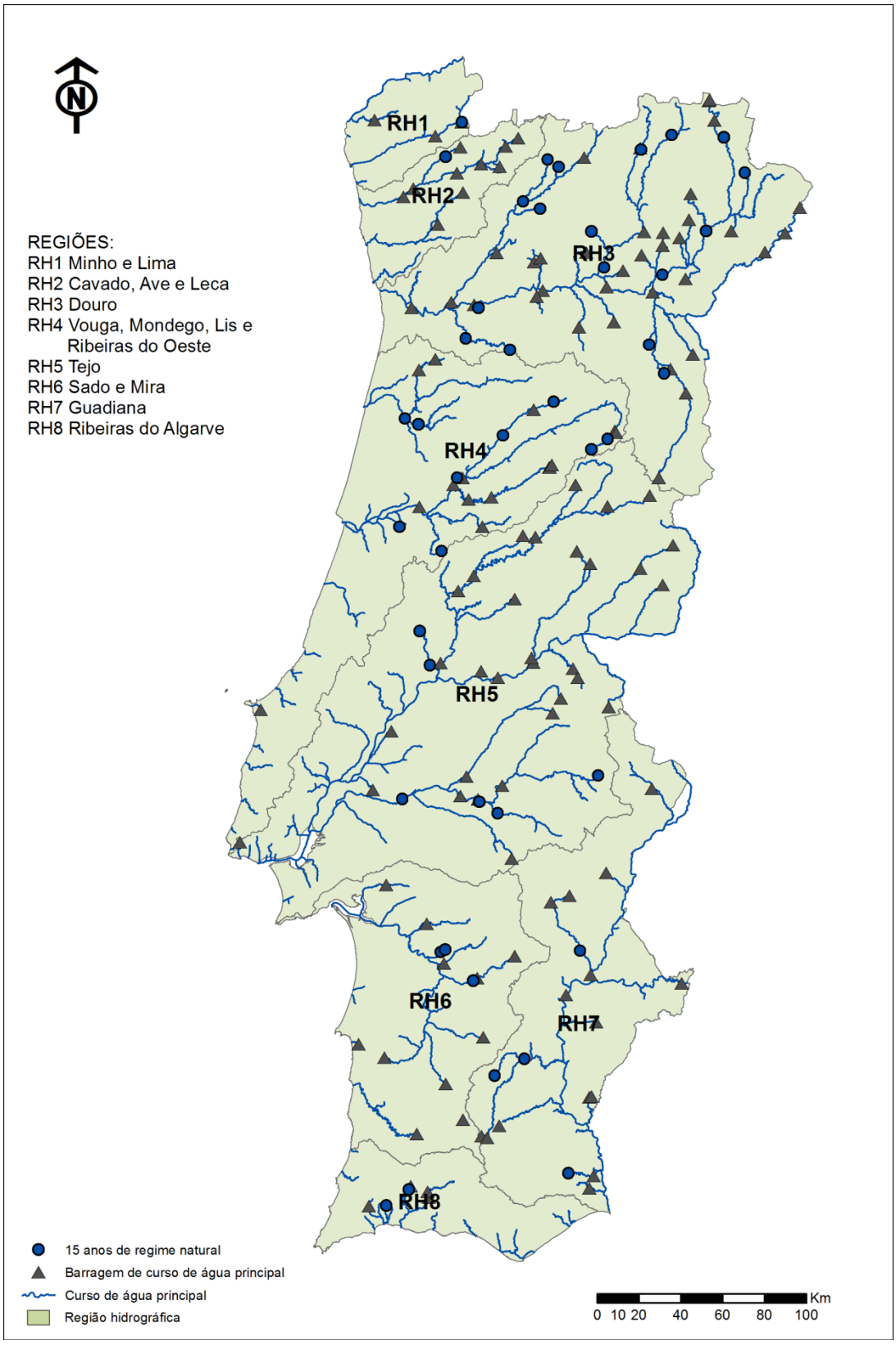

Figura 1 - Localização das 36 EH com mais de 15 anos de registo representativas das sete regiões hidrográficas em Portugal Continental em regime natural (adaptado SNIRH, 2014).

Tabela 1 - Designação das EH e tipos de rios de Portugal Continental. N1 - rios do Norte de pequena, média-grande dimensão, N2 - rios do Alto Douro de média dimensão, N3 - rios do Alto Douro de pequena dimensão, S1 - rios do Sul de pequena, média-grande dimensão, S3 - depósitos sedimentares do Tejo e Sado e S4 - calcários do Algarve (baseado no art.º. 5 da DQA. INAG IP, 2008), C – Cávado, D – Douro, V – Vouga, M – Mondego, T – Tejo, G – Guadiana, S – Sado, A- Arade e RA – Ribeiras do Algarve.

Número da Estação Hidrométrica	Estação hidrométrica	Massa de água	Bacia hidrográfica	Tipos de rios	Região	Número de anos regime natural	Número de anos regime modificado
1	Covas	Rio Homem	C	N1	Norte	16	33
2	Boticas	Rio Terva	D	N2	Norte	34	-
3	Cabriz	Rib. de Sampaio	D	N3	Norte	36	-
4	Castanheiro	Rio Tua	D	N2	Norte	34	-
5	Castro Daire	Rio Paiva	D	N2	Norte	49	-
6	Fragas da Torre	Rio Paiva	D	N2	Norte	48	-
7	Cunhas	Rio Beça	D	N2	Norte	57	-
8	Vale Giestoso	Rio Beça	D	N2	Norte	49	-
9	Murça	Rio Tinhela	D	N2	Norte	34	-
10	Ponte Figueira	Rib. das Cabras	D	N2	Norte	21	-
11	Ponte Pinelo	Rib. do Rio Macas	D	N2	Norte	37	-
12	Gimonde	Rio Sabor	D	N2	Norte	22	-
13	Ponte Remondes	Rio Sabor	D	N2	Norte	15	-
14	Qta das Laranjeiras	Rio Sabor	D	N2	Norte	28	-
15	Rebordelo	Rio Rabaçal	D	N2	Norte	48	-
16	Sta Marta do Alvão	Rio Louredo	D	N3	Norte	51	-
17	Vale Trevo	Rib. de Massueime	D	N2	Norte	47	-
18	Vinhais	Rio Tuela	D	N2	Norte	39	-
19	Ponte Águeda	Rio Águeda	V	N1	Norte	51	-
20	Ponte Requeixo	Rio Águeda	V	N1	Norte	47	-
21	Almaça	Rib. de Mortagua	M	N1	Norte	18	-
22	Caldas de São Gemil	Rio Dão	M	N1	Norte	30	-
23	Ponte Sta Clara Dão*	Rio Dão	M	N1	Norte	60	-
24	Agroal*	Rio Nabão	T	S3	Sul	19	-
25	Cabeção	Rib. da Raia	T	S1	Sul	19	-
26	Monforte	Rib. Grande	T	S1	Sul	27	-
27	Pavia	Rib. de Tera	T	S1	Sul	31	-
28	Ponte Coruche	Rio Sorraia	T	S3	Sul	38	-
29	Amieira*	Rio Degebe	G	S1	Sul	34	-
30	Entradas	Rio Cobres	G	S1	Sul	29	-
31	Monte da Ponte*	Rio Cobres	G	S1	Sul	33	-
32	Monte dos Fortes	Rib. de Odeleite	G	S1	Sul	33	-
33	São Domingos (Algalé)	Rib. de Algalé	S	S3	Sul	25	-
34	Vale da Ursa	Rib. da Ursa	S	S3	Sul	31	-
35	Monte dos Pachecos*	Rib. de Odelouca	A	S1	Sul	35	-
36	Vidigal*	Rib. do Farelo	RA	S4	Sul	40	-

Nota: o sinal (*) indica que as EH apresentam dois a sete dias consecutivos com falhas.

Entre as 36 estações selecionadas foi possível identificar uma estação que regista o impacto de aproveitamentos hidráulicos construídos a montante. O registo desta estação pode ser dividido em duas subséries: uma em regime natural e outra em regime modificado estacionário. Tratam-se da estação hidrométrica de Covas. A EH Covas situa-se no rio Homem e apresenta 16 anos em regime natural e 33 anos em regime modificado estacionário, resultado da construção da barragem Vilarinho das Furnas em 1972, que apresenta um coeficiente de regularização de 0.41. O registo desta estação está compreendido entre os anos de 1955/56 a 2003/04.

2.2. Parâmetros hidrológicos analisados

Na identificação dos parâmetros hidrológicos mais adequados para caracterizar o regime de escoamento dos cursos de água considerou-se inicialmente um conjunto de 66 parâmetros considerados biologicamente relevantes (Mosley, 1981; Haines *et al.*, 1988), calculados pelo programa "Índices de Alteración Hidrológica en Ríos" (IAHRIS 2.2), desenvolvido por Martínez *et al.* (2010) .

Os 66 parâmetros podem ser agrupados em cinco componentes que descrevem características distintas do regime de escoamento, nomeadamente magnitude (10), frequência (2), taxa de alteração (10), sazonalidade (30) e duração (14) (Poff e Ward, 1989; Richter *et al.*,1996) (Tabela 2). A magnitude avalia o caudal disponível no ecossistema fluvial numa determinada situação. A frequência indica a recorrência dessas situações, característica que condiciona o ecossistema. A taxa de alteração indica a rapidez com que o caudal varia de uma situação para a outra, o que determina a capacidade de resposta do biota a essas variações. A sazonalidade indica em que época do ano certas situações tendem a ocorrer. Finalmente, a duração está associada ao tempo que uma determinada condição de caudal (e.g., cheias ou secas) se mantêm. A duração das condições insatisfatórias é inversamente proporcional à resiliência, isto é, capacidade de recuperação de diferentes espécies ao evento extremo (Figura 2) (Holling, 1973; Martínez *et al.*, 2010).

O código dos 66 parâmetros analisados inclui uma letra maiúscula, representando cada uma das cinco componentes (M - Magnitude, V – Taxa de alteração; F - Frequência, D - Duração; S – Sazonalidade), um número e um conjunto de letras minúsculas para caracterizar o ano hidrológico e o mês em análise (h - Húmido; m - Médio; s – Seco; o – outubro; n - novembro; d - dezembro; j – janeiro; f – fevereiro; m – março; a – abril; ma – maio; ju – junho; jul – julho; ag – agosto; s – setembro).

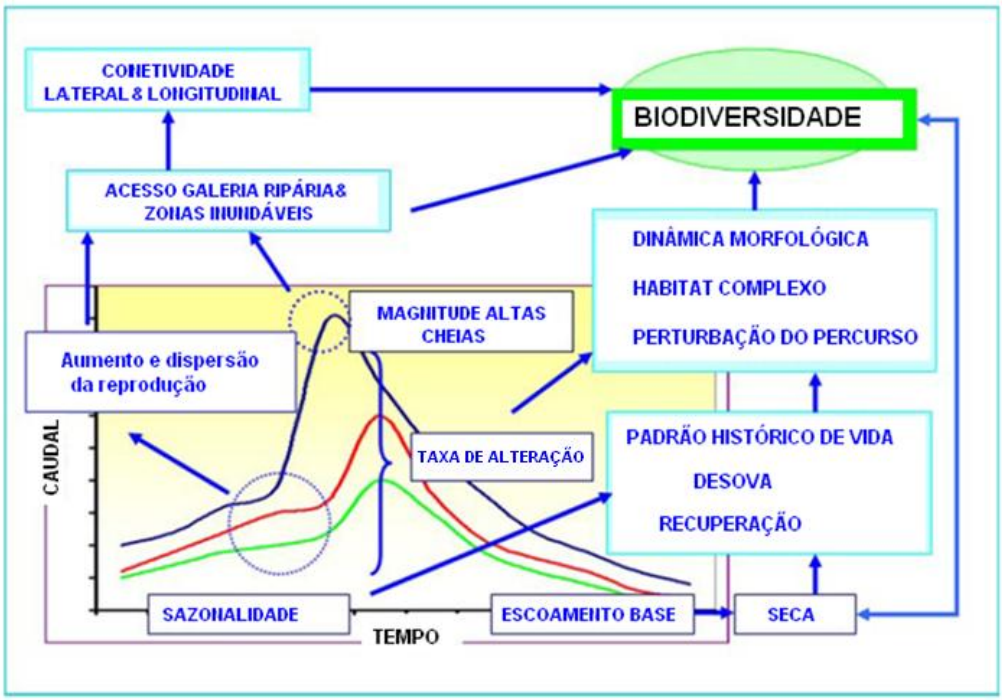

Figura 2 – Paradigma do regime natural (adaptado Bunn e Arthington, 2002).

Tabela 2 - Descrição dos 66 parâmetros hidrológicos do programa IAHRIS 2.2. M - Magnitude, V – Taxa de alteração; F - Frequência, D - Duração; S - Sazonalidade; h - Húmido; m - Médio; s - Seco.

Código Parâmetro	Parâmetro hidrológico	Unid.	Componente hidrológica
M1_h	Média do escoamento anual dos anos húmidos	hm^3	M
M1_m	Média do escoamento anual dos anos médios	hm^3	M
M1_s	Média do escoamento anual dos anos secos	hm^3	M
M1	Média do escoamento anual	hm^3	M
V2_h	Diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo dos anos húmidos	hm^3	V
V2_m	Diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo dos anos médios	hm^3	V
V2_s	Diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo dos anos secos	hm^3	V
V2	Diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo de todos os anos	hm^3	V
S3_h	Meses onde ocorrem os valores caudal máximo e mínimo nos anos húmidos	Mês	S[1]
S3_m	Meses onde ocorrem os valores de caudal máximo e mínimo nos anos médios	Mês	S[1]
S3_s	Meses onde ocorrem os valores de caudal máximo e mínimo nos anos secos	Mês	S[1]
V4_10	Caudal médio diário associado ao percentil 10%	m^3/s	V
V4_90	Caudal médio diário associado ao percentil 90%	m^3/s	V
M5	Média dos máximos anuais do caudal médio diário (Qc)	m^3/s	M
M6	Caudal efetivo, definido como o produto entre a média e o coeficiente de variação dos máximos anuais do caudal médio diário (Q_{GL})	m^3/s	M
F6	Período de retorno associado ao caudal efetivo	Nº anos	F
M7	Caudal de conetividade, definido como caudal que corresponde ao dobro do período de retorno associado ao caudal efetivo (Q_{conec})	m^3/s	M
F7	Período de retorno associado ao caudal de conetividade	Nº anos	F
M8	Caudal de cheia (Q5%)	m^3/s	M
V9	Coeficiente de variação do máximo anual do caudal médio diário (CV(Qc))	-	V
V10	Coeficiente de variação do caudal de cheia (CV(Q5%))	-	V
S11	Número médio de dias por mês em que Q5% é excedido	Nº dias/mês	S[2]
D12	Número máximo de dias consecutivos no ano em que Q5% é excedido	Nº dias	D
M13	Caudal de limpeza, definido como caudal médio diário mínimo anual (Qs)	m^3/s	M
M14	Caudal estival (Q95%)	m^3/s	M
V15	Coeficiente de variação do caudal médio diário mínimo anual (CV(Qs))	-	V
V16	Coeficiente de variação do caudal estival (CV(Q95%))	-	V
S17	Número médio de dias por mês em que Q95% não é excedido	Nº dias/mês	S[2]
D18	Número máximo de dias consecutivos no ano em que Q95% não é excedido	Nº dias	D
D19	Número médio de dias por mês em que caudal igual a zero	Nº dias/mês	D[2]

(1) Representa os parâmetros que apresentam dois valores.
(2) Representa os parâmetros que apresentam 12 valores mensais.

2.3. Análise estatística

A análise de componentes principais é um método que permite transformar um conjunto multivariado de dados num número mais reduzido de variáveis (componentes principais), independentes entre si. Estas componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, sendo ordenadas em função da quantidade de informação que disponibilizam. Cabe ao utilizador decidir sobre o número de componentes que deve considerar em análise subsequentes, procurando um equilíbrio entre a simplicidade (e.g. número reduzido de componentes principais) e informação (traduzida pela variância que é explicada pelas componentes principais consideradas).
Utilizou-se o programa R (R Development Core Team, 2008) para proceder à análise das componentes principais (ACP) com 66 parâmetros hidrológicos e 36 estações hidrológicas. O objetivo foi analisar os padrões dominantes de correlação entre os parâmetros hidrológicos e, assim, identificar os parâmetros que explicam a maior quantidade possível da variância, minimizando a redundância (i.e. multicolinearidade). Adotou-se a matriz de correlação para assegurar que todos os parâmetros contribuem igualmente para a ACP e que são independentes de efeitos de escala, quer temporal quer espacial (Legendre e Legendre, 1998).
Esta análise foi realizada por duas vezes, uma primeira considerando um único conjunto de dados com a totalidade das 36 estações e uma segunda dois conjuntos separados com as estações de cada região.
Efetuada a ACP, procedeu-se a uma análise de classificação hierárquica de aglomeração (cluster analysis) para evidenciar eventuais subgrupos de estações hidrométricas com características similares e avaliar a consistência dos tipos de rios identificados em estudos anteriores. Utilizou-se a matriz de covariância que mede o grau de interdependência numérica entre as 36 estações e os 66 parâmetros para descrever a proximidade de características entre estações (Legendre e Legendre, 1998).

2.4. Indicadores de Alteração Hidrológica

Martínez *et al.* (2010) propõe a seguinte metodologia para obter os valores dos indicadores de alteração hidrológica e da alteração do estado de hidrológico das massas de água, a qual se apresenta na Figura 3.
De acordo com a metodologia proposta, identificados os parâmetros relevantes, os Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH) que avaliam o grau de alteração do regime de escoamento podem ser calculados pela razão entre os valores dos parâmetros em regime modificado e em regime natural. Segundo Martínez *et al.* (2010) existem cinco níveis que permitem avaliar quantitativamente o estado hidrológico da massa de água, a partir de cada Indicador de Alteração Hidrológica que varia entre zero a um (Figura 4). São eles: nível I ($0.8<IAH\leq1$), nível II ($0.6<IAH\leq0.8$), nível III ($0.4<IAH\leq0.6$), nível IV ($0.2<IAH\leq0.4$) e nível V ($0\leq IAH\leq0.2$). Sendo que o nível I representa menor alteração hidrológica e o nível V representa maior alteração hidrológica no regime.

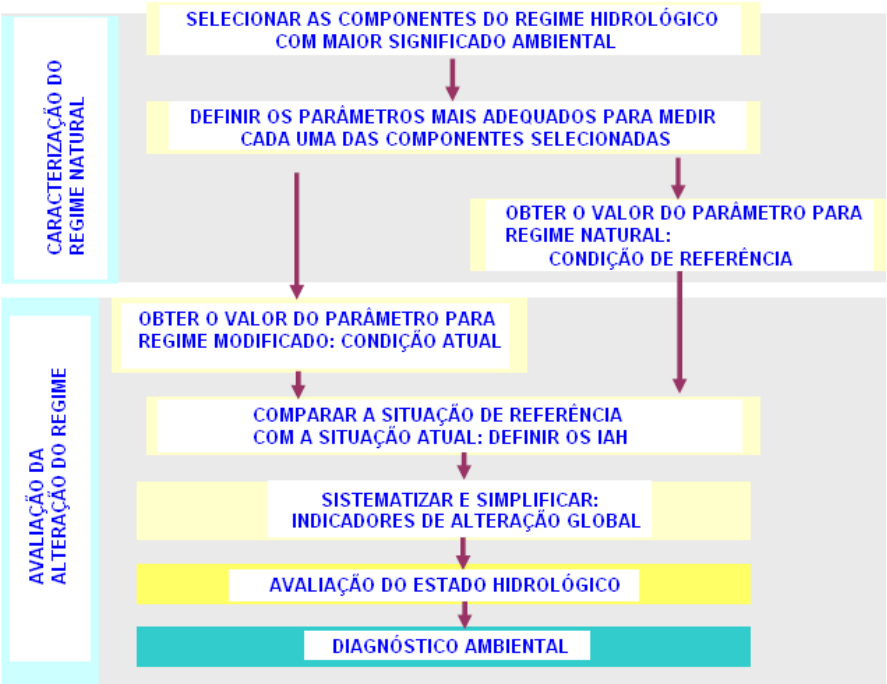

Figura 3 – Metodologia para avaliar o grau de alteração hidrológica no regime de escoamentos (adaptado Martínez *et al.*, 2010).

Para além, da avaliação individual de alteração de cada parâmetro, é também, possível avaliar globalmente a alteração do estado hidrológico das massas de água, a partir da razão entre a área no interior do polígono em regime modificado e a área dentro do polígono em regime natural, isto é, a área associada ao valor de 1 para todos os IAH. A avaliação da alteração global do estado hidrológico é designada por Indicador de Alteração Global (IAG) e segundo Martínez *et al.* (2010) apresenta cinco níveis. São eles: nível I ($0.64<IAG\leq1$), nível II ($0.36<IAG\leq0.64$), nível III ($0.16<IAG\leq0.36$), nível IV ($0.04<IAG\leq0.16$) e nível V ($0\leq IAG\leq0.04$). Sendo que o nível I representa a alteração do estado hidrológico nas massas de água nula ou reduzida, nível II alteração do estado hidrológico bom, o nível III alteração do estado hidrológico razoável, o nível IV alteração do estado hidrológico medíocre e o nível V representa alteração do estado hidrológico mau.

Figura 4 – Exemplo de avaliação do estado hidrológico para cada IHA (azul regime natural e magenta regime modificado estacionário).

3. RESULTADOS

3.1. Padrões gerais de redundância entre os parâmetros hidrológicos

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de componentes principais para os dois tipos de análise. Independentemente de se considerar um único conjunto de dados ou dois conjuntos, as primeiras quatro componentes principais explicam cerca de 72% da variância, evidenciando a redundância que existe entre os 66 parâmetros considerados. A componente principal (CP I) explica mais de 30% da variância e a CP II explica cerca de 21%. Juntas explicam mais de 50% da variância, enquanto a CP III e a CP IV explicam, em conjunto, cerca de 17%.

A Figura 5 apresenta os valores de correlação de cada parâmetro com as primeiras duas componentes principais. A maioria dos parâmetros está situada nos quadrantes positivos da CPI e CPII. Identificam-se quatro grupos de parâmetros com elementos fortemente correlacionados entre si. A correlação entre dois parâmetros pode ser avaliada pelo ângulo entre os vetores que representam cada um dos parâmetros.

Um primeiro conjunto de parâmetros, representado por vetores sensivelmente horizontais, inclui parâmetros que descrevem as características da componente hidrológica da sazonalidade, nomeadamente: o número médio de dias por mês em que o caudal estival não é excedido (S17o a S17s), o mês onde ocorre os valores de caudal máximo nos anos húmidos (S3hmax), os meses onde ocorrem os valores de caudal mínimo nos anos médios e secos (S3mmin, S3smin) e o número médio de dias em que o caudal de cheia é excedido no mês de dezembro (S11d). Inclui parâmetros que descrevem as características da componente da duração, nomeadamente: o número

Tabela 3 - ACP numa matriz de correlação com 66 parâmetros por 36 estações hidrométricas em regime natural em Portugal Continental.

	Componente Principal (% variância explicada)				Total
	I	II	III	IV	
Rios do Norte	24.8	23.0	14.2	9.9	71.9
Rios do Sul	37.7	19.5	14.5	7.8	79.1
Todos os rios	32.8	21.0	10.8	6.8	71.4

Nota: Apenas as primeiras quatro CP são apresentadas. "Total" refere-se ao somatório da variância explicada pelas quatro primeiras componentes principais.

máximo de dias consecutivos no ano em que o caudal estival não é excedido (D19o a D19s) e o número médio de dias por mês em que caudal igual a zero (D18). Inclui, também parâmetros que descrevem as características da componente taxa de alteração, nomeadamente: o coeficiente de variação do máximo anual do caudal médio diário (V9), o coeficiente de variação do caudal de cheia (V10) e o caudal de limpeza (V15) e parâmetros que descrevem as características da componente da frequência, nomeadamente: o período de retorno associado ao caudal efetivo (F6) e o período de retorno associado ao caudal de conetividade (F7).

Um segundo conjunto de vetores horizontais, situado nos quadrantes negativos do eixo da CPI inclui parâmetros que descrevem a componente magnitude, nomeadamente: o caudal de limpeza (M13) e o caudal estival (M14). Inclui parâmetro que descreve a componente taxa de alteração, nomeadamente: o caudal associado ao percentil 90% (V4_90) e parâmetro que descreve a componente duração, nomeadamente: o número máximo de dias consecutivos no ano em que o caudal de cheia é excedido (D12) e parâmetros que descrevem a componente da sazonalidade, nomeadamente: o mês onde ocorre os valores de caudal mínimo nos anos húmidos (S3hmin) e o número médio de dias em que o caudal de cheia é excedido no mês de janeiro e de março (S11j, S11m).

Um terceiro conjunto de vetores sensivelmente verticais positivamente correlacionados com a CPII inclui parâmetros que descrevem as características da componente da sazonalidade, nomeadamente: o número médio de dias em que o caudal de cheia é excedido no mês de outubro, novembro, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro (S11o, S11n, S11a, S11ma, S11ju, S11jul, S11ag, S11s) e os meses onde ocorrem os valores de caudal máximo nos anos médios e secos (S3mmax, S3smax).

Um quarto conjunto de vetores verticais, situado no quadrante negativo do eixo da CPII inclui parâmetros que caracterizam a componente da magnitude, nomeadamente: a média do escoamento anual dos anos húmidos (M1_h), a média do escoamento anual (M1) e a

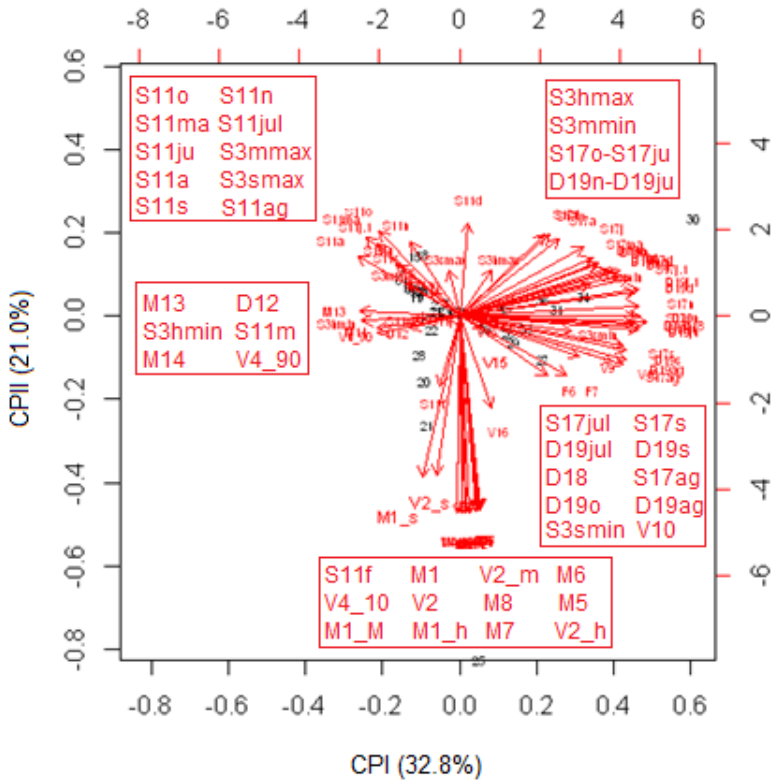

Figura 5 – ACP de 36 estações hidrométricas (a preto) e 66 parâmetros hidrológicos (a vermelho).

média do escoamento anual dos anos médios (M1_m), a média dos máximos anuais do caudal médio diário (M5), o caudal efetivo (M6), o caudal de conetividade (M7) e o caudal de cheia (M8). Inclui, parâmetros que caracterizam a taxa de alteração, nomeadamente: a diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo dos anos húmidos (V2_h), a diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo de todos os anos (V2), a diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo dos anos médios (V2_m) e o caudal médio diário associado ao percentil 10% (V4_10). Inclui o parâmetro que caracteriza a componente da sazonalidade, nomeadamente: o número médio de dias em que o caudal de cheia é excedido no mês de fevereiro (S11f). Os vetores deste conjunto de parâmetros tem a mesma direção que os vetores do conjunto anterior, embora o sentido seja contrário. O reduzido ângulo entre estes dois conjuntos de vetores indica que estes parâmetros estão correlacionados, embora negativamente.

Há ainda um conjunto de dois parâmetros no quadrante inferior direito, são eles: a média do escoamento anual dos anos secos (M1_s) e a diferença entre o escoamento mensal máximo e mínimo dos anos secos (V2_s) que descrevem a componente da magnitude e da taxa de variação, respetivamente.

3.2. Seleção de parâmetros hidrológicos mais relevantes

Com o objetivo de identificar um conjunto reduzido de parâmetros hidrológicos, não redundante, que explique a variabilidade observada selecionaram-se os parâmetros que possuem a maior correlação com cada componente principal para cada uma das componentes principais.

A Tabela 4 indica os cinco parâmetros com maior correlação com a CP I, CP II e CP III e os quatro parâmetros com maior correlação com a CP IV. Excluíram-se da tabela os parâmetros com coeficientes inferiores a 6%.

A Tabela 5 identifica os parâmetros mais relevantes para cada componente do regime hidrológico. Uma vez que as componentes principais são por definição ortogonais entre si, para cada componente do regime hidrológico, selecionaram-se os parâmetros que possuem a maior correlação com cada componente principal. As repetições indicam parâmetros que se situam no topo da hierarquia de correlação de várias componentes principais.

A partir da Tabela 4 e 5 é possível propor um conjunto de parâmetros adequado para caracterizar o regime hidrológico dos rios portugueses. A seleção realizada

Tabela 4 - Parâmetros hidrológicos (por ordem decrescente) com maior correlação com cada CP. j – janeiro, f – fevereiro, m – março, a –abril, ma- maio, ju – junho, jul – julho, ag – agosto, s – setembro, n – novembro, o – outubro e d – dezembro.

Tipologia dos rios		Total
Norte	Sul	
PC I		
V2_h	D18	D18
V2	S17o	D19n
V2_m	D19o	S17jul
M8	D19n	D19jul
M1_h	S17n	D19ju
PC II		
D19ag	M6-	M1_h-
D19s	M7-	M1-
D19jul	M5-	M8-
D19o	V2_h-	V2-
M14-	V2-	-
PC III		
D12	S17m	S17m-
S17n	S17f	S17a-
F6	S17a	S17f-
V10	D19m	S17ma-
-	S17ma	-
PC IV		
D19j-	S11m	S11n
D19f-	S11n-	S11o
D19m-	S11a	S11ju
-	V10-	S11ma

Nota: O sinal (-) indica que o parâmetro se localiza na parte negativa do eixo da CP. Os parâmetros a negrito representam os parâmetros recomendados.

incluiu os parâmetros que apresentam maior correlação com cada componente principal, que apresentam maior independência entre si e que caracterizam as diferentes componentes hidrológicas com significado ambiental. São os parâmetros M1 e M13 para a componente da magnitude, os parâmetros F6 e F7 para a frequência, os parâmetros V2 e V10 para a taxa de alteração, os parâmetros S11d e o S17o para a sazonalidade e os parâmetros D12 e D18 para a componente da duração. Este conjunto de parâmetros pode aplicar-se aos rios do Norte e do Sul, embora a ordenação dos parâmetros não seja idêntica em ambos os tipos de rio (negrito). A opção de selecionar mais quatro parâmetros conduziria aos parâmetros M1_h para a componente magnitude, V2_h para a componente taxa de alteração, S17n para a componente sazonalidade e D19n para a componente duração.

A Figura 6 apresenta os resultados de uma nova ACP com uma matriz de correlação com os 10 parâmetros selecionados, verificando-se que os parâmetros representam adequadamente todo o espaço ordenado ocupado pelos 66 parâmetros hidrológicos. Por representarem as principais características do regime hidrológico, estes 10 (ou 14) parâmetros podem ser a base para Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH). Estes indicadores são definidos pela razão dos valores que assumem em séries de caudal médio diário em regime natural e em regime modificado.

Esta proposta deverá ser testada posteriormente uma vez que a procura por um conjunto reduzido e não redundante de indicadores, apenas com base em informação hidrológica, pode ignorar aspetos relevantes do ponto de vista biológico. Diferentes espécies podem reagir de forma diferente a alterações aparentemente semelhantes do regime hidrológico. Dito de outra forma, a redundância entre parâmetros hidrológicos pode não refletir-se em redundância na análise dos aspetos biológicos.

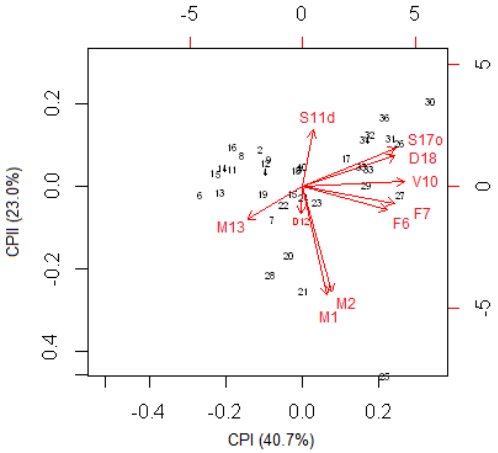

Figura 6 - ACP de 36 EH (a preto) por 10 parâmetros hidrológicos relevantes não redundantes (a vermelho).

3.3. Classificação hidrológica de rios

Na Figura 5 identificam-se a cor preta os valores da CPI e CPII para cada estação. Verifica-se que uma maior variabilidade de valores no eixo da CPI, com valores positivos representativos das estações da região Sul e os valores negativos representativos das estações da região Norte. Uma estação destaca-se das restantes. É a EH Cabeção (25).

A Figura 7 apresenta o dendrograma resultante da análise de clusters da matriz de covariância de 66 parâmetros e 36 estações hidrométricas. Adotou-se um método de aglomeração por distância ao vizinho mais distante (complete linkage), utilizando a distância euclidiana como medidas de distância. A classificação dos rios obtida é genericamente concordante com a tipologia de rios resultante da aplicação do Sistema B do artigo 5° da Diretiva-Quadro-Água (INAG I.P., 2008) e com as regiões

Tabela 5 - Parâmetros hidrológicos de cada componente do regime hidrológico com maior correlação com cada CP.

Componente do regime	Tipologia do rio		Todos os rios
	Norte	Sul	
Magnitude	M8, M14, M7, M13	M1_s, M6, M14, M7	M13, M1_h, M13, M14
Frequência	F6, F7, F6, F6	F6, F6, F7, F6	F7, F7, F7, F6
Taxa de alteração	V2_h,V4_90, V10, V16	V2_s, V2_h,V4_90, V10	V10, V2, V15, V4_90
Sazonalidade	S17f, S17o, S17n, S3smax	S17o, S3smax,S17m, S11m	S17jul, S11d, S17m, S11n
Duração	D18, D19ag, D12, D19ag	D18, D19ag, D19m, D19jul	D18, D19m, D19m, D12

Nota: Os parâmetros a negrito representam os parâmetros recomendados.

hidrologicamente homogéneas identificadas em estudos anteriores (Alves *et al.*, 2002; Matias, 2002; Alves e Bernardo, 2003). Os rios do Sul (EH24 a EH36) situam-se sobretudo nos extremos do dendrograma e os rios do Norte (EH1 a EH23) na parte central.

As estações do Sul, situadas nos extremos do dendrograma, apresentam uma menor similaridade entre si, medida pela distância indicada no eixo vertical. Este facto é provavelmente devido à maior variabilidade hidrológica interanual e intra-anual que ocorre no conjunto das estações classificadas como do Sul, uma área que abrange as bacias do Tejo, Sado, Guadiana, Mira e ribeiras no Algarve. As estações do Norte, colocadas no centro do dendrograma, apresentam uma maior semelhança entre si, uma área que abrange as bacias do Cávado, Douro, Vouga e Mondego. Entre estas estações encontram-se três exceções que são a EH30 (Entradas), a EH36 (Vidigal) e a EH24 (Agroal).

Na Figura 7 destacam-se cinco clusters. O primeiro cluster inclui uma única estação, EH25 (Cabeção); o segundo inclui a EH21 (Almaça), EH27 (Pavia), EH20 (Ponte Requeixo) e EH 28 (Ponte Coruche); o terceiro inclui a EH26 (Monforte) e EH29 (Amieira); o quarto inclui a EH19 (Ponte Águeda), EH22 (Caldas São Gemil), EH31 (Monte da Ponte), EH33 (São Domingos), EH23 (Ponte Santa Clara Dão), EH32 (Monte dos Fortes), EH34 (Vale da Ursa) e EH35 (Monte dos Pachecos) e o quinto inclui a EH3 (Cabriz), EH2 (Boticas), EH17 (Vale Trevo), EH10 (Ponte Figueira), EH8 (Vale Giestoso), EH16 (Santa Marta do Alvão), EH6 (Fragas da Torre), EH1 (Covas), EH13 (Ponte Remondes), EH14 (Quinta das Laranjeiras), EH5 (Castro Daire), EH7 (Cunhas), EH9 (Murça), EH11 (Ponte Pinelo), EH12 (Gimonde), EH18 (Vinhais), EH4 (Castanheiro) e EH15 (Rebordelo).

Verifica-se que os primeiros quatro clusters agrupam estações que situam-se em rios classificados como do tipo Sul, com exceção das EH19 (Ponte Águeda), EH22 (Caldas São Gemil), EH23 (Ponte Santa Clara Dão), EH 21 (Almaça) e EH20 (Ponte Requeixo),estações do centro do País, das bacias hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Tejo, sugerindo que é talvez possível identificar uma terceira região. O quinto cluster agrupa estações que situam-se em rios classificados como do tipo Norte, com exceção das EH30 (Entradas), EH36 (Vidigal) e EH24 (Agroal), estações das bacias hidrográficas do rio Guadiana, Ribeiras do Algarve e do rio Tejo, sugerindo também, que é talvez possível identificar uma quarta região. O número reduzido de estações hidrométricas com registos hidrológicos adequados impede, por agora, a sua distribuição por quatro regiões, sendo preferível manter apenas duas.

3.4. Avaliação de alteração hidrológica

A Figura 8 apresenta o gráfico radar resultante do cálculo dos dez parâmetros hidrológicos selecionados com maior significado ambiental (M1, M13, V2, V10, S11d, S17o, D12 e D18) para o rio Homem (EH Covas). O grau de alteração do regime pode ser avaliado pela diferença entre os polígonos relativos à alteração hidrológica (magenta) relativamente à condição de referência (azul).

No que diz respeito ao rio Homem, o IAH que apresenta maior grau de alteração hidrológica é o número de dias consecutivos no ano em que o caudal estival não é excedido (D18) com valor de 0.36, que descreve as características da componente da duração, e que em termos biológicos influencia a resiliência das espécies e o IAH que apresenta menor alteração hidrológica é o caudal de limpeza (M13) com valor de 0.87, que descreve as características da componente da magnitude, e que influencia em termos biológicos a área de habitat disponível (Figura 8). A alteração do estado hidrológico do troço do rio Homem é classificada como Bom, dado que o IAG apresenta um valor de 0.58, correspondendo a uma ligeira alteração hidrológica de nível II.

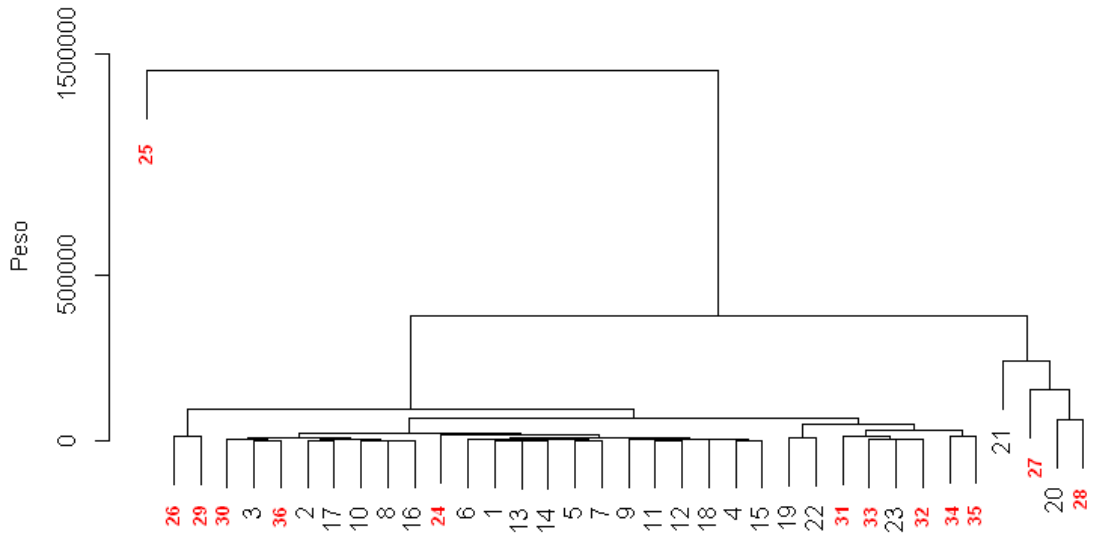

Figura 7 - Dendrograma representativo dos tipos de rios das 36 EH em regime natural de Portugal Continental (a vermelho a região Sul e a preto a região Norte).

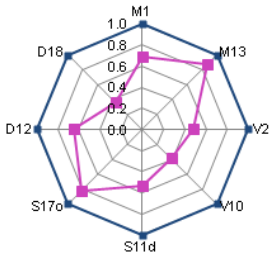

Figura 8 – Alteração do estado hidrológico para cada IHA do rio Homem (azul regime natural e magenta regime modifcado estacionário).

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este estudo identificou um conjunto de parâmetros hidrológicos que podem ser utilizados para avaliar e quantificar de forma adequada as alterações hidrológicas no regime de escoamento em resultado da construção de barragens ou de alterações climáticas. Este conjunto resultou de uma análise abrangente da correlação entre os parâmetros hidrológicos propostos na literatura para rios mediterrâneos, nomeadamente Portugal Continental.

Através de uma análise estatística das séries de caudal médio diário foi possível reduzir um conjunto de 66 parâmetros a 10 ou 14 parâmetros que caracterizam os padrões dominantes de variabilidade hidrológica. Esta seleção apenas baseada em informação hidrológica ignora os aspetos biológicos que podem ser relevantes na análise das condições de habitat de espécies piscícolas e de vegetação ripícola. No entanto, a utilização deste conjunto reduzido de dados pode revelar-se útil em estudos que procurem relacionar o regime hidrológico com aspetos biológicos e que exijam uma utilização intensiva de dados.

Para cada uma das componentes do regime hidrológico com relevância ambiental, nomeadamente a magnitude, a taxa de alteração, a duração e a sazonalidade de caudais como as principais componentes do regime hidrológico, propuseram-se um ou dois parâmetros identificados na Tabela 4. A utilização desta tabela concede ao investigador flexibilidade na escolha dos parâmetros relevantes para descrever as características do regime hidrológico e a sua interligação à qualidade do ecossistema fluvial, garantindo que as principais características do regime hidrológico são adequadamente consideradas.

Estes Indicadores de Alteração Hidrológica permitem avaliar de forma empírica e expedita o grau de alteração do regime hidrológico resultante da construção de barragens ou de alterações climáticas, e ainda definir as condições mínimas que permitem assegurar o bom estado ecológico do ecossistema fluvial.

Os resultados do estudo também confirmaram os principais tipos de rios e as regiões hidrologicamente homogéneas propostos em estudos anteriores, concretamente rios do Norte e rios do Sul. O número reduzido de estações hidrométricas com registos hidrológicos adequados impede, por agora, a dessegregação destes dois grandes grupos.

BIBLIOGRAFIA

Alexandre, C.M., Ferreira, T.F. & Almeida, P.R. (2012). Fish Assemblages in Non-regulated and Regulated rivers from Permanent and Temporary Iberian Systems. River Research and Applications. Vol. 29 (8), 1042-1058.

Alves M.H. & Bernardo J.M. (2003). Determinação de Caudais Ecológicos. In: M.H. Alves e J.M. Bernardo (eds.), Caudais Ecológicos em Portugal, pp. 3.1-3.27, INAG, DSP, Lisboa. ISBN 972-9412-63-4.

Alves M.H., Bernardo J.M., Matias P. & Ribeiro L. (2002). Contributos para a Determinação do Caudal Ecológico em Portugal Continental: Prémio Água e Progresso do Biénio de 1996/97. 13.4p., INAG, Lisboa, Portugal. ISBN 972-97480-3-9.

Arthington, A.H., Naiman, R.J., McClain, M.E. & Nilsson, C. (2010). Preserving the Biodiversity and Ecological Services of Rivers: New Challenges and Research Opportunities. Freshwater Biology, Vol. 55 (1), 1-16.

Belmar, O., Velasco, J. & Martínez-Capel, F. (2011). Hydrological Classification of Natural Flow Regimes to Support Environmental Flow Assessments in Intensively Regulated Mediterranean Rivers, Segura River Basin (Spain). Environmental Management, Vol. 47 (5), 992-1004.

Bernardo, J.M., Ilhéu, M., Matono, P. & Costa, A.M. (2003). Interannual Variation of Fish Assemblage Structure in a Mediterranean river: Implications of Streamflow on the Dominance of Native or Exotic Species. River Research and Applications, Vol. 19 (5-6), 521–532.

Ferreira, M.T., Oliveira, J., Caiola, N., Sostoa, A., Casals, F., Cortes, R., Economou, A., Zogaris, S., Garcia-Jalon, D., Ilhéu, M., Martínez-Capel, F., Pont, D., Rogers, C. & Prenda, J. (2007). Ecological Traits of Fish Assemblages from Mediterranean Europe and their Responses to Human Disturbance. Fisheries Management and Ecology, Vol. 14, 473-481.

Gan, K.G., McMahon, T.A. & Finlayson, B.L. (1991). Analysis of Periodicity in Streamflow and Rainfall data by Colwell's indices. Journal of Hydrology, Vol 123 (1-2) 105–118.

Haines, A.T., Findlayson, B.L. & McMahon, T.A. (1988). A Global Classification of River Regimes. Applied Geography, Vol. 8, 255–272.

Holling, C.S., (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4, 1-23.

Ilhéu, M., Matono, P., Formigo, N., Ferreira, M.T., Almeida, P.R., Cortes, R. & Bernardo, J.M. (2009). Tipologia Fluvial para Portugal Continental com base no elemento peixes. Recursos Hídricos, Vol. 30 (2), 39–46.

INAG I.P. (2008). Tipologia de Rios em Portugal Continental no âmbito da implementação da Directiva Quadro da Água. I - Caracterização abiótica. Ministério do

Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Instituto da Água, I.P.

Legendre P. & Legendre L. (1998). Numerical Ecology. 852p., Elsevier Scientific, Amsterdam, Holanda. ISBN 0-444-89250-8.

Lei n.º 58/2005 - Diário da República 249 Série I-A de 2005-12-19. http://dre.pt/pdf1s/2005/12/249A00/72807310.pdf.

Marmelo V.L. (2007). Avaliação de Caudais Ecológicos em Cursos de Água do Centro e Norte de Portugal. 6.7p., Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Matias, P. (2002). Características hidrológicas com interesse para a caracterização do regime e dos tipos de escoamento em Portugal Continental. In: M.H. Alves e J.M. Bernardo (eds.), Caudais Ecológicos em Portugal, pp. 7.1-7.43, INAG, DSP, Lisboa. ISBN 972-9412-63-4.

Martínez, C., Fernández, J.A. & Magdaleno F. (2010). IAHRIS 2.2 Indicators of Hydrologic Alteration in Rivers. User's Manual. 64p., Ministry of the Environment. Polytechnic University of Madrid, Espanha. ISBN 978-84-693-7959-2.

Martins J.P.F (2012). Avaliação Ecohidrológica de Caudais Modificados e de Caudais Ecológicos em Troços de Rios Fortemente Modificados. 91p., Dissertação de Mestrado em Gestão e Conservação de Recursos Naturais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

McCully P. (1996). Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams. 350p., London ZED books, London, Reino Unido. ISBN 1856494357.

Mosley, M.P. (1981). Delimitation of New Zealand hydrologic regions. Journal of Hydrology, Vol. 49, 179–192.

Olden, J.D., Kennard, M.J. & Pusey, B.J. (2012). A Framework for Hydrologic Classification with a Review of Methodologies and Applications in Ecohydrology. Ecohydrology, Vol. 5 (4), 503–518.

Poff, N.L. & Ward, J.V. (1989). Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: a Regional-Analysis of Streamflow Patterns. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 46 (10), 1805-1818.

Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Poff, N.L., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.P., Freeman, M.C., Henriksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J.G., Merritt, D.M., O´Keeffe, J.H., Olden, J.D., Rogers, K., Tharme, R.E. & Warner A. (2010). The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA): a New Framework for Developing Regional Environmental Flow Standards. Freshwater Biology, Vol.55 (1),147-170.

Portela, M.M. (2006). Definição de Caudais Ecológicos em Cursos de Água do Sul de Portugal Continental. In: APRH (eds.), 8º Congresso da Água - Água, Sede de Sustentabilidade, 14 p, Figueira da Foz, Portugal. CD-Rom.

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. & Braun, D.P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. Conservation Biology, Vol. 10 (4), 1163-1174.

Santos, J.M, Godinho, F, Ferreira, M.T. & Cortes, R. (2004). The Organization of Fish Assemblages in the Regulated Lima basin, Northern Portugal. Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters, Vol. 34 (3), 224–235.

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (2014). http://snirh.pt/index.php?idMain=2&idItem=1. Lisboa, Portugal.

Walker, K.F., Sheldon, F. & Puckridge, J.T. (1995). A Perspective on Dryland River Ecosystems. Regulated Rivers: Research & Management, River Research and Applications, Vol. 11 (1), 85-104.

World Commission on Dams (2000). Dams and Development. A New Framework for Decision-making. 322p., The report of the World Commission on Dams. Earthscan Publications, London, Reino Unido. (disponível em http://www.internationalrivers.org/files/attachedfiles/world_commission_on_dams_final_report.pdf).