

# Recursos Hídricos

Volume 45, N.º 1 | Março 2024



**ASSOCIAÇÃO  
PORTUGUESA DOS  
RECURSOS HÍDRICOS**

**Título**

Revista Recursos Hídricos

**Data de publicação**

2 de agosto de 2024

**Data do número**

Março 2024

**Proprietário**

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

**Diretora**

Susana Neto

**Subdirector**

Rui Rodrigues

**Diretores Associados**

Cláudia Brandão

Amparo Sereno

José Maria Santos

**Conselho Editorial**

António Betâmio de Almeida

António Guerreiro de Brito

António Pinheiro

Bernardo Silva

Catarina Roseta Palma

Dália Loureiro

Fernando Veloso Gomes

Francisco Ferreira

Francisco Nunes Correia

Francisco Taveira Pinto

Jaime Melo Baptista

João Pedroso de Lima

Jorge Matos

José Manuel Ginçalves

José Maria Santos

José Matos

Manuela Moreira da Silva

Maria José Vale

Maria Paula Mendesa

Paulo Canelas de Castro

Rafaela Matos

Rodrigo Maia

Rodrigo Oliveira

Rui Ferreira

Teresa Ferreira

**Membros da Comissão Diretiva**

Jorge Cardoso Gonçalves (Presidente)

Ana Estela Barbosa (Vice-Presidente)

Carla Rolo Antunes (Vice-Presidente)

Carina Almeida (Vogal)

Tiago Ferradosa (Vogal)

**Secretariado**

Ana Estêvão

André Cardoso

Conceição Martins

**Redação, Administração e Sede do editor**

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

a/c LNEC

Av. do Brasil, 101

1700-066 Lisboa

PORTUGAL

Telefone 21 844 34 28 Fax 21 844 30 17

NIF n.º 501063706

**Design**

Ana Rosária Gonçalves

**Periodicidade**

Semestral

**Edição digital gratuita****Estatuto Editorial**

<http://www.aprh.pt/rh/estatuto-editorial.html>

Os artigos publicados na Recursos Hídricos são identificados com DOI (Digital Object Identifier).

Registo de Pessoa Colectiva n.º 501063706

Registo na ERC n.º 125584

ISSN 0870-1741

## Apoiantes



Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural

# ÍNDICE

EDITORIAL .....	5
EDITORIAIS CONVIDADOS .....	7
<i>Dia Mundial do Ambiente – o papel da Diplomacia</i>	
Jorge Cardoso Gonçalves .....	7
<i>Fenómenos hidrológicos extremos: os desafios das próximas décadas</i>	
Paulo Rosa Santos .....	9
<i>Água - Desafios do Futuro</i>	
Carla Antunes, José Manuel Gonçalves, Jorge Cardoso Gonçalves .....	13
<i>Relato da Conferência Água - Desafios do Futuro</i>	
Duarte Baltazar .....	15
ARTIGO DE OPINIÃO .....	17
<i>Contributos para a eficiência no ciclo urbano da água</i>	
Eduardo Vivas .....	19
CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO .....	29
<i>Diagnóstico das principais pressões humanas e boas práticas de gestão aplicadas aos ecossistemas de água doce: visão geral e perspectivas para as bacias na Região do Minho, Portugal</i>	
Ana M. Valente, Cláudia Carvalho-Santos, Janeide Assis de Padilha, Luis Machado, Fernanda Cássio, Cláudia Pascoal .....	31
<i>Análise comparativa de modelos digitais do terreno obtidos por satélite, para aplicação hidrológica em Portugal</i>	
Jorge E. Matos, Cíntia F. Santos, Raquel Matos .....	43
<i>Assessment of groundwater sustainability in the Maipo River Basin (Chile)</i>	
Alexander Van Der Hulst, Nuno Barreiras .....	59
AS COMISSÕES ESPECIALIZADAS EM AÇÃO .....	73
<i>Notas sobre a criação da Comissão Especializada em Rios</i>	
Rui M. L. Ferreira et al. ....	75
HOMENAGEM .....	79
<i>“Há águas e águas”: a extraordinária vida do hidrogeólogo José Martins Carvalho (1943–2023)</i>	
Helder I Chaminé .....	81



## EDITORIAL

É com grande satisfação que a Direção da Revista *Recursos Hídricos* (RH) anuncia este volume 45, o primeiro de 2024 e que é editado no ano correspondente. Recuperado o atraso dos últimos dois anos, contamos ter agora reencontrado o ritmo habitual.

Este tem sido, aliás, um ano de múltiplas e relevantes realizações pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) e a RH orgulha-se de acertar o passo com a dinâmica que a atual Comissão Diretiva tem imprimido às atividades da Associação. Este primeiro volume de 2024 conta com diversas contribuições de relevo, a começar por três Editoriais Convidados associados a eventos de relevo e organizados pela APRH; um Artigo de Opinião e quatro Artigos Científicos; um texto de Homenagem e uma peça editorial redigida por uma Comissão Especializada.

O primeiro editorial convidado, de Jorge Cardoso Gonçalves - ***Dia Mundial Do Ambiente – O Papel Da Diplomacia*** – reflete sobre a importância deste dia, instituído há mais de 50 anos pela Organização das Nações Unidas (ONU) durante a Conferência de Estocolmo e da sua relação com a necessidade de ser estabelecida uma “diplomacia para a água”. Esta poderá incluir um conjunto de ações relacionadas com a cooperação internacional na área dos recursos hídricos, em particular entre os países da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP). O segundo, por Paulo Rosa Santos - ***Fenómenos Hidrológicos Extremos: os Desafios das Próximas Décadas*** – apresenta os objetivos e realização do 9º Seminário do NRN-APRH realizado a 16 de novembro de 2023 na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), o qual contou com cerca de 90 participantes e diversas apresentações técnicas e científicas. Finalmente o terceiro, assinado por Carla Antunes, José Manuel Gonçalves e Jorge Cardoso Gonçalves - ***Água - Desafios Do Futuro*** - apresenta a visão que norteou a organização da Conferência “Água - Desafios do Futuro”, organizada pela APRH e que decorreu na Universidade do Algarve, de 16 a 18 de maio de 2024. Este evento visou contribuir para o futuro da gestão da água nas diversas atividades humanas e de conservação da natureza, privilegiando abordagens inovadoras num quadro multidisciplinar e transversal à sociedade e dando destaque a questões que atualmente levantam mais incertezas e preocupações. Este Editorial é completado pelo excelente relato do jornalista Duarte Baltazar.

No Artigo de Opinião no qual convidámos o autor, Eduardo Vivas, a tecer considerações sobre os

***Contributos Para a Eficiência no Ciclo Urbano da Água***, é efetuada uma reflexão crítica e muito relevante sobre a evolução dos níveis de eficiência do setor, tomando por base os dados disponíveis nos relatórios de avaliação da qualidade de serviço do regulador (ERSAR) e desenvolvem-se perspectivas para o futuro das intervenções necessárias.

Os três artigos científicos que integram este volume são: ***Diagnóstico das principais pressões humanas e boas práticas de gestão aplicadas aos ecossistemas de água doce: visão geral e perspectivas para as bacias na região do Minho, Portugal***, da autoria de Ana M. Valente, Cláudia Carvalho-Santos, Janeide Assis de Padilha, Luis Machado e Fernanda Cássio; ***Análise comparativa de modelos digitais do terreno obtidos por satélite, para aplicação hidrológica em Portugal***, da autoria de Jorge E. Matos, Cíntia F. Santos, Raquel Matos; e ***Evaluation of groundwater management and governance performance through the application of assessment methodologies to achieve groundwater sustainability. The case of the Maipo basin, central Chile*** - Van Der Hulst, da autoria de Alexander Johannes e Nuno Barreiras.

A peça redigida na secção ‘As Comissões Especializadas em Ação’ é, nesta edição, da responsabilidade da Comissão Especializada em Rios (CER). Nesta nota relata-se a génese desta CE e apresentam-se alguns dos seus objetivos e linhas orientadoras da atuação e envolvimento em projetos. É assinada por Rui M.L. Ferreira, Ana Margarida Ricardo, João Nuno Fernandes, Elsa Carvalho, Ana Margarida Bento, André Batoréu, Manuela Lima, Afonso Fernandes e Ana Margarida Sousa.

Por último, mas com lugar especial de honra, este volume da RH inclui uma Homenagem: ***“Há Águas e Águas”: a Extraordinária Vida do Hidrogeólogo José Martins Carvalho (1943–2023)***, brilhantemente escrita por Helder Chaminé que com ele trabalhou e que partilha connosco o perfil admirável deste investigador de renome internacional e enorme influência na área científica da Hidrogeologia.

Desejamos aos nossos leitores uma leitura inspiradora dos textos editados neste volume e desejamos nesta época de Verão umas boas férias.

**Susana Neto**

**Diretora da Revista Recursos Hídricos**



# Dia Mundial do Ambiente – o papel da Diplomacia

*Jorge Cardoso Gonçalves*

*Presidente da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*

O Dia Mundial do Ambiente foi instituído há mais de 50 anos, pela Organização das Nações Unidas (ONU), durante a Conferência de Estocolmo, que foi um importante marco internacional para os desafios ambientais.

Este dia convoca a sociedade civil, os decisores, as empresas e as instituições para a ação em prol do ambiente. Com bom senso, com responsabilidade e com sentido de missão, as Organizações Não Governamentais (ONG) devem contribuir para a sensibilização dos cidadãos, para a mobilização dos decisores e para o desenho de políticas públicas integradas, que conduzam ao uso sustentável dos recursos.

No atual contexto de exigência e de adaptação climática, é urgente assegurar a proteção do ambiente, garantindo que a satisfação das necessidades dos cidadãos e a procura da qualidade de vida não afetam a continuidade dos recursos e a estabilidade dos ecossistemas.

O crescimento da população provoca um inevitável aumento do consumo. A forma como vivemos e ocupamos o território, muitas vezes com padrões de consumo intensivo de recursos (e conseqüente geração de resíduos), poderá ser repensada em dois planos: as oportunidades globais de mudança (p.ex.: governança dos países, regiões e cidades) e as nossas escolhas individuais.

Como contributos para a sustentabilidade global, realço os modelos que assentam numa lógica de economia circular, com uma visão holística e equilibrada da ocupação do território, da preservação dos recursos e da gestão integrada dos serviços públicos e das infraestruturas que os suportam.

Como estratégias mais específicas, saliento o incentivo à eficiência dos diferentes setores, o encurtamento das cadeias de abastecimento, o envolvimento dos produtores no tratamento dos

produtos e subprodutos gerados na sua atividade, e a aposta na reciclagem, na reutilização e na redução de consumos.

Num futuro que se avista carregado de incerteza e repleto de desafios, a “diplomacia ambiental” introduzida na Conferência de Estocolmo, há mais de 50 anos, assume particular relevância e atualidade. A APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, uma das mais emblemáticas ONG(A) – Organizações Não Governamentais (de Ambiente) portuguesas, tem vindo a trabalhar na “diplomacia para a água”.

A “diplomacia para a água” inclui um conjunto de ações relacionadas com a cooperação internacional na área dos recursos hídricos, em particular entre os países da CPLP – Comunidade dos Países de Língua Portuguesa, com os quais se pretende criar pontes e contribuir para uma agenda comum de discussão das ameaças, dos desafios e das oportunidades globais.

Esta “comunidade da água” da CPLP poderá trabalhar numa estratégia comum de “diplomacia para a água”, que vá para além dos eventos pontuais relacionados com recursos hídricos que se têm realizado, fomentando a constituição das Associações de Recursos Hídricos da CPLP em países onde essas estruturas não existem ou ainda não têm uma organização formal.

As ONG desempenham um papel fundamental na “diplomacia ambiental” e na “advocacia para a água”, contribuindo para a mobilização dos decisores para questões críticas como o desenho de políticas públicas para a gestão resiliente dos recursos hídricos e a cooperação internacional para o cumprimento dos ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, em particular o ODS6 – Água potável e saneamento.

Não existe “planeta B”. Vamos estar do lado certo da história, protegendo esta que é a “casa comum” das gerações passadas, presentes e futuras.

Lisboa – 05/06/2024





# Fenómenos hidrológicos extremos: os desafios das próximas décadas

Paulo Rosa Santos

Presidente do Núcleo Regional do Norte da APRH

As alterações climáticas e o consequente aumento da intensidade e da frequência dos fenómenos hidrológicos extremos trouxeram novos e complexos desafios à gestão, à preservação e à utilização sustentável dos recursos hídricos, que requerem abordagens multidisciplinares e colaborativas. Com efeito, as incertezas associadas à previsão desses fenómenos, assim como as consequências da não preparação do território para os mesmos, podem resultar em perdas significativas de bens materiais e naturais, com a descontinuação temporária de serviços públicos fundamentais, e, no limite, na perda de vidas.

A redução da incerteza dos modelos de previsão (para diferentes escalas temporais), o planeamento estratégico, a monitorização contínua e com elevada resolução temporal e espacial, a atualização de cadastros de infraestruturas, a implementação de sistemas de alerta e suporte à tomada de decisão, o aumento da eficiência no uso dos recursos hídricos e a sua reutilização, a adoção de estratégias eficientes para gestão de crise, bem como a capacidade de adaptação da sociedade civil, entre outros, são fundamentais para lidar com os impactos desses fenómenos hidrológicos extremos nas próximas décadas e construir um futuro mais resiliente face às incertezas de um clima em contínua mudança. De referir que a necessária adaptação deverá incluir a antecipação, o planeamento, a identificação e a potenciação das oportunidades que possam surgir, evitando-se assim a tomada de medidas reativas face à ocorrência de situações de emergência.

Este contexto justifica a urgência e a importância de se refletir sobre as estratégias de adaptação aos efeitos das alterações climáticas, de redução da vulnerabilidade da sociedade e do território a esses efeitos, e da criação e posterior implementação de planos de contingência e de gestão de riscos. Foi este enquadramento que levou o Núcleo Regional do Norte da Associação Portuguesa dos Recursos

Hídricos (NRN-APRH) a selecionar como tema para o seu 9º Seminário os "*Fenómenos hidrológicos extremos: os desafios das próximas décadas*", colocando o enfoque principal do evento nas vertentes da previsão de fenómenos hidrológicos extremos e sua relação com as estratégias de adaptação, no planeamento como forma de reduzir riscos face aos cenários climáticos, bem como na monitorização e na adaptação a uma nova realidade.

O 9º Seminário do NRN-APRH foi realizado a 16 de novembro de 2023, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e contou com cerca de 90 participantes. Este evento teve o apoio da empresa Águas do Douro e Paiva S.A., bem como o apoio institucional da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do DEC-FEUP e do Instituto para a Construção Sustentável (ICS). O evento contou com a participação de vários oradores convidados e com a contribuição de oradores que, de forma a participarem ativamente no seminário, submeteram resumos técnico-científicos para apresentação oral. A sessão de abertura do seminário contou com a participação do Prof. Paulo Rosa Santos, Presidente do NRN-APRH e Coordenador da SHRHA, do Prof. Francisco Taveira Pinto, Diretor do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, e do Doutor Eng.º Jorge Cardoso Gonçalves, Presidente da APRH.

A primeira sessão técnica – *Fenómenos hidrológicos extremos: previsão, monitorização e incertezas* – incluiu um enquadramento geral do tema do seminário e abordou a gestão desses fenómenos em contexto de alterações climáticas, comparando, sempre que possível, a situação portuguesa com a situação espanhola. Teve como oradores convidados a Eng.ª Maria Felisbina Quadrado, Chefe de Departamento de Recursos Hídricos da APA, e o Eng. Carlos Ruiz del Portal, Jefe de la Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, O.A, tendo a moderação ficado a cargo do Prof. Paulo Rosa Santos.

A primeira mesa redonda foi focada no tema das "cheias e inundações", tendo abordado a gestão de situações de crise, a gestão de albufeiras em períodos de cheias e a coordenação operacional da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. A moderação ficou a cargo do Prof. Rui Cortes, do NRN da APRH e Prof. da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, e os oradores convidados

foram a Dr.<sup>a</sup> Maria Manuela Saramago, Chefe de Divisão de Avaliação das Disponibilidades da Água, APA, o Eng.<sup>o</sup> Vitor Silva, Diretor da Área de Gestão da Operação, EDP Produção, e o Eng. Armando Neves da Silva, 2º Comandante Regional de Emergência e Proteção Civil do Norte.

A segunda mesa redonda abordou o tema dos instrumentos de gestão territorial na adaptação aos eventos extremos e teve como moderador o Eng.<sup>o</sup> João Mamede. Os oradores convidados foram a Arqt.<sup>a</sup> Pais<sup>a</sup> Alexandra Cabral – Diretora de Serviços do Ordenamento do Território, CCDRN, a Dr.<sup>a</sup> Inês Andrade, Diretora Regional da Administração da Região Hidrográfica do Norte – APA, e a Eng.<sup>a</sup> Marta Fernandes, Diretora do Departamento de Infraestruturas Hidráulicas da Esposende Ambiente. A terceira mesa redonda foi moderada pelo Doutor Eng.<sup>o</sup> Eduardo Vivas e teve como tema a gestão de situações de secas e da escassez na perspetiva dos sistemas urbanos. Os oradores convidados foram a Eng.<sup>a</sup> Cristiana da Costa Barbosa, Vogal Executivo do Conselho de Administração da Águas do Norte, S.A., o Dr. João Sabino Vilaça, Diretor de Exploração da SIMDOURO, e o Prof. Joaquim Poças Martins, Secretário-Geral do Conselho Nacional da Água e Professor da FEUP.

O evento incluiu também duas sessões de comunicações livres, moderadas pelo Doutor Eng.<sup>o</sup> Hugo Guedes Lopes, do NRN-APRH e Diretor de Desenvolvimento e Sustentabilidade da Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, e pelo Doutor Eng.<sup>o</sup> Jorge Cardoso Gonçalves, Presidente da APRH. Estas sessões incluíram um conjunto de temas abrangente, nomeadamente: reabilitação fluvial na mitigação de fenómenos extremos; recarga de aquíferos como estratégia para a mitigação de cheias e secas; modelos digitais para aplicação hidrológica; avaliação de inundações com base em imagens de satélite; ondas de calor em Portugal continental; adaptação da rede hidrográfica às alterações climáticas; regeneração, reabilitação e valorização de cursos de água; entre outros.

O sucesso deste seminário deveu-se, por um lado, à atualidade e à relevância do tema escolhido, num momento em que se tem assistido a um claro e progressivo aumento da frequência e intensidade dos fenómenos hidrológicos extremos, mas também aos oradores convidados de vários *stakeholders*, que enriqueceram o evento com a partilha de conhecimentos, experiência prática e visão dos problemas, perspetivas futuras e soluções, nomeadamente: Agência Portuguesa do Ambiente, Administração da Região Hidrográfica do Norte, Confederación Hidrográfica del Miño-Sil,

EDP Produção, Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDRN), Esposende Ambiente, Águas do Norte, S.A., SIMDOURO, Conselho Nacional da Água, e Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo.

O 9º Seminário do NRN-APRH mostrou que as autoridades nacionais, regionais e locais estão atentas e cientes dos desafios que os fenómenos hidrológicos extremos representam nas próximas décadas na Região Norte, embora se debatam com as incertezas decorrentes das ferramentas disponíveis e naturalmente com as limitações associadas aos meios e recursos disponíveis. Ficou também patente que este tipo de eventos, com o envolvimento de diversas instituições públicas e privadas, entidades gestoras, e *stakeholders*, ao possibilitar enquadrar, refletir e debater os problemas e desafios atuais, potencia o diálogo interdisciplinar, contribuindo para o esclarecimento das comunidades técnica e científica e, em certa medida, da sociedade civil, em perfeito alinhamento com a missão da APRH.

Para além das onze comunicações convidadas, o evento incluiu ainda oito comunicações livres. Neste número da Recursos Hídricos é publicado um dos trabalhos selecionados pela comissão organizadora do evento, que passou posteriormente pelo normal processo de revisão por pares da revista. Esse artigo refere-se à análise comparativa de vários modelos digitais do terreno, obtidos por satélite, para aplicação hidrológica (Matos *et al.*, 2024). Os autores recorreram a duas bacias hidrográficas em Portugal para mostrar a influência que a escolha do modelo digital do terreno pode ter nos resultados dos estudos hidrológicos e, em particular, nos resultados da simulação de inundações urbanas usando para o efeito um *software* de modelação hidrodinâmica a duas dimensões. Este trabalho permitiu ainda concluir que o modelo FABDEM, subproduto do COPERNICUS, e o ALOS WORLD (AW3D30) são os que mais se aproximam do terreno natural em Portugal continental, devendo por isso ser usados nos estudos de escoamento superficial, em detrimento do modelo SRTM, considerado mais comum. Este trabalho fornece, portanto, contributos e orientações importantes que serão por certo úteis para os leitores da Recursos Hídricos. Por fim, de realçar o trabalho da Comissão Diretiva do NRN-APRH (Paulo Rosa Santos, João Mamede, Hugo Lopes, Cristina Calheiros e Jaime Gabriel Silva) e Assembleia Regional (Eduardo Vivas, Alexandra Roeger, Rui Cortes) que, ao longo de vários meses, planearam e organizaram este 9º seminário. Um obrigado também à comissão que fez a seleção

dos trabalhos com potencial de publicação na revista Recursos Hídricos, assim como aos revisores anónimos que, com a sua análise crítica e sugestões, contribuíram para melhorar a clareza e a qualidades dos mesmos.

Espero que este 9º Seminário, focado nos fenómenos hidrológicos extremos, na sua relação com as estratégias de adaptação e o planeamento, como forma de reduzir riscos face aos cenários climáticos, bem como na monitorização e na adaptação a esta nova realidade, tenha correspondido às melhores expectativas de todos os participantes.

## **REFERÊNCIAS**

Jorge E. Matos, Cíntia F. Santos, Raquel Matos, 2024. Análise comparativa de modelos digitais do terreno obtidos por satélite para aplicação hidrológica em Portugal, Recursos Hídricos, Vol. 44, Nº1. ISSN: 0870-1741.



# Água - Desafios do Futuro

Carla Antunes<sup>1</sup>, José Manuel Gonçalves<sup>2</sup>,  
Jorge Cardoso Gonçalves<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Presidente da Comissão Organizadora da Conferência "Água - Desafios do Futuro"

<sup>2</sup> Presidente da Comissão Científica da Conferência "Água - Desafios do Futuro"

<sup>3</sup> Presidente da Comissão Diretiva da APRH

A Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos organizou a Conferência "Água - Desafios do Futuro", que decorreu na Universidade do Algarve, de 16 a 18 de maio de 2024, criando um evento sobre a temática da água de âmbito nacional, num ano em que não se realiza o Congresso da Água. Visou contribuir-se para o futuro da gestão da água nas diversas atividades humanas e de conservação da natureza, privilegiando-se abordagens inovadoras e integradas, num quadro multidisciplinar e transversal à sociedade, dando-se destaque a questões que levantam mais incertezas e preocupações. No atual contexto de complexidade e exigência na gestão dos recursos hídricos, face às mudanças climáticas e problemas associados, os desafios para a água são vários. Esta Conferência envolveu, na sua discussão, de forma muito ativa e sinérgica, diversos atores sociais do setor da água e dos recursos hídricos. Participaram membros da academia, dirigentes e decisores, profissionais de entidades públicas e privadas e outras partes interessadas, que partilharam conhecimento e debateram temas e tecnologias emergentes e sua aplicação na resolução dos problemas nos diversos domínios da gestão da água. Estamos convictos que, da discussão, surgiram novas ideias aliadas à reflexão partilhada sobre os problemas, resultando impulsos de inovação para se enfrentar o futuro com mais recursos e confiança.

A conferência contou com mais de 60 trabalhos técnicos, 125 participantes, 5 Sessões Plenárias, 9 Sessões Técnicas, 1 Sessão Especial e 1 Visita Técnica ao Espaço Museológico dos Banhos Islâmicos de Loulé e Casa Senhorial dos Barreto.

Na sessão de abertura estiveram presentes o Presidente da CCDRALgarve – José Apolinário, o Diretor da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade do Algarve – Carlos Guerreiro, a Sub-Diretora do Instituto Superior de Engenharia do Algarve – Isabel Ratão e o Presidente da Comissão

Diretiva da APRH – Jorge Cardoso Gonçalves, que enquadrou a conferência com os objetivos da ONU - Organização das Nações Unidas, lançou os principais temas a discutir e salientou a importância de uma visão holística, supra-setorial e de cooperação internacional para um uso inteligente da água.

A sessão plenária 1 "Políticas Locais e Governança" contou com a presença de Vitor Aleixo - Presidente da Direção da Associação adapt. Local, Pedro Coelho – Presidente da Administração da Região Hidrográfica do Algarve, José Pedro Salema – Presidente da EDIA e Pedro Valadas Monteiro – Vice Presidente da CCDRALgarve.

A sessão plenária 2 "Novas Origens: Dessalinização", contou com a presença de Nuno Pereira – Diretor de Produção da Água e Resíduos da Madeira, António Eusébio – Presidente das Águas do Algarve e Vera Eiró – Presidente da ERSAR.

A sessão plenária 3 "Água e Território" contou com a presença de Maria José Vale e Fátima Bachatel – Direção Geral do Território, José Pacheco – Vice Presidente da CCDRALgarve, Maria José Roxo – FCSH/ Universidade Nova de Lisboa e Rui Santos – FCT/ Universidade Nova de Lisboa.

A sessão plenária 4 "Novas Origens: Pomarão/ Foupana, ApR" além de uma apresentação de António Carmona Rodrigues – FCT/Universidade Nova de Lisboa, contou com a presença de Macário Correia – Presidente da Associação de Beneficiários do Plano de Rega do Sotavento Algarvio, Andreia Franco – APAmbiente, Carlos Manso - Presidente do Conselho de Administração InfraLobo e Soraia Almeida - Inframoura.

A sessão plenária 5 "Inovação Tecnológica e Gestão Integrada da Água" além de uma apresentação de Joaquim Poças Martins – FEUP, contou com a presença de Jorge Cardoso Gonçalves – Lis-Water, Susana Neto – IST/UL, Armando da Silva Afonso – ANQIP, Pedro Valadas Monteiro – Vice Presidente da CCDRALgarve e Ana Rita Santos, AGS.

Com um foco abrangente e tendo como fio condutor o mote do Dia Mundial da Água de 2024 "A Água nos une. O Clima nos move", as sessões técnicas englobaram temas como Água, Território e Agricultura; Eficiência Hídrica e Novas Origens; Ciclo Urbano da Água; Zonas Costeiras, Qualidade da Água; Inovação Tecnológica no Domínio da Água, sendo de destacar, por tema, o seguinte:

- Água, Território e Agricultura – foram apresentados 14 trabalhos que focaram as seguintes questões-chave: a) Relação da gestão do território com os modelos de governação da água, com enfoque na participação dos cidadãos, na gestão inteligente da informação e na adaptação às alterações climáticas; b) Relação água – paisagem, com destaque à influência da gestão da água na modelação e conservação da paisagem e à resiliência aos fenómenos climáticos extremos em meio mediterrânico; c) Gestão da água em regadio, com a apresentação de casos de estudo sobre modelação do solo e hidrológica, da digitalização no apoio à gestão de aproveitamentos e a reutilização de águas residuais tratadas; d) A relação das plantas com a escassez de água e a salinização do solo, com exemplos em áreas agrícolas e de árvores urbanas.

- Zonas Costeiras – foram apresentados 7 trabalhos que focaram os seguintes assuntos: a) Modelação de sistemas, nomeadamente de quebra-mar principal e de elevação de marés em estuário; b) Design e impactes de infraestruturas, tais como sistemas de infiltração, de dessalinização e de ETAR; c) Questões de proteção dos ecossistemas costeiros e do direito na União Europeia.

- Ciclo Urbano da Água – foram apresentados 13 trabalhos que focaram os seguintes assuntos: a) Sistemas de abastecimento, com referência à gestão e controlo das redes com inovações tecnológicas; b) Tratamento de águas residuais, abordando sistemas descentralizados e de emergência e a modelação da ação e controlo das águas pluviais; c) Análise de risco sanitário, nomeadamente em águas residuais hospitalares, em ETAR urbanas e em reutilização nos usos não potáveis.

- Eficiência Hídrica e Novas Origens – foram apresentados 7 trabalhos que focaram os seguintes assuntos: a) Redução de perdas, com estudos de caso municipais; b) Operação de reservatórios e captações, com recursos a modelação e monitorização de remota e a sistema de gestão de água subterrânea.

- Qualidade da Água – foram apresentados 4 trabalhos que focaram os seguintes assuntos: a) Abordagens colaborativas; b) Problemas de toxicidade de grande risco, como de poluentes orgânicos e microbiológicos; c) Relação com fatores ambientais.

- Inovação Tecnológica no Domínio da Água – foram apresentados 14 trabalhos que focaram os seguintes assuntos: a) Monitorização, incluindo novas tecnologias para redes urbanas e sistemas agrícolas, modelos digitais do terreno e recurso a imagens de satélite; b) Hidráulica costeira, incluindo modelos físicos para avaliação de danos e repositório de centralização de dados; c) Diversas inovações na

governança e gestão da água, incluindo soluções de retenção e adução de água, tecnologias de inteligência artificial na gestão de dados, modelos para segurança de colaboradores e modelos para melhoria da satisfação de clientes em redes urbanas.

As sessões foram bem participadas, tendo a audiência colocado variadas questões, sinalizando preocupação por questões relacionadas com sustentabilidade dos sistemas de gestão hídrica, em especial ênfase na escassez hídrica, nas novas fontes de abastecimento, na conservação do solo e dos ecossistemas, no contexto do desenvolvimento aos níveis regional e nacional.

## FINAL

A importância da Água para o desenvolvimento e sustentabilidade do país determina a atualidade e pertinência deste tema, em particular no presente cenário de incerteza. É crescente a exigência de bom uso, de equidade na utilização e de salvaguarda dos recursos naturais. A gestão da água continuará a suscitar dificuldades e controvérsias pelas variadas implicações sociais, económicas, ambientais e políticas, pelo que a participação da sociedade na reflexão desta preocupação desempenha um papel determinante. Através desta conferência, a APRH procurou contribuir para a discussão informada, abrangente e integrada dos desafios futuros na gestão da água.

A Conferência reconheceu a importância da partilha de conhecimento, do envolvimento das partes e da cooperação, das políticas públicas e da governança, do uso inteligente e da equidade na gestão da água. Este encontro, com destaque no calendário da comunidade global dos recursos hídricos, foi uma oportunidade para, em conjunto, se refletir e discutir questões fundamentais que determinam o futuro dos recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável. Foi dado destaque a medidas como o planeamento do território e ocupação do solo, a drenagem natural em meio urbano, a gestão integrada das infraestruturas construídas, a eficiência hídrica e o bom uso das fontes hídricas alternativas.

Na sessão de encerramento estiveram presentes o Presidente da Comissão Diretiva da APRH – Jorge Cardoso Gonçalves, a Presidente da Comissão Organizadora – Carla Antunes, o Presidente da Comissão Científica – José Manuel Gonçalves e Duarte Baltazar, jornalista que assegurou a cobertura do evento e que apresentou uma síntese deste (Relato da conferência). O fecho da Conferência foi assegurado pelo Reitor da Universidade do Algarve que felicitou a APRH por ter trazido a reflexão de um tema tão importante e fundamental para a região do Algarve, tendo referido que todos os setores de atividade têm obrigação de melhor compreender como podemos gerir este recurso, que é um bem de todos.

# Relato da Conferência Água - Desafios do Futuro

Duarte Baltazar

Informação Televisão

## SESSÃO PLENÁRIA 1 - POLÍTICAS LOCAIS E GOVERNANÇA

A primeira sessão plenária focou-se na importância da gestão multinível para melhor definição das políticas de eficiência hídrica.

A caracterização hidrológica do Algarve relevou uma redução de 29% da precipitação desde 2012 e que, em 2024, o valor deverá fixar-se nos 37%; a interanualidade das reservas de água nas albufeiras registou uma descida gradual desde 2018, até deixar de verificar-se em dezembro de 2023; o Algarve tem 13 massas de água subterrânea em estado crítico, um cenário mais alarmante do que em 2022 e 2005.

Foram sublinhados os resultados positivos das medidas de eficiência hídrica no concelho de Loulé e os investimentos do Plano Regional de Eficiência Hídrica do Algarve, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência, que prevê a poupança anual de 76 hm<sup>3</sup> de água na região; destacou-se a instalação de uma central dessalinizadora em Albufeira, as obras de minimização das perdas de água em circuito urbano e o recurso às águas para reutilização (ApR).

A respeito da barragem e aproveitamento hidroagrícola do Alqueva, foi abordada a prática de rega ultraeficiente e apresentado um projeto em curso, que prevê a instalação de painéis solares flutuantes nas águas da albufeira.

A influência do setor agrícola na escassez de água do Algarve dividiu alguns membros do painel. Vitor Aleixo considerou que a agricultura praticada no Algarve não tem “qualquer sentido nem sustentabilidade” e propôs “proibir o crescimento das áreas agrícolas”, posição fortemente contestada por Pedro Valadas Monteiro, que sublinha a importância da agricultura na “soberania nacional”

e conservação da paisagem, bem como os esforços que os agricultores têm feito ao longo dos anos agricultores na poupança de água.

## SESSÃO PLENÁRIA 2 - NOVAS ORIGENS: DESSALINIZAÇÃO

A segunda sessão plenária debruçou-se sobre a dessalinização de água para fins potáveis. O único exemplo de abastecimento público em Portugal é a unidade da ilha de Porto Santo, na Madeira, cujas condições edafoclimáticas são particularmente críticas e justificam também o recurso a águas para reutilização; foram apresentados projetos em curso, que visam a redução dos consumos energéticos associados à dessalinização em Porto Santo.

Foi feita uma apresentação atualizada do projeto de central dessalinizadora no Algarve, financiado pelo PRR em 90 milhões de euros e que deverá produzir anualmente um máximo de 24 hm<sup>3</sup> anuais, bem como um ponto de situação dos investimentos relativos às águas para reutilização (ApR), estimados em 23 milhões de euros. Ambos os projetos suscitam desafios, como a intrusão salina nas condutas de ApR ou a laboração contínua do sistema de osmose inversa, cuja água produzida será (ou perspectiva-se que seja) mais cara para o consumidor final. Levantaram-se dúvidas sobre quem deve pagar os custos operacionais da dessalinização, se o consumidor urbano ou o regante (que beneficiará de um “excedente” nas águas superficiais).

## SESSÃO PLENÁRIA 3 - ÁGUA E TERRITÓRIO

A terceira sessão plenária propôs-se a relacionar a escassez hídrica com uma série de outras variáveis territoriais, biofísicas, urbanísticas e administrativas/políticas. Houve oportunidade para sublinhar a importância do solo e o seu potencial na retenção de água e a importância dos sistemas de informação, como o Projeto TER-AGUA, para melhor gestão das bacias hidrográficas do país.

## SESSÃO PLENÁRIA 4 - NOVAS ORIGENS: POMARÃO/FOUPANA

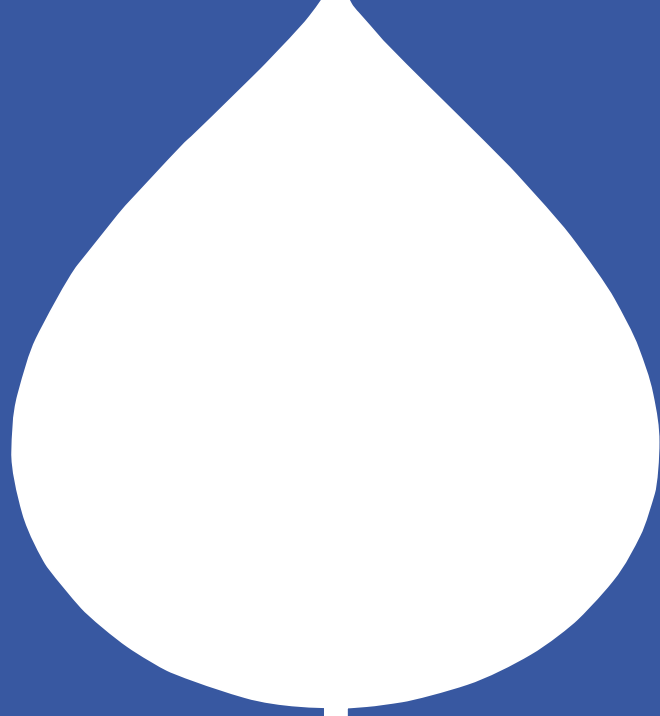
A quarta sessão plenária abordou, à semelhança da segunda, novas origens de água para o Algarve, que têm sido discutidas como como possíveis

soluções e que se encontram já em fase de estudo, como sejam a captação do rio Guadiana, feita na zona do Pomarão (Mértola), ou a construção da barragem da Foupana, que divide opiniões. Foram apresentados os desafios e resultados positivos da empresa pública Inframoura, como entidade gestora do abastecimento em baixa em Vilamoura, no que à eficiência hídrica diz respeito.

## **SESSÃO PLENÁRIA 5 - INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E GESTÃO INTEGRADA DA ÁGUA**

Na quinta e última sessão plenária, houve oportunidade para sublinhar a importância, na gestão integrada da água, das políticas públicas e de regulação, como incentivos fiscais e subsídios, bem como do diálogo entre stakeholders, das tecnologias de sensorização e proteção eficaz dos ativos elétricos contra incêndios (como formas de reduzir custos operacionais), das comunidades urbanas de água (com aproveitamento de águas pluviais, que em Portugal está muito atrasado), dos sistemas de drenagem sustentável, do nexo água-energia-nutrientes nos sistemas urbanos, da digitalização do setor da água, das soluções baseadas na natureza, da adaptação social e da coesão nacional.





# Artigo de Opinião



# Contributos para a eficiência no ciclo urbano da água

## *Contributions for the efficiency of the Urban Water cycle*

*Eduardo Vivas*

*Fundador e Diretor da Aquaurb Engenharia, Associado APRH nº 1678, Membro da Comissão Especializada dos Serviços de Águas,  
Presidente da Assembleia Regional do Norte da APRH*

**RESUMO:** O ciclo urbano da água, responsável pelo abastecimento de água às populações e pela drenagem de águas residuais, evoluiu, de forma notável, em Portugal, nos últimos 30 anos. Não obstante, numa fase em que a perspetiva principal já não é a de expansão dos sistemas, importa avaliar e fomentar a eficiência desses sistemas, procurando garantir um serviço tão bom, ou ainda melhor, com o consumo de menos recursos.

Nesse sentido, no presente artigo é efetuada uma reflexão sobre a evolução dos níveis de eficiência do setor, tomando por base os dados disponíveis nos relatórios de avaliação da qualidade de serviço do regulador (ERSAR). A avaliação efetuada incide sobre uma análise da eficiência hídrica (focando nas perdas nos sistemas de abastecimento e nas aflúncias pluviais indevidas nos sistemas de águas residuais), bem como da eficiência energética para tentar inferir sobre a eficiência global do ciclo urbano da água.

**Palavras-chave:** Abastecimento de água, sistemas de águas residuais, perdas, aflúncias indevidas, eficiência energética

**ABSTRACT:** *The urban water cycle responsible for supplying water to populations and collecting and treating wastewater has evolved remarkably, in Portugal, over the last 30 years. However, since the main perspective is no longer to expand systems, it is important to evaluate and promote the efficiency of these systems, seeking a service as good, or even better, than current situation, with the consumption of fewer resources.*

*In this sense, this article collects some thoughts on the evolution of the efficiency levels in this sector, based on the data made available by the regulator (ERSAR) on the quality-of-service assessment reports. For that, an analysis of water efficiency (focusing on losses in supply systems and rainfall derived infiltration inflows to wastewater systems) and energy efficiency is considered, to try to assess the overall efficiency of the urban water cycle.*

**Keywords:** *Water supply, wastewater systems, water losses, rainfall-derived infiltration inflows, energy efficiency*

## ENQUADRAMENTO

O ciclo urbano da água, responsável pelo abastecimento de água às populações e pela drenagem de águas residuais, evoluiu, em Portugal, de forma notável, nos últimos 30 anos.

Tal como salientado no Plano Estratégico para o Abastecimento de Água e Gestão de Águas Residuais e Pluviais 2030 – PENSAARP 2030<sup>1</sup>, recentemente aprovado, destaca-se a evolução, em Portugal Continental, ao nível da cobertura de serviços de abastecimento de água, atingindo-se, em 2022, 96% de alojamentos servidos, ou da drenagem e tratamento de águas residuais, onde se conta com mais de 85% de alojamentos servidos.

Ao nível da qualidade do serviço, também se denota uma evolução bastante significativa, com a percentagem de alojamentos servidos com água segura, face à legislação europeia e nacional, a evoluir de 50% para 98,99%. Também nesse sentido, ao nível da drenagem, se verifica uma melhoria muito significativa da qualidade das águas interiores e balneares, como se poderá aferir pelo aumento considerável de praias fluviais e costeiras com Bandeira Azul, ou mesmo Qualidade Ouro, que passaram de menos de 90, para mais de 350, em ambos os casos.

Não obstante, numa fase em que a perspetiva principal já não é a de expansão dos sistemas, importa avaliar e fomentar a eficiência desses sistemas, procurando garantir um serviço tão bom, ou ainda melhor, com o consumo de menos recursos.

Este aspeto assume especial relevância, numa altura em que são cada vez mais os desafios que se perspetivam para o futuro no setor: a incerteza associada ao clima, as maiores exigências face a novas diretivas, a demografia da sociedade portuguesa (e também dos recursos humanos do setor), o aumento dos custos de investimento e de operação, a maior atenção e exigência, por parte da sociedade, em relação às questões ambientais, etc. Nesse sentido, no presente artigo é efetuada uma reflexão sobre a evolução dos níveis de eficiência do setor, segundo diferentes vertentes (hídrica e energética) e tomando por base os dados disponíveis nos relatórios de avaliação da qualidade de serviço do regulador (ERSAR)<sup>2</sup>, procurando inferir sobre a eficiência global do ciclo urbano da água.

Nota: Este artigo resulta de uma compilação e adaptação de pequenos artigos de opinião

---

1 - PENSAARP2030 | Agência Portuguesa do Ambiente (apambiente.pt)

2 - ERSAR - Relatório Anual do Setor

anteriormente publicados, pelo autor, na plataforma LinkedIn, sobre este tema<sup>3</sup>.

## PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Sendo esta uma questão extremamente relevante para a eficiência de funcionamento do setor, não se poderão, todavia, ignorar as circunstâncias de conceção, instalação, operação e até de gestão destes sistemas, sob pena de não se compreenderem as razões subjacentes à perda (económica) de quase 30% do volume que entra no sistema (parcela de água não faturada).

De facto, estes sistemas são concebidos para funcionar em pressão, desenvolvendo-se, ao longo de muitos quilómetros, enterrados e estando sujeitos a um conjunto significativo de ações internas (flutuações de pressões, velocidades de escoamento, etc.) e externas, em especial em meio urbano (sobrecarga por tráfego viário, variações de temperatura, ação sísmica, ou mesmo intervenções na própria infraestrutura, ou em infraestruturas das imediações e que provocam danos sobre estes sistemas).

Acresce, a todos estes fatores, a idade considerável dos sistemas, de várias décadas na maioria dos casos, sem que se verifique uma significativa reabilitação e renovação dos mesmos, fundamentalmente pelos elevados investimentos necessários e com todas as implicações que se adivinham no reflexo sobre as tarifas dos consumidores.

Por outro lado, ao nível da gestão e operação dos sistemas importa salientar que, até recentemente, a principal preocupação das entidades era a de fiabilidade e garantia do serviço (minimização de interrupções, ou falhas no abastecimento).

Em todo o caso, verifica-se, em especial nos últimos 10 anos, que as entidades têm vindo a dedicar maior atenção ao problema da eficiência hídrica, ainda que com diferentes níveis de sucesso, no espectro das quase 250 entidades que asseguram (em alta e em baixa) o abastecimento de água à população. De facto, para quem não é do setor, podem parecer

---

3 -

[Contributos para a eficiência do ciclo urbano da água - 1 | LinkedIn](#)

[Contributos para a eficiência do ciclo urbano da água - 2 | LinkedIn](#)

[Contributos para a eficiência do ciclo urbano da água - 3 | LinkedIn](#)

[Contributos para a eficiência do ciclo urbano da água - 4 | LinkedIn](#)

[Contributos para a eficiência do ciclo urbano da água - 5 | LinkedIn](#)

caricatas as dificuldades em controlar os volumes de água perdidos. Convém, no entanto, pensar que os sistemas estão no subsolo, logo, não são visíveis e há muitas situações em que apenas existem medições em contínuo dos volumes de água na entrada dos sistemas.

As medições nos contadores dos clientes finais, espalhados pelo aglomerado populacional, normalmente não são avaliadas em contínuo, existem erros (de medição, por estimativas, ou por ilícitos) e não são reportadas em tempo útil (dependente das rotinas de leitura dos contadores). Como tal, com a exceção das situações em que se verifica uma rotura de grandes dimensões, o volume mais significativo das perdas tende a ocorrer por pequenas fugas que se verificam ao longo dos sistemas, sendo estas de difícil identificação e ainda mais complexa localização.

Obviamente, existe, hoje, um nível bastante avançado e sólido de conhecimento e de meios, inclusive tecnológicos, à disposição das entidades nesta matéria e que ajudam, sobremaneira, a reduzir estas dificuldades e a fazer um controlo bastante mais apertado dos níveis de água perdidos.

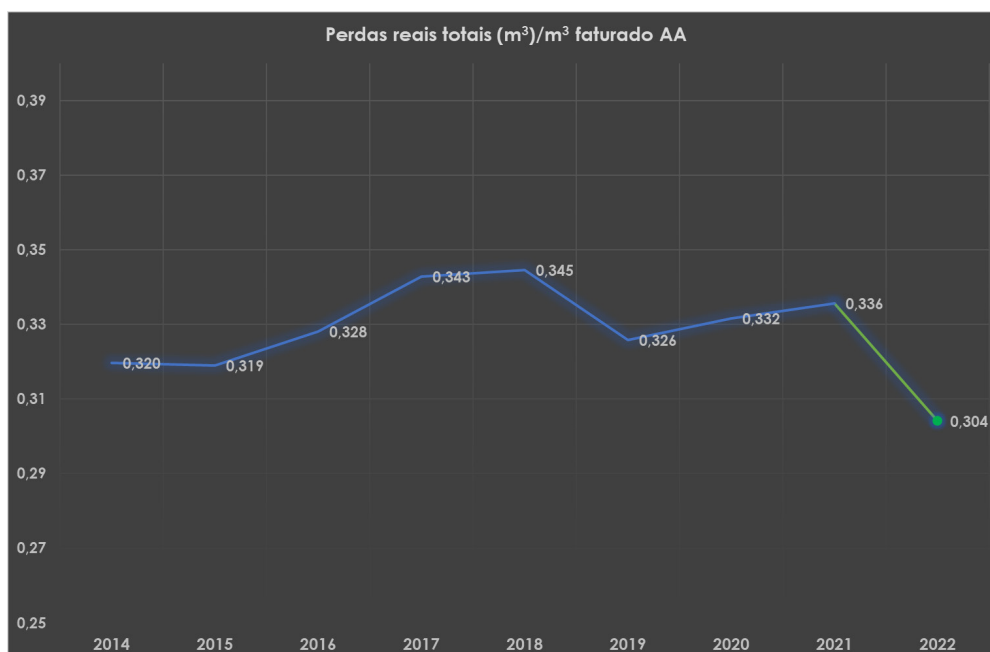
O conhecimento aprofundado das características do sistema (cadastro e clientes) e do funcionamento hidráulico do sistema (incluindo as condicionantes operacionais) serão sempre os pilares fundamentais para um adequado controlo de perdas, aos quais deverá acrescer a subdivisão dos sistemas em zonas de monitorização e controlo (ZMC), a adequada gestão do parque de contadores e ilícitos, bem como a otimização da regulação de pressões (incluindo,

em alguns casos, a alteração da configuração dos sistemas). Importará, igualmente, identificar as infraestruturas que, pelo seu degradado estado de condição, se considera que atingiram, ou estão próximas de atingir, o final da vida útil e deverão ser reabilitadas ou substituídas.

Por outro lado, a chamada pesquisa ativa de fugas, que corresponde, no fundo, à identificação e localização dessas fugas, exerce, igualmente, um papel fundamental e não poderá ser descurada pelas entidades. Para o efeito estão já disponíveis inúmeras tecnologias (acústicas e não acústicas, de monitorização pontual ou contínua, com ou sem apoio de ferramentas de inteligência artificial), em que a aplicabilidade e respetivas vantagens e desvantagens deverão ser avaliadas de acordo com as características dos sistemas e, obviamente, também do potencial da perda económica recuperável.

Assim, atendendo a que o problema é complexo, mas há forma de o controlar, importa avaliar em que ponto o setor se encontra e qual a tendência de evolução, partindo dos valores disponibilizados, pelo regulador (ERSAR), no âmbito das avaliações anuais às entidades (RASARP).

Para tal, propõe-se a avaliação de um rácio de  $\text{m}^3$  de perdas reais, por  $\text{m}^3$  de volume faturado aos consumidores, cujos valores e tendência de evolução, de 2014 a 2022, inclusive, são apresentados no Gráfico 1. Note-se que as perdas reais avaliadas correspondem ao somatório dos valores totais das entidades em alta e em baixa, traduzindo, no fundo, o volume perdido fisicamente, ao longo de todo o sistema, para o fornecimento de  $1\text{m}^3$  ao cliente final.



**Gráfico 1.** Perdas reais totais (em  $\text{m}^3$ ), por  $\text{m}^3$  faturado no abastecimento urbano.

Apesar de existirem algumas flutuações, a tendência global de evolução, até ao ano de 2021, inclusive, era de aumento do nível de perdas reais por volume faturado. No entanto, em 2022, verifica-se uma importante redução do valor global de perdas reais, atingindo-se, mesmo, o valor mais reduzido, do rácio analisado, desde o ano de 2014.

Importa, no entanto, referir que, no ano de 2019, houve um apoio para o controlo de fugas e perdas, com recurso a fundos comunitários, no âmbito do POSEUR<sup>4</sup>, a que muitas entidades concorreram. No âmbito dessas candidaturas, muitas empreitadas, de implementação de Zonas de Monitorização e Controlo (ZMC), de instalação de válvulas reguladoras de pressão (VRP) e de reabilitação de algumas infraestruturas, decorreram nos anos seguintes, parecendo que os resultados de 2022 já refletem os resultados de alguns desses investimentos e de uma maior preocupação das entidades com este tema.

Sendo um resultado positivo, importa salientar que se verifica, ainda, uma perda real de 3 m<sup>3</sup>, ao longo de todo o sistema, para fornecer 10 m<sup>3</sup> ao cliente final. Assim, o caminho a percorrer parece estar definido e a dar resultados. No entanto, haverá que reforçar e alavancar esta aposta para a melhoria da eficiência hídrica no abastecimento de água.

## AFLUÊNCIAS INDEVIDAS EM SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS

Os sistemas de águas residuais existem com o propósito de resolver o problema da utilização da água ao nível dos edifícios/utilizadores. A água resultante dessa utilização vê a sua qualidade adulterada, pelo que é necessária a remoção de carga poluente antes da devolução ao meio recetor. Para o efeito, há que transportar a água residual dos edifícios, por uma rede de coletores, até às múltiplas Estações de Tratamento de Águas Residuais que, posteriormente, farão a descarga da água tratada ao nível das massas de água interiores, ou costeiras. A partir de meados do século XX, começou a generalizar-se, em Portugal, a conceção e construção de sistemas de drenagem do tipo separativo, em que existem dois sistemas de drenagem com redes de coletores próprias, um para a drenagem das águas residuais (domésticas e industriais) e outro para a drenagem de águas pluviais. Uma boa parte dos sistemas mais antigos (do tipo unitário, com drenagem conjunta de águas residuais e pluviais) foram já reformulados e reconvertidos em sistemas

separativos e, segundo o regulamento geral dos sistemas de distribuição e drenagem de águas residuais (D.R. 23/95 de 23 de agosto), na conceção de sistemas novos deve ser adotado, em princípio, o sistema separativo.

De acordo com a informação reportada pelas entidades gestoras ao regulador (ERSAR), a expressão dos sistemas unitários a nível nacional será inferior a 18% da extensão total das redes de drenagem de águas residuais (dados de 2022). Mesmo admitindo algum erro na estimativa, poderá assumir-se que a larga maioria destes sistemas será do tipo separativo. Ainda assim, tal não significa que, num sistema separativo, sejam recolhidos apenas os volumes de água residual gerados no aglomerado. Na verdade, existem afluências adicionais a essas redes de coletores que derivam, direta ou indiretamente da precipitação e que, nesta situação, se designam, habitualmente, por afluências indevidas.

Em situações pontuais, essas afluências até poderão ser benéficas, melhorando as condições de arrastamento de sólidos que depositem ao longo da rede. Porém, na grande maioria das situações, as afluências indevidas constituem um sério problema de eficiência de funcionamento destes sistemas, que transportam e tratam caudais em excesso.

Nas situações mais críticas e em especial nas épocas mais húmidas, as afluências indevidas revelam-se, igualmente, um problema operacional significativo, com condicionamento do funcionamento dos sistemas de bombagem e de tratamento e conduzem, muitas vezes, a um problema ambiental. De facto, sempre que é ultrapassada a capacidade destes sistemas, verifica-se uma descarga (em descarregadores, de emergência ou de tempestade, previstos para o efeito) ou um extravasamento (em que, em pontos críticos, se verifica a saída de caudal pelos pontos de contacto destes sistemas com o exterior, por ex. pelas tampas das câmaras de visita). Nestas situações, o efluente não sofreu qualquer tratamento e poderá ser uma fonte de poluição significativa para o meio natural.

Fundamentalmente, na origem das afluências indevidas aos sistemas de águas residuais (doravante AR) está, então, a entrada de água, de origem pluvial, de forma direta ou indireta.

A entrada direta corresponde a um aumento quase imediato dos caudais em circulação nas redes de AR aquando de uma chuvada e resulta da existência de ligações indevidas da drenagem de águas pluviais aos sistemas de AR, ou de escorrência direta, a partir de tampas não estanques das câmaras de visita, por exemplo.

Por sua vez, a entrada indireta, de efeito mais prolongado no tempo, corresponde à infiltração de

4 - POSEUR-12-2018-18 | Perdas de Água nos Sistemas em Baixa | PO SEUR (portugal2020.pt)

água do subsolo, que entra nos sistemas de AR por eventuais fissuras, quebras, ou deficientes ligações nos diversos elementos (coletores, câmaras de visita, ramais, etc.), que podem resultar do simples facto de estes sistemas estarem enterrados e sujeitos a ações (variação de temperatura, sobrecargas por circulação viária, assentamentos, etc.).

Nestas situações, como a pressão no interior da rede de coletores é igual à atmosférica, se o terreno envolvente estiver saturado, a pressão será maior no exterior do que no interior, conduzindo à entrada de água na rede de AR, pelas fissuras ou irregularidades que existam.

Por analogia com as perdas nos sistemas de abastecimento de água, poderá dizer-se que, também neste caso, a identificação e localização destes problemas é complexa. Porém, no caso das aflúências indevidas, os meios de deteção são mais limitados e onerosos, resumindo-se, em grande medida, à monitorização de alguns parâmetros (caudais, precipitação, qualidade) e à inspeção direta (de coletores e câmaras de visita).

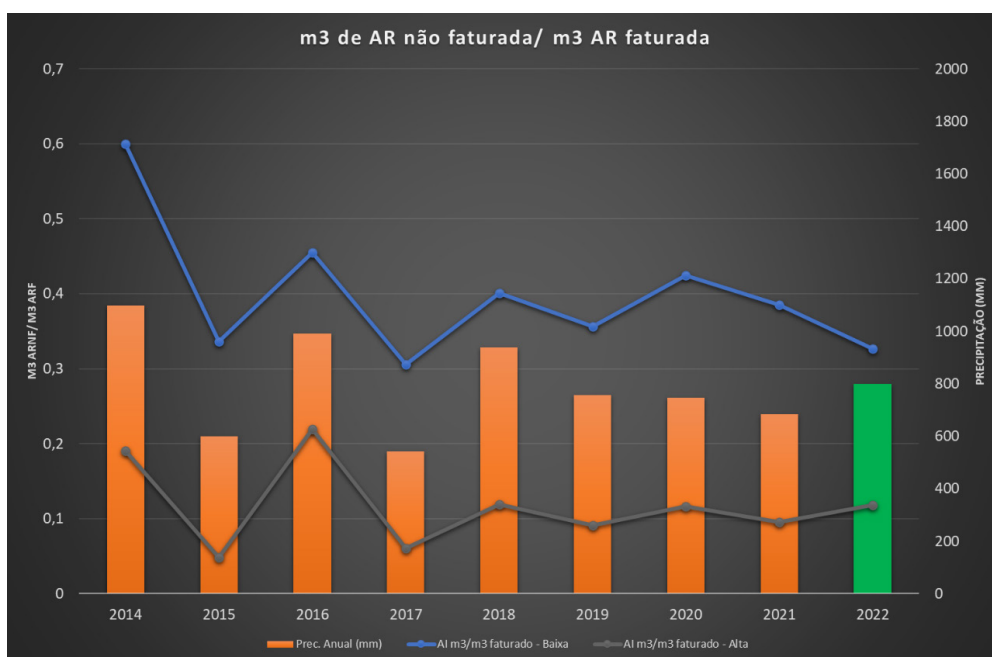
Note-se que, ao contrário do que se verifica nos sistemas de abastecimento, as aflúências indevidas não são, em geral, persistentes no tempo e as condições de inspeção, idealmente em tempo de chuvada, são muito limitadas, ou mesmo impossíveis, o que condiciona a eficácia na deteção dos pontos de entrada de água no sistema. De igual forma, não existe um meio de controlo (ex. pressão nos sistemas de abastecimento) que permita reduzir as aflúências indevidas, restando, essencialmente, a eliminação de ligações ilícitas e a reabilitação dos sistemas.

Tal não significa, contudo, que as entidades não devam apostar: numa melhor caracterização do problema, na monitorização (ainda que complexa) dos sistemas, num melhor conhecimento do funcionamento hidráulico dos sistemas e das suas limitações, na aferição, com métricas de desempenho adequadas, das zonas mais críticas onde intervir e na introdução de meios técnicos e tecnológicos mais avançados para melhorar a gestão destes sistemas. A redução das aflúências indevidas é, inclusivamente, um dos objetivos de prioridade 1 do Plano Estratégico para o setor (PENSAARP 2030), recentemente aprovado e publicado.

Atendendo aos avultados investimentos que a reabilitação destes sistemas implica, será muito relevante olharmos para o panorama atual do setor, ao nível das aflúências indevidas, bem como para a evolução que se tem vindo a sentir, de acordo com os dados disponíveis pela ERSAR, no âmbito dos relatórios anuais do setor (RASARP).

Não havendo, no quadro da avaliação da qualidade de serviço, uma quantificação específica dessa parcela, poderá considerar-se, tal como já o fazem algumas entidades, a avaliação da diferença entre os dados de volumes recolhidos e os volumes faturados que corresponde, no fundo, à parcela de água residual não faturada.

Para avaliar tendências, considera-se, então, a representação do rácio de  $m^3$  de água residual não faturada, por  $m^3$  de água residual faturada, sendo apresentados, no Gráfico 2, os valores globais, desde 2014 a 2022, para as entidades em baixa e para as entidades em alta. Como as aflúências indevidas



**Gráfico 2.** Rácio de  $m^3$  de água residual não faturada por  $m^3$  de água residual faturada e comparação com dados de precipitação anual (mm).

são influenciadas pela precipitação, apresentam-se, igualmente, os totais de precipitação anual, para esses anos, segundo os dados do IPMA<sup>5</sup>.

Saliente-se, porém, que não é claro que se possam adicionar estes dois valores de água não faturada, na medida em que tudo depende do que as entidades em baixa reportam como volume recolhido (na ETAR, ou em pontos de medição, se existentes, no sistema interceptor) e do esquema de faturação estabelecido com as entidades em alta (que poderá prever limitações e descontos).

Como facilmente se pode verificar por análise do gráfico, apesar de a grande maioria dos sistemas ser do tipo separativo, os volumes de AR recolhida sofrem uma influência significativa dos níveis de precipitação verificados, podendo atingir-se quase o dobro do volume de água residual não faturada em anos mais húmidos, face a anos mais secos.

Importa salientar que, ao nível das entidades em baixa, se verifica um acréscimo de volume em circulação nos sistemas de pelo menos 3 m<sup>3</sup> por cada 10 m<sup>3</sup> faturados aos clientes, podendo atingir-se valores bastante superiores em anos húmidos, enquanto, nas entidades em alta, se verifica, igualmente, uma média superior a 1 m<sup>3</sup> por cada 10 m<sup>3</sup> faturados, neste caso, às entidades em baixa. Porém, tal como se pode verificar por análise mais detalhada do gráfico, em particular dos últimos 4 anos (2019 a 2022), parece que a clara relação com a precipitação, que se verifica nos anos anteriores, deixa de existir.

5 - Instituto Português do Mar e da Atmosfera (ipma.pt)

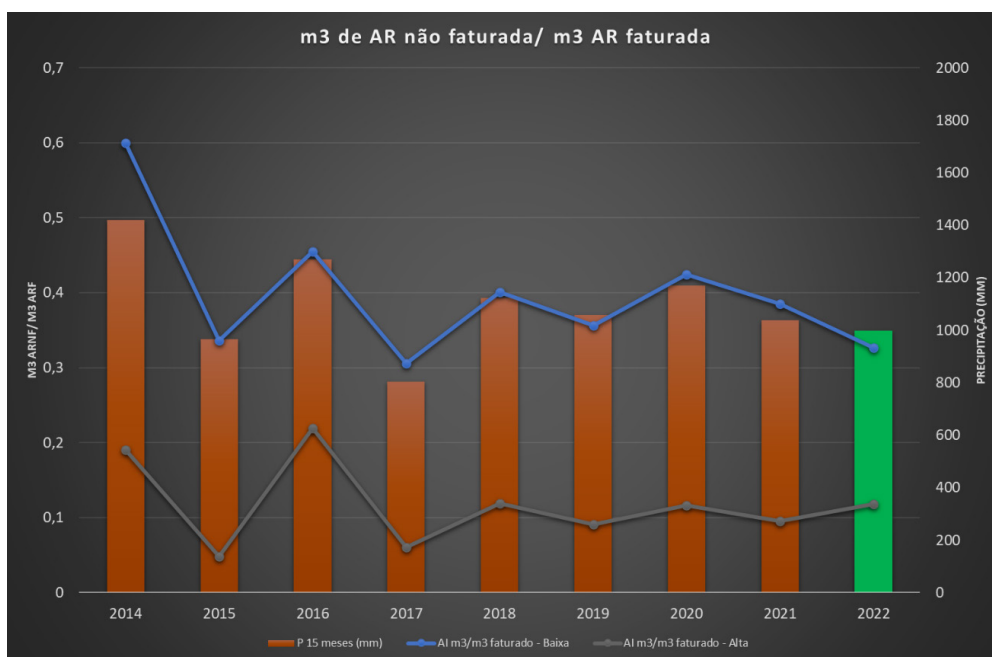
De facto, apesar de a precipitação anual do ano de 2020 ser ligeiramente inferior a 2019, os níveis de aflúncias indevidas sobem. De igual forma, no ano de 2021, apesar de a precipitação ser cerca de 10% inferior ao verificado em 2019, os níveis de água residual não faturada são superiores em 2021. Por fim, verificando-se, no ano de 2022, a maior precipitação anual desses 4 anos, os níveis de água não faturada nas entidades em baixa reduzem, significativamente.

Importa não esquecer, todavia, que mais de 2/3 da precipitação anual concentra-se, habitualmente, nos períodos de outono e inverno, pelo que os níveis de água presentes no subsolo são muito dependentes dos níveis de precipitação que se verificam no conjunto desse período mais húmido. No entanto, uma análise segundo a precipitação anual (de janeiro a dezembro) separa o período mais húmido a meio: o outono, de outubro a dezembro, num ano e o inverno, de janeiro a março, no ano seguinte.

É por esse motivo que, na hidrologia, se avaliam os dados meteorológicos segundo o ano hidrológico, isto é o período que decorre entre o início da época de chuvas (outubro) e o fim do período seco (setembro do ano civil seguinte).

Não obstante, os dados disponibilizados pela ERSAR em relação aos sistemas de AR são avaliados na escala do ano civil, não sendo, por isso, possível uma comparação direta com os dados de precipitação segundo o ano hidrológico.

Nesse sentido, propõe-se a análise de um novo



**Gráfico 3.** Rácio de m<sup>3</sup> de água residual não faturada por m<sup>3</sup> de água residual faturada e comparação com dados de precipitação acumulada de 15 meses (mm).



gráfico (Gráfico 3) introduzindo um outro parâmetro que é a precipitação, em cada ano, correspondente ao total de 15 meses, ou seja, integrando, além da precipitação de cada ano civil, o verificado, também no outono do ano anterior, de outubro a dezembro, para tentar incorporar o efeito sobre os níveis de água no subsolo.

Tal como se pode verificar, a relação entre os valores de precipitação acumulada de 15 meses e os níveis de água residual não faturada passa, assim, a ser quase linear, em especial nos sistemas em baixa, confirmando-se a importância da precipitação do período húmido para os níveis de água no subsolo e a razão, pela qual, os níveis de água residual não faturada aumentam em 2020, apesar de a precipitação, no ano civil, reduzir.

Assim, apesar de se assistir a uma redução, nos últimos 3 anos, de 2020 a 2022, da parcela de água residual não faturada, tal não deixa, todavia, de coincidir com uma redução dos níveis de precipitação, desconhecendo-se se existirá, ou não, algum resultado de um melhor controlo das afluências indevidas nestes sistemas.

Por outro lado, ao nível das entidades em alta, é possível verificar, no ano de 2022, uma inversão de tendência em relação aos dados da precipitação de 15 meses, ao contrário do que se verificou em todos os anos anteriores, desde 2014 e também ao contrário do que se verifica por comparação com as entidades em baixa. Desconhece-se a razão por detrás desta inversão de tendência, ficando a dúvida, para uma eventual análise futura.

Em todo o caso, parece ser possível concluir que a influência do meio natural sobre os sistemas de AR é relevante e que a gestão integrada destes sistemas com a gestão das águas pluviais, tal como se perspetiva, também, pela nova DARU, será um importante caminho a explorar, havendo, ainda um trabalho significativo a realizar para fazer para um maior controlo destas afluências aos sistemas de águas residuais.

## CONSUMO DE ENERGIA NO CICLO URBANO DA ÁGUA

Para análise do consumo de energia neste setor, centre-se, em primeiro lugar, a avaliação na evolução, no período de 2014 a 2022, do indicador de eficiência energética, considerado, pela ERSAR, no âmbito dos Relatórios Anuais dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal Continental (RASARP).

Esse indicador, aplicado, em específico, às estações elevatórias, surge, no Gráfico 4, individualizado segundo o tipo de sistema (abastecimento de água – AA, ou saneamento – AR), sendo, ainda, subdividido nas entidades gestoras (EG) que atuam em alta e em baixa.

Este indicador, que corresponde a uma adaptação do consumo específico (i.e. kWh/m<sup>3</sup>), pretende atender ao facto de o consumo de energia ter de ser naturalmente diferente, se, no bombeamento do mesmo caudal, a altura de elevação for de 10m, ou de 50m, por exemplo.

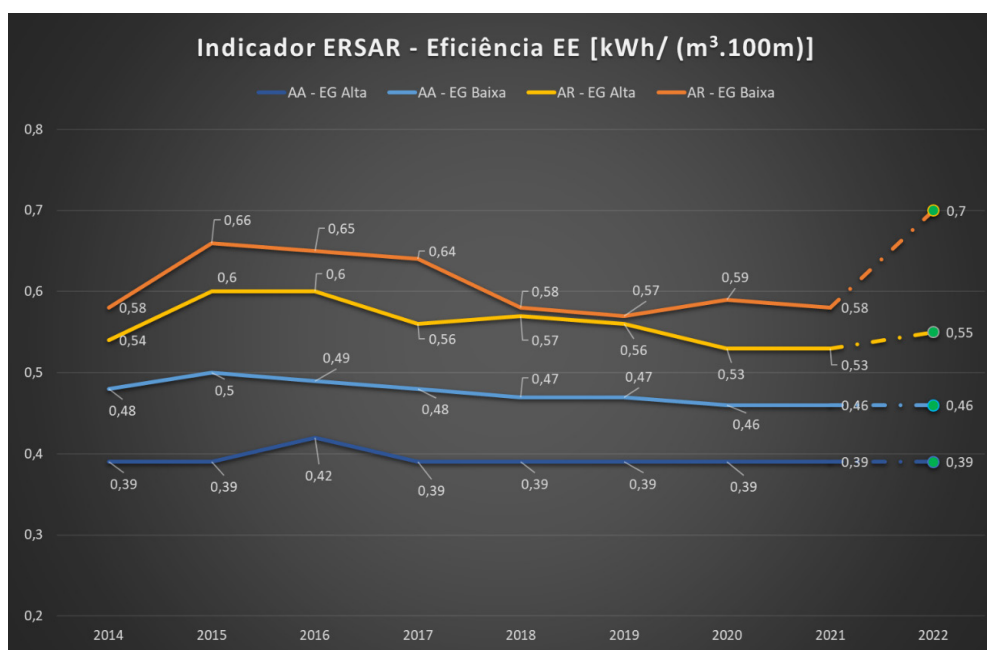


Gráfico 4. Indicador ERSAR de Eficiência Energética de EE (kWh/(m<sup>3</sup>.100m))

Como tal, o indicador avaliado pelo regulador uniformiza (e bem) a avaliação do consumo específico de energia para todas as instalações de bombagem, quantificando o consumo de energia que seria necessário para elevar 1 m<sup>3</sup> a 100m. Na prática, com esse ajuste, os valores obtidos são diretamente relacionáveis com o rendimento médio global (ou eficiência) dos sistemas de bombagem, sendo que o valor de 0,27 kWh/(m<sup>3</sup>.100m) corresponde ao mínimo absoluto, para um rendimento de 100% e o valor de 0,54 kWh/(m<sup>3</sup>.100m), p.e., corresponde a um rendimento global de 50%. Tal permite, igualmente, a comparação e o benchmarking das diferentes instalações, sistemas e entidades.

Olhando para os resultados obtidos, a primeira conclusão que se poderá inferir é a de que os valores são muito distintos entre o abastecimento de água e o saneamento, assim como entre a alta e a baixa. Porém, tal advém, naturalmente, do tipo de equipamentos de bombagem utilizados: de maior eficiência para o bombeamento de águas limpas e, obviamente, também, tanto mais eficientes, quanto maior a sua dimensão (caudal bombeado), logo com melhores valores nos sistemas em alta.

Por outro lado, ao nível do abastecimento de água confirma-se uma certa estagnação de valores deste indicador, quer na alta, quer na baixa, em relação aos últimos anos. Ainda que os resultados não possam ser considerados maus, convém salientar que os resultados obtidos no abastecimento correspondem, na alta, a uma eficiência global de cerca de 70% e, na baixa, um pouco inferior a 60%, havendo margem para algumas melhorias.

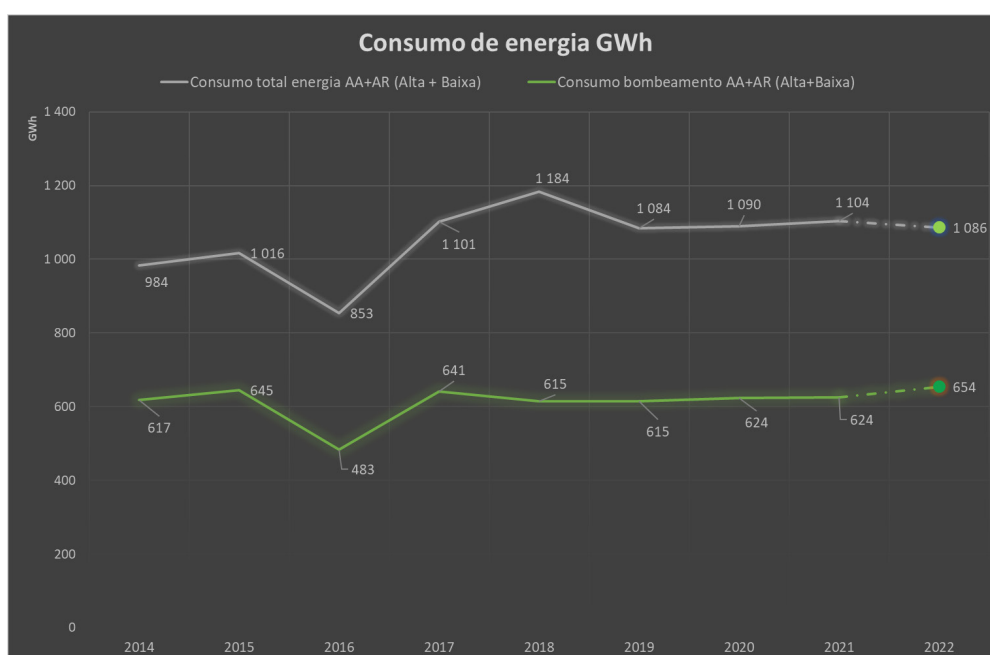
Por outro lado, ao nível das estações elevatórias de águas residuais, verifica-se que os resultados pioram, em 2022, face a 2021, sendo tal especialmente notório nas entidades em baixa, com o valor do indicador a atingir o registo mais elevado desde 2014.

Importa salientar, todavia, que no ano de 2022, iniciou-se a aplicação da 4ª geração de indicadores de avaliação da qualidade de serviço. Ainda que este indicador, em si, não tenha sofrido alterações, é um facto que passou a ser considerado que todas as instalações deveriam ser reportadas para o cálculo do mesmo, ao contrário do que se verificava anteriormente (que estava dispensado de reporte para instalações com caudal inferior a 10 l/s).

Como tal, a redução dos níveis de eficiência verificados nos sistemas de águas residuais (tanto em baixa, como em alta) poderão resultar dessa alteração de pressuposto, passando a ser reportadas as instalações de menor dimensão (também menos eficientes), face ao que se verificava em anos anteriores.

De forma análoga ao salientado para o abastecimento de água, note-se que os níveis globais de eficiência das estações elevatórias de águas residuais são um pouco inferiores a 50%, na alta, e abaixo de 39%, na baixa, havendo, igualmente, margem para melhorias.

Considerando, agora, uma análise dos consumos de energia globais, apresenta-se, no gráfico 5, a evolução dos consumos de energia totais para o setor (AA+AR), destacando, igualmente, a componente específica para o bombeamento (AA+AR).



**Gráfico 5.** Consumo de energia global e consumo de energia para bombeamento (AA+AR)

Os consumos de energia considerados correspondem ao agregado dos valores totais reportados pelas diferentes entidades. Assim, para o AA considera-se o total de consumo de energia, somando as entidades em alta e as entidades em baixa e, de igual forma, o mesmo foi considerado para a drenagem de AR. Na avaliação global é efetuada a soma do consumo de energia de todas as entidades do setor (alta e baixa, AA e AR). A título indicativo, saliente-se que, no ano de 2021, o consumo de energia global deste setor correspondeu a mais de 1100 GWh, cerca de 2,3% do total de consumo de energia elétrica nacional e equivalente ao consumo global de iluminação de vias públicas.

Considerando a evolução dos valores ao longo dos anos, é possível, desde logo, verificar alguma inconsistência de valores, em especial nos anos de 2016 e 2018. Tal deve-se, no ano de 2016, à falta de reporte de uma parte muito relevante de consumo de energia do abastecimento de água e, no ano de 2018, a um muito provável erro no reporte do consumo de energia de uma ou mais entidades, constituindo, igualmente, um valor anómalo.

Por outro lado, verifica-se que os valores nos anos iniciais de reporte são, também, um pouco inferiores ao verificado atualmente. Tal dever-se-á, muito provavelmente, a um período de adaptação e de melhoria dos dados das próprias entidades, que resultou numa melhoria do conhecimento e da caracterização do funcionamento das infraestruturas a nível nacional.

Depuradas essas questões, parece existir uma tendência geral de aumento dos consumos de energia. Centrando a análise nos anos de 2019 a 2021, inclusive, verifica-se um ligeiro aumento dos consumos globais de energia (cerca de 1,8%), sendo que, até 2021, o consumo de energia para bombeamento não atingia os 60% dos consumos de energia totais.

Porém, em 2022, verifica-se uma redução dos consumos globais de energia na ordem dos 18 GWh, face a 2021, ainda que se verifique um aumento dos consumos de energia específicos para bombeamento, na ordem dos 30 GWh, em igual período.

Não é, todavia, expectável, face aos dados disponíveis, que se verifique a ocorrência de ganhos, por melhoria da eficiência energética, de quase 50GWh, nos demais consumos de energia de todo o setor, permitindo absorver o acréscimo de consumos para bombeamento e ainda essa redução de 18 GWh do consumo global.

Nesse sentido, poderá, então, inferir-se que o aumento registado no consumo para bombeamento se deverá a terem sido reportados, com a 4ª geração de indicadores, como sendo de bombeamento, alguns

dos consumos de energia que já eram quantificados a nível global.

Por outro lado, como anteriormente se pode concluir, ao nível da eficiência energética das estações elevatórias, não parece haver melhorias e não existem, atualmente, indicadores que permitam avaliar os níveis de eficiência energética noutras fases do ciclo urbano da água, nomeadamente no tratamento de águas. Ainda assim, os níveis de consumo de energia globais reduziram.

## AVALIAÇÃO GLOBAL DE EFICIÊNCIA

Como poderá, então, ser efetuada uma avaliação da eficiência global do setor, atendendo às múltiplas questões elencadas nos pontos anteriores?

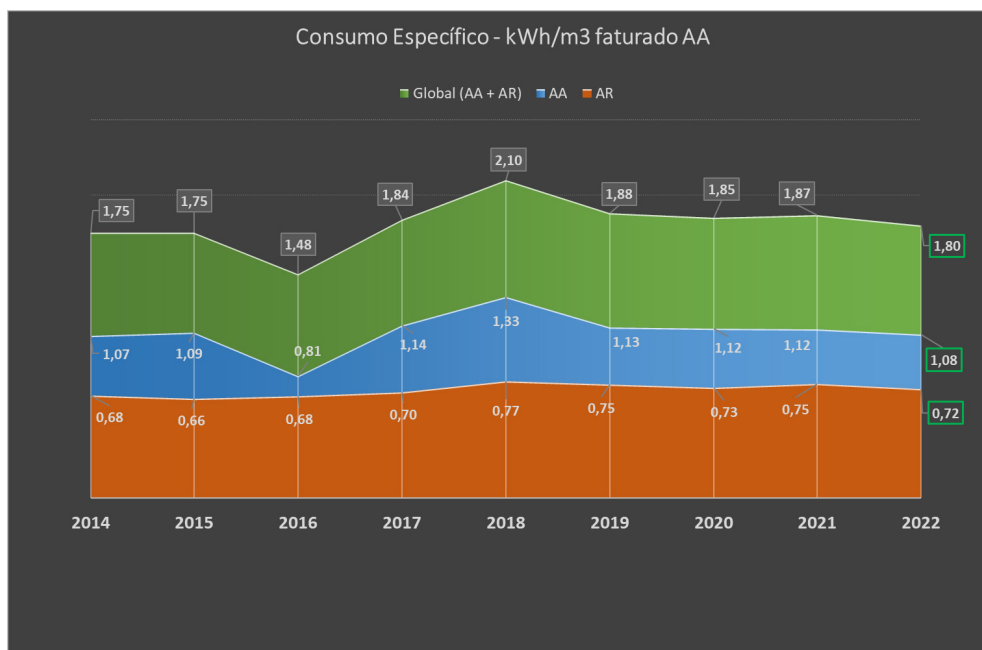
Focando, essencialmente, na componente técnica, poderá ser seguido o princípio básico do funcionamento destes sistemas, para analisar a eficiência dos mesmos. De facto, os clientes deste setor pretendem o fornecimento de água, ao nível dos edifícios, em condições adequadas (caudal/pressão e qualidade) e a necessária resolução do problema das águas residuais resultantes dessa utilização, independentemente do número de entidades envolvidas, das funções asseguradas, ou do seu modelo de gestão.

Por outro lado, um dos principais recursos consumidos para a prestação desses serviços é a energia, seja para a captação, tratamento e elevação no abastecimento de água (AA), ou para o transporte e tratamento, antes da devolução ao meio recetor, na drenagem de águas residuais (AR).

Como tal, apresenta-se, no gráfico seguinte (Gráfico 6), a evolução do consumo específico de energia, por unidade de volume faturado, no abastecimento de água, ao cliente. Este rácio permite a avaliação do consumo de energia de todo o ciclo urbano (desde a captação de água na origem, à devolução de água residual tratada ao meio recetor), por m<sup>3</sup> de volume de abastecimento de água faturado ao cliente final, aquilo que corresponde ao serviço básico a prestar ao utilizador final e, pelo qual, também é necessária a recolha e tratamento de águas residuais.

Analisando o consumo total de energia, por unidade de volume entregue ao cliente, é possível concluir que, por cada m<sup>3</sup> de água potável que utilizamos, em Portugal Continental, ao nível dos edifícios, existe (segundo dados de 2022) um consumo de cerca de 1,08 kWh (60%) na produção e distribuição dessa água e de 0,72 kWh (40%) na recolha e tratamento da água residual, para devolução ao meio recetor.

Depuradas as condicionantes dos dados disponíveis (até 2018, inclusive, como referido no ponto anterior) e focando nos anos de 2019 a 2021, inclusive, é possível verificar que o consumo específico de energia para o serviço prestado estava relativamente estabilizado, até 2021, quer ao nível do abastecimento de água,



**Gráfico 6.** Consumo específico de energia, por m<sup>3</sup> de água faturado ao cliente final no abastecimento de água (AA)

quer na drenagem e tratamento de águas residuais. Não obstante, verifica-se que o rácio em causa reduz quase 4%, em 2022, face a 2021. Por outro lado, é possível comprovar que mais de metade dessa redução se verifica por redução dos consumos de energia ao nível do abastecimento de água (alta + baixa).

Atendendo às análises anteriores, é possível concluir que, em 2022, face ao ano de 2021, se verifica: (i) uma redução significativa ao nível das perdas de água reais nos sistemas de abastecimento, (ii) uma redução mais ligeira ao nível dos volumes de água residual não faturada que entram nos sistemas (embora relacionável com uma redução dos níveis de precipitação), e (iii) uma redução dos consumos de energia globais (apesar de não se verificar uma melhoria dos níveis de eficiência das estações elevatórias).

Como tal, será muito provável que essas reduções se devam, em grande medida, a uma redução dos volumes em circulação, quer por redução de perdas reais, no abastecimento, quer por redução dos níveis de afluências indevidas, nos sistemas de drenagem.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tomando, por base, a análise levada a cabo nos pontos anteriores, parece ser possível efetuar algumas reflexões importantes.

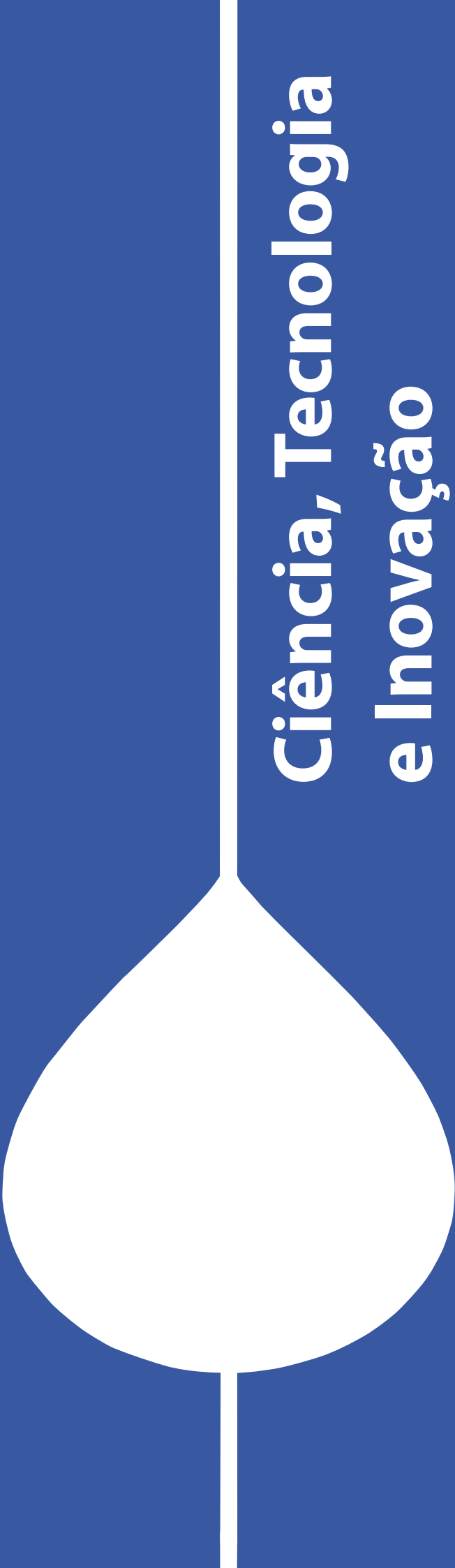
Fruto, muito provavelmente, do investimento realizado no reforço da monitorização e do controlo de perdas, integrando também, essa questão na gestão das entidades, parece estar a verificar-se uma inversão de tendência ao nível das perdas de água, com uma redução já com algum significado, em

2022 e que se espera que continue nos próximos anos. Convém, no entanto, salientar que os níveis de perdas reais ainda são elevados (3m<sup>3</sup> por cada 10 m<sup>3</sup> faturados ao cliente final) e que esse esforço tem de ser contínuo e complementado com a adequada reabilitação de sistemas, sob pena de se poderem verificar indesejáveis retrocessos.

Ao nível das afluências indevidas, as maiores reduções têm-se verificado em períodos de menor precipitação, razão, pela qual, ainda não é possível concluir sobre a existência de especiais melhorias a este nível. Ainda em relação a este aspeto, convém salientar a considerável parcela de volumes de água que entram no sistema e que não são faturados aos clientes (com um mínimo de 3m<sup>3</sup> adicionais por cada 10 m<sup>3</sup> faturados, só nos sistemas em baixa), dificultando a sua gestão, onerando de forma significativa a sua operação e podendo ser causadores de problemas ambientais relevantes, havendo, ainda, muito a fazer nesta matéria.

Este setor ainda continua a ser um consumidor intensivo de energia com um consumo total (AA+AR) de quase 2 kWh por cada m<sup>3</sup> faturado ao consumidor final e impõe-se uma maior caracterização dos níveis de eficiência energética em todas as fases do ciclo urbano da água que, em alguns casos, poderá melhorar significativamente.

Não obstante, a aposta na redução das perdas de água nos sistemas de abastecimento e das afluências indevidas nos sistemas de águas residuais poderá, igualmente, trazer significativos benefícios ao nível dos consumos de energia, como se poderá comprovar pela análise dos dados do ano de 2022, por comparação com os anos anteriores.



# Ciência, Tecnologia e Inovação



# Diagnóstico das principais pressões humanas e boas práticas de gestão aplicadas aos ecossistemas de água doce: visão geral e perspectivas para as bacias na Região do Minho, Portugal

## *Diagnosis of the main human pressures and best management practices applied to freshwater ecosystems: overview and perspectives for basins in the Minho Region, Portugal*

Ana M. Valente<sup>1,2,3</sup>, Cláudia Carvalho-Santos<sup>1,2,3</sup>, Janeide Assis de Padilha<sup>1,2,3</sup>, Luis Machado<sup>1,2,3</sup>, Fernanda Cássio<sup>1,2,3</sup>, Cláudia Pascoal<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Biologia Molecular e Ambiental (CBMA), Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057, Braga, Portugal

<sup>2</sup> Instituto para a Ciência, Inovação e Bio-Sustentabilidade (IB-S), Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057, Braga, Portugal

<sup>3</sup> ARNET - Rede de Pesquisa Aquática, Laboratório Associado

**RESUMO:** Os ecossistemas de água doce estão entre os mais ameaçados, e são necessárias medidas que visem a sua proteção e preservação. Em Portugal, as ameaças associadas às massas de água são diversas, destacando-se a poluição, a fragmentação de habitats e a presença de espécies invasoras como as principais preocupações atuais. A região do Minho alberga espécies importantes do ponto de vista ecológico e económico, e a caracterização das ameaças, juntamente com a sugestão de boas práticas de gestão é essencial, principalmente tendo em conta a necessidade de adaptação às alterações climáticas. A poluição das massas de águas, potenciada por estruturas de tratamento de águas ineficazes ou inadequadas, juntamente com a crescente poluição por microplásticos, e outros contaminantes emergentes, ameaça os ecossistemas de água doce desta região, o que torna urgente a existência de legislação para regular este tipo de poluição. No entanto, é a agricultura e a pecuária que se assumem como uma das principais causas de poluição da água, pelo que a implementação de medidas para minimizar o impacto do setor agro-pecuário torna-se prioritária, como as faixas de vegetação de proteção dos cursos de água, ou o uso de fertilizantes orgânicos. Além disso, a existência de barreiras hidrológicas constitui uma ameaça à conectividade dos habitats, o que é especialmente preocupante para espécies migradoras, que partilham o ciclo de vida entre os ecossistemas de água doce e de água salgada, como é o caso dos peixes diádromos (e.g. sável, lampreia, enguia-europeia). É essencial a efetiva aplicação de medidas que possam mitigar os impactos provocados por estas barreiras, salvaguardando a necessidade da produção de energia hidroelétrica e o abastecimento das populações. As espécies invasoras representam também uma grave ameaça aos ecossistemas e às espécies nativas, pelo que a sua gestão deve considerar a sua abundância, as tendências populacionais, as interações inter-específicas e a necessidade de conter a sua expansão. O desenvolvimento da investigação científica na região do Minho é a pedra basilar que permitirá implementar boas práticas de gestão, juntamente com um trabalho de proximidade com os atores locais e com os cidadãos, com o objetivo de proteger os valores naturais da região do Minho, da biodiversidade e dos ecossistemas.

Palavras-chave: barreiras hidrológicas; Cávado; espécies invasoras; Lima; Minho; poluição da água

**ABSTRACT:** *The maintenance and conservation of freshwater ecosystems is of utmost importance due to their endangered status worldwide. In Portugal, water bodies face several challenges that need urgent attention by the scientific community. Foremost among these concerns are pollution, habitat fragmentation, and invasive species, which together pose threats to aquatic ecosystems. The Minho region holds significant ecological and economic value, necessitating a comprehensive understanding and proactive response to the threats it faces, particularly in light of the influence of climate change. Notably, water pollution, stemming from inadequate water treatment plants and the increasing presence of microplastics, and other emerging contaminants poses a severe risk to freshwater ecosystems in the region. This urgency needs legislation to regulate this type of pollution. To safeguard these ecosystems effectively, it is crucial to prioritize measures targeting the agricultural and livestock sectors, as they contribute significantly to water pollution, such as riparian buffer strips or the use of organic fertilizers. Moreover, the presence of hydrological barriers in the Minho region (mainly for hydropower production) also threatens the connectivity between habitats, particularly for migratory species (e.g. shad, lamprey or eel), which rely on both freshwater and saltwater ecosystems during their life cycle. It is essential to manage these barriers effectively while ensuring the production of hydroelectric energy and water supply. Additionally, invasive species pose a serious threat to native species and ecosystems, underscoring the urgency of considering their presence, population trends, interactions and the need to control their expansion in the managing efforts. The foundation for achieving the best management practices lies in scientific research conducted in the Minho region, working in close cooperation with stakeholders and local communities to protect its biodiversity, ecosystems, and the inherent value of this natural capital.*

**Keywords:** *Cávado; hydrological barriers; invasive species; Lima; Minho; water pollution.*

## 1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas de água doce são especialmente vulneráveis às alterações climáticas e às pressões humanas, tais como o desenvolvimento agrícola e industrial, o que pode comprometer o uso sustentável e multi-funcional dos rios (Acuña-Alonso et al., 2023). Estes ecossistemas estão entre os mais ameaçados do mundo (Maceda-Veiga, 2012), e o número de espécies em perigo (na IUCN red list) mais do que triplicou entre 2003 e 2009, de cerca de 2000 espécies para mais de 6000 (Vié et al., 2009), sendo acompanhado por um grande declínio na biodiversidade à escala mundial (MA, 2005; Albert et al., 2021). O declínio da biodiversidade nos ecossistemas de água doce é especialmente alarmante em Portugal, com uma evidente ligação a pressões antropogénicas (Fernandes et al., 2018), mas também ao aumento do número de espécies invasoras (Anastácio et al., 2019).

Também as alterações nos padrões hidrodinâmicos do sistema fluvial (e.g., a construção de açudes e barragens) podem desencadear um desequilíbrio dos ecossistemas de água doce (Iglesias et al., 2019). Estas estruturas têm um notório impacto na distribuição, densidade e/ou atividade de algumas espécies nativas (Azeiteiro et al., 2021), especialmente quando consideramos os peixes diádromos, como o sável (*Alosa alosa*), a lampreia-marinha (*Petromyzon marinus*), ou a enguia-europeia (*Anguilla anguilla*), com grande relevância ecológica e económica em Portugal, particularmente na região minhota. A procura de soluções que possam minimizar estes impactos, protegendo o ecossistema, e simultaneamente garantido a produção de energia hidroelétrica, essencial para

o desenvolvimento económico do país e da região do Minho (contribuindo com mais de 36% da produção hidroelétrica nacional – EDP, 2021), a rega e o abastecimento das populações, constitui um dos grandes desafios para os investigadores, para os atores locais e para os decisores políticos.

A intensificação da pressão humana, especialmente através da agricultura e da pecuária também constituem uma ameaça à qualidade da água (EEA, 2018), resultando no excesso de nutrientes e pesticidas (Maceda-Veiga, 2012), cuja concentração aumenta nos cursos de água (APA, 2022a; APA, 2022b). Assim, é imprescindível implementar medidas para reduzir o problema de contaminação da água e manter a produção agrícola local essencial para o desenvolvimento regional, assegurando também rendimentos à agricultura de menor escala. Por outro lado, algumas estações de tratamento de águas residuais (ETARs) estão sub-dimensionadas (APA, 2022a; APA, 2022b), para dar resposta a uma urbanização e industrialização crescentes, o que contribui também para a poluição das massas de água. Em Portugal, e na região do Minho, enfrentam-se desafios significativos relacionados com a qualidade da água e com a degradação dos ecossistemas de água doce (Azeiteiro et al., 2021). Este estudo tem como objetivo destacar alguns dos problemas destas bacias hidrográficas, nomeadamente a poluição da água, as barreiras hidrológicas e as espécies invasoras com foco nas bacias dos Rios Minho, Lima e Cávado. Serão apresentadas sugestões de “boas práticas de gestão”, para prevenir ou mitigar as ameaças à biodiversidade, aos habitats e aos ecossistemas identificadas.



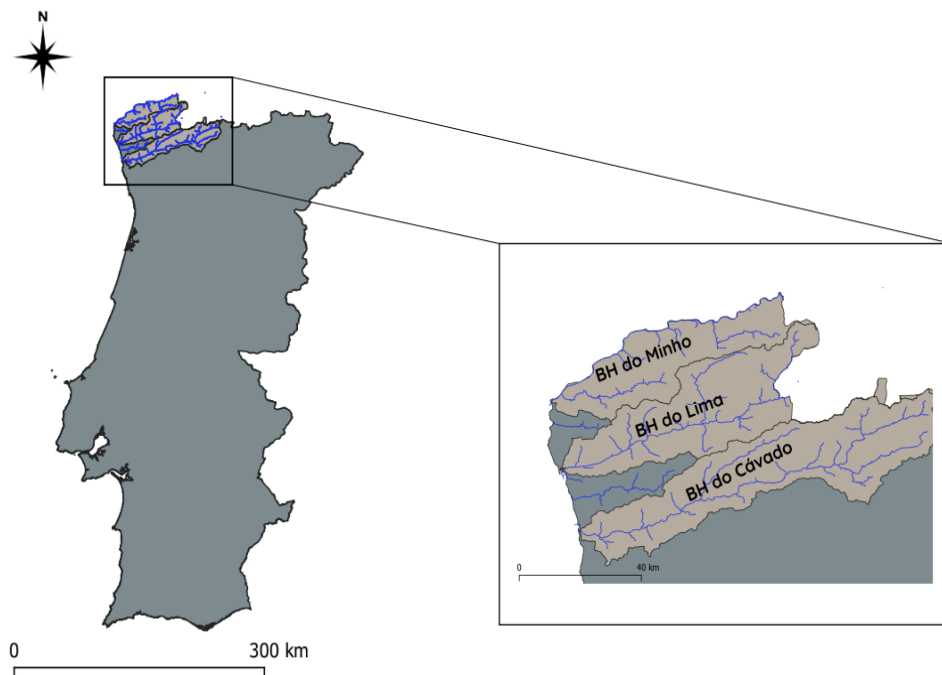
## 2. ÁREA DE ESTUDO

A região do Minho, está localizada no Noroeste de Portugal e abrange as bacias hidrográficas dos rios Minho, Lima e Cávado (Figura 1). Este estudo incide sobre as bacias hidrográficas destes três rios, correspondendo à Região Hidrográfica 1 (RH1 Minho e Lima) e parte da Região Hidrográfica 2 (RH2 Cávado, Ave e Leça), auxiliado por informações presentes nos Planos de Gestão das Regiões Hidrográficas 1 e 2 (PGRH), disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA 2022a, APA 2022b). Climaticamente, a região situa-se na zona atlântica, caracterizando-se por temperaturas amenas e invernos chuvosos. Os estuários destes rios fazem parte da Rede Natura 2000, classificados como Sítios de Importância Comunitária (SIC). O estuário do rio Cávado está integrado no Parque Natural do Litoral Norte, e os estuários dos rios Minho e do Lima são considerados Zonas Especiais de Conservação (ZEC). A maioria destas bacias, a montante, integra o Parque Nacional Peneda-Gerês. A bacia hidrográfica do Rio Minho tem cerca de 17080 km<sup>2</sup>, e o seu troço principal tem cerca de 300 km. O Rio Minho atravessa o limite setentrional de Portugal e tem a sua nascente na serra de São Mamede (Espanha), fluindo para Caminha e constituindo a fronteira entre os dois países. Este rio não tem nenhuma barragem em Portugal, mas é afetado pelas barragens existentes no troço espanhol, principalmente a jusante pela barragem da Frieira (APA, 2022a). A bacia hidrográfica do Rio

Lima tem cerca de 2470 km<sup>2</sup> e o seu canal principal tem cerca de 108 km. Este rio tem a sua nascente na serra de Meira (Espanha), fluindo para Viana do Castelo até alcançar o Oceano Atlântico. Esta bacia possui três barragens no troço português do rio (APA, 2022a). O estado global das massas de água destes dois rios é geralmente superior à média nacional, no entanto a poluição por nutrientes (derivados da agricultura e pecuária), continua a apresentar-se como o fator de maior impacto nas águas superficiais, contribuindo com cerca de 29% dos impactos totais (APA, 2022a). A bacia hidrográfica do Rio Cávado tem cerca de 1589 km<sup>2</sup> e o seu rio principal tem cerca de 129 km. Este rio tem a sua nascente na serra do Larouco, fluindo para Esposende. Ao longo da sua extensão este rio tem seis barragens (APA, 2022b). O Rio Cávado flui por zonas particularmente industrializadas e pode ser afetado por efluentes industriais e domésticos.

## 3. POLUIÇÃO DA ÁGUA

A qualidade da água do rio Minho é consistentemente avaliada como “boa” (Cairrão *et al.*, 2004; Reis *et al.*, 2014a; Caetano *et al.*, 2016). No entanto, alguns estudos abriram a discussão sobre este tópico, com a descoberta de enriquecimento por metais, encontrado neste estuário (Reis *et al.*, 2014b), nomeadamente cobre (Cu), com origem antropogénica. Os afluentes do Minho apresentam regularmente sinais de contaminação, particularmente o Rio Louro (Santos *et al.*, 2013),



**Figura 1.** Localização da área de estudo em Portugal continental – Bacia Hidrográfica (BH) do rio Minho, BH do rio Lima e BH do rio Cávado com os principais rios e afluentes a azul.

e eventualmente alguns afluentes com origem em Espanha (Filgueiras *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2013). De facto, alguns troços presentes na RH1 não cumprem os objetivos específicos de classificação de zona protegida definidos e regulados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2022a), de acordo com a Diretiva Quadro de Água (DQA) da União Europeia (Diretiva 2000/60/CE), nomeadamente no que diz respeito à proteção de espécies economicamente relevantes.

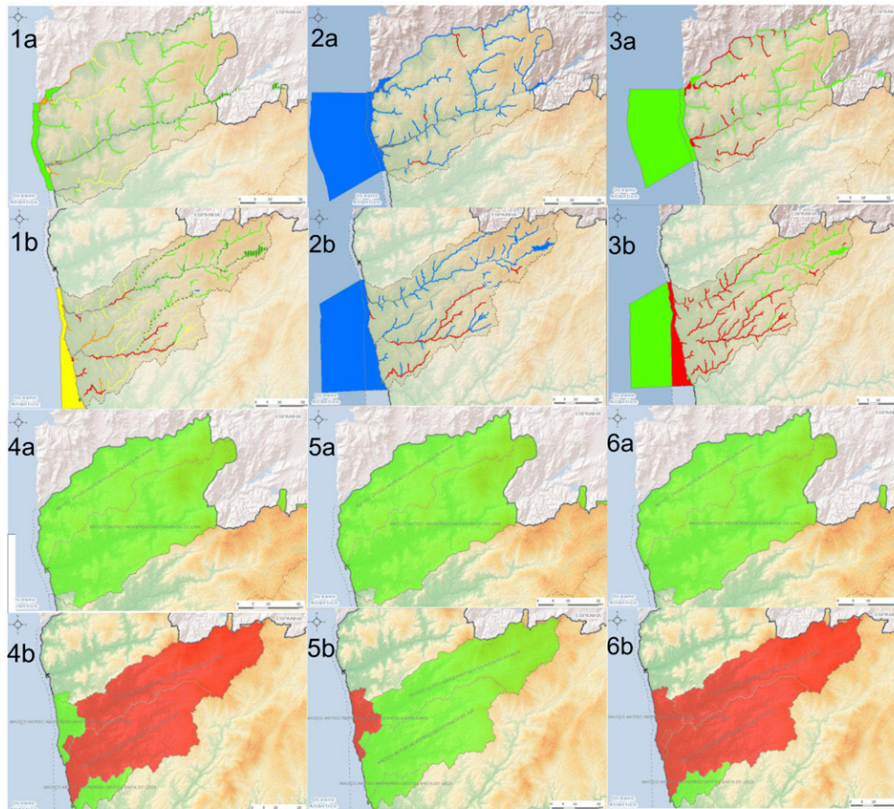
O Rio Lima apresenta, num dos seus troços superiores, níveis de nitratos acima da média (Caetano *et al.*, 2016), que podem colocar em causa a qualidade da água. As características físico-químicas da água podem ameaçar a saúde de alguns peixes, como é o caso da enguia-europeia, espécie de elevada importância económica, e cujo declínio pode ser provocado pela contaminação das massas de água, como se verificou no Rio Lima (Gravato *et al.*, 2010), em contraste com o rio de referência – o Rio Minho.

Globalmente, o estado químico das águas superficiais desta RH é satisfatório, apresentando no entanto 6% da área com classificação insuficiente. Do ponto de vista ecológico, constatamos que 3% da área apresenta uma classificação medíocre. É também de destacar os impactos que as espécies exóticas e as alterações hidromorfológicas têm ao nível das águas superficiais nesta região hidrográfica contribuindo com 17% e 25% dos motivos pelos quais não é possível atingir o bom estado destas águas. As águas subterrâneas nesta RH apresentam integralmente um bom estado quantitativo e químico (WISE). A figura 2 apresenta espacialmente esta informação.

Alguns estudos identificam sinais de contaminação no Rio Cávado (Reis *et al.*, 2014a; Caetano *et al.*, 2016), nomeadamente elevadas concentrações de amónia e de fosfatos (Caetano *et al.*, 2016). Apesar disso, algumas ações concretas têm contribuído para a melhoria da qualidade da água neste rio, nomeadamente a desativação da ETAR de Amares (APA, 2022b). Ainda assim, continua a existir uma clara deterioração na qualidade da água junto a agregados populacionais (e.g. no município de Braga) (Oliveira *et al.*, 2021). O Plano de Gestão da Região Hidrográfica 2 (PGRH2 – Cávado, Ave e Leça) identifica dois troços do Rio Cávado a jusante da barragem da Caniçada que não cumprem os objetivos específicos de classificação de zona protegida definidos pela APA, afetando a qualidade de zonas de captação de água para consumo humano (APA, 2022b). Globalmente, o estado químico das águas superficiais desta RH (que inclui duas bacias que não são alvo deste estudo)

é globalmente insatisfatório, com 97% da área a não atingir um bom estado químico (WISE), sendo o níquel o elemento que mais contribui para a poluição nesta área. Do ponto de vista ecológico, constatamos que 17% da área apresenta uma má classificação. É também de destacar que a poluição difusa e a poluição pontual contribuem em 99% para não ser possível atingir o bom estado ecológico. Adicionalmente, 6% da área das águas subterrâneas têm estado químico insatisfatório, no entanto, o seu estado quantitativo (WISE) é integralmente satisfatório.

Há medidas urgentes a tomar, principalmente no que diz respeito aos rios Lima e Cávado, sendo imperiosa a concretização de intervenções que possam aumentar a capacidade de tratamento das águas residuais, seja através da capacitação e melhoria das estruturas existentes, seja através da construção de novos equipamentos que possam acompanhar o desenvolvimento urbano e industrial destas regiões. A monitorização e fiscalização feita pela APA, para além de cumprir o seu papel de controlo de qualidade das massas de água, tem de ser acompanhada pela concretização de medidas concretas (já inscritas no programa de medidas dos PGRH, e outras que se tornem necessárias) para melhorar o estado ecológico da água. O Plano de Gestão da Região Hidrográfica 1 (PGRH1 - Minho e Lima) prevê a ampliação ou melhoria de duas ETARs e a construção de oito ETARs na bacia do Rio Minho, bem como a ampliação ou melhoria de duas ETARs e a construção de uma ETAR na bacia do Rio Lima até 2027 (APA, 2022a). No que diz respeito ao Rio Lima, poderá ser necessário um levantamento mais exaustivo das necessidades reais de construção ou ampliação de ETARs, considerando os indicadores de qualidade de água presentes neste rio e o impacto económico e social que a poluição da água provoca, nomeadamente através da diminuição das populações de espécies ecológica e economicamente importantes, como é o caso da enguia (Gravato *et al.*, 2010). No que diz respeito ao Rio Cávado, o PGRH2 (APA, 2022b) prevê a ampliação ou a melhoria de oito ETARs e a construção de quatro ETARs até 2027. Apesar dos esforços de modernização, há algumas preocupações, que continuam sem resposta, como é o caso da poluição das massas de água por microplásticos no Rio Minho (Guilhermino *et al.*, 2021), e outros contaminantes emergentes (nanomateriais e fármacos). Para responder ao crescente problema dos contaminantes emergentes, as ETARs deveriam possuir os meios necessários para proceder à sua remoção, apesar dos custos poderem ser, para já, bastante elevados.



LEGENDA: 1a) a 3b)

ESTADO/POTENCIAL ECOLÓGICO:

Massas de Água Rios	Massas de Água Lagos (Albufeiras)	Massas de Água Costeiras	Massas de Água de Transição
<b>Potencial Ecológico</b>	<b>Potencial Ecológico</b>	<b>Estado Ecológico</b>	<b>Estado Ecológico</b>
Exceente	Bom e superior	Razoável	Bom
Bom			Razoável
Razoável			Mediocre
Mediocre			<b>Potencial Ecológico</b>
Mau			Bom e superior
<b>Potencial Ecológico</b>			Razoável
Bom e superior			Mediocre
Razoável			<b>Potencial Ecológico</b>
			Bom e superior
			mau

ESTADO QUÍMICO:

Massas de Água Rios	Massas de Água Lagos (Albufeiras)	Massas de Água de Transição	Massas de Água Costeiras
Bom	Bom	Bom	Bom
Insuficiente	Desconhecido		Águas Territoriais
Desconhecido			Bom

ESTADO GLOBAL:

Massas de Água Rios	Massas de Água Lagos (Albufeiras)	Massas de Água de Transição	Massas de Água Costeiras
Bom e superior	Bom e superior	Bom e superior	Inferior a bom
Inferior a bom		Inferior a bom	Águas de Territoriais
			Bom e superior

LEGENDA: 4a) a 6b)

Massas de Água Subterrânea - Estado Quantitativo

Massas de Água Subterrânea - Estado Químico

Massas de Água Subterrânea - Estado Global

Bom	Mediocre
-----	----------

**Figura 2.** Caracterização do estado ecológico/potencial ecológico, químico, quantitativo e global das massas de água na área de estudo. Estado/potencial ecológico das massas de água superficiais na RH1 1a) e RH2 1b); estado químico das massas de água superficiais na RH1 2a) e RH2 2b); estado global das massas de água superficiais na RH1 3a) e RH2 3 b); estado quantitativo das massas de água subterrâneas na RH1 4a) e RH2 4b); estado químico das massas de água subterrâneas na RH1 5a) e RH2 5b); estado global das massas de água subterrâneas na RH1 6a) e RH2 6b)– adaptado de APA, 2002a e APA, 2002b.

Será necessária mais investigação nesta área, não só para que a tecnologia necessária à concretização desta medida seja acessível, mas também no sentido de estabelecer limites de toxicidade a partir dos quais a presença destes elementos constitui um risco para os ecossistemas e para a saúde humana. Além destas medidas, é também essencial que se proceda ao alargamento da rede de abastecimento de água e de saneamento, que atualmente apresenta ainda insuficiências na cobertura. Na RH1, que inclui os rios Minho e Lima, em 2018 a acessibilidade ao serviço de abastecimento de água encontrava-se nos 92% da população, com uma ligação efetiva ao serviço de 76%, enquanto que no que diz respeito ao saneamento existia uma acessibilidade de 60% da população e uma ligação efetiva ao serviço de 48%. Na RH2, que inclui o Rio Cávado, a acessibilidade ao serviço de abastecimento de água encontrava-se nos 96% da população em 2018, com uma ligação efetiva de 80%, enquanto que no que diz respeito ao saneamento existia uma acessibilidade de 85% e uma ligação efetiva ao serviço de 73%. Estes valores são particularmente alarmantes, sendo que o alargamento da rede de distribuição de água e saneamento deverá constituir uma prioridade, por constituir uma ameaça aos ecossistemas de água doce e também por constituir um desígnio social. É também urgente definir, monitorizar e propor novas práticas para a agricultura e pecuária, que possam minimizar o seu impacto nos ecossistemas de água doce. Só na região hidrográfica dos rios Minho e Lima, a agricultura é responsável por uma carga de aproximadamente 901317 kg/ano de nitratos e de 56375 kg/ano de fósforo (APA, 2022a), enquanto nas bacias hidrográficas do Cávado, Ave e Leça, os valores rondam os 1267167 kg/ano de nitratos e 103703 kg/ano de fósforo (APA, 2022b). Os valores são preocupantes e exigem um conjunto de medidas tais como a incorporação de fertilizantes no solo de forma faseada; a redução da mobilização do solo, e a aplicação de faixas de vegetação para proteção dos cursos de água e que deverá ter em conta o declive da parcela agrícola (Ramião *et al.*, 2022a), bem como o apoio aos pequenos e médios agricultores para que possam concretizar as medidas propostas. Além disto, é necessária a fiscalização do cumprimento do previsto na lei, através da “Diretiva Nitratos” (Diretiva 91/676/CEE), e da sua futura atualização, que prevê o limite máximo de 25 mg/l de nitratos em águas tratadas e lançadas para a Natureza pelas ETARs. Também a indústria tem um impacto direto na qualidade das massas de água na região do Minho (Mil-Homens *et al.*, 2013), principalmente no que diz respeito às descargas esporádicas, motivadas

por falta de resposta de tratamento de águas. Nos rios Minho e Lima recaem preocupações sobre o impacto da indústria do papel (APA, 2022a), enquanto que na zona do rio Cávado, predomina a indústria alimentar e vitivinícola, bem como a indústria extrativa (APA, 2022b). A necessária vigilância e defesa destas massas de águas torna urgente o regresso da carreira dos *guarda-rios*, que possam assegurar a fiscalização e proteção dos rios. Recentemente, o município de Guimarães implementou o regresso dos *guarda-rios*, para a fiscalização do Rio Ave e do Rio Selho, através da empresa municipal Vitrus, iniciativa que deveria ser replicada pelo restante território nacional.

As alterações climáticas terão também um papel destacado no que diz respeito à gestão da água. Nos próximos anos, é esperado um agravamento das assimetrias espaciais e sazonais em Portugal, no que diz respeito ao risco de cheia e à qualidade da água (Nunes *et al.*, 2018), acompanhado por um declínio generalizado na disponibilidade de água (Carvalho-Santos *et al.*, 2016). Isso leva-nos ao capítulo seguinte, que versará sobre as barreiras hidrológicas.

#### 4. BARREIRAS HIDROLÓGICAS

Ao longo das últimas décadas (principalmente a partir dos anos 50), têm sido implementadas várias estruturas de controlo dos caudais e de produção de energia hidroelétrica na zona Noroeste de Portugal, como é o caso das barragens da Caniçada, Alto Lindoso, Rabagão, entre outras (e2p, 2023). A produção de energia hidroelétrica é de grande importância pois contribui para a diminuição do consumo e produção de combustíveis fósseis e consequente redução da emissão de gases com efeito de estufa (Berga, 2016). Além disso, constitui a forma de produção de energia mais eficaz do ponto de vista do armazenamento (Fairley, 2015), o que é essencial para a gestão dos recursos renováveis. As barragens do Cávado-Lima têm um papel relevante na produção de energia verde, representando hoje cerca de 36,7% da produção nacional de energia hidroelétrica (EDP, 2021). No entanto, as alterações climáticas alterarão os padrões hidrológicos e terão um impacto na produção hidroelétrica, sendo que um estudo efetuado nas barragens do Cávado (Ramião *et al.*, 2022b) estimou que o armazenamento de água nas albufeiras seja reduzido em cerca de 55% a 90% a médio (2071) e longo prazo (2100), respetivamente. Esta redução originará uma redução entre 79 GWh/ano e 272 GWh/ano, o que é equivalente a menos 11% e 38% do potencial de energia turbinada, na cascata de barragens da bacia

do Cávado quando comparado com o histórico (1975-2005). Estes dados realçam a necessidade de serem tomadas medidas no sentido de adaptação às alterações climáticas, nomeadamente com a eventual alteração nas funções das albufeiras, de modo a responder ao perigo de cheias, de seca, mas também à necessidade de produção de energia, estando já projetados meios para recolocação de água turbinada na barragem à noite através de energia produzida em torres eólicas.

Na bacia hidrográfica do Minho e Lima, 85,6% da água disponível nas albufeiras é direcionada para o uso hidroelétrico (APA, 2022a), enquanto que este valor sobe para 98,5% no caso do Cávado (APA, 2022b). Apesar das evidentes vantagens, as barragens constituem uma barreira ao fluxo hidrológico dos rios, induzido a redução de sedimentos disponíveis através da sua retenção nas albufeiras e através da alteração do regime hidrológico (Taveira-Pinto *et al.*, 2011). Além disso, as barragens constituem uma barreira física para peixes, especialmente para as espécies diádromas, cujo ciclo de vida é partilhado entre ecossistemas de água doce e salgada, implicando a necessidade da conectividade de habitats (Braga *et al.*, 2022). Vários estudos confirmam o declínio das populações de várias espécies de peixes, após a construção de barragens (Azeiteiro *et al.*, 2021). De facto, estima-se que houve um declínio de cerca de 90% das populações de sável, depois da construção das barragens no Rio Minho (Baglinière *et al.*, 2003; Azeiteiro *et al.*, 2021; Braga *et al.*, 2022). Estes dados são especialmente preocupantes, considerando não só a importância ecológica das espécies, mas também o seu potencial económico e o impacto que a sua progressiva redução terá no desenvolvimento económico da região do Minho.

No entanto, as consequências não são semelhantes para todas as espécies – *e.g.* os dados de captura da lampreia-marinha no Rio Minho não indicam qualquer quebra relacionada com a construção destas estruturas, o que pode estar relacionado com o uso dos afluentes como habitats reprodutivos (Azeiteiro *et al.*, 2021), tal como tinha sido comprovado noutras bacias portuguesas, como é o caso do Rio Mondego (Almeida *et al.*, 2002) ou do Rio Vouga (Andrade *et al.*, 2007).

A existência de outras estruturas, como barragens obsoletas ou açudes, constituem um problema que potencia a fragmentação de habitats e a continuidade do sistema fluvial, criando obstáculos aos processos geomorfológicos e biológicos. Existe um levantamento ao nível nacional de todas as estruturas que, apesar de já não cumprirem a sua função original, continuam a exercer um impacto

no ecossistema (Ministério do Ambiente, 2016). Este levantamento identificou cerca de sete mil obstáculos, no entanto, a remoção dessas estruturas ocorre de forma esporádica. Em Portugal, há já projetos a efetuar estas tarefas, nomeadamente no Rio Vascão, entre o Alentejo e o Algarve, com a destruição de uma passagem rodoviária de múltiplos canais (DRE, 2023), e na bacia do Rio Vouga, com a destruição de seis açudes obsoletos (LIFE ÁGUEDA, 2018). A remoção dos obstáculos com o necessário restauro ecológico e fluvial representará uma melhoria na qualidade da água, a recuperação do sistema natural e da conectividade horizontal (Magilligan *et al.*, 2016), bem como a redistribuição de sedimentos (Konrad, 2009), e o eventual aumento na densidade de espécies nativas economicamente relevantes (Birnie-Gauvin *et al.*, 2017). No entanto, estes processos têm que ser cuidadosamente planeados e monitorizados (Cortes *et al.*, 2019), para garantir que custos e benefícios são considerados (*e.g.* no Norte de Itália, provou-se que eram as barreiras hidrológicas que limitavam a expansão das espécies exóticas existentes - Gavioli *et al.*, 2017). É essencial envolver as populações locais nas decisões a tomar, e informá-las dos processos em curso, bem como das vantagens e desvantagens de cada decisão a médio e a longo prazo.

É também fundamental que sejam inventariadas as barragens que, não possuindo passagens para peixes, possuem as condições necessárias para a sua colocação, efetivando a sua concretização. A monitorização destas passagens apresenta-se como uma ferramenta útil, para obter dados fidedignos acerca das tendências populacionais de espécies economicamente relevantes.

## 5. ESPÉCIES INVASORAS

Os ecossistemas de água doce são especialmente vulneráveis a espécies invasoras, que exercem um impacto negativo nas espécies nativas, alterando os padrões ecológicos (Sala *et al.*, 2000). Nos ecossistemas de água doce em Portugal o seu impacto é evidente, tendo sido registadas até agora 67 espécies invasoras no que diz respeito à fauna (Anastácio *et al.*, 2019 – podendo 18 destas ser encontradas no Rio Minho – Sousa *et al.*, 2008a), e 667 espécies de flora (De Almeida *et al.*, 2012).

Nas bacias do Minho e do Lima há espécies invasoras especialmente preocupantes, como é o caso da amêijoia-asiática (*Corbicula fluminea*) (Sousa *et al.*, 2006; 2008b). É no estuário do Minho que a situação é mais alarmante e onde os valores de abundância, biomassa e produção

secundária desta espécie invasora atingem os níveis mais elevados (Sousa et al., 2008b), afetando outras espécies deste estuário, como é o caso do *Corophium multisetosum* (Sampaio et al., 2014). A amêijoia-asiática já atingiu também a bacia do Rio Cávado (Sousa, comunicação pessoal). Esta espécie pode ocasionalmente servir de presa ao lagostim-vermelho (*Procambarus clarkii*) (Pereira et al., 2016), outra espécie invasora preocupante, que se encontra estabelecida nas três bacias hidrográficas em estudo (Moreira, 2011). Este lagostim invasor é uma espécie omnívora e oportunista, provocando diversos impactos nas regiões em que se insere e nas espécies nativas presentes (Sousa et al., 2013). A sua expansão poderá estar a contribuir para o aumento das populações de um mamífero invasor, o visão-americano (*Neogale vison*), do qual é presa e cujas populações se estendem desde o Minho até ao Douro (Rodrigues et al., 2015). O visão-americano pode ter impactos negativos em espécies nativas, como é o caso do toirão (*Mustela putorius*) (Rodrigues et al., 2015), espécie considerada “em Perigo” (Santos-Reis et al., 2023), com a qual compete por território e alimento.

Relativamente à flora invasora, há várias espécies que constituem uma preocupação, como é o caso da Elódea-densa (*Egeria densa*) ou do Jacinto-de-água (*Eichhornia crassipes*), cuja propagação foi potenciada pelos seus atributos ornamentais, tendo o seu potencial de dispersão tornado estas duas espécies em ameaças ecológicas e socio-económicas, potenciadas pela concentração de nutrientes em caudais baixos (IPVC & BIOPOLIS, 2022). A formação de “tapetes” que cobrem a superfície da água e dificultam a sua oxigenação, alteram os padrões de navegabilidade, aumentando a eutrofização e modificando padrões hidrológicos, fazendo com que sejam necessárias medidas de prevenção e controlo que possam responder ao avanço destas populações, tais como a remoção mecânica dos mantos, principalmente quando detetados precocemente e a criação de barreiras superficiais nos rios para evitar a propagação para áreas não afetadas (aplicado só para espécies de superfície) (IPVC & BIOPOLIS, 2022).

É fundamental que se prossigam os estudos que possam completar e atualizar a informação relativamente às espécies invasoras presentes na região do Minho, bem como aos seus impactos e interação com espécies nativas e com o ecossistema, com vista ao seu controlo, à limitação da sua expansão e ao restauro dos habitats. Algumas práticas podem ser localmente implementadas no sentido de diminuir o potencial de invasão de algumas espécies, nomeadamente a maior

fiscalização da obrigatoriedade de desinfeção das embarcações, que podem ser portadoras de espécies invasoras no casco (Sampaio et al., 2014). Desta forma, a deteção precoce de espécies invasoras assume-se como urgente, sendo necessários métodos inovadores, como o DNA *metabarcoding*. Esta técnica assegura a identificação das espécies de uma forma mais precisa, rápida, rigorosa e económica, relativamente aos métodos tradicionais (i.e. análises morfológicas) (Duarte et al., 2023), podendo ser utilizada para a deteção precoce de espécies invasoras (Westfall et al., 2020). Importa destacar que algumas espécies invasoras já estão estabelecidas e têm um lugar na cadeia trófica na região do Minho (como é o caso de amêijoia-asiática), pelo que todas as medidas a considerar deverão ter em conta as relações inter-específicas, avaliando o impacto da sua presença no ecossistema, bem como o impacto da sua remoção/controlo.

## 6. GESTÃO E GOVERNANÇA – CONCLUSÕES

No que concerne à gestão dos ecossistemas de água doce, as recomendações visam promover a implementação de boas práticas de gestão, como ilustrado na Figura 3. Destacam-se a construção e ampliação de estações de tratamento de águas residuais (ETARs), preferencialmente equipadas com tratamento terciário, e a melhoria das infraestruturas já existentes. É também crucial estabelecer um quadro legislativo robusto que garanta a incorporação, nas ETARs, de mecanismos eficazes para a remoção de microplásticos e outros contaminantes emergentes. Propõe-se a definição de limites máximos admissíveis para a concentração de microplásticos em águas tratadas, visando a proteção da biodiversidade e da saúde pública — uma tarefa que se revela particularmente complexa (ver Brennholt et al., 2018). Adicionalmente, recomenda-se o fortalecimento da fiscalização e monitorização dos cursos de água, potencialmente através da reintrodução da carreira de *guarda-rios* ou de outras estratégias colaborativas já testadas/validadas em diferentes contextos (Wang & Chen, 2019; Herawati et al., 2024).

É necessária a implementação de incentivos financeiros aos agricultores para a concretização das melhores práticas de gestão, como sejam a inclusão de faixas de proteção para os rios nos campos agrícolas e formação para as boas práticas de conservação do solo, cuja eficácia foi demonstrada na América do Norte (Yates et al., 2007, Johengen et al., 2009).



**Figura 3.** Boas práticas de gestão propostas para os ecossistemas aquáticos da Região do Minho.

É essencial o envolvimento e esclarecimento das populações aquando da remoção de barreiras, sejam de pequena dimensão como açudes, sejam as de maiores dimensões (barragens), acoplado ao registo de barragens onde é possível colocar passagens para peixes, o que permitirá monitorizar as tendências populacionais piscícolas (como acontece, por exemplo, na bacia do Mondego; Monteiro *et al.*, 2023).

No que diz respeito às espécies invasoras, é imprescindível o aumento da fiscalização, a obrigatoriedade de desinfeção de embarcações, a utilização de métodos inovadores que possam

avaliar a sua presença precoce de forma rigorosa, rápida e económica (*e.g.* DNA *metabarcoding* – Pukk *et al.*, 2021), e a concretização atempada de medidas específicas para cada espécie invasora, no sentido de proceder à sua remoção, considerando todos os elementos do ecossistema e os riscos associados. Para concretizar todas as medidas elencadas é necessário o aumento do financiamento da investigação científica nas bacias hidrográficas do Minho, Lima e Cávado assegurando o envolvimento das populações e dos atores locais na gestão dos recursos hídricos, o que pode ser potenciado através da realização de ações de educação ambiental

dirigidas a escolas, jovens e associações, bem como ao público em geral, no sentido de alertar para a necessidade de proteção dos ecossistemas de água doce, enfatizando a sua importância, as ameaças a que estão sujeitos e do contributo de cada um para a conservação destes ecossistemas.

É essencial adotar uma abordagem integrada de gestão e governança para garantir a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos na região do Minho. As boas práticas de gestão apresentadas pretendem ser um contributo para a proteção da biodiversidade e dos ecossistemas de água doce, promovendo um futuro sustentável para a região minhota.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi suportado pelo projeto River2Ocean (NORTE-01-0145- FEDER-000068), co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020). Cláudia Carvalho-Santos é apoiada pelo “Financiamento Programático” UIDP/04050/2020 por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, I.P.). Este trabalho tem o apoio do “contrato-programa” atribuído ao CBMA (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04050/2020>) e ao ARNET- Rede de Infraestruturas em Investigação Aquática (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020>), por fundos nacionais através da FCT, I.P.

## REFERÊNCIAS

Acuna-Alonso, C.; S. Varandas; X. Álvarez; A. Martinho 2023. “Analysis of the evolution of a fisheries management plan based on environmental governance: Living laboratory in the Olo River, Portugal”. *Fisheries Research*, 260, 106595.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2022a) “Plano de Gestão de Região Hidrográfica, 3º ciclo, 2022-2027, Minho e Lima, RH1”

Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2022b) “Plano de Gestão de Região Hidrográfica, 3º ciclo, 2022-2027, Cávado, Ave e Leça, RH2”

Albert, J.S.; G. Destouni; S.M. Duke-Sylvester; A.E. Magurran; T. Oberdorff; R.E. Reis; K.O. Winemiller; W.J. Ripple 2021. “Scientists’ warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis”. *Ambio*, 50(1), 85-94.

Almeida P.; B. Quintella; N. Dias 2002. “Movement of radio-tagged anadromous sea lamprey during the spawning migration in the River Mondego (Portugal)”. *Hydrobiologia*, 483, 1-8

Anastácio, P.M.; F. Ribeiro; C. Capinha; F. Banha; M. Gama; A.E. Filipe; R. Rebelo; R. Sousa 2019. “Non-native freshwater fauna in Portugal: A review”. *Science of the total environment*, 650, 1923-1934.

Andrade, N.O.; B.R. Quintella; J. Ferreira; S. Pinela; I. Póvoa; S. Pedro; P.R. Almeida 2007. “Sea lamprey (*Petromyzon marinus* L.) spawning migration in the Vouga river basin (Portugal): poaching impact, preferential resting sites and spawning grounds”. In *Developments in Fish Telemetry: Proceedings of the Sixth Conference on Fish Telemetry held in Europe* (121-132). Springer Netherlands.

Azeiteiro, U.M.; M.J. Pereira; A.M. Soares; H.O. Braga; F. Morgado; M.C. Sousa; J.M. Dias; C. Antunes 2021. “Dynamics of two anadromous species in a dam intersected river: analysis of two 100-year datasets”. *Fishes*, 6(2), 21.

Baglinière, J.L.; M.R. Sabatié; E. Rochard; P. Alexandrino; M.W. Aprahamian 2003. “The allis shad *Alosa alosa*: Biology, ecology, range, and status of populations”. In *American Fisheries Society Symposium*, 35, 85-102.

Berga, L. 2016. “The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: A review”. *Engineering*, 2, 313-318.

Birnie-Gauvin, K.; M.H. Larsen; J. Nielsen; K. Aarestrup 2017. “30 years of data reveal dramatic increase in abundance of brown trout following the removal of a small hydrodam”. *Journal of environmental management*, 204, 467-471.

Braga, H.O.; M.G. Bender; H.M. Oliveira; M.J. Pereira; U.M. Azeiteiro 2022. “Fishers’ knowledge on historical changes and conservation of Allis shad-*Alosa alosa* (Linnaeus, 1758) in Minho River, Iberian Peninsula”. *Regional Studies in Marine Science*, 49, 102094.

Caetano, M.; J. Raimundo; M. Nogueira; M. Santos; M. Mil-Homens; R. Prego; C. Vale 2016. “Defining benchmark values for nutrients under the Water Framework Directive: Application in twelve Portuguese estuaries”. *Marine Chemistry*, 185, 27-37.

Cairrao, E.; M. Couderchet; A.M.V.M. Soares; L. Guilhermino 2004. “Glutathione-S-transferase activity of *Fucus* spp. as a biomarker of environmental contamination”. *Aquatic Toxicology*, 70(4), 277-286.

Carvalho-Santos, C.; J.P. Nunes; A.T. Monteiro; L. Hein; J.P. Honrado 2016. “Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal”. *Hydrological processes*, 30(5), 720-738.

Cortes, R.M.; A. Peredo; D.P. Terêncio; L.E. Sanches Fernandes; J.P. Moura; J.J. Jesus; M.P. Magalhães; P.J. Ferreira; F.A. Pacheco 2019. “Undamming the Douro River catchment: A stepwise approach for prioritizing dam removal”. *Water*, 11(4), 693.

De Almeida, J.D.; H. Freitas 2012. “Exotic flora of continental Portugal—a new assessment”. *Bocconeia*, 24, 231-237.

e2p energias endógenas de Portugal. “Database of electrical power plants based on renewable energy sources 2017”. [<http://e2p.inegi.up.pt/>]. Acedido em 18/05/2023.



- EDP 2021. “Declaração ambiental 2021, Aproveitamentos Hidroelétricos da EDP Produção”, Direção centro de produção Cávado-Lima
- EEA 2018. “European waters – assessment of status and pressures 2018”. European Environment Agency EEA Report 7/2018.
- DRE 2023. “Dam Removal Europe”. <https://damremoval.eu>
- Duarte, S.; P.E. Vieira; B.R. Leite; M.A. Teixeira; J.M. Neto; F.O. Costa 2023. “Macrozoobenthos monitoring in Portuguese transitional waters in the scope of the water framework directive using morphology and DNA metabarcoding”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 281, 108207.
- Fairley P. 2015. “Energy storage: Power revolution”. *Nature*, 526, 102–S104.
- Fernandes, L.S.; A.C.P. Fernandes; A.R.L. Ferreira; R.M.V. Cortes; F.A.L. Pacheco 2018. “A partial least squares–path modeling analysis for the understanding of biodiversity loss in rural and urban watersheds in Portugal”. *Science of the total environment*, 626, 1069–1085.
- Filgueiras A.V.; I. Lavilla; C. Bendicho 2004. “Evaluation of distribution, mobility and binding behaviour of heavy metals in surficial sediments of Louro River (Galicia, Spain) using chemometric analysis: a case study”. *Science of the Total Environment*, 330(1-3), 115–129.
- Gavioli, A.; M. Mancini; M. Milardi; V. Aschonitis; E. Racchetti; P. Viaroli; G. Castaldelli 2018. “Exotic species, rather than low flow, negatively affect native fish in the Oglio River, Northern Italy”. *River Research and Applications*, 34(8), 887–897.
- Gravato, C.; L. Guimarães; J. Santos; M. Faria; A. Alves; L. Guilhermino 2010. “Comparative study about the effects of pollution on glass and yellow eels (*Anguilla anguilla*) from the estuaries of Minho, Lima and Douro Rivers (NW Portugal)”. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(4), 524–533.
- Guilhermino, L.; A. Martins; C. Lopes; J. Raimundo; L.R. Vieira; L.G.A. Barboza; J. Costa; C. Antunes; M. Caetano; C. Vale 2021. “Microplastics in fishes from an estuary (Minho River) ending into the NE Atlantic Ocean”. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 113008.
- Herawati, H.; L.I.E. Kausar; S. Arifin; I.H. Atqiya; M. Rayhan 2024. “Analysis of leadership model for participation of River Guard in the river waste management system for sustainable healthy city in Banjarmasin South Kalimantan, Indonesia”. *International Journal of Law, Environment, and Natural Resources*, 4(1), 68–75.
- Iglesias, I.; P. Avilez-Valente; A. Bio; L. Bastos 2019. “Modelling the main hydrodynamic patterns in shallow water estuaries: The Minho case study”. *Water*, 11(5), 1040.
- IPVC & BIOPOLIS 2022. “Guia de boas práticas para a gestão de espécies exóticas invasoras aquáticas: O caso do jacinto-de-água e da elódea-densa”. Projeto SINVAQUA. 32 pp.
- Johengen, T.H.; A.M. Beeton; D.W. Rice 1989. “Evaluating the effectiveness of best management practices to reduce agricultural nonpoint source pollution”. *Lake and Reservoir Management*, 5(1), 63–70.
- Konrad C.P. 2009. “Simulating the recovery of suspended sediment transport and river-bed stability in response to dam removal on the Elwha River, Washington”. *Ecological Engineering*, 35(7), 1104–1115.
- LIFE ÁGUEDA 2018. “Ações de conservação e gestão para peixes migradores na bacia hidrográfica do Vouga (LIFE16 ENV/PT/000411)” - <https://www.life-agueda.uevora.pt>
- Maceda-Veiga, A. 2012. Towards the conservation of freshwater fish: Iberian Rivers as an example of threats and management practices. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 23, 1–22.
- Magilligan, F.J.; B.E. Graber; K.H. Nislow; J.W. Chipman; C.S. Sneddon; C.A. Fox 2016. “River restoration by dam removal: Enhancing connectivity at watershed scales”. *Elementa*, 4, 108.
- Mil-Homens, M.; A.M. Costa; S. Fonseca; M.A. Trancoso; C. Lopes; R. Serrano; R. Sousa 2013. “Characterization of heavy-metal contamination in surface sediments of the Minho River Estuary by way of factor analysis. *Archives of environmental contamination and toxicology*”. 64, 617–631.
- Ministério do Ambiente 2016. “Revisão do Programa Nacional de Barragens”. República Portuguesa, Ambiente.
- MEA 2005. “Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis”. World Resources Institute, Washington, DC.
- Monteiro, R.M.; I. Domingos; P.R. Almeida; J.L. Costa; E. Pereira; A.F. Belo; T. Portela; A. Telhado; B.R. Quintella 2023. “Upstream movement of juvenile eels (*Anguilla anguilla* L.) in a southwestern European river”. *Environmental Biology of Fishes* 106, 1313–1325.
- Moreira, F.D. 2011. “Propagação de um invasor: passado, presente e futuro de *Procambarus clarkii* no Noroeste de Portugal” Tese de mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Nunes, J.P., J. Seixas; N.R. Pacheco 2008. “Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds”. *Hydrological Processes* 22(16), 3115–3134.
- Oliveira M.; M. Antunes; A. Carvalho 2021. “Water Management of River Beaches—A Portuguese Case Study”. *Geosciences*, 11(4), 152.
- Pereira, J.L.; S. Pinho; A. Re; P.A. Costa; R. Costa; F. Goncalves; B.B. Castro 2016. “Biological control of the invasive Asian clam, *Corbicula fluminea*: can predators tame the beast?”. *Hydrobiologia*, 779, 209–226.
- Pukk, L.; J. Kanefsky; A.L. Heathman; E.M. Weise; L.R. Nathan; S.J. Herbst; N.M. Sard; K.T. Scribner; J.D. Robinson 2021. “eDNA metabarcoding in lakes to quantify

- influences of landscape features and human activity on aquatic invasive species prevalence and fish community diversity". *Diversity and Distributions*, 27(10), 2016-2031.
- Ramião, J.P.; C. Carvalho-Santos; R. Pinto; C. Pascoal 2022. "Modeling the effectiveness of sustainable agricultural practices in reducing sediments and nutrient export from a river basin". *Water*, 14(23), 3962.
- Ramião, J.P.; C. Carvalho-Santos; R. Pinto; C. Pascoal 2023. "Hydropower contribution to the renewable energy transition under climate change". *Water Resources Management*, 37(1), 175-191.
- Reis, P.A.; J. Cassiano; P. Veiga; M. Rubal; I. Sousa-Pinto 2014. "*Fucus spiralis* as monitoring tool of metal contamination in the northwest coast of Portugal under the European Water Framework Directives". *Environmental monitoring and assessment*, 186, 5447-5460.
- Reis, P.A.; L. Guilhermino; C. Antunes; R.G. Sousa 2014. "Assessment of the ecological quality of the Minho estuary (Northwest Iberian Peninsula) based on metal concentrations in sediments and in *Corbicula fluminea*". *Limnetica*, 33(1), 161-174.
- Rodrigues, D.C.; L. Simões; J. Mullins; S. Lampa; R.C. Mendes; C. Fernandes; R. Rebelo; M. Santos-Reis 2015. "Tracking the expansion of the American mink (*Neovison vison*) range in NW Portugal". *Biological Invasions*, 17(1), 13-22.
- Sala, O.E.; F.I.I.I. Stuart Chapin; J.J. Armesto; E. Berlow; J. Bloomfield; R. Dirzo; E. Huber-Sanwald; L.F. Huenneke; R.B. Jackson; A. Kinzig; R. Leemans 2000. "Global biodiversity scenarios for the year 2100". *Science*, 287(5459), 1770-1774.
- Sampaio, E.; I.F. Rodil 2014. "Effects of the invasive clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) on a representative macrobenthic community from two estuaries at different stages of invasion". *Limnetica*, 33(2), 249-262.
- Santos-Reis, M; A. Mira; M. Lopes-Fernandes 2023. "*Mustela putorius* toirão". In Mathias ML (coord.), Fonseca C. et al (eds.): *Livro Vermelho dos Mamíferos de Portugal Continental*. FCIências.ID, ICNF, Lisboa.
- Santos, S.; V.J. Vilar; P. Alves; R.A. Boaventura; C. Botelho 2013. "Water quality in Minho/Miño River (Portugal/Spain)". *Environmental monitoring and assessment*, 185, 3269-3281.
- Sousa R.; S.Dias; J.C. Antunes 2006. "Spatial subtidal macrobenthic distribution in relation to abiotic conditions in the Lima estuary, NW of Portugal". *Hydrobiologia*, 559, 135-148.
- Sousa, R.; S. Dias; L. Guilhermino; C. Antunes 2008. "Minho River tidal freshwater wetlands: threats to faunal biodiversity". *Aquatic Biology* 3, 237-250.
- Sousa, R.; A.J. Nogueira; M.B. Gaspar; C. Antunes; L. Guilhermino 2008b. "Growth and extremely high production of the non-indigenous invasive species *Corbicula fluminea* (Müller, 1774): possible implications for ecosystem functioning". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80(2), 289-295.
- Sousa, R.; F.E. Freitas; M. Mota; A.J. Nogueira; C. Antunes 2013. "Invasive dynamics of the crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) in the international section of the River Minho (NW of the Iberian Peninsula)". *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 23(5), 656-666.
- Taveira-Pinto, F., R. Silva; J. Pais-Barbosa 2011. "Coastal erosion along the Portuguese northwest coast due to changing sediment discharges from rivers and climate change". *Global change and baltic coastal zones*, 135-151.
- Yates, A.G.; R.C. Bailey; J.A. Schwindt 2007. "Effectiveness of best management practices in improving stream ecosystem quality". *Hydrobiologia*, 583, 331-344.
- Vié, J., C. Hilton-Taylor; S.N. Stuart 2009. "Wildlife in a changing world—an analysis of the 2008 IUCN Red List of threatened species". IUCN, Gland.
- Wang Y.; X. Chen 2019. "River chief system as a collaborative water governance approach in China". *International Journal of Water Resources Development*, 36(4), 610-630.
- Westfall, K.M.; T.W. Theriault; C.L. Abbott 2020. "A new approach to molecular biosurveillance of invasive species using DNA metabarcoding". *Global Change Biology*, 26(2), 1012-1022.
- WISE (Water Information System for Europe - Freshwater) from the European Environmental Agency. Available online at: <https://water.europa.eu/>, Acedido em 19/06/2024.

# Análise comparativa de modelos digitais do terreno obtidos por satélite, para aplicação hidrológica em Portugal

## *Comparative analysis of digital terrain models obtained by satellite, for hydrological application in Portugal*

Jorge E. Matos<sup>1</sup>, Cíntia F. Santos<sup>2</sup>, Raquel Matos<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup> Mathidro Engineering Lda., Campo Mártires da Pátria 144-A, Porto, Portugal

<sup>3</sup> Kengo Kuma & Associates Ltd., Tokyo, Japão

**RESUMO:** Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) desempenham um papel crítico na modelação hidrológica e hidráulica. Os mapas de inundações, realizados com esses modelos, contêm informação que depende, em grande parte, da precisão do MDT. Em Portugal, os MDT com resolução de 10 ou 5 m que existem não cobrem todo o território, são caros e de difícil acesso, o que faz dos obtidos por via satélite, de acesso livre e gratuito, uma ferramenta essencial para os estudos hidrológicos e hidráulica dos recursos hídricos. Os diferentes MDT gratuitos disponíveis foram obtidos por diferentes satélites, em diferentes datas e com diferentes algoritmos utilizados na sua elaboração. Por essa razão, apresentam naturalmente diferenças significativas quer em altitude, quer nos resultados que proporcionam neste tipo de estudos. Assim, é necessário avaliar as diferenças na introdução dos MDT atualmente disponíveis para simulação e previsão de inundações, assim como reduzir possíveis erros que estes possam apresentar. Neste estudo, apresenta-se uma comparação de oito MDT de livre acesso, utilizando a análise estatística dos ficheiros raster de cada modelo e também uma simulação de inundação urbana em duas bacias hidrográficas em Portugal, na Bacia do Rio Leça, a norte da cidade do Porto, e na Bacia do Rio Arade, no Algarve, usando um *software* de modelação hidrodinâmica a duas dimensões.

Palavras Chave: Hidrologia, mapas de inundação, modelação hidráulica, MDT.

**ABSTRACT:** Digital Terrain Models (DTM) play a critical role in hydrological and hydraulic modeling. Flood maps created with these models contain information that largely depends on the accuracy of the DTM. In Portugal, the existing DTM with a resolution of 10 or 5 m do not cover the entire territory nor are they free. Existing national DTM with this resolution are still scarce, expensive and difficult to access, which makes those obtained via satellite, freely accessible, an essential tool for hydrological and hydraulic studies of water resources. The different free DTM available were obtained by different satellites, on different dates and prepared with different algorithms. For this reason, they naturally present significant differences both in altitude and in the results they provide in this type of studies. Therefore, it is necessary to evaluate the differences in the introduction of currently available MDTs for flood simulation and forecasting, as well as reducing possible errors that they may present. In this study, a comparison of eight freely accessible MDTs is presented, using statistical analysis of the raster files of each model and also a simulation of urban flooding in two river basins in Portugal, in the Leça River Basin, north of the city of Porto, and in the Arade River Basin, in the Algarve, using two-dimensional hydrodynamic modeling software.

Keywords: Hydrology, flood maps, hydraulic modeling, DTM.

## 1. INTRODUÇÃO

A ameaça de inundações nas suas diversas formas, resulta em última análise, em perdas económicas e sociais, com a devastação de propriedades, e perda de vidas humanas e materiais. Uma avaliação precisa do risco de inundação em áreas urbanas em cidades costeiras e fluviais é, portanto, necessária para compreender os riscos de inundação, fornecer previsões precisas de ocorrência destes desastres naturais, assim como preparar respostas prontas a este tipo de emergências.

O mapeamento das áreas inundadas, assim como a avaliação das profundidades e velocidades do escoamento em situação de cheia, é imprescindível para identificar áreas de potencial impacto e destruição e assim preparar uma resposta adequada das populações de modo a minimizar a gravidade destas ocorrências.

Devido à constante evolução das capacidades de cálculo dos computadores, bem como à simplificação e desenvolvimento de algoritmos dedicados, nos anos mais recentes os modelos hidrodinâmicos têm assumido um papel cada vez mais importante na simulação hidráulica de inundações fluviais e costeiras. E para usufruir dos mais avançados modelos hidrodinâmicos é necessário dispor de modelos digitais do terreno (MDT).

Em Portugal, tradicionalmente, os estudos hidrológicos e hidráulicos de linhas de água eram realizados recorrendo a cartas militares, á escala 1/25.000, publicadas pelo Instituto Geográfico do Exército, cobrindo cada uma delas uma área de 16x10 km<sup>2</sup>. Estas cartas, presentemente, podem ser compradas online em formato raster, mas são uma reprodução da carta a duas dimensões. Além do custo de aquisição dessas cartas, a transformação de uma carta bidimensional em tridimensional, para uso nos modernos algoritmos de modelação hidráulica, acarretaria muitas horas de trabalho, e correspondente custo laboral, aumentando os custos globais dos serviços de engenharia.

Por essa razão, á medida que foram sendo disponibilizados para o público, os modelos digitais obtidos via satélite, estes foram gradualmente sendo usados pelos especialistas para os modelos hidrológicos e hidráulicos das linhas de água. No entanto, para que o cálculo hidráulico destes modelos seja o mais aproximado à realidade possível, é necessário que o MDT seja o mais preciso e que corresponda, de facto, em todas dimensões, à topografia do terreno natural, mas descartando elementos que podem alterar o escoamento superficial, e impedir uma avaliação incorreta de pendentos, como grupos de grandes árvores ou edifícios.

Os produtos MDT gratuitos e de livre acesso têm sido amplamente utilizados em simulação de inundações e mapeamento. No entanto, a resolução e a precisão relativamente fracas dos MDT de acesso livre limitam significativamente a capacidade de estimar as áreas de inundação e riscos relevantes (Sampson *et al.* 2016). Foi já demonstrado que a baixa qualidade dos dados do MDT pode levar a enganos graves na previsão de inundações (Hawker *et al.* 2018). Os resultados são afetado principalmente pela resolução espacial e pelo erro vertical dos MDT.

Por um lado, a baixa resolução espacial afeta o delineamento das características da superfície e a precisão da simulação de inundação (Merwade 2015). Por outro lado, os erros de elevação (direção vertical) também podem afetar a precisão da simulação do terreno e, portanto, da simulação de inundação (Talchabhadel *et al.* 2021). É evidente a necessidade da utilização de MDT precisos e de resolução tal, que não altere significativamente o escoamento superficial, de modo a obter uma modelação rigorosa e uma gestão de inundações precisa.

Neste estudo comparam-se oito MDT de acesso livre, produzidos por organizações internacionais, com as cartas militares portuguesas, de modo a perceber qual deles se aproxima melhor ao território nacional. Essa avaliação e comparação foi feita de três formas: (1) analisando pontualmente pontos cotados das cartas militares, com as cotas dos MDT; (2) comparando trechos de linhas de nível das cartas com as cotas obtidas nos mesmos locais nos MDT; e (3) modelando uma cheia centenária num troço de duas bacias hidrográficas e comparando áreas e profundidades de escoamento dos mapas de inundação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As subseções seguintes apresentam uma breve introdução da área de estudo, os conjuntos de dados empregues e suas propriedades, e os métodos usados.

### 2.1 Bacias hidrográficas estudadas

Para analisar possíveis alterações de resultados causadas pelas diferentes latitudes do território nacional, optou-se por realizar este estudo em duas bacias hidrográficas posicionadas uma a norte e outra a sul do país. A norte escolheu-se a bacia do rio Leça, situada a norte do Porto, e a Sul a bacia do rio Arade, cuja foz é em Portimão, no Algarve. O relevo e forma destas duas bacias pode ser visto nas figuras 1 e 2.

A bacia hidrográfica do rio Leça tem uma área aproximada de 189,18 km<sup>2</sup> e cotas que variam entre 0 e 535 metros de altitude. Está orientada na direção Este-Oeste e é limitada a Norte pela bacia do rio Ave e a Sul e Este pela bacia do rio Douro. O rio Leça nasce a uma cota aproximada de 457 m, entre os Montes de Santa Luzia e do Lavradio, a Norte da localidade de Redundo, no distrito de Santo Tirso. Percorre 48,61 km antes de desaguar no oceano Atlântico, através do porto de Leixões

que é o segundo maior do país, a cerca de 1900 m a Norte da cidade do Porto. Os seus principais tributários são a Ribeira do Arquinho, que desagua no Leça em São Mamede de Infesta, Matosinhos, e a Ribeira de Leandro, que encontra o Leça perto da localidade de Travagem, na Maia. Esta bacia, que ocupa território de quatro municípios do distrito do Porto - Santo Tirso, Valongo, Maia e Matosinhos – pertence à região hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2).

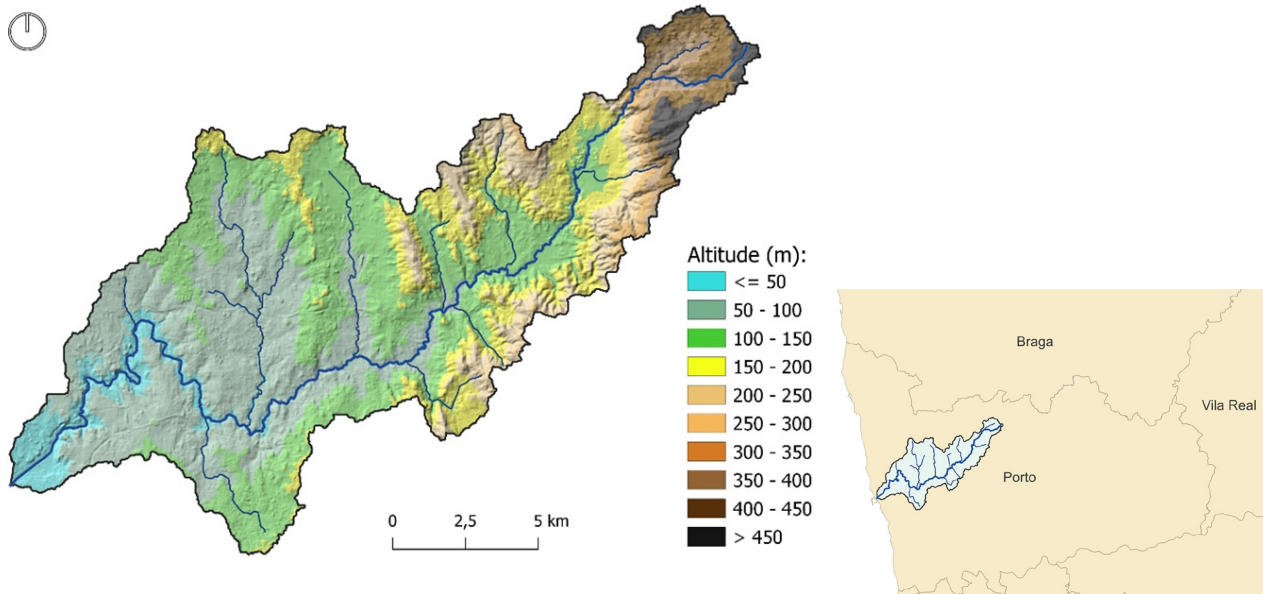


Figura 1. Área, relevo e localização da bacia hidrográfica do rio Leça.

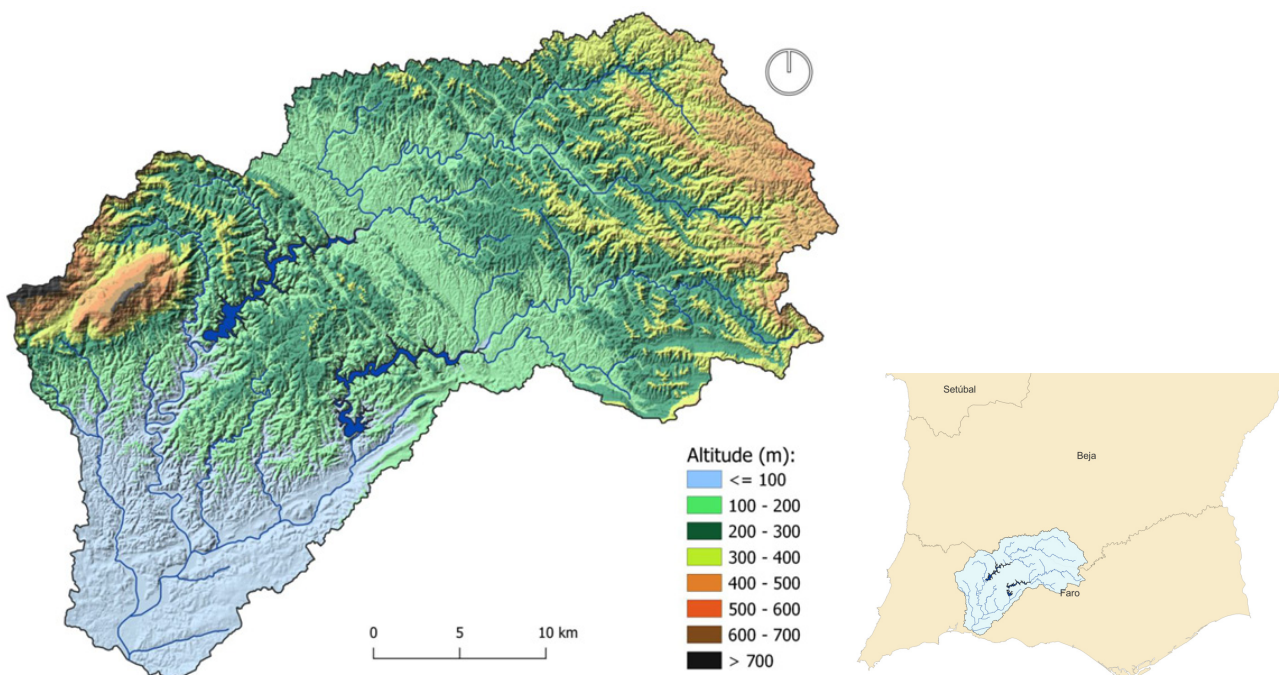


Figura 2. Área, relevo e localização da bacia hidrográfica do rio Arade.

A bacia hidrográfica do rio Arade tem uma área aproximada de 972,24 km<sup>2</sup> e cotas que variam entre os 0 e os 902 m de altitude, em Foia, no alto da serra de Monchique. A sua orientação é Nordeste-Sudoeste. É limitada a Norte pela bacia do rio Mira, a Este pelas bacias das ribeiras de Alcantarilha e de Quarteira, e a Oeste pelas bacias das ribeiras da Torre, do Farelo, de Aljezur e do rio Seixe. O rio Arade, que começa como ribeira do Arade, nasce a uma cota aproximada de 485 m, perto da localidade de Malhão, freguesia de Salir, conselho de Loulé. O rio Arade tem um comprimento de 72,03 km e a sua foz situa-se junto à cidade de Portimão. Tem como principal tributário a ribeira de Odelouca, cuja bacia hidrográfica tem 507,27 km<sup>2</sup>, o que representa 52% da área total da bacia do rio Arade. Esta bacia, que abrange dois concelhos dos distritos do Beja - Ourique e Almodôvar – e cinco do distrito de Faro – Loulé, Silves, Monchique, Portimão e Lagoa - pertence à região hidrográfica do Algarve (RH8).

## 2.2 Modelos digitais do terreno utilizados

Neste estudo analisamos oito conjuntos de dados MDT globais que são livremente acessíveis: SRTM, ASTER-GDEM, NASADEM, EURODEM, ALOS-WORLD, COPERNICUS, FABDEM e ALOS-PALSAR. Quase todos com resolução de 30 m, com exceção do último, alegadamente com 12,5 m de resolução.

**SRTM:** A primeira versão dos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) foi lançada em 2003 com resoluções horizontais de 30 m e 90 m. Os conjuntos de dados publicados inicialmente foram processados usando uma interpolação algorítmica para preencher as lacunas de dados do radar (Reuter *et al.* 2007). Os erros absolutos de elevação do SRTM no quantil de 90% (LE90) variam entre 5,6 cm e 9,0 m (Rodrigue *et al.* 2006). Neste estudo foram usados MDT com resolução de 30 m.

**ASTER GDEM:** é um conjunto global de dados de elevação de um arco de segundo (30 m) baseado nos produtos do novo satélite de observação da Terra lançado pelas equipas científicas do Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) da NASA e do Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI). Este tem a vantagem de uma ampla cobertura de dados, cobrindo a maior parte das regiões do globo terrestre, entre as latitudes 83N e 83S. O erro médio das elevações do ASTER foi estimado em 8,68 m (Tachikawa, *et al.* 2011). A versão 2 do ASTER-GDEM, usada neste estudo, foi lançada em outubro de 2011 e melhora a resolução espacial, usando 260.000 pares de imagens adicionais e melhora a precisão horizontal e vertical (Tachikawa *et al.* 2011).

**NASADEM:** este produto reprocessa os dados SRTM, com elevações do ASTER GDEM, para melhorar os dados altimétricos. As novas e melhoradas altitudes do SRTM em NASADEM são o resultado do melhor controlo vertical baseado em pontos de controlo no solo da missão Satélite de Gelo, Nuvens e Elevação da Terra (ICESat), e as lacunas no SRTM foram reduzidas pelo uso de um novo algoritmo (Crippen *et al.* 2016). NASADEM cobre 80% das regiões terrestres e inclui latitudes entre 60N e 56S. A versão usada neste estudo foi divulgada em fevereiro de 2020, e tem 30 m de resolução horizontal.

**AW3D30:** Os dados ALOS WORLD 3D com 30 m de resolução, são obtidos pelo Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) no satélite de observação avançada do terreno, ALOS (Tadono *et al.* 2014). Os valores de elevação são obtidos por *software* de cálculo a partir de fotografias obtidas por três câmaras com diferentes ângulos de visão, o que efetivamente melhora a precisão. AW3D30 é uma versão transformada a partir do AW3D5 (que não é de uso livre), com resolução de 30 m e cobertura global de 83N a 82S. O erro vertical médio do AW3D5 em 5121 pontos distribuídos em 127 blocos de imagens, é de 4,40 m (Takaku *et al.* 2016). Os dados AW3D30 usados neste estudo são da versão 2.3, lançada em abril de 2019 com 30 m de resolução horizontal.

**Copernicus GLO-30:** O MDT Copernicus é um modelo digital de superfície (MDS) que representa a superfície da Terra, incluindo edifícios, infraestruturas e vegetação. Este MDS é derivado de um outro denominado WorldDEM, onde foram incluídos o achatamento dos corpos d'água e o fluxo consistente dos rios. Além disso, também foram editadas linhas costeiras e ilhas, assim como características especiais como aeroportos e formas improváveis de terreno.

O produto WorldDEM é baseado nos dados de radar de satélite adquiridos durante a Missão TanDEM-X, que foi financiada por uma Parceria Público-Privada entre o Estado Alemão, representado pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a Airbus Defence and Space.

A Copernicus tem dois produtos; o GLO-30, que foi usado neste estudo, oferece cobertura global com resolução de 30 m; e o GLO-90 que oferece cobertura global com resolução de 90 m.

**EuropeDTM:** Este MDT para a Europa Continental foi elaborado usando Ensemble Machine Learning (EML) a partir de modelos digitais de superfície disponíveis publicamente. Cerca de 9 milhões de pontos foram sobrepostos em relação aos mapas MERITDEM, AW3D30, GLO-30, EU DEM, assim como

a altura das copas das árvores (GLAD – Global Land Analysis & Discovery), e mapas de cobertura de solos com árvores e superfícies de águas superficiais. Um modelo de previsão de conjunto foi ajustado usando floresta aleatória, Cubist e GLM, e usado para prever a cota mais provável do terreno (sem vegetação). (Hengl *et al.* 2020).

**FABDEM:** é um produto derivado do Copernicus GLO-30, e elaborado na Universidade de Bristol (UK) onde, por “*machine learning*”, se tentou “retirar” desse MDT os edifícios e florestas (FAB – Forest and Buildings). Tem também resolução de 30 m. Segundo os seus autores (Hawker *et al.* 2020) o método usado para a sua produção permite reduzir o erro vertical médio absoluto em áreas urbanas de 1,61 para 1,12 m, e em florestas de 5,15 a 2,88 m, apresentando este modelo digital como sendo mais preciso do que outros mapas de elevação globais existentes.

**ALOS-PALSAR RTC:** são baseados nos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ou do NED (National Elevation Dataset) dos Estados Unidos. Por um processo de correção radiométrica do terreno (RTC), o espaçamento de pixels do MDT de origem foi ajustado para corresponder ao da imagem Terrain Corrected ao qual ele está agregado e não corresponde à resolução do MDT. Estes ficheiros MDT fornecidos com os produtos “Terrain Corrected” destinam-se apenas a ser usados como referência para a interpretação dos resultados do processo de correção radiométrica do terreno. Eles não devem

ser usados diretamente como um MDT normal, pois os valores de elevação são alterados pela correção do geóide na preparação para o processamento de correção radiométrica.

A opção de comparar este produto aos restantes MDT’s, deve-se á propalada melhoria da sua resolução (12,5 m) que pode induzir em erro os menos informados.

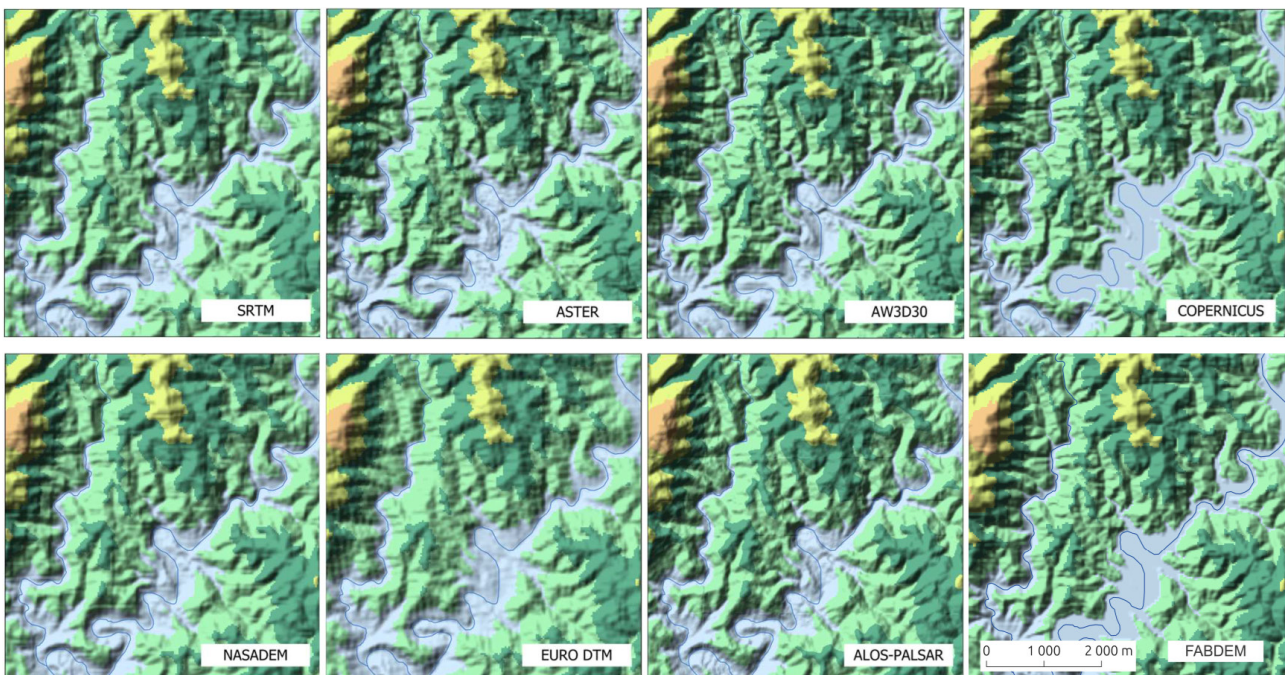
### 2.3 Metodologia

Nas subseções que se seguem apresentam-se os três processos principais do estudo, que incluem o processamento do modelo digital de elevação, a análise das diferenças altimétricas, a simulação dos eventos de inundação e a avaliação da precisão da simulação de inundação.

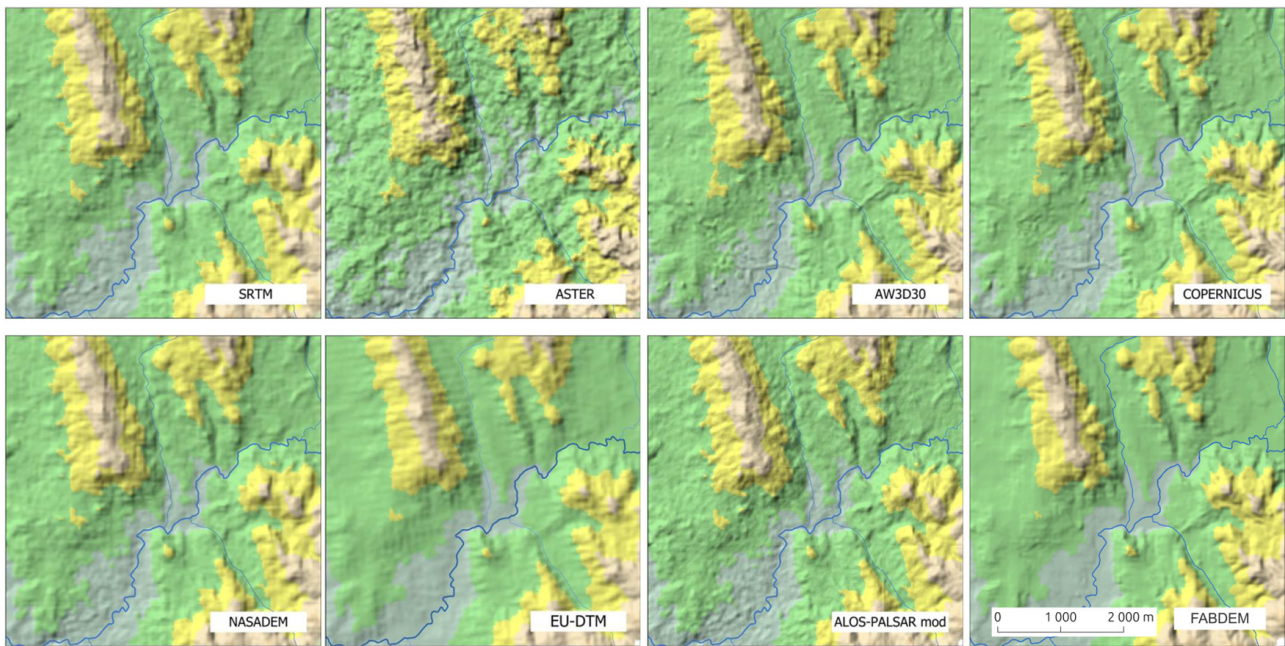
#### 2.3.1 Processamento dos Modelo Digital de Elevação

Os oito MDT usados para cada bacia deste estudo foram “descarregados” dos sites respetivos e foram reprojatados para as coordenadas EPSG:3763 - ETRS89/Portugal TM06, depois recortados de acordo com as áreas de cada bacia, entretanto calculadas com ferramentas apropriadas do *software* SIG, e finalmente coloridos de acordo com a sua hipsometria.

A primeira análise efetuada foi o aspeto gráfico dos MDT. Nas figuras 3 e 4 podem ver-se pormenores das duas bacias hidrográficas recorrendo aos oitos modelos digitais do terreno.



**Figura 3.** Representação altimétrica de pormenor da bacia hidrográfica do Rio Arade, com os diferentes MDT.



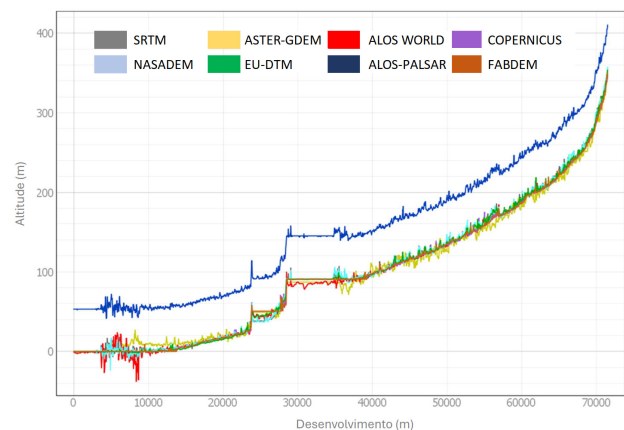
**Figura 4.** Representação altimétrica de pormenor da bacia hidrográfica do Rio Leça, com os diferentes MDT.

Apesar da avaliação gráfica não poder ser medida por parâmetros exatos e depender mais do gosto e sensibilidade pessoal de quem avalia, é possível sentir alguma simpatia por uns modelos e antipatia por outros, que parecem menos naturais. No caso dos pormenores do rio Arade, que abrangem a albufeira da barragem de Odelouca, construída em 2009, é possível notar em alguns MDT (COPERNICUS e FABDEM) o nível de água da albufeira, enquanto nos restantes não se representa o nível da água da albufeira. No pormenor da bacia do rio Leça sobressai a “aspereza” do modelo ASTER e a “lisura” do modelo EU-DTM.

Todos os MDT, sendo obtidos por tratamento informático de fotografias obtidas por satélite, representam apenas o terreno acima do nível da água e, portanto, não são utilizáveis para a análise batimétrica dos cursos dos grandes rios ou de albufeiras.

Foi também analisado o perfil longitudinal das principais linhas de água das duas bacias, o que permitiu detetar logo uma grande diferença de cotas entre o modelo ALOS-PALSAR e os restantes. Na figura 5 apresenta-se o perfil longitudinal do rio Arade obtido com recurso aos modelos digitais, onde é evidente que o modelo ALOS-PALSAR está claramente desfasado de todos os outros e da realidade, contendo cotas que, em média, estão 47,6 metros acima dos restantes. Na bacia do rio Leça, essa diferença média é de 56,8 metros. Este produto foi obtido a partir de MDT’s pré-

existentes, como os SRTM (resolução de 30 m) e os NED (National Elevation Dataset dos Estados Unidos, com resolução de 10 m), e artificialmente organizado com pixels de 12,5 m, de modo a coincidir com as imagens satélite LandSat 8, com as quais é fornecido, no pacote RTC.



**Figura 5.** Perfil longitudinal do rio Arade, obtido pelos MDT.

As diferenças de cotas médias, encontradas no produto ALOS PALSAR RTC, entre o Norte e o Sul de Portugal, talvez se devam à conversão de alturas do geoide de cada MDT de origem, para o elipsoide WGS84, que usaram como referência. Estas conversões altimétricas foram elaboradas pelo ASF (Alaska Satellite Facility) recorrendo a ferramentas informáticas, por eles desenvolvidas, a partir de alturas ortométricas com dados verticais EGM96.



Por esta razão, nas análises comparativas que se seguem, o modelo ALOS-PARSAR foi “rebaixado” das diferenças médias encontradas, em cada bacia, de modo a permitir a sua comparação com os restantes modelos.

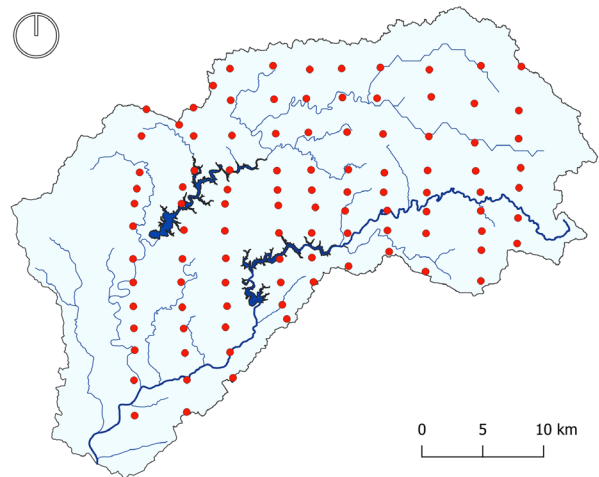
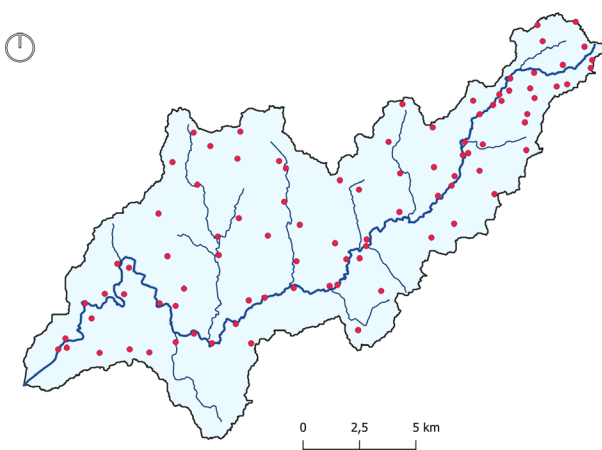
### 2.3.2 Análise das diferenças altimétricas pontuais

Seguidamente analisou-se a exatidão das cotas dos MDT, fazendo uma comparação com os pontos cotados das cartas militares portuguesas. Assim, em cada bacia hidrográfica foram escolhidos aproximadamente uma centena de pontos, correspondentes a locais com cotas assinaladas nas cartas militares e foi comparada a cota vertical com as dadas pelos MDT. Nas figuras 6 e 7 podem ver-se

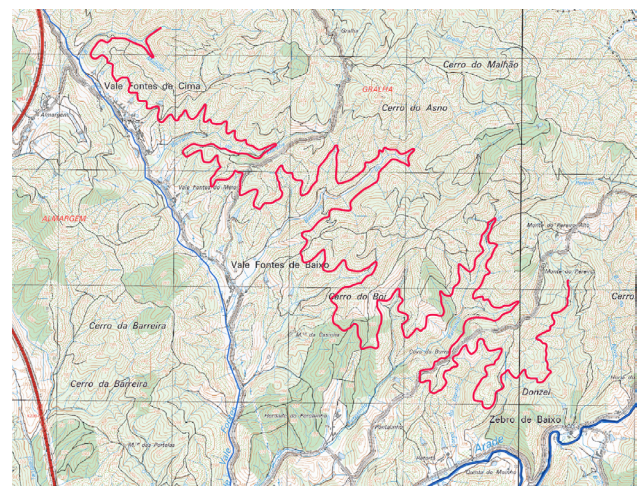
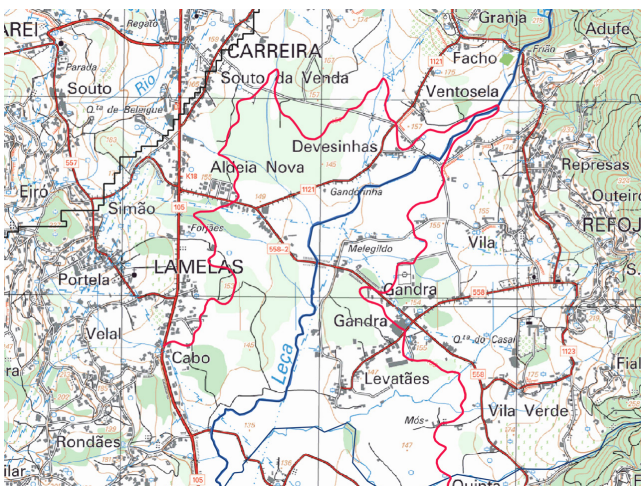
os locais onde foram feitas essas comparações nas duas bacias hidrográficas.

### 2.3.3 Análise das diferenças altimétricas lineares

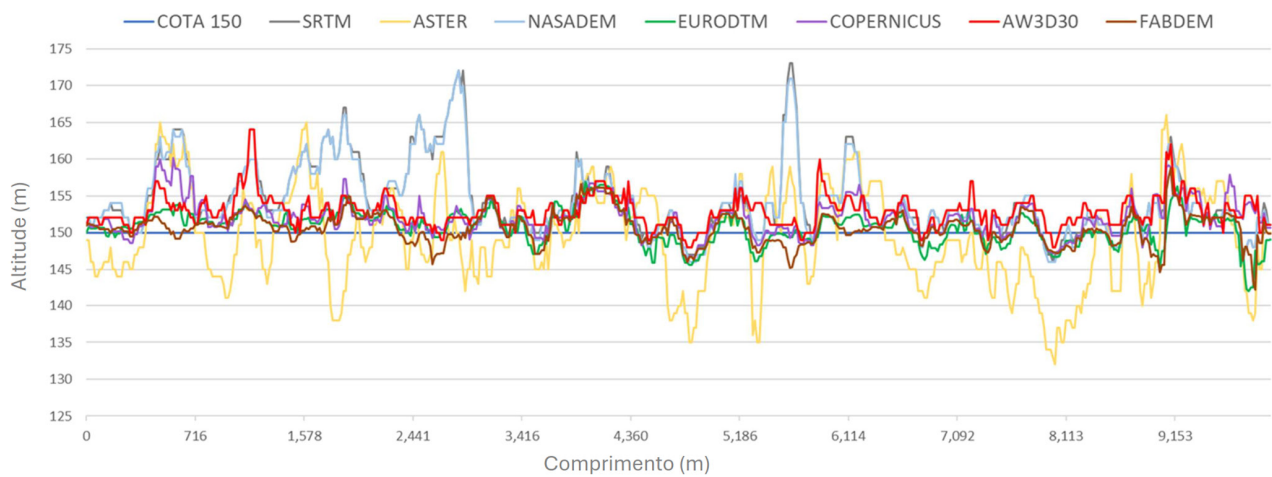
Dado que os pontos cotados das cartas militares são maioritariamente pontos com cotas elevadas, foi também feita uma análise linear das diferenças de altitude. Para tal, foram digitalizadas sobre as cartas militares troços de curvas de nível com cerca de 10 km de extensão. As curvas de nível escolhidas foram as de 150 m para a bacia do rio Leça e de 250 m para a bacia do rio Arade. Nas figuras 8 e 9 pode ver-se a localização das curvas de nível nas duas bacias hidrográficas e nas figuras 10 e 11 apresentam-se as diferenças observadas em relação aos diferentes MDT.



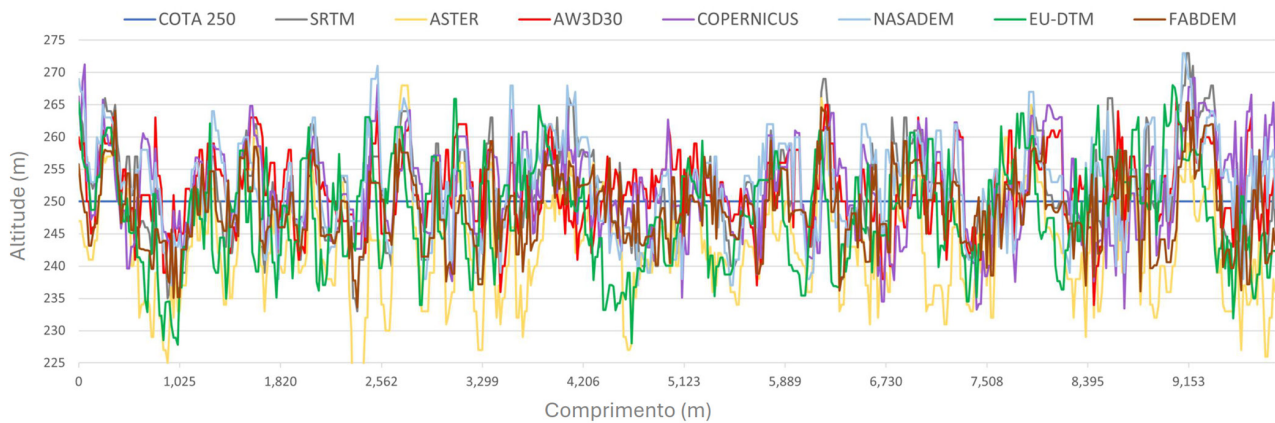
**Figuras 6 e 7.** Pontos escolhidos para comparação de cotas, nas duas bacias hidrográficas.



**Figuras 8 e 9.** Localização das curvas de nível escolhidas para comparação nas bacias do rio Leça (8) e do rio Arade (9).



**Figura 10.** Comparação de cotas dos MDT com a curva de nível 150, na bacia do rio Leça.



**Figura 11.** Comparação de cotas dos MDT com a curva de nível 250, na bacia do rio Arade.

### 2.3.4 Mapas de inundação

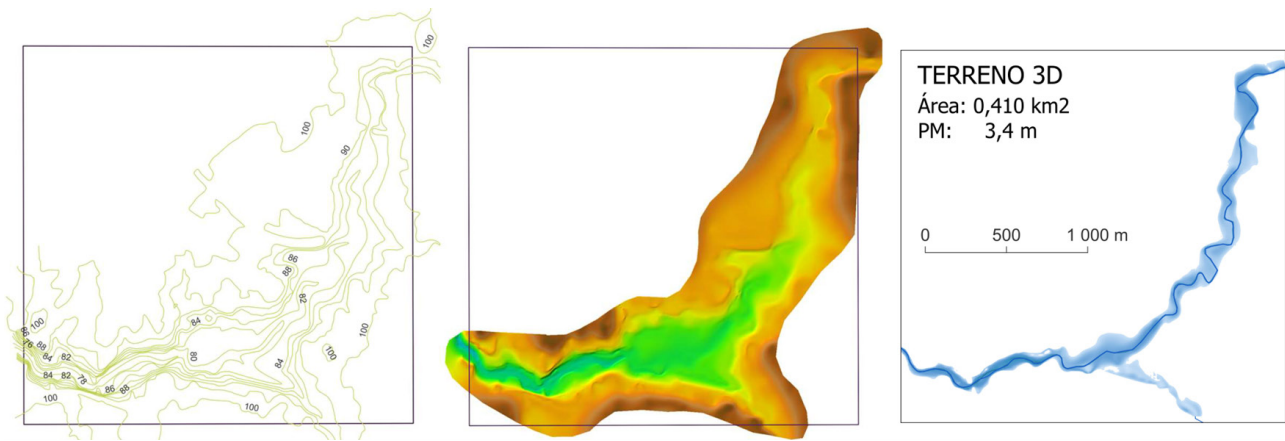
As análises de diferenças de altimetria, sejam elas pontuais ou lineares, não permitem avaliar completamente a adequabilidade de um MDT para utilização em estudos de hidráulica fluvial, uma vez que não nos dão pistas sobre o comportamento hidráulico no plano horizontal ou em planta. A melhor forma de fazer essa análise é modelando uma ocorrência de uma inundação e isso foi feito para as duas bacias hidrográficas com todos os MDT em análise.

Para se comparar cada um dos MDT com o terreno real, foi necessário obter primeiro um modelo digital do terreno real de um trecho de cada bacia hidrográfica em estudo. Para isso, com base nas curvas de nível e pontos cotados das cartas militares, foi elaborado um modelo tridimensional com recurso a um *software* SIG, (SAGA GIS v. 9.1.3) pelo método de interpolação "Multilevel B-Spline".

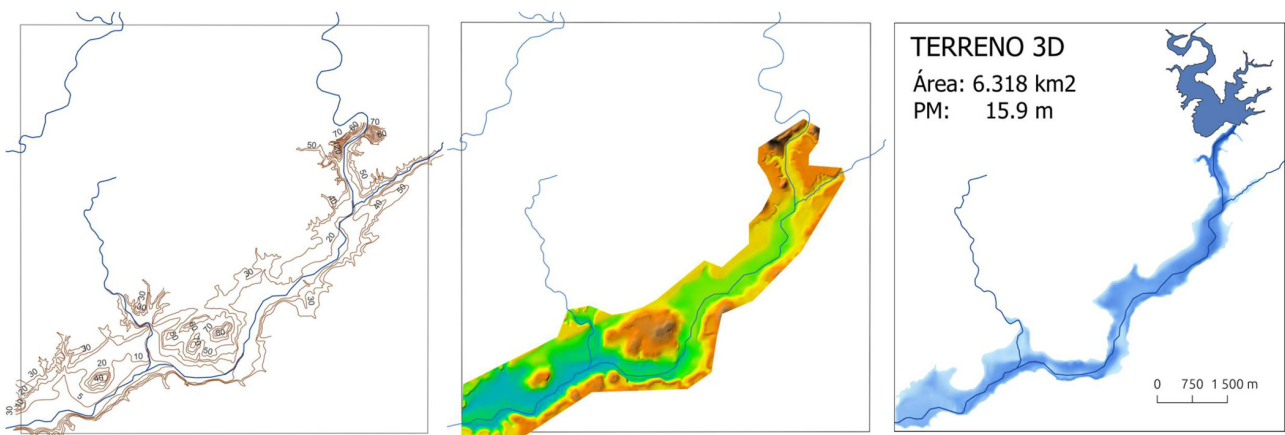
As áreas utilizadas para cada bacia foram de cerca de 2,5x2,5 km<sup>2</sup>, no caso do rio Leça, e 7x7 km<sup>2</sup>, no caso do rio Arade. Nas figuras 12 e 13 podem ver-se os modelos digitais do terreno real e o mapa de inundação nos trechos escolhidos do rio Leça e Arade, respetivamente.

Depois de obtido o modelo digital real foi simulada uma situação de inundação. Para esse efeito foi utilizado o *software* HEC-RAS, na versão 6.2, e foi desenvolvida uma análise do escoamento não-permanente a 2 dimensões. Este *software* foi desenvolvido pelo United States Army Corps of Engineers e nas suas últimas versões permite desenvolver uma simulação em duas dimensões de escoamentos variados através da utilização das equações de Saint-Venant e/ou das equações de difusão da onda.

O modelo digital elaborado com base nas cartas militares tem uma resolução de 0,5 m o que permite um escoamento superficial modelado muito mais



**Figura 12.** Modelação do terreno real e correspondente mapa de inundação no rio Leça (área de 2,5x2,5 km<sup>2</sup>).



**Figura 13.** Modelação do terreno real e correspondente mapa de inundação no rio Arade (área de 7x7 km<sup>2</sup>).

aproximado á realidade do que os MDT em estudo que têm, recorde-se, uma resolução de 30 metros. Em seguida fizeram-se os mapas de inundação das mesmas zonas e com os mesmos caudais de cheia, para os vários MDT e comparou-se a área inundada e as profundidades máximas de escoamento.

Para o rio Leça considerou-se uma cheia relativamente frequente (período de retorno de 5 anos), numa zona de relevo amplo ocupada por parques urbanos recreativos, com um caudal de cheia de 60 m<sup>3</sup>/s. Para o rio Arade esse cenário não seria plausível, quer pela ausência de precipitação na zona, quer pela existência de duas barragens no rio (Odelouca e Funcho) cujas albufeira absorvem e amortecem as possíveis cheias que possam ocorrer. Por essa razão, para o rio Arade simulou-se a destruição por rompimento da barragem de Odelouca, o que originaria uma onda de cheia de 5700 m<sup>3</sup>/s, com efeitos catastróficos na cidade

de Silves. Para ambos os rios analisou-se a área inundada e a profundidade máxima da cheia (no ponto mais fundo).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Diferenças altimétricas pontuais

Apesar da correlação matemática entre os valores apresentados nas cartas militares e os dados pelos MDT ser satisfatória para ambas as bacias, com valores de R<sup>2</sup> entre 0,9944 (ASTER) e 0,9992 (AW3D30 e COPERNICUS), a análise das diferenças revelou ser mais conclusiva acerca das capacidades dos vários modelos para representar o terreno real. Nas figuras 14 e 15 apresentam-se as diferenças de cotas encontradas e linhas de tendência da variação em função da altitude.

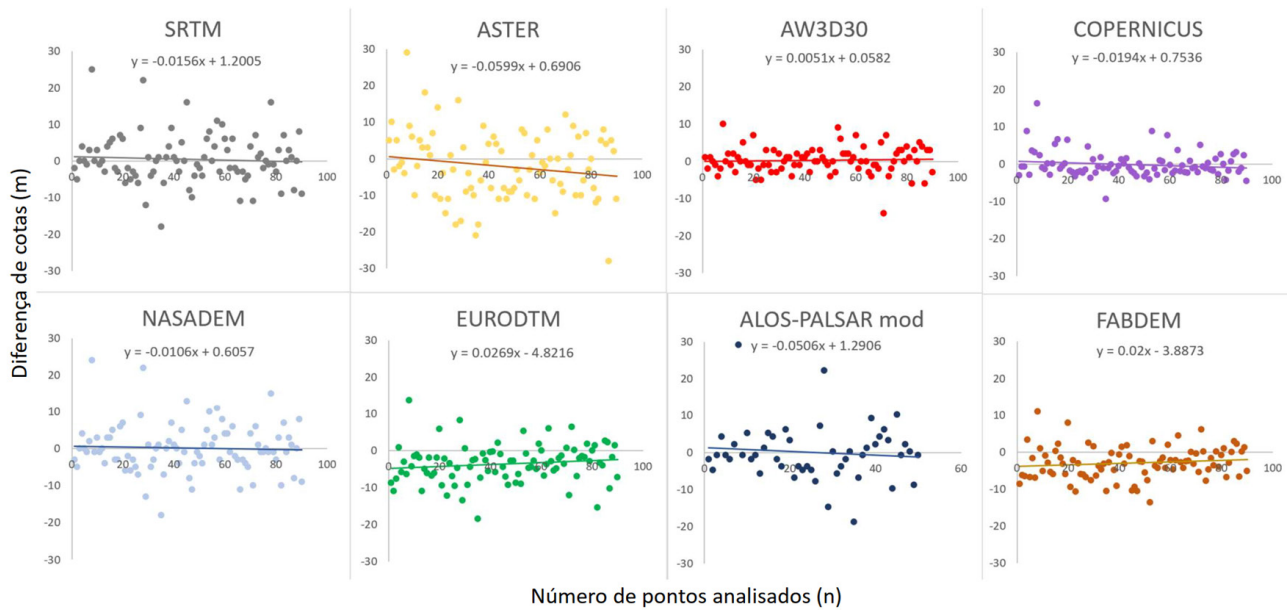


Figura 14. Análise das diferenças de cotas pontuais para a bacia do rio Leça.

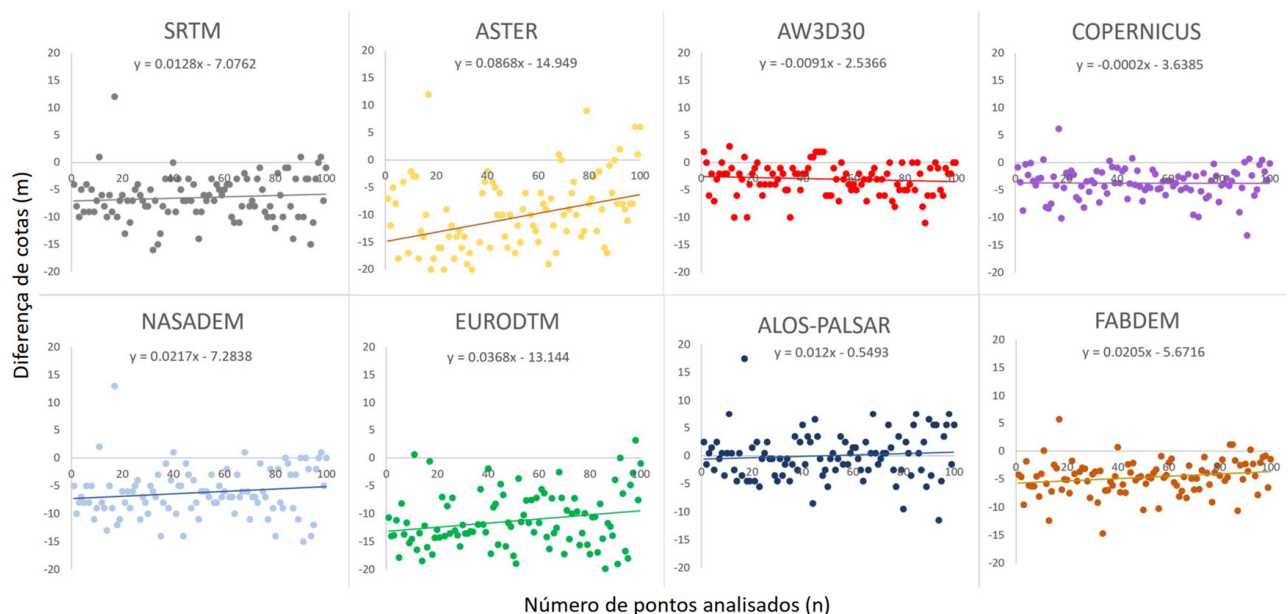


Figura 15. Análise das diferenças de cotas pontuais para a bacia do rio Arade.

Relativamente à bacia do rio Leça, podemos observar que a maioria dos modelos não apresenta variações em função da altitude, apresentando linhas de tendência horizontais. As exceções são o modelo ASTER, cujas diferenças vão sendo maiores à medida que aumenta a altitude, e o modelo EURODTM cujas diferenças são maiores para baixas altitudes.

Naturalmente que os modelos mais próximos da realidade serão aqueles cuja nuvem de pontos se aproxima mais da linha horizontal zero. Para a bacia hidrográfica do rio Leça serão os modelos AW3D30, COPERNICUS e FABDEM.

O erro quadrático médio (EQM) das diferenças por pontos nesta bacia variam entre os 3,56 m (COPÉRNICUS) e 9,08 m (ASTER). (Ver Tabela 1)

Na bacia hidrográfica localizada no Algarve notam-se mais diferenças em função da altitude. Na figura 15 pode observar-se que as linhas de tendência raramente são horizontais, sendo os modelos AW3D30, COPERNICUS e ALOS-PALSAR (modificado) aqueles que apresentam uma tendência mais estável com a altitude.

O erro quadrático médio (EQM) das diferenças por pontos na bacia do rio Arade variam entre os 2,82 m (COPÉRNICUS) e 22,15 m (EURODTM). (Ver Tabela 2).

### 3.2 Diferenças altimétricas lineares

Da comparação das altitudes das linhas de nível escolhidas para cada bacia hidrográfica, resultam as seguintes observações.

Na bacia do rio Leça constata-se que a diferença máxima de altitudes é de cerca de 5 metros (entre 145 e 155 m), com exceção dos modelos SRTM, NASA DEM e ASTER, que apresentam diferenças maiores. Já para a bacia do rio Arade as diferenças são maiores, da ordem dos 15 metros, resultando num gráfico bastante confuso (fig.11), de onde não se conseguem descortinar quais os modelos melhores ou piores.

Nas diferenças altimétricas lineares, o EQM varia entre 2,24 m (FABDEM) e 6.62 m (ASTER) para o rio Leça e entre 5,90 m (FABDEM) e 10,76 m (ASTER), para a bacia do Arade.

Observa-se mais claramente que, na bacia do rio Leça, os modelos AW3D30, COPERNICUS, EURODTM e FABDEM apresentam pouca dispersão em volta do valor 150 m, e têm uma linha de tendência quase horizontal, o que significa que não existem variações com a altitude. Os restantes modelos apresentam variações maiores e tendências de variação com a altitude. Notar que o modelo SRTM atinge diferenças superiores a 20 m. Relativamente à bacia do Rio Arade no Sul, as dispersões observadas são muito maiores e mesmo os modelos com melhores resultados no Norte apresentam agora diferenças superiores a 20 m.

As figuras 16 e 17 apresentam uma análise das diferenças encontradas ao longo das curvas de nível nas bacias do rio Leça e do Arade respetivamente.

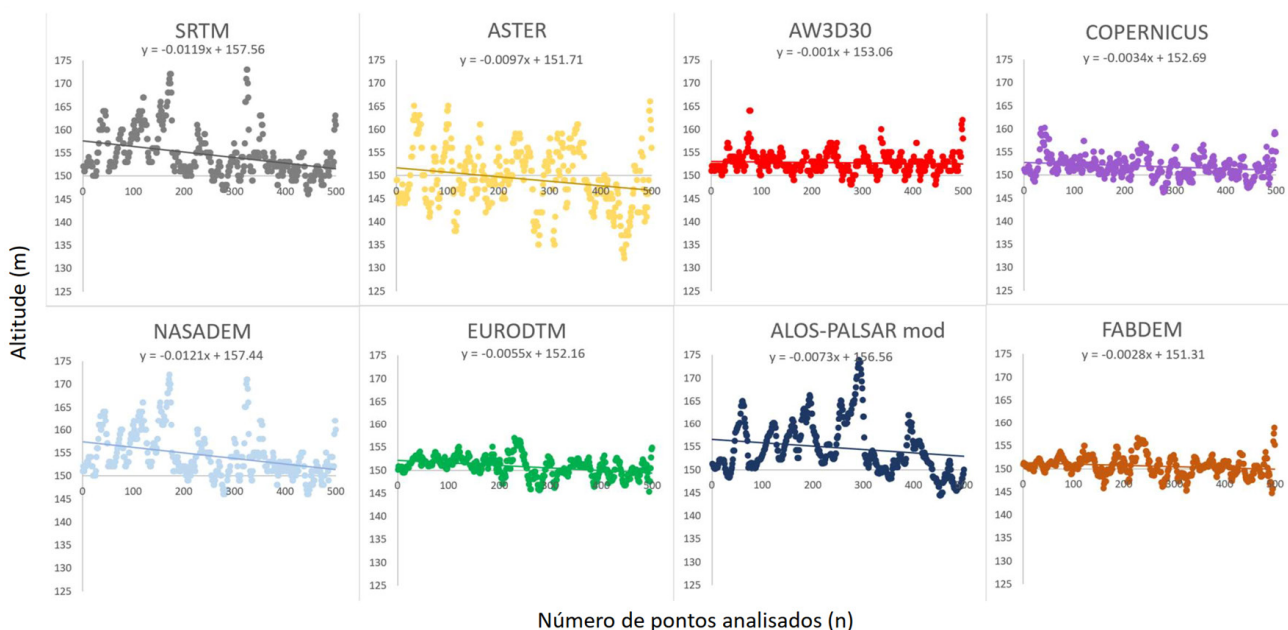
### 3.3 Análise da precisão da simulação de inundação

Para cada troço escolhido de cada um dos rios foi feita uma simulação de cheia com os oito MDTs e analisada a área inundada, assim como as profundidades máximas de escoamento obtidas. Nas figuras 18 e 19 podem ver-se esses mapas e nas tabelas da secção 4 apresentam-se os valores e as diferenças.

## 4. DISCUSSÃO

Para uma análise mais precisa sobre as diferenças verificadas entre as altitudes dos modelos digitais e as cartas militares, elas foram analisadas segundo o erro quadrático médio (EQM) e o desvio padrão (DP). Nas simulações de inundação compararam-se as áreas inundadas e as profundidades máximas obtidas com cada um dos MDT com os mesmos parâmetros obtidos com o terreno tridimensional real, obtido por interpolação das linhas de nível. Nas tabelas 1 e 2 apresentam-se estes valores sintetizados.

A correlação linear entre as altitudes registadas nas cartas militares e as dadas nos mesmos pontos por cada um dos modelos MDT demonstrou ser positiva e quase perfeita, com um coeficiente de correlação entre 0,9958 e 0,9994 para a bacia do rio Leça, e entre 0,9944 e 0,9992 para a bacia do rio Arade. Neste aspeto o pior resultado é obtido para o modelo ASTER e os melhores resultados vão para os modelos AW3D30 e COPERNICUS em ambas as bacias.



**Figura 16.** Análise das diferenças de cotas dos MDT com a curva de nível 150, na bacia do rio Leça.

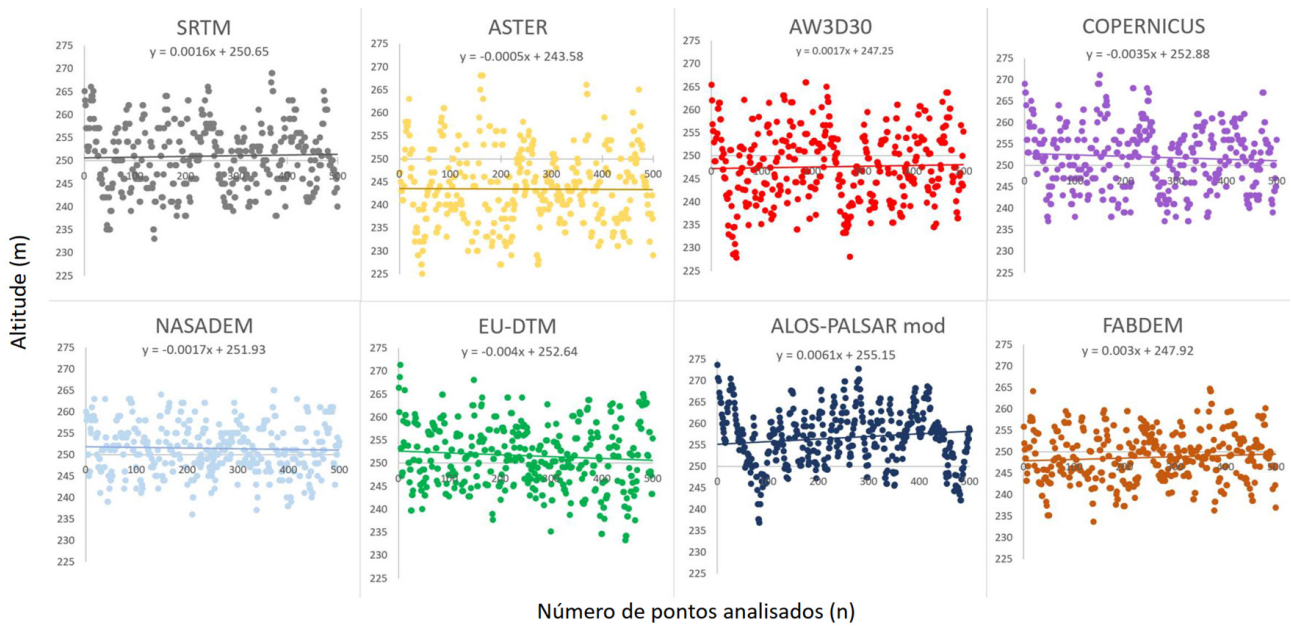


Figura 17. Análise das diferenças de cotas dos MDT com a curva de nível 250, na bacia do rio Arade.

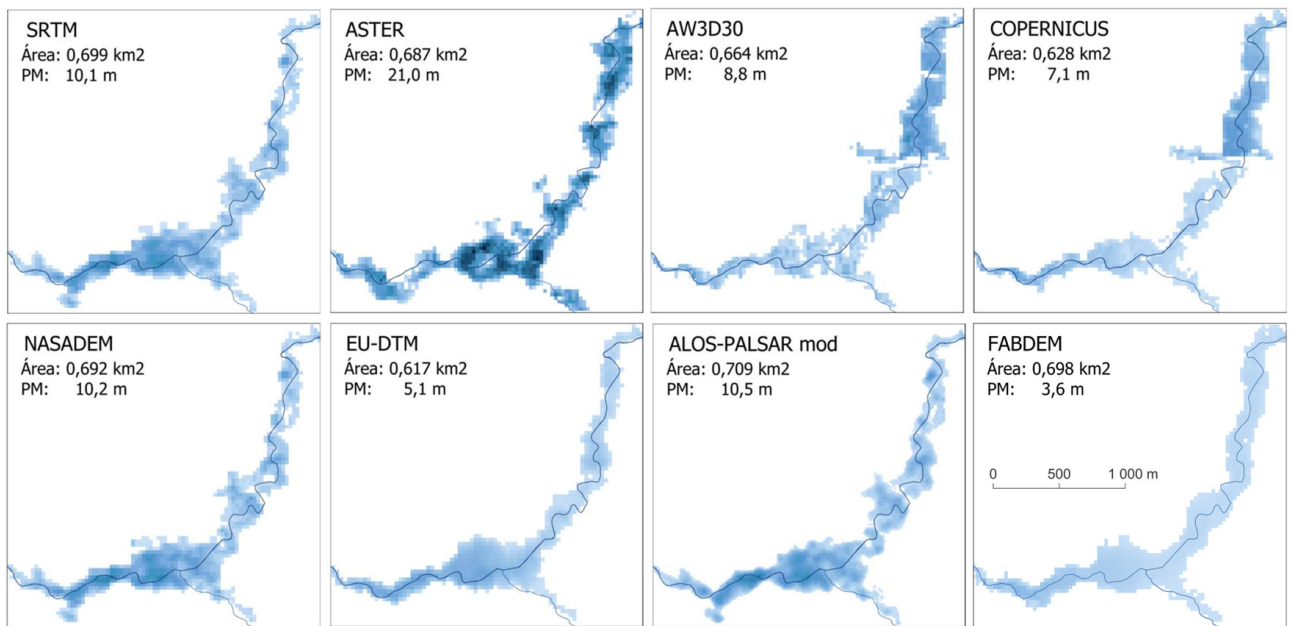


Figura 18. Comparação das áreas inundadas e profundidades máximas de inundação no trecho do rio Leça.

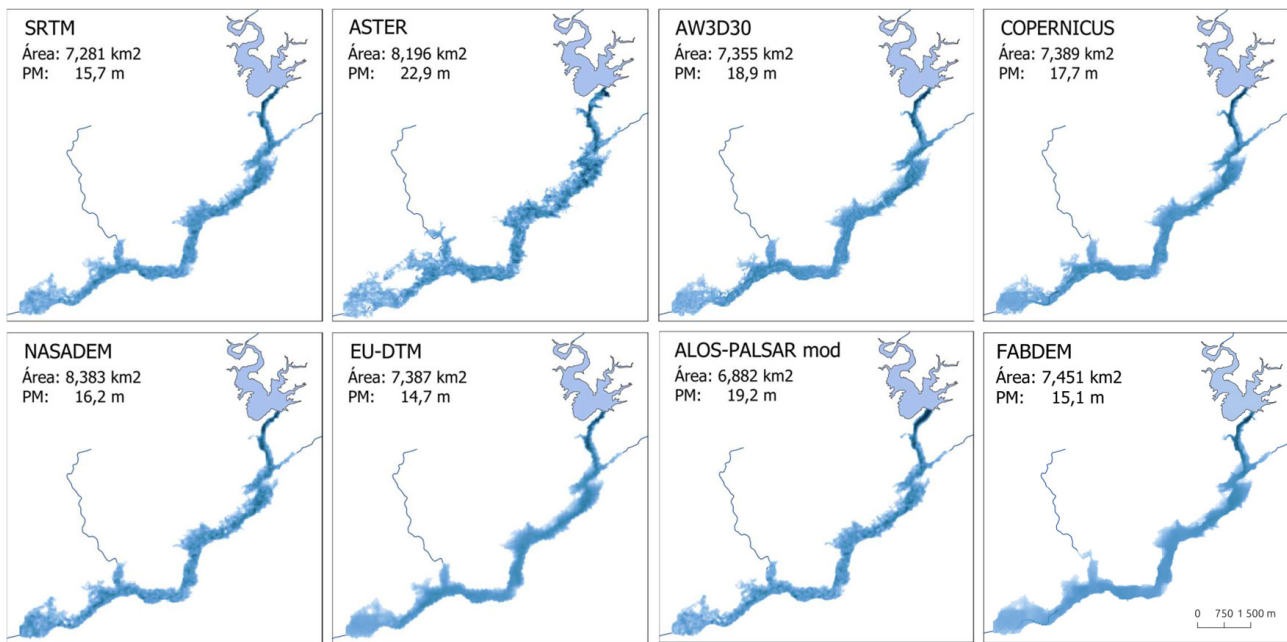


Figura 19. Comparação das áreas inundadas e profundidades máximas de inundação no troço do rio Arade.

Tabela 1. Comparação de resultados relativos à Bacia do rio Leça.

NORTE - Bacia do rio Leça												
MDT/MDE	R <sup>2</sup>	EQM (m)		DP (m)		Área Inundada (Km <sup>2</sup> )				Prof. Máx. Escoam. (m)		
		Pontos	Linha	Pontos	Linha	MDT	Real	Dif.	%	MDT	Real	Dif.
SRTM	0.9976	7.41	6.56	6.79	4.89	0.699	0.410	0.289	41%	10.0	3.4	6.6
ASTER	0.9958	9.08	6.62	9.23	6.60	0.687		0.277	40%	21.0		17.6
AW3D30	0.9994	3.48	3.56	3.53	4.82	0.664		0.254	38%	8.8		5.4
COPERNICUS	0.9994	3.53	3.09	3.47	2.29	0.628		0.218	35%	7.1		3.7
NASADEM	0.9977	6.06	6.39	6.66	2.39	0.692		0.282	41%	10.2		6.8
EURODTM	0.9988	4.82	2.39	5.11	2.17	0.617		0.207	34%	5.2		1.7
FABDEM	0.9991	4.20	2.24	4.28	2.16	0.698		0.288	41%	3.6		0.2
ALOS-PALSAR*	0.9971	7.55	6.12	7.72	6.12	0.709		0.299	42%	10.5		7.1

\* - Depois de rebaixado 56.8 m

Tabela 2. Comparação de resultados relativos à Bacia do rio Arade.

Sul - Bacia do rio Arade												
MDT/MDE	R <sup>2</sup>	EQM (m)		DP (m)		Área Inundada (Km <sup>2</sup> )				Prof. Máx. Escoam. (m)		
		Pontos	Linha	Pontos	Linha	MDT	Real	Dif.	%	MDT	Real	Dif.
SRTM	0.9983	4.10	7.40	4.13	7.20	7.281	6.318	0.963	13%	15.7	15.9	0.2
ASTER	0.9944	7.39	10.76	7.49	8.37	8.196		1.878	23%	22.9		7.0
AW3D30	0.9992	2.86	6.11	2.91	5.91	7.355		1.037	14%	18.9		3.0
COPERNICUS	0.9992	2.82	7.01	2.84	6.83	7.389		1.071	14%	17.7		1.8
NASADEM	0.9982	4.25	7.30	4.30	7.02	8.383		2.065	25%	16.2		0.3
EURODTM	0.9976	22.15	8.12	5.06	7.86	7.387		1.069	14%	14.7		1.2
FABDEM	0.9991	2.99	5.90	3.02	5.86	7.451		1.133	15%	15.1		0.8
ALOS-PALSAR*	0.9983	4.19	10.42	4.16	6.72	6.882		0.564	8%	19.2		3.3

\* - Depois de rebaixado 47.6 m

Relativamente ao EQM das diferenças pontuais de altitude, verifica-se que os melhores resultados são os dos modelos AW3D30 e COPERNICUS, com um EQM de 3,48 e 2,82 m, para as bacias do rio Leça e do Arade, respetivamente. Já para a comparação linear, o modelo que melhor resultado obteve foi o FABDEM com 2,24 e 5,90 m, respetivamente para a bacia do Norte e do Sul.

O desvio padrão das diferenças de altitude confirmou estes modelos como os mais aproximados à realidade com o COPERNICUS a ser melhor na análise por pontos (3,47 e 2,84 m no Leça e no Arade) e o FABDEM na análise linear com 2,16 e 5,86 m, respetivamente para a bacia do rio Leça e do rio Arade.

A análise das áreas inundadas demonstra uma disparidade de precisão dos resultados entre a bacia do Rio Leça e a do Arade. Enquanto na primeira as diferenças de área inundada estão entre os 35 e os 42%, na segunda estão entre os 8 e os 25%. Esta diferença de precisão, entre as duas zonas, talvez resida no modelo tridimensional elaborado com base nas curvas de nível das cartas militares. De facto, como se pode ver nas figuras 8 e 9, apesar das curvas de nível terem o mesmo espaçamento vertical (10 m) a área na zona escolhida do rio Leça é menor (2,5x2,5 km<sup>2</sup>) e as margens tem menores declives logo, apresenta poucas curvas de nível e muito espaçadas em planta. A zona escolhida do rio Arade tem uma área maior (7x7 km<sup>2</sup>) e as margens do rio são mais inclinadas, pelo que as curvas de nível são em maior número na carta militar. Este facto faz com que o modelo tridimensional do terreno, elaborado por interpolação das curvas de nível, e que se assumiu para efeito deste estudo como correspondendo ao modelo real, seja mais credível na zona do rio Arade do que no rio Leça.

Assim, dado que o MDT "real" se baseou nas curvas de nível, que são escassas, e não em cartas topográficas ou MDT reais, a análise da área inundada não apresenta o mesmo rigor matemático que a análise altimétrica por comparação de cotas cartografadas. No entanto, os resultados de profundidade máxima podem ser considerados corretos e permitem tirar algumas conclusões. Assim, verifica-se que na zona estudada do rio Leça os modelos mais precisos são os EURODTM e FABDEM, com diferenças de 1,7 e 0,2 m, e na zona do rio Arade os MDT FABDEM e NASADEM são os que apresentam menor diferença, com -0,80 e 0,30 m, respetivamente.

## 5. CONCLUSÕES

Os métodos usados para o estudo hidrológico e hidráulico de linhas de água naturais, tradicionalmente feitos com base nas curvas de nível das cartas militares, têm vindo a ser modificados com a introdução no mercado de novas tecnologias espaciais. A disponibilidade de livre acesso de modelos digitais da superfície terrestre, que aconteceu em 2015 com o lançamento do modelo SRTM, veio revolucionar a forma como se fazem este, e outros tipos de estudos ambientais.

Este estudo demonstrou que o modelo pioneiro SRTM, foi ultrapassado em precisão e rigor geográfico pelos posteriores modelos ALOS WORLD e COPERNICUS e seus subprodutos. O modelo FABDEM, subproduto do COPERNICUS, e o ALOS WORLD (AW3D30) parecem ser os que mais se aproximam no terreno natural em Portugal continental, devendo por essa razão ser usados nos estudos de escoamento superficial, em detrimento do modelo SRTM, mais antigo e por isso mais conhecido

Ficou também demonstrado que quanto maior a área estudada por estes métodos, maior será o grau de precisão alcançado por estes modelos digitais. O facto destes produtos terem unidades de área de 30x30 m, impede a sua aplicação em área reduzidas, que devem ser estudadas recorrendo às tradicionais plantas topográficas ou a modelos digitais mais precisos, obtidos por meios aéreos.

Comparando a aplicabilidades dos MDT analisados ao Norte e a Sul do território português, verifica-se que os modelo COPERNICUS e o seu subproduto FABDEM, são igualmente eficazes, apresentando o primeiro, melhores resultados na análise por pontos e o segundo na análise linear. No entanto, dado que o COPERNICUS contem a informação sobre construções e florestas pode ser necessário modificá-lo localmente (junto a uma ponte, p.ex.) para evitar que impeça o escoamento natural. O modelo FABDEM, tendo sido produzido de modo a eliminar edificios e florestas, terá resultados mais fiáveis, e não necessita de técnicos tão habilidosos na manipulação e alteração dos modelos tridimensionais.



## REFERÊNCIAS

- Crippen, R., S. Buckley, P. Agram, E. Belz, E. Gurrola, S. Hensley, M. Kobrick, M. Lavalley, *et al.* (2016). NASADEM global elevation model: Methods and progress. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI–B4: 125–128.
- Hawker, L., P. Bates, J. Neal, and J. Rougier. (2018). Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) simulation for flood modeling in the absence of a high-accuracy open access global DEM. *Frontiers in Earth Science* 6: Article 233.
- Hengl, Tomislav, Leal Parente, Leandro, Krizan, Josip, and Bonannella, Carmelo. (2020). “Continental Europe Digital Terrain Model at 30 M Resolution Based on GEDI, Icesat-2, AW3D, GLO-30, EUEM, MERIT DEM and Background Layers.” Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4724549>.
- Reuter, H.I., A. Nelson, and A. Jarvis. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science* 21(9): 983–1008.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, and J.E. Belz. (2006). A global assessment of SRTM performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(3): 249–260.
- Sampson, C., A. Smith, P. Bates, J. Neal, and M. Trigg. (2016). Perspectives on open access high resolution Digital Elevation Models to produce global flood hazard layers. *Frontiers in Earth Science* 3: Article 85.
- Tachikawa, T., M. Hato, M. Kaku, and A. Iwasaki. (2011). Characteristics of ASTER GDEM version 2. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 24–29 July, Vancouver, BC, Canada, 3657–3660.
- Tadono, T., H. Ishida, F. Oda, S. Naito, K. Minakawa, and H. Iwamoto. (2014). Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II–4: 71–76.
- Takaku, J., T. Tadono, K. Tsutsui, and M. Ichikawa. (2016). Validation of “AW3D” global DSM generated from ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III–4: 25–31.
- Talchabhadel, R., H. Nakagawa, K. Kawaike, K. Yamanoi, and B.R.Thapa. (2021). Assessment of vertical accuracy of open source 30m resolution space-borne digital elevation models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 12(1): 939–960.



# Assessment of groundwater sustainability in the Maipo River Basin (Chile)

## *Avaliação da sustentabilidade das águas subterrâneas na Bacia do Rio Maipo (Chile)*

*Alexander Van Der Hulst<sup>1</sup>, Nuno Barreiras<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

<sup>2</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

**ABSTRACT:** In Central Chile, precipitation decreases while drinking water and irrigational demand increase. In the Maipo Basin, shortages in surface water are compensated by increased groundwater abstraction for agriculture and drinking water. Also, agricultural land is transformed due to the expansion of Santiago city. Effective groundwater management is required to protect available groundwater resources and ensure equal distribution among users. Therefore, this study aims to analyze the current groundwater management and governance framework at the basin scale. The study assesses the context of groundwater management and the functioning cooperation mechanisms between the stakeholders. Furthermore, the current knowledge gaps and challenges are identified, and approaches to improve water resources management policy are proposed.

A literature and legal context analysis in the context of the Maipo Basin is supplemented by interviews and a survey among stakeholders. Groundwater sustainability indicators are applied to enhance sustainable water planning and management, support data sharing, show groundwater users' current impact, and stimulate stakeholder communication. Lastly, a sustainable yield index is developed and proposed to assess groundwater management and to provide a concrete initial step to sustainable groundwater management in the Maipo Basin, which could be applied in other basins in Chile.

The results show that groundwater is seen and treated differently than surface water, and its management and governance are neglected. Moreover, hydrological boundaries are not always respected because groundwater management is organized by administrative regions which are not always clearly based on hydrogeological boundaries, and groundwater management is decentralized. Some difficulties in allocating resources to monitoring groundwater use were found. The groundwater sustainability indicators show the urgent situation of 'overgranting' of groundwater rights compared to the recharge. The sustainable yield index demonstrates the unsustainable situation of the region, threatening groundwater-dependent ecosystems. Further recommendations are made towards a more robust groundwater management with the well-defined role of the General Directorate of Water (DGA).

**Keywords:** Chile, Groundwater, Management, Governance, Indicators, Sustainability

**RESUMO:** No Chile central, a precipitação diminui enquanto as necessidades hídricas aumentam. Na bacia do Maipo, a escassez de recursos hídricos superficiais é equilibrada pelo aumento de captações de água subterrânea, tanto para agricultura como para o abastecimento público. Além disso, os terrenos agrícolas têm vindo a sofrer alterações devido à expansão urbana, nomeadamente da cidade de Santiago do Chile. Urge uma gestão eficaz das águas subterrâneas para proteger os recursos hídricos disponíveis e garantir a sua distribuição equitativa entre os seus utilizadores. Portanto, este estudo pretende analisar o atual quadro de gestão e governança das águas subterrâneas à escala da bacia hidrográfica do Maipo. O estudo avalia a gestão das águas subterrâneas e o funcionamento dos mecanismos de cooperação entre as partes interessadas. Além disso, identificam-se as atuais lacunas e desafios do conhecimento e propõem-se abordagens para melhorar a política de gestão dos recursos hídricos.

*É feita uma análise no contexto da região hidrográfica, suplementada por entrevistas e questionários a partes interessadas. São aplicados indicadores de sustentabilidade para apoiar o planeamento e gestão sustentável, a partilha de dados, mostrar o impacto atual dos utilizadores e estimular a comunicação entre as partes interessadas. Foi desenvolvido e proposto um índice de produção sustentável para avaliar a gestão das águas subterrâneas e fornecer um ponto de partida concreto para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na bacia do Maipo, e que tem o potencial de ser aplicado noutras bacias hidrográficas no Chile.*

*Os resultados mostram que as águas subterrâneas são vistas e tratadas de forma diferente das águas superficiais, e a sua gestão e governança foram negligenciadas. Além disso, os limites hidrológicos nem sempre são respeitados e a gestão das águas subterrâneas é descentralizada. A entidade pública responsável pela água carece de capacidade e recursos para fiscalizar e monitorizar o uso das águas subterrâneas. Os indicadores de sustentabilidade aplicados mostram uma situação grave de “sobre-licenciamento” relativamente aos recursos subterrâneos renováveis. O índice de produção sustentável demonstra uma situação insustentável, ameaçando os ecossistemas dependentes das águas subterrâneas. Finalmente, são feitas recomendações para que possa ser feita uma gestão das águas subterrâneas mais robusta em que o papel da Direção Geral de Águas (DGA) é fundamental.*

*Palavras-chave: Chile, Água Subterrânea, Gestão, Governança, Indicadores, Sustentabilidade.*

## 1. INTRODUCTION

Chile is a country of hydrological extremes, with its long coastline stretching from Patagonia to one of the driest deserts on Earth, the Atacama Desert, and from the sparsely populated high peaks of the Andes to the densely populated Central Valley (McPhee, 2018). This characteristic is also reflected in Chile's water management. It is a challenge to manage Chile's water resources in a suitable manner while simultaneously having one of the driest and wettest places on Earth. Droughts and accelerated land-use change are known to impact semi-arid regions significantly. Droughts increase groundwater use and consequently decrease aquifer storage. Land-use change often alters the spatial patterns of groundwater recharge. It is, therefore, important to mitigate and study these effects with sustainable groundwater management. On the other hand, especially in the arid and semi-arid regions, water has always played an important role in Chile (Donoso *et al.*, 2020).

The water code that shaped Chilean water governance is the Water Code of 1981 (WC81), a product of this pro-market, neoliberal policy. The code mainly concentrates on surface water and does not integrate groundwater into water management. However, the General Directorate of Water (DGA) provides a similar legal framework to both surface water and groundwater. This system offers the right to use groundwater as a private good, similar to the rights of land ownership. In real life, this implies that groundwater was managed the same way as real estate (Rinaudo & Donoso, 2019). Land and water ownership are, therefore, disconnected. Furthermore, the WC81 states that

groundwater and surface water are managed separately, which is kept the same in a reform of the WC81 in 2005 (Donoso *et al.*, 2020). Once a user obtains the rights of a (ground)water resource, it is freely tradeable, with the vision that this would allow for the development of an efficient water allocation system (Meza *et al.*, 2012).

Central Chile is becoming more dependent on groundwater resources. It is expected that groundwater resources will become even more critical due to population growth, economic development, urbanization, water contamination and pollution, and the effects of climate change on water use (Donoso *et al.*, 2020). Climate change is expected to decrease precipitation, and the time of the peak of glacier snowmelt will shift. This significantly impacts water supply and reliability because the region strongly depends on melting water from the Andes. The geological and geomorphological settings allow interaction between groundwater and surface water. The distance between the Andean mountains and the river mouth is relatively short, and the valleys and the steep slopes make a context favourable for interaction between the river streams and the aquifers (Meza *et al.*, 2012).

The consequences of groundwater overexploitation are already observed. Groundwater levels have declined in aquifers to below sustainable limits (Nascimento *et al.*, 2022), Andean rivers have dried up and baseflow significantly reduced (Donoso *et al.*, 2020), and groundwater-dependent ecosystems are facing severe damage (Duran-Llacer *et al.*, 2022). Furthermore, an increase in water conflicts is observed because of the intensification of groundwater use (Donoso *et al.*, 2020).

In general, there is a lack of available and sufficient information on groundwater dynamics and its interaction with surface water. Significant data gaps are identified on, for instance, well licencing and abstracted volumes. On the other hand, there is no collective groundwater management because of the lack of groundwater user associations in the basins (Donoso *et al.*, 2020).

In Chile, 83% of the current water problems are related to poor water management, while the remaining 17% can be attributed to climate change (Fundación Chile, 2021). Groundwater governance has already been documented for multiple years. However, its evaluation and monitoring are still relatively little investigated. In most regions, the development of groundwater governance has not kept the same pace as the pressures on groundwater resources (Akhmouch & Clavreul, 2017). Currently, there is no research specifically on the assessment and evaluation of groundwater management and governance in Chilean basins. However, previous studies on groundwater management are often included in a study focusing on surface water.

Furthermore, it is important to realize that groundwater-related problems and opportunities are well-known to a small, specific group of experts but not to politicians and policymakers (FAO, 2016). There is a need to present scientific groundwater data in a more coherent approach to the public and policymakers. The UNESCO Groundwater Resources Sustainability Indicators have the potential to serve policy objectives and support the development of groundwater resource management. Furthermore, the indicators simplify, quantify, communicate, order, and allow for the comparison with other zones or regions (Vrba *et al.*, 2006).

Lastly, the academic sector should try to support the transition to sustainable groundwater management and governance. In the Maipo Basin, it could help by identifying sustainable yield and giving directions to policy.

The main objectives of this study are to:

- a) Identify the main groundwater-related problems in the Maipo Basin and assess how these problems have developed in the current cultural, historical, and legislative context.
- b) Verify the existence and functioning of institutions managing groundwater at the basin scale and how cooperation mechanisms for the groundwater management across water-related users and levels of government from local to basin, regional, national, and upper scales.
- c) Verify the existence and level of implementation of Integrated Water Resources Management (IWRM) policies and strategies within groundwater governance.

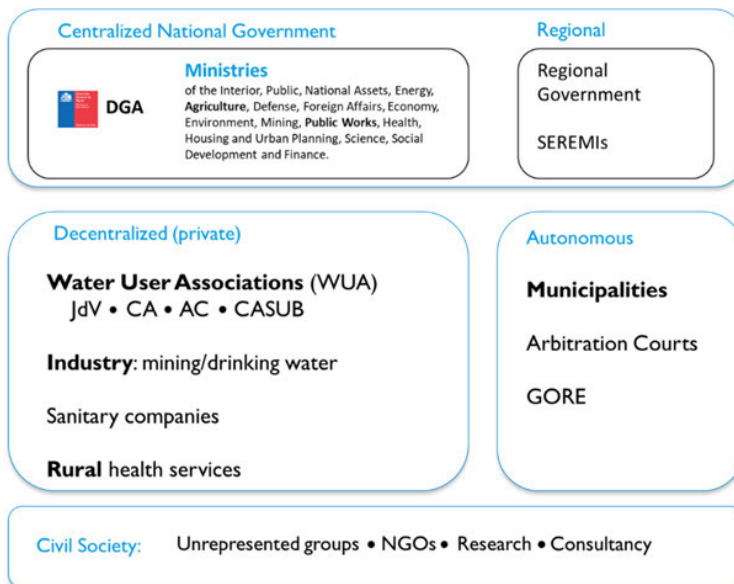
- d) Identify and analyse the current gaps and challenges and the areas needing improvement.
- e) Application of groundwater indicators for the improvement of water resource management policy
- f) Looking at a sustainable yield index to provide directions and solutions for more precise sustainable groundwater management.

## 2. GROUNDWATER MANAGEMENT AND GOVERNANCE IN CHILE

The World Bank has identified 42 institutional actors, such as management units, user groups, or water resource stakeholders active in Chile (Peña, 2021). This fact illustrates that the water management sector is quite fragmented. Figure 1 shows the conceptual institutional structure of water governance in Chile. It is characterized by an authority that independently governs the water users and the project developers. The main centralized institutions are the public bodies such as the 'Dirección General de Aguas' (DGA) and the Ministry of Agriculture. The regional government and the regional departments of these centralized bodies have little autonomous power and are there to implement the policy which is made on the national level. The main decentralized and private bodies are the water user associations (WUA).

The literature review on groundwater management and governance in Chile provides valuable background information on its current state and development. It becomes clear that groundwater governance is mainly carried out by decentralized and private institutions, with a centralized government lacking authority on a regional and national level. Furthermore, the large number of different legal stakeholders present makes the integration of groundwater policy and governance even harder. In addition, most institutions focus on surface water without cross-coordination with other sectors and disciplines.

An increased awareness of groundwater role in water policy and legislation could have profound benefits. Groundwater policy requires long-term planning, which is currently lacking in Chilean water legislation. A more prominent place for groundwater would force policymakers to think in longer terms. Also, groundwater planning requires a broader view of the hydrological cycle and will automatically, in a more natural way, cause a shift to an IWRM approach. It is not possible to manage groundwater resources without integrating surface water. However, political will and the budget must be available for this.



AC - Canal associations (Asociaciones de Canales)  
 CA - Water communities (Comunidades de Agua)  
 CASUB - Groundwater user community (Comunidad de Aguas Subterráneas)  
 GORE - Chilean regional governments (Gobiernos regionales de Chile)  
 JdV - Surveillance boards (Juntas de Vigilancia)  
 SEREMI - Regional Ministerial Secretariats of Health (Secretarías Regionales Ministeriales de Salud)

**Figure 1.** Main institutions of Chilean water governance, based on Vergara & Rivera (2018).

### 3. CHILEAN WATER MARKET AND POLICY

In the analysis of Chilean water market and policy, it has become clear that the Chilean water market on groundwater management are characterized by:

- A system of water rights holders that secures them the use and possession of water like any other private good;
- The existence of a water rights market;
- The role of the State is seen as accompanying;
- The WUAs, private organizations, are essential for the management of a public good.

The most striking fact is that the State is seen as accompanying, because of the existence of a strongly privatized water market. However, it has the largest responsibility over some main tasks of groundwater management. In the new water code, this is not different. The DGA even got a larger responsibility and more tasks. WUAs have, in theory, extensive responsibilities and take over functions from the DGA, but regarding groundwater, this is not the case because groundwater user associations do not nearly exist. The principle that the DGA has the power to restrict an aquifer if newly granted water rights harm the existing water rights gives the impression that the economic perspective is more important than, for instance, the ecological value. Furthermore, groundwater use was not the main objective of the WC81, as groundwater abstraction was minimal at the time of writing (Vergara & Rivera, 2018). However, pressures on groundwater

resources have increased. New legislation could not prevent negative effects and it limits sustainable groundwater management. It will be the question whether the new water code, which is in place since the beginning of 2021, addresses groundwater better. The fact that groundwater rights are now granted with a time limit of 30 years is a step in the right direction. However, an aquifer can be depleted in less time. The DGA has the authority to limit the right after five years, which is a good rule, but it seems that the capacity of the DGA is too little to enforce this rule.

### 4. ANALYSIS OF CURRENT GAPS AND CHALLENGES OF GROUNDWATER GOVERNANCE AND MANAGEMENT OF THE MAIPO BASIN

Furthermore, an analysis of the current State and future challenges of groundwater governance in the Maipo Basin is conducted. The analysis is based on literature analysis, stakeholder interviews, and a survey. The literature analysis is based on recent studies. The interviews and survey assess groundwater governance using a methodology developed by Hamer *et al.* (2020)), which evaluates water governance rationality. Rational groundwater governance tools allow equitable groundwater access and sustainable abstraction. There are five criteria: 1) water system knowledge, 2) water resources usage and monitoring, 3) the legal framework, 4) short and long-term vision, and 5) stakeholder participation and engagement. The methodology can easily be adapted to groundwater

governance and provides a clear outline for stakeholder interviews and surveys. The final assessment using this methodology is shown in Table 1. Water system knowledge on a macro-scale is present. However, on a local scale, there is information missing, and the knowledge gaps are not addressed. Therefore, this criterion is classified as average. Water resource usage and monitoring are classified as low. Illegal abstraction is a significant concern for most respondents, and it is believed that groundwater abstractions are too high while monitoring and inspection are not enforced and are only partly in place. The legal framework is also lacking since most respondents are not confident that the groundwater rights market is equally distributing the water among the groundwater users, and the DGA cannot enforce its legal responsibilities. Also, participants from all the groundwater users are lacking. The short and long-term vision is classified as average to low because some initiatives and ideas address the groundwater-related problem in the long term, such as a nature-based solution. However, there seems to be no consensus on the direction to go, and economic and social interests are leading. Mainly because of this mix of different perspectives, there is no clear vision of the long term. However, awareness of sustainability and ecological values is increasing. The last criterion, stakeholder participation and engagement, are also classified as average to low. There are initiatives to engage stakeholder participation and engagement, like the 'Fondo de Agua'. However, the fragmentation of the stakeholders is considerable, and trust has to be built between them, which takes time. Therefore, in the current State, cooperation is limited.

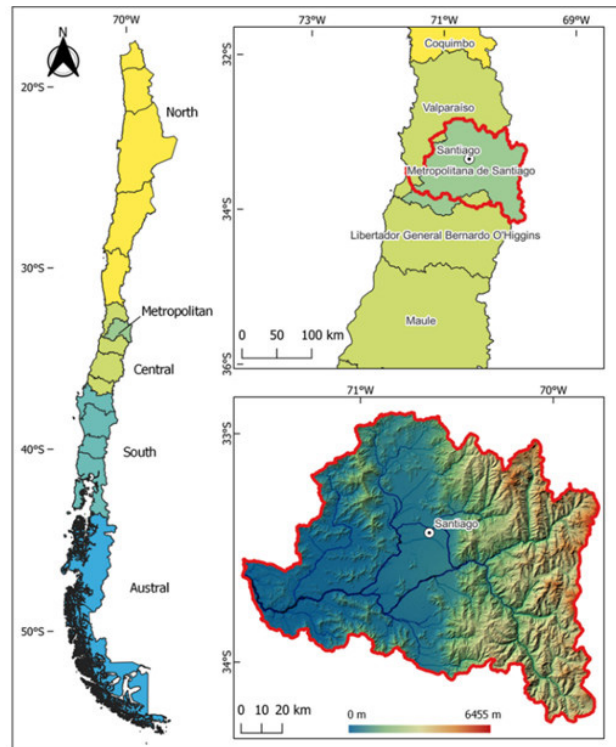
**Table 1.** Final assessment of groundwater governance rationality of the Maipo Basin, based on Hamer et al. (2020).

Assessment of rationality of groundwater governance of the Maipo Basin	Score
Water system knowledge and gaps	Average
Water resources usage and monitoring	Low
Legal framework	Low
Short and long-term vision	Average - low
Stakeholder participation and engagement	Average - low

### 5. STUDY AREA: THE MAIPO BASIN

The Maipo Basin consists almost entirely of one large connected aquifer with multiple important water users (Figure 2), such as agriculture and domestic use, with different interests. FAO (2016) argues

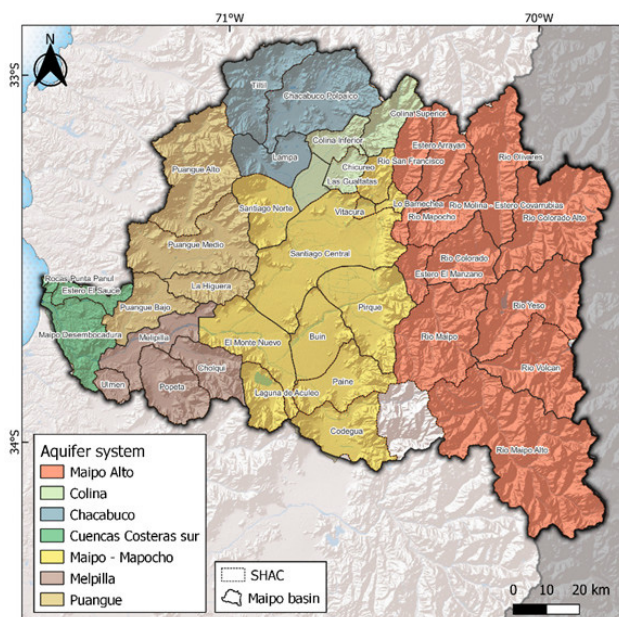
that governance of such aquifers is challenging but not impossible. Because of the abundance of stakeholders, creating a formal regulatory regime is a complex task. Together, they should strive towards creating a database with shared and common knowledge to encourage informed groundwater abstraction. Currently, the DGA has most of the information on groundwater. However, it is incomplete and only in large documents, such as the Strategic Plan for Water Management (Plan Estratégico de Gestión Hídrica, PEGH) for the Maipo Basin. Shared responsibility and vision under all groundwater users are important for the sustainability of the groundwater resources, and providing the information is an integral part of this. As the role of the DGA is seen as supplementary, providing information should have a more prominent importance. Ideally, this will lead to more engaged and participative groundwater management.



**Figure 2.** Situation of the study area within Chile.

Human interventions have seriously affected recharge processes, and more understanding is needed. The expansion of urban land at the expense of agriculture has consequences on groundwater recharge rate, drinking water demand, and the increase of groundwater rights. These factors have been poorly studied up until now. This could mainly be explained because groundwater abstraction in the Maipo Basin does not have a long history. Therefore, the absence of high-quality

reference studies on natural recharge and the status of aquifers is a severe problem. Agent-based modelling could be a promising tool to consider all stakeholders in hydrogeological and numerical models and to improve IWRM in the basin. This way, better strategies and planning can be conducted (Suárez *et al.*, 2021). Measures must be taken to adapt to the local and national context (FAO, 2016). Figure 3 provides an overview of the aquifer systems and the SHAC units (Hydrogeological Sectors of Common Use that Belong to the Aquifer). In the Maipo River basin, there are seven aquifer systems: Colina, Puangue, Melpilla, Chacabuco, Maipo – Mapocho, Maipo Alto and Cuencas Costeras sur. The first five are often taken as one aquifer.



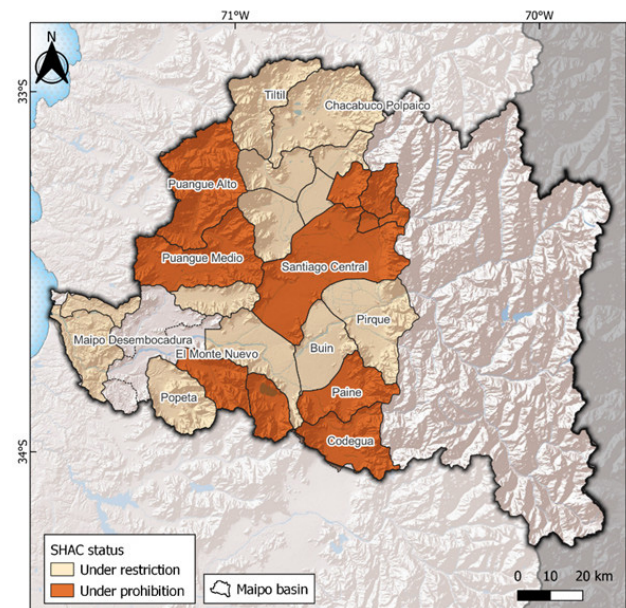
**Figure 3.** Aquifer systems of the Maipo River Basin and the corresponding SHAC units (DGA, n.d.; División de Estudios y Planificación, 2017).

According to DGA (2022), there are 11 SHAC units under prohibition and 13 under restriction. This means that all the active, used aquifers are under some sort of limitation for granting new water rights. The location of the SHACs under restriction or prohibition are shown in Figure 4.

## 6. GROUNDWATER POTENTIAL INDEX

To protect groundwater resources it is important to have a high-resolution map. This map is currently lacking in the Maipo basin. However, it is possible to construct a high-resolution map of the occurrence of groundwater resources in the Maipo basin. The method used is the Groundwater Potential Index (GWPI). The term 'groundwater potential' is described in Rahmati *et al.* (2015) as: 'the possibility of groundwater occurrence in an area'. Thus, this is

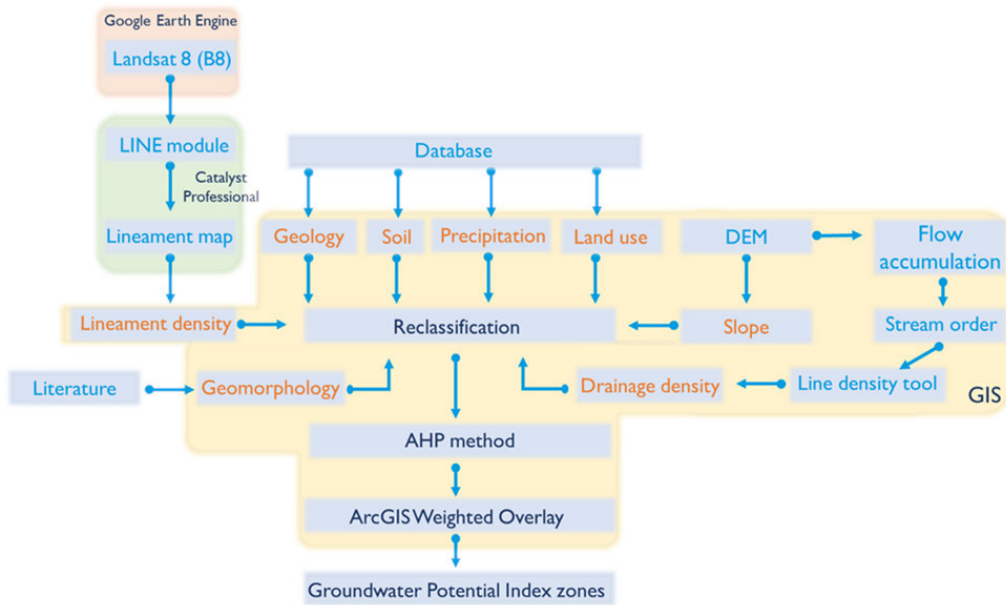
the possibility that there are groundwater resources. However it does not mean that it is there in reality per se. Artificial influences such as groundwater abstraction, managed aquifer recharge, or land-use change are not taken into account.



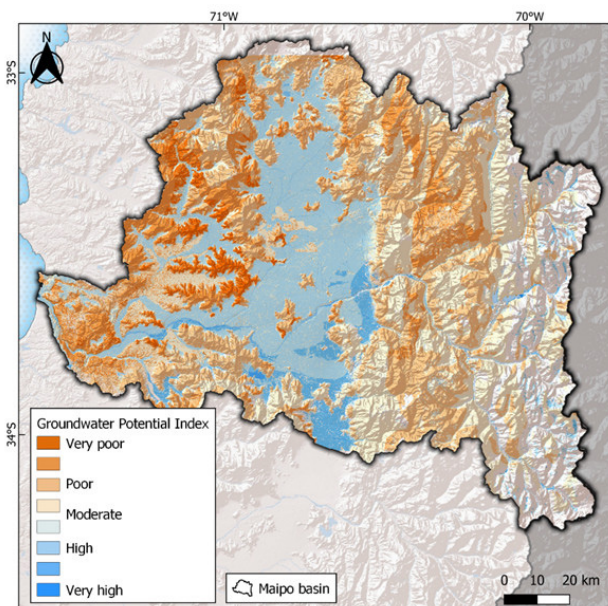
**Figure 4.** Areas under restriction and prohibition for the Maipo River basin, based on DGA (2022).

The GWPI zones were elaborated based on the methodology presented in Figure 4 (van der Hulst, 2022), and the result is presented in Figure 5. The method was based on the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which uses weights and criteria to different thematic layers. The thematic layers, the factors influencing groundwater, are chosen based on data availability and previous studies. The index should include climatic, hydrologic, and hydrogeological data. This study considered eight thematic layers: geomorphology, land-use, geology, lineament density, drainage density, slope, soil type, and precipitation. High groundwater potential index is observed in the Central Valley. In the Andean mountain range, the potential is predominantly low. Furthermore, there is a considerable area in the coastal mountain range where the groundwater potential is very poor because of the combination of steep slopes, little precipitation, and the occurrence of intrusive rocks. A poor potential for groundwater characterizes the majority of the basin. Some areas in the Andean mountain range have a high or very high groundwater potential, mainly because the precipitation is higher here than in the rest of the basin. Also, river valleys with a flat surface and sedimentary rocks create more suitable conditions for groundwater occurrence.





**Figure 5.** Methodology used to obtain a Groundwater Potential Index map (van der Hulst, 2022). The colour represent the used software: yellow: GIS, green: Catalyst Professional, and red: Google Earth Engine.



**Figure 6.** Groundwater Potential Index (GWPI).

## 7. GROUNDWATER SUSTAINABILITY INDICATORS

### 7.2 Selected groundwater sustainability indicators

Groundwater sustainability indicators help show patterns and raise concerns simply and attractively. There is not a large variety of groundwater sustainability indicators, though. However, the UNESCO Groundwater Sustainability Indicators form a solid base to explore groundwater dependence, availability, and quality on an aquifer scale.

Table 2 shows the selected groundwater

sustainability indicators. The indicators are selected based on observations and measurements of groundwater data about water quality and quantity that describe social, economic, and environmental aspects. Moreover, to avoid the selection of the indicators based on data availability, the indicators are chosen before data selection (Vrba *et al.*, 2006). Because different SHACs manage the aquifer, the scale of the indicators is per SHAC. However, because the data on agricultural dependency and surface water rights were only available on a sub-basin scale, these indicators could not be presented per SHAC. This results from selecting the indicators first and subsequently gathering the required data. Calculating an indicator on a basin scale would not fit this study because the objective is to show variability within the basin itself. However, this was needed for the drinking water indicator because the data on drinking water use was only available for the whole Maipo basin. Furthermore, the indicators have been modified to the Chilean context, for instance, the indicator on groundwater rights compared to recharge.

The indicators provide a more understandable perspective on groundwater use in the Maipo Basin. Especially since the Maipo Basin is large and multiple complex processes play a role. These indicators show that the Central Valley is approximately 30% dependent on groundwater for agricultural use. Drinking water production is less dependent on groundwater. However, it puts extra pressure on the system, especially in the aquifer around the Santiago metropole.

**Table 2.** Selected groundwater sustainability indicators with the corresponding scale and data sources.

Category	Indicator	Scale	Data source(s)
Groundwater Dependence	1 Groundwater volume per capita	SHAC	DGA (2021), INE (2017)
	2 Agricultural dependency on groundwater	Sub-basin	DGA (2021a)
	3 Groundwater as a percentage of total use of drinking water	SHAC and basin	DGA (2021a)
	4 Total granted water rights of groundwater (all uses) as a percentage of total ground and surface water rights granted	Sub-basin	DGA (2021a)
Groundwater Availability	5 Total groundwater rights as a percentage of groundwater recharge	SHAC	Nascimento & Barreiras (2021), (DGA, 2021a)
	6 Total groundwater abstraction as a percentage of groundwater recharge	SHAC	Nascimento & Barreiras (2021), (DGA, 2021b)
	7 Total granted groundwater rights as a percentage of groundwater volume	SHAC	DGA (2021a)
	8 Groundwater level decline	SHAC	DGA (2021a)
Groundwater Quality	9 The total area with high vulnerability as a percentage of the total area of the SHAC	SHAC	Nascimento & Barreiras (2021)

## 7.2 Groundwater Dependence

Indicator 1, groundwater volume (m<sup>3</sup>/year) per capita per SHAC (Figure 7), indicates that the SHACs Melpilla and Puangue Medio have relatively the largest groundwater volume per capita available. Furthermore, the southern region has, in general, more groundwater available per capita. These areas are regions with a low population density and large groundwater volumes.

The map of indicator 3 (Figure 7), a drinking water indicator, shows the rural and urban groundwater Drinking Water Demand (DWD) as a share of the total DWD and per SHAC; and the share of rural and urban groundwater DWD. Groundwater plays a small part in the total DWD in most SHACs. However, only the Santiago Central sector has a total groundwater DWD which is 16% of the total DWD. Thus, this shows that drinking water production is not as dependent on groundwater as agriculture. Regarding the share of urban and rural groundwater DWD, in most SHACs, the urban groundwater DWD succeeds the rural groundwater DWD. In general, the further away from Santiago, the higher the share of rural groundwater DWD.

## 7.3 Groundwater Availability

The result for indicator 5, shown in Figure 7, demonstrates the ratio between the granted groundwater rights and the recharge. In several SHACs, the ratio is higher than one, which means that the amount of granted groundwater rights is higher than the recharge. It can be observed that the ratio in the northern and central parts of the Central

Valley is slightly higher than in the south. A possible explanation could be the lower recharge in the North could be due to less precipitation, or higher granted groundwater rights. A few regions have less granted groundwater rights than recharge. Only in the Maipo Alto sub-basin and near the outlet are SHACs with a ratio of less than one.

The ratio between the monitored abstraction (DGA, 2021) and the recharge (Nascimento & Barreiras, 2021), indicator 6 (Figure 7), shows the same pattern as in the previous indicator. The highest ratios are observed in the northern and central parts of the Central Valley. However, the ratio is significantly lower in absolute terms. The areas with more agriculture show lower ratios than those with the granted groundwater rights. That might indicate that there is an over-abstraction in many parts of the basin. Mainly in the SHAC Colina Sur and Vitacura, there is serious over-exploitation. In regions with high irrigation, there is a smaller difference between the recharge and monitored abstraction. However, there is still overexploitation in large parts.

The ratio between the georeferenced granted groundwater rights and the volume (indicator 7) (Figure 7) indicates that the granted groundwater rights are, for most SHACs lower than the volume. However, in Maipo Desembocadura and Colina Inferior, the granted groundwater rights greatly exceed the SHAC's volume. Five other SHACs have ratios higher or around 1. Despite the uncertainties about whether granted groundwater rights are used in reality, this indicator does provide a view on the 'overgranting' of groundwater rights in the SHACs and where the groundwater pressure is high.

The groundwater level decline is the most direct indicator to see what are the real effects of this overexploitation (indicator 8). Figure 7 shows the average groundwater depletion (m) per SHAC. Three different regions can be distinguished: 1) in the SHACs near the outlet of the Maipo basin there is an increased water level; 2) in the Southern and Central parts of the Central Valley, in which the groundwater level decreased, however, not drastically, with the maximum around 5m; and 3) in the Northern part of the Central Valley the water depth dropped severely. In the SHAC Chacabuco Polpaico, for instance, has dropped 38.6 m. In the other sectors, the drop in water level stays between 5 and 30 m.

### Groundwater quality

The selected indicator to characterize the groundwater quality for the Maipo Basin was the Total area with high vulnerability as a percentage of the total area of the SHAC (indicator 9) (Figure 8). The data source is based on Nascimento & Barreiras (2021). It indicates that the highest vulnerability is observed mainly in the South of the Central Valley. The maximum percentage is calculated for the SHAC Buin, where 62% of the total area presents high vulnerability. Furthermore, the vulnerability is also high in Colina Sur, El Monte Nuevo, Paine, La Higuera, Puangue Bajo, and Melpilla. This high vulnerability is a result of a combination of variables (soil type, precipitation, run-off, groundwater levels, recharge, slope, land use, etc, explained in Nascimento & Barreiras, 2021) that determine agricultural lands one of the main factors for the contamination of aquifers (Nascimento & Barreiras (2021)). This result is not observed in the Central Santiago SHAC and the other highly populated areas, where there is little recharge and no agriculture. Furthermore, the values of vulnerability in the Maipo Alto region are low, partly explained by the lower recharge in that area, as well as the little human impact.

### 7.5 Discussion on the groundwater sustainability indicators

According to these sustainability indicators, the status of groundwater in the Maipo Basin are classified as under stress. According to the data sources and calculations, monitored abstraction is already larger than estimated recharge in many regions. In addition, the results might indicate that there is 'overgranting' in some areas. Nevertheless, because monitoring network is not completely extensive and representative, some results might be limited to the data quality. The granted groundwater rights exceed the recharge in many regions. Looking at groundwater depletion (Figure 7), this decrease seems to be quite important in some areas, especially in areas with greater concentration of abstractions, nearby or within urban areas.

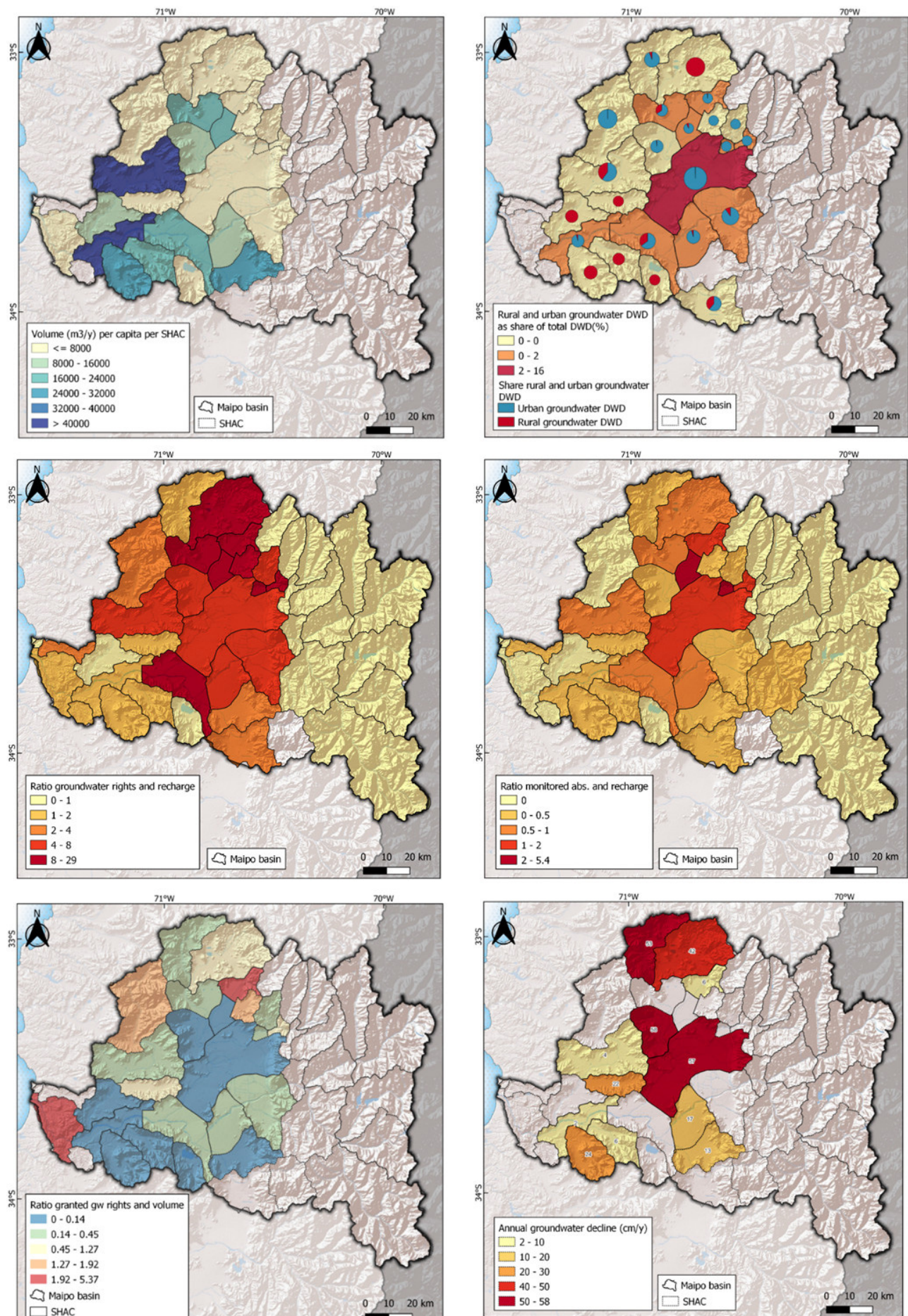
In addition, overexploitation, as seen in the 'overgranting' of groundwater rights compared to the recharge in the Maipo Desembocadura, could cause additional conditions for saline intrusion. If the groundwater level decreases near the coast, more seawater could flow inland. However, this depends on whether the SHAC is compensated by increased groundwater flow from other areas, like the Central Valley.

## 8. SUSTAINABLE GROUNDWATER MANAGEMENT

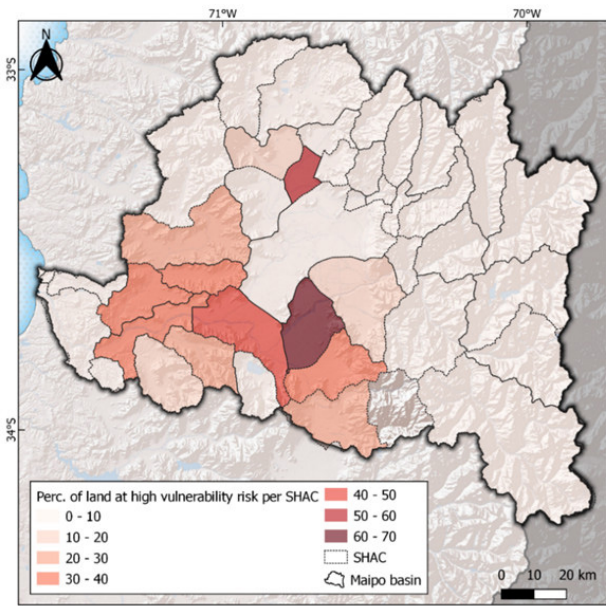
### 8.1 Background

Groundwater management in the Maipo Basin needs to shift to sustainable groundwater management. The first step is integrating the term sustainable yield into the current management approach. This study aimed at improving the current sustainable use criteria applied by DGA, and is based on the analysis made by van der Hulst (2022):

- 1) Presently, and according to DGA (2021a), the sustainable volume of the aquifer is equal to the volume corresponding to the granted permanent groundwater rights. Therefore, it does not detail the difference between granted groundwater rights and recharge in most regions, and the granted groundwater rights are the maximum groundwater abstraction. In addition, the system of groundwater rights can only work when actual groundwater abstraction is monitored, which does not happen. The situation gets quickly unsustainable when the volume of the granted groundwater rights is larger than the calculated sustainable volume. Therefore, a more efficient characterization of groundwater use is required to estimate a sustainable yield of the aquifer systems.
- 2) Hydrological data is processed at the administrative level. This procedure might lead to difficulties in managing an aquifer system if several administrative entities are involved and containing partly one of more aquifers within the same administrative boundary. So, it is considered that the processing of hydrological data should be made at the aquifer system level.
- 3) There is too little awareness of the environmental consequence of groundwater level decline. The surface water discharge indicator results show that the minimum ecological flow is endangered in nearly most SHACs, which can severely impact Groundwater-Dependent Ecosystems (GDEs) in the Maipo Basin.



**Figure 7.** Results of groundwater sustainability indicators. Indicators 1, 4 regarding Groundwater Dependence, and indicators 5, 6, 7, 8 regarding Groundwater availability (consult Table 2) (van der Hulst, 2022).



**Figure 8.** Percentage of total land with high vulnerability, per SHAC.

### 8.2 Sustainable yield index

Therefore, considering the previous background terms, a sustainable yield index is proposed to identify these areas and classify them. It is calculated using the GWPI, the Groundwater-Dependent-Ecosystems zones (GDEZ), the ratio of monitored abstraction and recharge, and the ratio of groundwater rights and recharge. These four parameters encompass groundwater’s hydrological and environmental value (GWPI and GDEZ), which should be protected and are vulnerable to over-abstraction, and the socioeconomic pressures on the system (groundwater abstraction and groundwater rights).

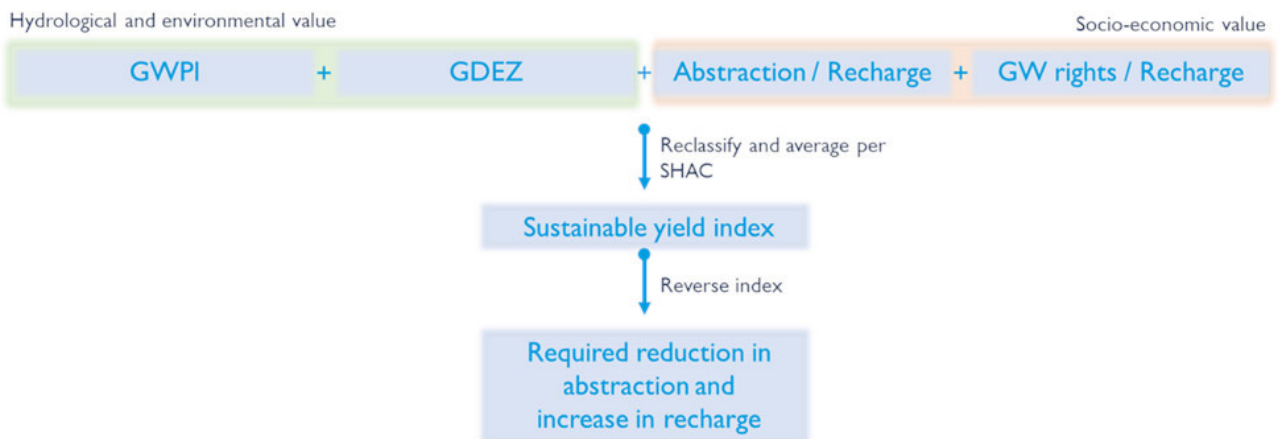
The workflow to calculate this index is shown in Figure 9. The index scale is per SHAC because

information on granted groundwater rights and abstraction is only available on this level. Therefore, the GWPI and GDEZ are averaged per SHAC.

The four different thematic layers are considered to be equally important. To give importance to the different classes of the layers, the layers are reclassified into five different classes, with a range from very low importance (1) to very high importance (5). The reclassification table is shown in Table 3. The GWPI and the GDEZ have the same classes as the final result of the calculations. The excluded classes in the GDEZ map are assumed to have the lowest value. The rank for the abstraction and groundwater rights thematic layers are slightly different. A rank of 1 indicates very high pressure on the groundwater system, and a rank of 5 indicates very low pressure. The classes are based on the groundwater sustainability indicators and logical values to compare.

The higher the rank, the higher the value of the natural system and the less pressure on the groundwater system, indicating higher sustainability. However, the lower the rank, the lower the importance of GDEs and groundwater occurrence, meaning a higher pressure on the system. The used limits per category are demonstrated in Table 4. The limits are based on the minimum, 4, and the maximum value, 20, that can be calculated.

The calculated sustainable yield index (SYI) per SHAC (Figure 10) shows that the Central Valley have, in general, lower sustainability than outside. Along the river valley of the Maipo River in the Coastal mountain range, the index is high, just like the edges of the Central Valley at the side of the Coastal mountain range. In the Maipo Alto region, the index is between moderate and very high. The moderate SYI can be explained by limited recharge and GDE zones. A subregion of the Maipo



**Figure 9.** Workflow to obtain sustainable yield index.

Alto region is characterized by very high values of SYI. In these SHACs, there is almost no pressure on the groundwater system. A small number of groundwater rights have been granted, and abstraction is practically zero.

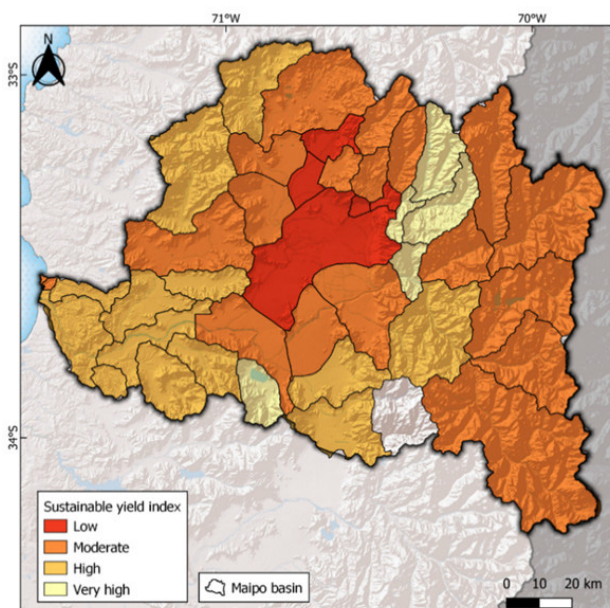
The five SHACs with lower values of SYI are located in the central-north part of the Central Valley. The pressure on the groundwater system is high, with many granted groundwater rights and monitored abstraction over the recharge. Also, the areas are characterized by a small existence of GDEs.

**Table 3.** Reclassification table for the four different thematic layers used in the GDEZ mapping.

Rank	GWPI	GDEZ	Monitored abstraction/recharge		Groundwater rights/recharge	
			Min	Max	Min	Max
5	Very high	Very high		=0.0		<=1
4	High	High	>0.0	<=0.5	>1	<=2
3	Moderate	Moderate	>0.5	<=1.0	>2	<=4
2	Low	Low	>1.0	<=2.0	>4	<=8
1	Very low	Excluded	>2.0	<=5.4	>8	<=29

**Table 4.** Used categories for sustainable yield index (SYI).

Sustainable yield index category	Min	Max
Very low	=4	< 7
Low	>= 7	< 10
Moderate	>= 10	< 13
High	>= 13	< 16
Very high	>= 16	=20



**Figure 10.** Sustainable yield index per SHAC.

After calculating the sustainable yield index, the index could be reversed to a quantitative estimate of a reduction in abstraction or increase in recharge required to obtain a moderate sustainable yield index for the SHACs that have been identified with low sustainability. The values of the GWPI and the GDEZ will not change because they represent the hydrological and ecological values. Furthermore, the groundwater rights are already granted (fixed), representing groundwater demand. Thus, the ratio of monitored abstraction and recharge is the only thematic layer that can be changed in the short term and could provide a first insight into the necessary change in abstraction or recharge.

For the five SHACs with a low sustainable yield index, the required increase in recharge or reduction in abstraction has been calculated and shown in Table 5. This shows that the SHACs Vitacura and Colina Sur require the largest change in groundwater use. The other SHACs need a smaller change. However, these SHACs are larger in the area and therefore need, in absolute terms, a significant change.

**Table 5.** Calculated required reduction in abstraction or increase in recharge in mm/year per SHAC with a low sustainability index.

SHAC	Needed reduce abstraction/ increase recharge in mm/year
Colina Inferior	34.9
Santiago Central	29.6
La Barnechea	51.35
Vitacura	329.05
Colina Sur	296.1

It becomes clear that in some regions, there is an unsustainable system (Figure 9). Moreover, using the index reversed, it can calculate the necessary reduction in abstraction or the increase in recharge that is needed in the SHAC. The index can also easily be applied to other basins in Chile since it is adapted to the Chilean data availability and context. It can serve as an effective tool to measure groundwater management.

Policymakers should look for nearby SHACs, where the pressure on the system is lower, aiming essentially at reducing the abstraction in the low sustainable regions. Also, the possibility of nature-based solutions such as MAR could be studied as an alternative or partial solution, even if the execution and implementation is difficult. The required efforts in Colina Sur and Colina inferior seem to be quite difficult or even impracticable. However, the area of the SHACs is small, meaning relatively small projects can have large positive effects.

## 9. CONCLUSION

Groundwater plays a vital role in the hydrological cycle and is a unique resource with huge potential in this region. However, it is vulnerable and needs to be protected and managed. It becomes clear that groundwater resources are not sufficiently protected for future generation in the Maipo Basin. A change in mindset among all stakeholders is needed, and responsibility needs to be taken collectively.

As urbanization increases, consequently, the drinking water demand will increase. In combination with climate change and the recent droughts, greater demand and dependency on groundwater exist. This could be seen as a problem. However, it is also an opportunity. As mentioned in FAO (2016), "Groundwater governance will also be influenced by the relative contribution of groundwater to different economic sectors and segments of the population."

A larger dependency on groundwater could therefore imply higher awareness and development of groundwater management and governance. Agriculture is highly dependent on groundwater, mainly in the Central Valley. Santiago's largest water service companies are already highly dependent on groundwater. Chile's politicians and policymakers can no longer ignore groundwater in the Maipo Basin because it is important to the economy and people's livelihood in urban and rural areas. This could be seen as a negative development for groundwater resources. However, it also presents an opportunity to show groundwater's importance and make the resource more visible. Groundwater management and governance could give a long-term vision from a multidisciplinary perspective to the Maipo Basin.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out at Instituto Superior Técnico and Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS), and has been funded by the Joint Master Degree Programme on Groundwater and Global Change - Impacts and Adaptation (acronym GroundwatCh), and by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) in the framework of project UIDB/04625/2020.

## REFERENCES

Akhmouch, A., & Clavreul, D. (2017). Assessing and monitoring groundwater governance. In *Advances in Groundwater Governance* (pp. 247–265). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315210025>

DGA, Dirección General de Aguas (2021a). Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. [https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos\\_historicos/Paginas/default.aspx](https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)

DGA, Dirección General de Aguas (2021b). Monitoreo de Extracciones Efectivas. <https://snia.mop.gob.cl/cExtracciones2/#/busquedaPublica>

DGA, Dirección General de Aguas (2022). Mapoteca Digital. Retrieved March 29, 2022, from [https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Documents/Publicacion\\_Mapa\\_Hidrogeologico.zip](https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Documents/Publicacion_Mapa_Hidrogeologico.zip)

Donoso, G., Lictevout, E., & Rinaudo, J.-D. (2020). Groundwater Management Lessons from Chile. *Groundwater Management Lessons from Chile. Sustainable groundwater management: a comparative analysis of French and Australian policies and implications to other countries*. Groundwater Management Lessons from Chile. 10. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8\\_25i](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_25i)

Duran-Llacer, I., Munizaga, J., Arumí, J. L., Ruybal, C., Aguayo, M., Sáez-Carrillo, K., Arriagada, L., & Rojas, O. (2020). Lessons to be learned: Groundwater depletion in Chile's ligua and petorca watersheds through an interdisciplinary approach. *Water (Switzerland)*, 12(9), 2446. <https://doi.org/10.3390/w12092446>

Duran-Llacer, I., Arumí, A., Arriagada, L., Aguayo, M., Rojas, O. Et al. (2022). A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile. *Science of The Total Environment* 816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151528>

FAO (2016). *Groundwater Governance Project Shared Global Vision for Groundwater Governance 2030 and A Call for Action*. Rome: Food Agriculture Organization, 118.

Fundación Chile. (2021). *Gobernanza desde las cuencas: institucionalidad para la seguridad hídrica en Chile*. <https://escenarioshidricos.cl/publicacion/gobernanza-desde-las-cuencas-institucionalidad-para-la-seguridad-hidrica-en-chile/>

Hamer, T., Dieperink, C., Tri, V. P. D., Otter, H. S., & Hoekstra, P. (2020). The rationality of groundwater governance in the Vietnamese Mekong Delta's coastal zone. *International Journal of Water Resources Development*, 36(1), 127–148. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1618247>

INE, Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Censos de Población.

McPhee, J. (2018). Hydrological Setting. *Global Issues in Water Policy*, 21, 13–23. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4_2)

Meza, F., Wilks, D. S., Gurovich, L., & Bambach, N. (2012). Impacts of Climate Change on Irrigated Agriculture in the Maipo Basin, Chile: Reliability of Water Rights and Changes in the Demand for Irrigation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 421–430. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000216](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000216)

Nascimento, J., & Barreiras, N. (2021). Estimación de la recarga en la cuenca del Río Maipo a través del modelo Wetspass. *Fundación Chile, Publicaciones Escenarios Hídricos 2030*, 55 pp.

Nascimento, J., Barreiras, N., Galleguillos, C., Cardenas, V. (2022). Gestão da água subterrânea da bacia do rio Maipo, Chile. 13.º Seminário sobre Águas Subterrâneas, APRH, Lisboa.

Rinaudo, J. D., & Donoso, G. (2019). State, market or community failure? Untangling the determinants of groundwater depletion in Copiapó (Chile). *International Journal of Water Resources Development*, 35(2), 283–304. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1417116>

Suárez, F., Leray, S., & Sanzana, P. (2021). Groundwater Resources. In *Water Resources of Chile* (pp. 93–127). Springer.

van der Hulst, A. (2022) Evaluation of groundwater management and governance performance through the application of assessment methodologies to achieve groundwater sustainability. The case of the Maipo basin, Central Chile. Master thesis. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

Vergara, A., & Rivera, D. (2018). Legal and Institutional Framework of Water Resources. *Global Issues in Water Policy*, 21, 67–85. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4_5)

Vrba, J., Hirata, R., Girman, J., Haie, N., Lipponen, A., Neupane, B., Shah, T., & Wallin, B. (2006). Groundwater resources sustainability indicators. In IAHS-AISH Publication (Issue 302). [https://www.academia.edu/download/67046961/Groundwater\\_Resources\\_Sustainability\\_Ind20210504-12208-2pz3hu.pdf](https://www.academia.edu/download/67046961/Groundwater_Resources_Sustainability_Ind20210504-12208-2pz3hu.pdf)





# **As Comissões Especializadas em Ação**



## Notas sobre a criação da Comissão Especializada em Rios

*Rui M.L. Ferreira, associado nº 1848,*

*Ana Margarida Ricardo, associado nº 1745*

*João Nuno Fernandes, associado nº 1825*

*Elsa Carvalho, associado nº 1757*

*Ana Margarida Bento, associado nº 1827*

*André Batoréu, associado nº 1549*

*Manuela Lima, associado nº 1804*

*Afonso Fernandes, associado nº 1890*

*Ana Margarida Sousa, associado nº 1853*

*"I do not know much about gods; but I think that the river  
Is a strong brown god—sullen, untamed and intractable,  
Patient to some degree, at first recognised as a frontier;  
Useful, untrustworthy, as a conveyor of commerce;  
Then only a problem confronting the builder of bridges.  
The problem once solved, the brown god is almost forgotten  
By the dwellers in cities—ever, however, implacable.  
Keeping his seasons and rages, destroyer, reminder  
Of what men choose to forget. Unhonoured, unpropitiated  
By worshippers of the machine, but waiting, watching and  
waiting."*

Excerto de "The Dry Salvages (No. 3 of 'Four Quartets')",  
T.S. Eliot, 1941"

A constituição da Comissão Especializada em Rios (CER) foi ratificada na Assembleia Geral da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) de 16 de Abril de 2024. Foi proposta pelos associados da APRH Afonso Barbosa, Ana Margarida Bento, Ana Margarida Ricardo, Ana Sousa, André Batoréu, Elsa Carvalho, João Fernandes, Maria Manuela Lima e Rui M.L. Ferreira. A CER herda o programa da Comissão Especializada em Hidráulica Fluvial (CEHF), que cessou de existir na mesma data, mas ambiciona um âmbito mais lato, visando um

tratamento multisectorial e interdisciplinar das temáticas relevantes para os rios portugueses.

Na formulação do âmbito da CER está implícito que a antiga Comissão Especializada em Hidráulica Fluvial já não seria o instrumento da APRH mais adequado para fazer face aos desafios associados aos rios portugueses, o que merece uma reflexão. A CEHF iniciou as suas actividades em 2009, respondendo a um desafio do então Presidente da APRH, Jorge Matos. Promovida pelos associados Elsa Alves, João Leal, Mário Franca, Rodrigo Maia e Rui M.L. Ferreira, teve a sua constituição ratificada na Assembleia Geral da APRH de Julho de 2009. A formação da CEHF representava o reconhecimento da importância da Hidráulica Fluvial como disciplina de engenharia e a sua evolução recente no contexto português. Dinamizada essencialmente por membros vindos da academia e de laboratórios do estado, a CEHF procurou estimular o enriquecimento do conhecimento sobre temas da física dos rios, associado ao incremento da qualidade da investigação fundamental e aplicada, e a utilização desse conhecimento em intervenções de engenharia fluvial.

Neste contexto, os membros da CEHF procuraram criar instâncias de discussão e troca de ideias, incluindo seminários e eventos de debate, mas também cursos especializados, colocando investigadores e engenheiros portugueses em contacto com especialistas internacionais. A investigação realizada pelos membros da CEHF foi divulgada e comunicada nas conferências da responsabilidade da APRH, como o Congresso da Água ou o SILUSBA, e publicada na revista Recursos Hídricos. Mais importante, a CEHF acompanhou a formação de jovens que se especializaram em Hidráulica Fluvial e que constituem hoje um corpo de profissionais com capacidade e conhecimentos para realizar intervenções de engenharia fluvial e de investigadores em temas fundamentais da física dos rios.

A CEHF cumpriu os seus objectivos quanto à aquisição e divulgação de conhecimento sobre os processos físicos dos rios e à formação de uma comunidade técnica que aplica esses

conhecimentos. Mas os rios são muito mais que os seus processos físicos. Os rios articulam natureza e cultura – são numerosos os exemplos de comunidades humanas que dependem dos rios para suprir as suas necessidades materiais e que, simultaneamente, os tomam como elementos essenciais para elaborar a sua dimensão espiritual. São distintos os modos pelos quais as comunidades estabelecidas junto de rios densificam as formas de interacção entre agentes humanos e não humanos. Todavia, pode afirmar-se que há invariantes nesses modos e que os processos físicos, bioquímicos e ecológicos que ocorrem nos rios são a condição de possibilidade de empreendimentos humanos, sejam paisagísticos, económicos, sociais ou políticos. Reciprocamente, é evidente que as actividades humanas têm impactes significativos nos processos naturais.

Se nada disto é novo e se é verdade que o carácter multidimensional dos rios é bem conhecido, também é verdade que a tomada de consciência da crise climática e a adopção de objectivos globais concretos de desenvolvimento sustentável tem induzido uma evolução na forma como entendemos e nos relacionamos com os rios – de recurso hídrico, cuja sustentabilidade importa salvaguardar, para entidade cuja relevância não decorre da sua utilidade para usos humanos, mas sim de processos de significação mais complexos. Esta evolução tem tido expressão no quadro normativo ambiental, Europeu, em particular, resultando que, hoje, qualquer intervenção técnica no espaço fluvial requer uma forte contextualização ambiental, económica, social e cultural.

Cumpridos os objectivos iniciais da CHEF, colocou-se aos proponentes da CER a questão de como contribuir para que a APRH enderece os temas e desafios actuais suscitados pela evolução da nossa percepção dos rios, neste quadro de grande exigência quanto à integração de práticas e saberes distintos. A resposta passa por estabelecer mais e mais complexas relações entre quem conhece os processos físicos, bioquímicos e ecológicos e quem aborda os aspectos paisagísticos, sociais, legais ou políticos, associados aos rios. Os actuais proponentes da CER não têm a pretensão de deter todas as competências necessárias para responder à complexidade dos desafios associados à nossa interacção com os rios. Têm claro, no entanto, que só a diversificação de temas e integrantes da CER permitirá uma densidade de ligações, a outras Comissões Especializadas da APRH, aos Núcleos Regionais, e a entidades fora da APRH, consistente com um tratamento verdadeiramente multisectorial e interdisciplinar dos desafios inerentes a uma nova relação com os rios.

A relação da CER com os Núcleos Regionais desenvolver-se-á naturalmente, à semelhança do que aconteceu com a CEHF, uma vez que em todas as regiões existem rios que colocam desafios ou oportunidades. A actual formulação da CER assume ligações naturais e possibilidade de trabalho conjunto com as Comissões Especializadas de Água, Agricultura e Florestas, Água e Energia, Qualidade da Água, Zonas Costeiras e do Mar, e Água, Território e Cultura.

No espaço fluvial surgem ameaças e desafios resultantes de actividades humanas antagónicas entre si e potencialmente danosas para a qualidade desses espaços. As ameaças mais antigas, e mais persistentes, serão a poluição, a perda de habitats e a sobre-exploração. A colaboração com as Comissões Especializadas de Água, Agricultura e Florestas e Qualidade da Água e dos Ecossistemas, permitirá agilizar acções de sensibilização e a formular respostas técnicas (com enquadramento social e político) a problemas concretos, no actual quadro normativo.

A perda de habitats naturais acompanhou o desenvolvimento das sociedades humanas. Acrescem riscos associados à exploração dos rios para fins hidroeléctricos - a fragmentação dos rios e os picos de caudal turbinado. No espaço Europeu, pretende-se reverter esta tendência e restaurar a conectividade de uma quantidade substantiva de cursos de água no horizonte próximo. Aqui os desafios fundamentais consistem em estudar e avaliar a resposta hidromorfológica dos rios e dos seus ecossistemas e divisar medidas de compatibilização de usos. Neste sentido, surge naturalmente a colaboração com as Comissões Especializadas de Água e Energia e Qualidade da Água e dos Ecossistemas.

Outro desafio é colocado pela dinâmica global das migrações de pessoas e de espécies animais e vegetais que concorre para aumentar o risco de destruição de habitats por espécies invasoras. Neste campo, a ciência cidadã tem procurado avanços na detecção precoce de problemas e de mitigação dos mesmos. No que diz respeito ao espaço fluvial e à APRH, a CER em conjunto com a Comissão Especializada de Qualidade da Água e dos Ecossistemas tem condições para fomentar esse tipo de iniciativas.

De entre as formas emergentes ou consolidadas de poluição dos rios saliente-se a dos plásticos. É frequente dizer-se que a resolução dos problemas de micro-plásticos no mar resolve-se nos rios. Neste sentido, note-se que são já frequentes as iniciativas de ciência cidadã que pretendem monitorizar e mitigar a incidência de plásticos, no mar, mas

também nos rios. Surge aqui uma possibilidade de colaboração com a Comissão Especializada de Zonas Costeiras e do Mar, não só em iniciativas de caracterização das fontes e destino da poluição, mas também no desenvolvimento de propostas de intervenção para reduzir o volume de plásticos no espaço fluvial.

O actual contexto da crise climática, em particular se se verificar a tendência para o aumento da frequência de secas severas, potencia a ameaça da sobre-exploração dos recursos hídricos. A ameaça da seca poderá conduzir a soluções de aumento da capacidade de retenção em albufeiras. Este é um campo em que as decisões que implementam a estratégia nacional de intervenção terão que ser sustentadas por um conhecimento profundo das dinâmicas do espaço fluvial e alimentadas por uma discussão aberta a toda a sociedade. Para este trabalho, a CER, herdando a competência específica em hidromorfologia da CEHF, deverá pugnar para que o conhecimento científico dos processos físicos não fique de fora do debate no espaço cívico e do resultado das decisões políticas.

Em alguns rios, a dimensão simbólica tem sido mantida e alimentada pelas suas comunidades. Noutros, frequentemente em sociedades em que os processos de industrialização reduziram a relação com os rios à dimensão utilitária, a conexão das comunidades ao seu rio é limitada. Nestes casos, coloca-se a questão da reconexão aos rios, assumindo que são fonte de bem-estar para as comunidades humanas, sem comprometer o respeito pelos ecossistemas, a articulação com outros usos e sem empreender comportamentos de risco. Neste contexto, surgem oportunidades de colaboração com a Comissão Especializada de Água, Território e Cultura, por exemplo em iniciativas que promovam actividades criativas ou que retomem a memória dos lugares como estratégias de reconexão.

Em 1941, quando T.S. Elliot escreveu os "Four Quartets", a atitude predominante em relação aos rios, nas sociedades denominadas ocidentais, era ainda a de domesticação. A engenharia fluvial garantia o desenvolvimento industrial e económico e a segurança contra cheias. Essa atitude entrou em rápido declínio após a guerra, para ser substituída pelo que se veio a tornar a abordagem dominante de hoje, que reconhece as múltiplas funções dos rios, químico-físicas, ecológicas, sociais ou económicas.

Há um aspecto que tem mudado mais lentamente – a nossa relação com os rios foi formada por ciclos de danos e curas. Às cheias sucedia-se a linearização dos rios, à linearização sucede-se a

renaturalização. Os rios têm sido problemas para os quais procuramos encontrar soluções. Talvez seja este o tempo de procurar uma outra relação com os nossos rios, baseada num investimento emocional mais completo que permita concebê-los não como agressores ou vítimas, mas como parceiros num mesmo contínuo socio-ecológico. Não há nesta proposta qualquer intenção de obscurantismo – pelo contrário, como em qualquer relação, quanto mais profundo for o conhecimento, e, nesta relação, importa fundamentalmente o conhecimento científico, mais lato o leque de possibilidades de evolução em conjunto.

Se os rios fossem seres sencientes, estariam possivelmente "à espera, observando e à espera", como diz o poema, não para concretizar uma ameaça (como uma leitura superficial poderia indicar), mas sim à espera de ver estabelecida uma relação diferente com a Humanidade. Uma relação não determinada por uma matriz de culpa e redenção, mas por um desequilíbrio fecundo entre curiosidade e experimentação. É talvez este o resumo deste texto – é para essa relação que a CER pretende contribuir.





# Homenagem





# “Há águas e águas”: a extraordinária vida do hidrogeólogo José Martins Carvalho (1943–2023)

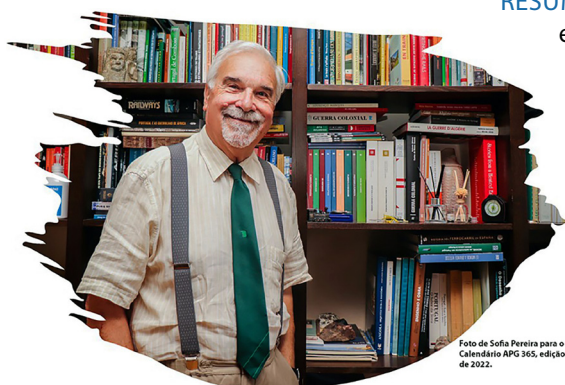
*“There are waters and waters”: the extraordinary life of hydrogeologist José Martins Carvalho (1943-2023)*

Helder I. Chaminé<sup>1,2\*</sup>

\* Autor correspondente: hic@isep.ipp.pt

<sup>1</sup> Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (Labcarga), Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto, Porto, Portugal

<sup>2</sup> Centro GeoBioTecUA, Aveiro, Portugal



**José Martins Carvalho (1943–2023)**  
EurGeólogo, Hidrogeólogo, Professor Emérito P.Porto

Foto de Sofia Pereira para o Calendário APG 365, edição de 2022.

**RESUMO:** Este ensaio pretende dar boa nota do legado e da extraordinária vida do hidrogeólogo profissional e professor emérito José Martins Carvalho (1943–2023). Teve uma carreira fulgurante de mais de 57 anos de atividade profissional ativa até ao seu último sopro em 31 de janeiro de 2023. Exerceu a profissão em várias geografias, na Europa, em África, na América do Sul, no Médio Oriente e na Ásia. Com um percurso ímpar como geólogo, desde a geologia militar até à hidrogeologia profissional ao nível da caracterização, investigação, monitorização, gestão e planeamento de recursos hídricos subterrâneos e geotérmicos, engenharia de águas subterrâneas e hidrogeotecnia, passando ainda por uma intensa experiência académica de mais de 32 anos em algumas instituições do ensino superior. Colaborou ainda como investigador sénior com várias equipas nacionais e internacionais até ao fim da sua longa carreira. Por último, mas não menos importante foi membro ativo de várias associações profissionais e sociedades científicas, tais como, a Associação Portuguesa de Geólogos (APG), Ordem dos Engenheiros (OE), Associação Internacional de Hidrogeólogos (IAH), Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), Sociedade de Geografia de Lisboa (SGL), entre outras.

Palavras-Chave: Águas Subterrâneas, Hidrogeologia, Recursos Hídricos, Legado, Geoética

**ABSTRACT:** This essay will record the legacy and extraordinary life of professional hydrogeologist and professor emeritus José Martins Carvalho (1943–2023). He had a brilliant career spanning more than 57 years of enthusiastic professional activity until he last breath on 31 January 2023. He has worked on several projects in various countries, including Europe, Africa, South America, the Middle East, and Asia. With a unique career as a geologist, from military geology to professional hydrogeology in characterization, research, monitoring, management, and planning of groundwater and geothermal resources, as well as groundwater engineering and hydrogeotechnics, he also had over 32 years of intense academic experience in some higher education institutions. He also collaborated as a senior researcher with multiple national and international teams until the end of his long career. Last but not least, he was an active member of several professional associations and scientific societies, such as the Portuguese Association of Geologists (APG), Order of Engineers (OE), International Association of Hydrogeologists (IAH), Portuguese Association for Water Resources (APRH), Portuguese Geotechnical Society (SPG), Geographical Society of Lisbon (SGL), among others.

Keywords: Groundwater, Hydrogeology, Water Resources, Legacy, Geoethics

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 45, N.º 1, 81-96 - março de 2024.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh45n1-homenagem1

## PALAVRAS PRÉVIAS

José Martins Carvalho nasceu numa noite fria, junto à estação ferroviária de Campolide em Lisboa, a 12 de dezembro de 1943. Filho de uma família operária (Júlio Carvalho e Maria de Jesus Martins) ligada à Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses (C.P.), que o marcou de forma indelével. Daí, porventura, o seu eterno gosto pelos comboios, modelismo ferroviário, as viagens por outras geografias, e, simplesmente, vaguear o espírito por outras paisagens, especialmente em África. Coursou várias escolas até que o seu Pai se mudou para Campanhã e terminou no ano escolar 1960/61 os seus estudos no Liceu Alexandre Herculano, no Porto.

No término do curso liceal e nas suas próprias palavras em recente entrevista promovida pelo 'Projeto APG 365' (Pereira & Pereira 2022): *"E por isso, aos meus 17 anos, quando tive que escolher para que curso ia, tive sérias dúvidas. O leque de opções também não era muito grande... Na altura, havia engenharia de minas ou Geologia e o meu coração balançava muito para a engenharia de minas. O que pesou foi um aspeto prático imediato: eu precisava de ganhar dinheiro, o curso de Geologia era de quatro anos e o de engenharia era de seis. Esse foi o critério que presidiu a decisão e acho que fiz a opção certa, fui e estou a ser muito feliz."*

As palavras inaugurais do anuário da Universidade de Porto são reveladoras de uma realidade inquestionável da sociedade portuguesa no dealbar dos anos 60, do século XX, que pelo punho do seu secretário afirmava: *"No ano escolar de 1961-62, que se iniciou quando mal tinha terminado a fase aguda do terrorismo em Angola, e durante o qual se realizou o vil ataque da União Indiana contra Goa, as preocupações da Universidade do Porto orientaram-se sobretudo, como convinha, para o Ultramar."* (In: UP 1962). Era este o ambiente académico e social quando o jovem José Martins Carvalho entrou, no ano letivo 1961/62, no curso de Ciências Geológicas da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Terminou o seu curso superior no ano de 1966, com 23 anos. Teve uma experiência profissionalizante num duríssimo estágio de Verão de 1965, no Alentejo, ligado à cartografia e prospeção geológico-mineira de jazigos de sulfuretos maciços por recomendação do professor Gaspar Soares de Carvalho ao coordenador do projeto, o insigne professor José Ávila Martins. Foram ambos, duas das suas principais referências académicas e profissionais. Neste estágio privou de perto com o geólogo inglês John William Lydon tendo-se tornado um verdadeiro mentor no despertar da

sua carreira e teceram laços de fraterna amizade. A vida separou-os, mas reencontraram-se muito mais tarde, em 2015, a propósito do tributo à carreira de J. Martins Carvalho (pormenores em Chaminé *et al.* 2015, Chaminé 2015, 2024). A vida profissional de ambos foi generosa, J.W. Lydon impôs-se como um reputado geólogo e investigador em geologia económica dos Serviços Geológicos do Canadá (Thomas&Jefferson 2019) e J. Martins Carvalho como extraordinário hidrogeólogo profissional e professor de hidrogeologia e investigador em instituições do ensino superior (em particular, Universidades de Évora, do Porto e de Aveiro e Instituto Superior de Engenharia do Porto – Politécnico do Porto). De facto, John W. Lydon captou instantaneamente, em meados de 1965, a essência do jovem José Martins Carvalho como um dos colegas geologicamente mais astutos e afáveis com quem teve o prazer de trabalhar no campo e, ainda, devido à sua generosa assistência, orientação e companheirismo por terras alentejanas. Assim, de forma intuitiva previu para J. Martins Carvalho uma carreira de sucesso nas geociências, comprovado pelo seu excecional historial profissional (pormenores em Chaminé *et al.* 2015, Chaminé 2024).

Depois veio o serviço militar obrigatório, com uma dura passagem pela recruta básica na Escola Prática de Infantaria, em Mafra e, posteriormente, obteve a sua especialidade na Escola Prática de Engenharia (EPE) no Polígono de Tancos, em 1967. A passagem pela engenharia militar num contexto de guerra colonial moldou em definitivo a sua personalidade e foi, com certeza, o momento seminal e potenciador das suas aptidões científicas e técnicas ligadas à hidrogeologia e engenharia de captações. Em Moçambique, como Alferes Miliciano, fez-se geólogo militar e liderou o carinhosamente denominado "pelotão das águas subterrâneas" (Fig.1) tendo praticado e desenvolvido, num timbre castrense, estudos hidrogeológicos (incluindo esboços de cartografia geológica aplicados à prospeção e pesquisa de água subterrânea e expeditos inventários hidrogeológicos) e de engenharia de águas subterrâneas (Carvalho 1970). Esta prática desenvolvida foi ao estilo das recomendações e ações de grupos de geólogos e engenheiros militares formados durante a Segunda Guerra Mundial e conflitos posteriores (e.g., Kranz 1938, USACE 1944, Kiersch 1998, Mather & Rose 2012, Chaminé & Carvalho 2015, Carvalho & Chaminé 2021).

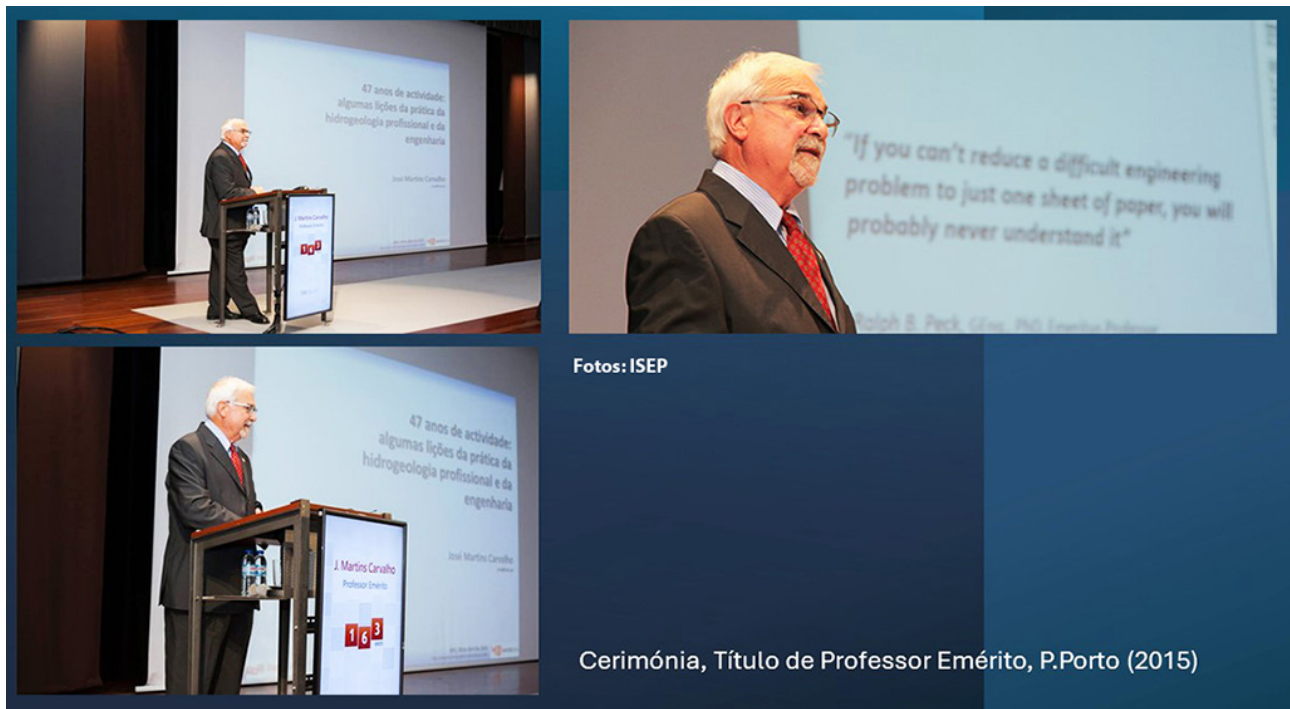
Em finais de 1973 regressou a Lisboa e aceitou o desafio de trabalhar na empresa nacional e internacional de referência 'Sondagens e Fundações ACavaco Lda.' donde desenvolveu, aprofundou e



**Figura 1.** O intenso período de 1967 a 1973: de Tancos a Moçambique (Polígono Militar de Tancos, cinco geólogos/ sapadores pontoneiros de engenharia na Engenharia Militar, Rio Tejo, Almourol, em Maio de 1967; Mucojo, Sonda de percussão Mangold da Geotécnica & Minas; com o Mestre-Sondador António Pereira, Março de 1969; Nova Mueda – Montepuez, Geotécnica & Minas, Agosto de 1968; ‘Pelotão das Águas Subterrâneas’, ladeado pelos seus camaradas e Martins Carvalho empunhando o clássico martelo de geólogo Estwing na região montanhosa de Mapé, no Planalto dos Macondes, ca. 1968). (Fotos: arquivo da família Carvalho)

praticou a atividade de hidrogeologia profissional, engenharia de captações e gestão de recursos hídricos subterrâneos, até por volta de 1996. Em 1998 criou e dinamizou até ao seu último sopro a empresa TARH – Terra, Ambiente e Recursos Hídricos, Lda., estabelecendo uma rede de colaboradores inter e multidisciplinar nacional e internacional na caracterização, estudo e desenho soluções de projetos de gestão e planeamento de recursos hídricos, subterrâneos, bem como avaliação e monitorização hidrogeológica e ambiental. Foi responsável por gestão de equipas em inúmeros projetos de caracterização, desenvolvimento, sustentabilidade e proteção de recursos hídricos, águas minerais naturais e geotermia e, ainda, em estudos de impacte ambiental nos domínios das águas subterrâneas nos empreendimentos de Foz Tua, Carvão-Ribeira, Alvito, Venda Nova, Salamonde e Paradela, no projeto mineiro de Conga (Peru) e no túnel rodoviário do Marão, entre muitos outros. Em 1982, Martins Carvalho abraçou outra indelével experiência profissional ligada à academia e investigação. Assim, numa primeira fase, lecionou aulas como docente convidado nos domínios da

hidrogeologia, dos recursos hídricos subterrâneos, dos recursos hidrominerais e da geotermia, de 1982 a julho de 2005, na Universidade de Évora (aqui, também, colaborou ativamente na criação da licenciatura em engenharia de recursos hídricos, em estreita parceria com o professor Ricardo P. Serralheiro) e de 1984 a 1994, na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Numa segunda fase, por volta de 2004, iniciou uma colaboração como professor adjunto convidado para lecionar, nomeadamente, nos domínios da hidrogeologia e gestão de recursos hídricos, da sustentabilidade de recursos geotérmicos e hidrogeotecnia no Instituto Superior de Engenharia do Porto – Politécnico do Porto. Em 2009, prestou, com sucesso, as provas públicas para o provimento de um lugar de professor coordenador no Departamento de Engenharia Geotécnica (tendo em 2012, obtido a ‘tenure’) e em abril de 2013 prestou provas públicas, na Universidade de Aveiro, para obter o título académico de agregado por unanimidade. Em 14 de Janeiro de 2014, lecionou a emotiva ‘última aula’ no Auditório de Geotecnia do ISEP perante uma plateia de mais de 90 colegas, antigos



**Figura 2.** Um momento marcante, a lição integrada na cerimónia para a atribuição do título honorífico de professor emérito, Politécnico do Porto (ISEP, abril de 2015). Ao fundo, a célebre frase do insigne geotécnico Ralph Peck *'if you can't reduce a difficult engineering problem to just one sheet of paper, you will probably never understand it.'* (DiBiagio & Flaate 2000) e que em tom de graça Martins Carvalho acrescentava "até poderia, vá lá, ser em formato A3".

alunos e alunos do seu último ano. Jubilou-se como professor coordenador com agregação, mas amiúde vinha ao ISEP proferir seminários e palestras. Em 8 de Abril de 2015 recebeu das mãos da Presidente do Politécnico do Porto a distinção do título honorífico de 'professor emérito' que o granjeou pelo seu elevado empenho, dedicação, ética e dignidade na promoção do espírito do Politécnico do Porto perante a sociedade e a academia a nível nacional e internacional (Fig. 2). O professor Martins Carvalho teve sempre, até ao último sopro, um papel incontornável e discreto, mas sempre cumprindo de forma profissional, entusiasta e dedicada, em prol de um ensino de excelência nos cursos ministrados no ISEP.

É de elemental reconhecimento o seu empenho e dedicação profissional, bem como o seu carácter afável e integridade técnica e científica exemplar comprovada ao longo de mais de 57 anos do exercício de profissional em geologia e engenharia. A par disso poder-se-á juntar a sua produção científica resultado de colaboração ativa com grupos de investigação e atividades técnicas e pedagógicas no âmbito da hidrogeologia, hidrogeotecnia, geotermia, engenharia de águas subterrâneas, prospeção hidrogeológica, e ordenamento do território e ambiente. Foi autor de uma vasta obra

científica e técnica em publicações nacionais e internacionais e ainda participou em vários projetos científicos. Foi (co)orientador de inúmeros relatórios de final de licenciatura, de dissertações de mestrado e de teses de doutoramento de várias instituições.

Sempre estimulou e incentivou os seus alunos e colaboradores a conceptualizarem de forma rigorosa, disruptiva e criativa, bem como buscando soluções sustentáveis desenhadas em harmonia com a natureza, assente em valores da geoética e para o bem societal (no sentido preconizado por Peppoloni & Di Capua 2022). Os seus escritos e reflexões, por exemplo, sobre o 'dimensionamento de captações de águas subterrâneas', a 'metodologia de prospeção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofílicas portuguesas', o 'ensino da geologia e o geólogo europeu', 'recursos hidrotermais: o ponto de vista do geólogo', as 'águas subterrâneas e ordenamento do território', os 'perímetros de proteção a captações de águas subterrâneas para abastecimento público', a 'captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas' e 'as águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no Norte de Portugal' (Carvalho 1973, 1984, 1990, 1993, 1999, 2001a,b, 2002) são ainda atuais. Nas suas intervenções lembrava-nos

constantemente que ‘Há Águas e Águas’<sup>1</sup> visto existir uma diversidade hidrogeoquímica dos sistemas hidrológicos que são utilizados para múltiplos fins (água potável, irrigação, indústria, etc.) e dos recursos hidrogeológicos (água mineral natural, águas termais, indústria de água engarrafada, etc.); ver, por exemplo, Carvalho *et al.* (2024). Além da importância da proteção e segurança ambiental dos sistemas hidrológicos (Braga *et al.* 2014) e da emergente área de hidrogeologia rural (Chaminé *et al.* 2021).

Pelo acima exposto, foi-lhe dedicado, em março de 2015, pelos seus pares nacionais e internacionais um volume de homenagem, com mais de 519 páginas — ‘Sustainability and water Resources: honouring emeritus professor EurGeol. José Martins Carvalho’ — publicado pela revista ‘Environmental Earth Sciences’ da editora Springer (Chaminé 2015). Mais recentemente foi publicado um ensaio, em jeito de epílogo, do volume de homenagem anterior, como um tributo à sua memória e legado, intitulado “‘Water Is a Unique Resource: A Drop Can Save a Life, in War and Peace’: embracing the legacy of the hydrogeologist José Martins Carvalho (1943–2023)” na mesma revista da Springer (Chaminé 2024). Assim, para se ter um retrato mais aprofundado sobre o percurso e o pensamento do professor J. Martins Carvalho sugere-se a leitura dos seguintes trabalhos: Chaminé *et al.* (2015), Chaminé & Carvalho (2015), Carvalho & Chaminé (2021), Pereira & Pereira (2022), APG (2023) e Chaminé (2024).

## O FORJAR DE UM PERFIL ÚNICO E DE MISSÃO

José Martins Carvalho tem um perfil pessoal e profissional ímpar forjado e vivenciado em distintas realidades geográficas, geológicas, sociais e temporais. Desde tenra idade foi uma espécie de viajante no seu Portugal devido à profissão de seu Pai e família, ligada à ferrovia. A vida de Martins Carvalho tem facetas de *Corto Maltese*, em que as viagens épicas (interiores e geográficas) e uma certa bruma misteriosa das histórias vivenciadas e partilhadas assumem o palco central da sua polifacetada e extraordinária vida profissional e pessoal.

1 - Esta expressão mimetiza, por certo, o famoso pensamento de Green (1882, p. 443) — ‘Há Granitos e Granitos’ — retomado numa abordagem fulgurante nas geniais meditações de Read (1943, 1944). Talvez, um eco de geração após geração de alunos da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto que sabiamente aprenderam e repetiram como um mantra petrográfico durante o curso de petrologia ígnea do nosso mútuo e ilustre professor Miguel Montenegro de Andrade (1918–2012). Pormenores em Chaminé (2024).

Para o efeito, repescamos o belíssimo e inédito texto da sua autoria para cinzelar as ‘palavras prévias’ do relatório para obtenção do título académico de agregado na Universidade de Aveiro (Carvalho 2012) e defendido em abril de 2013. Assim, na primeira pessoa, escutemos José Martins Carvalho nas suas múltiplas vidas desde as memórias da sua meninice até quase aos dias da sua jubilação no Instituto Superior de Engenharia do Porto, em finais de dezembro de 2013.

E, disse na primeira pessoa, em timbre coloquial, retrospectivo, crítico e afetivo (segundo Carvalho 2012 e outros pormenores em Chaminé & Carvalho 2015, Chaminé 2024):

“Em dezembro de **1943** a Segunda Guerra Mundial estava ao rubro. Após a derrota dos Alemães em Estalinegrado e da Conferência de Teerão em novembro, o professor Salazar iniciará a política de ‘neutralidade colaborante’, concedendo facilidades ao velho aliado inglês, nos Açores. Lisboa fervilhava de agitação: refugiados, espões, mulheres ousadas, desafiavam a pacatez lusíada. A teatralização do império colonial operada pelo Estado Novo, estava no auge e nesse mesmo ano foi criada a Casa dos Estudantes do Império.

Numa sociedade muito hierarquizada e conservadora, a sofrer colateralmente as dificuldades da guerra, numa madrugada gélida, o Sr. Júlio Carvalho, operário de Via e Obras da CP, saía do Túnel do Rossio, lado de Campolide. Fumo, vapor e alguma névoa matinal misturavam-se com vultos, gritos humanos e o silvo estridente das locomotivas, cenário dantesco de apoio ao fluxo incessante dos comboios tranvias que em breve despejariam no Rossio os ensonados residentes da Amadora, Queluz e Cacém. O Natal estava próximo, este ano com um Menino Jesus especial que nascera na sua casa do bairro ferroviário, umas centenas de metros a Norte da estação. Para além das velhoses, comer-se-ia ananás nessa noite de consoada!

Tua, coração do Douro vinhateiro, outubro de **1947**, vale e linha férrea do Douro. A linha do Tua desempenhava o seu papel alimentador da rede principal, trazendo e levando diariamente até Bragança centenas de passageiros de Lisboa, do Porto, de Espanha até. A vida de ferroviário e das suas famílias é como a de um judeu errante. Uma casa modesta, cerca de 1 km a leste da estação, os comboios passando a dois ou três metros da parede. Nas traseiras a paisagem deslumbrante de um rio ainda não domado pelas barragens, os rabelos vogando mansamente, embora as barricas de Porto viajassem bastante mais pela via-férrea que lhes retirara o protagonismo. No ar o cheiro balsâmico das estevas e do rosmaninho, o vozear

das vindimas, e o ruído metálico dos comboios que se perdia na distância para Este, no Túnel da Rapa, e para Poente no bruaá da estação.

Por aqui passou Jacintho (de Eça de Queiroz, 1901, 'A Cidade e as Serras') vindo de Paris no 'Sud Express', ramo do Porto, que de Medina rumava a Salamanca e Fregeneda, e daí a Barca de Alva, numa das mais fantásticas linhas ferroviárias do mundo.

*"Sacudi violentamente Jacintho:*

*— Acorda, homem, que estás na tua terra!*

*Elle desembrulhou os pés do meu paletot, cofiou o bigode, e veio sem pressa, á vidraça que eu abrira, conhecer a sua terra.*

*— Então é Portugal, hein?... Cheira bem.*

*— Está claro que cheira bem, animal!*

*A sineta tilintou languidamente. E o comboio deslisou, com descanço, como se passeasse para seu regalo sobre as duas fitas d' aço, assobiando e gozando a beleza da terra e do ceu".*

É do Tua que guardo as primeiras e mais antigas recordações pessoais e a admiração pelas paisagens telúricas do Douro e pela ténpera dos seus Homens. E recordarei sempre a angústia do atravessamento da ponte de São Martinho sobre a Ribeira da Ribalonga, no percurso ao longo da linha férrea até ao túnel da Rapa, antes de mergulhar na sua boca desdentada. Não sabia eu, então, que no morro atravessado por aquela obra de arte se encontram as pinturas rupestres do Cachão da Rapa (Santos Júnior 1932, 1940). Segundo M.J. Gandra (in: Teixeira 2014), este não é mais do que um paredão vertical de granito insculturado, situado na margem direita do Douro, sobre o túnel da Alegria (ca. 2 km a montante da estação de caminho de ferro de Tua) expressamente construído, em 1853, para preservar o arqueossítio.

Curiosamente haveria de voltar mais tarde a esse lugar mágico, também conhecido pela população como Curral das Letras. Em meados dos anos 60, aluno de Ciências Geológicas na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, na companhia do amigo e colega António José Crespo Moreira visitámos, à custa de acrobacias inenarráveis, as referidas gravuras e fizemos outras expedições geológicas no Concelho de Carrazeda de Ansiães, então um burgo quase medieval. Muito depois, já geólogo profissional, em 2006, na equipa do Labcarga|ISEP (Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada) coordenaria os estudos de impacte ambiental (Hidrogeologia) do empreendimento hidroelétrico de Foz-Tua que virá

a submergir uma já praticamente morta linha do Tua, então só operacional até Mirandela. Ironias do destino...

**1953**, no mês de agosto, em Vila Nova de Ourém, na feira no largo principal da vila. Acabara de chegar com a minha Avó materna para vender no mercado fruta e outros produtos agrícolas de uma economia de subsistência. Centenas de camponeses vindos do Maciço Calcário Estremenho, e das colinas suavemente onduladas da bacia cretácica envolvente, acotovelavam-se com carroças, mulas e burros, quadros vivos de Malhoa ou Roque Gameiro, num burburinho ensurdecido, culminando num almoço, nas mesas corridas, de sardinhas de barrica, acabadas de chegar da Nazaré.

Vinha eu de chegar de Pombal, novo local de residência, sempre com o comboio ao lado, o Arunca de águas cristalinas pela frente, a placidez de um vale aluvial com poços de águas fartas. E, também, o adivinhar de novos mundos no passar do Sud Express ou da nova coqueluche ferroviária portuguesa, o comboio automotor Fiat (Foguete) que estava, então, a destronar as belas locomotivas 'Pacific' a vapor da série 500 e o seu Flecha de Prata na ligação Lisboa-Porto. A visão de uma poderosa e corpulenta locomotiva a vapor Mikado do pós-guerra, 'made in USA', descarrilada do lado Sul da estação de Pombal, mais de 150 toneladas de aço, água e carvão, ainda agora me atormenta os sonhos!

Foi na bacia cretácica de Ourém que comecei a interessar-me pelas pedras (fósseis de ouriços e de lamelibrânquios nos níveis carbonatados, madeira fossilizada nalguns níveis argilo-gresosos e concreções ferruginosas no contacto dos depósitos pliocénicos com o Cenomaniano-Turoniano). E foi também em contacto com o meu Avô, em Seiça (Seiça-Ourém como se dizia então, pois era esse o nome do apeadeiro ferroviário servindo a freguesia) que aprendi que o futuro se constrói com perspicácia, perseverança, determinação, prudência... e fé.

Assim, o mundo era visto por mim através da revista "O Século" e do "Boletim da CP".

Chegava o momento de frequentar o ensino liceal e para isso o sistema permitia que os ferroviários fossem colocados em locais onde tal ensino existisse: fui parar a Campanhã a uma casa encravada entre o Douro (então um Douro falsamente plácido no Areinho), a linha da Alfândega, e as vias principais, em viaduto, onde se encaixavam os acessos à ponte D. Maria Pia e à estação de São Bento. Miúdo "parolo" na grande cidade, meio ano letivo num Colégio João de Deus para ricos, depois no Liceu Alexandre Herculano e aí está: os meus grandes

amigos são do Porto, eu sou do Porto, os primeiros amores, também.

Na entrada em *Ciências Geológicas*, em **1961**, na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, na Praça dos Leões, há um choque: os caloiros recebem do porteiro Sr. Leites o tratamento de ‘Dr.’, as aulas são mistas (jovens dos dois sexos na mesma sala), e sobretudo, há a crise académica. Afinal o mundo lusíada era bem diferente daquilo que parecia. Para completar o quadro, o assalto ao paquete Santa Maria, o início da ‘Guerra do Ultramar’ em Angola, a queda da ‘Índia Portuguesa’, o desvio do avião da TAP Casablanca–Lisboa, e, finalmente o ‘Golpe de Beja’, quebram a monotonia e o fluir, que parecia manso, da História.

O ensino na Faculdade de Ciências do Porto nesses tempos recuados era quase escolástico. Alguns Mestres tentavam impor ensinamentos mais atuais, e no caso da cadeira de ‘Geologia’ o professor Gaspar Soares de Carvalho promovia visitas ao campo, apresentava as teorias mais recentes da geomorfologia global, acenava-nos com as paisagens distantes de Angola e da Guiné, onde estivera em missão de serviço, e proclamava que a profissão de geólogo existia, e que nós poderíamos ser geólogos.

Depressa, um grupo que incluía o já referido António José Crespo Moreira, o Mário Oliveira, o António Casal Moura e outros, passou a organizar visitas de campo, seguindo a estratigrafia dos cortes de Nery Delgado (1908) no anticlinal de Valongo, com o apoio da folha 9-C da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50.000, datada de 1957, da autoria dos professores J. Carrington da Costa e Carlos Teixeira. Um “must” eram as escombrelas da mina de S. Pedro da Cova. Por isso, um percurso típico incluía Porto-Valongo de comboio e a caminhada até S. Pedro Cova, donde se regressava ao Porto no elétrico da linha 10.

No último ano letivo da licenciatura, em **1965**, uma novidade: na cadeira de Antropologia o professor Joaquim Rodrigues dos Santos Júnior obrigava à apresentação de um trabalho de investigação que devia incluir alguma experimentação e pesquisa bibliográfica. Premonitoriamente apresentei um documento sobre a ‘prospecção popular da água’ (Carvalho 1965), numa visão mais etnográfica que radiestésica, e menos ainda, hidrogeológica. O documento foi apresentado, e avaliado, como era normal nessa cadeira, manuscrito sobre papel costaneira. Estamos a falar do ano de 1965!

Nos intervalos editávamos um jornal inteiramente manuscrito, exemplar único em papel costaneira (“O Costaneira”), cuja periodicidade não recorde e que abarcava temas variados desde a ciência à análise de

costumes. Nos cafés que frequentávamos (o ‘Piolho’, o ‘Avis’, entre outros), e onde também se estudava, ouvíamos as peripécias dos mais velhos que faziam a tropa, em Mafra, em Tavira, nas Caldas da Rainha e mesmo dalguns que voltavam dos dois anos obrigatórios de comissão no Ultramar. Com estes últimos a conversa era séria: havia histórias bizarras, silêncios, alguma incomodidade e a expectativa de que a todos nós calharia ir e alguns poderiam não regressar, ou voltar numa urna de chumbo.

O meu percurso fora dos muros da Universidade foi iniciado no Alentejo, na ‘Mining Exploration International’ (Portugal), pela mão do professor José Ávila Martins, a pedido do professor Gaspar Soares de Carvalho, que são ambos fortes referências afetivas, profissionais e científicas. Com efeito, levar a cabo prospeção geológico-mineira num Verão inclemente de 1965, naquelas então muito distantes paragens Alentejanas do Rio Guadiana, era duro, mas o desafio de começar uma carreira de geólogo ultrapassava todas as barreiras. Germinou, então, a semente da profissão.

A viagem Porto–Lisboa foi feita no conforto da 1ª Classe do Automotor ‘Fiat Foguete’, então em plena maturidade, fazendo-me pensar que estava a subir na vida: até aí só conhecera as 3as classes!

Após uma dura passagem pela Escola Prática de Infantaria em Mafra, acabei (juntamente com os recém-licenciados em Ciências Geológicas, o A. Casal Moura, o A. Costa Pereira, o A. Gomes Coelho e o Santos Silva), como Sapador Pontoneiro de Engenharia na Escola Prática de Engenharia (EPE) no Polígono de Tancos, em **1967**. Curiosamente, aquilo que para muitos era considerado uma maldição foi para alguns de nós do ‘Grupo de Tancos’, senão para todos, uma oportunidade. Os nossos ‘camaradas’ do Quadro Permanente receberam-nos de braços abertos e depressa começaram a ver em nós, utilidade como geólogos. Iniciámos, mesmo uma carta geológica do Polígono de Tancos, tomado como referência um trabalho de Pereira de Sousa (1902). Guardo, ainda, religiosamente, esses esboços. À EPE interessava particularmente o problema da prospeção de argilas e também apoio para os problemas geotécnicos que a Engenharia Militar Portuguesa enfrentava nas já então três frentes de guerra no Ultramar.

Por essa época a profissão de geólogo começava a despertar timidamente e em abril e maio de 1968 o professor João Manuel Coteló Neiva organizou em Coimbra o “Curso Livre de Geologia Aplicada” no qual me inscrevi. Assisti, assim, a intervenções fascinantes de oradores, então ainda jovens, como Manuel Rocha, Matos Dias, Nabais Conde, Portugal Ferreira, Ricardo Oliveira, Úlpio Nascimento, etc.

Nessa viagem a Coimbra conheci uma moça que frequentava Geografia. Após um namoro típico dessas épocas recuadas em que tudo era diferente, a Sociedade, os costumes, o Império, o mar a separar-nos, resolvemos 'juntar os nossos fiozinhos' três anos depois. Essa jovem é a minha mulher, Alda, e o nosso casamento perdura há mais de quarenta anos. Vieram depois os filhos (Rita, Joana e Tiago) e agora os netos Rodrigo, Miguel, Alexandre e Aurora. Foi mesmo boa a ideia do 'Curso Livre de Geologia Aplicada', em Coimbra!

No estertor do sonho imperial, Portugal mobilizava, nessa época, praticamente todos os jovens para a Guerra do Ultramar. Então, chegado o Verão, numa manhã serena de junho perturbada pelos gritos no cais e pela emoção contida a bordo, embarcava para Moçambique no navio 'Vera Cruz', uma das 'joias da coroa' da Companhia Colonial de Navegação, fretado como transporte de tropas. O desembarque foi feito em Nacala diretamente para um comboio a vapor que nos esperava no cais. A noite caiu depressa, como sempre em África. O comboio avançava rugindo raivosamente: os embondeiros eram sombras espectrais recortadas no céu, tinha chovido há pouco e havia no ar o cheiro a terra fecundada e ao fumo das aldeias. O fascínio de África!

Quando, depois da planície costeira, se divisaram ao longe as luzes bruxuleantes de Nampula, adivinhei no céu estrelado pelo Cruzeiro do Sul os imponentes 'inselbergs' de rochas do Pré-Câmbrico Moçambicano que durante mais de dois anos foram a minha companhia no Agrupamento de Engenharia de Moçambique (AEM).

Em Moçambique, na Engenharia Militar Portuguesa, sob o comando do Tenente-Coronel Eng.º Nuno Maria Rebelo Vaz Pinto, feito geólogo militar, vivi, seguramente, os dias mais intensos da minha vida profissional. No 'mato' de Cabo Delgado, Niassa e Tete aprendi que a sobrevivência de muitas vidas, na guerra e na paz, pode depender da existência e da operacionalidade de uma captação de água subterrânea. Tão importante como isso, em quatro anos de Engenharia Militar Portuguesa, conheci a perspetiva do Engenheiro, fundamental no equacionar e na resolução dos problemas concretos dos Recursos Hídricos, da Geologia de Engenharia e da Sociedade.

Em **1969** o Exército português consolidou, em Cabo Delgado, na Cruz Alta uma posição na Serra Mapé, local até então considerado inexpugnável pela guerrilha. Em pleno planalto e não existindo recursos hídricos, era necessário realizar um furo de captação como os que existiam mais a Norte no Planalto dos Macondes, nas mesmas formações cretácicas. O

reconhecimento por terra foi feito em julho de 1969 com evidente risco físico, particularmente na coluna Macomia-Darumba-Cruz Alta (30 km para nervos de aço), e no planalto até à região de Coveque onde havia um nascente. De imediato elaborei um 'relatório hidrogeológico' (Carvalho 1970) muito inspirado nas recomendações do manual TM 5-296 da 'US Army Corps of Engineers' (USACE 1944), o meu primeiro livro de hidrogeologia. Em estilo seco, telegráfico, enfim, castrense, recomendava-se, no final, um furo de pesquisa de 200m, cujo "custo estimado era da ordem de 500 contos". Adicionalmente, preconizava-se, ainda, para o revestimento das plataformas das picadas a utilização de solos das formações quaternárias e dos saibros vermelhos de alteração do Pré-Câmbrico (a pedido expresso do meu amigo Eng.º José Manuel Guerreiro, Alferes Miliciano da Companhia de Engenharia 2393 (Mueda), comandada pelo Capitão Eng.º J.P. Morais Marques, que construía o quartel da Cruz Alta, e em cujas tendas de campanha tive a honra de dormir várias noites). Gosto, ainda hoje, certamente herança da minha educação no terreno africano, de praticar nos meus relatórios um estilo contido, expurgado de informação e detalhes que não contribuem para a solução do problema que se pretende resolver.

Ainda em Moçambique, na Geotécnica e Minas Lda., tive a sorte de encontrar o Doutor António Saldanha de Sousa Neves, então jovem Doutor (PhD) pelo 'Massachusetts Institute of Technology' (MIT), brilhante geofísico e hidrogeólogo que me ensinou, com independência perante ideias feitas, honestidade intelectual, fino humor e muita irreverência, que a prospeção e pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas é tarefa muito séria e exige trabalho de campo, georreferenciado ao metro, pesquisa bibliográfica e uma atitude de superação constante, considerando todas as disciplinas disponíveis para o efetivo entendimento do reservatório geológico. A 'descoberta' da hidráulica, essencial para o hidrogeólogo, essa, veio mais tarde. Através do Doutor Sousa Neves, em 1969, fiz com surpresa a 'descoberta' da então revolucionária tectónica de placas partilhando a revista 'New Scientist' (Fisher 1969).

No Aeródromo de Manobra Nº 51 em Mueda vivi um grande feito da Engenharia Portuguesa realizada pela Acavaco Lda.: em tempo de guerra fazer uma captação de 300 m de profundidade em pleno Planalto dos Macondes, até ao substrato pré-câmbrico, não é para todos, tão pouco manter a sua exploração com dois andares de elevação, como foi o caso, pois o nível hidrostático situava-se próximo da base da captação. Estávamos perto da zona de



descarga do sistema hidrogeológico, mas era ali que se situava a base aérea....

Em **1973** vivi a antecâmara dos dias do fim: a guerrilha atacava no Istmo de Tete, ameaçava Vila Pery (atual Chimoio), destruía comboios na linha de Moatize. Fiz campanhas de prospeção (fotointerpretação, cartografia geológica e geofísica) em locais tão improváveis e inseguros como Mecito, Necungas, Capirisange, Chizampeta, Chipera, etc. Algumas dessas deslocações e reconhecimentos eram feitas de comboio, em ‘draisines’ blindadas, e muitas noites foram dormidas em ‘carruagens salão’ estacionadas nos locais do trabalho. Dessa época recordo o colega José Edmundo de Magalhães, então nos Caminhos de Ferro de Moçambique, e muito mais tarde foi professor na Universidade de Aveiro. Quando em agosto de 1973, saía num helicóptero ‘Alouette III’ da Força Aérea Portuguesa de Cantina Oliveira, no inferno de Tete, após mais uma campanha de prospeção, vi a bandeira portuguesa tremular no tosco pau de bandeira daquele aquartelamento perdido no mato. Senti, naquele local remoto que protegia os trabalhos da barragem de Cabora Bassa, um mundo a finir-se: não havia mais forças, nem ânimo, nem vontade de prosseguir o Império. Eu próprio estava de partida para a, então, Metrópole.

De regresso à então Metrópole, em setembro de 1973, ingressei na grande e ignorada escola da hidrogeologia aplicada portuguesa dos anos 1960 e 1970 que foi a empresa Sondagens e Fundações ACavaco Lda., dirigida pelos sócios-gerentes Engenheiros Augusto Cavaco, Diamantino Henriques de Mendonça e José Alfredo Botelho Chaves, onde o rigor metodológico na aquisição e tratamento de dados, a todos os níveis de intervenção técnica, rondava a perfeição paranoica. Nessa estrutura, com o apoio de notáveis, esforçados e, às vezes estoicos colegas, encarregados, mestres e operários — sábios na arte de ‘saber-fazer’ — foi-me permitido adquirir grande parte das competências de que hoje disponho.

Desses tempos de prospeção hidrogeológica com meios, metodologias e abordagens rigorosas recordo os trabalhos para o então ‘Amoniaco Português’ (depois ‘Quimigal’) realizados na zona de Estarreja em que tive a honra de conhecer e trabalhar em equipa com o agora professor Manuel Augusto Marques da Silva, estimado colega e amigo, e o Eng.º Francisco Ferreira de Almeida. Que muita história ferroviária me contava do seu Pai, Eng.º Tristão Ferreira de Almeida, diretor de exploração da Companhia dos Caminhos de Ferro do Vale do Vouga, e colaborador da Gazeta dos Caminhos de Ferro.

Seguiu-se a descoberta da hidrogeologia das termas (aqui pela mão do engenheiro de minas e professor José António Simões Cortez) e dos recursos geotérmicos, das águas engarrafadas e da atividade profissional em quatro continentes — tudo sobre a égide da hidrogeologia das rochas cristalinas — paixão que persiste, agora como consultor independente. Afortunadamente viajo agora a África com frequência, revisito alguns locais da juventude e até nalguns deles voltei a exercer atividade profissional, como é o caso da Namaacha e do Mossuril, em Moçambique (pormenores em Carvalho & Chaminé 2021).

Durante quase quatro décadas de atividade de prospeção e pesquisa de água subterrânea tive o ensejo de conhecer ilustres colegas, nacionais e estrangeiros, com os quais muito aprendi de ciência e de técnica, de ética e do rigor científico e profissional, mas também dos prazeres simples da vida. Permito-me destacar aqui dois já falecidos, os geólogos Doutor Georges Zbyszewski e o Doutor Pierre Yves Berthou, este tragicamente desaparecido no exercício da profissão no Brasil, que constituem referências profissionais e científicas marcantes. O Doutor Zby, nos momentos difíceis, recordava-me que ‘o importante é cumprirmos sempre o nosso dever’.

A atividade no Ensino Superior, mantida em tempo parcial há quase trinta anos, em paralelo com o labor de geólogo profissional, quase começava em 1968 em Moçambique, na então Lourenço Marques, quando o professor J.M. Correia Neves me desafiou com um ‘que tal uma aventurazinha universitária?’. Anos depois, em **1982**, sim, a aventura começou na Universidade de Évora pela mão do saudoso professor Francisco Gonçalves, que tudo fez para que eu abandonasse a atividade de geólogo profissional, tendo inclusive promovido, em 1991, a minha intenção de doutoramento naquela Universidade, no que foi, então, apoiado pelos professores Rafael Fernández Rubio (ETSIM, Madrid) e José António Simões Cortez (FEUP, Porto). Mais tarde, os professores Manuel Oliveira da Silva (FCUL, Lisboa) e Carlos Costa Almeida (FCUL, Lisboa) manifestaram igual disponibilidade, mas o meu profundo empenhamento na atividade privada, não me conferia autonomia para dar esse passo. Por isso, os apelos para que preparasse a ‘tese’, continuados pelos professores Alexandre Araújo, Rui Dias e Ausenda Balbino no Departamento de Geociências (UÉ, Évora), caíram sucessivamente em ‘saco roto’.

Bem mais tarde, por circunstâncias da vida e pela insistência amiga do professor Fernando Tavares Rocha e pelo imediato apoio dos professores M.A.

Marques da Silva e M. Senos Matias, submeti-me a provas de doutoramento em geociências (Hidrogeologia Aplicada), em abril de 2006, na Universidade de Aveiro. Assim, devo a todos e, sobretudo, à generosidade do departamento de Geociências|UA, a oportunidade de me doutorar na Escola de Hidrogeologia de Aveiro, liderada na altura pelo professor M.A. Marques da Silva (Carvalho 2006). Nesta Escola de Engenharia Geológica realizei a convite, amiúde, palestras ou apoiei a lecionação visitas técnicas de campo no antigo curso de mestrado em Minerais e Rochas Industriais (módulo de Recursos Hídricos) em parceria com o colega geólogo e professor Helder I. Chaminé.

Adicionalmente uma passagem de dez anos, entre 1984 e 1994, pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto veio permitir-me, afortunadamente, travar conhecimento com inúmeros alunos que hoje são referências no ensino, na docência, na investigação e na atividade geo-profissional em Portugal e no estrangeiro. Correndo o risco de cometer alguma omissão realço aqui alguns dos nomes, por ordem alfabética, dos geólogos: Álvaro Pinto, António Guerner Dias, António Pinho, Carlos Nascimento, Helder I. Chaminé, Isabel Fernandes, João Carlos Nunes, Jorge Espinha Marques, Júlio Carneiro, Lígia Rocha Santos, Maria Clara Castro, Maria José Coxito Afonso, Maria Manuela Carvalho, Maria do Rosário Costa, Nadir Plasencia, Nicolau Wallenstein, Normando Ramos, Paulo Ferraz, etc.

Terminado o ciclo de Évora onde integrei até julho de 2005 o grupo de Hidrogeologia do Departamento de Geociências, regressei à parte oriental da cidade Invicta, por volta do ano letivo 2004/2005, agora ao Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia (ISEP), Politécnico do Porto, em equipa com antigos alunos e amigos, e ilustres colegas. Aqui, em colaboração com a Universidade de Aveiro, através do Centro GeoBioTec|UA (grupo de Georrecursos, Geotecnia e Geomateriais), apoiei o projeto do Centro de Prestação de Serviços Especializados e I&D, o Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (Labcarga|ISEP), onde se passou à prática hidrogeológica em prol de projetos reais ligados à engenharia e sociedade em colaboração intensa com o meu antigo aluno, professor Helder I. Chaminé, bem como, na maioria deles, com possibilidade de realização de metodologias inter e multidisciplinares de investigação científica em cartografia hidrogeológica, hidrogeologia urbana, hidrogeologia aplicada e engenharia de águas subterrâneas (Fig. 3). Agradeço a todos os colegas do ISEP, a todas as direções do DEG|ISEP o apoio inequívoco para a minha evolução como docente na Escola de Geotecnia, Georrecursos e Geoambiente do ISEP, bem como as sucessivas presidências do ISEP que contactei. Uma palavra de gratidão à presidente do Politécnico do Porto, professora Rosário Gambôa, pela visão estratégica de apoio



**Figura 3.** Projetos hidrogeológicos e viagens por outras paragens: prospeção hidrogeológica junto ao rio Impaputo, Naamacha, Moçambique (2012), com José Teixeira e Helder I. Chaminé; num intervalo de estudo hidrogeológico parecendo um retrato vivo em Angola (2012); projeto SUDOE TERMARED com o ISEP, nas reuniões de La Guardia (2009) e de Ourense (2011). (Fotos: arquivo TARH Lda.)

e de afirmação das diferentes personalidades das Escolas na tarefa de projeção da ‘Invicta Região’ para o Mundo.

O desafio permanente de uma carreira de hidrogeólogo profissional muito intensa não me deixou seduzir pelas agruras e pela exigência da vida docente e de investigação que em Portugal ronda o sacerdócio, tais as dificuldades existentes. Às Universidades de Évora (UE), do Porto (UP) e de Aveiro (UA) e ao Instituto Superior de Engenharia do Porto do Politécnico do Porto (ISEP|P.Porto) devo a possibilidade única do contacto permanente com ilustres professores e com o fulgor da juventude através dos seus alunos. Com os alunos vivi dias apaixonantes de companheirismo e de descoberta científica e tecnológica. Nesse contexto julgo ter ganho forças para resistir à erosão dos anos. Sem essa ligação complementar, árdua, mas reconfortante, seria hoje intelectualmente mais fraco, cientificamente muito menos preparado e humanamente mais pobre.

A minha ligação afetiva ao mundo ferroviário levou-me a escrever uma carta que foi gentilmente publicada na secção ‘Os amigos do caminho de ferro’ (Carvalho 1971) do Boletim da C.P. (Fig. 4) e, ainda, o honroso convite em representação do

Ministério das Obras Públicas, a fazer parte da comissão executiva instaladora do Museu Nacional Ferroviário (2002–2004).

Finalmente, no cómodo assento do Alfa Pendular (o TGV seria mais eficaz, mas os portugueses preferiram ter três autoestradas entre Lisboa e o Porto...), ao terminar estas *palavras prévias* das provas de Agregação, agradeço a todos — desde modestos pastores, operários e funcionários anónimos, até ilustres figuras da sociedade civil e militar portuguesa, colegas, amigos, concorrentes e clientes —, que me ajudaram no percurso pessoal e profissional o meu *Muito Obrigado!*

Janas (Sintra), Lisboa, Porto: 12 de dezembro de 2012”.

Como opinou Eco (2024) no texto sobre a geografia imperfeita de Corto Maltese: ‘Assim se torna *vagabundo um texto*’. Na nossa opinião as palavras, na primeira pessoa, acima esfiadas retratam a personalidade do nosso distinto homenageado. Um percurso, ou melhor, uma vagabundagem boa, em prol da sua incrível profissão de geólogo “das águas”, mas interiorizando na sua práxis uma busca incessante de contribuir com soluções

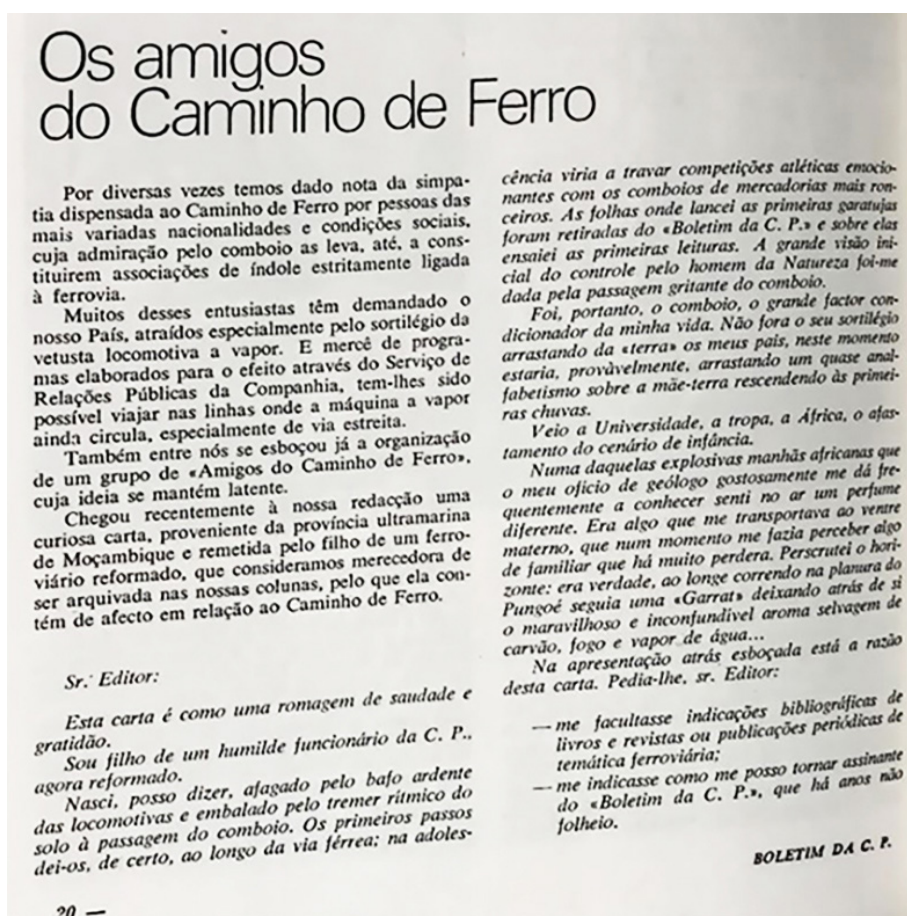


Figura 4. Uma singular carta de J. Martins Carvalho publicada no ‘Boletim da C.P.’ em 1971.

técnico-científicas para o bem-comum e o meio ambiente. Além de um gosto intrínseco por ensinar, partilhar e treinar jovens e, por fim, a construção de uma vivência pessoal para ser melhor pessoa albergando memórias gratas e poderosos ensinamentos de vida. Assim, *‘um comboio não é um veículo. O comboio faz parte do país. É um lugar.’* (Theroux 2021). E, arriscaríamos acrescentar, para Martins Carvalho era um estado de êxtase gratificante de *‘memórias-invasões-brumas-cheiros-brisas-ruídos-paisagens’*, ou seja, a chave sensorial para a consciência do *sentimento de si*.

## A FACETA ASSOCIATIVA

No seu perfil polifacetado destaca-se, desde muito cedo, o seu ativo envolvimento com várias associações profissionais e sociedades científicas, bem como subscrevia várias revistas técnicas e científicas de especialidade (e.g., European Geologist Journal EFG, Geonovas APG, Revista Recursos Hídricos APRH, Hydrogeology Journal IAH, Ground Water NGWA, Groundwater Monitoring & Remediation NGWA, Water Well Journal NGWA, World Oil, Geotecnia SPG). Por outro lado, a *‘International Association of Hydrogeologists’* (IAH) outorgou a distinção, na África do Sul, com o título *‘Millennium Hydrogeologist’* (2000) e foi o primeiro membro português a pertencer à IAH.

Martins Carvalho recebeu, em 1998, o título profissional de *‘EuroGeólogo’* (EurGeol) pela EFG – Federação Europeia de Geólogos. Foi também membro correspondente da OE – Ordem dos Engenheiros (Colégio de Engenharia Geológica e de Minas) tendo apoiado várias iniciativas a convite da OE. Foi membro da Comissão Portuguesa de Geotecnia Ambiental (CPGA) da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), tendo apoiando a linha temática de áreas urbanas e geotecnia ambiental, na especialidade de hidrogeologia urbana.

Foi Presidente da Comissão Diretiva da APG – *‘Associação Portuguesa de Geólogos’* (1979–1981), Vice-Presidente da EFG – *‘European Federation of Geologists’* (1983–1986) e Presidente da Assembleia-Geral da APG (2018-2023). Nos últimos anos apoiou estoicamente as direções da APG em especial no dossiê sobre a *‘Ordem dos Geólogos’*, tendo inclusive integrado a comitiva da APG para expor as razões junto do Ministro Ambiente e da Transição Energética. Era um convicto defensor desse passo para o correto cumprimento da deontologia e regulação profissional e ainda a definição do ato geológico para uma verdadeira responsabilização técnica do *‘geólogo profissional’*.

Foi, ainda, o primeiro português agraciado com

a Medalha de Mérito da Federação Europeia de Geólogos – EFG (2015). Esta medalha é a mais alta distinção conferida pela EFG sendo atribuída a geólogos europeus que se distinguiram excepcionalmente na defesa da profissão e na sua prática profissional. A medalha foi entregue pelo presidente da EFG, EurGeol Vitor Correia, em Lisboa, durante a reunião do Conselho de Delegados da EFG (Fig. 5). A sua atribuição foi sugerida pelos antigos presidentes da EFG EurGeol. Gareth Ll. Jones (Irlanda) and EurGeol. Richard Fox (Reino Unido). Da sua fundamentação constou: *“José foi delegado português junto da EFG durante os anos conceptuais, de 1978 a 1980, e depois durante os anos estruturantes, de 1980 a 1989 (Carvalho 2004). Foi instrumental para ajudar a construir a estrutura básica da EFG, através dos seus estatutos, regulamentos, código de deontologia e ética, etc. Em particular, foi Secretário-Tesoureiro ativo e dedicado de 1983 a 1986 e vice-presidente da EFG de 1986-1989. O José prestou, ainda, um apoio extraordinário à geologia profissional em toda a Europa e não só. Com a sua autoridade e liderança tranquilas, é um exemplo para todos nós. A nível pessoal, não só é uma magnífica companhia, mas também um excelente ‘embaixador’ da profissão, demonstrando integridade e honestidade.”*

Martins Carvalho apoiou inúmeras vezes a APRH, nomeadamente através da Comissão Especializada de Águas Subterrâneas ou simplesmente como delegado em eventos. De destacar o seu empenho pessoal na organização e realização do *‘11.º Seminário sobre Águas Subterrâneas’* no Instituto Superior de Engenharia do Porto (Porto, 2 e 3 de março de 2017), pormenores em APRH (2017). Enquadrado no evento da APRH (2017) foi ainda organizada uma visita de campo de cariz científico-cultural ao Mosteiro de Tibães liderada por H.I. Chaminé, M.J. Afonso e J.M. Carvalho, local onde há vários anos o Labcarga|ISEP desenvolve investigação cartográfica, hidrogeológica, hidrogeotécnica e geo-patrimonial (Chaminé *et al.* 2017). A propósito dessa visita repesca-se aqui as singelas linhas de abertura — *‘Mosteiro de Tibães: a dimensão ética da arte das nascentes’* — de autoria de José Martins Carvalho:

*“Na história milenar do Mosteiro de Tibães encontra-se espelhado o saber-fazer dos monges Beneditinos na gestão aplicada do ciclo da água, em usos humanos e agrícolas, para honra de Deus e satisfação das necessidades humanas.*

*É notável o acervo de estruturas hidráulicas reconhecidas em Tibães desde a captação de águas subterrâneas, a adução, o armazenamento, a distribuição e a própria restituição dos efluentes à*



**Figura 5.** Imagens várias dos últimos anos: Medalha de Mérito da EFG (2015) recebida das mãos do presidente da EFG (em Maio de 2016; Foto: EFG/APG); palestra na OERN com apresentação de J. Poças Martins (2019; Foto: OERN); partilha de informações sobre a hidrogeologia de Chaves com Paulo E. Fonseca e Marina Paiva no âmbito do Projeto AquaeVitae (Novembro de 2022; Foto: H.I. Chaminé); Jornadas da APG, em Vila Real (2022; Foto: APG); J. Martins Carvalho no escritório da TARH Lda., em 2021 (Foto: Sofia Pereira, para o Calendário APG 365 – edição 2022).

natureza. Além disso, os Beneditinos dinamizaram na região, a partir do Condado Portucalense, o aproveitamento da força da água dos rios e ribeiros que faziam movimentar as azenhas, as serrações e os lagares de azeite. Esta experiência da hidráulica monástica Beneditina teve reflexo na sua difusão pelo mundo, durante a expansão ibérica, nos locais improváveis de instalação de muitos cenóbios, onde havia gente para converter... e água, quase sempre água subterrânea. Os Beneditinos praticavam a arte de descobrir as nascentes e a circulação da água subterrânea, e cultivaram a sua aplicação sábia aos usos humanos. Eram ‘Hidrogeólogos e Engenheiros dos Recursos Hídricos’ avant la lettre.

Fez bem o Labcarga|ISEP em agarrar esta experiência multiseccular dos monges Beneditinos e associar-lhe investigação multifacetada, desde a hidrogeologia e recursos de água subterrânea à geomicrobiologia, da cartografia geotécnica à geologia de engenharia, da microclimatologia subterrânea à biodiversidade e da atividade mineira à geoconservação patrimonial e, assim, promover a sua divulgação, em colaboração com o Mosteiro de Tibães. Logo, a hidrogeologia e a engenharia de águas subterrâneas, neste contexto, ganham a dimensão ética da satisfação das necessidades humanas na sua plenitude. Está de parabéns o ISEP|P.Porto por dar ao prelo este breve guia para o grande público e por todo o labor que

*lhe está subjacente, ficando toda a comunidade a aguardar novos desenvolvimentos da atividade no lugar mágico que é o Mosteiro de Tibães.”.*

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O professor Martins Carvalho tinha, de facto, uma personalidade polifacetada e eclética, sendo um cavalheiro, muito afável no seu trato e um excelente colega com elevados padrões de integridade científica e técnica e exigência ética, além de ter uma preocupação acrescida com todos os aspetos sociais ligados à sustentabilidade e proteção ambiental quando abordava qualquer investigação, projeto, estudo ou parecer. Tinha sempre em mente o preconizado por McHarg (1992): ‘Design with Nature’ — nas várias escalas envolvidas e nas abordagens estratégicas ou táticas na proteção, gestão, planeamento e governança dos recursos naturais — quando conceptualizava um estudo, projeto ou, até um simples parecer. Por isso é vital continuar a promover estudos consistentes sobre o papel das águas subterrâneas na gestão, planeamento e governança dos recursos hídricos visto ser ainda considerado por muitos ‘um recurso invisível, sobre-explorado e pouco valorizado’ (Biswas & Tortajada 2024).

Sabemos que pelo seu carisma sereno, feitio contido, sentido de humor, personalidade afável e discreta,

achava que todos os tributos e homenagens eram exageradas e que não fez mais do que seu dever, ou seja, ser um competente (hidro)geólogo e praticar o ato profissional da geologia dentro dos parâmetros de integridade técnico-científica e ética e, ainda, a sua paixão por ensinar, mentorar, motivar, treinar alunos e equipas sempre com um timbre teórico-prático, experimentalista, integrador em termos de multiescala e disruptivo. Além de ter uma característica única que era a sua contenção e humildade consciente — no sentido mais positivo e nobre — de que fez o seu melhor num dado momento e de se (re)aprender, sempre, com os insucessos. Uma consciência geoética. Por tudo isto e muito mais perguntámos se sentia feliz quando recebia estes merecidos afetos e retorquia, de forma contida, sempre: *‘claro que sim, desde que serviam para inspirar outros a serem e fazerem melhor...’*. Era assim José Martins Carvalho. Um espírito serenamente irrequieto e de bem com a vida que abraçou, seja profissional ou junto da sua querida família.

Assim, permanecerá na memória de todos como uma referência na profissão, quer como hidrogeólogo profissional quer como académico através das suas publicações e aulas excepcionais da sua especialidade. Tinha uma habilidade rara na transmissão de (complexos) conhecimentos técnicos e científicos através do seu rigor, empatia e criatividade pedagógica, como por exemplo, a capacidade de ‘trazer o campo e/ou laboratório para dentro da sala de aula’ e sempre alertando para a necessidade de ‘olharmos para a complexidade dos problemas com equilíbrio e bom-senso técnico’. Parecendo simples, é, de veras difícil. Foi um verdadeiro mentor e amigo de muitos jovens alunos e profissionais de geologia e de engenharia. Impulsionou, apoiou e inspirou o arranque de muitas carreiras. Talvez por isso, que *‘les beaux esprits se rencontrent’*.

O legado do professor EurGeol. José Martins Carvalho será, por certo, uma viva fonte de inspiração, de exigência e de criatividade para todos os que conviveram ao longo destes anos ou todos aqueles que irão contactar ou visitar a sua vasta obra publicada. E, por isso, terminamos estas linhas com uma das suas mensagens mais fortes (pormenores em Chaminé & Carvalho 2015, Chaminé 2024):

*“Aprendi que a Água é um recurso único: uma gota pode salvar uma vida, em guerra e paz. Uma mensagem duradoura que retive é que a rigorosa prática profissional da geologia é uma força que pode ajudar a resolver muitos problemas da humanidade...”. (J. Martins Carvalho 2015)*

**In aeternum.**

## AGRADECIMENTOS

Os nossos agradecimentos à APRH, em nome da professora Susana Neto, pelo honroso convite para apresentar um ensaio sobre a personalidade de José Martins Carvalho (1943–2023), hidrogeólogo (EurGeol.) e professor emérito do P.Porto. Sabendo do seu apreço e ser afincado leitor da Revista ‘Recursos Hídricos’ da APRH por ser um farol nos estudos de hidráulica, recursos hídricos e ambiente teria, por certo, um orgulho nesta colaboração. Muito grato à partilha de fotos à OERN, APG/EFG e Sofia Pereira (Calendário APG 365). Um agradecimento especial à família Carvalho pela gentileza na partilha de fotos e apoio. Qualquer incorreção ou imprecisão apenas a mim cabe e, desde já, me penitencio.

Este ensaio é um singelo tributo à memória e legado do professor EurGeol. José Martins Carvalho sendo dedicado a todos antigos alunos geólogos e engenheiros que privaram nas suas aulas um espírito de ‘botas nos aquíferos’ em que na sua visão integradora e multiescala (desde a cartografia até à conceptualização do modelo hidrogeológico, baseado em dados do terreno, do laboratório e de modelação conceptual e numérica, com uma significância geológica, morfotectónica, petrofísica, hidrológica e hidráulica do reservatório e sempre texturado com o rigor técnico-científico, geoético e bom-senso técnico que se impõe) para propor cenários e desenho de soluções realistas e sustentáveis em harmonia com a natureza e para o bem da sociedade. Que o seu legado perdure e inspire muitas e novas gerações de geólogos e engenheiros. Este foi o segundo e último ensaio, de dois que dei a lume, que me coube traçar por imperativo dever de consciência de preservar a memória e o legado de um dos meus Mestres, camarada e colega do ISEP e doravante remeto-me a um sóbrio silêncio ético com matizes beneditinas. Bem-haja, Mestre amigo, por tudo!

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APG – Associação Portuguesa de Geólogos (2023) Dia da APG – 15ª Reunião Anual: Sessão de Homenagem póstuma a José Martins Carvalho. Associação Portuguesa de Geólogos, Lisboa. [[https://www.apgeologos.pt/images/Notcias/diadaapg2023-programa\\_final\\_s.pdf](https://www.apgeologos.pt/images/Notcias/diadaapg2023-programa_final_s.pdf)] (Acesso em maio de 2024)

APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (2017) Livro de Resumos do 11.º Seminário sobre Águas Subterrâneas. APRH, IAH-GP e Instituto Superior de Engenharia do Porto (Porto, 2 e 3 de março de 2017), Porto.

- Biswas AK, Tortajada C (2024) Groundwater: an unseen, overused and unappreciated resource. *Int J Water Res Develop* 40(1):1–6. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2292448>
- Braga B, Chartres C, Cosgrove WJ, Veiga da Cunha L, Gleick PH, Kabat P, Kadi MA, Loucks DP, Lundqvist J, Narain S, Xia J (2014) Water and the future of humanity: revising water security. Gulbenkian think tank on water and the future of humanity. Calouste Gulbenkian Foundation. Springer, Berlin
- Carvalho JM (1965) A prospeção popular da água. Instituto Mendes Correia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 27 pp. (Relatório manuscrito inédito, Licenciatura em Ciências Geológicas)
- Carvalho JM (1970) Reconhecimento hidrogeológico da Serra Mapé. Agrupamento de Engenharia de Moçambique, 6 pp. (+ esboço fotogeológico à escala 1/40.000)
- Carvalho JM (1971) Os amigos do caminho de ferro. *Boletim da C.P.* 510:20. [https://www.cp.pt/StaticFiles/Institucional/4\\_cultura\\_feroviaria/2\\_historia/2\\_boletim/70/1971/boletim510.pdf](https://www.cp.pt/StaticFiles/Institucional/4_cultura_feroviaria/2_historia/2_boletim/70/1971/boletim510.pdf) (Acesso em maio de 2024)
- Carvalho JM (1973) O dimensionamento de captações de águas subterrâneas. *Memórias do Instituto de Investigação Científica de Moçambique, Lourenço Marques*, 9 (Série B):145-176.
- Carvalho JM (1984) A metodologia de prospeção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofílicas portuguesas. In: Volume d’Hommage au Géologue G. Zbyszewski, Éditions Recherche sur les Civilisations, Paris. p. 137-153
- Carvalho JM (1990) O ensino da geologia e o geólogo europeu. *Geonovas Rev Assoc Portg Geol* 11:35-41
- Carvalho JM (1993) Recursos hidrotermais: o ponto de vista do geólogo. *Anais da Universidade de Évora*, 3:91-98
- Carvalho JM (1999) Águas subterrâneas e ordenamento do território. *Geonovas Rev Assoc Portg Geol* 13:5-9
- Carvalho JM (2001a) Perímetros de protecção a captações de águas subterrâneas para abastecimento público. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Ano XXI, 4(2):48-52
- Carvalho JM (2001b) As águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no Norte de Portugal. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Ano XXI, 4(1):4-18
- Carvalho JM (2002) Captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Edição I, p. 65-74
- Carvalho JM (2004) Former APG participation in the EFG activities: remembers some of the earliest days from a Portuguese perspective. In: Jones GLL, Hultquist G (eds) *A pictorial history of the European Federation of Geologists*. Published by European Federation of Geologists, Brussels, p. 7 [[https://igi.ie/assets/files/EFG%20docs/2004\\_Pictorial\\_History\\_EFG.pdf](https://igi.ie/assets/files/EFG%20docs/2004_Pictorial_History_EFG.pdf)] (Acesso em Maio de 2024)
- Carvalho JM (2006) *Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas*. Universidade de Aveiro, Aveiro. (Tese de Doutoramento). <http://hdl.handle.net/10773/5016>
- Carvalho JM (2012) José Martins Carvalho Curriculum Vitae – pedagógico, investigação, profissional e difusão. Relatório para o título académico de agregado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal (Relatório Inédito)
- Carvalho JM, Chaminé HI (2021) Over fifty years of hydrogeological practice and geoethics: an intergenerational view of a changing world. In: Abrunhosa M, Chambel A, Peppoloni S, Chaminé HI (eds) *Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development*. *Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development)*. Springer, Cham. p. 297-303. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59320-9\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59320-9_61)
- Carvalho JM, Paiva M, Carvalho R, Fonseca PE, Freitas L, Teixeira J, Chaminé HI (2024) Uma visão integrada dos recursos hídricos subterrâneos e dos recursos hidrogeológicos de Trás-os-Montes. In: Balsa C, Escudeiro M, Rodrigues O (eds.) *Recursos Hídricos e Geológicos de Trás-os-Montes*. Instituto Politécnico de Bragança Edições, Bragança, (in press)
- Chaminé HI (2015) Water resources meet sustainability: new trends in environmental hydrogeology and groundwater engineering. *Environ Eart Sci* 73(6):2513–2520. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3986-y>
- Chaminé HI (2024) ‘Water Is a Unique Resource: A Drop Can Save a Life, in War and Peace’: embracing the legacy of the hydrogeologist José Martins Carvalho (1943–2023). *Environ Eart Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11640-z>
- Chaminé HI, Carvalho JM (2015) Meeting sustainability and water resources: a dialogue about groundwater science and hydrogeology practice. *Environ Eart Sci* 73(6):2531–2542. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3969-z>
- Chaminé HI, Carvalho JM, Freitas L (2021). *Sustainable groundwater management in rural*

- communities in developed countries: some thoughts and outlook. *Med Geosc Rev* 3(3):389–398. <https://doi.org/10.1007/s42990-021-00064-7>
- Chaminé HI, Fernández-Rubio R, Simões Cortez JA, Oliveira Silva M, Custodio E, Llamas MR, Chambel A, Lydon JW, Fox RA, Jones GL, Cotelos Neiva JM, Gama Pereira LC, Borges FS, Oliveira R, Costa Pereira A, Gomes Coelho A, Baptista R, Nunes JC, Senos Matias M, Rocha F (2015) Hydrogeologist J. Martins Carvalho: professional, professor and gentleman. *Environ Earth Sci* 73(6):2521–2529. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3982-2>
- Chaminé HI, Lopes ME, Trigo JF, Dias Costa MJ (eds.) (2017) As minas de Tibães: um património hidrogeológico, geomineiro e de hidráulica monástica / The Tibães mines: a hydrogeological, geomining and monastic hydraulic heritage / Las minas de Tibães: un patrimonio hidrogeológico, geominero y de la hidráulica monástica / Les mines de Tibães: un héritage hydrogéologique, géominier et de hydraulique monastique. Coleção LABCARGA-GEO|3, Edição Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 15 p. + Anexo DVD-Rom.
- DiBiagio E, Flaate K (2000) Ralph B. Peck: engineer, educator – a man of judgement. Publications of the Norwegian Geotechnical Institute (NGI), N° 207, Oslo
- Eco U (2024) Entre a mentira e a ironia. Gradiva, Lisboa
- Fisher D (1969) Dating the spreading sea floor. *New Scientist* 44: 185-187.
- Green AH (1882) *Physical geology: part I*. Rivingtons Waterloo Place, London
- Kiersch GA (1998) Engineering geosciences and military operations. *Eng Geol* 49(2):123–176
- Kranz W (1938) *Technische Wehrgeologie: Wegweiser für Soldaten, Geologen, Techniker, Ärzte, Chemiker und andere Fachleute*. Dr Max Jänecke Verlagsbuchhandlung, Leipzig
- Mather JD, Rose EPF (2012) Military aspects of hydrogeology: an introduction and overview. In: Mather JD, Rose EPF (eds) *Military aspects of hydrogeology*, Geological Society, London, Special Publications, 362:1–17. <https://doi.org/10.1144/SP362.1>
- McHarg IL (1992) *Design with nature*. Wiley series in sustainable design, 25th ed. Wiley, New York
- Nery Delgado JF (1908) *Système silurique du Portugal : Étude de stratigraphie paléontologique*. Commission du Service Géologique du Portugal, Lisbonne
- Peppoloni S, Di Capua G (2022) *Geoethics: manifesto for an ethics of responsibility towards the Earth*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98044-3>
- Pereira de Sousa LPS (1902) Estudo geológico do polígono de Tancos. *Revista de Engenharia Militar*, pp. 112-123 e pp. 195-215
- Pereira I, Pereira S (2022) José Martins Carvalho: entrevista. *Associação Portuguesa de Geólogos, APG 365*, Lisboa. <https://www.apg365.pt/dezembro2022/> (Acesso em 1 maio de 2024)
- Read HH (1943) Meditations on granite: part one. *Proc Geol Assoc* 54(2):64-85. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(43\)80008-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(43)80008-0)
- Read HH (1944) Meditations on granite: part two. *Proc Geol Assoc* 55(2):45-93. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(44\)80006-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(44)80006-2)
- Santos Júnior JR (1932) As pinturas pré-históricas do Cachão da Rapa. *Trab Soc Port Antropol Etnog* 6(3):185-222
- Santos Júnior JR (1940) Arte rupestre. *Actas do Congresso do Mundo Português*, Lisboa, 1: 338-344
- Teixeira L (2014) *Abrigos com pinturas rupestres de Trás-os-Montes e Alto Douro: Pala Pinta, Penas Róias e Cachão da Rapa*. Lema d'Origem Editora, Carviçais
- Theroux P (2021) *A arte da viagem*. Terra Incognita, Quetzal, Lisboa
- Thomas M, Jefferson C (2019) Milestones, memories, and tributes: John William Lydon. *Geol Mag Geol Assoc Canada* 48(1):6–8
- UP – Universidade do Porto (1962) *Anuário da Universidade do Porto: Ano escolar de 1961-1962*. Volume 16. Universidade do Porto, Porto [<https://repositorio-tematico.up.pt/handle/10405/34285>] (acesso em dezembro de 2023)
- USACE – US Army Corps of Engineers (1944) *TM 5-296 Ground Water Supply for Military Operations*. U.S. Government print office, USA. 88 pp. (U408.3.A13 TM 5-296 Feb. 1944). [<http://www.loc.gov/rr/scitech/SciRefGuides/technicalmanuals.html>] (Acesso em maio de 2024).



# NORMAS PARA SUBMISSÃO DE ARTIGOS

Os autores interessados em publicar artigos científico-técnicos ou discussões de artigos anteriormente publicados na revista Recursos Hídricos deverão respeitar as seguintes normas:

1. O artigo, necessariamente original e preferencialmente redigido em Português, na forma impessoal, tem de ser entregue em suporte informático. O processador de texto a utilizar deverá ser o Word (Microsoft). São também aceites artigos redigidos em Inglês.
2. O título, o nome do(s) autor(es) e o texto do artigo (incluindo quadros e figuras) devem ser compostos e guardados num ficheiro único, devidamente identificado (por exemplo, artigo.doc). Tal ficheiro tem de conter a indicação, de forma clara, das zonas onde se pretendem inserir as figuras, desenhos ou fotografias. O texto do artigo deve ser corrido a uma coluna, com espaçamento normal e com a extensão máxima de quarenta mil caracteres (incluindo espaços).
3. O título do artigo tem de ser redigido em Português e em Inglês.
4. A seguir ao título deve ser indicado o nome do(s) autor(es) e um máximo de três referências aos seus graus académicos ou cargos profissionais, assim como o número de associado, caso seja membro da APRH.
5. O corpo do artigo tem de ser antecedido do resumo, redigido em Português e em Inglês (abstract). O resumo em qualquer um dos anteriores idiomas não deve exceder dois mil e quinhentos caracteres (incluindo espaços).
6. Os elementos gráficos (figuras, desenhos e fotografias) têm também de ser fornecidos separadamente em suporte informático, num único ficheiro ou em ficheiros individuais, mas sempre devidamente identificados (por exemplo, Figuras.doc, Figura1.jpg, etc.). Não existe qualquer restrição quanto à utilização de cor naqueles elementos.
7. As referências bibliográficas no corpo do texto devem ser feitas de acordo com a norma portuguesa NP-405 de 1996, indicando o nome do autor (sem iniciais) seguido do ano de publicação entre parêntesis. No caso de mais de uma referência relativa ao mesmo autor e ao mesmo ano, devem ser usados sufixos a), b), etc.
8. Os artigos devem terminar por uma lista de referências bibliográficas organizada por ordem alfabética do nome (apelido) do primeiro autor, seguido dos nomes dos outros autores, caso os haja, do título da obra, editor, local e ano de publicação (ou referência completa da revista em que foi publicada). De tal lista só podem constar as referências bibliográficas efectivamente citadas no corpo do texto.
9. Só serão aceites discussões de artigos publicados até dois meses após a publicação do número da revista onde esse artigo se insere. As discussões serão enviadas ao autor do artigo, o qual poderá responder sob a forma de réplica. Discussões e réplica, caso exista, serão, tanto quanto possível, publicados conjuntamente.
10. O título das discussões e da réplica por elas originada é o mesmo do artigo original acrescido da indicação Discussão ou Réplica. Seguidamente, deve constar o nome do autor da discussão ou da réplica de acordo com o indicado no ponto 4.
11. À publicação de discussões e de réplicas aplicam-se as normas antes explicitadas para a publicação de artigos
12. Os artigos e as discussões devem ser enviados por correio electrónico para o endereço da APRH (aprh@aprh.pt). O assunto desse correio electrónico deve elucidar sobre o respectivo conteúdo (por exemplo, submissão de artigo ou discussão de artigo). No corpo do correio, o autor ou os autores têm ainda de sugerir três revisores que considerem adequados, face ao teor científico técnico e ao idioma do respectivo artigo.

Secretariado da APRH  
A/c LNEC – Av. do Brasil, 101  
1700-066 Lisboa  
Portugal

