

Patrocinadores



Apoiantes



# 14.º SEMINÁRIO *sobre* ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

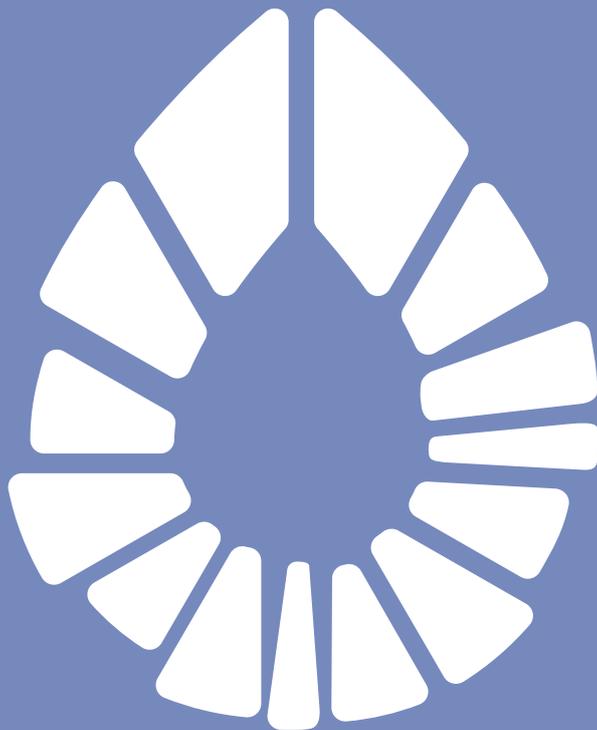
30 ANOS

*STATE OF THE ART*  
DO ESTADO DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS

**5 e 6 DEZEMBRO 2024**

**14.º SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS:**  
SAS 30 ANOS DE CONHECIMENTO, DISSEMINAÇÃO  
E RELAÇÕES INTERNACIONAIS, CONSTRUINDO A  
COMUNIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM  
PORTUGAL





14.º SEMINÁRIO *sobre*  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

30 ANOS

*STATE OF THE ART*  
DO ESTADO DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS

**5 e 6 DEZEMBRO 2024**

**14.º SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS:**  
SAS 30 ANOS DE CONHECIMENTO, DISSEMINAÇÃO  
E RELAÇÕES INTERNACIONAIS, CONSTRUINDO A  
COMUNIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM  
PORTUGAL

APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

**Título**

14.º Seminário sobre Águas Subterrâneas: SAS 30 anos de Conhecimento, Disseminação e Relações Internacionais, construindo a Comunidade das Águas Subterrâneas em Portugal

**ISBN**

978-989-8509-39-0

1ª Edição: Novembro de 2024

Email APRH: [aprh@aprh.pt](mailto:aprh@aprh.pt)



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## ÍNDICE

COMISSÕES .....	9
TEMAS.....	10
MENSAGEM DO PRESIDENTE DA COMISSÃO DIRETIVA DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS - APRH .....	11
MENSAGEM DO PRESIDENTE DA COMISSÃO ORGANIZADORA DO 14.º SAS – SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	13
MENSAGEM DO PRESIDENTE DA COMISSÃO CIENTÍFICA DO 14.º SAS – SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	15

### **A- ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS EM SITUAÇÕES DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS**

A IMPORTÂNCIA DOS AQUÍFEROS CÁRSICOS ENQUANTO RESERVATÓRIOS DE ÁGUA NUM CENÁRIO DE MUDANÇAS HIDROCLIMÁTICAS. O CASO DO AQUÍFERO DE SICÓ (POMBAL).....	19
Isabel Paiva, Ana Castilho	
ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, ESCASSEZ DE ÁGUA, QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA A AGRICULTURA NO SW ALENTEJANO: DESAFIOS PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	21
M. Teresa Condeso de Melo, João Nascimento, Vitor Cantarella, Alice Fialho, Miguel Prado	
AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA E GESTÃO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO NOS PERÍMETROS DE CAPTAÇÃO DE MOÇÂMEDES E OUTRAS CIDADES COSTEIRAS DO NAMIBE - ANGOLA.....	23
João Nascimento, Rodrigo Proença de Oliveira, Teresa Condeso de Melo, Joana Simões, Irina Miguel, Felisberto Queta, Miguel Alonso, José Saldanha Matos	
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS ORIGENS DESATIVADAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CONCELHO DE MAFRA .....	25
João Nascimento, Nuno Barreiras, João Ribeiro, Susana Reis	
COMBATE À ESCASSEZ DE ÁGUA CAPTADA PARA ABASTECIMENTO HUMANO NO CONCELHO DE SERNANCELHE .....	27
Sobral M., Salgado H., Caiado L.	
ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO DA ILHA DE MAIO (CABO VERDE): SUPORTE PARA UMA GESTÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA MAIS RESILIENTE ÀS ALTERAÇÕES GLOBAIS .....	29
Dillon Mungle, Dieke Postma, M. Teresa Condeso de Melo	
IMPACTOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: UM ESTUDO DE CASO DA MATA DE LEIRIA.....	31
Mariana La Pasta Cordeiro, Maria Teresa Condeso de Melo	



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## **B- SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA, GESTÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS, ARMAZENAMENTO E CAPTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

CONTRIBUIÇÃO DA HIDROLOGIA ISOTÓPICA ( $^2\text{H}$ E $^{18}\text{O}$ ) PARA O REFINAMENTO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DAS ÁGUAS MINERAIS NATURAIS DE RIBEIRINHO E FAZENDA DO ARCO [CASTELO DE VIDE].....	35
José M. Marques, Paula M. Carreira, António da Cunha Filipe, Manuel Antunes da Silva	
FLOOD AND DROUGHT MITIGATION USING STORMWATER ATTENUATION AND ENHANCED INFILTRATION SYSTEMS.....	37
Stephen Thomas and George French	
GESTÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS UTILIZANDO FONTES ALTERNATIVAS DE ÁGUA. O CASO DE ESTUDO DA COMPORTA NO ÂMBITO DO PROJETO MARCLAIMED .....	39
Teresa E. Leitão, Tiago N. Martins, Selçuk Oral, Margarida Rebelo, João Lutas Craveiro, Manuel M. Oliveira, Simone Pio, Nuno Correia, João Mimoso, João Maurício	
GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA REGIÃO DE MAGALHÃES - CHILE: CONSERVAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA.....	41
João Nascimento, Nuno Barreiras, Francisco Peixoto, Valentina Cárdenas, Paola Mateus, Patricio Pliscoff, Alejandro Aguado, Pablo Sanhueza, Manuel Contreras, Ulrike Broscheck	
REFLEXÕES SOBRE O ESTADO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS A NÍVEL GLOBAL .....	43
João Paulo Lobo-Ferreira	

## **E - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM OBRAS DE ENGENHARIA E AMBIENTE URBANO**

AFLUÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO TÚNEL DO PEGREGAL, ILHA DA MADEIRA ....	47
Susana Prada, J. Virgílio Cruz, Celso Figueira, Nuno Gouveia, Alexandra Reynolds, Nélia Sousa	

## **F- VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS; AQUÍFEROS COSTEIROS E INTRUSÃO SALINA; POLUIÇÃO E RECUPERAÇÃO DE AQUÍFEROS EM ÁREAS MINEIRAS**

A PEGADA GEOQUÍMICA DAS TERRAS RARAS (REE) NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (PORTUGAL) .....	51
Cláudia Costa, Orquídia Neves, M. Teresa Condesso de Melo	
IDENTIFICAÇÃO DE MECANISMOS DE MINERALIZAÇÃO COM RECURSO A TRAÇADORES AMBIENTAIS NUCLEARES.....	53
Paula M. Carreira, Luis R. Costa, Dina Nunes, José Paulo Monteiro	
ORIGEM E MOBILIDADE DO ARSÉNIO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA	



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

REGIÃO DE CHAVES.....	55
João Martins, Maria do Rosário Carvalho, Marina Paiva, Catarina Silva, Paulo E. Fonseca, Liliana Freitas, Hélder I. Chaminé	

## **G- MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO E DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

GROUNDWATER ENGINEERING: DESIGN & MODELLING .....	59
Stephen Thomas	

IMPACTS OF FOREST FIRES IN GROUNDWATER SYSTEMS: THE CASE STUDY OF ALVA WATERSHED (PORTUGAL) IN THE FRAMEWORK OF C2IMPRESS PROJECT .....	61
Manuel M. Oliveira, Teresa E. Leitão, Tiago N. Martins	

MODELAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E REJEIÇÃO DE ÁGUAS SALINAS EM AQUÍFEROS COSTEIROS.....	63
Joel Zeferino, Marina Paiva, Rita Carvalho, Maria do Rosário Carvalho, Manuela Simões	

NUMERICAL MODELLING OF THE COMPORTA CASE STUDY SITE TO SIMULATE THE IMPACT OF MANAGED AQUIFER RECHARGE IN THE SCOPE OF AGREEMAR PROJECT.....	65
Marcel Horovitz, Manuel M. Oliveira, Tiago N. Martins, Teresa E. Leitão	



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## COMISSÕES

### **COMISSÃO ORGANIZADORA**

Manuel Abunhosa (Presidente)

Carina Almeida

Jorge Cardoso Gonçalves

Teresa Leitão

### **COMISSÃO CIENTÍFICA**

João Paulo Lobo Ferreira (Presidente)

Anabela Cruces

António Chambel

Hélder I. Chaminé

João Lopo Mendonça

João Nascimento

Stephen Thomas

### **COMISSÃO DE HONRA**

João Lopo de Mendonça

José Manuel Marques

José Paulo Monteiro

Manuel Oliveira

Maria Manuela Simões

Maria Paula Mendes

Maria do Rosário Carvalho



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## TEMAS

### **A- ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS EM SITUAÇÕES DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS**

Planos de Gestão de Recursos Hídricos

Metodologias para integração das alterações climáticas em estudos hidrogeológicos

Hidrogeoética e avaliação de impacte ambiental

Avaliação da recarga e reservas subterrâneas em situações de alterações climáticas

### **B- SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA, GESTÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS, ARMAZENAMENTO E CAPTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

### **C- PROTEÇÃO DAS CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, ASPETOS CONSTRUTIVOS E DEFINIÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO, MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

### **D - TÉCNICAS DE PROSPEÇÃO, INTRUSIVAS E NÃO INTRUSIVAS**

### **E - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM OBRAS DE ENGENHARIA E AMBIENTE URBANO**

### **F- VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS; AQUÍFEROS COSTEIROS E INTRUSÃO SALINA; POLUIÇÃO E RECUPERAÇÃO DE AQUÍFEROS EM ÁREAS MINEIRAS**

### **G- MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO E DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Modelos de dados

Modelos open access



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



## MENSAGEM DO PRESIDENTE DA COMISSÃO DIRETIVA DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS - APRH

No lançamento do **14º SAS – Seminário de Águas Subterrâneas**, que marca os 30 anos desta reunião de especialistas, desafiei os Presidentes das Comissões Organizadora e Científica a desenharem um Seminário que culminasse com um “**Estado da Arte Prospetivo das Águas Subterrâneas em Portugal**”, com uma visão global, com uma componente internacional e com comunicações técnicas em temas da atualidade. O programa construído não só respondeu ao meu repto, como elevou as expectativas.

As conclusões do 14º SAS contribuirão para um trabalho global sobre os “**Recursos Hídricos em Portugal**”, a ser apresentado no 17º Congresso da Água (2025) organizado pela APRH.

Nesta mensagem de lançamento do 14º SAS, refiro uma componente que me parece fundamental na gestão das águas subterrâneas, à semelhança de outras áreas: conhecimento. É necessário medir para conhecer e conhecer para gerir. Não se gere o que não se conhece e não se conhece o que não se mede.

Por isso, realço a necessidade de reforçar o conhecimento, apostando na medição, na monitorização e no controlo, não considerando esta origem, à priori, apenas como uma reserva estratégica, e reforçando os instrumentos e mecanismos públicos de gestão.

Agradeço aos Membros das Comissões Organizadora, Científica e de Honra pelo trabalho efetuado neste e em Seminários anteriores, no cumprimento da missão da APRH e em prol da boa gestão dos recursos hídricos em Portugal, em particular das Águas Subterrâneas.

Lisboa – novembro de 2024,

**Jorge Cardoso Gonçalves**



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



## MENSAGEM DO PRESIDENTE DA COMISSÃO ORGANIZADORA DO 14.º SAS – SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

É com grande satisfação que, em nome da **Comissão Organizadora**, dou as boas-vindas a todos os participantes do **14.º Seminário sobre Águas Subterrâneas**. Celebramos trinta anos de um percurso notável, marcado pela dedicação de uma comunidade científica que se debruçou, de forma incansável, sobre os desafios e oportunidades que as águas subterrâneas nos apresentam.

Ao longo destas três décadas, iniciadas em **1983**, os sucessivos Seminários sobre Águas Subterrâneas constituíram uma cadeia de marcos identificadores da investigação das temáticas que foram motivando a **comunidade de Águas Subterrâneas** e dos desafios colocados à revelação e gestão deste recurso vital. O progresso do conhecimento dos nossos sistemas aquíferos e das suas amplas problemáticas passaram por aqui e podem encontrar-se nos seus registos escritos.

Em resultado da verificação de ampla convergência de propósitos essenciais, **desde 2017**, as duas associações científicas de referência dedicadas às águas subterrâneas em Portugal, a fundadora dos SAS, **CEAS – Comissão Especializada das Águas Subterrâneas da APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos** e o **AIH- GP - Grupo Português da Associação Internacional de Hidrogeólogos**, que circunstancialmente tenho a honra de presidir, concertaram-se para a organização conjunta dos SAS de que resultaram sinergias para toda a comunidade de águas subterrâneas em todas a suas valências, apoiadas nos ambiciosos objetivos colocados aos mais recentes e aos futuros SAS.

Neste 14.º SAS pretendemos não só celebrar estes extraordinários **trinta anos de história das Águas Subterrâneas em Portugal** ou centrados em Portugal, como também olhar para o futuro com otimismo, ambição e modernidade. Queremos fazer um balanço do estado da arte baseado nos progressos alcançados e nas dificuldades ainda não superadas, homenagear aqueles que ao longo dos anos dedicaram os seus esforços a esta causa e, acima de tudo, traçar um roteiro para os próximos 30 anos.

Apesar da água subterrânea constituir a cada momento **o mais vasto recurso de água doce líquida**, a sua natureza faz dela um recurso quase invisível e pouco compreendido, e a sua dinâmica no Ciclo da Água Modificado com que seja um recurso finito, incerto, de distribuição variada e variável, e cada vez mais pressionado em quantidade e qualidade. As alterações e incertezas climáticas que a condicionam, a crescente procura por água para abastecimento, usos agrícolas, industriais, energéticos, saúde e bem-estar e usos emergentes, a contaminação, a sobreexploração, as afetações pela expansão urbana, a interação com o meio geotécnico e a atividade mineira, a calamidade dos fogos cada vez mais extensos, a necessidade incompreendida de se intervir na reposição quantitativa e qualitativa do recurso, na manutenção dos essenciais serviços ecológicos, as necessidade de monitorização de última geração e da modelação computacional, e muito mais, são alguns dos desafios complexos que exigem a nossa atenção e dedicação para a obtenção de soluções inovadoras tendentes a uma gestão integrada e responsável dos recursos hídricos com



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

as águas subterrâneas. E para isso são indispensáveis mais profissionais qualificados, um sistema de ensino, investigação, desenvolvimento e inovação que os produza e qualifique, uma sociedade que os reconheça porque terá cada vez melhor literacia nestas matérias para que se torne mais consciente, participativa e exigente sobre o seu papel e sobre o papel orientador e regulador de uma **Administração eficaz e proativa** que monitorize, gira, defenda e proteja o recurso.

Neste contexto, este seminário surge como uma oportunidade única para apresentar os mais recentes **avanços científicos e tecnológicos** nas áreas de intervenção das águas subterrâneas, antes de mais em Portugal, para debater os mais recentes conhecimentos, as melhores práticas de gestão, para fortalecer a cooperação entre os diferentes atores envolvidos e **estabelecer canais de comunicação** entre todos os envolvidos.

Aos investigadores, aos profissionais do setor, aos decisores políticos e a todos os interessados nas questões da água, com ênfase sobre os estudantes e os jovens profissionais, apelo a que reconsiderem **a água subterrânea como foco de um novo paradigma das águas doces líquidas**, como propõe a **Hidrogeoética** que nasceu entre nós. Deixo um convite para participarem ativamente neste evento, replicando-o no futuro com renovados objetivos, atendendo a que o "...mundo é composto de mudança /Tomando sempre novas qualidades". Partilhem os vossos conhecimentos, as vossas dúvidas, as vossas experiências e as vossas ideias. Projetem-nas para um futuro mais justo, responsável e sustentável para, e com, as nossas comuns águas subterrâneas ao serviço da sociedade e do meio natural.

Quase a terminar, **em nome da Comissão Organizadora**, quero deixar uma palavra de reconhecimento aos patrocinadores privados e públicos e às entidades apoiantes, destacando a **IAH – International Association of Hydrogeologists** que pela primeira vez projeta internacionalmente o **14.º SAS**, e aos muitos colaboradores e contribuintes dedicados, nomeadamente os colegas da **CEAS** e do **AIH-GP**, da **Comissão Científica**, pelo seu **Presidente Dr. Eng. João Paulo C. Lobo Ferreira**, da **Comissão de Honra** do 14.º SAS e do **Secretariado** e serviços da **APRH** que muito contribuíram e contribuem para o sucesso dos SAS. Ao **Presidente da Comissão Diretiva da APRH, Eng. Jorge Cardoso Gonçalves** fica um agradecimento especial pela constante atenção, pelos desafios e incentivos, e pelas judiciosas contribuições.

Finalmente, há que justamente salientar que os SAS sempre beneficiaram ao longo dos 30 anos do generoso acolhimento de diversas entidades. A todas elas, e em particular à **Universidade Lusófona (Centro Universitário de Lisboa) que acolhe o 14.º SAS**, manifestamos um sincero agradecimento, através da **Prof. Carina Almeida**, fazendo votos que os SAS possam ter sido e ainda sejam uma motivação adicional para que as Águas Subterrâneas possam tomar um lugar nos seus objetivos institucionais ou ter um papel ainda mais destacado e distribuído.

A todos os participantes, com trabalhos apresentados ou não, a quem se destina em última instância o agradável esforço de uma vasta equipa coordenada, sejam Bem-Vindos ao 14.º SAS e levem as suas mensagens para o futuro!

Lisboa, novembro de 2024

**Manuel Abrunhosa**



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



## MENSAGEM DO PRESIDENTE DA COMISSÃO CIENTÍFICA DO 14.º SAS – SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Caros Amigos

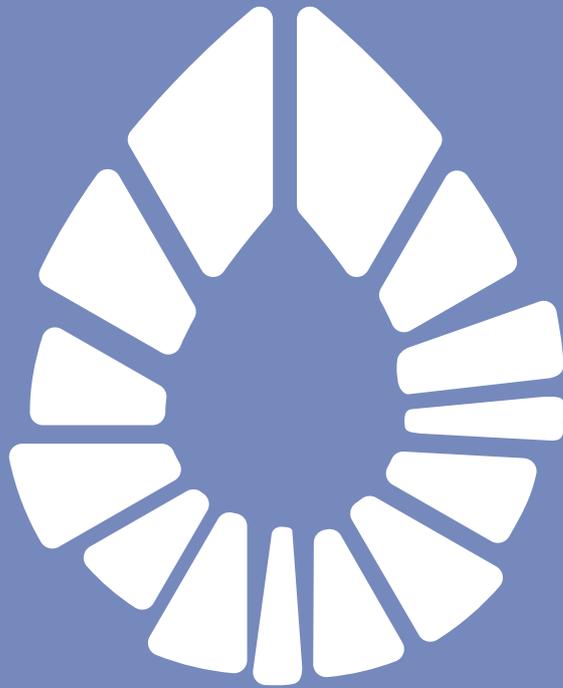
É com enorme honra e alegria que aceitei o convite do Presidente da APRH, Eng<sup>o</sup> Jorge Gonçalves, para presidir à Comissão Científica do 14º SAS. Nesta mensagem pretendemos, com a APRH e a AIH-GP, motivar a vossa participação proativa na celebração dos 30 anos do Seminário sobre Águas Subterrâneas. De facto, passaram já 30 anos desde a organização do 1º Seminário sobre Águas Subterrâneas pela APRH, organizado pela Comissão Especializada das Águas Subterrâneas, no LNEC em 20 e 21 de maio de 1993. Naturalmente que não foi por coincidência que tal ocorreu na vigência da Comissão Diretiva da APRH (1992-1994) que tive a honra de presidir. O nosso lema para o 14º SAS, de celebração, a meu ver pode ser “SAS 30 anos de Conhecimento, Disseminação e Relações Internacionais, construindo a Comunidade das Águas Subterrâneas em Portugal”. Com base no notável trabalho da CEAS prosseguimos, de 1996 a 2024, a organização dos seguintes treze SAS. Nesses SAS promoveu-se o intercâmbio de ideias e de experiências nos domínios das Águas Subterrâneas, discutindo como bem passar do conhecimento à prática, impulsionando a construção de respostas cientificamente baseadas. Há ainda muito a fazer no domínio das Águas Subterrâneas para adaptação do País às alterações climáticas, em termos de gestão do armazenamento em aquíferos. Gostaria de referir um recente artigo na Revista Florestas/Conhecer sobre a temática “*Há soluções de recarga artificial de águas subterrâneas para gerir bacias hidrográficas e sistemas aquíferos sob cenários de seca extrema em Portugal?*”. O convite que me foi dirigido surgiu na sequência da publicação pela Assembleia da República da Resolução n.º 86/2022, de 26 de dezembro, que recomenda ao Governo “...incentive a recarga artificial de aquíferos para reforço da eficiência hídrica”. Aplauda-se a Resolução, que constitui um marco histórico incentivador da aplicação da Gestão da Recarga de Aquíferos também em Portugal. É fundamental a criação de verdadeiras “contas poupança de água” pela utilização dos excedentes hídricos superficiais dos anos húmidos ou de situação de cheia, em armazenamento subterrâneo disponível em anos de seca, nomeadamente nos aquíferos do Algarve. Este será um dos temas em discussão no 14º SAS. São todos bem-vindos para participar, neste e noutros temas do 14º SAS, apresentando as vossas sugestões.

Lisboa - novembro de 2024

**João Paulo Lobo Ferreira**



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



14.º SEMINÁRIO *sobre*  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A- ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS  
QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS  
EM SITUAÇÕES DE ALTERAÇÕES  
CLIMÁTICAS





14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# A IMPORTÂNCIA DOS AQUÍFEROS CÁRSICOS ENQUANTO RESERVATÓRIOS DE ÁGUA NUM CENÁRIO DE MUDANÇAS HIDROCLIMÁTICAS. O CASO DO AQUÍFERO DE SICÓ (POMBAL)

Isabel Paiva<sup>1</sup>, Ana Castilho<sup>2</sup>

1. Universidade de Coimbra, CEGOT, Departamento de Geografia e Turismo da Universidade de Coimbra; Colégio S. Jerónimo, 3004-530 Coimbra; isabelrp@ci.uc.pt

2. Universidade de Coimbra, CGEO, Departamento de Ciências da Terra; Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra; amcastil@dct.uc.pt

## RESUMO

A elevada capacidade de armazenamento dos aquíferos cársicos incute-lhes uma crucial importância como fonte de água potável em muitas regiões no mundo. Em muitos países do Mediterrâneo, de clima seco e quente, os aquíferos cársicos constituem a maior fonte de abastecimento público de água. O conhecimento aprofundado da capacidade de armazenamento destes aquíferos e da sua hidrodinâmica assume particular importância, de modo a demonstrar a importância das águas subterrâneas de aquíferos cársicos enquanto recursos hídricos de elevada qualidade e quantidade. Em Portugal, no atual contexto de mudanças hidroclimáticas, com uma tendência consistente e generalizada de descida da precipitação (Portela *et al.*, 2020), as águas subterrâneas e, em particular as de aquíferos cársicos, constituem um recurso hídrico estratégico. O presente trabalho enquadra-se no seguimento de estudos anteriores (ex: Paiva, 2015; Paiva & Cunha, 2020) que vêm aprofundando o conhecimento da hidrodinâmica da parte setentrional do sistema aquífero Sicó-Alvaiázere (centro-oeste de Portugal) e foca-se na análise da sua função enquanto reservatório de água. Em termos metodológicos, procedeu-se à análise estatística das séries de precipitação em várias estações udométricas da região centro-litoral de Portugal, de 1950/1951 a 2022/2023 (SNIRH e IPMA) com recurso ao software XLStat (Statistical Software for Excel). Foram consideradas, após aplicação de testes de homogeneidade e consistência e do preenchimento dos dados em falta, as estações de Coimbra, Pombal, Soure, Penela e Rego da Murta. O cálculo da tendência foi efetuado por regressão linear e pelo teste não-paramétrico de Mann-Kendall (para um nível de significância de  $\alpha=0,05$ ). A magnitude da tendência foi medida pelo Sen's *slope*. No que se refere à hidrodinâmica do aquífero, foi considerado e analisado o caudal drenado pela principal exurgência do aquífero (Olhos d'Água do Anços – OAA) no período de 2009/2010-2021/2022, tendo por base as variáveis caudal, temperatura e condutividade elétrica (registo contínuo em sonda multiparamétrica). Os métodos utilizados foram: (i) a análise estatística de séries temporais (análise univariada e bivariada em software IBM SPSS 27); (ii) estudo das curvas de recessão sazonais através da sua decomposição pelo método de Magin (Paiva & Cunha, 2020); e (iii) análise do comportamento da condutividade elétrica e a temperatura da água dessa nascente.

O Maciço de Sicó, um dos principais sistemas carbonatados e carsificados da Orla Meso-Cenozóica Ocidental, é constituído essencialmente por calcários do Jurássico Médio com uma disposição monoclinal com fraca inclinação para oeste, onde se localizam as principais exurgências, que drenam cerca de 80% de toda a água que circula em profundidade. A recarga é totalmente autogénica e predominantemente difusa, sendo favorecida pelas características geomorfológicas da área, designadamente a sua planura, a ampla bacia morfo-estrutural que ocupa uma grande extensão de parte central da área de recarga e a existência de um vasto número de formas cársicas que promovem a infiltração. Em termos médios, a recarga ronda os 700 mm (cerca de 58% dos 1200 mm anuais de precipitação nesta área), embora possa variar substancialmente consoante os quantitativos de precipitação e decalca fielmente o ritmo da precipitação. O caudal anual médio dos OAA é de 1,37 m<sup>3</sup>/s, com valores diários médios superiores a 5 m<sup>3</sup>/s em águas altas e valores inferiores a 0,2 m<sup>3</sup>/s em período de estiagem.

O teste de Mann-Kendall e o Sen's *slope* para a precipitação anual revelam uma tendência de descida em todas as estações udométricas estudadas: Rego de Murta (-5,4 mm/ano); Pombal (-3,02 mm/ano), Soure (-2,55 mm/ano); Coimbra (-2,2 mm/ano); Penela (-1,4 mm/ano). A regressão linear evidenciou a mesma tendência negativa em todas as estações. Se considerarmos apenas a época



mais húmida (Novembro a Março), a tendência negativa é igualmente consistente (ex: Rego de Murta: -4,5 mm/ano; Coimbra: -2,3 mm/ano).

Na análise estatística do caudal diário dos OAA, a autocorrelação ( $r_k$ ) revelou um elevado efeito-memória do aquífero ( $r_k = 0$  só após 100 dias), com um esvaziamento paulatino. A densidade espectral mostra a importante regulação plurianual das reservas ( $S_f = 0,00277 = 360$  dias), o que confirma a enorme capacidade de armazenamento deste aquífero. Na correlação cruzada (precipitação-caudal), a descida gradual do correlograma após o pico confirma essa considerável capacidade de armazenamento. A função de coerência (*coherence function*) e a *phase function* corroboram esses resultados e indicam a predominância do fluxo de base (*baseflow*) no caudal da exurgência. Na análise da curva de recessão (em particular do setor de esgotamento, que não sofre qualquer interferência da recarga sendo, por isso, considerado como indicador das características internas do aquífero), o coeficiente de recessão  $\alpha$  é muito baixo ( $\alpha=0,005$ ). Este valor traduz o esvaziamento lento da zona saturada, que se prolonga por vários meses (cerca de 120 dias) e a elevada capacidade de armazenamento do aquífero. O volume de água drenado na fase de esgotamento (volume dinâmico segundo Mangin) é elevado, correspondendo a 67,5% do total da água escoada pelos OAA durante a recessão, o que significa o domínio do escoamento de base no caudal da exurgência. No mesmo sentido, se considerarmos a razão *baseflow*/caudal total  $\rightarrow 90$  (quando o *baseflow* constitui mais de 90% da água escoada), esta regista-se em 143 dias, representando 78% do total de dias da recessão. O predomínio do escoamento de base visível na análise da curva de recessão demonstra a existência de reservas consideráveis na zona saturada, as quais, salvo uma estiagem de duração excepcional ou uma seca hidrológica severa, garantem o carácter permanente dos OAA e das exurgências a jusante. Os valores elevados de  $k$  (parâmetro que, segundo Mangin, traduz a capacidade de armazenamento), em particular em anos muito secos ( $k = 0,54$ ) revelam a existência de consideráveis reservas (águas com tempos de residência superiores a meio ano) e mostram a grande capacidade de armazenamento da zona saturada. Os dados da temperatura da água dos OAA mostram uma significativa uniformidade (coeficiente de variação de apenas 1,7%), o que se explica pela eficiente troca de calor água-rocha, revelando um tempo de residência no aquífero relativamente longo para tal equilíbrio. O mesmo se pode concluir pela substancial mineralização da água (condutividade elétrica média de 533  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), sendo que mais de 72% dos valores diários são superiores a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , o que corrobora o tempo de permanência da água no aquífero e a elevada capacidade de armazenamento da zona saturada.

Os resultados obtidos revelam a enorme capacidade de armazenamento do aquífero, com uma prolongada interação água-rocha, evidenciando a relevância destes aquíferos enquanto recurso hídrico estratégico. Esta primordial característica dos aquíferos cársicos e do aquífero de Sicó, aqui em estudo, assume particular importância num contexto em que os quantitativos regionais de precipitação têm vindo a diminuir.

**Palavras-Chave:** aquífero cársico; hidrodinâmica; *baseflow*; Maciço de Sicó

## REFERÊNCIAS

- Paiva, I. (2015). Hidrossistema cársico Degracias-Sicó. Estudo do funcionamento hidrodinâmico a partir das suas respostas naturais. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra, 445 p.
- Paiva, I., & Cunha, L. (2020). Characterization of the hydrodynamic functioning of the Degracias-Sicó Karst Aquifer, Portugal. *Hydrogeology Journal*, 28(7), 2613-2629. doi: 10.1007/s10040-020-02201-2
- Portela, M.M., Espinosa, L.A., & Zelenakova, M. (2020). Long-term rainfall trends and their variability in mainland Portugal in the last 106 years. *Climate*, 8(146). doi:10.3390/cli8120146



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, ESCASSEZ DE ÁGUA, QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA A AGRICULTURA NO SW ALENTEJANO: DESAFIOS PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

M. Teresa Condesso de Melo<sup>1</sup>, João Nascimento<sup>2</sup>, Vitor Cantarella<sup>3</sup>, Alice Fialho<sup>4</sup>,  
Miguel Prado<sup>5</sup>

1. CERIS – IST ULisboa teresa.melo@tecnico.ulisboa.pt;

2. CERIS – IST ULisboa/ Waterways, Lda, Montijo, Portugal jnascimento@waterways.pt;

3. ADDA Consultoria, São Paulo, Brasil vcantarella@gmail.com;

4. APA. Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., Évora, Portugal alice.fialho@apambiente.pt;

5. Sousa Prado & Filhos, Agropecuária, Lda, Vila Nova de Mil Fontes, Portugal, Miguel Prado miguel.prado@spf-agrobusiness.com

## RESUMO

O sudoeste alentejano, em particular a região de Odemira, enfrenta uma crise hídrica cada vez mais acentuada, resultado das alterações climáticas e da intensa atividade agrícola. As pressões sobre os recursos hídricos superficiais com origem na sua grande maioria na Barragem de Santa Clara, combinadas com as características hidrogeológicas da região e com o aumento da imigração sazonal de trabalhadores agrícolas configuram um cenário de vulnerabilidade não só ambiental mas também social com impacto potencial na economia da região. Este resumo faz uma análise integradora destas variáveis e analisa as características hidrológicas, hidrogeológicas e geoquímicas da região, procurando promover a discussão sobre soluções mais sustentáveis e resilientes, que passam por melhorar o conhecimento hidrogeológico potenciando a gestão da recarga de água subterrânea, aumentando a monitorização, e contribuindo assim para uma melhor gestão integrada e governança dos recursos hídricos na região.

A maioria dos aproveitamentos hidroagrícolas existentes no Sul de Portugal foi construída entre 1950 e 1990, tendo uma precipitação média anual de 600 mm/ano como valor de referência, valor médio este que permaneceu estável durante décadas. No entanto, nos últimos 10 anos, observou-se uma redução de cerca de 30% na precipitação média no litoral Alentejano e Algarvio, registando-se valores de precipitação nunca observados desde 1930. Essa diminuição significativa da precipitação resultou numa redução de quase 60% do escoamento superficial para as principais albufeiras que abastecem os diversos sistemas agrícolas, colocando a maioria das regiões em déficit hídrico num curto intervalo de tempo. Com a agricultura a ser a maior consumidora de água na região, mas com menor prioridade relativamente ao abastecimento de água para consumo humano, o setor agrícola tem enfrentado restrições severas, aumentando o risco de destruição do tecido económico e da desertificação das áreas rurais. Urge, portanto, repensar esses aproveitamentos para tornar a região mais resiliente às alterações climáticas.

O Aproveitamento Hidroagrícola do Mira, em funcionamento desde 1970 e abastecido pela Albufeira de Santa Clara, é um caso emblemático. Abastece o Perímetro de Rega do Mira, com uma área total de 12 000 ha ao longo do litoral de Odemira e Aljezur, sendo fundamental para a economia regional e a balança comercial de Portugal, pois contribui com cerca de 15% das exportações nacionais de frutas, legumes e flores. Devido à redução da precipitação, o consumo de água agrícola no Mira passou de 35 hm<sup>3</sup>/ano em 2018-2020 para apenas 12 hm<sup>3</sup>/ano em 2023, uma queda de 66% em três anos. Essa redução ocorreu tanto por uma diminuição de 25% da área regada (de 7 000 para 5 300 ha) como por uma menor dotação média de água por hectare de terreno agrícola (de 5 000 para 2 250 m<sup>3</sup>). Para atingir uma média sustentável, estima-se que seriam necessários cerca de 3 500 m<sup>3</sup>/ha, o que implicaria um volume de 19 hm<sup>3</sup>/ano para os atuais 5 300 ha, ou 25 hm<sup>3</sup>/ano para os 7 000 ha.

Mesmo com a redução no consumo água para a abastecimento agrícola, a Albufeira de Santa Clara continua em déficit no balanço de água, com reservas de água apenas para cerca de mais três a quatro anos com os valores médios de precipitação atual. Soluções alternativas são, portanto,



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

urgentes. A redução das perdas de distribuição — que chegam a 40% no Mira — é uma prioridade, embora insuficiente para compensar o déficit atual e complexa de implementar devido à extensão da infraestrutura (170 km de canais e 420 km de condutas). Outras alternativas, como interligações com sistemas hídricos como o Alqueva ou a dessalinização, são soluções promissoras, porém com prazos longos requerem mais de 4-5 anos para a sua execução. Neste contexto, surge a possibilidade de um melhor aproveitamento das águas da chuva potenciando a sua infiltração e armazenamento no subsolo. Seria uma opção mais rápida e eficaz, ampliando a área efetiva da bacia que serve o Aproveitamento Hidroagrícola do Mira e a respetiva capacidade de armazenamento de água. Enquanto o armazenamento superficial é limitado pela orografia plana da região; o armazenamento subterrâneo surge como uma alternativa mais viável, exigindo estudos hidrogeológicos detalhados para avaliar o potencial de recarga e armazenamento dos aquíferos e o impacto das características geológicas no quimismo das águas subterrâneas. Na região, ocorrem formações arenosas com espessuras variáveis (10-30 m) com intercalações mais ou menos argilosas, sobre formações de xistos e xisto-grauvaques, com uma permeabilidade por fracturação que diminui em profundidade. Nestas formações circula muitas vezes água subterrânea com salinidade elevada devido ao facto de se terem formado em ambiente marinho há milhões de anos.

A gestão da recarga de aquíferos usando a água da chuva surge assim como uma alternativa promissora para enfrentar a escassez hídrica. Este método permite promover a infiltração da água da chuva no subsolo, proporcionando armazenamento subterrâneo, reduzindo as perdas de água ao mar e aumentando as reservas de água subterrânea. Em regiões com ciclos de seca frequentes e climas semi-áridos, a promoção da recarga subterrânea contribui para aumentar a disponibilidade de água para uso agrícola e abastecimento humano garantindo também as necessidades de água dos ecossistemas dependentes. No entanto, a promoção da recarga de aquíferos enfrenta desafios na região, quer do ponto de vista da quantidade devido à reduzida espessura das formações hidrogeológicas mais superficiais quer da qualidade da água devido à geologia, implicando estudos hidrogeológicos detalhados à escala regional e a implementação de redes de monitorização, que permitam gerar dados suficientes para depois serem tratados e otimizados com modelos matemáticos e ferramentas de IA.

O envolvimento dos agricultores e outras comunidades locais e a coordenação interinstitucional são fundamentais para o sucesso deste tipo de projetos de recarga de aquíferos. A participação ativa dos utilizadores dos recursos hídricos permite não apenas a aceitação das medidas, mas também contribui para a manutenção e mobilização de recursos. A governança inclusiva, com um sistema de monitorização em tempo real e planeamento detalhado, contribuirá para promover a sustentabilidade dos recursos hídricos e a adaptação às alterações climáticas.

Assim, para assegurar a sustentabilidade da agricultura e da sociedade no SW Alentejano e garantir a segurança hídrica, é crucial estudar e monitorizar detalhadamente os recursos hídricos subterrâneos e a sua relação com os recursos hídricos superficiais; implementar uma gestão integrada e adaptativa dos recursos hídricos face aos desafios das alterações climáticas; potenciar a infiltração da água da chuva promovendo a recarga de aquíferos; modernizar os sistemas de distribuição de água e implementar o uso de novas tecnologias de análise de dados (IA) quer ao nível da gestão dos recursos hídricos quer para otimização da rega. Este conjunto de ações deve ser complementado por uma participação comunitária robusta, visando equilibrar as necessidades agrícolas, a conservação ambiental e o bem-estar social.

**Palavras-Chave:** Recursos hídricos, SW Alentejo, Agricultura Sustentável, Gestão de Recarga de Aquíferos, Governança da água



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUBTERRÂNEA E GESTÃO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO NOS PERÍMETROS DE CAPTAÇÃO DE MOÇÂMEDES E OUTRAS CIDADES COSTEIRAS DO NAMIBE - ANGOLA

João Nascimento<sup>1</sup>, Rodrigo Proença de Oliveira<sup>2</sup>, Teresa Condesso de Melo<sup>3</sup>,  
Joana Simões<sup>4</sup>, Irina Miguel<sup>5</sup>, Felisberto Queta<sup>6</sup>, Miguel Alonso<sup>7</sup>,  
José Saldanha Matos<sup>8</sup>

1. CERIS – IST / Waterways, Lda, jnascimento@waterways.pt;

2. Ceris – IST / Bluefocus, rodrigopoliveira@tecnico.ulisboa.pt;

3. CERIS – IST, teresa.melo@tecnico.ulisboa.pt;

4. Bluefocus, jrs@bluefocus.pt;

5. Universidade Agostinho Neto, Faculdade de Ciências Naturais, Departamento de Geologia, ludkamiranda@gmail.com;

6. Universidade Agostinho Neto, Faculdade de Ciências Naturais, Departamento de Geologia, felqueta@gmail.com;

7. RECLIMA, Luanda, miguel.alonso@reclima.ao. 8. HIDRA, Lisboa, jsm.hidra@gmail.com;

## RESUMO

Todas as atividades socioeconómicas da região do Namibe dependem exclusivamente das águas subterrâneas. A vulnerabilidade climática da região, juntamente com a intensificação da captação de água para abastecimento público e para distribuição privada por autotanques, ameaça a segurança hídrica da região, onde, atualmente, se verifica um número crescente de pessoas afetadas pelas secas. Nesta área, um metro de rebaixamento pode inviabilizar a agricultura de subsistência, uma vez que a extração de água por estes utilizadores é feita por bombas de superfície com capacidade manométrica limitada.

No sentido de se promover a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na região do Namibe, surge o projeto “Avaliação da Disponibilidade Hídrica Subterrânea e Gestão do Risco de Salinização nos Perímetros de Captação de Moçâmedes e Outras Cidades Costeiras do Namibe”, financiado pelo Banco Mundial e Agência Francesa de Desenvolvimento e promovido pelo Ministério da Energia e Águas de Angola. A execução do projeto está a cargo de um consórcio liderado pela HIDRA e BLUEFOCUS.

A área de estudo centra-se nos aquíferos aluvionares da região, nomeadamente, aluviões dos rios Carunjamba, Bentiaba, Bero, Giraul, Curoca e aluviões de Camucuio.

A metodologia adotada pelo projeto é abrangente e interdisciplinar. Integra estudos climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos, incluindo geofísica, análises hidrogeoquímicas e isotópicas, monitorização *in situ* do nível piezométrico e parâmetros físico-químicos em contínuo, construção de piezómetros, elaboração de ensaios de bombagem, caracterização histórica das utilizações, modelação numérica do fluxo e transporte, culminando na elaboração de estratégias de gestão de riscos.

O projeto encontra-se em curso, tendo sido já realizados estudos preliminares que comprovaram a produtividade e significativa capacidade de armazenamento dos aquíferos. Verificou-se, no entanto, que os aquíferos suportados pelas aluviões não são a única origem de água subterrânea, ocorrendo importantes aquíferos em profundidade que, pela conexão direta com as aluviões, são também alvo de estudo do projeto.

As campanhas de monitorização e análises hidrogeoquímicas e isotópicas, permitiram uma compreensão aprofundada sobre os mecanismos de recarga e os fatores que influenciam a dinâmica hidrogeológica dos aquíferos. Uma das conclusões sugere que a recarga tem origem não só na infiltração sazonal no leito dos rios, mas também pela contribuição dos aquíferos profundos. Esta conclusão é particularmente relevante para a gestão dos aquíferos, nomeadamente, conhecer a resiliência à seca.

Foi ainda identificado o risco de salinização associado ao avanço da cunha salina e dissolução do



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

gesso das formações adjacentes às aluviões. As análises laboratoriais comprovaram que na maioria das origens a água é adequada para irrigação e abastecimento público, mas que em alguns pontos requer intervenções simples, como processos de desinfecção.

Dados preliminares para os valores de recarga, indicam valores entre os 3 hm<sup>3</sup>/ano no aquífero de Bentiaba e 17 hm<sup>3</sup>/ano no aquífero do Bero. Esta variação reflete a influência das condições geológicas e geomorfológicas locais específicas de cada aquífero.

As próximas tarefas incluem a realização de estudos geofísicos para caracterizar as formações aquíferas, nomeadamente a sua profundidade e a ocorrência de água salobra. Serão identificadas seis áreas para a construção de piezómetros no sentido de se caracterizar os aquíferos em profundidade e instalar sondas de registo contínuo de nível e condutividade elétrica para melhor caracterizar os processos de recarga. Os parâmetros hidráulicos serão caracterizados através de ensaios de bombagem.

Paralelamente, estão a ser desenvolvidos modelos numéricos em regime transitório para simulação passada e futura da evolução dos níveis e da salinidade da água subterrânea. Estes modelos permitirão prever o comportamento do aquífero em função de variáveis como alterações climáticas, cenários de exploração e mudanças no uso do solo. Com base nos resultados dos cenários simulados, serão propostas soluções práticas no sentido de mitigar os impactos negativos da sobreexploração e aumentar a resiliência às alterações climáticas, promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos.

Como resultado do projeto serão ainda identificados os locais mais favoráveis para a construção de novos furos para abastecimento público. O projeto prevê ainda a promoção de campanhas de sensibilização junto às comunidades locais, enfatizando a importância do uso responsável da água e a necessária proteção da qualidade.

Em síntese, os resultados obtidos até agora indicam que, embora os aquíferos da região apresentem potencial significativo para atender às necessidades da população, é essencial implementar medidas de gestão rigorosas dos recursos hídricos.

**Palavras-Chave:** Aquíferos do Namibe - Angola, Aquíferos aluvionares, Gestão da salinização, Sustentabilidade, Modelação de fluxo e transporte



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS ORIGENS DESATIVADAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CONCELHO DE MAFRA

João Nascimento<sup>1</sup>, Nuno Barreiras<sup>2</sup>, João Ribeiro<sup>3</sup>, Susana Reis<sup>4</sup>

1. CERIS – IS / Waterways, jnascimento@waterways.pt;

2. CERIS – IS / Water2You, nbarreiras@water2you.net;

3. SMAS Mafra, joao.ribeiro@smas-mafra.pt ; 4 SMAS Mafra susana.reis@smas-mafra.pt

## RESUMO

Historicamente, as águas subterrâneas desempenharam um papel central no abastecimento do concelho de Mafra. O aqueduto de Mafra, datado do século XVIII, é um exemplo de como as captações locais foram integradas para responder às necessidades da população. No século XX, a expansão populacional e o aumento das exigências de consumo impulsionaram a construção de novas captações, como os poços da Fonte Boa dos Nabos, Brejo e Fonte da Telha. Contudo, com o tempo, estas origens foram gradualmente substituídas por sistemas centralizados, particularmente após a integração do concelho nos sistemas de abastecimento da EPAL na década de 1980. Esta transição foi motivada por limitações de caudal das captações locais, pela qualidade da água de algumas origens e pela necessidade de atender a uma população em crescimento.

O estudo hidrogeológico desenvolvido no concelho de Mafra teve como objetivo principal avaliar o potencial para a recuperação de captações subterrâneas desativadas e identificar áreas de interesse para a construção de novas captações. Pretendeu-se desta forma, conhecer se estas origens históricas desativadas poderiam constituir-se como origens estratégicas em alturas de seca ou para fornecimento de água para fins diferentes do consumo humano. Neste último caso, contribuiria para uma redução da dependência de sistemas centralizados.

Do ponto de vista geológico, o concelho está inserido no setor central da Bacia Lusitaniana, uma unidade tectono-estratigráfica formada entre o Jurássico Superior e o Cretácico Inferior. Este setor caracteriza-se pela presença de formações sedimentares, incluindo calcários, margas, pelitos e arenitos, frequentemente controlados por falhas tectónicas. A compartimentação interna da bacia, reflete-se na distribuição espacial dos aquíferos e na sua variabilidade hidrogeológica. Entre as formações mais representativas no concelho de Mafra encontram-se as do Freixial, Ribamar e Ribeira de Ilhas, que cobrem cerca de 50% da área total.

A geomorfologia da região é influenciada pela litologia predominante, resultando em paisagens diversificadas. Destacam-se vales encaixados, relevos basálticos e declives acentuados, que moldam o escoamento superficial e subterrâneo. Os declives mais pronunciados estão associados às margens das principais linhas de água e às colinas basálticas no sudeste do concelho. Estes elementos geomorfológicos têm implicações diretas na recarga dos aquíferos e na distribuição espacial dos recursos hídricos subterrâneos.

No que se refere aos recursos hídricos subterrâneos, identificam-se duas massas de água subterrânea (MAS) no concelho de Mafra: a Orla Ocidental Indiferenciada da Bacia do Tejo e a Orla Ocidental Indiferenciada das Bacias das Ribeiras do Oeste. Estas massas são caracterizadas por aquíferos indiferenciados, onde a produtividade varia consideravelmente, dependendo da litologia local. A recarga principal ocorre pela infiltração direta da precipitação, com contributos adicionais de cursos de água superficiais e escoamentos laterais. Apesar de algumas limitações em termos de transmissividade, as formações calcárias demonstraram maior potencial produtivo, especialmente em áreas onde a fracturação é mais pronunciada.

A visita às origens de água desativadas do Concelho de Mafra, permitiu identificar sete onde se elaboraram estudos *in situ*: Poço 4, Poço 7 e furos TD1 e TD2 na Fonte da Telha e poços em Ribamar, Fonte Boa dos Nabos e Brejo. A escolha destes pontos teve por base 3 critérios: potencial de reabilitação, acessibilidade e a não utilização por outros utilizadores. Após a seleção dos pontos identificaram-se os trabalhos mais adequados para a sua caracterização.

Os ensaios *in situ* incluíram a medição manual do nível piezométrico em março e setembro de 2022, complementados com a instalação de sondas de registo contínuo nas sete origens para medição do nível com intervalos de 30 minutos (Poço do Brejo) ou uma hora (restantes origens) durante



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

o mês de setembro. A variação dos valores entre março e setembro, demonstrou a resiliência das origens, pois apesar da seca verificada neste período a variação do nível piezométrico não foi relevante, baixando um máximo de 1.2 m no Poço 4. O controlo automático dos níveis durante o mês de setembro permitiu conhecer a resposta dos aquíferos à precipitação ocorrida neste mês. O cálculo da recarga e da taxa de recarga permitiu comprovar que a água subterrânea na Fonte da Telha não tem apenas origem na precipitação direta, mas também na contribuição de água das formações adjacentes.

A elaboração de seis ensaios de bombagem do tipo escalonados permitiu conhecer o potencial de cada uma das seis origens estudadas. Os caudais pré-determinados tiveram como foco uma gestão dos níveis/caudais compatível com a utilização de bombas de superfície, não se pretendendo provocar rebaixamentos muito pronunciados. Os ensaios demonstraram o bom potencial de algumas das origens estudadas, determinando-se um caudal para exploração em contínuo. Os caudais máximos recomendados variaram entre 10 m<sup>3</sup>/h no furo TD2 e 30 m<sup>3</sup>/h no poço 4 na Fonte da Telha. Excluiu-se deste intervalo o Poço de Ribamar com uma capacidade de 1 m<sup>3</sup>/h.

Refira-se, no entanto, que o armazenamento dos poços poderá ser captado imediatamente independentemente do caudal de bombagem, variando a reposição dos níveis de poço para poço. Se a bomba a utilizar for de superfície, o que limita a profundidade máxima de captação a 7.5 m, os volumes armazenados nos poços em setembro de 2022 variaram entre 16 m<sup>3</sup> no Poço 7 (Fonte da Telha) e 58 m<sup>3</sup> no Poço do Brejo. Não estão incluídos neste intervalo o Poço de Ribamar e os furos TD1 e TD2.

A avaliação da qualidade da água através de análises laboratoriais mostrou que várias origens cumprem uma qualidade adequada para consumo humano, embora algumas necessitem de tratamento adicional para cumprir os padrões legais.

A análise espacial das origens licenciadas do tipo furo revelou uma forte concentração nas zonas de Sobral de Abelheira, Póvoa de Cima e Fonte Boa dos Nabos, que também apresentam os maiores volumes licenciados para extração. Verificou-se também a existência de um número considerável de furos com caudais inferiores a 1 L/s.

O estudo concluiu ainda que a recuperação de captações desativadas é uma alternativa viável para diversificar as origens de abastecimento e aumentar a resiliência hídrica no concelho de Mafra. No entanto, a sua exploração requer um planeamento estratégico que contemple a viabilidade técnica, económica e ambiental, assegurando a sustentabilidade a longo prazo.

**Palavras-Chave:** Gestão integrada de origens, Ensaios de bombagem, Origens de água tradicionais; Concelho de Mafra



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# COMBATE À ESCASSEZ DE ÁGUA CAPTADA PARA ABASTECIMENTO HUMANO NO CONCELHO DE SERNANCELHE

Sobral M.<sup>1</sup>, Salgado H.<sup>2</sup>, Caiado L.<sup>3</sup>

1. Maria Sousa Sobral, Técnica Superior – Geóloga, C. M. de Sernancelhe, R. Dr. Oliveira Serrão, 3640-240 Sernancelhe, maria.sobral@cm-sernancelhe.pt

2. Hugo Salgado, Técnico Superior – Eng.º Civil – C. M. de Sernancelhe, R. Dr. Oliveira Serrão, 3640-240 Sernancelhe, hugo.salgado@cm-sernancelhe.pt

3. Lurdes Caiado, Chefe de Divisão – Eng.ª Civil – C. M. de Sernancelhe, R. Dr. Oliveira Serrão, 3640-240 Sernancelhe, lurdes.caiado@cm-sernancelhe.pt

## RESUMO

Desde março de 2023 que a Divisão Técnica de Obras e Urbanismo da Câmara Municipal de Sernancelhe, se debruçou com maior interesse e atenção ao diferencial entre a água captada para abastecimento humano e aquela que é efetivamente faturada nestes Serviços. Com abastecimento em Alta e em Baixa, onde seria de esperar que esses diferenciais fossem diferentes, uma vez que o abastecimento em Alta levou a investimentos na rede relativamente recentes quando comparados com os da Baixa (com cerca de 40 anos ou mais), essa situação não é linear e nem se verifica. Como tal, existem aldeias com captação própria eficientes (com perdas na ordem dos 10%) e aldeias abastecidas em Alta com percentagens de perda muito elevadas, sendo o contrário também verdadeiro.

Posta esta análise inicial, pudemos concluir que ainda que o envelhecimento e grau de conservação da rede influencie a eficiência do sistema de abastecimento, as utilizações indevidas, os ramais abandonados, os cortes de ligação por tacho, o desconhecimento cadastral das redes mais antigas, e até algum nível de ilicitude, são os fatores que mais contribuem para as **perdas totais** (volume utilizado-volume faturado) que foram sendo quantificadas mensalmente em folhas de cálculo. Temos ainda e recorrentemente roturas em condutas, em ramais de ligação e por vezes fugas nas paredes ou pavimentos dos reservatórios mais antigos e extravasamento dos mesmos.

Apesar de ser o abastecimento em Alta aquele que mais pesa nos cofres do Município, também se tem verificado que é aquele em que os nossos esforços mais imediatos e diários menos influência têm, e portanto com 15 aldeias abastecidas com captação própria de água subterrânea; investimento realizado na aquisição de um Geofone para deteção de fugas e carros elétricos para acompanhamento diário da rede e das fugas ou roturas detetadas visualmente e comunicadas aos serviços; tivemos de progredir no sentido da aplicação de medidas concretas que conduzissem à **alteração das práticas relativas à gestão e utilização da água**, nomeadamente através do desenvolvimento de estratégias para uso eficiente da água (Almeida *et al.*, 2001).

Estamos portanto com a instalação completa de **contadores inteligentes** em toda a vila de Sernancelhe, que aumentou o grau de eficiência na medição caudalímetra, e logo a faturação. Com a instalação de **Zonas de Monitorização e Controlo** (ZMC's) em marcha acelerada, já conseguimos de forma diária perceber zonas de maior necessidade de acompanhamento e verificação, pois revelam caudais noturnos muito elevados, não se justificando a utilização dessa água durante esse período temporal. Este processo de avaliação diária desencadeia uma melhor organização de meios e ações no terreno, pois permite seccionar zonas para inspeção visual rápida ou utilização do Geofone.

As **perdas** são obtidas através da comparação entre o **volume de saída** dos reservatórios, agora já com caudalímetros digitais e data loggers para envio diário de blocos de dados, e a partir de determinados pontos do sistema, seccionando a rede, e o consumo autorizado ou recebido num ou mais pontos da mesma rede. Incorporando-se assim na **água não faturada** todas as perdas, sejam elas **reais** ou **aparentes**.

As principais razões que justificam a nossa implementação e desenvolvimento de estratégias de combate às perdas de água são (adap. Serranito, F. S. e Donnelly, A., 2015):

- A elevada pressão a que se encontra sujeito o recurso água em termos das captações subterrâneas;



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

- Evitar recorrer a situações de emergência, como abastecimentos pontuais de água para consumo humano, pela demora na recuperação do reservatório nos meses de verão;
- Evitar o comprometimento do abastecimento e dos controlos analíticos de ACH, bem como da legislação aplicável, em meses de seca;
- Redução dos riscos para a saúde e maior segurança do serviço de abastecimento;
- Maior eficiência na gestão, com diminuição de custos e investimentos de operação e de capitais;
- Redução do stresse hídrico e ecológico do território;
- Melhorias na medição e faturação;
- Diminuição de danos estruturais, normalmente colaterais às fugas ou roturas;
- Redução de carga e aporte ao saneamento;
- Melhoria da satisfação do munícipe, pela consequente melhoria da qualidade do serviço, da garantia de água na quantidade necessária, e pressão suficiente.

Esperamos num futuro próximo, e conforme se avolumam os dados recebidos das ZMC's, atuar no sentido da efetivação das razões enumeradas, como forma de num curto espaço de tempo darmos resposta aos problemas reais consequência das alterações climáticas, e que como Entidade Gestora muito nos preocupam.

De facto, a escassez de água é considerada em apenas algumas zonas do planeta, no entanto, a questão da sua qualidade é discutida na sua globalidade, urge que o seja também em quantidade (adap. Marques, 1999).

No atual contexto é fundamental uma consciencialização global, quiçá responsabilização, à semelhança do conceito "poluidor-pagador", de que os recursos hídricos são limitados e de vital necessidade de proteção e conservação, pois as consequências das alterações climáticas a que estamos sujeitos irá pressionar a disponibilidade em quantidade e qualidade deste recurso essencial à vida humana.

**Palavras-Chave:** água de abastecimento público; água subterrânea; perdas reais; perdas aparentes; geofone; alterações climáticas.

## BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

Almeida, M., *et al* (2001) – O uso eficiente da água em Portugal no sector urbano: Que medidas e que estratégias de implementação? Uma gestão para o Séc. XXI. Encontro Nacional das Entidades Gestoras, Lisboa.

Marques, R. (1999) - Avaliação e gestão de empreendimentos de abastecimento de água. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Serranito, F. S. e Donnelly, A. (eds), 2015 – Controlo Ativo de Perdas de Água. EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres S. A., Lisboa. 95 pp. ISBN 978-989-8490-02-5



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO DA ILHA DE MAIO (CABO VERDE): SUPORTE PARA UMA GESTÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA MAIS RESILIENTE ÀS ALTERAÇÕES GLOBAIS

Dillon Mungle<sup>1</sup>, Dieke Postma<sup>2</sup>, M. Teresa Condesso de Melo<sup>3</sup>

1. Erasmus Mundus Programme Groundwater and Global Change (IST ULisboa) dillon.mungle@gmail.com;

2. Emeritus GEUS Denmark dip@geus.dk;

3. CERIS – IST ULisboa teresa.melo@tecnico.ulisboa.pt

## RESUMO

Maio é uma pequena ilha vulcânica [269 km<sup>2</sup>] do arquipélago de Cabo Verde, com um clima muito árido e recursos hídricos limitados. A água subterrânea é essencial para a agricultura e segurança alimentar da ilha, onde os esforços de desenvolvimento sustentável visam reduzir a dependência de alimentos importados.

As ilhas vulcânicas enfrentam grandes desafios na gestão das águas subterrâneas. A complexidade da sua geologia, a heterogeneidade das suas características hidrogeológicas resulta em sistemas aquíferos compartimentados, constituídos por formações hidrogeológicas muito heterogêneas e com condutividades hidráulicas muito variáveis. As ilhas vulcânicas apresentam também riscos elevados do ponto de vista da qualidade das águas subterrâneas, uma vez que são vulneráveis tanto à intrusão salina da água do mar como à contaminação geogénica resultante da dissolução de minerais.

O estudo hidrogeológico da ilha do Maio combinando métodos para a estimativa da recarga de águas subterrâneas, avaliação da piezometria, estudo de logs de sondagens e informação geológica de campo, revela a existência de três formações hidrogeológicas principais com comportamento aquífero: as escoadas lávicas subaéreas, os conglomerados vulcânicos e o Complexo Intrusivo Central fraturado. É proposto um modelo conceptual hidrogeológico para descrever o papel de cada formação geológica no armazenamento e escoamento subterrâneo.

O estudo hidrogeoquímico combinando parâmetros de campo, concentrações de elementos maiores, menores e vestigiais, isótopos estáveis e índices de saturação mineral, revela características distintas entre as principais formações hidrogeológicas da ilha do Maio e valida o modelo hidrogeológico conceptual. As águas subterrâneas da ilha do Maio têm uma mineralização de fundo geoquímico relativamente elevada, que geralmente aumenta com a profundidade e a proximidade da costa. Uma parte do Complexo Intrusivo Central mostra uma salinização geogénica significativa, incluindo concentrações de sulfato invulgarmente elevadas. Muitas amostras excedem as diretrizes da OMS para água potável e apresentam um elevado risco de salinização do solo se forem utilizadas para irrigação.

Os resultados sugerem que os processos de mineralização das águas subterrâneas ocorrem em diferentes regiões e por diversas origens, incluindo a contribuição da água do mar, a dissolução de minerais carbonatados e minerais silicatados. A contribuição da água do mar é uma das principais fontes de mineralização, representando a maioria da mineralização em quatorze das vinte e uma amostras. Mas todas as amostras apresentam enriquecimento iónico além da contribuição da água do mar, indicando processos adicionais de mineralização em curso. A poluição antropogénica não é significativa devido à ausência de indústria e agricultura em larga escala, o que é evidente nas concentrações relativamente baixas de nitrato. Assim, a mineralização de origem geogénica é o principal fator além da contribuição da água do mar.

A dissolução de carbonatos parece ser comum em toda a ilha, enriquecendo as concentrações de cálcio, magnésio e bicarbonato. Os efeitos desse processo são mais visíveis nas amostras do Complexo de Base recolhidas no sul, onde muitas das formações carbonatadas e representativas do fundo do mar permanecem intactas. No entanto, a dissolução de carbonatos parece ter menor influência nas zonas de maior salinidade do Complexo Intrusivo Central, onde as amostras são muito mineralizadas.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Assim, a dissolução de carbonatos explica apenas uma parte da mineralização geogénica. A alteração de minerais silicatados também é significativa, como indicado pelas concentrações de sílica e respectivas relações iónicas. A dissolução de piroxena tem maior influência no Complexo Vulcânico Subaéreo e nos conglomerados de Pedro Vaz. Esses minerais enriquecem a água subterrânea com sódio, cálcio e, em menor grau, magnésio, além de introduzir concentrações relativamente altas de vanádio.

A oxidação de pirite tem também um impacto significativo na química da água subterrânea no Complexo Intrusivo Central, resultando num grande enriquecimento de sulfato. As concentrações de ferro também são elevadas, mas grande parte do ferro precipita em minerais secundários no ambiente oxidante. Esse processo reduz o pH da água subterrânea e liberta  $\text{CO}_2$ , o que aumenta a alteração de minerais silicatados, mais pronunciada do que em outras formações hidrogeológicas. A subsequente dissolução de essexito é observada pelo alto enriquecimento de sódio, cálcio e magnésio nas amostras. A mineralização resultante da dissolução de pirite e essexito gera salinidade geogénica significativa.

Na Ribeira da Lagoa, a bacia hidrográfica mais importante de Maio, todos esses processos atuam em diferentes regiões da bacia. A química das amostras do Complexo de Base a jusante reflete uma mistura da água subterrânea proveniente de cada uma dessas regiões.

Por fim, pode haver um mecanismo de troca catiónica que contribui para o enriquecimento de sódio e bicarbonato, especialmente em amostras com baixo enriquecimento de cálcio e magnésio, levando a águas do tipo  $\text{Na-HCO}_3$ . Este quimismo pode ser interpretado por dois mecanismos possíveis. O primeiro é a lixiviação por entrada de água doce da precipitação e que leva a que os iões cálcio substituam iões de sódio adsorvidos nos sedimentos, libertando sódio e desencadeando uma nova dissolução dos carbonatos quando as concentrações de cálcio diminuem. O segundo é a troca na superfície do vidro vulcânico, em que iões  $\text{H}^+$  substituem iões sódio adsorvidos ao vidro vulcânico, enriquecendo sódio e bicarbonato devido à dissociação do ácido carbónico.

As formações hidrogeológicas da ilha de Maio apresentam características geoquímicas únicas que oferecem suporte ao modelo conceitual hidrogeológico proposto. A baixa mineralização e a ausência de influências externas na química das amostras do Complexo Vulcânico Subaéreo demonstram o papel dessas formações como zona de recarga de águas subterrâneas. A semelhança de muitas amostras dos conglomerados de Pedro Vaz com as amostras da Formação Casas Velhas apoia a ideia de que essas formações se comportam como um único aquífero, influenciado por processos geoquímicos semelhantes. As amostras do Complexo Intrusivo Central diferem significativamente, dependendo se foram captadas em poços profundos no centro da ilha de Maio, onde existe uma salinização geogénica elevada.

A química das amostras do Complexo de Base reflete a mistura de águas subterrâneas de diferentes regiões, influenciadas por distintos processos geoquímicos. Essa região parece receber água subterrânea do Complexo Intrusivo Central, com salinidade elevada, mas é diluída por águas subterrâneas influenciadas pela dissolução de carbonatos e pela dissolução de minerais como a piroxena. Finalmente, a evidência de dissolução de minerais carbonatados em quase todas as amostras fora do Complexo Intrusivo Central demonstra a influência do fluxo de águas subterrâneas da parte central da ilha para o mar, através das formações carbonatadas do Complexo de Base que constituía o fundo do mar.

Na maioria das regiões costeiras, não há evidência de intrusão de água do mar, mas a vulnerabilidade mantém-se.

**Palavras-Chave:** aquíferos insulares, clima árido, hidrogeoquímica, mineralização, ilhas vulcânicas, Cabo Verde



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# IMPACTOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: UM ESTUDO DE CASO DA MATA DE LEIRIA

Mariana La Pasta Cordeiro<sup>1</sup>, Maria Teresa Condesso de Melo<sup>1</sup>

1. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal, mlapasta@tecnico.ulisboa.pt, teresa.melo@tecnico.ulisboa.pt

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar as consequências dos incêndios florestais na qualidade da água subterrânea do aquífero Viera de Leiria-Marinha Grande utilizando *baselines* obtidos em áreas ardida e não ardida. Os resultados preliminares mostram diferenças em alguns parâmetros de interesse incluindo Na, Cl, Fe, entre outros. A investigação ressalta a importância do estabelecimento de redes de monitorização em áreas ardidas para diminuir as incertezas relacionadas à esta análise, proporcionando melhor compreensão dos impactos destes eventos a curto, médio e longo prazo.

**Palavras-Chave:** águas subterrâneas; *baselines*; incêndios florestais; qualidade da água.

## INTRODUÇÃO

Os efeitos das alterações climáticas têm sido documentados em várias regiões do mundo. Em Portugal, as tendências climáticas indicam verões mais quentes e secos, acompanhados por um aumento no número e na severidade das ondas de calor e incêndios florestais. A Mata Nacional de Leiria é uma floresta única, plantada há mais de 800 anos para conter o avanço das dunas na região. No que diz respeito às águas subterrâneas, a floresta atua como uma importante zona de recarga do aquífero e, embora a região de Leiria seja essencialmente abastecida por água subterrânea, pouco se sabe sobre as consequências hidrológicas dos incêndios recorrentes que ocorrem na floresta, especialmente o ocorrido em outubro de 2017 que devastou cerca de 86% da floresta.

O cálculo dos valores de referência (*baselines*) é uma ferramenta que permite avaliar os padrões de qualidade da água em um determinado corpo hídrico considerando suas características específicas e detectar e avaliar os impactos da ocorrência de eventos que alteram a qualidade da água. Este estudo visa avaliar os impactos dos incêndios florestais na qualidade das águas subterrâneas do aquífero Viera de Leiria – Marinha Grande através do cálculo e comparação dos *baselines* nas áreas ardida e não ardida da Mata de Leiria.

## METODOLOGIA

Os *baselines* para o aquífero foram calculados a partir de amostras de água subterrânea recolhidas em abril de 2023, em 26 pontos (5 nascentes e 21 poços) distribuídos pela área de estudo, contemplando as áreas ardida e não ardida (Figura 1). As amostras passaram por um processo de pré-seleção para eliminar a influência de processos antropogênicos no cálculo dos *baselines*. Os critérios definidos para o processo de pré-seleção foram baseados na metodologia descrita por Hinsby *et al.* (2008) e encontram-se resumidos abaixo: (1) Amostras com balanço iônico incorreto (EN >10%), (2) Amostras de águas hidrotermais ou salobras ( $[Na^+] + [Cl^-] > 1000$  mg/L), (3) Amostras de um mesmo ponto devem ser convertidas para o valor da mediana da série de dados, (4) Amostras com  $[NO_3^-] > 10$  mg/L e (5) Se a série de dados contém amostras anaeróbicas ( $[O_2] < 1$  mg/L), a análise deverá ser feita separadamente para as amostras aeróbicas e anaeróbicas. Após a pré-seleção 7 amostras foram descartadas (W2, W25, W28, W30, W41, W52 e W56) e os *baselines* foram calculados considerando o percentil 97.7 para as restantes 19 amostras da série de dados utilizada (Müller *et al.*, 2006).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostram diferenças nos *baselines* observados nas áreas ardida e não ardida



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

da Mata de Leiria. Os parâmetros em que esta diferença é mais significativa são:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ . Relativamente aos iões menores (metais e metalóides), as concentrações totais dos elementos As, Al, Cu e Fe são os que apresentam maior diferença entre área ardida e não ardida, com os valores de referência da área ardida ligeiramente mais elevados (Figura 1). O enriquecimento em elementos como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , também pode estar relacionado à presença de formações geológicas salíferas em certas regiões da área de estudo.

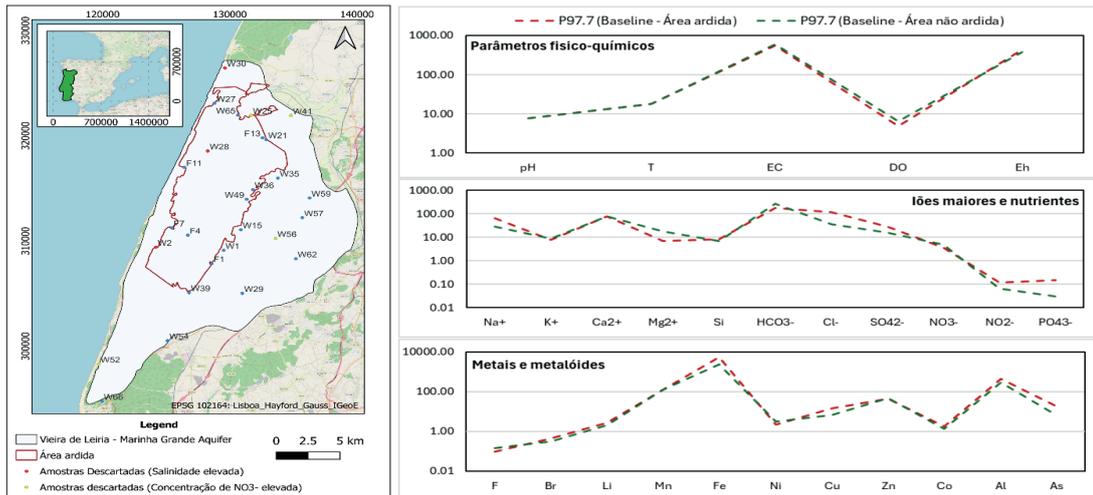


Figura 1- Rede de monitorização estabelecida no aquífero Vieira de Leiria-Marinha Grande e *Baselines* calculados para as águas subterrâneas nas áreas ardida e não ardida do aquífero.

## CONCLUSÕES

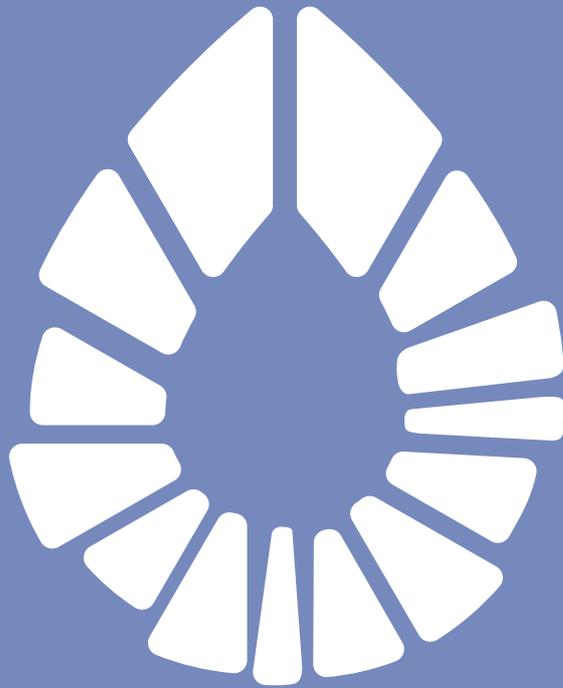
Apesar das estimativas dos valores de referência nas áreas ardida e não ardida do aquífero apresentarem diferenças significativas para alguns elementos químicos analisados, nomeadamente Na, Mg, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PO}_4$ , As, Al, Cu e Fe, a análise isolada dos impactos dos incêndios revela-se complexa, pois a heterogeneidade das características geológicas e pedológicas do meio influencia as interações água-rocha. Os resultados obtidos sublinham a necessidade de um monitorização mais rigoroso da qualidade da água em áreas ardidas, de modo a compreender os efeitos destes eventos a curto, médio e longo prazo. Isto permitirá promover uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos, garantindo o seu uso sustentável e aumentando a resiliência face a eventos extremos futuros.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento de uma bolsa de doutoramento (10.54499/2021.06868.BD) realizada na unidade de investigação Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS) (DOI: 10.54499/UIDB/04625/2020) do Instituto Superior Técnico.

## REFERÊNCIAS

- Hinsby, K., Condeso de Melo, M. T., & Dahl, M. [2008]. European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment*, 401(1-3), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.018>
- Müller D, Blum A, Hart A, Hookey J, Kunkel R, Scheidleder A, *et al.* [2006]. Final proposal of a methodology to set up groundwater threshold values in Europe. [www.wfd-bridge.net](http://www.wfd-bridge.net).



14.º SEMINÁRIO *sobre*  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

B- SOLUÇÕES BASEADAS NA  
NATUREZA, GESTÃO DA RECARGA  
DE AQUÍFEROS, ARMAZENAMENTO  
E CAPTAÇÃO DE ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS





14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# CONTRIBUIÇÃO DA HIDROLOGIA ISOTÓPICA ( $^2\text{H}$ E $^{18}\text{O}$ ) PARA O REFINAMENTO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DAS ÁGUAS MINERAIS NATURAIS DE RIBEIRINHO E FAZENDA DO ARCO (CASTELO DE VIDE)

José M. Marques<sup>1</sup>, Paula M. Carreira<sup>2</sup>, António da Cunha Filipe<sup>1</sup>,  
Manuel Antunes da Silva<sup>3</sup>

1. Centro de Recursos Naturais e Ambiente (CERENA), Departamento de Engenharia de Recursos Minerais e Energéticos (DER), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa, Portugal jose.marques@tecnico.ulisboa.pt

2. Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN), Departamento de Engenharia e Tecnologias Nucleares (DECN), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Estrada Nacional 10, ao km 139,7 2695-066 Bobadela LRS, Portugal carreira@c2tn.tecnico.ulisboa.pt

3. Super Bock Group, Apartado 1044, 4466-955 S. Mamede de Infesta, Portugal. Antunesda.Silva@superbockgroup.com

## RESUMO

No presente estudo apresenta-se nova contribuição para o refinamento do modelo hidrogeológico conceptual das águas minerais naturais da concessão Ribeirinho e Fazenda do Arco (Castelo de Vide - distrito de Portalegre) com base em dados recentes da composição isotópica (teores de  $^2\text{H}$  e de  $^{18}\text{O}$ ) destas águas minerais, exploradas pelo Super Bock Group e designadas por Água Vitalis. Procedeu-se igualmente ao tratamento de dados físico-químicos (2004 – 2024) destas águas minerais tendo em vista a sua interpretação conjunta com os dados isotópicos.

Um modelo hidrogeológico conceptual associado a um determinado sistema hidromineral deve ser essencialmente qualitativo e incluir uma descrição física do seu funcionamento, incluindo o foco principal e o conteúdo específico da investigação envolvida (Moore, 2002). Estes modelos consistem geralmente em mapas e/ou cortes geológicos esquemáticos mostrando a localização de potenciais áreas de recarga, sistemas de fluxo subterrâneo, principais processos de interação água-rocha em profundidade e locais de descarga (ex. Brassington, 2007; Marques *et al.*, 2024). Trata-se de uma temática que deverá ir sendo atualizada/modificada ao longo do tempo, de acordo com informações recentes (novas abordagens) que vão ficando disponíveis como resultado de trabalhos de campo e do uso de novas metodologias laboratoriais.

O NE Alentejano é dominado pela presença de rochas graníticas, ao longo de extensas planícies com altitudes entre os 300 e 400 m (Feio & Almeida, 2012). Na região de Castelo de Vide, no entanto, a paisagem é marcada por uma estrutura em sinclinal de onde sobressaem duas linhas de cumieira associadas às extensas cristas quartzíticas ordovícicas da Serra de São Mamede, com cerca de 40 km de comprimento e orientação NW-SE, chegando a atingir 1025 m de altitude no Pico de São Mamede (Monteiro & Silva, 1992). A geomorfologia particular desta região Alentejana influencia o clima local, contribuindo para a diminuição da temperatura, acréscimo da precipitação e menor evaporação, explicando a elevada quantidade de recursos hídricos subterrâneos desta região como resultado de uma infiltração eficaz mais elevada (Monteiro, 1993).

O núcleo do sinclinal de Castelo de Vide é formado por aluviões atuais, depósitos de vertente e de fundo de vale datados do Holocénico, envolvidos por uma camada de xistos do Silúrico Superior, ladeados por formações quartzíticas do Ordovício Inferior que contactam a SW com as arcoses (camada de base do sinclinal) e com os granitos tectonizados ante-hercínicos (Monteiro *et al.*, 1997). Os quartzitos apresentam-se fortemente fraturados facilitando o fluxo de água subterrânea (Fernandes *et al.*, 1973). Os furos de captação da Água Vitalis encontram-se nas cristas quartzíticas que, por apresentarem maior dureza e resistência superior à das rochas envolventes, são o resultado de erosão diferencial.

Ao contrário da composição físico-química destas águas, apenas foi realizada uma campanha de amostragem (em Outubro de 2023) para a sua caracterização isotópica ( $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$ ), com vista ao refinamento do modelo hidrogeológico conceptual das águas minerais naturais de Ribeirinho e Fazenda do Arco (Castelo de Vide). Os resultados isotópicos preliminares obtidos parecem indicar a não existência de continuidade de fluxo entre os dois blocos (NW e SE) das cristas quartzíticas, separados por uma falha de orientação local aproximadamente N-S. Esta hipótese é corroborada pelos valores isotópicos mais enriquecidos das águas do furo AC22 ( $^{18}\text{O} = -5,90$  per mil), localizado no bloco SE, comparativamente ao



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

valor isotópico médio das águas das restantes captações (Vitalis I, II, III, IV, V e VI) localizadas no bloco NW ( $^{18}\text{O}_{\text{médio}} = -6,30$  per mil). Relativamente às captações localizadas no bloco NW, a composição isotópica destas águas aponta para altitudes de recarga relativamente semelhantes (superiores a 600 m de altitude), tendo como referência os valores isotópicos das médias ponderadas da Estação Meteorológica de Portalegre (Carreira *et al.*, 2009). Deste modo, considerando a composição isotópica das águas do furo AC22 é possível apontar para uma altitude preferencial de recarga menor que no caso das águas das restantes captações.

A recarga das águas minerais naturais no bloco NW parece ter lugar ao longo de toda a crista quartzítica e com uma tendência de fluxo de SE para NW, conforme anteriormente proposto por Morais Almeida *et al.* (2019) e corroborado pelo aumento da condutividade eléctrica destas águas de SE para NW (SE-Vitalis II: 48,3 microS/cm; NW-Vitalis VI: 60,1 microS/cm). No caso das águas do furo AC22, localizado no bloco SE, registaram-se valores menores de condutividade eléctrica (AC22: 45,6 microS/cm) indicando um fluxo subterrâneo relativamente curto, o que nos leva a considerar a hipótese de o sentido de fluxo ser de NW para SE, isto é, no sentido oposto ao das águas minerais naturais do bloco NW.

Importa referir o facto de estarmos a caracterizar águas hipossalinas de muito baixa mineralização (valor médio de condutividade eléctrica = 55,6 microS/cm) onde qualquer oscilação nos valores físico-químicos deverá suscitar a nossa atenção. Está prevista a realização de futuras campanhas para recolha de dados isotópicos, tendo em vista aprofundar o conhecimento acerca da altitude preferencial de recarga, dos fluxos de circulação subterrânea e da idade aparente das águas minerais naturais hipossalinas de Ribeirinho e Fazenda do Arco (Castelo de Vide).

**Palavras-Chave:** águas minerais naturais hipossalinas; formações quartzíticas; isótopos ambientais estáveis; refinamento do modelo conceptual de circulação

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo Super Bock, S.A. pelos dados disponibilizados e toda a logística associada à campanha de 2023. J.M. Marques reconhece o apoio da FCT através do projecto UIDB/04028/2020 for CERENA/IST e P.M. Carreira reconhece o apoio da FCT através do projecto UIDB/04349/2020 for C<sup>2</sup>TN/IST;

## BIBLIOGRAFIA

- Brassington, F.C. (2007) A proposed conceptual model for the genesis of the Derbyshire thermal springs. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 40:35-46
- Carreira, P.M., Nunes, D., Valério P., Araújo, M.F. (2009) A 15-year record of seasonal variation in the isotopic composition of precipitation water over continental Portugal. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 281: 153-156.
- Feio, M., Almeida, G. (2012) A Serra de S. Mamede. *Finisterra*, 15 DOI:10.18055/Finis2213
- Fernandes, A.P., Perdigão, J.C., Carvalho, H.F., Peres, A.M. (1973) Notícia Explicativa da Folha 28 D - Castelo de Vide, Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50000. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa.
- Marques, J.M., Carreira, P.M., Caçador, P., Antunes da Silva, M. (2024) Update of the Interpretive Conceptual Model of Ladeira de Évendos Hyposaline Hydromineral System (Central Portugal): A Contribution to Its Sustainable Use. *Sustainability*, 16: 5179 <https://doi.org/10.3390/su16125179>
- Monteiro, J.P. (1993) Hidrogeologia da Formação Carbonatada de Escusa (Castelo de Vide). Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia, Lisboa.
- Monteiro, J.P. Silva, M.L. (1992) Aspectos de Hidrogeologia e Qualidade das Águas Associadas à Formação Carbonatada de Escusa (Castelo de Vide). *Geolis*, Vol. V1, Fasc.1 e 2: 19-32
- Monteiro, J.P., Silva, M.L., Carreira, P.M., Soares, A.M. (1997) Aplicação de Métodos Geoquímicos Isotópicos à Interpretação da Hidrodinâmica do Aquífero Carbonatado da Serra de S. Mamede (Castelo de Vide). In: *VII Congresso de Espanha de Geoquímica*, Ed. Cedex, pp. 544-551
- Moore, J.E. (2002) *Field hydrogeology: a guide for site investigations and report preparation*. Lewis Publishers, New York
- Morais Almeida, A., Dias, D., Almeida, M., Marques, J.M., Antunes da Silva, M. (2019) Contribuição para o desenvolvimento do modelo conceptual de circulação da Água Mineral Natural de Castelo de Vide. *Livro de Actas do 12º Seminário sobre Águas Subterrâneas*, Coimbra, 7 e 8 de março de 2019, pp. 18-21



# FLOOD AND DROUGHT MITIGATION USING STORMWATER ATTENUATION AND ENHANCED INFILTRATION SYSTEMS

Stephen Thomas and George French

OGI Groundwater Specialists, City of Durham, UK.

## RESUMO

Stormwater Attenuation and Enhanced Infiltration Systems (SAEIS) enables collection, attenuation and infiltration of stormwater back to the ground, thus mitigating surface flooding. The following describes how this innovative attenuation and vertical infiltration system functions in practice, and then demonstrates by mathematical modelling how water flows through the system and infiltrates water into the soil at a far greater rate than can be achieved using a conventional soakaway system. Vertical infiltrators often encounter anisotropic ground strata where the horizontal permeability is much greater than the vertical permeability. Stormwater Attenuation and Enhanced Infiltration Systems have been used for many years in the United Kingdom to mitigate flooding and erosion, and to provide recharge to groundwater resources. With groundwater resources similarly in decline in Portugal, together with more frequent flooding conditions during intense rainfall, these collection and enhanced infiltration systems could also be most beneficial to the hydrogeology and weather conditions of Portugal. Using this system, stormwater infiltrating into the vadose zone eventually finds its way down to the water table, so mitigate drought conditions by supplementing the aquifer water resources.

With more of the UK being covered with urban developments, roads and industrial parks, the available open land to enable natural infiltration to the ground is receding (Charlesworth and Booth, 2016). As a consequence, this affects the ability of the ground surface to absorb rainfall and so mitigate storm flooding. Furthermore, over time this means less water is being recharged back into the ground and the major aquifers. As a consequence, the UK Government has enforced where possible the need for a developer to construct a Sustainable Drainage System (SuDS) to mitigate peak flooding that occurs from rapid runoff from hard impermeable surfaces such as roofs, roads, car parks or other paved areas (Fletcher *et al.*, 2015). In 2010, the UK Government published Building Regulations with Part H (Building Regulations, 2015).

These UK building regulations guidance clearly state that the priority is to discharge collected groundwater to an adequate soakaway or some other adequate infiltration system, and not to stormwater or foul sewer. In response to these regulations, Stormwater Attenuation and Enhanced Infiltration Systems (SAEIS) have been developed to provide an efficient method to collect, attenuate and infiltrate stored water into soils of variable permeability at depth. This systems have been designed to infiltrate water at greater depths (typically in the range of 3 m to 12 m deep) than conventional soakaways, which means these systems are more suitable in areas where low permeability anisotropic soils such as laminated sandy and silty clays are more prominent (Jarvis *et al.*, 1984).

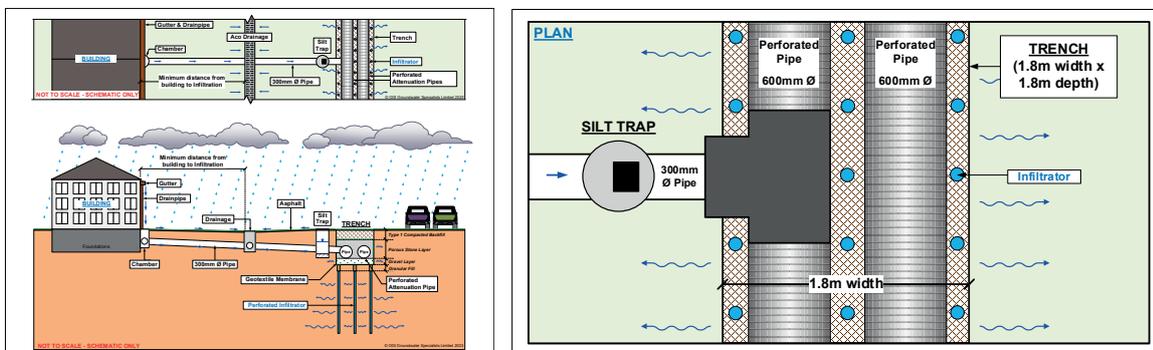


Figure 1. Attenuation and Enhanced Infiltration system.

By channelling and capturing stormwater into void rich trenches, comprising slotted pipes combined with a gravel surround, enables infiltration via vertical devices at depth into laminated silt or sand lenses within clay soils.



These enhanced infiltration systems mitigate local surface water flooding by reducing storm flow of water to watercourses and sewers. This in turn helps to lower the peak water levels in local rivers following storm events.

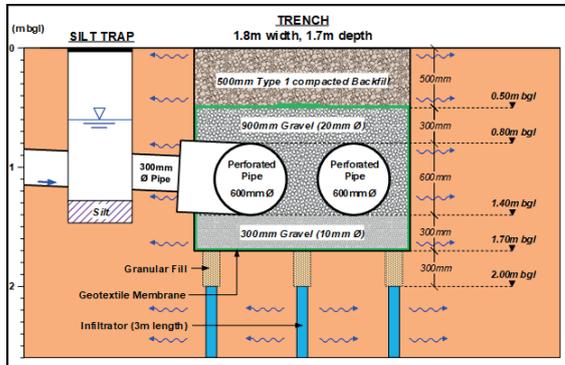


Figure 2. Detail of attenuation trenches and infiltrators.



Figure 3. Perforated pipes within attenuation trenches.

Each trench normally contains one or two large diameter perforated pipes, designed to provide a high storage volume to attenuate collected rainwater following a storm event. The trench is backfilled around the perforated pipes with gravel or angular stone. Gravel or stone is then backfilled around the pipes and typically to 300 mm above the crown of the pipes. Surrounding this gravel & pipe attenuation structure is a specialist nonwoven green geotextile developed to promote the growth of a microbic biofilm to absorb and digest any hydrocarbon.

The movement of the collected stormwater through the infiltrators into the ground has been modelled by French and Thomas (Authors) using the GeoStudio finite element software SEEP/W (Geostudio, 2012) with equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{rw} K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \left( S_w S_s + \phi \frac{\partial S_w}{\partial \psi} \right) \frac{\partial h}{\partial t} - Q_w$$

where  $k_{rw}$  is relative permeability,  $K_{ij}$  is Hydraulic Conductivity Tensor,  $h$  is hydraulic head,  $\phi$  is porosity,  $S_w$  is water saturation,  $S_s$  is Specific Storage,  $\psi$  is pressure head, and  $Q_w$  is a point water source

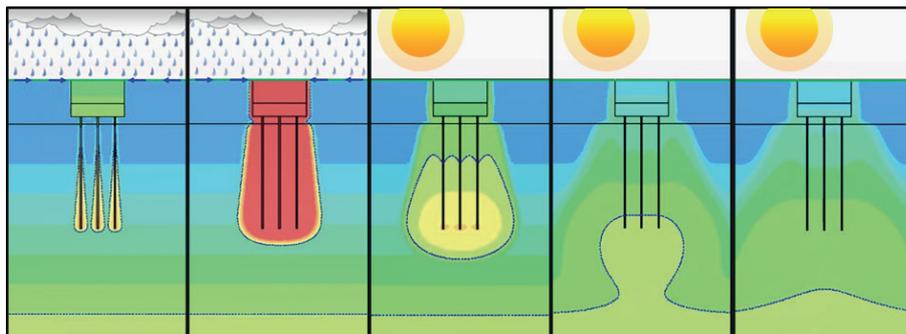


Figure 4: Stages of attenuation and enhanced infiltration during and following a storm event.

Building Regulations. (2015). "Part H - Drainage and Waste Disposal (2015 Edition)." Planning Portal.

Charlesworth, S M., Booth C. A. (2016). *Sustainable Surface Water Management*. Edited by Susanne M. Charlesworth and Colin A. Booth. *Sustainable Surface Water Management: A Handbook for SuDS*. Wiley. New Jersey. USA. <http://doi.org/10.1002/9781118897690>

Fletcher, T D., Shuster W, Hunt W F., Ashley R, Butler D, Arthur S, Trowsdale S, *et al* (2015). "SuDS, LID, BMPs, WSUD and More – The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage." *Urban Water Journal* 12 (7): 525–42. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

GeoStudio. (2012) 'Seepage Modelling with SEEP/W: An engineering methodology (July 2012 Edition).

Jarvis, R. A, Bendelow V. C, R. Bradley I, Carroll, D. M, Furness, R. R, Kilgour, I. N. L, and. King S. J. (1984). *Soils and Their Use in Northern England*. Soils and Their Use in Northern England. Rothamsted Research.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# GESTÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS UTILIZANDO FONTES ALTERNATIVAS DE ÁGUA. O CASO DE ESTUDO DA COMPORTA NO ÂMBITO DO PROJETO MARCLAIMED

Teresa E. Leitão<sup>1</sup>, Tiago N. Martins<sup>1</sup>, Selçuk Oral<sup>1</sup>, Margarida Rebelo<sup>1</sup>, João Lutas Craveiro<sup>1</sup>, Manuel M. Oliveira<sup>1</sup>, Simone Pio<sup>2</sup>, Nuno Correia<sup>2</sup>, João Mimoso<sup>2</sup>, João Maurício<sup>2</sup>

1 Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. Email: [tleitao@lnec.pt](mailto:tleitao@lnec.pt), [tmartins@lnec.pt](mailto:tmartins@lnec.pt), [soral@lnec.pt](mailto:soral@lnec.pt), [mrebelo@lnec.pt](mailto:mrebelo@lnec.pt), [jcraveiro@lnec.pt](mailto:jcraveiro@lnec.pt), [moliveira@lnec.pt](mailto:moliveira@lnec.pt)

2. Águas Públicas do Alentejo, Rua Dr. Aresta Branco 51, 7800-310 Beja, [simone.pio@adp.pt](mailto:simone.pio@adp.pt), [n.correia@adp.pt](mailto:n.correia@adp.pt), [j.mimoso@adp.pt](mailto:j.mimoso@adp.pt), [j.mauricio@adp.pt](mailto:j.mauricio@adp.pt)

## RESUMO

Neste artigo apresenta-se o projeto MARCLAIMED (<https://marclaimed.eu/>), o caso de estudo na Comporta e as principais ações em curso, bem como os resultados esperados no âmbito do projeto.

O projeto MARCLAIMED visa promover a integração da gestão da recarga de aquíferos (Managed Aquifer Recharge, MAR), utilizando fontes alternativas de água (Alternative Water Resources, AWR), no planeamento e na gestão de bacias hidrográficas, aumentando a disponibilidade de águas subterrâneas e apoiando a adaptação e resiliência dos sistemas estruturais de abastecimento no contexto das alterações climáticas.

O projeto MARCLAIMED assenta em três pilares principais: **1) eficiência operacional**, onde o desempenho operacional dos sistemas é avaliado através de três ferramentas baseadas em inteligência artificial para: i) monitorizar e controlar a qualidade da AWR e dos meios recetores, ii) prever a disponibilidade de recursos hídricos e iii) fornecer indicadores de riscos para a saúde, ambientais e de desempenho; **2) sustentabilidade económica**, monitorizada através de: i) indicador de escassez de água, por meio de uma ferramenta de pegada hídrica à escala municipal facilitando decisões sobre governança hídrica, ii) segurança hídrica e o valor económico de MAR com AWR através de uma ferramenta de cálculo de seguros, e iii) um sistema baseado na recuperação de custos; e **3) aceitação social** através de: i) implantação de ações sociais para fortalecer o envolvimento dos decisores políticos nacionais e da UE em colaboração com uma Comunidade de Prática (CoP), e ii) definição de orientações europeias de MAR para promover recomendações políticas e impulsionar o respetivo quadro regulamentar. Para garantir a fiabilidade, aceitação e confiança em sistemas MAR com AWR está a ser construída uma Ferramenta Integrada de Suporte à Decisão (IDST) de ponta e interoperável, integrando as ferramentas dos pilares 1 e 2 e com base no feedback do pilar 3, que fornecerá soluções para enfrentar as ameaças existentes e emergentes e apoiar a tomada de decisões e as políticas de adaptação.

A Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) da Comporta foi selecionada como caso de demonstração português, sendo o LNEC e a AgdA - Águas Públicas do Alentejo os responsáveis pela implementação e validação das ferramentas de apoio à decisão produzidas no âmbito do projeto, bem como pela otimização do desempenho e da monitorização das áreas experimentais, tendo em vista a aumentar o potencial de replicação do sistema.

A ETAR da Comporta (Fig. 1) é o 1.º exemplo de um sistema MAR em funcionamento em Portugal, encontrando-se em operação desde 1 de outubro de 2021. A ETAR está equipada com um tratamento tecnologicamente avançado, incluindo tratamento primário, biológico e desinfecção adicional para produzir água para reutilização e tratamento de lamas por desidratação. O sistema MAR é composto por quatro bacias de infiltração e apresenta-se como uma alternativa à habitual descarga de efluentes tratados em massas de água superficiais, decorrente do facto da região se inserir no Ecossistema Estuarino do Sado, zona sensível classificada como Reserva Natural. Estando numa Reserva Natural sensível, todas as atividades potencialmente contaminantes devem respeitar a sua proteção para minimizar os eventuais impactes e proporcionar benefícios para o ambiente e para a população existente. O local situa-se sobre o aquífero Tejo-Sado Margem Esquerda, a mais importante reserva aquífera da Península Ibérica, que também importa preservar, cuja composição litológica no local é essencialmente de areias. Para além do turismo, também associado a um novo campo de golfe, as



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

principais atividades na região são a produção de arroz, juntamente com outras culturas, e a pesca. Esta é uma área de baixa densidade populacional que, no entanto, quintuplica a sua população no período estival. Os volumes de recarga variam entre 110 e 190 m<sup>3</sup>/d.

O projeto MARCLAIMED visa obter informação detalhada sobre os processos de tratamento em curso, incluindo novas soluções experimentais, na efetiva melhoria da qualidade da água infiltrada, para melhorar a aceitação pública/social dos sistemas MAR, enquanto ajuda a proteger áreas naturais sensíveis proporcionando benefícios para as atividades económicas locais.

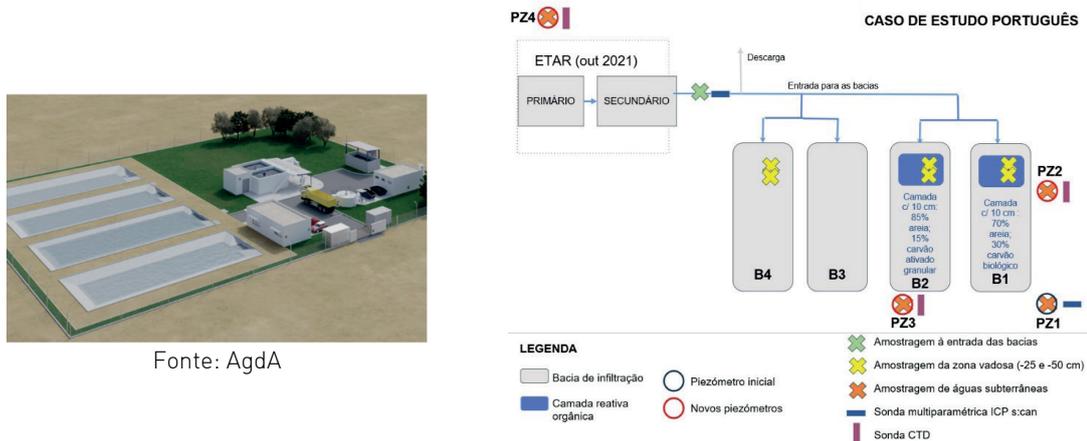


Fig. 1 – Esquema geral das bacias de infiltração e do sistema SAT-MAR da ETAR da Comporta, com os diversos equipamentos e infraestruturas de monitorização instalados.

No contexto do exposto, o projeto MARCLAIMED tem como principais benefícios esperados: 1) melhorar a qualidade da água durante a infiltração e otimizar as taxas de infiltração através da implementação de um sistema experimental de tratamento solo-aquífero (Soil-Aquifer Treatment, SAT-MAR); 2) melhorar a compreensão do risco de contaminação das águas subterrâneas decorrente do SAT-MAR; 3) melhorar a sensibilização e as práticas dos serviços públicos de água; e 4) melhorar a aceitação social e política, fiabilidade e confiança nos sistemas SAT-MAR como solução estrutural para pequenas ETAR em regiões viáveis e em contexto de escassez hídrica.

Nesta apresentação introduz-se o caso de estudo na Comporta e as principais ações em curso, onde se destaca a instalação, no passado mês de setembro, pelas equipas do LNEC e da AgdA, de duas camadas orgânicas reativas (Reactive Organic Layers, ROL) no fundo de duas das quatro bacias de infiltração existentes. Esta instalação SAT-MAR é um passo significativo para melhorar a qualidade da água do sistema, na medida em que permite incrementar os processos de biodegradação e de adsorção, melhorando assim a qualidade das águas residuais tratadas à medida que estas infiltram no solo. Na Bacia 1 foi colocada uma ROL contendo carvão biológico (biochar, 30%) e areia (70%) e na Bacia 2 foi colocada uma ROL composta por Carvão Ativado Granular (Granular Activated Carbon, GAC) (15%) e areia (85%). As ROL são concebidas para libertar carbono orgânico na água de infiltração, o que promove o crescimento da biomassa do solo. Este processo é essencial para a biodegradação de compostos farmacêuticos, promovendo ainda a desnitrificação, bem como a precipitação de ferro e manganês e a remoção de agentes patogénicos. Serão, finalmente, apresentadas as principais ações de monitorização em curso (cf. Fig. 1) e que permitirão avaliar o desempenho do sistema, em especial na melhoria da qualidade da água após tratamento SAT-MAR.

**Palavras-Chave:** MARCLAIMED, gestão da recarga de aquíferos, fontes alternativas de água, ETAR da Comporta

**AGRADECIMENTOS:** Este projeto recebeu financiamento do Programa-Quadro Horizonte Europa) ao abrigo do acordo n.º 101136799 MARCLAIMED: Integrated Decision Support Tool for Reliable and Affordable Application of Manage Aquifer Recharge with Alternative Water Resources in River Basin and Drought Management Plans.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA REGIÃO DE MAGALHÃES - CHILE: CONSERVAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

João Nascimento<sup>1</sup>, Nuno Barreiras<sup>2</sup>, Francisco Peixoto<sup>3</sup>, Valentina Cárdenas<sup>4</sup>,  
Paola Mateus<sup>5</sup>, Patricio Pliscoff<sup>6</sup>, Alejandro Aguado<sup>7</sup>, Pablo Sanhueza<sup>8</sup>,  
Manuel Contreras<sup>9</sup>, Ulrike Broscheck<sup>10</sup>

1. CERIS – IST / Waterways, jnascimento@waterways.pt; 2. CERIS – IST / Water  
2. You, nbarreiras@water2you.net;
3. Waterways, francisco.peixoto@tecnico.ulisboa.pt;
4. Fundación Chile, valentina.cardenas@fch.cl;
5. Fundación Chile, Paola.Matus@fch.cl;
6. Universidad Católica de Chile, ppliscoff@uandes.cl;
7. Centro de Ecología Aplicada – Chile, aaguado@cea.cl;
8. Centro de Ecología Aplicada Chile, psanhueza@cea.cl;
9. Centro de Ecología Aplicada Chile mcontreras@cea.cl;
10. Fundación Chile, ulrike.broscheck@fch.cl

### RESUMO

#### *Enquadramento*

A Região de Magalhães, localizada no sul do Chile, tem uma área de 132 297 km<sup>2</sup>, e é, em termos territoriais, a maior região administrativa do Chile. Inclui arquipélagos, fiordes e campos de gelo, além de uma parte da Antártica Chilena, demonstrativo da sua importância ecológica e características geográficas e climáticas únicas. É composta por um sistema hidrológico complexo e intrincado, incluindo importantes áreas transfronteiriças, partilhadas com a Argentina, o que aumenta a complexidade da gestão dos recursos hídricos.

O clima varia significativamente ao longo da região, com valores de precipitação anual entre os 600 mm em áreas mais secas, como Punta Arenas, até mais de 8000 mm em zonas montanhosas e florestais. Esta diversidade climática reflete-se na vegetação regional, que inclui florestas sempre-verdes e caducifólias, turfeiras, estepes e pastagens. A topografia também é variada, variando entre terrenos suaves e planos a áreas montanhosas na cordilheira dos Andes, onde glaciares, fiordes e campos de gelo dominam a paisagem.

Do ponto de vista hidrogeológico, existem aquíferos fundamentais para o abastecimento local, especialmente em zonas urbanas como Punta Arenas e Puerto Natales. Contudo, a pressão humana, como a expansão das áreas agrícolas e industriais, juntamente com os impactos das alterações climáticas, põem em risco a sua sustentabilidade.

É neste enquadramento que surge o estudo “**Diagnóstico Hídrico da Região de Magalhães - Chile**”, enquadrado no programa “**Escenários Hídricos 2030**”. Coordenado pela Fundación Chile, reúne instituições públicas, privadas e da sociedade civil no Chile e integra diversos especialistas de diferentes áreas. O projeto tem como objetivo promover a gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos em resposta aos desafios climáticos e de escassez hídrica. Este programa procura promover o conhecimento científico para apoiar decisões estratégicas que assegurem o equilíbrio entre desenvolvimento económico, proteção ambiental e bem-estar humano, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável e às prioridades nacionais para enfrentar a crise hídrica e climática.

#### *Recarga e risco de contaminação das águas subterrâneas*

Uma das principais tarefas do projeto foi avaliar a recarga de água subterrânea na região. Nesse sentido, considerou-se o modelo WetSpa (Water and Energy Transfer between Soil, Plants, and Atmosphere under quasi-Steady State), que corresponde a uma ferramenta de modelação hidrológica que estima fluxos de água e energia em ecossistemas terrestres. É amplamente utilizado para calcular a recarga de aquíferos, a evapotranspiração e o escoamento superficial em diferentes condições ambientais. No presente estudo, a utilização deste modelo permitiu identificar as áreas com maior potencial de recarga, tendo por base dados de uso do solo, clima, topografia



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

e características do solo. O modelo permite uma análise espacial detalhada, mostrando como as mudanças no uso do solo afetam a recarga dos aquíferos

A aplicação do WetSpass à área em estudo, revelou que as áreas de floresta e turfeiras estão associadas às áreas de maior recarga, destacando a importância da sua conservação para a sustentabilidade dos recursos hídricos.

A análise da recarga em dois cenários de uso do solo (1995-2019) demonstrou que, embora as alterações à escala regional tenham sido irrelevantes, ocorreram mudanças locais significativas, associadas à expansão agrícola em comunas como Puerto Natales e Punta Arenas. Estas alterações reforçam a necessidade de estratégias de conservação e proteção das zonas críticas de recarga.

O risco de contaminação das águas subterrâneas, avaliado com o Índice de Susceptibilidade, mostrou que as classes de maior risco estão associadas às zonas agrícolas e urbanas, a solos arenosos e áreas onde a profundidade do nível piezométrico é inferior a 7 m.

#### *Soluções Baseadas na Natureza (SbN)*

As SbN são ferramentas com potencial estratégico para mitigar os riscos identificados, contribuindo assim para a sustentabilidade dos recursos hídricos na região. Estas soluções incluem processos naturais de conservação e restauro de ecossistemas críticos, promovendo a resiliência climática e benefícios adicionais à biodiversidade.

No presente trabalho, identificaram-se 404 279 ha com potencial para se desenvolver ações de restauro. Caso as SbN de conservação forem aplicadas, poderão contribuir com uma disponibilidade hídrica adicional de 181 MMC anuais, enquanto as SbN de restauro poderão contribuir com 60MMC.

As medidas identificadas foram as seguintes:

#### Medidas de conservação

- Turfeiras e Florestas perenes: essenciais para o armazenamento hídrico e a regulação do ciclo do carbono. Reduzem a erosão, promovendo a infiltração de água.
- Vegetação Ripária: a implementação de buffers de 200 m ao longo de cursos de água permite proteger ecossistemas florestais e potenciar a melhoria da qualidade da água. Adicionalmente, reduz o impacto de atividades humanas na área.
- Estepes e Pastagens: crucial para manter a recarga dos aquíferos e evitar a degradação de solos.

#### Medidas de Restauração

- Canais de Infiltração e Reflorestamento: promovem a recarga local e a regeneração de áreas degradadas, com impacto positivo no armazenamento dos recursos hídricos.
- Planícies de Inundação: restauram a dinâmica natural dos rios, potenciando a infiltração e reduzindo o risco de cheias em períodos críticos.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo reforça a importância de um planeamento territorial sustentável que integre as águas subterrâneas na gestão e ordenamento do território. As SbN emergem como elementos-chave para garantir a sustentabilidade hídrica, por promoverem a resiliência contra as alterações climáticas e a redução da vulnerabilidade das populações.

Identificaram-se as seguintes medidas como prioritárias para o curto prazo:

- Reforço da monitorização: ampliação das redes de monitorização hidrológica e hidrogeológica.
- Proteção de zonas prioritárias: implementação de regulamentos específicos para áreas preferenciais de recarga e ecossistemas críticos.
- Promoção das SbN: promover intervenções baseadas em soluções naturais, com alocação de recursos para ações de conservação e restauração.

Ao assegurar a integridade dos aquíferos e ecossistemas associados, este projeto estabelece uma base sólida para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos na Região de Magalhães, contribuindo para a segurança hídrica a longo prazo.

**Palavras-Chave:** Gestão sustentável de aquíferos; Soluções Baseadas na Natureza (SbN); Avaliação da Recarga; Segurança Hídrica; Ecossistemas dependentes de água subterrânea



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# REFLEXÕES SOBRE O ESTADO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS A NÍVEL GLOBAL

João Paulo Lobo-Ferreira

Investigador-Coordenador Dr.-Ing. Habil., Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1990-2013), Vogal de Águas Subterrâneas do Conselho Nacional da Água, Presidente da Comissão Diretiva (1992-1994) e Membro do Conselho-Geral da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos; JPLOBOFERREIRA@GMAIL.COM

## RESUMO

O volume global de água doce líquida é estimado em 10,6 milhões de km<sup>3</sup>. Aproximadamente 99% consiste em água subterrânea (Shiklomanov & Rodda, 2004). A extração de água doce de rios, lagos, aquíferos e albufeiras aumentou muito durante o último século e continua a crescer na maioria dos países do mundo. A taxa de aumento foi significativamente alta (cerca de 3% ao ano) durante 1950-1980, em parte devido a uma maior taxa de crescimento populacional e uma contribuição acrescida das águas subterrâneas, particularmente para irrigação. Atualmente a taxa de aumento é de aproximadamente 1% ao ano, em sintonia com a taxa de crescimento populacional atual. Água subterrânea é um recurso hídrico disponível em quase todos os lugares, mas varia fortemente em relação à quantidade, qualidade e à recarga de águas subterrâneas (Figura 2, extraída de Lobo-Ferreira, 2023, originalmente em Nações Unidas, 2022).

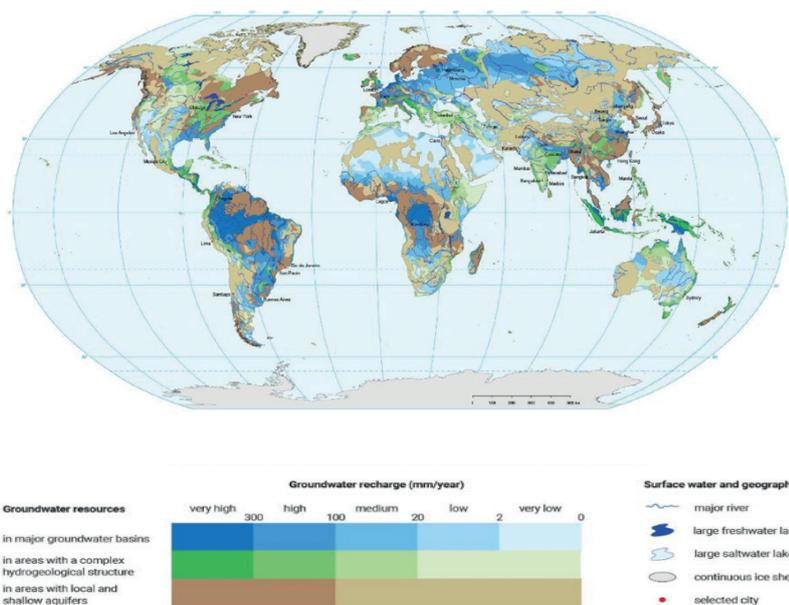


Figure 2-1: Groundwater resources of the world. Illustration from the United Nations World Water Development Report 2022 (United Nations, 2022).

Fig. 1- Mapa da recarga de águas subterrâneas a nível mundial (extraído de Nações Unidas, 2022).

A distribuição dos vários tipos hidrogeológicos mapeados mostra que, em média global, metade da superfície terrestre (47%) dos continentes (excluindo a Antártida) é composta por aquíferos com ocorrências menores de água subterrânea. Nessas áreas a água subterrânea é limitada à zona de alteração do leito rochoso que também pode conter aquíferos locais produtivos. Aproximadamente 35% do subsolo terrestre corresponde a aquíferos relativamente homogêneos, geralmente em grandes bacias sedimentares que podem oferecer boas condições para a exploração de água subterrânea. 18% do subsolo terrestre compreende aquíferos em cenários geologicamente complexos com aquíferos que podem ser altamente produtivos em regiões cársticas ou com falhas. As águas subterrâneas fornecem cerca de 25% de toda a água doce captada na Terra. A sua importância a nível consuntivo é muito maior, bem como os benefícios que proporciona. O Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento da Água (2022) "Águas Subterrâneas: tornar visível o invisível" menciona que a captação global total de águas subterrâneas, em 2017, foi estimada em 959 km<sup>3</sup> (Nações Unidas, 2022). As taxas de captação



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

de água subterrânea estabilizaram (mais ou menos) nos Estados da América, na maioria dos países europeus e na China. A Ásia tem a maior quota de água doce captada (64,5%). É seguida pela América do Norte (15,5%), Europa (7,1%), África (6,7%), América do Sul (5,4%), Austrália e Oceânia (0,7%). Uma análise da captação de águas subterrâneas por setor do uso da água mostra que 69% do volume total é captado para a agricultura, 22% para uso doméstico e 9% para fins industriais. Estas percentagens variam conforme os continentes. Os aquíferos costeiros são um recurso crítico de água doce. A sua exploração intensiva e prolongada por captações muito próximas do mar, onde não existem fontes de compensação para as extrações (por recarga natural ou artificial do aquífero), têm provocado avanços na interface água doce - água salgada, em direção às captações ou poços e o que conduz naturalmente à sua posterior salinização. Dado que a variabilidade e alguns dos impactos negativos das alterações climáticas estão a aumentar rapidamente, tanto em escala como em intensidade, torna-se importante fomentar a “inovação na ação hídrica”, incorporando “soluções tecnológicas” permanentes e adequadas às alterações climáticas, como por exemplo as relacionadas com a gestão da recarga de aquíferos (cf. Lobo-Ferreira *et al.*, 2014). O objetivo é aumentar a disponibilidade de água para setores económicos críticos, melhorar a saúde humana e o seu bem-estar e aumentar a sustentabilidade dos ecossistemas e da biodiversidade. A gestão da recarga de aquíferos, é considerado um método tecnicamente robusto, seguro e uma alternativa sustentável de utilização de recursos hídricos não-convencionais, por exemplo provenientes de água reutilizável apropriadamente tratada. Neste contexto, o Projeto MARSOL (2022) impulsionou a gestão da recarga de aquíferos a tornar-se uma das melhores soluções técnicas modernas para o armazenamento dos recursos hídricos subterrâneos (cf. Fig. 2 extraída de Lobo-Ferreira, 2023 e MARSOL (2022, November 13, Retrieved from Marsol: <http://www.marsol.eu/>).



Figure 5-5: Rio Seco riverbed infiltration ponds (left image) and MAR clogging and infiltration experiments developed in Rio Seco (right image) (Campina de Faro, Algarve, Portugal). Illustrations from MARSOL. For more details on this MARSOL project click [here](#) or scan the QR code.

Fig. 2 – Bacias de infiltração do Projeto MARSOL (rio Seco, Campina de Faro, Algarve)

A Diretiva Quadro da Água (2000/60/EC) considera a “recarga artificial” das águas subterrâneas como uma das ferramentas de gestão da água que podem ser utilizadas pelos Estados-Membros para alcançarem um bom estado qualitativo das águas subterrâneas. Devem, no entanto, ser assegurados os controlos necessários, incluindo a monitorização, para garantir que tais práticas não comprometem os objetivos de qualidade legais estabelecidas para o corpo de água subterrâneo recarregado. Louva-se a Resolução da Assembleia da República n.º 86/2022, que recomenda ao Governo que incentive a recarga artificial de aquíferos para reforço da eficiência hídrica de Portugal.

**Palavras-Chave:** Recursos hídricos subterrâneos, gestão da recarga de aquíferos, alterações climáticas, gestão da recarga de aquíferos, perspetiva hídrica global.

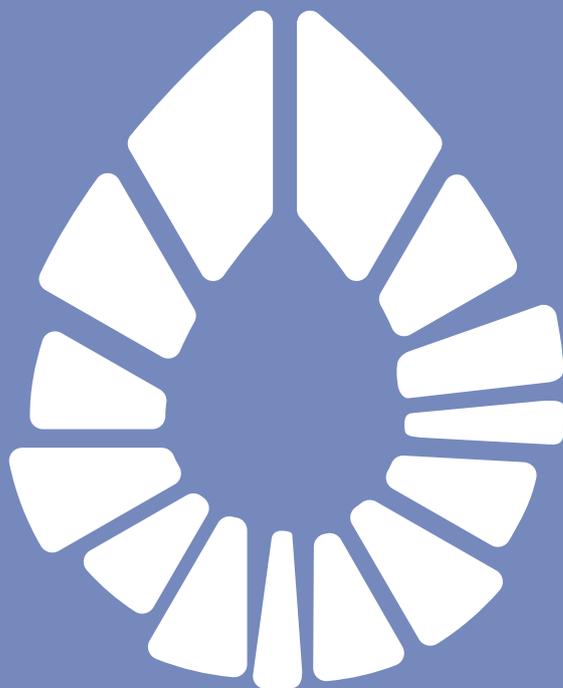
## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lobo-Ferreira (2023) - Groundwater status in ENGINEERING, GROUNDWATER, AND INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT - World Federation of Engineers Organizations Standing Technical Committee on Water [https://www.wfeo.org/wp-content/uploads/wg-w/CW-ENGINEERING\\_GROUNDWATER\\_AND\\_INTEGRATED\\_WATER\\_RESOURCES\\_MANAGEMENT.pdf](https://www.wfeo.org/wp-content/uploads/wg-w/CW-ENGINEERING_GROUNDWATER_AND_INTEGRATED_WATER_RESOURCES_MANAGEMENT.pdf)

Lobo Ferreira, J., Leitão, T., & Oliveira, M. (2014). Portugal’s river basin management plans: groundwater innovative methodologies, diagnosis, and objectives. *Environ Earth Sci*. Retrieved from <http://repositorio.lnec.pt:8080/xmlui/handle/123456789/1006457>.

Nações Unidas (2022). The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. Paris: UNESCO.

Shiklomanov, I., & Rodda, J. (2004). *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. UNIVERSITY OF CAMBRIDGE.



14.º SEMINÁRIO *sobre*  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

E - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
EM OBRAS DE ENGENHARIA E  
AMBIENTE URBANO





14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# AFLUÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO TÚNEL DO PEGREGAL, ILHA DA MADEIRA

Susana Prada<sup>1</sup>, J. Virgílio Cruz<sup>2</sup>, Celso Figueira<sup>3</sup>, Nuno Gouveia<sup>4</sup>,  
Alexandra Reynolds<sup>4</sup>, Nélia Sousa<sup>4</sup>

1. Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada 9020-105 Funchal – Portugal; slprada@staff.uma.pt
2. Faculdade de Ciências e Tecnologia e Instituto de Investigação em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores; jose.vm.cruz@uac.pt
3. Instituto das Florestas e Conservação da Natureza, IP-RAM, Rua João de Deus 12 E, RC C 9050-027, Funchal – Portugal; celso.figueira@madeira.gov.pt
4. Águas e Resíduos da Madeira, S.A., Rua dos Ferreiros 148-150, 9000-082 Funchal – Portugal; nunodinarte@gmail.com; nelia.sousa@arm.pt; alexandra.reynolds@arm.pt

## RESUMO

A Madeira, a principal ilha da Região Autónoma com o mesmo nome, possui um conjunto de especificidades hidrológicas que lhe colocam desafios distintos dos encontrados a nível continental. Caracterizada por uma orografia acentuada e um clima variável, a ilha da Madeira depende fortemente da disponibilidade de água subterrânea para satisfazer as necessidades de consumo humano, regadio e produção de energia. A regionalização dos mais recentes cenários climáticos para a Madeira permitem antever uma diminuição na precipitação, assim como na sua distribuição sazonal, e o aumento da temperatura e subida do nível do mar, que levarão, inevitavelmente, a uma diminuição da qualidade e da quantidade de água disponível, tornando imperiosa a necessidade de reduzir perdas e aumentar o armazenamento de água em altitude.

A rede de Levadas que caracteriza a Madeira, um extenso e histórico sistema de canais de irrigação, construído ao longo de séculos para captar e transportar água das regiões montanhosas e húmidas do Norte para as áreas baixas, mais secas e povoadas do Sul da ilha, desempenha, ainda hoje, um papel crucial no abastecimento de água, na agricultura e na produção de energia hidroelétrica. Esta rede compreende canais estreitos e túneis escavados na rocha, que se estendem por mais de 2800 km.

Um dos principais sistemas de transporte de água do Norte para o Sul da ilha é a Levada ou Canal do Norte, construído entre 1947 e 1952, com uma extensão total de 50,5 km. Uma vez que parte do canal escavado na rocha, num talude vertical da margem do vale da Ribeira Brava, se apresentava profundamente degradado e fraturado, com avultadas perdas de água e em risco de desmoronamento, colocando em causa a segurança de pessoas, o abastecimento público e o regadio, a ARM - Águas e Resíduos da Madeira, S.A. decidiu construir um novo túnel hidráulico. Esta obra, designada como túnel do Pedregal, situada entre as cotas 559 e 548m, ao mesmo nível altitudinal da Levada do Norte, tem 5400 m de extensão e uma secção de 4,5x4,5m, e foi projetada por forma a desativar o troço mais degradado Levada do Norte, eliminar as perdas de água e criar uma reserva de água de cerca de 40 000m<sup>3</sup>, contribuindo para a adaptação da Região às menores disponibilidades hídricas previstas no futuro.

Apesar deste projeto ter como objetivo principal o transporte e o armazenamento de água, durante a fase de escavação do túnel ocorreram três relevantes afluições de água, nomeadamente, aos 1031m (amostra 1), aos 1151m (amostra 2) e aos 1222m (amostra 3) a contar do emboquilhamento de montante, caudal que foi integralmente aproveitado e acomodado no sistema Canal do Norte. O somatório do caudal inicial das três afluições ao túnel foi estimado em cerca de 150 L/s (em 2021), tendo causado alguns constrangimentos à prossecução da obra, nomeadamente a necessidade de bombeamento e a redução das condições de estabilidade resultante da pressão exercida pela água nas paredes das discontinuidades, o que levou a um atraso no desenvolvimento do projeto. No entanto, com o tempo, o caudal tem vindo a diminuir totalizando, atualmente, cerca de 30 L/s, ou seja, 1/5 do caudal inicial.

Verifica-se que a primeira afluição de água surge na interceção do túnel com o limite geológico que separa a Unidade da Encumeada, mais antiga, constituída por rochas mais alteradas e menos permeáveis e a Unidade da Penha de Água, mais recente, constituída por rochas em geral menos alteradas e mais permeáveis.

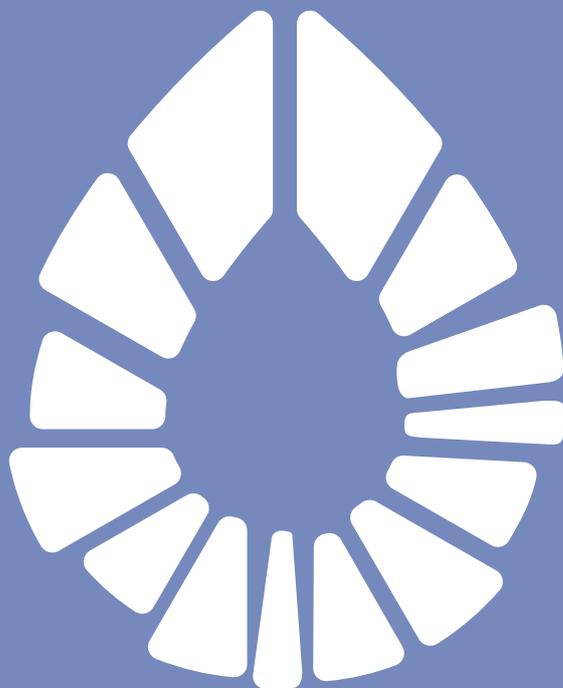


14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A composição química das águas do túnel é semelhante à das águas do aquífero de base da ilha da Madeira, com condutividades entre 100 e 111 $\mu$ S/cm, pH entre 8,6 e 8,9 e temperatura entre 13 e 15°C, tratando-se de águas do tipo bicarbonatada cálcica (1 e 2) e bicarbonatada sódica (3). As determinações de Trítio sugerem que a amostra 1 seja a mais antiga, com um tempo de circulação de pelo menos 30 anos, sendo a mais recente a amostra 3, a qual parece ser resultante de mistura entre recarga submoderna e moderna.

O Túnel do Pedregal representa uma solução multifuncional que melhorou substancialmente a eficiência e a fiabilidade do sistema de distribuição de água da Levada do Norte, tendo permitido um ganho de 84 L/s (54 L/s no canal e 30 L/s nas afluências), o que corresponde a um acréscimo de cerca de 42% ao caudal deste sistema. A criação da reserva hídrica de 40 000 m<sup>3</sup>, combinada com a redução das perdas de água no canal, e com o aproveitamento do caudal subterrâneo que surgiu nas três afluências, contribuem para a adaptação da Madeira às alterações climáticas. Este modelo de infraestrutura integrada é o exemplo de uma solução sustentável em obras de engenharia, contribuindo para uma gestão eficaz dos recursos hídricos em ambientes vulcânicos insulares.

**Palavras-Chave:** Águas Subterrâneas; Alterações Climáticas; Túnel Hidráulico; Gestão de recursos hídricos; Madeira



14.º SEMINÁRIO *sobre*  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

F- VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO  
DE AQUÍFEROS; AQUÍFEROS  
COSTEIROS E INTRUSÃO SALINA;  
POLUIÇÃO E RECUPERAÇÃO DE  
AQUÍFEROS EM ÁREAS MINEIRAS





14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# A PEGADA GEOQUÍMICA DAS TERRAS RARAS (REE) NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (PORTUGAL)

Cláudia Costa<sup>1</sup>, Orquídia Neves<sup>2</sup>, M. Teresa Condesso de Melo<sup>3</sup>

1. DER IST ULisboa; APA. Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., Lisboa, Portugal claudia.costa@apambiente.pt;

2. CERENA – IST ULisboa Orquídia Neves orquidia.neves@tecnico.ulisboa.pt;

3. CERIS – IST ULisboa teresa.melo@tecnico.ulisboa.pt

## RESUMO

Um conjunto de 10 sistemas aquíferos e formações hidrogeológicas localizados em Portugal Continental e no arquipélago da Madeira, com diferentes contextos geológicos e hidrogeológicos, foram selecionados para investigar as concentrações de elementos de terras raras (REE), as suas principais origens (processos naturais ou antropogénicos) e processos geoquímicos que influenciam a sua abundância e padrões de distribuição nas águas subterrâneas.

A definição dos valores naturais de background (NBL) das terras raras nas águas subterrâneas foi efetuada utilizando o percentil 90 da distribuição de dados dos elementos químicos após a aplicação de um critério de pré-seleção de dados para eliminar as amostras que poderiam ter sido afetadas pela contaminação das águas subterrâneas devido a ação antropogénica. Os valores mínimos de NBL foram de 0,001 µg/L (para os lantanídeos na maioria dos sistemas) e os máximos ( $2.35 \leq [REE] \leq 200$  µg/L) foram observados numa formação hidrogeológica localizada numa zona de atividades mineiras. Em geral, as concentrações medianas (P50) de terras raras foram inferiores aos valores NBL, exceto em três sistemas, sendo consideradas naturalmente elevadas devido à sua origem (fluidos hidrotermais, depósitos vulcânicos e à presença de hialoclastitos) e/ou devido a condições geoquímicas particulares (pH e potencial de oxidação-redução) das águas subterrâneas.

As terras raras REE apresentam concentrações relativamente baixas nas águas subterrâneas portuguesas e são maioritariamente enriquecidos em elementos de terras raras pesados (HREE). As anomalias médias de Cério ( $Ce/Ce^*$ ) são negativas ( $0.10 \leq Ce/Ce^* \leq 0.84$ ), com exceção de um sistema ( $Ce/Ce^*=1.50$ ). As anomalias médias de Európio ( $Eu/Eu^*$ ) são todas positivas ( $1.12 \leq Eu/Eu^* \leq 3.68$ ). Verificou-se que estas características estão relacionadas com o pH, as condições redox das águas subterrâneas e a geologia local. A condutividade elétrica, o potencial de oxidação-redução e o teor de oxigénio dissolvido, assim como a presença de alguns cátions ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ) e aniões ( $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  e  $SO_4^{2-}$ ) maiores, elementos menores (Li e  $PO_4^{3-}$ ) e vestigiais (Th), apresentam uma correlação positiva elevada com os REE.

**Palavras-Chave:** Elementos de terras raras (REE), Valores de Fundo Geoquímico (NBL), águas subterrâneas, anomalias.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# IDENTIFICAÇÃO DE MECANISMOS DE MINERALIZAÇÃO COM RECURSO A TRAÇADORES AMBIENTAIS NUCLEARES

Paula M. Carreira<sup>1</sup>, Luis R. Costa<sup>2</sup>, Dina Nunes<sup>1</sup>, José Paulo Monteiro<sup>3</sup>

1. Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN), Departamento de Engenharia e Tecnologias Nucleares (DECN), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Estrada Nacional 10, ao km 139,7 2695-066 Bobadela LRS, Portugal. carreira@ctn.tecnico.ulisboa.pt; dina@ctn.tecnico.ulisboa.pt

2. Divisão de Planeamento e Informação, ARH do Algarve – Agência Portuguesa do Ambiente, R. do Alportel 4, 8000-293 Faro, luis.ricardo.costa@apambiente.pt

3. CERIS IST/UALG; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, Faro, jpmonteir@ualg.pt

## RESUMO

A utilização de métodos nucleares de análise no estudo de problemas hidrogeológicos teve início dos anos 30 e tem sido desenvolvida de forma exponencial após os anos 50, tendo por base o estudo das variações de concentração das diferentes espécies isotópicas, resultado de processos naturais, não controláveis pelo homem. A sua representação, no caso das águas subterrâneas e superficiais, resulta da sua comparação quer com padrões absolutos internacionais quer através da variação isotópica regional e por vezes local. A aplicação dos métodos nucleares de análise isoladamente quer a par com as técnicas hidrogeológicas e hidrogeoquímicas convencionais, têm-se revelado marcantes na identificação/caracterização de: velocidade e direção de fluxo subterrâneo; definição das altitudes preferenciais de recarga; na mistura de unidades hídricas; datação de sistemas hídricos subterrâneos; e na origem da salinização das águas subterrâneas. O conhecimento da composição isotópica em oxigénio e de hidrogénio da molécula de água, permitem/fornecem “um rótulo” eficaz no rastreio de processos modificadores da composição química dos sistemas hídricos, ou seja, responsáveis pelo aumento de salinização que resultam no agravamento da qualidade das águas subterrâneas.

O aumento da população mundial, induziu um aumento de práticas agrícolas intensivas e a um aumento da utilização industrial da água, que conduziu a uma procura crescente de águas subterrâneas. Em muitas regiões a escassez de água e a sobre-exploração dos aquíferos acessíveis são uma realidade. Ameaças de poluição antrópica, resultantes de derrames de contaminantes e toxinas nas águas subterrâneas, são reportadas a nível mundial e atribuídas a diferentes fontes, como a agricultura, a indústria ou as atividades urbanas. O aumento da mineralização dos recursos hídricos subterrâneos deve-se frequentemente ao afluxo de água salina durante a extração intensa dos aquíferos costeiros, no entanto, a mistura com a água do mar não é a única causa da degradação dos recursos hídricos em zonas costeiras. A poluição da água devido à irrigação extensiva e intensiva dos campos agrícolas assim como à utilização de fertilizantes e outros pesticidas.

A bacia sedimentar algarvia é caracterizada por apresentar um clima mediterrânico quente, e constituída principalmente por calcários do Cenozoico e depósitos aluviais do Quaternário, que representam as principais formações aquíferas na faixa costeira do Algarve. Na região a deterioração dos recursos hídricos subterrâneos pode dever-se a: (i) intrusão marinha, (ii) dissolução de minerais evaporíticos dispersos nas camadas sedimentares e a (iii) poluição antrópica associada a práticas agrícolas e/ou urbanas. Existe uma grande procura de água para a agricultura de regadio e como suporte de viabilidade das urbanizações turísticas.

Evidências de que as alterações climáticas já começaram, têm sido registadas nas tendências de menores índices de recarga efetiva em toda a região algarvia, traduzidas no aumento do risco de seca/aridez. Esta situação afeta diretamente a disponibilidade e a dependência dos recursos hídricos subterrâneos, que no caso do Algarve, e de acordo com o Plano Regional Eficiência Hídrica do Algarve, as águas subterrâneas são responsáveis por 60 percento do consumo de água no Algarve. O principal objetivo deste estudo é: a identificação e delimitação da salinização das águas subterrâneas (intrusão marinha versus dissolução de minerais evaporíticos versus práticas agrícolas) recorrendo a técnicas químicas e nucleares de análise.

Na Região Algarvia, aproximadamente entre a Campina de Faro e Tavira, entre 2021 e 2022 foram realizadas 3 campanhas de amostragem da água subterrânea na região, tendo sido colhidas amostras em mais de 40 locais, para determinação isotópica e físico-química. As determinações



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

isotópicas foram efetuadas no laboratório do C<sup>2</sup>TN/IST, em todas as amostras de água doce, água salobra e água do mar. Todas as amostras foram analisadas por espectroscopia de massa (LGR-24d). A composição isotópica das águas dos sistemas aquíferos varia entre -4,83 e -0,40 per mil em delta <sup>18</sup>O (vs. V-SMOW) e entre -27,7 e -6,46 per mil em delta <sup>2</sup>H (vs. S-SMOW). A composição isotópica média das águas subterrâneas foi utilizada para calcular a linha de mistura água doce-água do mar. Foram efetuadas ainda determinações de teor trítio, recorrendo a enriquecimento eletrolítico e posterior contagem de emissões beta através de um contador de cintilação líquida. Os teores obtidos variam entre não detetado e 1,9TU.

As determinações dos iões principais foram realizadas apenas nas amostras de água recolhidas durante a primeira campanha de amostragem. Os parâmetros de campo como a condutividade elétrica, o pH, a temperatura e o Eh foram medidos *in situ*. A condutividade elétrica das amostras de águas subterrâneas varia entre 500 e 42 000 micro S/cm.

A hidrogeoquímica indica a presença de fenómenos modificadores da composição química, i.e., mecanismos de troca iónica nítidos com libertação de sódio e fixação de cálcio. Igualmente, observa-se um afastamento de uma evolução química “característica” de mecanismos de intrusão marinha, i.e., nas amostras de água a relação Cl/SO<sub>4</sub> vs. Cl, Na/Cl vs. Cl e quer ainda na relação Na versus Cl.

Os resultados isotópicos permitiram identificar 3 processos principais, responsáveis pela degradação dos recursos hídricos: intrusão marinha, reciclagem/evaporação associada a praticas agrícolas e ainda mecanismos de interação água-rocha (dissolução de minerais).

A percentagem de mistura de água do mar foi estimada utilizando como membros finais a composição média da água subterrânea (teor isotópico e condutividade elétrica). O teor mais elevado de salinização observado no furo 610/254 (CE com uma percentagem 30 de água do mar e através dos valores de <sup>18</sup>O a percentagem de mistura é de 33,9). No entanto, valores dispares de percentagens de mistura foram obtidos quando a dissolução de minerais evaporíticos está presente (81 versus 68 por cento de mistura), por exemplo, na Fuseta. O teor de trítio nas amostras de águas subterrâneas indica uma recarga ativa dos sistemas e águas relativamente modernas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores do C<sup>2</sup>TN/IST agradecem à Agência Internacional de Energia Atómica – Secção de Hidrologia Isotópica através do Projeto RER7013 e reconhecem o apoio da FCT através do projeto UIDB/04349/2020.

**Palavras-Chave:** Algarve, aquíferos costeiros; intrusão marinha; dissolução de evaporitos; isótopos ambientais



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## ORIGEM E MOBILIDADE DO ARSÊNIO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE CHAVES

João Martins<sup>1</sup>, Maria do Rosário Carvalho<sup>1</sup>, Marina Paiva<sup>2</sup>, Catarina Silva<sup>1</sup>,  
Paulo E. Fonseca<sup>1</sup>, Liliana Freitas<sup>3</sup>, Hélder I. Chaminé<sup>3</sup>

1 - IDL-Instituto D. Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, fc51214@alunos.fc.ul.pt, mdrcarvalho@ciencias.ulisboa.pt, csilva@ciencias.ulisboa.pt, pefonseca@ulisboa.pt

2 - TARH-Terra Ambiente e Recursos Hídricos Lda, R. Forte Monte Cintra 1B3, 2685-137 Sacavém, marina.paiva@tarh.pt, rita.carvalho@tarh.pt

3 - LABCARGA e GeoBioTeclUA, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Porto, Portugal; LFSFR@isep.ipp.pt, hic@isep.ipp.pt

### RESUMO

A presença de arsénio nas águas subterrâneas representa um risco significativo para a saúde pública, sendo reconhecido como um problema à escala global. É bem conhecida a origem do As associada a processos de interação água-rocha rica em minerais com elevados teores de As, potenciada por atividade hidrotermal, e a fontes antropogénicas, normalmente associadas à exploração de jazigos minerais, preservação de madeira e aplicação de pesticidas na agricultura. Devido à sua elevada toxicidade, a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2001) e, posteriormente, a legislação portuguesa através do DL 306/2007, fixaram em 10 µg/L o limite máximo admissível para a concentração de As na água potável.

As águas subterrâneas da região de Chaves, associadas a aquíferos desenvolvido em rochas graníticas, metamórficas e sedimentares, apresentam concentrações variáveis de arsénio, que chegam a ultrapassar, em muito, os valores máximos admissíveis de 10 µg/L. Este estudo teve como objetivo identificar a relação entre as anomalias de As encontradas nas águas subterrâneas da região de Chaves e os controlos geológicos e hidrológicos locais, focando-se na origem, abundância e mobilidade do arsénio.

A área de estudo é parte integrante sub-zona da Galiza Média/Trás-os-Montes na zona Centro Ibérica (Ribeiro, 1974, Baptista, *et al.*, 1993). Estende-se desde o grande vale da Veiga de Chaves até às vertentes da serra da Padrela e do Planalto do Barroso, a este e oeste, respetivamente. O vale está associado ao acidente tectónico Penacova-Régua-Verín, com uma orientação NNE-SSW (Monteiro Santos *et al.*, 1997), caracterizado nesta zona por uma depressão tectónica, com centenas de metros de subsidência (Monteiro Santos *et al.*, 1997), preenchida por materiais sedimentares de idade Miocénica-Plistocénica, de origem lacustre e aluvionar, características do grande desenvolvimento da planície aluvial do rio Tâmega (Marques, 1999).

Nas vertentes do vale afloram granitos hercínicos e rochas metamórficas silúricas. O granito tem sido classificado como alcalino, de grão médio a fino, contendo biotite e moscovite abundante. O feldspato é fundamentalmente potássico e a plagioclase é do domínio da albite (7% de An.) (Marques, 1993). As rochas metamórficas afloram de ambos os lados do *graben* de Chaves, tratando-se de um complexo xistoso com bandas de ardósia carbonatada (Carreira *et al.*, 2010).

Na região ocorrem diversas tipologias de águas subterrâneas, desde frias a hipertermias, com características químicas e isotópicas distintas. As águas termais possuem temperatura da ordem de 67 °C, elevada mineralização e concentração de CO<sub>2</sub> dissolvido. Ascendem de um reservatório mais profundo, através de falhas e fraturas associadas à zona de fratura Penacova-Régua-Verín (Carreira *et al.*, 2010, Carvalho *et al.*, 2024).

As águas subterrâneas regionais circulam em aquíferos definidos nas rochas metassedimentares e rochas graníticas, com características de aquíferos fraturados. Os aquíferos são captados por minas ou furos, a maioria particulares, e servem de abastecimento para consumo humano ou rega de pequenos espaços agrícolas. As águas destes aquíferos são frias e possuem baixa a média mineralização. A distância do percurso subterrâneo e o tempo de contacto água-rocha determinam o seu grau de mineralização, mas em regra a condutividade elétrica é inferior a 450 µS/cm. O pH é ligeiramente ácido a neutro e a fácies hidroquímica é algo variada, mas predominam as águas bicarbonatadas sódicas. Algumas apresentam alguma contaminação por nitratos.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As concentrações em As nas águas subterrâneas regionais variam entre 0,35 µg/L e 457 µg/L, estando os valores mais altos associados a águas captadas em rocha granítica, na vertente oeste do vale, e à zona do aquífero aluvionar da Veiga mais encostada a essa vertente. A água do aquífero aluvionar, na zona mais próxima à vertente este do vale, tem concentrações baixas, na maioria dos casos inferiores a 10 µg/L. Não é observada nenhuma correlação significativa entre a concentração de As e a condutividade elétrica das amostras, a concentração em sódio, ou o pH, dando a indicação que não há ligação direta entre o grau de dissolução da rocha e a quantidade de As dissolvido. A projeção das águas num diagrama Eh-pH, de estabilidade das espécies de As, mostra que este elemento está presente como  $H_2AsO_4^-$ , devido ao baixo pH destas águas.

Os resultados apontam para a dissolução de rochas com elevados teores de As como a principal origem deste elemento nas águas. Este enriquecimento é observado na vertente oeste do vale onde é conhecido um cortejo filoneano predominantemente quartzoso e aplitopegmatítico.

## REFERÊNCIAS

Baptista J., Coke C., Dias R., Ribeiro A. (1993). Tectónica e geomorfologia da região de Pedras Salgadas-Vidago e as nascentes minerais associadas. In: Chambel A. (ed.), Comunicações da XII Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, Universidade de Évora, 1:125-139.

Carreira, M. P., Marques, J. M., Carvalho, M. R., Capasso, G., Grassa, F., (2010). Mantle-derived carbon in Hercynian granites. Stable isotopes signatures and C/He associations in the thermomineral waters, N-Portugal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.008>

Carvalho J.M., Paiva M., Carvalho R., Fonseca P.E., Freitas L., Teixeira J., Chaminé H.I. (2024). Uma visão integrada dos Recursos Hídricos Subterrâneos e dos Recursos Hidrogeológicos de Trás-os-Montes. In *Recursos Hídricos e Geológicos de Trás-os-Montes*: 13-96.

Marques, J. M. (1993). As águas termais e minerais de Vilarelho da Raia, Chaves, Vidago e Pedras Salgadas. Uma perspectiva global; aplicação geotérmica. Trabalho elaborado no âmbito das Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Instituto Superior Técnico. 154 pp..

Marques, J. M. (1999). Geoquímica dos fluidos e da interacção água-rocha: os casos das águas mineralizadas quentes e frias de Chaves, Vilarelho da Raia, Vidago e Pedras Salgadas. IST, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa (Tese de Doutoramento), 276 pp..

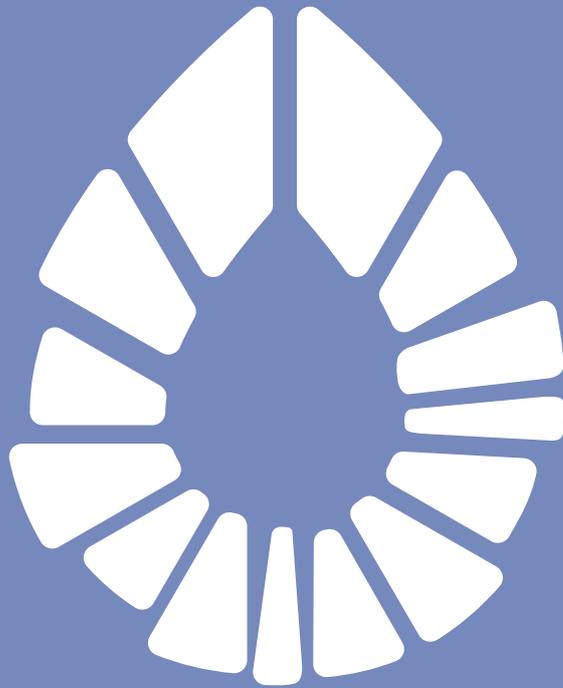
Monteiro Santos, F. A., Dupis, A., Andrade Afonso, A. R., Mendes-Victor, L. A., (1997). Study of the Chaves geothermal field using 3D resistivity modeling. *Journal of Applied Geophysics*, 37: 85- 102. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00010-4)

Ribeiro, A. (1974). Contribution à l'étude tectonique de Trás-Os-Montes oriental. *Memória n.º 24, Nova Série. Serviços Geológicos de Portugal*. Lisboa.

**Palavras-Chave:** Arsénio; Água subterrânea; Origem; Mobilidade; Qualidade.

## AGRADECIMENTOS:

O projeto foi financiado pela "La Caixa"/BPI/FCT (Projeto Aquae Vitae) Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) I.P./MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) – UIDB/50019/2020, UIDP/50019/2020, e LA/PL0069/2020.



14.º SEMINÁRIO *sobre*  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

G- MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO  
ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO  
E DA QUALIDADE DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS





14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# GROUNDWATER ENGINEERING: DESIGN & MODELLING

Stephen Thomas

OGI Groundwater Specialists, City of Durham, UK.

## RESUMO

Groundwater Engineering can be considered as the cumulative actions to change behaviour of groundwater from its natural or ambient state to the state required. Typically, this can be achieved using water well construction, containing electro-submersible, suction pumps. However, it can also be achieved using passive gravity drains, siphon, vacuum systems and reinjection of recharge of surface water. Barrier techniques are also used to reduce the permeability of the ground, such as using steel or concrete walls, grouting techniques, or ground freezing.

All the above techniques serve to change the groundwater state to the state required, this being a rise or fall in water head or pressure, or a change in the direction or velocity of the groundwater. Also important to recognise is the change in chemical composition of groundwater. Clearly, there is the contamination of groundwater, although I would state that this is not the objective of good engineering. However, the cleanup of contaminated groundwater certainly is beneficial from competent and skilled groundwater engineering.

It is important to recognise the objective of the engineering being actioned. Constructing a series of groundwater boreholes certainly requires an engineering design. However, the purpose and constraints need to be defined clearly in advance of construction. For example, are the boreholes required for the supply of groundwater as a resource, and is this for drinking water, for agriculture or for industrial use? Alternatively, is the purpose of the engineering to lower the water table or potentiometric head to enable safe construction to take place, or is it to reinject water to provide a hydraulic barrier to mitigate saline water intrusion from the ocean into coastal aquifers.

The following provides a series of examples of groundwater engineering techniques that have been applied to projects requiring a change in the state of the groundwater behaviour. Inherent in the design process is that it is not feasible, nor practical, to design everything perfectly at the outset. Groundwater Engineering also requires an observational, or iterative, approach, in which a system is designed and then implemented based on ground conditions anticipated. The performance of the system is then measured and then reassessed. Then most often the system is augmented, sometimes many times, to reach the final objectives.

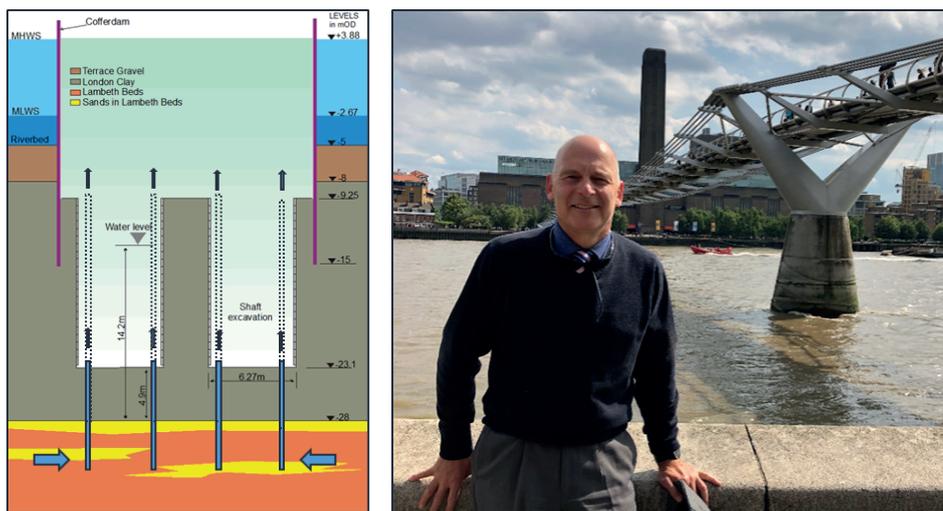


Figure 1. London Millennium Bridge passive groundwater pressure relief system to prevent ground heave.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

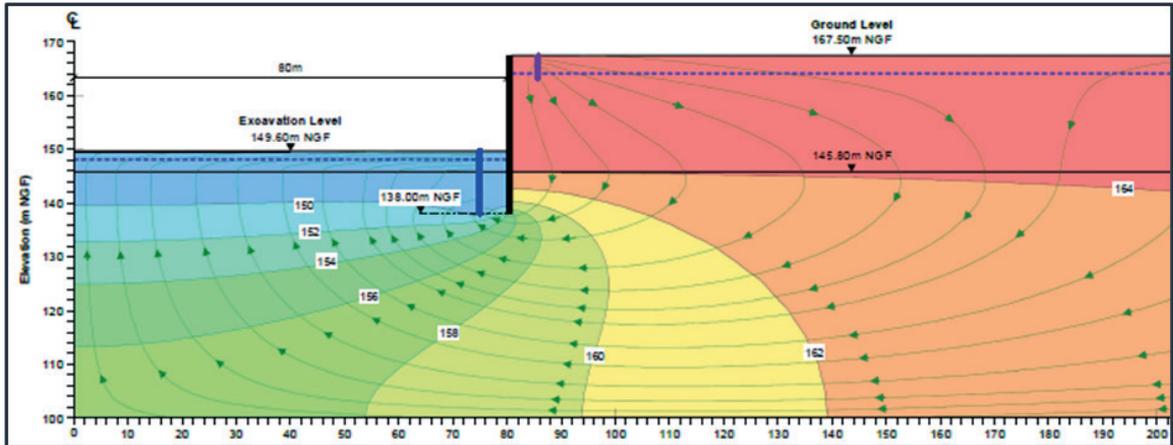


Figure 2. Combination of impermeable cutoff wall with groundwater abstraction & recharge to mitigate settlement.

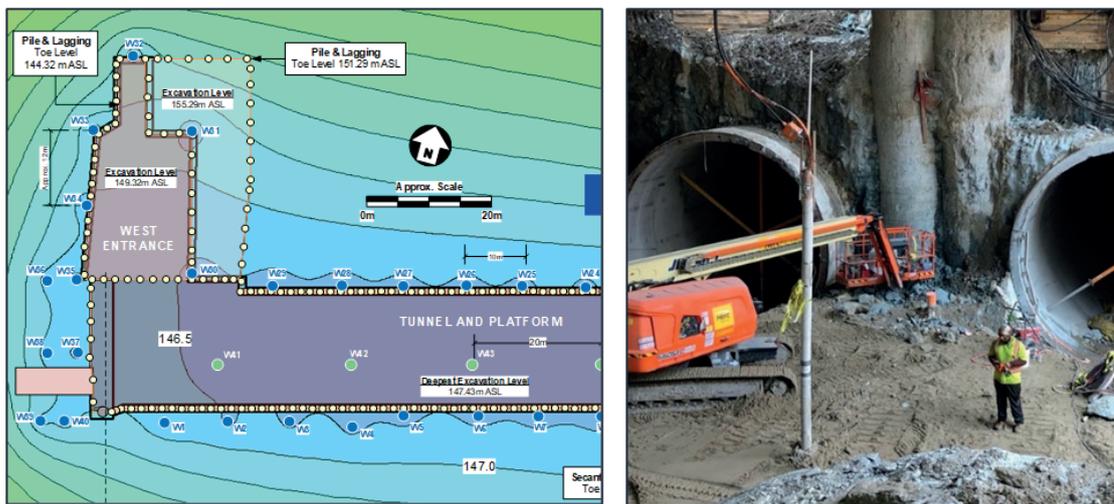


Figure 3. Combination of external & internal abstraction boreholes to dewater metro station construction, Toronto.

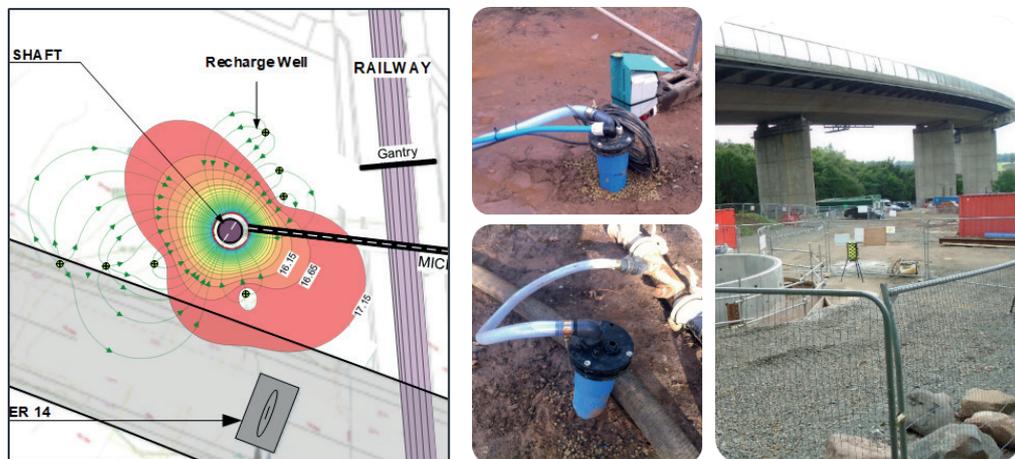


Figure 4. Combination of abstraction & recharge wells to dewater shaft and prevent settlement of road bridge.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# IMPACTS OF FOREST FIRES IN GROUNDWATER SYSTEMS: THE CASE STUDY OF ALVA WATERSHED (PORTUGAL) IN THE FRAMEWORK OF C2IMPRESS PROJECT

Manuel M. Oliveira, Teresa E. Leitão, Tiago N. Martins

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. Email: moliveira@lnec.pt, tleitao@lnec.pt, tmartins@lnec.pt

## RESUMO

The C2IMPRESS project (Co-creative improved understanding and awareness of multi-hazard risks for disaster resilient society, [www.c2impress.com](http://www.c2impress.com)) is funded by the European Union through the Horizon Europe Programme. It aims to develop an innovative set of products that contribute to a more resilient society in the face of risks due to extreme weather events under different climate change scenarios.

There are four case study areas (CSA), Egaleo (Greece), Mallorca (Balearic Islands, Spain), Ordu (Turkey) and Centro Region (Portugal). In each of those study areas, different hazards are being studied, i.e., heat waves, wildfires, river floods, wave overtopping, and coastal floods. The Portuguese CSA, Centro Region, addresses several hazards in five different sub-areas: river flooding in Mondego river, wave overtopping and coastal flooding in Aveiro and Figueira da Foz areas, and its impact on ship mooring and manoeuvring in Aveiro and Figueira da Foz harbours, impact of wildfires on surface water flow and groundwater flow and quality in Alva river basin (a subbasin in Mondego river), and also on Leirosa-Monte Real aquifer system.

This abstract presents the results of the development of a groundwater numerical model to study the impact of forest fires to the groundwater system occurring in the Alva river basin. The basin size is 707.6 km<sup>2</sup>. Topography elevation varies between 49 m in the river mouth and 1,991 m above mean sea level. Initiating on 15 October 2017, 54.6% of the total area of Alva river basin was affected by wildfires that took place in the Centro region, due to exceptional climatic conditions (CTI, 2022).

Geologically the area is mainly composed of schists (60 %), granites (29 %) and some quartzites of Palaeozoic age and, to a lesser extent, by consolidated sedimentary and carbonate rocks of Mesozoic age, and Cenozoic sediments. The basin is totally included in the Maciço Antigo Indiferenciado da Bacia do Mondego groundwater body (GWB) (EU Code PTAOX2RH4), representing 14.7% of the GWB area.

The numerical model was developed using ModelMuse v.5.3 software (Winston, 2024) with the finite difference groundwater model MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005). The model is composed of 277 rows, 578 columns, 11 layers and 100 m side squared cells (Figure). Per layer there are 790163 active cells. Top of the model is given by topography and bottom of model is at -1,100 m relative to mean sea level. Hydraulic conductivities were assigned per layer ranging from 1 m/day to 0.001 m/day. Three boundary conditions were considered: recharge, drains, and wells. Recharge was computed using the BALSEQ model (Lobo Ferreira, 1981). Drains were used to model the river and streams network. Well location and available abstraction rates were provided by APA/ARH-Centro.

Since the modelled area has no groundwater level control points, the model calibration and validation strategy was to obtain a water table that was acceptable in terms of spatial behaviour, able to provide water to pumping wells, below topography, and at a reasonable depth. Due to the mountain geomorphology and the hydraulic behaviour of hard rocks, difficulties were expected to model the groundwater system. Most of the times the code did not converge, or balance errors were high. Work consisted of many attempts of assigning hydraulic conductivities values and changing the conductance of the streams, so that acceptable head outputs and well discharges could be obtained. An acceptable result was obtained but, to get model convergence, the head change criterium for closure had to be increased up to 2 m, which is acceptable considering the geomorphology of the area. The model ran successfully with a maximum head change of 1.92 m and a maximum residual error of 89.12 m<sup>3</sup>/day. Volumetric budget for the entire model showed an error of -0.05 %. Due to the characteristics of the model, all the recharge water left the system as discharge to rivers (87,186 m<sup>3</sup>/day), and wells (1,936 m<sup>3</sup>/day).

Forward particle tracking, using ModPath v7 software (Pollock, 2016), was applied to model groundwater paths in the burnt areas following the October 2017 events. It was considered one particle per model cell intersected by the burnt area, in the centre of the top face of the cell of the layer where the modelled water table is located. A total of 38518 particles was used. Porosity was defined as 3 % (a literature



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

value for granites and schists), and no retardation factor was considered. Using this methodology, it is possible to determine the areas of the groundwater body affected by the wildfire. As a result, after a 10-year period, 6047 particles flowed to the streams or to a few wells, while the remaining particles are still following their path inside the groundwater system.

In the last year of the Project, the model will be used to study the impact of future climate and forest fire scenarios.

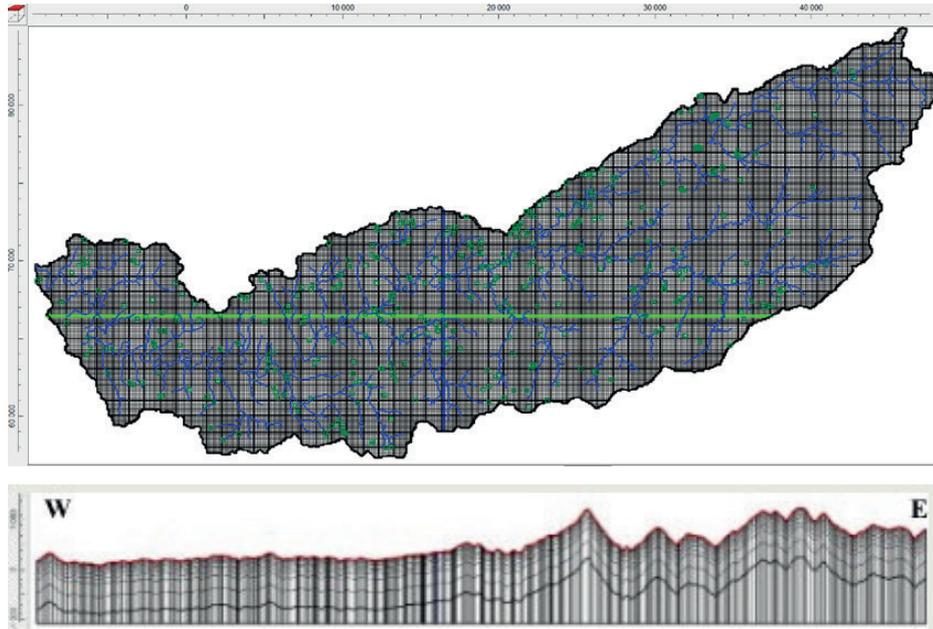


Figure – Model grid and W-E cross section showing the vertical discretisation of the area and the undulation of the terrain. Also represented, the streams (blue lines) and the wells (green squares)

## ACKNOWLEDGMENTS

This project has received funding from the Horizon Europe Framework Programme (HORIZON) Research and Innovation Actions under grant agreement No 101074004 (C2IMPRESS: Co-creative Improved Understanding and Awareness of Multi-Hazard Risk for Disaster Resilient Society).

APA/ARH-Centro provided data concerning the location of pumping wells and abstractions.

**Keywords:** Numerical modelling; aquifer impact; hardrock; Centro region; Modflow 2005.

## REFERENCES

CTI (2022). Avaliação dos incêndios ocorridos entre 14 e 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental – Relatório final. Coord. Guerreiro, J.; Fonseca, C.; Salgueiro, A.; Fernandes, P.; Lopez Iglésias, E.; de Neufville, R.; Mateus, F.; Castellnou Ribau, M.; Sande Silva, J.; Moura, J.M.; Castro Rego, F.; Caldeira, D.N. [https://www.parlamento.pt/ArquivoDocumentacao/Documents/Incendios\\_Outubro\\_2017\\_Relatorio.pdf](https://www.parlamento.pt/ArquivoDocumentacao/Documents/Incendios_Outubro_2017_Relatorio.pdf).

Harbaugh, A.W. (2005). MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/>.

Lobo Ferreira, J.P. (1981). Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce (Lack) Hydrogeological Data. Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp. 1981, Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends).

Pollock, D. W. (2016). User guide for MODPATH Version 7 - A particle-tracking model for MODFLOW (Report Nos. 2016-1086; Open-File Report, p. 41). USGS Publications Warehouse. <https://doi.org/10.3133/ofr20161086>.

Winston, R.B. (2024). ModelMuse version 5.3: U.S. Geological Survey Software Release, 1 August 2024, <https://doi.org/10.5066/P1AZMVXV>.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# MODELAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E REJEIÇÃO DE ÁGUAS SALINAS EM AQUÍFEROS COSTEIROS

Joel Zeferino<sup>1</sup>, Marina Paiva<sup>2</sup>, Rita Carvalho<sup>2</sup>, Maria do Rosário Carvalho<sup>1</sup>,  
Manuela Simões<sup>3</sup>

1. IDL-Instituto D. Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, jfzeferino@ciencias.ulisboa.pt, mdrcarvalho@ciencias.ulisboa.pt
2. TARH-Terra Ambiente e Recursos Hídricos Lda, R. Forte Monte Cintra 1B3, 2685-137 Sacavém, marina.paiva@tarh.pt, rita.carvalho@tarh.pt
3. Faculdade de Ciências de Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, GeoBioTec FCT.NOVA, Largo da Torre, 2829-516 Caparica, mmsr@fct.unl.pt

## RESUMO

O aumento demográfico e as conseqüentes pressões socioeconómicas têm intensificado o uso de recursos hídricos em áreas costeiras, estimulando desequilíbrios significativos em sistemas naturais. Entre os mais afetados, encontram-se os subterrâneos, cuja exploração excessiva acelera a progressão da cunha salina nos aquíferos. A intrusão salina pode ocorrer na dependência de causas naturais, como resultado da redução da recarga, agravada pelas alterações climáticas e do aumento descontrolado da captação de água subterrânea. Em resposta à escassez hídrica, o reforço da exploração tem sido recorrente, aumentando os rebaixamentos no aquífero e exacerbando os desafios para uma gestão sustentável destes recursos.

A implementação de um sistema de captação de água subterrânea em aquíferos vulneráveis à intrusão salina envolve um conjunto de considerações complexas. Em primeiro plano, é fundamental determinar o número ideal de captações, definir as suas localizações e estabelecer os adequados volumes de extração. Ademais, essas decisões precisam equilibrar a necessidade hídrica com a otimização dos recursos económicos, assegurando, ao mesmo tempo, a preservação da qualidade e sustentabilidade do aquífero (Ferreira da Silva *et al.*, 2000). O licenciamento de novas captações tem sido suspenso pelo organismo que tutela os recursos hídricos, em função da sobre-exploração aquífera e do acentuado rebaixamento dos níveis freáticos (e.g. Algarve, Sines, Troia). De acordo com Ferreira da Silva e Haie (2004), a redução do volume de água salgada num aquífero, assim como o recuo da interface água doce-salgada, podem ser alcançados por meio da extração controlada de águas salinas. O tratamento destas águas surge, assim, como uma alternativa potencialmente viável e, em alguns casos, a única solução para garantir o abastecimento de água em regiões vulneráveis. Neste contexto, sistemas de captação de águas salinas ou salobras, com a subsequente rejeição controlada para o oceano das salmouras resultantes do processo de dessalinização, têm sido considerados a solução ambiental mais viável e amplamente aceite.

As águas subterrâneas são um recurso invisível, dinâmico e difícil de conceptualizar, tornando qualquer processo de gestão um trabalho complexo. Sendo a água doce e salgada fluidos miscíveis, o contacto entre elas forma uma zona de transição ou de mistura, resultante da dispersão hidrodinâmica, em que a densidade varia gradualmente entre o valor característico de cada uma. Neste domínio, são os modelos numéricos que proporcionam uma representação mais precisa do sistema, superando a simplificação de uma interface abrupta, que desconsidera a heterogeneidade e anisotropia do meio. Estes modelos têm a capacidade de simular, matematicamente, variações no comportamento hidráulico do meio subterrâneo, permitindo prever essas mudanças antes que se manifestem efetivamente. Diamantino e Lobo Ferreira (2002) exemplificaram a construção de um modelo de transporte de massa, tridimensional, com recurso ao software FEFLOW, aplicado ao estudo da intrusão salina no sistema aquífero de Monte Gordo. Condeça e Oliveira da Silva (2006) empregaram o mesmo software para analisar o comportamento da interface água doce-salgada no aquífero insular da Península de Setúbal. Embora não perfeitos, a utilidade destes modelos, fundamentados em princípios físicos, sendo indiscutível e inegável, representam uma valiosa ferramenta para o estudo de fenómenos complexos, como a intrusão salina.

A metodologia proposta surge da dificuldade frequente em obter resultados consistentes de modelos tridimensionais de transporte de massa que envolvem variação de densidades. Considerando este desafio, parcialmente refletido pela limitação de bibliografia existente, o processo de modelação foi segmentado em:



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1. um modelo numérico, tridimensional, representativo do escoamento subterrâneo,
2. um outro, bidimensional, em perfil vertical, representativo dos processos de transporte de massa.

O primeiro é usado para estudar os efeitos na hidrodinâmica local da instalação de um sistema de captação e rejeição, acompanhando o comportamento de linhas de fluxo regressivas e progressivas. A principal finalidade é garantir que estes sistemas não fiquem em comunicação hidráulica e assegurar que os impactes associados à rejeição de água salobra sejam minimizados nos aquíferos costeiros. Deste modo, é essencial também que a captação ocorra a profundidades onde se capte, estritamente, águas salinas ou salobras, sem afetar os níveis e qualidade de água doce. Adicionalmente, o modelo permite avaliar o risco de inversão de fluxo, o que pode ocorrer se houver rebaixamento excessivo promovido pela captação. O segundo é desenvolvido selecionando um perfil vertical do modelo de fluxo, perpendicular à linha de costa e intercetante do sistema de rejeição, acompanhando a dispersão gravítica da salmoura pelo aquífero. Neste domínio, é essencial garantir que o gradiente hidráulico gerado é suficiente para direcionar a salmoura no sentido do oceano, assegurando, assim, a proteção das águas continentais.

Em conclusão, a modelação numérica é fundamental para avaliar os potenciais impactos de sistemas de captação e dessalinização de água salgada em aquíferos costeiros, sendo a ferramenta mais avançada atualmente disponível. Os modelos são complementares e permitem otimizar a instalação destes sistemas, considerando variáveis críticas, como posição, profundidade de operação e caudais extraídos e rejeitados. A metodologia proposta traz maior rigor técnico ao processo, oferecendo uma base robusta que facilita o licenciamento e atende aos critérios exigidos pelas entidades governamentais, assegurando uma gestão mais sustentável e informada dos recursos hídricos.

## BIBLIOGRAFIA

Condeça J, Oliveira da Silva M (2006) Comportamento da Interface Água Doce/Água Salgada na Península de Tróia Utilizando o Modelo Matemático Feflow. 8º Congresso da Água, 13 a 17 de março de 2006, Figueira da Foz.

Diamantino C, Lobo Ferreira JP (2002) Modelação da intrusão salina com o modelo matemático FEFLOW - Fundamentos teóricos: Formulação para um caso real de estudo. 6º Congresso da Água, 18 a 22 de março de 2002, Centro de Congressos da Alfândega, Porto.

Ferreira da Silva JF, Haie N, Ribeiro LT, Lobo Ferreira JP (2000) Planeamento e gestão de captações sujeitas à intrusão salina: Uma Perspetiva Global para a definição de Perímetros de Protecção. 5º Congresso da Água, 25 a 29 de setembro de 2000, Culturgest (Edifício da Caixa Geral de Depósitos, ao Campo Pequeno).

Ferreira da Silva JF, Haie N (2004) Localização otimizada de captações em aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina. 7º Congresso da Água, 7º Congresso da Água, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

**Palavras-Chave:** Aquíferos costeiros; Intrusão salina; Modelação numérica; Captação e rejeição de salmouras.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# NUMERICAL MODELLING OF THE COMPORTA CASE STUDY SITE TO SIMULATE THE IMPACT OF MANAGED AQUIFER RECHARGE IN THE SCOPE OF AGREEMAR PROJECT

Marcel Horovitz<sup>1</sup>, Manuel M. Oliveira<sup>1</sup>, Tiago N. Martins<sup>1</sup>, Teresa E. Leitão<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Laboratory for Civil Engineering, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. Email: mhorovitz@lnec.pt, moliveira@lnec.pt, tmartins@lnec.pt, tleitao@lnec.pt,

## ABSTRACT

The aim of this article is to present the results obtained using numerical steady state modelling to simulate the impact of different Managed Aquifer Recharge (MAR) schemes in the case-study area of Comporta (Portugal) in the framework of the AGREEMAR project.

The AGREEMAR project, intitled “Adaptive agreements on benefits sharing for managed aquifer recharge in the Mediterranean region” (<https://www.agreemar.inowas.com/>), proposes an improved and integrated management of water resources, centred on optimizing the storage of water in the subsurface. It aims to increase water security in the Mediterranean region for climate change adaptation.

To reach this goal, the project develops an integrated, participative and coordinated methodology in four case study countries, including the following components: 1) development and demonstration of **feasibility mapping for managed aquifer recharge**, based on a GIS multi-criteria decision analysis for the selection of suitable sites for MAR application (Martins *et al.*, 2024); 2) **development of a participatory governance framework** at regional level based on the feasibility maps and national policy analysis (Ghannem *et al.*, 2024); 3) **validation of parts of the feasibility maps through numerical models** at watershed and local scale to assess the impacts of different MAR schemes; 4) implementation of location-specific **agreements for MAR** benefits sharing; 5) participative multi-actor approach for fostering the **engagement of stakeholders** from different societal sectors and actor groups throughout the project (Conrad, Heim & Helling, 2022).

The Comporta Wastewater Treatment Plant (WWTP) located south of Lisbon, see Fig. 1a, is the 1<sup>st</sup> example of a soil aquifer treatment (SAT) MAR system in Portugal, and is running since October 1<sup>st</sup>, 2021 by Águas Públicas do Alentejo. The modelling objectives were mainly to identify the influence of the existing MAR site on the groundwater table and the radius of influence, for current and scenario conditions. This was assessed for different infiltration rates, which would be a proxy for different volumes of treated wastewater (TWW) due to, e.g., tourism in summer months.

The numerical steady state model was set up in MODEL MUSE (USGS) with MODFLOW-2005. The regional model with grid refinement in the vicinity of the infiltration basins covers an area of approx. 604 km<sup>2</sup> (Fig. 1b and c). The model comprises 11 layers based on lithologic information from borehole logs. Each layer is composed of several simplified lithologic units. Constant head boundary conditions were set in the west for the Atlantic Ocean and north for the Sado River Estuary. The recharge boundary condition is based on BALSEQ\_mod (AGREEMAR Deliverable D2.3). Based on information provided by the regional water authority, 304 pumping wells were set as sink term.

Fig. 1d shows the results of the long-term increase of water levels for an increase of the infiltration rates due to e.g., tourism in summer months. The maximum infiltration rate with a groundwater level increase without surpassing the ground surface was found to be 16x more infiltration (2188 m<sup>3</sup>/d) than the current average infiltration rate (136.75 m<sup>3</sup>/d). The water infiltrated at Comporta could help increase the groundwater level locally by 6.5 m for the maximum infiltration rate compared to the current average infiltration rate, therefore contributing locally to alleviating water stress. Concerning the area of influence, the water level rise would be approx. 1 m at about 500 m from the infiltration basins.

A particle tracking with MODPATH (version 7) was modelled and the results indicate that the travel times of infiltrated TWW towards Vala Real (CHD boundary 0 m amsl) and associated rice fields west of Comporta MAR site is at least 10 years for the current average infiltration rate (Fig. 1e).



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

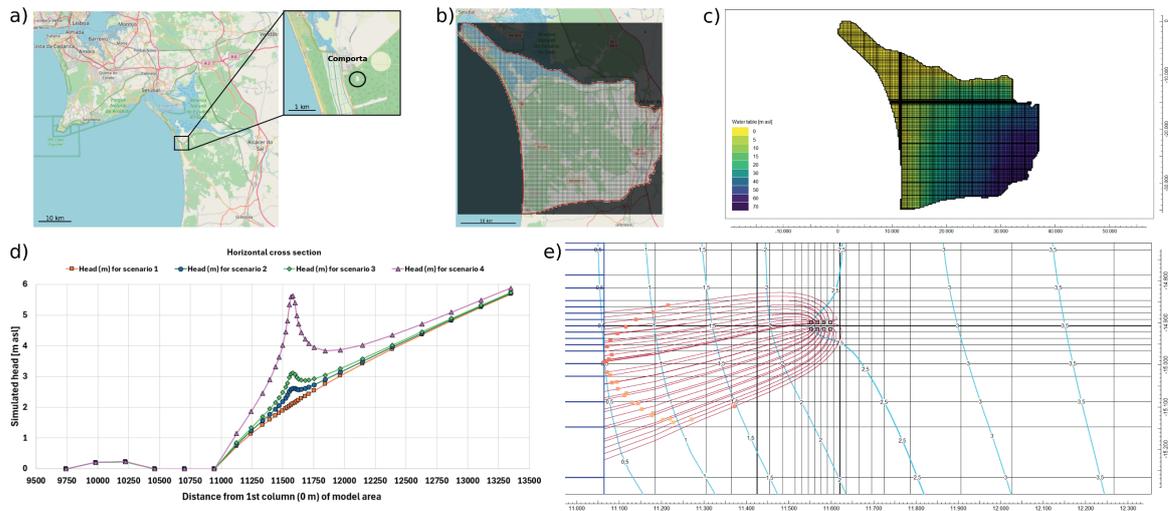


Fig. 1 – (a) location of Comporta WWTP and MAR site, (b) regional model area with red marked cell for WWTP Comporta, (c) simulated water table with Comporta MAR site in the centre of the grid refinement, (d) results of the groundwater heads for different scenarios for row 70 which is the northern row of MAR site cells, and (e) results of the particle tracking for 10 years simulation time, showing the pathlines (dark red) originating in the infiltration basins. Reddish colour squares show the position of the particles after 10 years. Cells with a CHD of 0 m are given in dark blue and the heads as cyan lines.

The Comporta case-study site in the scope of the AGREEMAR project could set an example for further replication of similar sites for areas in Alentejo region indicated by the GIS-based multicriteria feasibility analysis. Additionally, hydrogeochemical models are foreseen in a follow-up project to provide further information regarding the change and possible improvement of TWW quality during infiltration and the effects of TWW on the groundwater.

Keywords: Managed Aquifer Recharge (MAR), numerical modelling, steady state, particle tracking.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The AGREEMAR project is funded under the Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area (PRIMA), (FCT, grant no. PRIMA/0004/2021).

APA/ARH-Alentejo provided data concerning boreholes' logs and permitted wells' abstractions.

## REFERENCES

- Chekirbane, A., Khemiri, K., Panagiotou, C.F., Martins, T.N., Leitão, T.E., Eisenreich, S., Stefan, C. 2023 AGREEMAR Deliverable D2.3: MAR feasibility maps validated for each demo region.
- Conrad, A.; Heim, R.; Helling, Leo. 2022. AGREEMAR Deliverable 1.1: Stakeholder engagement strategy and plan. AGREEMAR D1.1: Stakeholder engagement strategy and plan ([https://agreemar.inowas.com/wp-content/uploads/2023/02/AGREEMAR\\_D1.1.pdf](https://agreemar.inowas.com/wp-content/uploads/2023/02/AGREEMAR_D1.1.pdf)).
- Ghannem, S., Bergillos, R.J., Andreu, J., Solera, A., Leitão, T.E., Martins, T.N., Alpes K.G., Oliveira M.M., Horovitz M., Chkirbene A., Khemiri K., Panagiotou C.F. 2024. AGREEMAR D3.3: Set of Regional Draft Agreements tailored to the project case studies ([https://www.agreemar.inowas.com/wp-content/uploads/2024/08/AGREEMAR\\_D3.3.pdf](https://www.agreemar.inowas.com/wp-content/uploads/2024/08/AGREEMAR_D3.3.pdf))
- Martins, T. N., Leitão, T. E., Oliveira, M. M., Panagiotou, C. F., Stefan, C., Chkirbene, A., Portela, M. M. [2024]. Proposal for a Managed Aquifer Recharge feasibility index for southern Portugal using multi-criteria decision analysis. Groundwater for Sustainable Development, 101280. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101280>.



14.º SEMINÁRIO sobre  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## Patrocinadores



<https://www.aprh.pt/>



## Apoiantes



International  
Association of  
Hydrogeologists  
the World-wide  
Groundwater Organisation



UNIVERSIDADE  
LUSÓFONA

CENTRO  
UNIVERSITÁRIO  
LISBOA