



LIVRO BRANCO DA GESTÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS:

SELEÇÃO DE CONTRIBUIÇÕES PORTUGUESAS PARA O PROJETO MARSOL SOBRE MITIGAÇÃO DA ESCASSEZ DE ÁGUA E DE SECAS

J.P. LOBO FERREIRA, Teresa E. LEITÃO, Tiago MARTINS, Manuel M. OLIVEIRA, Rogério MOTA e Maria José HENRIQUES (LNEC¹); José Paulo MONTEIRO, Rui HUGMAN e Luís COSTA² (UALg²); Tiago M. CARVALHO, Rui AGOSTINHO e Raquel SOUSA (TARH³)

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, lferreira@lneec.pt.

² Universidade do Algarve (UALg), Faro, Portugal, jmonteiro@ualg.pt

³ Terra, Ambiente e Recursos Hídricos (TARH), tcarvalho@tarh.pt

Resumo

O projeto MARSOL abordou questões inovadoras relativas à Gestão da Recarga de Aquíferos tais como a sua viabilidade técnica e os riscos relacionados com a qualidade da água na origem. O projeto analisou - em oito locais de demonstração na Grécia, Portugal, Espanha, Malta, Itália e Israel - diferentes técnicas de recarga com água de diferentes origens (precipitação, água dos rios, águas residuais tratadas e água do mar dessalinizada), aspetos legais, custos e benefícios, cf. <http://www.marsol.eu/35-0-Results.html>.

Pretende-se no 13º SILUSBA apresentar uma seleção de contribuições portuguesas para o Livro Branco da Gestão da Recarga de Aquíferos: Soluções Europeias Desenvolvidas no Projeto Marsol para Mitigação da Escassez de Água e de Secas, disponível no site https://www.researchgate.net/publication/314957907_White_book_on_MAR_modelling_Selected_results_from_MARSOL_PROJECT. No Livro Branco apresenta-se uma seleção de resultados do Workpackage “Modelling” do projeto MARSOL liderado pelo LNEC.

Dos múltiplos temas desenvolvidos no Livro Branco MARSOL da Gestão da Recarga de Aquíferos salientam-se (1) a caracterização dos caso de estudo do projeto MARSOL; (2) uma revisão do estado da arte na “Modelação da Recarga Artificial de Aquíferos”; (3) os balanços hídricos atuais e cenários de alterações climáticas nos casos de estudo do Algarve e de Israel; (4) a Gestão da Recarga de Aquíferos e a infiltração florestal: exemplos do caso de estudo de Vicenza, Itália; (5) a eficiência da Gestão da Recarga de Aquíferos numa área de irrigação com grande desenvolvimento agroindustrial no aquífero de Los Arenales, em Castela e León, Espanha, e (6) a modelação das experiências de infiltração, com três tipos de solos, desenvolvidas tanto no aquífero artificial do LNEC como em colunas laboratoriais (cf. <http://www.lneec.pt/pt/investigacao/infraestruturas-de-investigacao/instalacao-experimental-de-hidraulica-fluvial/aquifero-artificial/> e LEITÃO *et al.*, 2016).

Palavras-Chave: Gestão da recarga de aquíferos, modelação matemática, projeto MARSOL, recursos hídricos subterrâneos, instrumentos de gestão sustentável.

1. INTRODUÇÃO AO PROJETO MARSOL

Como pode o recurso cada vez mais escasso chamado Água ser explorado e utilizado de forma inteligente? Um exemplo, no Algarve, é a utilização das águas do rio Seco, na Campina de Faro, para o armazenamento subterrâneo no aquífero livre, via bacias de infiltração construídas no leito do rio (Figura 1), que permitem a infiltração de 600 m³/dia na época húmida. Estas bacias foram construídas no âmbito dos projetos GABARDINE (200m²) http://cordis.europa.eu/publication/rcn/13034_en.html e duplicadas no âmbito do projeto MARSOL (200 m² adicionais) <http://www.marsol.eu/>.



Figura 1 - Bacias de infiltração no leito do rio Seco, na Campina de Faro

O projeto MARSOL “Recarga Artificial de Aquíferos: Demonstração de Soluções (Europeias) para a Escassez de Água e Secas”, teve como objetivo demonstrar, do início de dezembro de 2013 a novembro de 2016, que as técnicas de Gestão da Recarga Aquíferos (MAR managed aquifer recharge, em nomenclatura inglesa ou gestão de recarga induzida de aquíferos) constituem soluções capazes de utilizar o “excesso” de água em períodos de excedente e armazená-lo no meio subterrâneo para futura utilização em períodos de escassez. A União Europeia financiou o projeto MARSOL com 5,2 milhões de Euros ao longo de 3 anos no âmbito do programa comunitário de Investigação FP7 WATER-INNO-DEMO. A conclusão final apresentada no Deliverable MARSOL Policy Brief é a de que “*Managed Aquifer Recharge is a sound, safe and sustainable strategy that can be applied with great confidence*”.

A utilização de técnicas de MAR visa armazenar água em aquíferos durante períodos de excedentes podendo ajudar a resolver posteriores desafios de escassez de água e, assim, melhor gerir a variabilidade temporal da disponibilidade de água. Além disso, a qualidade da água pode ser melhorada através da sua circulação pelo meio poroso até ao aquífero, como resultado de processos químicos e biológicos, para além da própria diluição. Nesse contexto, a recarga induzida de aquíferos pode ser um importante contributo para resolver a crise de água da Europa, ligando o uso de excedentes hídricos com a reutilização de água e a gestão de recursos hídricos.

As fontes de água alternativas exploradas no âmbito do MARSOL são excedentes hídricos superficiais gerados em eventos extremos durante as estações chuvosas e efluentes de águas residuais com tratamento secundário. Ambos foram estudados no sentido de avaliar os volumes disponíveis e sua importância no contexto do balanço hídrico regional e da sua qualidade, o primeiro para a Campina de Faro e o segundo para o Querença-Silves. A melhoria da qualidade da água é o objetivo principal em ambos os aquíferos, no primeiro através da recarga por bacias, furos e noras e, no segundo caso, melhorando a qualidade das

águas residuais por processos de atenuação e de filtração naturais de tratamento no solo (SAT).

Durante o triénio 2013-2016, o Consórcio MARSOL foi formado por 21 parceiros de 7 países que desenvolveram experiências de campo em 8 áreas de demonstração para corresponder às expectativas da candidatura à UE e as dos atores parceiros interessados. O projeto MARSOL teve como objetivo estimular o uso de fontes de água alternativas para MAR e otimizar a Gestão de Recurso Hídricos através do armazenamento dos excedentes de água em anos húmidos para serem recuperados em anos de escassez. Hoje, podemos afirmar que a MAR é uma estratégia sólida, segura e sustentável para fazer face à variabilidade climática e que pode ser usada com grande confiança.

As fontes de água disponíveis para MAR incluem águas pluviais, escoamento superficial, águas residuais tratadas, água de ribeiros e lagos, águas subterrâneas de aquíferos remotos ou água dessalinizada. Estas fontes de água têm qualidades diferentes e requerem diferentes soluções técnicas para infiltração e recuperação. Várias soluções técnicas estão disponíveis além de uma vasta experiência com o seu funcionamento adquirido nos demo-sites. Foram aplicadas a injeção direta de água através de poços e a infiltração indireta através de lagoas de superfície, bacias de infiltração, valas, canais, zonas húmidas, leitos de rios ou poços. Os tempos de vida operacional das instalações variam de 50 anos no caso das instalações MAR em Menashe, Israel, onde as águas residuais tratadas são infiltradas, até instalações muito recentes como Malta Sul para prevenção da intrusão salina no aquífero basal costeiro. Foi demonstrado que as soluções técnicas funcionam de forma eficaz e sustentável. A estrutura organizativa do projeto MARSOL é apresentada na Figura 2.

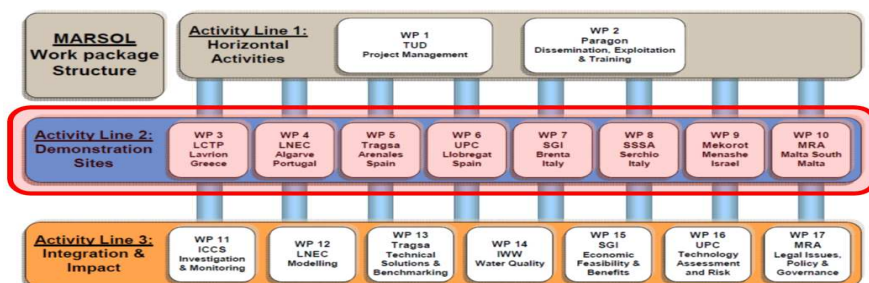


Figura 2 – Estrutura organizativa do projeto MARSOL

Foram seleccionadas três áreas de estudo em Portugal para o projeto MARSOL:

PT1: Sistema aquífero Campina de Faro e Rio Seco (Algarve)

PT2: sistema aquífero cársico Querença-Silves (Algarve)

PT3: aquífero, rio e lagoa de Melides (Alentejo)

No sistema de aquífero PT1 - Rio Seco e Campina de Faro (Algarve) - o objetivo principal foi a melhoria da qualidade das águas subterrâneas fortemente contaminadas com nitratos (zona vulnerável), principalmente devido a más práticas agrícolas.

No sistema aquífero cársico PT2 - Querença-Silves (Algarve) - existem duas subáreas principais e dois objetivos: (1) desenvolver um sistema de tratamento solo-aquífero (SAT) para melhorar a qualidade da água dos efluentes tratados a partir de efluentes de águas residuais tratadas na ETAR de São Bartolomeu de Messines, que descarregam no rio Ribeiro Meirinho

(PT2_5) e posteriormente se infiltram parcialmente no aquífero cársico Querença-Silves, e (2) aumentar o armazenamento de águas subterrâneas na área cársica do Cerro do Bardo usando o excedente de água superficial dos anos húmidos nas barragens de Odelouca e do Funcho, para aumentar a disponibilidade de água em anos secos e facilitar o abastecimento de água a jusante, a ser captado em Vale da Vila pelas Águas do Algarve (**Figura 3**).

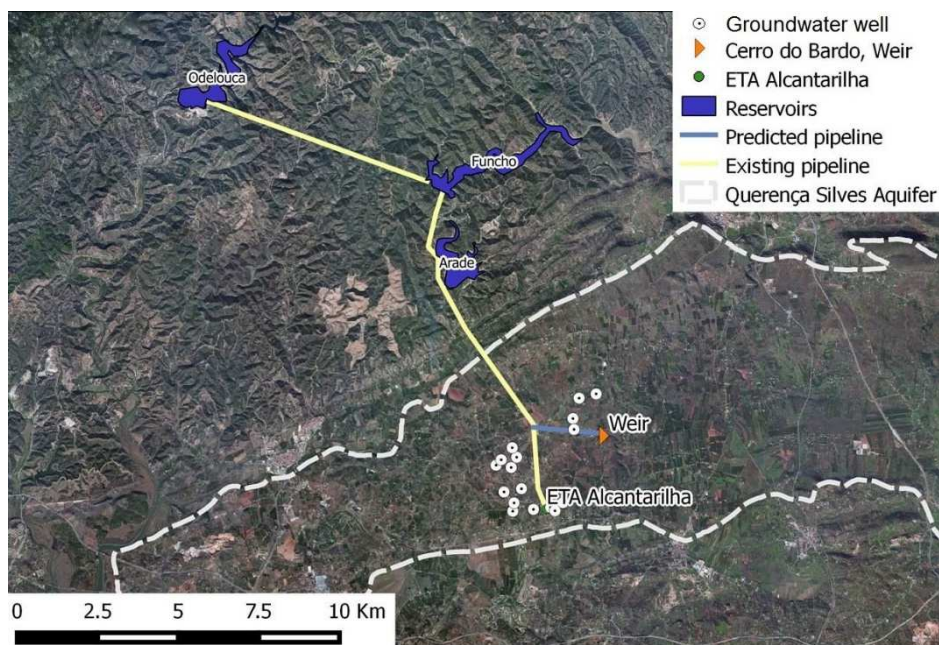


Figura 3 - Localização das fontes de MAR para o caso de estudo Querença-Silves

No aquífero de Melides, PT3 - rio e lagoa de Melides, (Alentejo) - o principal objetivo é usar a técnica SAT-MAR para remover poluentes do campo de arroz antes da sua descarga na lagoa de Melides.

Complementando o trabalho desenvolvido no Work Package 12 “Modelling”, no Deliverable 12.6 “Video visualisation of managed aquifer recharge (MAR) at the MARSOL demonstration sites” [MARSOL Video Channel on VIMEO](https://vimeo.com/channels/marsol), foram desenvolvidos vídeos com as experiências realizadas nos demo-sites MARSOL e os resultados da modelação. Todos os vídeos estão disponíveis ao público no canal MARSOL da plataforma de vídeo Vimeo intitulado “MARSOL Managed Aquifer Recharge Solutions”, sob o seguinte URL: <https://vimeo.com/channels/marsol>. Nesse site estão disponíveis os seguintes vídeos:

- Vídeo “MARSOL Demo Sites Presentations” com uma compilação de videoclipes de trabalhos realizados nos vários demo-sites MARSOL: <https://vimeo.com/194059586> salientando-se em <https://vimeo.com/208335984> uma descrição da componente portuguesa;
- Documentação em vídeo das atividades MAR na região do aquífero Los Arenales, Castela e León, Espanha: <https://vimeo.com/208334134> e <https://vimeo.com/208558417>;
- Vídeo da área de estudo PT1 Rio Seco e aquífero da Campina de Faro (Algarve, Portugal), especificamente para testes de infiltração e de colmatação do leito do rio

(obstrução de infiltração) em bacias do projeto GABARDINE, desenvolvido em julho de 2014: <https://vimeo.com/208667775> ;

- Vídeo da área de estudo PT2 aquífero cársico Querença-Silves (Algarve, Portugal), especificamente relacionado com um teste de infiltração de 90 horas (com traçador) realizado num poço de largo diâmetro (“nora”) e em sumidouros naturais na área de estudo do Cerro do Bardo em abril de 2016: <https://vimeo.com/208669545> ;
- Vídeo sobre atividades de investigação relacionadas com a área de estudo PT3 Melides (aquífero, rio e lagoa), no Alentejo, Portugal. Este vídeo decreve as experiências no modelo físico de um aquífero artificial construído no LNEC. O modelo foi preenchido, em três compartimentos separados, com três diferentes tipos de solo: um apenas com solo de Melides e dois com diferentes camadas experimentais de solos com teores diferentes em matéria orgânica e valores de condutividade hidráulica. As experiências foram desenvolvidas em maio de 2016: <https://vimeo.com/208670944>;
- Visualização do modelo desenvolvido para o aquífero de Malta do Sul, para o período 2016-2026, criado por J.P. Monteiro *et al.* na Universidade do Algarve (http://www.marsol.eu/files/marsol_d10-4_malta-groundwater-model.pdf), no âmbito do projeto MARSOL: <https://vimeo.com/208726351> .

O Vimeo também contém vídeos de depoimentos registados no Workshop MARSOL realizado em Malta em 2015, sobre aspectos legais e regulamentares de MAR. Alguns videos estão também disponíveis noutros sites, *e.g.*:

- EIP Water AG 129 MARtoMARket site https://www.eip-water.eu/MAR_Solutions ;
- Youtube <https://www.youtube.com/>, procurando em "MARSOL demo site".

2. DESENVOLVIMENTO DE UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O ESTADO DA ARTE EM MODELAÇÃO MATEMÁTICA “MANAGED AQUIFER RECHARGE”

No Capítulo 2 do “Livro Branco MARSOL sobre Modelação MAR”, (Deliverable 12.7, a/c do LNEC, cf. http://www.marsol.eu/files/marsol_d12-7_white-book-on-mar-modeling.pdf), T. Martins e J.P. Lobo-Ferreira (LNEC) desenvolveram uma análise do estado da arte em modelação matemática analisando, em múltiplos demo-sites, onde a modelação foi essencial para refinar as estratégias de recarga artificial, quais os principais impactos reportados de projetos de MAR, e a experiência e resultados obtidos em ensaios de traçador no campo.

Após essa revisão, fica-se com a ideia que os autores, na literatura da modelação MAR, concluem, considerando que para cada modelo é necessário um conjunto diferente de dados de entrada de modo a reproduzir adequadamente o mundo real, ser fundamental verificar quais os dados fiáveis disponíveis para o alimentar permitindo produzir resultados confiáveis.

A decisão final para a seleção e, eventualmente, a compra de um novo modelo terá que ser baseada no conhecimento, know-how disponível, e objetivos ambientais locais ou regionais para a modelação de águas subterrâneas em sintonia com as instituições ambientais governamentais. Os autores apoiam firmemente a ideia de que as instituições ambientais governamentais ganham em tirar partido do conhecimento científico disponível nas Universidades e nos Laboratórios de Estado e, se disponível, eventualmente também de

empresas privadas com conhecimentos especializados em avaliação e modelação de águas subterrâneas.

Os modelos usados variam, mas o método de diferenças finitas e o modelo MODFLOW parece serem, de longe, os mais frequentemente usados. Devido à sua complexidade, os modelos de elementos finitos (FEM) não são tão abundantes, embora a malha FEM seja muito mais ajustável às fronteiras complexas das áreas de estudo, como se pôde verificar no LNEC e na UAIG nos projetos GABARDINE e MARSOL com o modelo FEFLOW. Por outro lado, o modelo FEM HYDRUS é comumente selecionado para simulações na zona vadosa. Em estudos hidrogeoquímicos relacionados ao MAR, o modelo PHREEQC, gratuito, parece ser o mais usado, principalmente devido ao seu amplo conjunto de potencialidades.

O aquífero e o local (pequena área do aquífero) parecem ser as escalas mais comuns estudadas, *e.g.* como em COSTA *et al.* (2015a). Os modelos de pequena escala locais (modelos de bacias da infiltração ou de poços de recarga em aquíferos) são, no entanto, escassos. A modelação MAR, em larga escala, tem sido utilizada como ferramenta de apoio à decisão como base para decidir a adequação das metodologias MAR, medidas mais eficazes de contenção de problemas ambientais e explorar cenários de escassez.

A modelação MAR também está sendo usada em todo o mundo, em particular em regiões semi-áridas e áridas, onde o problema da escassez é comum e as técnicas MAR apresentam-se como soluções confiáveis. Nessas áreas, o uso de água reutilizada é cada vez mais frequente com técnicas de infiltração e tratamento no solo SAT-MAR, como forma de aumentar a qualidade da água e a sua disponibilidade.

3. AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM TETOS DE ESTUFAS NA CAMPINA DE FARO

Uma possível fonte importante de água para MAR no sistema aquífero da Campina de Faro consiste na colheita de água de chuva de estufas (Figura 4) devido à grande área de superfície ocupada por essas infra-estruturas (*cf.* COSTA *et al.*, 2015b). Essa fonte potencial de água poderia ser redirecionada para os poços de grande diâmetro (Figura 5), que, no sistema aquífero da Campina de Faro, apresentam um alto potencial de recarga de água no poço (conforme determinado durante os testes de injeção de poços de grande diâmetro na ordem de grandeza dos 500 m³/dia).



Figura 4 – Estufas na Campina de Faro e sistemas de drenagem de águas pluviais



Figura 5 – Poços tradicionais de largo diâmetro (2,5 m) adequados para infiltração de água pluvial recolhida dos tetos das estufas da Campina de Faro

Para estimar a potencial da água da chuva que pode ser colhida de estufas, a distribuição média do valor anual e mensal da água da chuva foi calculada pela Universidade do Algarve e sobreposta com a localização das estufas no sistema de aquífero Campina de Faro. As estimativas médias de precipitação anual basearam-se num modelo de distribuição da precipitação média em 32 anos (de 1959/60 a 1990/91), consistindo numa matriz de resolução de 1 km² desenvolvida por Nicolau (2002). Com base nesse modelo de distribuição, a precipitação média anual no sistema de aquífero da Campina de Faro foi estimada em 570 mm com a distribuição espacial mostrada na Figura 6.

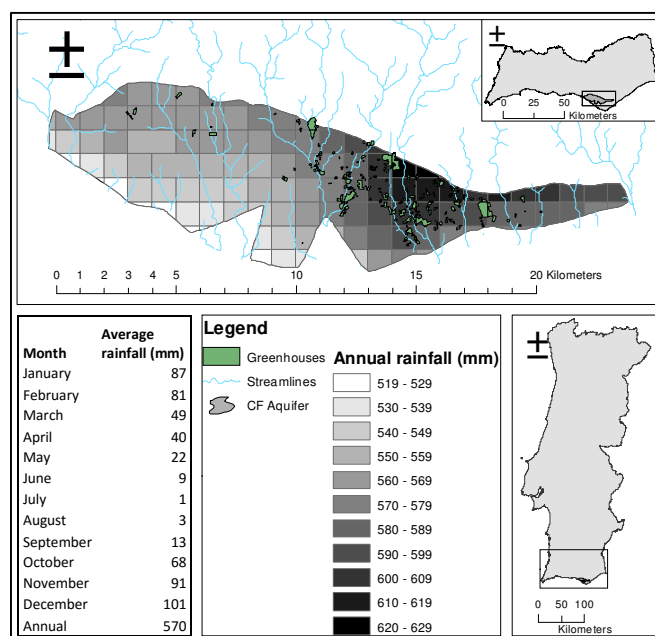


Figura 6 - Média de 32 anos da precipitação mensal e anual na Campina de Faro (Nicolau, 2002) e localização das estufas (APA-ARH Algarve, não publicado).

A localização das estufas e a estimativa da área de superfície baseou-se na pesquisa sobre o uso da terra, utilizando fotos aéreas do ano de 2007, desenvolvidas pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA-ARH Algarve, não publicado). Com base nesta pesquisa, a área de superfície total ocupada por estufas que estão totalmente dentro ou intercetam a superfície do aquífero da Campina de Faro foi estimada em 2,74 km² com a distribuição espacial indicada na Figura 6. Com base nas estimativas da distribuição média anual e mensal de precipitação, os locais da estufa e sua área de superfície (Figura 6), a precipitação média anual potencialmente intercetada pelas estufas no aquífero da Campina de Faro foi calculada por COSTA *et al.* (2015b) em 1,63 hm³ / ano. As médias mensais e anuais de 32 anos das chuvas intercetadas pelas estufas são apresentadas na Tabela 1. Não é provável que a totalidade desses valores possam ser recolhidas e usadas para MAR devido à falta de infraestruturas de estufa adequadas, condutas ou localização próxima a noras (poços grande de diâmetro). No entanto, eles devem ser vistos como a água potencial máxima média disponível para futuras soluções MAR.

Tabela 1 – Estimativas medias mensais e anuais da quantidade de precipitação que poderá ser recolhida dos tetos das estufas na Campina de Faro

Mês	Precipitação intersetada (hm ³)	Mês	Precipitação intersetada (hm ³)
JAN	0.252	JUL	0.00273
FEV	0.235	AGO	0.00823
MAR	0.139	SET	0.0371
ABR	0.112	OUT	0.191
MAIO	0.0625	NOV	0.263
JUN	0.0275	DEZ	0.292
Anual		1.63 hm³	

4. CONCLUSÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS TAXAS DE INFILTRAÇÃO NAS ÁREAS DE ESTUDO DA CAMPINA DE FARO E DE QUERENÇASILVES

Na Figura 7, esquematizada por Tiago Martins de Carvalho (TARH), apresenta-se a descrição das infraestruturas de recarga artificial construídas nos projetos GABARDINE e MARSOL, no leito do rio Seco.

Na seqüências dos estudos de infiltração desenvolvidos pelo LNEC, UAIG e TARH, a infiltração máxima do sistema da bacia foi estimada em 22 m³/h (1,3 m/d). Com a atual disponibilidade de água, estima-se que a infiltração anual seja de cerca de 0,03 hm³. No

entanto, se a este valor se adicionar o do potencial de infiltração dos poços de grande diâmetro (noras) de cerca de 35 m³/h por poço, combinado com a disponibilidade de água de estufa, a infiltração de água anual atingiria 0,42 hm³.

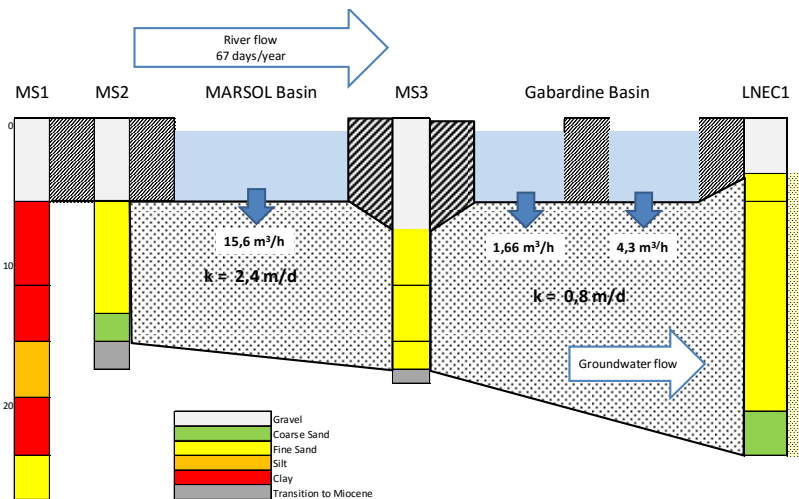


Figura 7 - Infraestruturas de recarga artificial localizadas no leito do rio Seco (PT1)

No Cerro do Bardo, o modelo hidrogeológico conceptual foi revisto, com base na grande quantidade de informação fornecida pela construção e desenvolvimento da rede de monitorização MARSOL que agora conta com dois novos piezómetros (Figura 8, esquematizada por Tiago Martins de Carvalho, TARH):

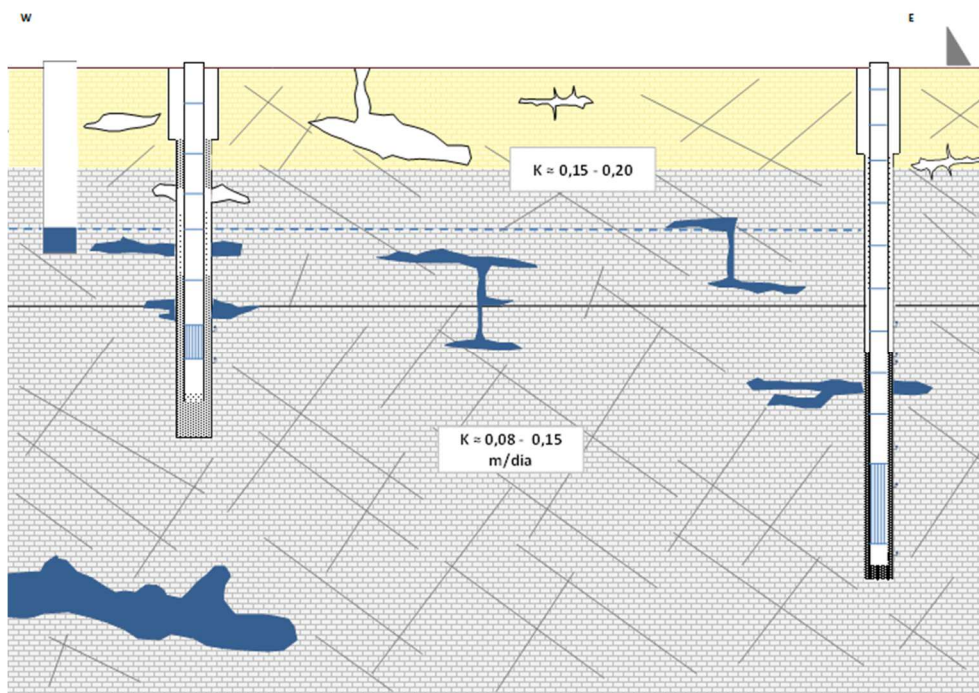


Figura 8 - Modelo hidrogeológico conceptual do sistema aquífero Querença-Silves no Cerro do Bardo (PT2)

Para fins da utilização da recarga artificial MAR, conforme se pode verificar na Figura 9, é importante referir as altas taxas de infiltração calculadas com base nos resultados obtidos no ensaio de infiltração de 90 h desenvolvido na nora do Cerro do Bardo (PT2).

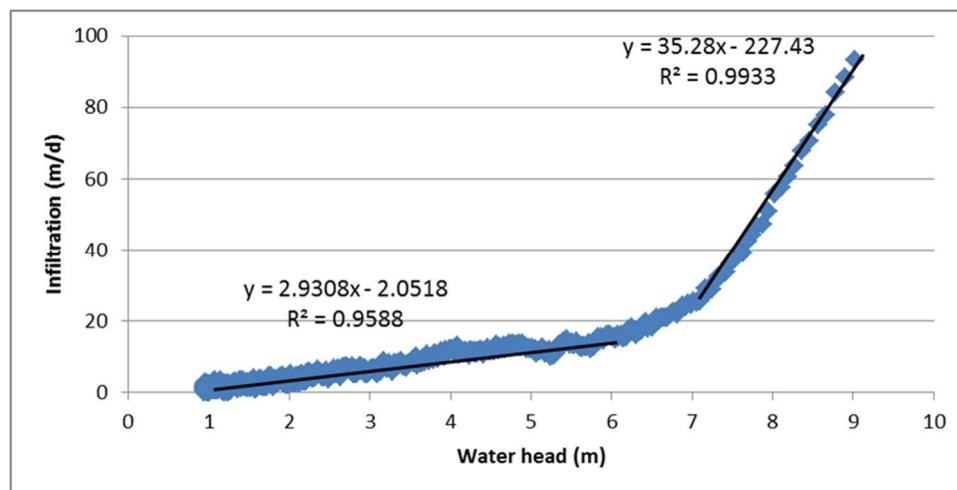


Figura 9 – Resultados do ensaio de infiltração de 90h desenvolvido na nora do Cerro do Bardo (PT2)

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Comissão Europeia, no âmbito do 7.º Programa-Quadro de Investigação, o financiamento do projeto n.º 619120 MARSOL. Agradece-se também à Agência Portuguesa do Ambiente (ARH Algarve) e à Águas do Algarve (AdA) o apoio recebido durante este projeto.

REFERÊNCIAS DA INTERNET E BIBLIOGRAFIA

- LOBO-FERREIRA, J.P. *et al.* (2017) - White book on MAR modelling: Selected results from MARSOL PROJECT, disponível em https://www.researchgate.net/publication/314957907_White_book_on_MAR_modelling_Selected_results_from_MARSOL_PROJECT.
- COSTA, L., MONTEIRO, J.P., OLIVEIRA, M.M., HUGMAN, R., (2015a) - Modelling Contributions of the Local and Regional Groundwater Flow of Managed Aquifer Recharge Activities at Querença-Silves Aquifer System, disponível em https://www.researchgate.net/publication/275716406_Modelling_Contributions_of_the_Local_and_Regional_Groundwater_Flow_of_Managed_Aquifer_Recharge_Activities_at_Querença-Silves_Aquifer_System.
- COSTA L., MONTEIRO J.P., LEITÃO T., LOBO-FERREIRA J.P., OLIVEIRA M.M., MARTINS DE CARVALHO J., CARVALHO T., AGOSTINHO R. (2015b) - Estimating harvested rainwater at greenhouses in south Portugal aquifer Campina de Faro for potential infiltration in Managed Aquifer Recharge. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-10415-3, 2015. EGU General Assembly 2015, 12 to 17 April, Wien. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-10415-3.pdf>.
- LEITÃO, T.E., LOBO-FERREIRA, J.P., CARVALHO, T.M., MONTEIRO, J.P., OLIVEIRA, M.M., AGOSTINHO, R., COSTA L.R.D., MARTINS, T., HENRIQUES, M.J. (2016) - Gestão de Recarga Induzida de Aquíferos. Exemplos do Projeto MARSOL no Algarve. 13.º Congresso da Água, 7-9 de março de 2016, 15 pp.
- NICOLAU R. (2002) - Modelação e Mapeamento da Distribuição Espacial de Precipitação - Uma Aplicação a Portugal Continental. Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.