

ENSAIOS DE RECARGA ARTIFICIAL E APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NO LEITO DO RIO SECO (PROJECTO GABARDINE)

Catarina DIAMANTINO

Bolsista de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel.: 218443561

e-mail: cdiamantino@lnec.pt

João Paulo LOBO-FERREIRA

Investigador-Coordenador, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa Tel.: 218443609

e-mail: lferreira@lnec.pt

Rogério MOTA

Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel.: 218443592

e-mail: rmota@lnec.pt

RESUMO

Este artigo apresenta parte dos ensaios de recarga artificial e dos resultados obtidos durante o desenvolvimento do segundo ano do Projecto Comunitário GABARDINE “Groundwater Artificial Recharge Based on Alternative Sources of Water: Advanced Integrated Technologies and Management”, do 6º Programa-Quadro de Investigação da União Europeia. Enquadra-se igualmente no âmbito da conclusão da Tese de Doutoramento do primeiro autor. A área de estudo seleccionada para a implementação destes ensaios foi o sistema aquífero da Campina de Faro, localizado na região Algarvia. Um dos principais objectivos deste estudo, na componente Portuguesa, consistiu na optimização da reabilitação do aquífero superficial da Campina de Faro, visando a aplicação *in situ* de diferentes metodologias de recarga artificial do aquífero e o recurso a fontes de água alternativas, com o objectivo de minimizar os efeitos causados pela poluição difusa, resultado de intensivas e inadequadas práticas agrícolas nesta região. Neste artigo descrevem-se as experiências realizadas no caso de estudo de Carreiros, em duas bacias de infiltração construídas numa secção do rio Seco, preenchidas por cascalho grosseiro até à superfície, que promovem a infiltração da água do rio. Foram monitorizados dois ensaios, o primeiro corresponde ao cenário natural, de infiltração do escoamento superficial do rio através das bacias de infiltração, nos períodos húmido e seco de um ano hidrológico e o segundo, criado artificialmente, em que se desenvolveu um ensaio de infiltração seguido de um ensaio de traçador. A monitorização destes ensaios, em termos de quantidade e qualidade das águas subterrâneas, foi realizada de forma contínua em piezómetros, tendo sido completada pela aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica.

Palavras-chave: Projecto Gabardine, recarga artificial, ensaio de traçador, métodos geofísicos, Campina de Faro.

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta parte dos ensaios de recarga artificial e dos resultados obtidos durante o desenvolvimento do segundo ano do Projecto Comunitário GABARDINE “Groundwater Artificial Recharge Based on Alternative Sources of Water: Advanced Integrated Technologies and Management”, do 6º Programa-Quadro de Investigação da União Europeia. Enquadra-se igualmente no âmbito da conclusão da Tese de Doutoramento do primeiro autor. Mais detalhes sobre o estudo em desenvolvimento no LNEC até final de 2008, poderão ser consultados nos seguintes endereços: http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nas/estudos_id/gabardine e <http://www.gabardine-fp6.org/>, ou através das seguintes referências bibliográficas: Lobo-Ferreira (2007), Diamantino *et al.* (2007), Lobo-Ferreira *et al.* (2008) e Mota *et al.* (2008).

A área de estudo seleccionada para a implementação dos ensaios de recarga artificial foi o sistema aquífero da Campina de Faro, localizado na região Algarvia. Um dos principais objectivos deste estudo, na componente Portuguesa, consistiu na optimização da reabilitação do aquífero superficial da Campina de Faro, visando a aplicação *in situ* de diferentes metodologias de recarga artificial do aquífero e o recurso a fontes de água alternativas, com o objectivo de minimizar os efeitos causados pela poluição difusa, resultado de intensivas e inadequadas práticas agrícolas nesta região. Pretende-se que este objectivo seja concretizado numa área de estudo onde os problemas resultantes destas práticas estão bem documentados, em termos de qualidade das águas subterrâneas, designada em 2004 como Zona Vulnerável relativamente à concentração nitratos pela aplicação da Directiva dos Nitratos. Simultaneamente com “o bom estado de qualidade” referido pela Directiva-Quadro da Água, estas são as motivações que serviram de base à implementação de infra-estruturas destinadas à melhoria da qualidade da água subterrânea numa secção deste aquífero, permitindo por outro lado, aumentar a disponibilidade de água subterrânea de qualidade na região Algarvia.

Diversos ensaios de recarga artificial foram realizados neste local de estudo durante o segundo ano do Projecto. Neste artigo descrevem-se os ensaios realizadas no caso de estudo de Carreiros, em duas bacias de infiltração construídas numa secção do rio Seco, preenchidas por cascalho grosseiro até à superfície, que promovem a infiltração da água do rio num período de maior disponibilidade hídrica. Foram desenvolvidos dois ensaios, o primeiro corresponde ao cenário natural, de infiltração do escoamento superficial do rio através das bacias de infiltração, nos períodos húmido e seco do ano hidrológico de 2006/2007 e o segundo, criado artificialmente, em que se produziu um ensaio de infiltração seguido de um ensaio de traçador, sendo a origem da água de recarga proveniente do aquífero confinado (Maio/2007). A monitorização destes ensaios, em termos de quantidade e qualidade das águas subterrâneas, foi realizada de forma contínua, em piezómetros. Complementarmente foram aplicados métodos geofísicos de resistividade eléctrica, para detecção e acompanhamento ao longo do tempo do traçador salino.

O objectivo dos ensaios realizados consistiu em determinar a aplicabilidade das diferentes metodologias de recarga artificial de aquíferos de forma que os resultados obtidos possam contribuir para a elaboração de um sistema de apoio à decisão. A sua aplicação permitirá a selecção das técnicas mais adequadas em função da maximização da melhoria da qualidade da água e minimização dos custos totais.

2 - OBJECTIVOS E METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE RECARGA ARTIFICIAL EM CARREIROS

Em Novembro de 2006, no leito do rio Seco, zona de Carreiros, foi desenvolvido um sistema de recarga artificial composto por duas bacias de infiltração, preenchidas até à superfície por cascalho grosseiro, que facilitam a infiltração natural do escoamento superficial. As bacias, com uma área de 100 m² cada (20m×5m) e 5 metros de profundidade, ocupam todo o leito do rio e distam, uma da outra, de apenas 5 m. A fonte de água para a recarga provém do escoamento do rio, quando este ocorre,

normalmente após episódios de precipitação mais intensos. A monitorização do aquífero superficial realizou-se através de dois piezómetros, designados por LNEC1 e LNEC2 e do aquífero confinado por um, designado por LNEC3. Na Figura 1 apresenta-se um esquema com as bacias de infiltração e a localização dos piezómetros.

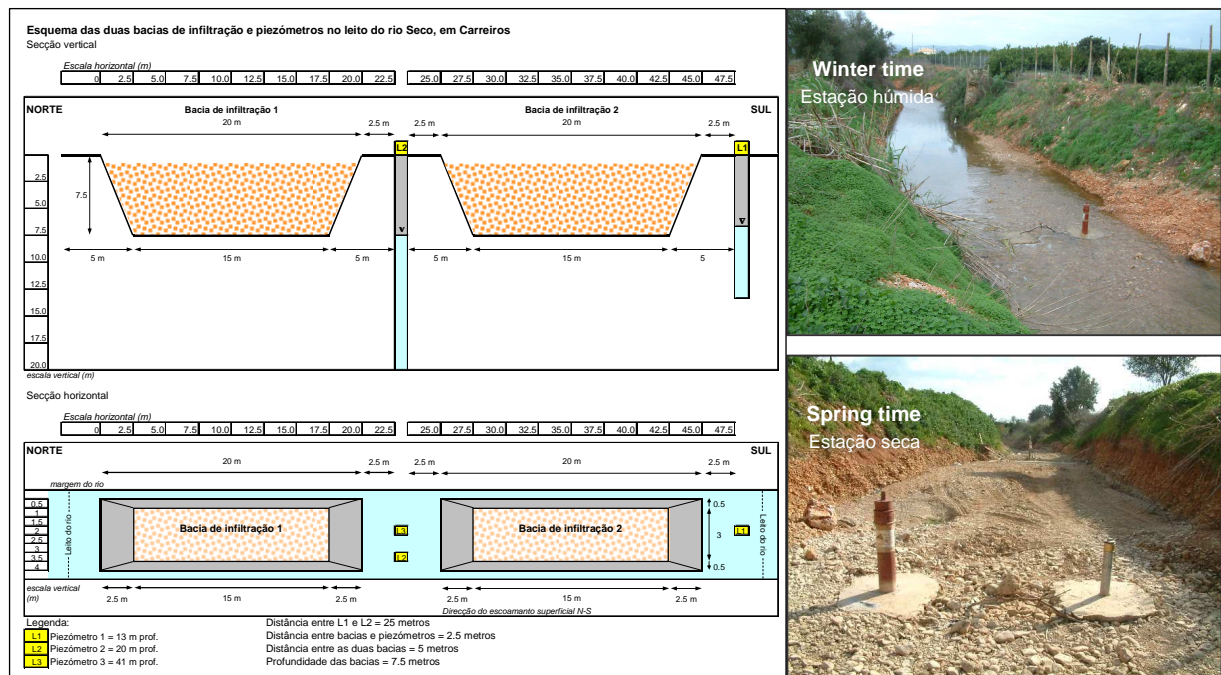


Figura 1 – Do lado esquerdo um esquema vertical e em planta das bacias de infiltração e piezómetros no leito do rio Seco, em Carreiros. Do lado direito um pormenor do rio no mesmo local, durante a estação húmida e durante a estação seca

O principal objectivo proposto para este tipo de estrutura de recarga artificial consistiu na determinação da sua eficiência para facilitar a infiltração da água do rio, avaliada em termos de incremento na quantidade e melhoria na qualidade da água do aquífero superficial. Complementarmente, este sistema também serviu de base para a realização de um ensaio de recarga seguido de um ensaio de traçador, de forma a estimar taxas de infiltração e velocidades de escoamento. O preenchimento com cascalho à superfície evitou causar qualquer perturbação visual no local como consequência da sua construção, não afectando a infiltração da água e promovendo a retenção das partículas finas, nos horizontes mais superficiais, normalmente transportadas em grandes quantidades pelo escoamento do rio.

A monitorização contínua, por intermédio de sondas multiparamétricas (*Troll9500* da *InSitu Inc.*) instaladas nos piezómetros, permitiu o acompanhamento dos resultados da recarga facilitada pelas bacias. Os parâmetros medidos pelas sondas, equipadas com sensores para registo com intervalos de 1 minuto, foram os seguintes: nível piezométrico, parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH, condutividade eléctrica e potencial redox) e dois parâmetros de qualidade da água (concentrações de nitratos (NO_3^-) e de cloretos (Cl^-)).

A aplicação de métodos geofísicos permitiu a detecção 2D e o acompanhamento ao longo do tempo do traçador salino durante o ensaio.

Relativamente ao esquema geológico do local, a informação fornecida durante a perfuração dos piezómetros, em Setembro/Outubro de 2006 e o estudo preliminar por métodos geofísicos, realizado em Janeiro de 2007, possibilitou definir a profundidade das bacias, de forma a que o preenchimento do leito do rio, formado por material aluvionar, muito cimentado e pouco permeável, fosse removido e substituído por outro, de natureza semelhante, mas mais permeável. Resumindo a informação litológica

atravessada neste local, o LNEC1, com 13 m de profundidade, está aberto no aquífero superficial arenoso, o LNEC2, com 20 m de profundidade, está aberto também no aquífero superficial arenoso, terminando numa camada mais argilosa, o LNEC3, com 40 metros de profundidade, está aberto no aquífero confinado calcarenito do Miocénico. A Figura 2 apresenta um esquema conceptual da disposição das camadas geológicas e da piezometria (Maio/2007) na zona de Carreiros.

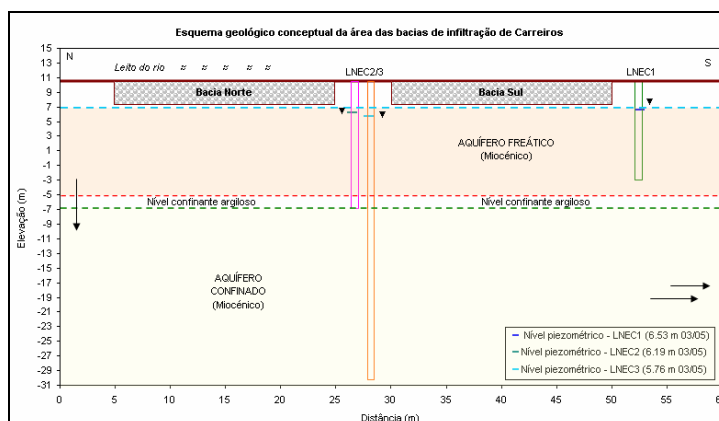


Figura 2 – Esquema geológico conceptual da área das bacias de infiltração de Carreiros

3 – MONITORIZAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL ATRAVÉS DAS BACIAS DE INFILTRAÇÃO

3.1 Descrição dos ensaios

Relativamente aos ensaios de recarga natural, os dois períodos estudados em termos de desempenho do sistema de recarga por infiltração do escoamento superficial foram os seguintes:

- Período da estação húmida, compreendido entre 1 de Outubro/2006 e 31 de Março/2007
- Período da estação seca, compreendido entre 1 de Abril a 30 de Setembro/2007.

Sendo a zona de estudo uma zona essencialmente agrícola, o primeiro período corresponde à estação em que a irrigação dos campos de cultivo é normalmente reduzida, previsivelmente as extracções no aquífero confinado são menores e os níveis piezométricos estão mais altos, quer no aquífero profundo quer no superficial; em oposição, o segundo período corresponde à época de irrigação, sendo assim de esperar extracções mais elevadas no aquífero confinado e um rebaixamento dos níveis em ambos os aquíferos. As oscilações sazonais na piezometria ficam deste modo dissimuladas por estas condições de irrigação e extracção variáveis.

3.2 Análise dos resultados obtidos (quantidade e qualidade da água)

Os primeiros resultados da monitorização nos piezómetros LNEC1, LNEC2 e LNEC3, relativos à estação húmida, apresentam-se na Figura 3: o primeiro gráfico mostra a variação no nível piezométrico e o segundo as concentrações de NO_3^- analisadas em amostras de água subterrânea e superficial. No mesmo gráfico também se acrescentou os valores de precipitação diária registados na estação mais próxima, São Brás de Alportel, com a finalidade de fornecer uma indicação dos períodos de ocorrência de escoamento superficial no rio Seco. A concentração de NO_3^- fornecida pela análise química de duas amostras de água do rio está também representada no gráfico. A análise destes resultados permitiu concluir que os níveis piezométricos tendem a sofrer uma elevação durante os meses de precipitação intensa de Novembro e Dezembro. Durante estes meses verificou-se a ocorrência de escoamento no leito do rio Seco, incluindo também na zona de instalação das bacia de infiltração de Carreiros. Verificou-se ainda que as concentrações de NO_3^- decrescem consideravelmente no mesmo período e tendem a aproximar-se dos valores medidos nas amostras de água do rio, especialmente no caso dos

piezómetros abertos no aquífero superficial. Estes resultados assinalam uma ocorrência relevante para o objectivo principal da investigação proposto no âmbito da Tese e do projecto Gabardine, relativamente à contribuição para a reabilitação da qualidade da água no aquífero superficial da Campina de Faro.

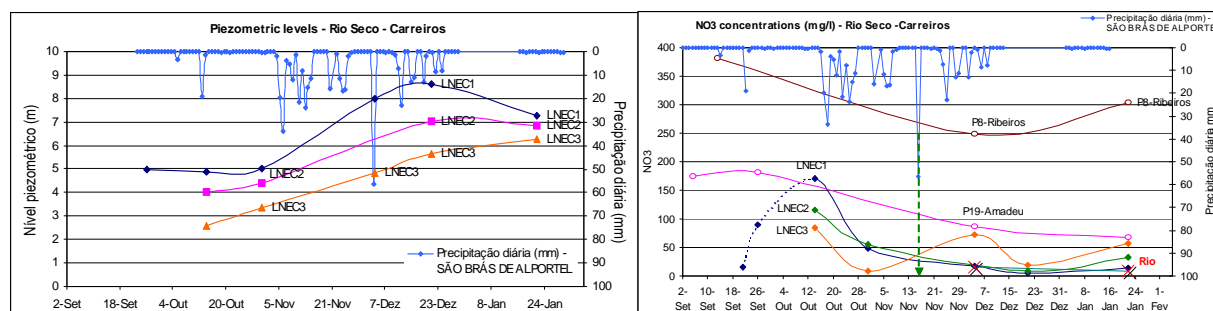


Figura 3 – Níveis piezométricos e concentrações de nitratos registadas entre Outubro/2006 e Janeiro/2007, nos piezómetros do caso de estudo de Carreiros. Precipitação registada na estação climatológica de São Brás de Alportel (resultados relativos à estação húmida)

Na estação seca no ano hidrológico de 2007, não seria previsível qualquer evento de precipitação significativo, passível de causar o escoamento superficial no rio. No entanto, no fim da estação, no final do mês de Agosto e a meados do mês de Setembro de 2007, a ocorrência de dois eventos de precipitação consideráveis e pouco comuns no Verão (de 53 mm em 25-26/08 e de 5 mm em 14/09, assinalados nos registos do SNIRH da estação climatológica de São Brás de Alportel), provocou a ocorrência de dois episódios isolados de escoamento no rio (igualmente monitorizados na estação hidrométrica de Coiro da Burra do SNIRH, de 0,04 m³/s em 25/08 e 0,01 m³/s em 12/09¹) e a infiltração de água do rio na zona das bacias de Carreiros. Estes resultados, conjuntamente com os fornecidos pela sonda de monitorização contínua instalada no LNEC1, em termos de profundidade ao nível, condutividade eléctrica, concentrações de NO₃⁻ e Cl⁻ apresentam-se na Figura 4 e na Figura 5. Mais uma vez se detectou uma melhoria da qualidade da água, causada pela infiltração da água do rio nas bacias durante o primeiro evento de cheia no rio Seco do ano hidrológico de 2007 (cf. Figura 5). A infiltração de água na bacia é também evidente pela elevação do nível registado no piezómetro no mesmo período (cf. Figura 4). Nesta Figura pode observar-se ainda que os dois eventos de precipitação anteriores, ocorridos em Maio e Junho de 2007, não terão sido suficientes para gerar escoamento superficial.

4 - ENSAIOS DE RECARGA ARTIFICIAL E DE UM TRAÇADOR SALINO

4.1 Descrição dos ensaios

Em Maio de 2007 realizou-se um ensaio de recarga artificial seguido de um ensaio de traçador na bacia de infiltração localizada a sul. O ensaio de recarga teve a duração de 3 dias. Pretendia-se determinar as taxas de infiltração da bacia, antes do ensaio de traçador que se seguiu e que teve a duração de 4 dias. A fonte de água utilizada para os ensaios foi proveniente do aquífero profundo, através da extracção de água realizada no furo LNEC3. O traçador utilizado foi o NaCl (cloreto de sódio), distribuído uniformemente na bacia, dissolvido com um caudal de descarga constante de 22 m³/h em 500 kg de NaCl. A Figura 6 mostra um pormenor da bacia e piezómetros antes e durante a

¹ De assinalar a ausência de dados nos registos da estação Climatológica de São Brás de Alportel entre 03-/13/09, mas a existência do episódio de escoamento superficial no dia 12/09 pressupõe a ocorrência de precipitação neste dia (cf. Figura 4). Deste modo, o valor de precipitação que gerou o segundo evento de escoamento terá sido certamente superior a 5 mm.

realização do ensaio de infiltração. Na Figura 7 observam-se algumas fases relativas à colocação do traçador.

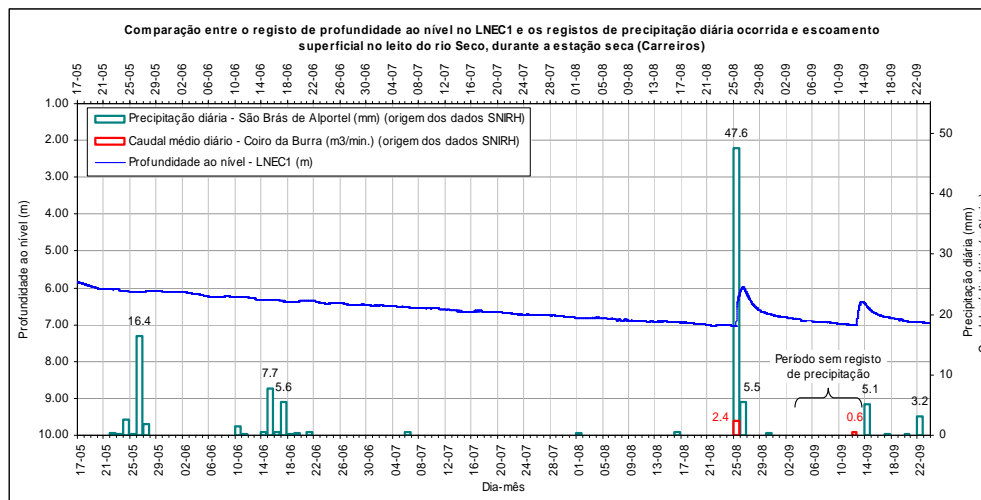


Figura 4 – Registo da profundidade ao nível no piezómetro LNEC1, após os primeiros eventos de escoamento superficial no rio Seco. Comparação de resultados com os valores de precipitação diária registados na estação climatológica de São Brás de Alportel e com os valores do escoamento superficial diário médio, registado na estação hidrométrica de Coiro da Burra, para o mesmo período em análise

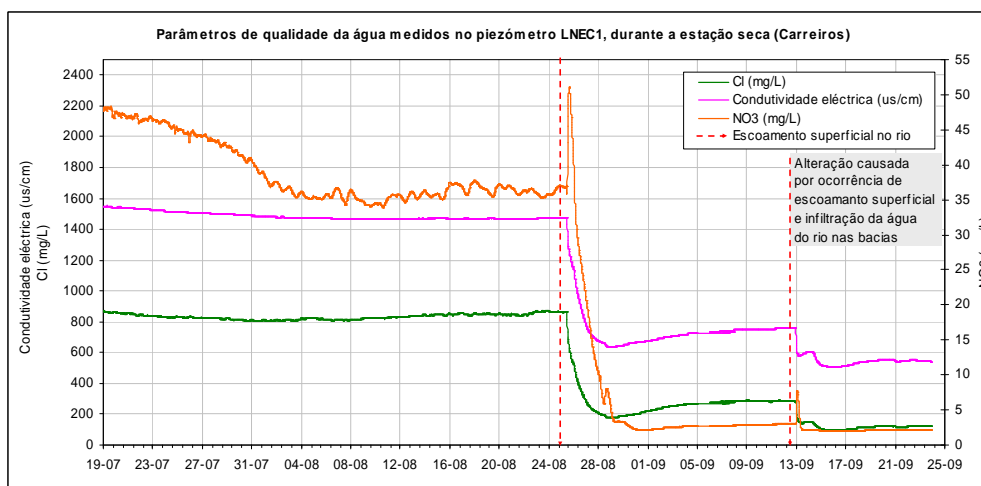


Figura 5 - Registo de parâmetros de qualidade da água (condutividade eléctrica, NO₃⁻ e Cl⁻) no piezómetro LNEC1, após os primeiros eventos de escoamento superficial no rio Seco.

O ensaio de infiltração realizado na bacia sul iniciou-se no dia 03/05 às 15h:45, com o enchimento da bacia. O fundo da bacia, coincidente com a superfície topográfica no leito do rio foi ligeiramente rebaixado, de forma a poder existir uma altura de água na bacia, de cerca de 20 cm, durante o ensaio. O caudal inicial fixou-se em 22 m³/h, tendo sido regulado para um valor mais baixo, de 5 m³/h, necessário para manter constante a altura de água na bacia. O enchimento da bacia interrompia-se durante a noite, sendo retomado no dia seguinte. Este procedimento, relativo ao ensaio de infiltração, foi mantido durante sete dias, terminando a 11/05 pelas 16h:25. No dia 08/05 às 9h:35 iniciou-se a infiltração do traçador na bacia. A monitorização do nível nos piezómetros foi feita pelas sondas multiparamétricas e também manualmente para se poder acompanhar a evolução dos ensaios. A recolha de amostras destinadas à análise química e à medição de parâmetros *in situ* era realizada 2

a 4 vezes por dia. A monitorização do nível de água e registo de condutividade eléctrica a diferentes profundidades também se realizou num pequeno piezómetro localizado no interior da bacia.



Figura 6 – Pormenor da bacia de infiltração (Sul) de Carreiros, antes e durante a realização do ensaio de infiltração



Figura 7 – Colocação do traçador (NaCl) na bacia de infiltração de Carreiros

4.2 Análise dos resultados obtidos (quantidade)

A estimativa dos valores relativos às taxas de infiltração na bacia sul foi realizada de três formas distintas:

1ª) Regulou-se um volume de água descarregado para o interior da bacia, necessário para manter constante uma altura de água de 20 cm, durante o dia, de 5 m³/h ou 120 m³/d; designou-se este valor de caudal de estabilização, que dividido pela área da bacia fornece uma primeira indicação da taxa de infiltração durante o ensaio.

2ª) Medição da descida do nível de água num pequeno piezómetro, instalado no interior da bacia, durante o período da noite, em que o ensaio era interrompido. A taxa de infiltração média foi estimada através da descida do nível em função do intervalo de tempo (durante 5 noites).

3ª) Medição da subida do nível da água no pequeno piezómetro durante o enchimento da bacia, com caudal de 20,2 m³/h. A comparação destes dois valores pode ser útil para estimar a taxa de infiltração durante o enchimento da bacia.

O volume de água infiltrado na bacia, durante o ensaio de recarga foi de 120 m³/dia (*i.e.* 5 m³/h) para uma área total, inicialmente estimada em 100 m². Assim, dividindo pela área da bacia a taxa de infiltração estimada foi de 1,20 m/dia.

Valores semelhantes foram obtidos pelo registo efectuado no pequeno piezómetro, de 1,81, 1,36 e 0,66 m/dia, variando de acordo com a carga hidráulica existente que exerce pressão e incrementa a taxa de infiltração (cf. Quadro 1).

A bacia de infiltração é formada por duas partes, uma subterrânea, preenchida por cascalho grosso e outra, acima da superfície. A área das duas partes é ligeiramente diferente uma vez que a bacia escavada em profundidade têm uma ligeira inclinação, especialmente nas paredes perpendiculares ao leito do rio, reduzindo um pouco a sua área subterrânea. A área da bacia acima da superfície foi medida em 88 m²; em profundidade foi estimada da seguinte forma: dividindo o caudal de estabilização (120 m³/d) pela taxa de infiltração (1,8 m/d) chegou-se a um valor de 67 m² para a área.

Quadro 1 – Taxas de infiltração estimadas durante os ensaios de infiltração realizados na bacia sul de Carreiros, com base nos registos de variação da altura de água no pequeno piezómetro

| Dias | Tempo (h) | Carga hidráulica (m) ⁽¹⁾ | Taxa de infiltração média (cm/h) | Taxa de infiltração média (m/d) |
|------------------------|-----------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 03 a 04 e 07 a 11 Maio | 12,6 | variável (de 4.69 a 3,54) | 7,53 | 1,81 |
| 04 a 07 Maio | 63 | variável (de 4.58 a 0,90) | 5,70 | 1,36 |
| 11 a 18 Maio | 168 | variável (de 4.71 a 0) | 2,75 | 0,66 |

⁽¹⁾ cf. Figura 8 e Figura 10.

A Figura 8 apresenta a subida do nível de água medida no piezómetro, durante três dias para a bacia subterrânea, e apenas num dos dias para a bacia à superfície. Calcularam-se taxas de enchimento para ambas as bacias. A comparação destes valores, convertidos para volumes de água colocados na bacia com o caudal de enchimento da bacia, de 22 m³/h, permitiu inferir sobre a taxa de infiltração. No caso da bacia subterrânea, não foi possível por esta análise determinar este valor porque o volume calculado foi superior ao volume colocado na bacia, i.e., considerando o valor mais baixo de enchimento de 0,53 m/d×área da bacia (67m²) = 35 m³/dia. No caso da bacia à superfície, o valor de enchimento de 0,16 m/h×área da bacia (88 m²) = 24 m³/d, o que daria uma taxa de infiltração de 1,8 m/d.

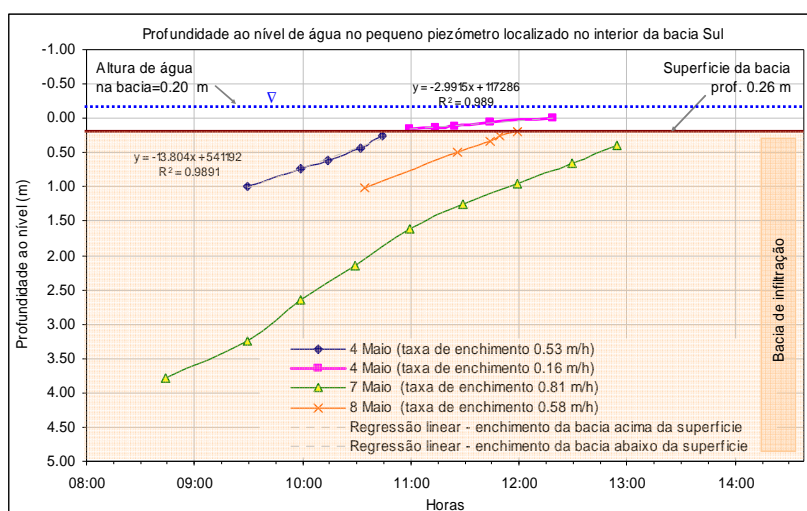


Figura 8 – Profundidade ao nível de água registada no pequeno piezómetro colocado no interior da bacia durante o ensaio de infiltração

Os valores de porosidade foram também estimados com base no volume total da bacia e no volume de vazios que corresponde ao volume de água colocado na bacia, desde o início do ensaio até aparecer à superfície do solo. Ambos os valores variam em cada dia de ensaio porque a profundidade ao nível registada no interior da bacia, no início de cada ensaio é diferente, sendo necessariamente também variável o volume de água necessário colocar na bacia até esta encher. Estes valores são apresentados no Quadro 2. Os valores de porosidade foram calculados considerando duas áreas da bacia, a inicialmente calculada de 120 m² e a deduzida posteriormente de 67 m², partindo do

pressuposto de que realmente a área da bacia seria mais baixa. Os valores de porosidade média foram, para o 1º caso de 0,22 e para o 2º caso de 0,40. Este último valor de porosidade parecer ser bastante mais credível, conhecendo-se já o valor da porosidade do cascalho de enchimento da bacia de 0,41, determinado em laboratório.

Quadro 2 – Estimativa da porosidade da bacia subterrânea

| Dia do ensaio | Vt (área 120 m ²) (m ³) | Vt (área 67 m ²) (m ³) | Vv (m ³) | n1 | n2 |
|---------------|---|--|----------------------|------|------|
| 3 Maio | 544 | 304 | 117 | 0,22 | 0,39 |
| 4 Maio | 120 | 67 | 28 | 0,23 | 0,41 |
| 7 Maio | 454 | 253 | 95 | 0,21 | 0,38 |
| 8 Maio | 112 | 62 | 28 | 0,25 | 0,44 |
| 9 Maio | 125 | 70 | 28 | 0,22 | 0,40 |
| Média | | | | 0,22 | 0,40 |

Vt (120 m² área) = Volume da bacia no respectivo dia do ensaio, considerando a estimativa inicial da área da bacia de 120 m² e o valor registado de profundidade ao nível no pequeno piezómetro, localizado no interior da bacia.

Vt (67 m² área) = Volume da bacia no respectivo dia do ensaio, considerando a estimativa da área da bacia de 67 m² e o valor registado de profundidade ao nível no pequeno piezómetro, localizado no interior da bacia.

Vv = Volume de água colocado na bacia desde o início do enchimento até atingir a superfície do solo, no respectivo dia do ensaio (considerando Q=22 m³/h).

n1 = Vv/Vt = Porosidade estimada considerando a área da bacia inicial de 120 m².

n2 = Vv/Vt = Porosidade estimada considerando a área da bacia calculada de 67 m².

Por fim, analisou-se a piezometria medida nos piezómetros LNEC1, LNEC2 e LNEC3, durante o ensaio e concluiu-se o seguinte (Figura 9): em relação ao LNEC1, aberto no aquífero freático e situado a jusante da bacia, é claramente influenciado pelos eventos de infiltração de água na bacia; o LNEC2, pelo contrário, não sofre influência significativa nem da extracção no LNEC3 (situado mesmo ao lado) nem da bacia, apesar de estar localizado para jusante, a proximidade entre ambos deveria provocar, caso estivesse aberto no aquífero mais superficial, algum efeito na piezometria, o que não se verifica. Relativamente ao LNEC3, aberto no aquífero confinado, apenas se representaram na Figura 9 os valores da piezometria correspondentes à recuperação do furo após os ensaios diários de extracção de água, destinada ao enchimento da bacia.

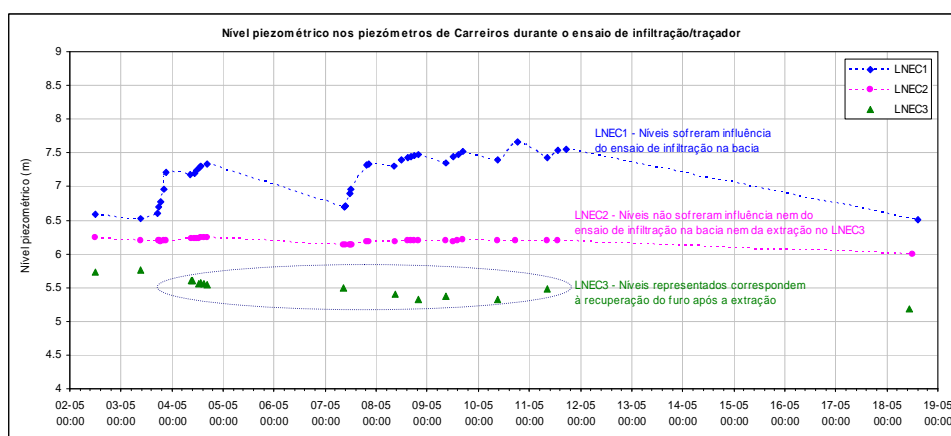


Figura 9 – Níveis piezométricos registados nos piezómetros (LNEC1, LNEC2, LNEC3) de Carreiros, durante o ensaio de infiltração/traçador na bacia Sul

4.3 Análise dos resultados obtidos no ensaio de traçador (qualidade da água)

Um dos resultados obtidos durante o ensaio de traçador foi a curva de chegada do NaCl ao LNEC1, traduzida pela variação da condutividade eléctrica e da concentração de Cl⁻ (cf. Figura 10).

Neste gráfico está também projectada a variação da profundidade ao nível da água registada no mesmo piezómetro. Esta curva permitiu estimar o tempo de chegada de uma partícula de traçador, desde a superfície da bacia de infiltração, atravessando cerca de 5 m de material de cascalho grosseiro do preenchimento da bacia, por escoamento vertical e cerca de 2,5 m em material arenoso até ao piezómetro, na zona saturada. Os valores de porosidade de ambos os materiais, determinados previamente em laboratório, foram 41% e 35%, respectivamente. O tempo de percurso total foi de 29 h até se ter detectado o início da subida da curva e de 66 h até se ter detectado o valor máximo ou o pico de chegada do traçador. O traçador move-se como resultado da advecção, causada pelo escoamento subterrâneo, mas é a dispersão hidrodinâmica (causada pela difusão molecular e a dispersão mecânica) que produz a curva que se obtém. Outro processo que afecta o transporte no meio subterrâneo seria o retardamento, causado pela adsorção, mas que neste caso não se aplica porque idealmente o traçador usado é conservativo, não interagindo com o meio envolvente. Então a velocidade intersticial (V_i) estimada foi de 2,73 m/d para uma distância total de 7,5 m e um tempo percorrido de 66 h. A velocidade de Darcy (V_D) foi estimada através da seguinte expressão: $V_D = V_i \times n_e$ (em que n_e é a porosidade eficaz). Separando a V_D para a 1ª parte do trajecto (bacia) e 2ª parte do trajecto (zona saturada) têm-se 1,12 m/d e 0,96 m/d, respectivamente. Esta separação das velocidades deve-se à presença de materiais com diferentes valores de porosidade. A permeabilidade ($k = V_D / i$) na zona saturada estimou-se em 2,82 m/d, assumindo um gradiente (i) entre o LNEC1 e o pequeno piezómetro, colocado no interior da bacia, de 0,34².

De salientar que os valores calculados correspondem ao escoamento influenciado, por efeito de um ensaio de recarga artificial e não ao escoamento natural, estando por este motivo sobrestimados em relação aos valores reais.

A avaliação do ensaio de traçador, em termos de qualidade da água, foi completada com a recolha de amostras de água nos três piezómetros e na água da bacia, para medição dos parâmetros físico-químicos *in situ* e posterior análise química de aniões maiores. Os resultados mais relevantes para esta análise estão apresentados na Figura 11, para as concentrações de Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} e condutividade eléctrica. A influência do ensaio de traçador é nitidamente assinalada no LNEC1, não só por se localizar para jusante da bacia mas também por estar aberto no aquífero freático, a uma profundidade de cerca de 4,5 m. O LNEC2, localizado para montante da bacia, não evidencia a influência do ensaio de traçador. Contudo, os aniões analisados sofrerem um ligeiro decréscimo durante a infiltração de água na bacia, para voltarem, após terminada a influência do ensaio, aos valores iniciais. A água da bacia era proveniente do LNEC3, pelo que a composição das duas águas é muito semelhante, exceptuando o período curto de dissolução do traçador na água da bacia, altura em que a concentração de Cl^- atinge os 218 mg/L e a condutividade eléctrica 4280 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Estes valores máximos estão abaixo dos que seriam de esperar conhecendo a quantidade de NaCl adicionado à bacia, o que se deve ao facto da recolha desta amostra ter um desfaseamento de cerca de 2,5 horas relativamente à altura de colocação do traçador. Por outro lado, também a sua elevada taxa de dissolução na água da bacia e maior densidade da água salobra resultante facilitam a rápida infiltração do traçador nos materiais que constituem a bacia e percolação em profundidade.

4.4 Aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica durante o ensaio de traçador

A análise do caso de estudo de Carreiros, durante o ensaio de traçador, foi aprofundada recorrendo-se à aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica. As campanhas de geofísica e a interpretação dos resultados obtidos foram realizadas pelo Núcleo de Geologia de Engenharia e

² O gradiente determinou-se entre o LNEC1 e o pequeno piezómetro instalado na bacia. A distância entre ambos é de 6.60 m e a diferença de nível entre os dois de 2.25 m. A altura de água no piezómetro era de 20 cm acima do solo, sendo este valor correspondente também ao rebaixamento que se efectuou na superfície da bacia. Assim, o nível de água no piezómetro coincide com a superfície topográfica. A profundidade ao nível no piezómetro era de 2.25 (3.7-1.45 m). Logo o gradiente hidráulico calculou-se em 0.34.

Geotecnia Ambiental do Departamento de Geotecnia do LNEC, no âmbito do Projecto Gabardine. Mais detalhes sobre este estudo encontram-se em Mota (2007) e Mota *et al.* (2008).

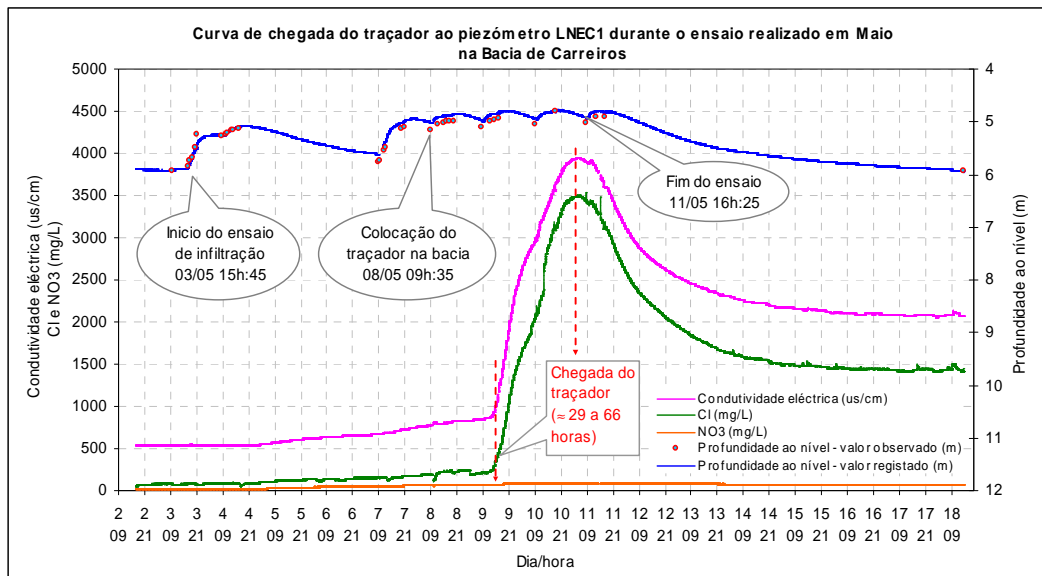


Figura 10 – Parâmetros de qualidade da água (condutividade eléctrica, concentrações de Cl^- e NO_3^-) e profundidade ao nível monitorizados no piezômetro LNEC1 durante o ensaio de traçador na bacia de infiltração de Carreiros

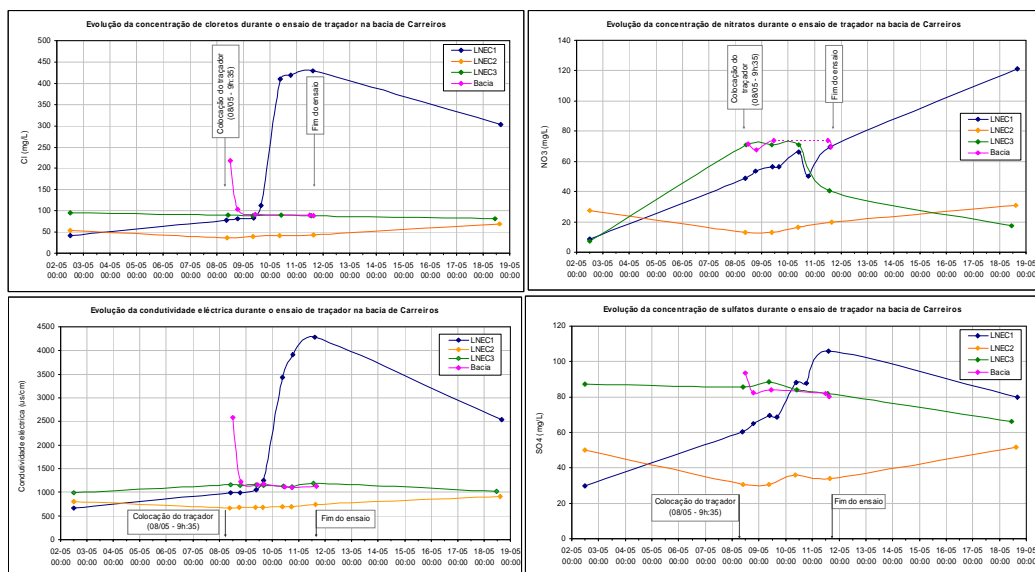


Figura 11 – Evolução de parâmetros de qualidade da água durante o ensaio de traçador na bacia de Carreiros

O principal objectivo consistiu em determinar, pela análise das tomografias resultantes de vários perfis de resistividades eléctrica, o sentido de escoamento subterrâneo na zona circundante das bacias de infiltração do leito do rio através da detecção e acompanhamento ao longo do tempo do traçador salino. A situação de referência, antes da realização do ensaio de infiltração, foi caracterizada no final de Janeiro de 2007. Nessa altura foram realizados os primeiros cinco perfis, um longitudinal e quatro transversais ao leito do rio (Perfil I a V). Em Maio, a situação de referência foi de novo representada pouco antes da realização do ensaios. Durante a realização do ensaio de infiltração e de traçador, entre os dias 4 e 11 deste mês, foram repetidas as leituras dos perfis para diferentes intervalos de tempo. Dois novos alinhamentos (Perfil VI e VII) foram incluídos com o objectivo de detectar uma

eventual migração da anomalia de baixa resistividade devida à injeção do traçador, para W ou E do rio Seco. Foram realizados no seu conjunto 7 perfis de resistividade eléctrica com dispositivo Dipolo-Dipolo, localizados na Figura 12, seguindo os alinhamentos que se apresentam no Quadro 3. No conjunto foram realizados 30 perfis, seguindo os alinhamentos referidos. Contudo, foi seleccionado o perfil longitudinal, ao longo do leito do rio, que atravessa as duas bacias (Perfil I), para se proceder à repetição da leitura em intervalos de tempo consecutivos – cerca de 12 horas - durante o ensaio de traçador. A identificação dos perfis com a designação de Perfil I ao Perfil VII, incluiu a data e hora de realização do mesmo.



Figura 12 – Localização dos sete perfis de resistividade eléctrica realizados no caso de estudo de Carreiros (Mapa de base retirado do Google Earth) (extraído de Mota, 2007)

Quadro 3 – Localização dos perfis de resistividade eléctrica e alinhamentos direccionais

| Perfil de resistividade eléctrica | Alinhamento | Localização |
|-----------------------------------|-------------|--|
| Perfil I | NNW-SSE | Longitudinal, ao longo do leito do rio |
| Perfil II | NW-SE | Transversal ao leito do rio, a montante das bacias |
| Perfil III | ENE-WSW | Transversal ao leito do rio, intersecta a bacia Norte |
| Perfil IV | NE-SW | Transversal ao leito do rio, intersecta a bacia Sul |
| Perfil V | ENE-WSW | Transversal ao leito do rio, intersecta o piezómetro LNEC1 |
| Perfil VI | NNW-SSE | Longitudinal, margem esquerda |
| Perfil VII | NNW-SSE | Longitudinal, margem direita |

A execução dos perfis geoelectricos foi realizada com o equipamento *Lund Imaging System* da ABEM, um sistema automático composto por 4 cabos multi-condutores e 41 eléctrodos de aço, pelo módulo LUND ES464 e pelo resistivímetro ABEM *Terrameter* SAS 4000. A inversão dos dados obtidos, ou seja, a obtenção das tomografias geoelectricas, foi efectuada utilizando o programa Res2Dinv v3.51. Optou-se por utilizar o dispositivo Dipolo-Dipolo devido à presença de elevados contrastes laterais e à influência da topografia na zona próxima das bacias de infiltração. Todos os perfis foram realizados com uma distância dipolar de 3 m, o que dá um total de 120 m de comprimento para cada perfil, 40 dipolos e uma profundidade máxima de investigação de 16 m.

Os modelos de resistividade utilizam a mesma escala graduada de cores, para facilitar a comparação de resultados. Considerou-se que o nível zero da superfície topográfica corresponderia à superfície do leito do rio e que todos os perfis foram realizados com os números de eléctrodos crescentes na direcção sul ou este. O Quadro 4 apresenta e descreve todas as leituras efectuadas nos alinhamentos referidos. O modelo de resistividade eléctrica resultante neste perfil, que se apresenta na

Figura 13, corresponde à situação de referência (Janeiro de 2007) e contém a localização dos piezómetros LNEC e de outros perfis de resistividade que cruzam este alinhamento N-S. A Figura 15 mostra a sequência dos modelos de resistividades eléctricas obtidos para este perfil. Os resultados obtidos nos perfis transversais ao leito do rio (Perfil II a V), correspondentes à situação inicial, podem observar-se na Figura 14.

Quadro 4 – Perfis de resistividade eléctrica realizados em Carreiros, antes, durante e após o ensaio de infiltração/traçador

| Data - Hora | Perfis realizados | Observações |
|--|-----------------------|--|
| 22/Janeiro | Perfis I a V | Situação de referência no período húmido |
| 02/Maio | Perfis I a V | Situação de referência no período seco – antes do enchimento da bacia |
| 04/Maio | Perfis I, III, IV e V | Após o 1º enchimento da bacia – situação de referência com a bacia saturada |
| 07/Maio | Perfis I, IV e V | Após o 2º enchimento da bacia – situação de referência com a bacia saturada, no dia anterior ao do ensaio |
| 08/Maio – 10h:55 08/Maio – 17h:15 09/Maio – 8h:30 09/Maio – 16h:31 10/Maio – 8h:35 10/Maio – 17h:00 11/Maio – 14h:00 | Perfil I | Após a colocação do traçador (no dia 08/05 às 9h:00), as medições foram efectuadas sensivelmente de 12 em 12 horas, durante três dias de ensaio, com a bacia saturada e uma altura de água de 20 cm. |
| 09/Maio | Perfil V | Um dia após a colocação do traçador, com a bacia saturada |
| 10/Maio | Perfil VI | Dois dias após a colocação do traçador, com a bacia saturada |
| 11/Maio | Perfil VI, VII | Três dias após a colocação do traçador, com a bacia saturada |
| 18/Maio | Perfil I, V, VI | Dez dias após a colocação do traçador (bacia já sem água) |

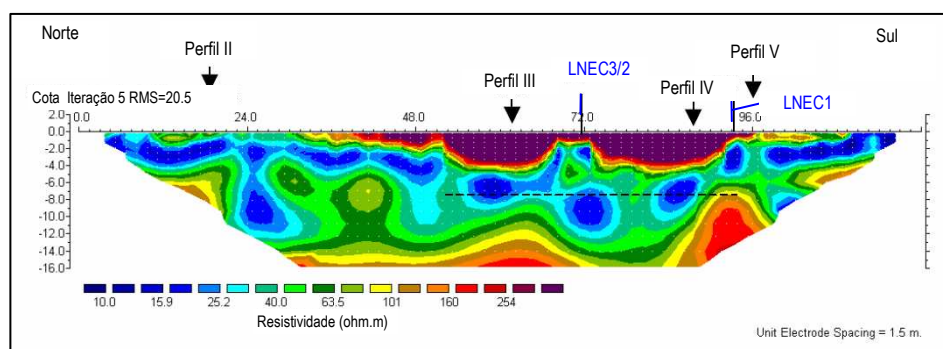


Figura 13 – Modelo de resistividade eléctrica obtido para o Perfil I, correspondente à situação de referência (Janeiro de 2007), localização dos piezómetros LNEC e de outros perfis de resistividade que cruzam este alinhamento N-S. A linha marcada a tracejado indica a base das bacias prevista no projecto (adaptado de Mota, 2007)

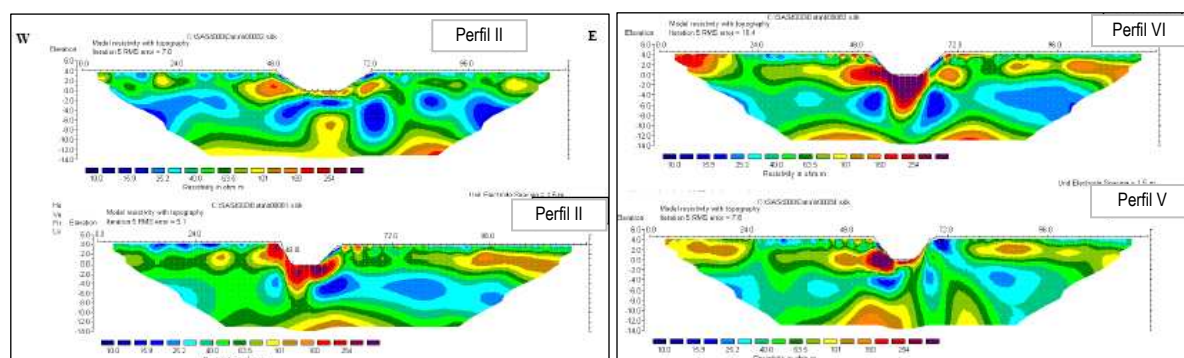


Figura 14 – Modelos de resistividade eléctrica obtidos para os perfis transversais ao leito do rio (Perfis II a V), correspondentes à situação de referência (Janeiro de 2007) (adaptado de Mota, 2007)

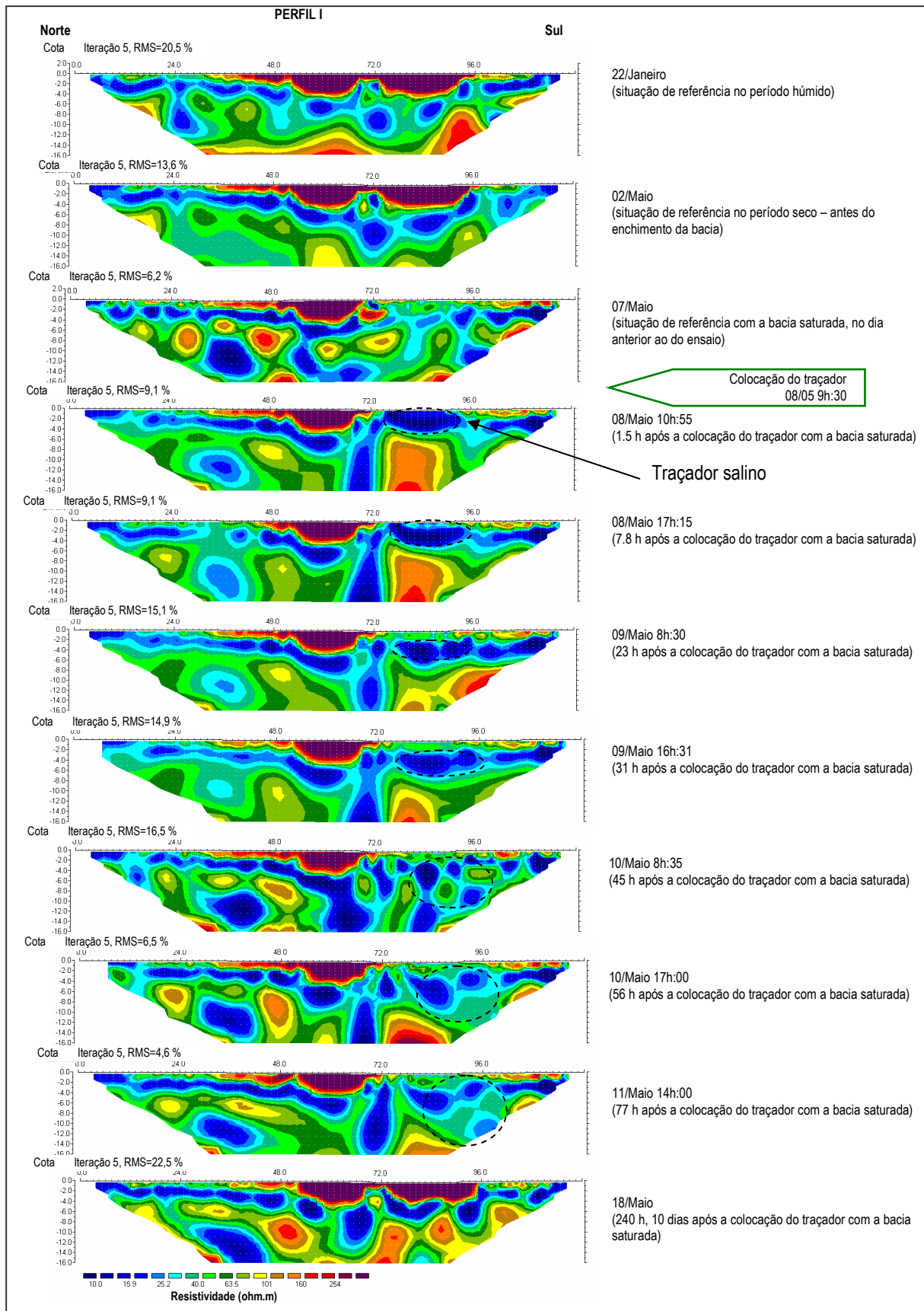


Figura 15 – Modelos de resistividade eléctrica obtidos no Perfil I, antes, durante e após o ensaio de traçador na bacia de infiltração do leito do rio Seco, em Carreiros (modificado de Mota, 2007)

As principais conclusões do estudo de geofísica pelo método da resistividade eléctrica, apontadas em Mota (2007) e Mota *et al.* (2008), são as seguintes:

- Clara identificação das bacias de infiltração e da sua geometria, caracterizadas por uma anomalia de elevada resistividade eléctrica, devido à presença de vazios. A saturação da bacia sul a 7 de Maio transformou esta anomalia numa outra de baixa resistividade, devido à presença de água nos vazios entre o cascalho;
- Deslocação de uma anomalia de baixa resistividade eléctrica, localizada entre as coordenadas 75 e 93 do Perfil I de 7 de Maio para uma anomalia menor, em torno da coordenada 96 a 18 de Maio. Esta anomalia é devida à presença do traçador salino, e desloca-se de norte para sul e em profundidade;
- Identificação de uma anomalia vertical de baixa resistividade no Perfil I (coordenada 72), a qual se correlaciona com o fluxo de água provocado pela bombagem, entre os dias 8 e 11 de Maio, mais evidente após extracção superior a 24 h (após 3 de Maio);
- Após sete dias desde o início do ensaio, a bacia sul retoma a configuração da situação de referência. Contudo não foi possível, pela análise geofísica, determinar o momento exacto desta ocorrência, o que daria uma indicação da taxa de infiltração das formações subjacentes à bacia.

5 - CONCLUSÕES

Diversos ensaios de recarga artificial foram realizados no âmbito do Projecto Gabardine no aquífero superficial da Campina de Faro. Neste artigo seleccionaram-se as experiências realizadas no caso de estudo de Carreiros, em duas bacias de infiltração construídas numa secção do rio Seco, preenchidas por cascalho grosseiro até à superfície, que promovem a infiltração da água do rio. Foi demonstrado neste artigo que este tipo de estruturas poderiam constituir uma forma viável de contribuição para a reabilitação da qualidade da água no aquífero superficial da Campina de Faro, através da recarga artificial do escoamento superficial do rio, que constitui assim uma importante fonte de água alternativa para a recarga. Complementarmente foi realizado um ensaio de traçador numa das bacias de infiltração, que permitiu estimar uma boa eficiência da estrutura de recarga, em termos de taxas de infiltração. Possibilitou também a estimativa de parâmetros hidráulicos como velocidades de escoamento e permeabilidade das formações do aquífero. A detecção da pluma salina pelo método de resistividade eléctrica apresenta uma relação favorável comparativamente com os registos da monitorização das águas subterrâneas, permitindo assinalar a sua migração espacial e temporal, durante a realização do ensaio de traçador na bacia. O objectivo dos ensaios realizados consistiu em determinar a aplicabilidade das diferentes metodologias de recarga artificial de aquíferos de forma que os resultados obtidos possam contribuir para a elaboração de um sistema de apoio à decisão. A sua aplicação permitirá a selecção das técnicas mais adequadas em função da maximização da melhoria da qualidade da água e minimização dos custos totais. Esta investigação estará em desenvolvimento até final de 2008, pelo que se prevê a publicação de resultados mais conclusivos em futuros artigos temáticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento no âmbito do Projecto Gabardine - *Groundwater artificial recharge based on alternative sources of water: advanced integrated technologies and management*, pelo 6º Programa Quadro de Investigação, Desenvolvimento Tecnológico e Demonstração da União Europeia (*Specific Targeted Research Project*, Contrato nº 518118, Gabardine Project site <http://www.gabardine-fp6.org/>). No LNEC (Portugal), a equipa do Projecto Gabardine contou com a colaboração, durante os primeiros 18 meses, de: Doutor J.P. Lobo-Ferreira, Dr^a. Catarina Diamantino, Doutor Manuel Oliveira, Doutora Teresa Leitão, Dr^a. Maria João Moinante, Dr^a. Maria José Henriques, Dr. Albino Medeiros, Dr. Nuno Charneca, Doutor Rogério Mota e Doutora Marília Oliveira. O primeiro

autor agradece o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no âmbito de uma Bolsa de Doutoramento.

BIBLIOGRAFIA

DIAMANTINO C.; LOBO-FERREIRA, J.P.; LEITÃO T. (2007). "Artificial aquifer recharge experiments in the Portuguese Campina de Faro Case-Study area", in *Proceedings XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems*, Lisboa, Editado por Ribeiro, L., Chambel, A., Condoso de Melo, M.T., 17 - 21 Setembro, 10 pp.

LOBO-FERREIRA J.P. (2007). "First year achievements of GABARDINE Project in Portugal", in *Seminário sobre Águas Subterrâneas*, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 1-2 Março, 10 pp.

LOBO-FERREIRA, J.P.C; DIMITRIADIS, K.; STYLLAS, M.; DIAMANTINO, C.; LEITÃO, T.E.; HENRIQUES, M.J.; OLIVEIRA, M.M.; MOTA, R.; ANAGNOSTOPOULOU, C.; TOLIKA, K.; SANCHEZ-VILA, X.; BARBIERI, M.; BENSABAT, J.; HADAD, A.; RABI, A.; TAMIMI, A.R. (2007). "Gabardine Project - Deliverable D54. Results of the field investigations". 53 pp. (*aguarda edição*).

MOTA, R. (2007). "Time-lapse resistivity tomography with a saline tracer for the Gabardine Project in Carreiros, Faro". Lisboa, LNEC, Relatório 325/2007 DG-NGEA.

MOTA, R.; MONTEIRO dos SANTOS, F.; DIAMANTINO, C.; LOBO-FERREIRA, J.P. (2008). "Evolução temporal da resistividade eléctrica aplicada a estudos ambientais e hidrogeológicos", in *XI Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, 7 – 11, 10 pp.