



**Joel Filipe Correia Zeferino**

Licenciado em Engenharia Geológica

**Modelação numérica (FEFLOW) e contaminação por  
intrusão salina do sistema aquífero Mio-Pliocénico do  
Tejo, na frente ribeirinha do Barreiro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Geológica

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria Manuela Malhado Simões Ribeiro,  
Prof. Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Co-orientador: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho,  
Prof. Auxiliar, Faculdade de Ciências da UL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Carlos Ribeiro Kullberg

Arguente: Prof. Doutora Maria Catarina Rosalino da Silva

Vogal: Prof. Doutora Maria Manuela Malhado Simões Ribeiro



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março 2016**



UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências da Terra

**Modelação numérica (FEFLOW) e contaminação por  
intrusão salina do sistema aquífero Mio-Pliocénico do Tejo,  
na frente ribeirinha do Barreiro**

**Joel Filipe Correia Zeferino**

Licenciado em Engenharia Geológica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Geológica

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria Manuela Malhado Simões Ribeiro

Co-orientador: Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho

**Março 2016**



## **MODELAÇÃO NUMÉRICA (FEFLOW) E CONTAMINAÇÃO POR INTRUSÃO SALINA DO SISTEMA AQUÍFERO MIO-PLIOCÉNICO DO TEJO, NA FRENTE RIBEIRINHA DO BARREIRO**

“© Copyright” em nome de Joel Filipe Correia Zeferino, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho não seria possível sem o contributo de várias pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, estão ligadas a realização desta dissertação e ao culminar da minha jornada académica, as quais não posso deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos, dedicando-lhes as seguintes palavras:

À Professora Doutora Maria Manuela Simões a quem devo este especial gosto pela hidrogeologia, obrigado pela sua preciosa orientação, sugestão do tema, por estar sempre disponível para o mais pequeno esclarecimento, por todos os concelhos, incentivos e críticas ao trabalho desenvolvido, mas também pela sua amizade a qual muito estimo e agradeço.

À Professora Doutora Rosário Carvalho por ter aceitado ser minha coorientadora e por me ter recebido de braços abertos na sua instituição, agradeço por partilhar comigo os seus conhecimentos na área da modelação, por todo o apoio concedido, boa disposição e simpatia.

À Câmara Municipal do Barreiro, Divisão de Águas e Saneamento do Departamento de Águas e Resíduos, agradeço a cedência de dados. Ao Engenheiro David Cabanas agradeço a essencial colaboração na disponibilização da documentação necessária que enriqueceu este trabalho.

Ao DHI GROUP e sua representante Cecília Correia por facultar a licença de utilizador do software FEFLOW e pela rápida e atenciosa resposta a todas as dúvidas colocadas.

Ao Departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL, aos seus docentes e não docentes, pelos conhecimentos transmitidos ao longo destes anos que contribuíram para a minha formação académica, pela capacidade de motivação, total disponibilidade e profissionalismo de todos os elementos desta casa que me fizeram crer que esta foi uma escolha acertada.

Aos meus colegas e amigos que tive o prazer de conhecer no começo desta jornada, ao Mário, Pimenta, Inês, Sousa, Pedro e Jorge, obrigado por todo o apoio, por todos os momentos que passámos juntos durante estes cinco anos, momentos que nunca esquecerei.

A todos os que não foram aqui referidos cujo contributo foi importante não só para o meu percurso académico mas também para a minha formação a nível pessoal.

E por último não posso deixar de agradecer à minha família, em especial aos meus pais, ao meu irmão e aos meus avós, pelo apoio incondicional, carinho, compreensão e por fazerem de mim aquilo que sou hoje. A eles dedico-lhes esta dissertação, retribuindo todo o esforço e sacrifício pelo qual passaram e porque sem eles nunca teria aqui chegado, o meu muito obrigado!



## RESUMO

O município do Barreiro é autossustentável no abastecimento de água, que extrai exclusivamente de captações subterrâneas. As necessidades hídricas para consumo humano, indústria e agricultura são correspondidas com recurso à elevada disponibilidade do sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado. Neste concelho, existe conexão hidráulica entre o aquífero e as águas do Tejo, estando este sujeito a fenómenos de intrusão salina na frente ribeirinha. A sobre-exploração agrava o problema e aumenta a vulnerabilidade, constituindo uma forte ameaça à sustentabilidade hídrica da região.

A área em estudo, intervencionada por obras hidráulicas e pressupondo o alargamento do Porto de Lisboa, poderá sofrer alterações no equilíbrio químico e hidrodinâmico do meio subterrâneo e substanciais avanços na cunha salina.

O aquífero Mio-Pliocénico, no setor norte do Barreiro, é um sistema multicamada complexo, constituído, essencialmente por um aquífero superficial livre e outro confinado mais profundo, separados por um aquitardo. A exploração incide principalmente no aquífero confinado, nos níveis detríticos com carbonatos do Miocénico Marinho. Os níveis piezométricos neste aquífero estão rebaixados em relação ao estuário, em consequência dos caudais extraídos na frente ribeirinha para abastecimento do complexo industrial. O regime de exploração intensivo promove drenância vertical no sentido descendente, transferindo-se águas de menor qualidade para o aquífero confinado.

O modelo numérico de fluxo subterrâneo desenvolvido para a frente ribeirinha revela uma forte zona de depressão no aquífero confinado, donde grande parte dos volumes captados deriva das camadas subjacentes ao estuário do Tejo, ainda que confinadas por níveis menos permeáveis. As linhas de fluxo regressivas calculadas para as captações F88 e F97 comprovam esta origem. As simulações efetuadas pelo FEFLOW mostram ligeiros cones de rebaixamento localizados no aquífero livre e inversão no sentido natural da drenância, dos níveis superiores para o aquífero confinado, agravando a elevada vulnerabilidade do sistema à intrusão salina reconhecida neste local.

**Palavras-Chave:** Vulnerabilidade, Contaminação salina, Modelação numérica com FEFLOW, Aquífero Mio-Pliocénico do Tejo, Frente Ribeirinha do Barreiro.



## ABSTRACT

The municipality of Barreiro is self-sustaining in water supply, obtaining its resources exclusively from groundwater wells. The water needs for human consumption, industry and agriculture are matched resorting to the high availability of the Tagus-Sado Basin aquifer system. In this county, however, there is hydraulic connection between the aquifer and the Tagus River, resulting in salt intrusion in the riverside front. The over-exploitation exacerbates this problem and increases the vulnerability of the aquifer, constituting a major threat to the hydric sustainability of the region.

The study area, undergoing hydraulic works and the potential enlargement of the Port of Lisbon, may have changes in the chemical and hydrodynamic balance of its groundwater environment and significant progress in the saline wedge.

The Mio-Pliocene aquifer in the northern sector of Barreiro is a multi-layer complex system constituted, essentially, by a superficial free aquifer and another deeper confined, separated by an aquitard. The exploitation is focused mainly on the confined aquifer in the detritic levels with carbonates of the Marine Miocene. The piezometric levels in this aquifer were highly drawn down relative to the estuary, due to water extraction on the waterfront for supplying an industrial complex nearby. The intensive water collection promotes vertical drainage downward, transferring lower quality water in to the aquifer.

The numerical flow model developed for the waterfront shows a large depression zone in the confined aquifer, where a large portion of the flow captured is drained from the underlying layers of the Tagus estuary, despite confined by semi-permeable levels. The regressive flow lines calculated for F88 and F97 abstractions support this origin. The simulations performed by the FEFLOW display small drawdown cones in the unconfined aquifer and inversion in the natural direction of the drainage, from the upper levels to the confined aquifer, aggravating the high vulnerability of the aquifer system to salt intrusion recognized in this area.

**Key-Words:** Vulnerability, Salt Intrusion, Numerical modelling with FEFLOW, Tagus Mio-Pliocene Aquifer, Barreiro waterfront.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|         |   |
|---------|---|
| 2D      | Duas Dimensões  |
| 3D      | Três Dimensões  |
| AC      | A. Cavaco   |
| APA     | Agência Portuguesa do Ambiente                                    |
| APL     | Administração do Porto de Lisboa                                  |
| ARH     | Administração da Região Hidrográfica                              |
| CMB     | Câmara Municipal do Barreiro                                      |
| CPE     | Companhia Portuguesa de Explosivos                                |
| CUF     | Companhia União Fabril  |
| DHI     | Danish Hydraulic Institute  |
| EDP     | Energias de Portugal  |
| ENE     | És-Nordeste   |
| ETAR    | Estação de Tratamento de Águas Residuais                          |
| ETP     | Evapotranspiração Potencial                                       |
| ETR     | Evapotranspiração Real  |
| FCT-UNL | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa |
| FEFLOW  | Finite Element subsurface FLOW system                             |
| FEM     | Método dos elementos finitos                                      |
| FR      | Furágua   |
| IGME    | Instituto Geológico y Minero de España                            |
| INAG    | Instituto Nacional da Água  |
| LNEG    | Laboratório Nacional de Energia e Geologia                        |
| MDT     | Modelo Digital de Terreno   |
| N       | Norte   |
| NE      | Nordeste  |
| NHD     | Nível Hidrodinâmico   |
| NHE     | Nível Hidrostático  |
| NNE     | Nor-Nordeste  |
| NNW     | Nor-Noroeste  |
| NW      | Noroeste  |
| PEB     | Parque Empresarial do Barreiro                                    |
| PETI3+  | Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas               |
| PNUD    | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento                 |
| PPA     | Perímetro de Proteção Alargado                                    |
| RA      | Renato Azenha   |
| S       | Sul   |
| SNIRH   | Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos               |
| SE      | Sudeste   |
| SSE     | Su-Sudeste  |
| SSW     | Su-Sudoeste   |
| SW      | Sudoeste  |
| TCB     | Terminal de Contentores no Barreiro                               |
| TIN     | Rede Triangular Irregular   |
| TTT     | Terceira Travessia do Tejo  |
| UFA     | União Fabril do Azoto   |
| USGS    | United States Geological Survey                                   |
| VMA     | Valores Máximos Admissíveis                                       |
| VMR     | Valores Máximos Recomendáveis                                     |
| W       | Oeste   |
| WSW     | Oés-Sudoeste  |
| ZH      | Zero Hidrográfico   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| b               | Espessura Saturada (m)   |
| Ca              | Cálcio (mg/l)  |
| Cl              | Cloretos (mg/l)  |
| CE              | Condutividade Elétrica (uS/cm)                                       |
| C <sub>s</sub>  | Concentração máxima de cloretos na água (mg/l)                       |
| C <sub>0</sub>  | Valor referência para a concentração de cloretos na água doce (mg/l) |
| D               | Dureza (mg/l)  |
| h               | Altura piezométrica (m)  |
| h <sub>SL</sub> | Elevação da água doce sobre o nível médio do mar (m)                 |
| K               | Condutividade hidráulica (m/dia)                                     |
| Mg              | Magnésio (mg/l)  |
| NO <sub>3</sub> | Nitratos (mg/l)  |
| Q <sub>e</sub>  | Caudal de ensaio (l/s)   |
| Q <sub>s</sub>  | Caudal específico (l/s/m)  |
| S               | Rebaixamento (m)   |
| S <sub>s</sub>  | Coefficiente de armazenamento específico                             |
| T               | Transmissividade (m <sup>2</sup> /dia)                               |
| Z               | Posição da interface água doce/água salgada em profundidade (m)      |
| α               | Relação entre a densidade da água doce e água salgada                |
| ε <sub>e</sub>  | Porosidade eficaz  |
| ρ               | Densidade (kg/m <sup>3</sup> )                                       |
| ρ <sub>0</sub>  | Densidade da água doce (kg/m <sup>3</sup> )                          |
| ρ <sub>s</sub>  | Densidade da água salgada (kg/m <sup>3</sup> )                       |
| cm              | Centímetros  |
| h               | Horas  |
| ha              | Hectares   |
| km              | Quilómetros  |
| l               | Litros   |
| m               | Metros   |
| mg              | Miligramas   |
| mm              | Milímetros   |
| s               | Segundos   |
| uS              | Microsiemens   |
| °C              | Graus Celsius  |

# ÍNDICE DE MATÉRIAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Enquadramento do tema .....   | 1         |
| 1.2. Problemática hídrica regional e objetivos do estudo .....           | 3         |
| 1.3. Organização do trabalho .....                                       | 5         |
| <b>2. ÁREA DE ESTUDO .....</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1. Enquadramento geográfico .....                                      | 7         |
| 2.2. Enquadramento geológico .....                                       | 8         |
| 2.2.1. Geomorfologia e Litoestratigrafia .....                           | 8         |
| 2.2.2. Tectónica e Neotectónica.....                                     | 11        |
| 2.3. Enquadramento hidrológico e hidrogeológico.....                     | 12        |
| 2.3.1. Estuário do Tejo.....   | 12        |
| 2.3.2. Clima .....   | 14        |
| 2.3.3. Sistema aquífero do Tejo, Margem Esquerda.....                    | 15        |
| 2.4. Intervenções no estuário e alterações ao equilíbrio do sistema..... | 17        |
| 2.4.1. Obras portuárias.....   | 17        |
| 2.4.2. Frente ribeirinha e acessos marítimos.....                        | 18        |
| 2.4.3. Intervenções e alterações previstas no estuário .....             | 19        |
| 2.4.4. Identificação dos potenciais impactes relevantes .....            | 20        |
| <b>3. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>                        | <b>23</b> |
| 3.1. Metodologia.....  | 23        |
| 3.2. Fundamentos teóricos .....  | 25        |
| 3.2.1. Intrusão salina e gestão de aquíferos costeiros .....             | 25        |
| 3.2.2. Modelação de águas subterrâneas.....                              | 27        |
| 3.2.3. Modelação da intrusão salina (FEFLOW).....                        | 28        |
| <b>4. ANÁLISE DE DADOS .....</b>   | <b>31</b> |
| 4.1. Dados inventariados.....  | 31        |
| 4.1.1. Dados da CMB .....  | 31        |
| 4.1.2. Dados do SNIRH.....   | 32        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.1.3.    | Dados do LNEG .....  | 33        |
| 4.2.      | Caraterização hidroquímica .....                               | 34        |
| 4.3.      | Caraterização hidrológica .....                                | 37        |
| 4.3.1.    | Modelo Digital de Terreno (MDT).....                           | 37        |
| 4.3.2.    | Modelo hidrológico .....                                       | 39        |
| 4.4.      | Caraterização geológica .....                                  | 40        |
| <b>5.</b> | <b>MODELO CONCEPTUAL DO SISTEMA AQUÍFERO .....</b>             | <b>45</b> |
| 5.1.      | Unidades hidrogeológicas.....                                  | 45        |
| 5.2.      | Transmissividade e condutividade hidráulica .....              | 47        |
| 5.3.      | Funcionamento hidráulico .....                                 | 51        |
| <b>6.</b> | <b>MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO .....</b>              | <b>55</b> |
| 6.1.      | Definição do problema.....                                     | 55        |
| 6.2.      | Desenvolvimento da malha do modelo.....                        | 55        |
| 6.2.1.    | Definição da área .....  | 55        |
| 6.2.2.    | Geração da malha .....   | 56        |
| 6.2.3.    | Discretização espacial vertical.....                           | 57        |
| 6.3.      | Dados para o modelo de fluxo .....                             | 58        |
| 6.3.1.    | Condições iniciais e de fronteira.....                         | 58        |
| 6.3.2.    | Parâmetros hidráulicos .....                                   | 60        |
| 6.4.      | Resultados obtidos para o modelo de fluxo .....                | 61        |
| 6.5.      | Avaliação e caraterização da intrusão salina.....              | 65        |
| 6.5.1.    | Mapas de velocidade de Darcy .....                             | 65        |
| 6.5.2.    | Balanços hídricos.....   | 66        |
| 6.5.3.    | Cálculo de linhas de fluxo regressivas.....                    | 68        |
| 6.6.      | Calibração do modelo de fluxo .....                            | 69        |
| <b>7.</b> | <b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</b>               | <b>71</b> |
| <b>8.</b> | <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                                       | <b>75</b> |
|           | <b>ANEXO I: PONTOS DE ÁGUAS RECOLHIDOS PARA O ESTUDO .....</b> | <b>81</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1: Percentagem da população, em diferentes regiões do globo, que será afetada pelas alterações climáticas, vulnerabilidade de aquíferos e depauperamento de recursos hídricos subterrâneos, considerando os cenários de mudanças climáticas segundo os modelos ECHAM4 ou E4 e HadCM3 ou H3 (adaptado de DÖLL, 2009). .....   | 1  |
| Figura 1.2: Intrusão salina por ação da sobre-exploração de aquíferos costeiros em território europeu (adaptado de EEA, 2007). .....  | 2  |
| Figura 1.3: Localização das captações subterrâneas no concelho e na rede de distribuição do Parque Empresarial do Barreiro e distribuição da capacidade das captações das principais entidades empresariais situadas no concelho do Barreiro (adaptado de ENGIDRO, 2010).....   | 3  |
| Figura 1.4: Localização do futuro Terminal de Contentores na zona ribeirinha do Barreiro (APL, 2014). .....   | 4  |
| Figura 2.1: Localização geográfica do concelho do Barreiro na base topográfica do LNEG (adaptado de <a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Barreiro">https://pt.wikipedia.org/wiki/Barreiro</a> e <a href="http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html">http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html</a> ).....  | 7  |
| Figura 2.2: Enquadramento geológico da Bacia do Baixo Tejo (PAIS, 2004). .....  | 8  |
| Figura 2.3: Enquadramento geológico do concelho do Barreiro e do Parque Empresarial do Barreiro na folha 34D – Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000 (adaptado de LNEG, 2005).....   | 9  |
| Figura 2.4: Malha de elementos finitos do modelo hidrodinâmico do Tejo e batimetria da área montante do estuário do Tejo (adaptado de GUERREIRO et al., 2015) e cartografia da zona intertidal do estuário do Tejo (adaptado de NOGUEIRA MENDES et al., 2012 in MORFEED, 2013).....   | 12 |
| Figura 2.5: Resultados da Modelação Operacional para distribuição de Temperatura (esquerda) e Salinidade (direita) (retirado de <a href="http://www.apambiente.pt/index.php?ref=x77">http://www.apambiente.pt/index.php?ref=x77</a> ). .....  | 13 |
| Figura 2.6: Modelo de cálculo do balanço hídrico segundo o método de Thornthwaite-Mather e valores de precipitação anual, mínima e máxima, em condições normais, em anos húmidos e secos para a estação meteorológica do Lavradio (E166) (adaptado de ARH TEJO, 2010).....  | 14 |
| Figura 2.7: Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental e enquadramento hidrogeológico do sistema aquífero do Tejo, margem esquerda (adaptado de <a href="http://snirh.pt/">http://snirh.pt/</a> ).....  | 15 |
| Figura 2.8: Representação esquemática tridimensional do sistema aquífero mio-pliocénico do Tejo e Sado (PNUD, 1980 in MENDONÇA, 2007). .....  | 16 |
| Figura 2.9: Modelo conceptual de fluxo do Sistema Aquífero Tejo-Sado (MENDONÇA, 2007). .....  | 17 |
| Figura 2.10: Localização administrativa do projeto do Terminal de Contentores do Barreiro (APL, 2014).....  | 18 |
| Figura 2.11: Vista em perspetiva (ArcScene) e profundidade da frente ribeirinha do Barreiro: <b>T<sub>1</sub></b> - Terminal de granéis líquidos (Tanquipor); <b>T<sub>2</sub></b> - Terminal de granéis sólidos (Atlanport); <b>T<sub>3</sub></b> - Terminal fluvial do Barreiro (Transtejo & Soflusa); <b>T<sub>CB</sub></b> - Localização do novo terminal de contentores do Barreiro..... | 19 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1: Organograma das etapas da metodologia adotadas para este estudo .....  | 24 |
| Figura 3.2: A) Posição da interface água doce/água salgada em equilíbrio hidrostático; B) Posição da interface considerando a descarga das águas subterrâneas (adaptado de FREEZE e CHERRY, 1979)..  | 25 |
| Figura 3.3: Migração da intrusão salina em virtude do rebaixamento piezométrico por bombeamento excessivo em áreas costeiras (adaptado de JOHNSON, 2007).....  | 26 |
| Figura 3.4: Esquema de uma barreira hidráulica positiva criada pela injeção artificial de água para restringir o avanço da intrusão salina em áreas costeiras (adaptado de JOHNSON, 2007).....   | 27 |
| Figura 3.5: a) Ilustração da definição da condutividade hidráulica; b) relação concentração/densidade de soluto adotada no modelo FEFFLOW (DHI-WASY GmbH, 2014).....   | 30 |
| Figura 4.1: Localização das captações para abastecimento público da Camara Municipal do Barreiro e respetivos perímetros de proteção alargados (PPA): a) sector norte e intermédio e b) sector sul.....  | 31 |
| Figura 4.2: Localização dos pontos de água da rede de monitorização do SNIRH considerados neste estudo. ....   | 32 |
| Figura 4.3: Representação gráfica da evolução do nível piezométrico (2000 - 2015) no ponto 442/241 da rede de monitorização e análise comparativa com o ano hidrológico de 2014/2015 (SNIRH, 2015). ....   | 33 |
| Figura 4.4: Localização das sondagens hidrogeológicas do LNEG no Parque Empresarial do Barreiro .....  | 34 |
| Figura 4.5: Representação gráfica das concentrações de cloretos nas águas subterrâneas nos pontos 443/38 (2000 - 2006) e 442/536 (2000 - 2008) da rede de monitorização nacional de qualidade (SNIRH, 2015).....   | 34 |
| Figura 4.6: Evolução temporal (2008 – 2014) da concentração de cloretos (mg/l) nas captações municipais para abastecimento público AC2, FR2/RA1 e FR1. ....  | 36 |
| Figura 4.7: Evolução temporal (2008 – 2014) da condutividade elétrica (uS/cm) nas captações municipais para abastecimento público AC2, FR2/RA1 e FR1. ....   | 36 |
| Figura 4.8: Valores médios para a condutividade elétrica, cloretos, cálcio, magnésio, dureza total, nitratos e pH nas captações do setor norte e intermédio do Barreiro para o ano de 2014.....  | 37 |
| Figura 4.9: Modelo Digital de Terreno (MDT) do sector norte do concelho do Barreiro (representação da superfície topográfica em imagem TIN obtida em ArcGIS 10.1). ....  | 38 |
| Figura 4.10: a) Representação das linhas de água presentes na carta geológica 34D – Lisboa; b) Desenho do padrão de escoamento superficial ( <i>Flow Direction</i> ); c) Rede de drenagem calculada para o sector norte do concelho do Barreiro ( <i>Flow Accumulation</i> ); d) Principais bacias hidrográficas simuladas para a presente área de estudo através da função ( <i>Basin</i> ). .... | 39 |
| Figura 4.11: Localização dos perfis geológicos e sondagens hidrogeológicas utilizadas na caraterização geológico e construção do modelo hidrogeológico da área em estudo. ....   | 40 |
| Figura 4.12: Perfil Geológico 1 - Frente ribeirinha do estuário do Tejo na zona norte do PEB. ....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.13: Profundidade da base do Pliocénico identificadas nas sondagens hidrogeológicas para o concelho do Barreiro e nas áreas adjacentes do Seixal e Moita. ....   | 42 |
| Figura 4.14: Perfil geológico 2: Verderena - baixios do estuário na Moita, atravessando a zona sul do PEB.....   | 43 |
| Figura 4.15: Perfil Geológico 3: Estuário do Tejo – Quinta da Lomba. ....  | 43 |
| Figura 5.1: Correlação entre as unidades geológicas caracterizadas e as formações hidrogeológicas. ..  | 45 |
| Figura 5.2: Box-Plot representativo dos valores calculados para a transmissividade do sistema aquífero utilizando a relação desta com o caudal específico obtida por SIMÕES (1998) (T1) e FIALHO (2007) (T2).....        | 49 |
| Figura 5.3: Condutividade hidráulica para o aquífero greso-calcário confinado no setor norte do Barreiro (PEB).....  | 50 |
| Figura 5.4: Modelo de escoamento para o sistema aquífero em regime natural para um cenário ante-exploração. ....   | 51 |
| Figura 5.5: Níveis hidrostáticos dos furos abertos na Quimiparque entre a década de 60 e 80 e localização das captações no sector norte do concelho e nas formações hidrogeológicas (*artesiano positivo repuxante)..... | 52 |
| Figura 5.6: Modelo de escoamento num cenário atual considerando a sobre-exploração do sistema aquífero por furos hipotéticos.....  | 53 |
| Figura 6.1: Área do sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado, margem esquerda, selecionada para o modelo numérico, na base geológica cartográfica 34D – Lisboa à escala 1:50000. ....                                      | 55 |
| Figura 6.2: Malha de cálculo de elementos triangulares do modelo através do algoritmo GridBuilder. ....  | 56 |
| Figura 6.3: Configuração 3D e profundidade das formações hidrogeológicas interpoladas no modelo. ....  | 57 |
| Figura 6.4: Condições de fronteira de 1ª ordem aplicadas no modelo numérico de fluxo subterrâneo. ....   | 59 |
| Figura 6.5: Condições relativas a furos de 4ª ordem aplicadas no modelo numérico de fluxo subterrâneo. ....  | 60 |
| Figura 6.6: Condutividades hidráulicas estimadas para cada camada do sistema aquífero.....   | 61 |
| Figura 6.7: Piezometria calculada para o modelo de fluxo em estado estacionário e sem regime de extração para o aquífero livre (layer 1) e aquífero confinado (layer 3).....   | 62 |
| Figura 6.8: Evolução dos níveis piezométricos no aquífero confinado considerando um intervalo de tempo de 60 anos (1960 – 2020). ....  | 63 |
| Figura 6.9: Evolução dos níveis piezométricos nos dois pontos de observação localizados em margens opostas do setor norte do complexo industrial durante o período de simulação. ....                                    | 64 |
| Figura 6.10: Mapa da velocidade de Darcy (m/dia) centrado na zona de captação e na área envolvente à captação F35 na base do aquífero livre (layer 2).....   | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 6.11: Balanço hídrico calculado para todo o domínio do modelo para um cenário sem exploração e em regime estacionário (esquerda) e em estado transiente com os furos atuais em atividade (direita).<br>..... | 66 |
| Figura 6.12: Balanço hídrico calculado para cada camada do sistema aquífero considerando um cenário sem exploração e em estado estacionário (acima) e o cenário de exploração atual (abaixo). .....                 | 67 |
| Figura 6.13: Balanço hídrico do sistema considerando as condições de fronteira do modelo .....  | 67 |
| Figura 6.14: Linhas de fluxo regressivas no tempo para as captações F88 e F97.....  | 68 |
| Figura 6.15: Condições de fronteira aplicada a furos com restrição máxima de rebaixamento e passagem para nível piezométrico imposto no caso de esse valor ser atingido (DHI-WASY GmbH, 2014). .....                | 69 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1: Valores médios, máximos e mínimos, dispersão e correlação das medições de cloretos (mg/l) e da condutividade elétrica (uS/cm) das águas subterrâneas nas captações para abastecimento público, localizadas no setor intermédio e norte do Barreiro, entre 2008 e 2014. ....   | 36 |
| Tabela 5.1: Transmissividades obtidas para o sistema aquífero através da relação entre T e $Q_s$ de SIMÕES (1998) ( $T_1$ ) e FIALHO (2007) ( $T_2$ ) (Legenda: NHE - Nível Estático, NHD - Nível Dinâmico, S - Rebaixamento, $Q_e$ - Caudal de Ensaio e $Q_s$ - Caudal específico). .... | 48 |
| Tabela 5.2: Valores estatísticos do caudal específico (l/s/m) e transmissividade ( $m^2/dia$ ) das unidades hidrogeológicas estimados nos furos de captação. ....   | 49 |



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

O uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos é, no presente, impreterível, sendo por isso uma das temáticas mais abordadas a nível mundial e esperada uma redução significativa da sua disponibilidade e fácil acesso. Estes recursos são fundamentais para o desenvolvimento das sociedades modernas pois representam importantes fontes de abastecimento urbano, industrial e agrícola, sendo necessário protegê-los. Em diferentes regiões do globo, as águas subterrâneas são a única fonte de água potável, onde adquirem elevada importância social e económica para as comunidades locais. Num mundo em constante expansão demográfica, garantir o suprimento de água às populações é um verdadeiro desafio para as entidades gestoras. Para além dos diversos fatores de ordem socioeconómica, os principais desafios a considerar num futuro recente centram-se nas alterações climáticas, fenómeno muito pouco controlável pelo ser humano que provoca variações no regime de precipitação e nas taxas de recarga aquífera. Sob futuras alterações climáticas, a importância das águas subterrâneas na nossa sociedade será ainda maior, sendo vital determinar a sustentabilidade humana face à diminuição das reservas aquíferas (Figura 1.1).

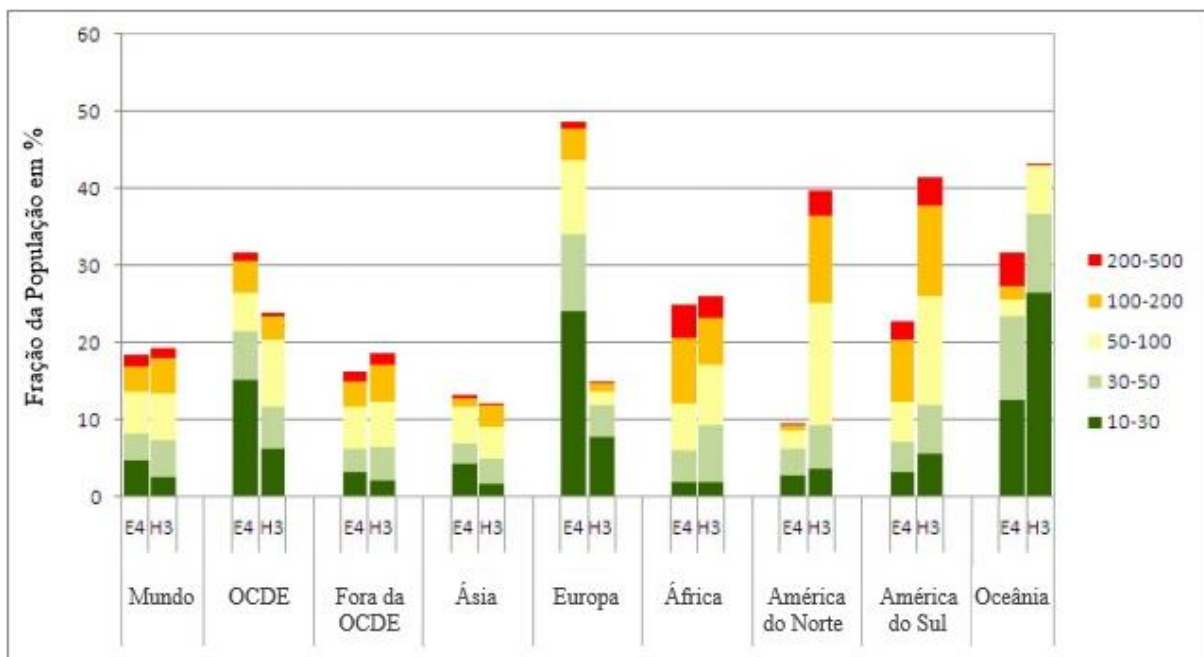


Figura 1.1: Percentagem da população, em diferentes regiões do globo, que será afetada pelas alterações climáticas, vulnerabilidade de aquíferos e depauperamento de recursos hídricos subterrâneos, considerando os cenários de mudanças climáticas segundo os modelos ECHAM4 ou E4 e HadCM3 ou H3 (adaptado de DÖLL, 2009).

Se considerarmos todas as adversidades atuais referentes à sustentabilidade no uso das reservas aquíferas, a questão complica-se ainda mais quando se trata de aquíferos costeiros. Nas áreas costeiras vive aproximadamente 50% da população mundial, onde as necessidades de recursos naturais são proporcionais à densidade populacional dos territórios ocupados. Em virtude da expansão demográfica

e crescente atividade turística nestes locais, a exploração excessiva dos recursos hídricos subterrâneos tornou-se um problema recorrente, gerando graves problemas ambientais que poderão tornar-se irreversíveis, como é o caso de alguns aquíferos costeiros no continente europeu onde se inclui o sistema aquífero do Tejo-Sado (Figura 1.2).

Segundo CABRAL (2004), os problemas existentes em aquíferos costeiros assemelham-se aos que ocorrem noutros tipos de aquíferos, embora surja um risco específico preponderante nestes meios, em resultado da intrusão salina. Este fenómeno pode ser sumariamente descrito como a introdução de água salgada num sistema aquífero pelo avanço da cunha salina. Os seus efeitos são devastadores para os ecossistemas locais, sendo a perda de água doce uma ameaça ao abastecimento público e ao próprio desenvolvimento socioeconómico das comunidades costeiras. Neste contexto, têm surgido nas últimas décadas extensos trabalhos que procuram compreender os mecanismos envolventes neste processo e desenvolver estratégias de gestão para a prevenção e controlo da intrusão salina (FELISA et al., 2013).

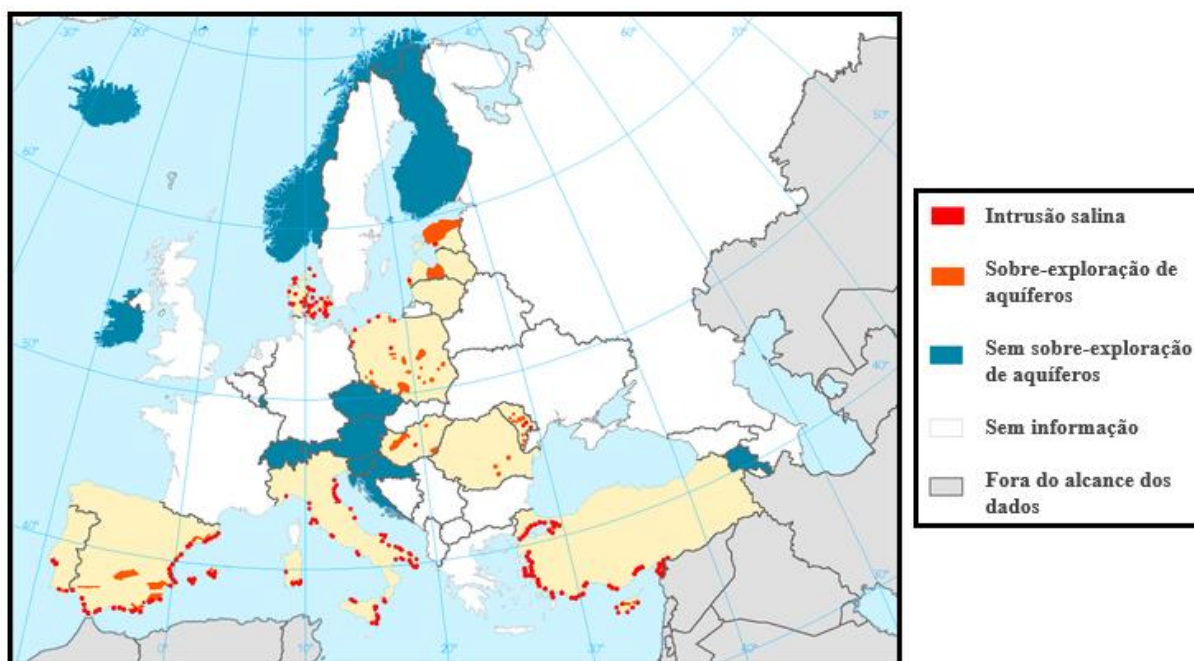


Figura 1.2: Intrusão salina por ação da sobre-exploração de aquíferos costeiros em território europeu (adaptado de EEA, 2007).

No âmbito da apresentação dos mapas comunitários da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas para Portugal Continental, LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA (1991) (in LOBO-FERREIRA, 1998) definiram o conceito de vulnerabilidade como a “*sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero*”. O estudo comprovou a elevada vulnerabilidade dos aquíferos nas regiões costeiras e estuarinas do nosso país, sendo urgente adotar medidas de gestão para o uso racional destes bens, salvaguardando-os de eventuais riscos de contaminação e garantindo a sua utilidade às gerações futuras. O desenvolvimento tecnológico atual tem permitido o aperfeiçoamento de técnicas utilizadas na gestão dos recursos hídricos

subterrâneos, nas quais se incluem a aplicação de modelos matemáticos para simulação de cenários, atuais e futuros, que permitam prever e compreender o comportamento de um sistema hidrogeológico real.

## 1.2. PROBLEMÁTICA HÍDRICA REGIONAL E OBJETIVOS DO ESTUDO

O município do Barreiro é autossustentável no abastecimento de água à população, dependendo exclusivamente de captações subterrâneas para corresponder às elevadas necessidades de consumo humano, indústria e agricultura. Os serviços de abastecimento público são garantidos pela Divisão de Águas e Saneamento do Departamento de Águas e Resíduos da Câmara Municipal do Barreiro (CMB), que garante o cumprimento dos padrões de qualidade estabelecidos na legislação para esse fim (Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto). As captações existentes no concelho exploram o sistema aquífero do Tejo, margem esquerda, onde os furos municipais e outros restantes captam maioritariamente as formações da base do Pliocénico e do topo do Miocénico (Figura 1.3).

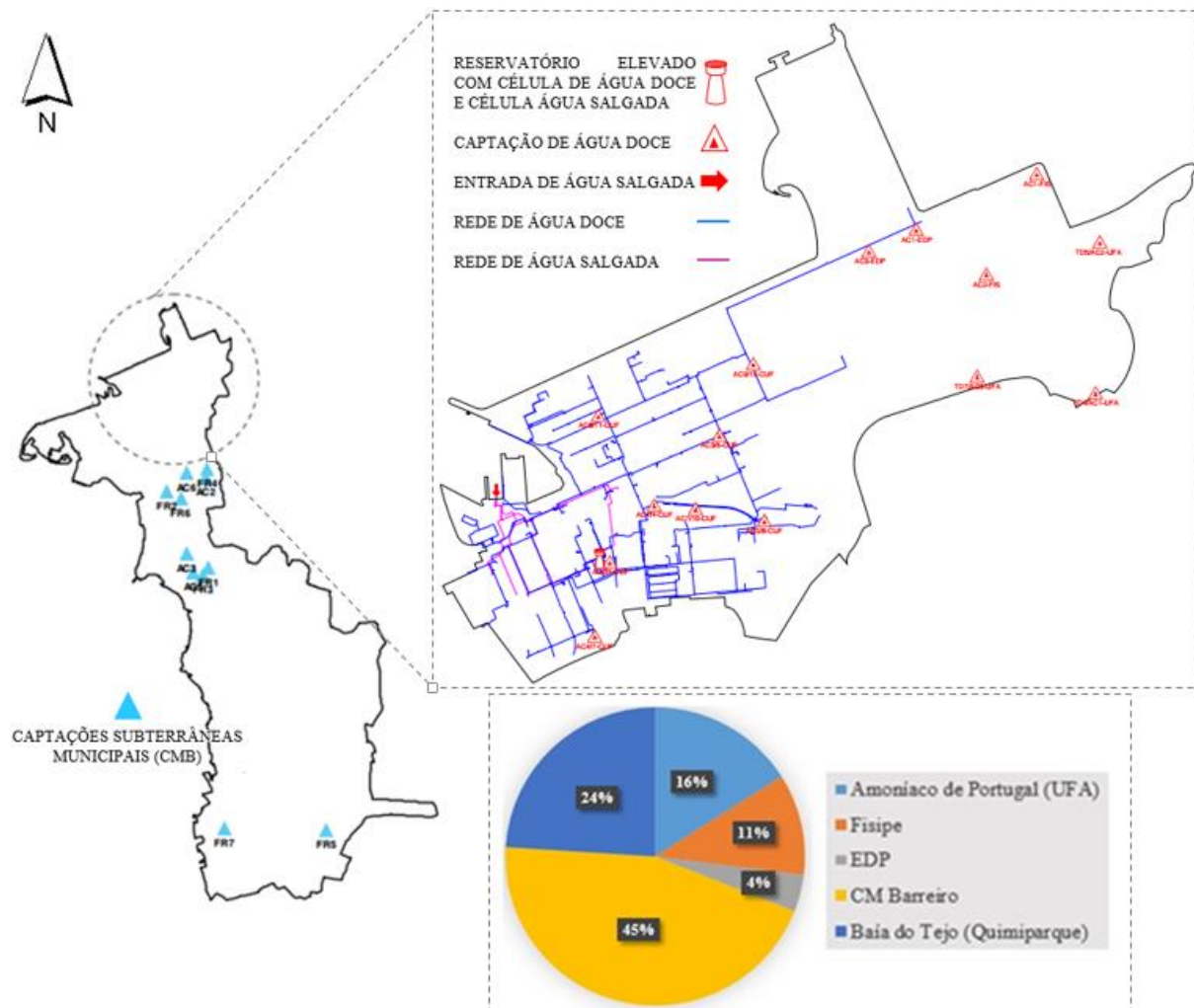


Figura 1.3: Localização das captações subterrâneas no concelho e na rede de distribuição do Parque Empresarial do Barreiro e distribuição da capacidade das captações das principais entidades empresariais situadas no concelho do Barreiro (adaptado de ENGIDRO, 2010).

## CAPÍTULO 1

Apenas 45% da exploração subterrânea de água advém das captações públicas municipais, sendo os restantes 55% divididos por entidades empresariais situadas no Parque Empresarial do Barreiro (PEB) (Figuras 1.3). Este complexo empresarial, outrora denominado por Quimiparque, ocupa uma área com aproximadamente 240 ha, estendidos ao longo de 4 km na frente ribeirinha do estuário do Tejo. Aqui se instalaram importantes empresas ligadas ao sector químico, nomeadamente a Companhia União Fabril (CUF), responsáveis por criarem fortes pressões sobre as águas subterrâneas com a abertura de múltiplos furos nos seus terrenos administrativos. Nestes terrenos é reconhecida a existência de um passivo ambiental, em virtude dos resíduos aqui depositados e outras fontes poluidoras industriais que potenciaram a contaminação dos solos e aquíferos presentes, não se sabendo ao certo o grau de contaminação do aquífero livre e a sua extensão no aquífero profundo (Mio-Pliocénico).

Na primeira metade do século passado observava-se artesianismo positivo ou repuxante na generalidade dos furos na Península de Setúbal, nomeadamente nos mais profundos a captarem no Miocénico. Porém, desde meados da década de 60, verifica-se um rebaixamento crescente nos níveis piezométricos em consequência das fortes extrações de água para abastecimento dos complexos industriais aqui instalados. Esta descida tem vindo a alterar o equilíbrio hidrodinâmico do sistema, com maiores consequências nas zonas litorais da Península, promovendo a migração de água salobra e transporte de sais para o interior do sistema aquífero nas regiões do Seixal, Barreiro e Moita (ALMEIDA et al., 2000). Tal situação pode agravar-se uma vez que, na área em estudo, está previsto o alargamento do porto de Lisboa, cujas obras hidráulicas poderão proporcionar avanços substanciais da cunha salina comprometendo a única fonte de abastecimento de água potável à população (Figura 1.4).



Figura 1.4: Localização do futuro Terminal de Contentores na zona ribeirinha do Barreiro (APL, 2014).

Este estudo tem como objetivo avaliar e caracterizar a contaminação salina do sistema aquífero Mio-Pliocénico do Tejo, em função da exploração intensiva de água subterrânea na zona de contato com o estuário do Tejo na frente ribeirinha do Barreiro. Para melhor compreender este mecanismo pretende-se obter o modelo conceptual hidrogeológico do funcionamento hidráulico do sistema aquífero e simular o fluxo subterrâneo no sistema aquífero no setor norte do concelho do Barreiro, recorrendo à modelação hidrogeológica do sistema, com o modelo numérico, em elementos finitos, FEFLOW.

Neste concelho existe conexão hidráulica entre o aquífero e as águas do Tejo, estando este sujeito a fenómenos de intrusão salina. A área em estudo, intervencionada por obras hidráulicas, poderá sofrer alterações no equilíbrio químico e hidrodinâmico do meio subterrâneo e substanciais avanços na cunha salina. A sobre-exploração das águas subterrâneas junto ao estuário agrava o problema e aumenta a vulnerabilidade do sistema aquífero à contaminação salina, constituindo uma ameaça à sustentabilidade hídrica regional. Os recursos hídricos subterrâneos são de extrema importância para o município e entidades gestoras dos serviços de água, dado que as fontes alternativas ao abastecimento público são externas à Península de Setúbal e, portanto, muito mais onerosas.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A presente dissertação foi desenvolvida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.

Esta encontra-se dividida em 8 capítulos, sendo neste capítulo introdutório (capítulo 1) descrita a problemática abordada, elaborado o enquadramento do tema e definidos os objetivos. No capítulo 2 descreve-se a área de estudo no contexto geográfico, geológico e hidrogeológico, juntamente com as alterações previstas para o local que podem contribuir para o desequilíbrio hidrodinâmico do sistema. A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho e os fundamentos teóricos que a suportam são apresentados no capítulo 3, sendo definidos os principais conceitos na gestão de aquíferos costeiros e na modelação numérica de sistema hidrogeológicos.

A compilação e análise de dados geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos, com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas do concelho e desenvolvimento do modelo geológico e modelo hidrológico consta do capítulo 4. Destaca-se no capítulo 5 a construção do modelo conceptual de funcionamento hidráulico do sistema aquífero do Tejo, margem esquerda, na região ribeirinha do Barreiro, e a estimativa da transmissividade e condutividade hidráulica no aquífero confinado. No capítulo 6 apresentam-se as etapas de construção do modelo numérico de fluxo subterrâneo e os resultados obtidos nas simulações efetuadas para diferentes regimes de extração na frente ribeirinha. Neste capítulo foram ainda utilizadas ferramentas do modelo FEFLOW para caracterizar e avaliar a vulnerabilidade do sistema aquífero à intrusão salina, neste setor.

## CAPÍTULO 1

O capítulo 7 foca-se na discussão de resultados e apresentação de conclusões, relatando as adversidades encontradas no desenvolvimento desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros, no âmbito desta temática. Por último, no capítulo 8, apresentam-se as referências bibliográficas consultadas e, em anexo, a listagem dos pontos de água utilizados no estudo (Anexo I).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

### 2.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A área de estudo pertence ao concelho do Barreiro, situado na margem esquerda do Tejo no extremo norte da sub-região da Península de Setúbal (Figura 2.1). É delimitada a N pelas águas estuarinas do Tejo, a W por um dos baixios do estuário marginado pelo concelho do Seixal, a E pelo concelho da Moita e a S pelos concelhos de Palmela, Setúbal e Sesimbra. A área em estudo está inserida nas freguesias setentrionais do município: Barreiro e Lavradio, Santo André, Verderena e Alto do Seixalinho (Lei n.º 11-A/2013 de 28 de Janeiro), onde se concentra grande parte dos seus 78 764 habitantes (CENSUS, 2011). Esta está representada na folha 34-II da Carta Militar de Portugal do Instituto Geográfico do Exército na escala 1:50000 e na escala 1:25000 nas folhas 431 – Lisboa, 432 – Montijo, 442 – Barreiro e 443 – Moita.

O Barreiro é parte integrante da região metropolitana de Lisboa situando-se a apenas 6 km por via fluvial da Baixa Pombalina. Historicamente povoado por habitantes dedicados às atividades piscatórias e extração do sal, a expansão demográfica do concelho coincidiu com a instalação da CUF, em 1908. Estes terrenos são atualmente ocupados pelo Parque Empresarial do Barreiro, administrado pela Baía do Tejo SA, situado numa frente ribeirinha que contata diretamente com as águas do estuário e inserida nas freguesias do Barreiro e Lavradio.

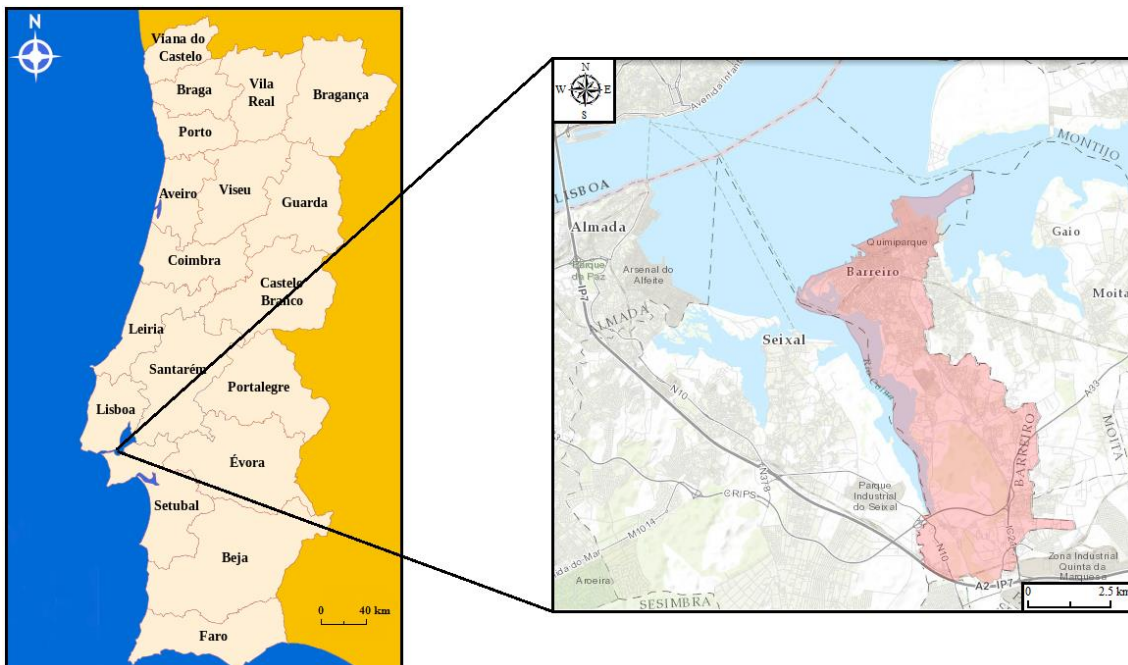


Figura 2.1: Localização geográfica do concelho do Barreiro na base topográfica do LNEG (adaptado de <https://pt.wikipedia.org/wiki/Barreiro> e <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html>).

## 2.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

### 2.2.1. GEOMORFOLOGIA E LITOESTRATIGRAFIA

A área em estudo insere-se na unidade estrutural da Bacia Cenozoica do Tejo e do Sado, mais precisamente na subunidade Bacia Terciária do Baixo Tejo (Figura 2.2). A origem da bacia coincide com o ciclo orogénico alpino, no qual resultou um grande afundimento de terrenos localizados entre falhas, posteriormente preenchidos por materiais da zona periférica. Ao longo do tempo, a bacia sofreu uma evolução complexa controlada pela interação entre movimentos tectónicos e eustáticos (RIBEIRO et al., 1979). A zona terminal da bacia do Baixo Tejo, correspondente ao estuário, ficou marcada por constantes alternâncias de ambientes deposicionais com a ocorrência cíclica de períodos transgressivos e regressivos. A subsidência foi preponderante na evolução geomorfológica desta unidade, podendo ainda estar ativa, sendo compensada por forte sedimentação. Atualmente, a bacia constitui uma depressão alongada na direção NE-SW, limitada a W e N pelas formações mesozoicas da Orla Ocidental, a NE e E pelo substrato hercínico e a S pelo Oceano Atlântico (PAIS, 2004).

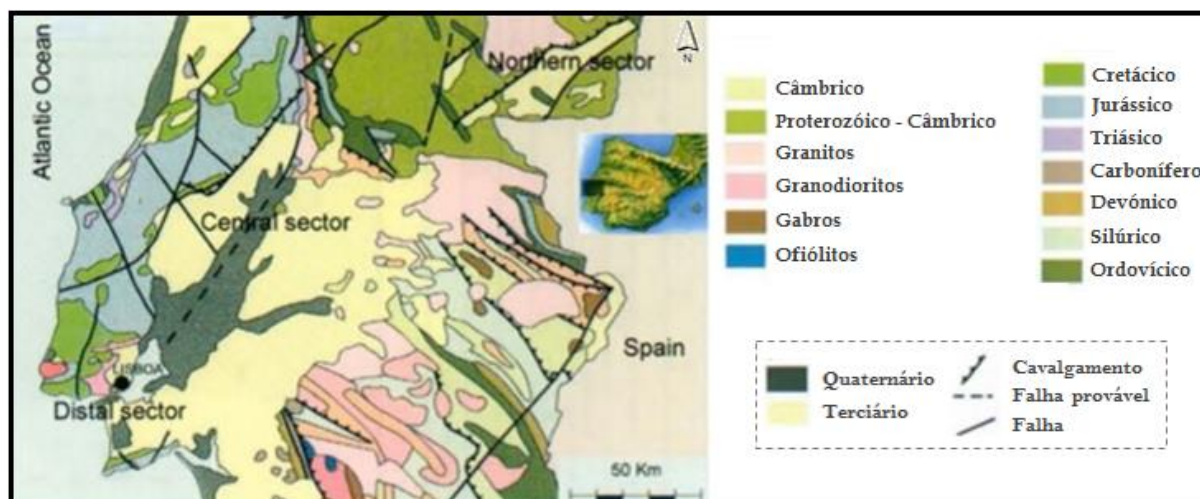


Figura 2.2: Enquadramento geológico da Bacia do Baixo Tejo (PAIS, 2004).

A sedimentação na bacia ficou marcada pela alternância de fácies continental, marinha e salobra, em ciclos de deposição que ocorreram no decurso do Neogénico, contabilizando-se no total 6 ciclos para o Miocénico e 1 no Pliocénico (ANTUNES et al., 1999; PAIS, 2004). O enchimento da bacia é composto por depósitos paleogénicos, miocénicos e pliocénicos recobertos por formações quaternárias em quase toda a extensão da bacia. Os depósitos do Paleogénico são essencialmente de origem continental, constituídos por arcoses, depósitos conglomeráticos, arenitos arcóscicos, argilitos e calcários margosos. O Miocénico é caracterizado pela alternância de depósitos continentais e marinhos, típicos de uma extensa planície aluvial aberta ao Oceano, situada entre as serras de Sintra e da Arrábida, afetada por várias incursões marinhas (PAIS et al., 2012). Neste contexto, originaram-se ambientes de transição fluviomarinhos com influência revezada de ações continentais, fluviais e marinhas, sendo que nas proximidades do estuário do Tejo predominam as fácies marinhas, ocorrendo no topo alternância entre

camadas argilosas e arenosas e na base prevalecendo os arenitos e margas. Os primeiros depósitos do Pliocénico são de origem fluvial, constituídos por conglomerados e areias grosseiras, quase sempre arcósicas, trazidos pelo escoamento do pré-Tejo. Na Península de Setúbal, as areias pliocénicas afloram à superfície ou encontram-se a pouca profundidade, podendo atingir os 320 m na região do Pinhal Novo e não excedendo os 50 m na faixa litoral (Figura 2.3). A evolução da bacia no Quaternário é marcada pela erosão fluvial, ocasionalmente, com depósitos continentais sobrepostos, nomeadamente a Formação de Marco Furado (PAIS et al., 2006).

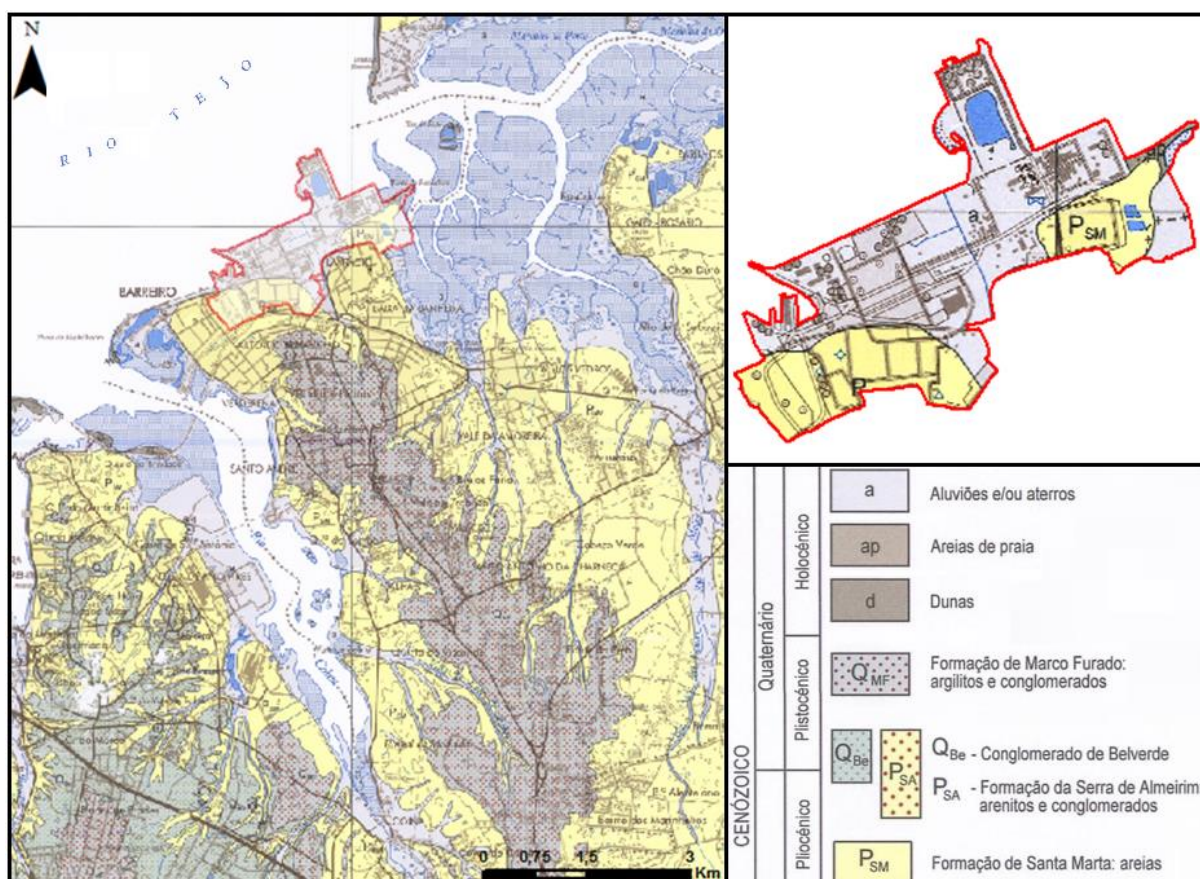


Figura 2.3: Enquadramento geológico do concelho do Barreiro e do Parque Empresarial do Barreiro na folha 34D – Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000 (adaptado de LNEG, 2005).

Descrevem-se de seguida as unidades estratigráficas de maior relevância para o presente estudo, através das descrições litológicas que constam na notícia explicativa da Folha 34-D de Lisboa (PAIS et al., 2006) da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 destacando-se de seguida as formações que, não aflorando, podem ser intercetadas em profundidade, como é o caso dos depósitos do Miocénico.

### Holocénico

- a: Aluviões e/ou materiais de aterro

Estes depósitos modernos encontram-se associados à rede hidrográfica do rio Tejo, que possibilitou o transporte e deposição destes materiais aluviais com elevada componente argilosa em áreas de descarga

## CAPÍTULO 2

(ALMEIDA et al., 2000). As sondagens efetuadas no leito do Tejo indicam espessuras na ordem de 58 m para as aluviões. Na margem sul e em particular na região do Barreiro foram “conquistadas” vastas extensões de terrenos ao rio Tejo, através do aterro de materiais de diversas origens (COSTA e BRITO, 2008).

### **Plistocénico**

- Q<sub>MF</sub>: Formação de Marco Furado

É uma unidade conglomerática vermelha de matriz arenoargilosa com espessura entre 30 e 40 m. Para oeste da ribeira de Coina esta formação assenta sobre o conglomerado de Belverde, enquanto para E, e na presente área de estudo, assenta sobre as areias de Santa Marta. Esta formação representa o último episódio de deposição no sinclinal de Albufeira, depois apenas se acumularam areias eólicas.

### **Pliocénico**

- P<sub>SM</sub>: Formação de Santa Marta

As areias de Santa Marta estão largamente representadas na Península de Setúbal e constituem a mais importante unidade deste estudo. Na base desta formação ocorrem conglomerados pouco espessos e descontínuos seguidos por areias finas a grosseiras quase sempre arcólicas, predominando na fração argilosa a caulinite e a ilitite. A cor das areias é variável, de branco (areias de Coina), a vermelho e amarelo. A espessura desta unidade também é variável, atingindo os 320 m em Pinhal Novo e não ultrapassando os 50 m na faixa litoral. Em profundidade, na sondagem de Belverde, entre os 10 m e 130 m, foram identificadas areias médias a finas de cor alaranjada atribuídas a esta unidade.

### **Miocénico**

- M<sub>QA</sub>: Areias e margas de Quinta do Anjo

Iniciam-se por micro-conglomerados ocreos que passam a biocalcarenitos e a depósitos argilo-margosos ricos em ostras esbranquiçados e/ou acinzentados. ZBYSZEWSKI et al. (1965, 1967) (in PAIS et al., 2006) atribuíram estes depósitos ao Helveciano (Vlc) e ao Tortoniano.

- M<sub>CB</sub>: Areolas de Cabo Ruivo e Areolas de Braço de Prata indiferenciados

Este conjunto, caracterizado na região de Lisboa (CHOFFAT, 1950; COTTER, 1956) e que se estende à Península de Setúbal, é constituído por alternâncias de arenitos finos, areias e bancos finos de calcários margosos e gressosos. Na sondagem de Belverde, entre os 130 e os 209 m, foram identificados arenitos finos a muito finos. Para S da localidade de Capuchos, esta unidade é sobreposta pelas areias arcólicas de Santa Marta, atribuídas ao Pliocénico.

- $M_{MG}$ : Calcários de Marvila e Grés dos Grilos indiferenciados

Caracterizados na região de Lisboa (CHOFFAT, 1950; COTTER, 1956) são constituídos por arenitos finos e biocalcarenitos amarelados com numerosos fragmentos de equinídeos de que se destaca *Schizaster scillae*. Na sondagem de Belverde foram reconhecidos entre os 238 m e 209 m de profundidade, sendo constituídos, na parte inferior, por arenitos finos micáceos; para o topo estão representados por siltitos muito micáceos de cor cinzento esverdeado.

- $M_{XA}$ : Argilas azuis de Xabregas (Mvr.)

Trata-se de conjunto silto-argiloso, às vezes com areias finas, de cor cinzento azulado, representando os sedimentos de ambientes mais profundos do Neogénico da Bacia do Baixo Tejo. Descritos na região de Lisboa (CHOFFAT, 1950; COTTER, 1956) foram reconhecidas entre os 238 m e 272 m de profundidade na sondagem de Belverde, onde são representadas por siltitos argilosos, cinzento-esverdeados, com intercalações de biocalcarenitos.

### 2.2.2. TECTÓNICA E NEOTECTÓNICA

A Bacia do Baixo Tejo corresponde a uma depressão tectónica alongada na direção NE-SW, limitada por falhas, que sofreu subsidência no decurso do Cenozóico. Esta é interpretada como uma bacia ante-país gerada na dependência de um regime compressivo que desencadeou a inversão tectónica da Bacia Lusitânica, situada a W, em resultado da convergência do continente africano relativamente ao bloco continental ibérico. Ao nível da estrutura, as formações que preenchem a bacia dispõem-se geralmente de modo sub-horizontal a ligeiramente inclinado, embora localmente perturbadas por alguns acidentes tectónicos principais (RIBEIRO et al., 1979; KULLBERG et al., 2000).

A Bacia do Baixo Tejo é essencialmente dominada pela tectónica frágil, com falhas de orientação preferencial NE - SW a E - W (PAIS et al., 2012). Destaca-se a estrutura em “graben” entre Alcochete e Setúbal, com direção N-S paralela ao atual leito do Tejo, associada à presença de uma estrutura diapírica profunda na área do Pinhal Novo. Esta estrutura é responsável pela depressão alongada na direção NE-SW, situada a SSW do Pinhal Novo e a NW de Palmela, que evidenciam os horizontes terciários, tratando-se de uma deformação em sinforma de idade terciária. Na área do Seixal, Barreiro e Moita, os depósitos paleogénicos assentam sobre as formações do Cretácico Inferior, que desaparecem para leste, passando os sedimentos terciários a assentar sobre formações jurássicas de diversas idades. A base das formações terciárias aprofunda-se ligeiramente até ao meridiano da Moita, elevando-se depois até à zona da falha do Pinhal Novo (PAIS et al., 2006).

Os depósitos pliocénicos fluviais, predominantemente arenosos, assentam sobre os sedimentos miocénicos, evidenciando uma descontinuidade erosiva que reflete uma mudança na evolução da bacia com a interrupção da tendência subsidente neste período. Sobre o flanco N da Cadeia Orogénica da

Arrábida, estes depósitos não evidenciam deformação, assentando em discordância sobre os sedimentos miocénicos inclinados para N. Na região da Península de Setúbal, a deposição de toda a série arenosa pliocénica, na ordem das centenas de metros, está relacionada com a reativação da subsidência nesta área da bacia e com a tectónica por parte de algumas das estruturas principais (PAIS et al., 2006).

A região do Baixo Tejo é ainda caracterizada por ser uma região tectonicamente ativa, como demonstram os eventos sísmicos históricos (1531, 1755, 1909 e 1969), relacionados com estruturas profundas donde se destaca a falha do “Gargalo do Tejo”. Esta falha encontra-se coberta por aluviões e outros depósitos modernos não sendo fácil o seu reconhecimento, pressupõem-se, no entanto, uma orientação provável N30°E (CABRAL, 1995).

## 2.3. ENQUADRAMENTO HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

### 2.3.1. ESTUÁRIO DO TEJO

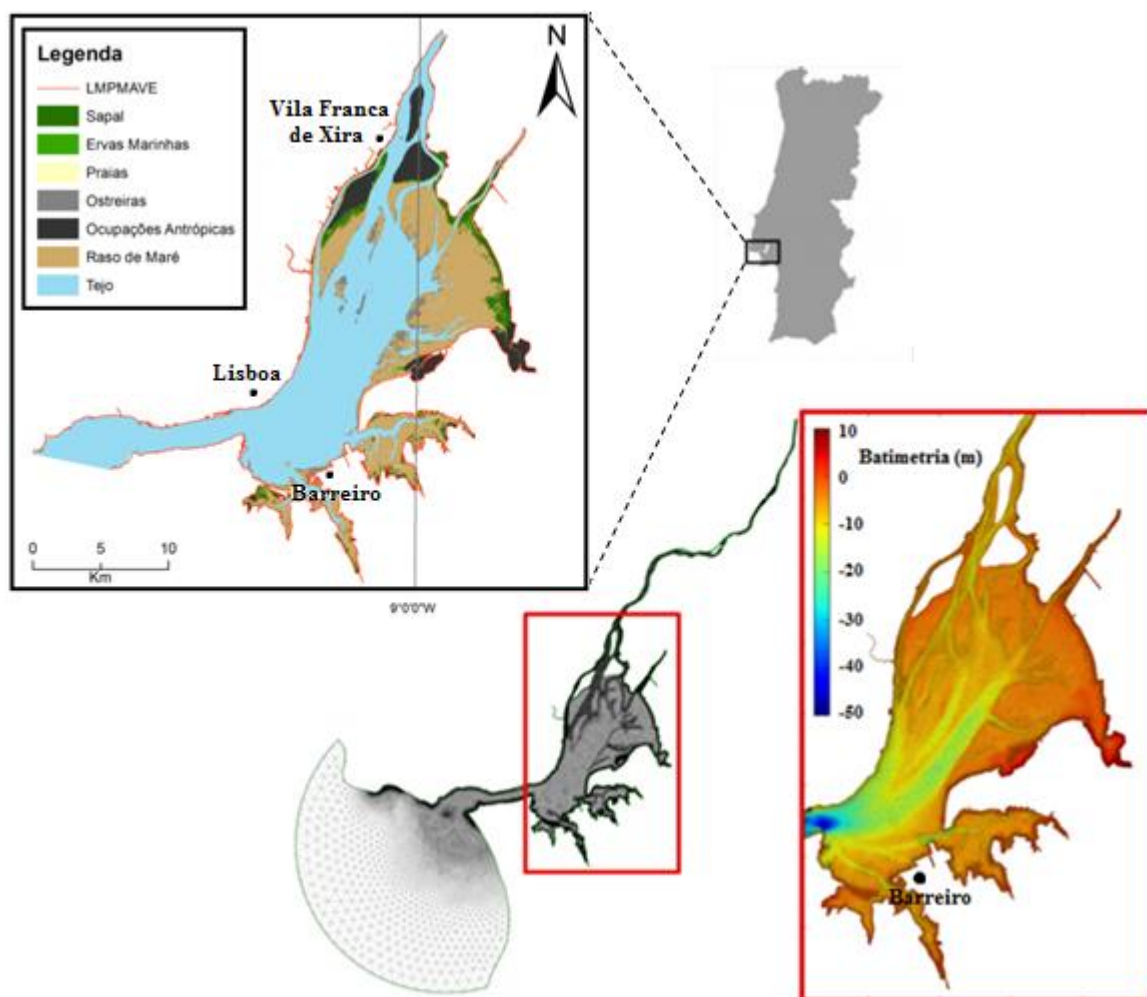


Figura 2.4: Malha de elementos finitos do modelo hidrodinâmico do Tejo e batimetria da área montante do estuário do Tejo (adaptado de GUERREIRO et al., 2015) e cartografia da zona intertidal do estuário do Tejo (adaptado de NOGUEIRA MENDES et al., 2012 in MORFEED, 2013).

O estuário do Tejo, ocupando uma área de aproximadamente 320 km<sup>2</sup>, é considerado o maior da Península Ibérica e um dos maiores da Europa. Situa-se na costa ocidental portuguesa, estabelecendo a transição entre o rio Tejo e o Oceano Atlântico, e fica adjacente à maior área metropolitana do país. O estuário estende-se desde o canal da embocadura até cerca de 50 km a montante, em Vila Franca de Xira, onde se localiza o alcance das águas salobras embora a influência das marés se faça sentir até Muge, a 80 km da foz (Figura 2.4) (FERNANDES, 2005).

A morfologia é distinta, sendo caracterizada por um estreito e profundo canal que contacta com as águas oceânicas, denominado por canal da embocadura, em contraste com uma zona interior pouco profunda mas bastante larga (Mar da Palha) que se assemelha a uma baía (Figura 2.4). Na zona interior do estuário ocorrem formas de acumulação longitudinais cortadas por canais de maré, e extensas zonas espraçadas que possibilitam o desenvolvimento de importantes áreas de sapal. Na margem esquerda, denota-se a presença de diversas praias compostas por pequenos depósitos arenosos que se formam por ação de ondas geradas localmente e a presença de enseadas, nas áreas do Montijo, Barreiro e Seixal, formadas em zonas terminais de afluentes, com importante sedimentação vasosa (FREIRE et al., 2006).

O estuário do Tejo é do tipo lagunar sujeito ao efeito das marés, em que as correntes na zona sul e oriental são perpendiculares ao eixo do canal principal. A estratificação da coluna de água depende diretamente das interações entre o caudal dos principais afluentes e as correntes de maré oceânicas. O rio Tejo, Sorraia e Trancão são os principais afluentes do estuário, sendo o Tejo a fonte predominante de descarga de água doce no estuário, podendo a descarga variar entre os 80 e 720 m<sup>3</sup>/s, registando-se um caudal médio em Santarém (1943-1977) de 392.9 m<sup>3</sup>/s (LOUREIRO, 1979 in GAMEIRO, 2009). O tempo de permanência da água doce é de aproximadamente 23 dias, considerando um caudal para o Tejo de 300 m<sup>3</sup>/s, e as correntes de maré podem atingir um valor máximo de 2 m/s na área terminal e 1.2 m/s na área intermédia (GAMEIRO, 2009).

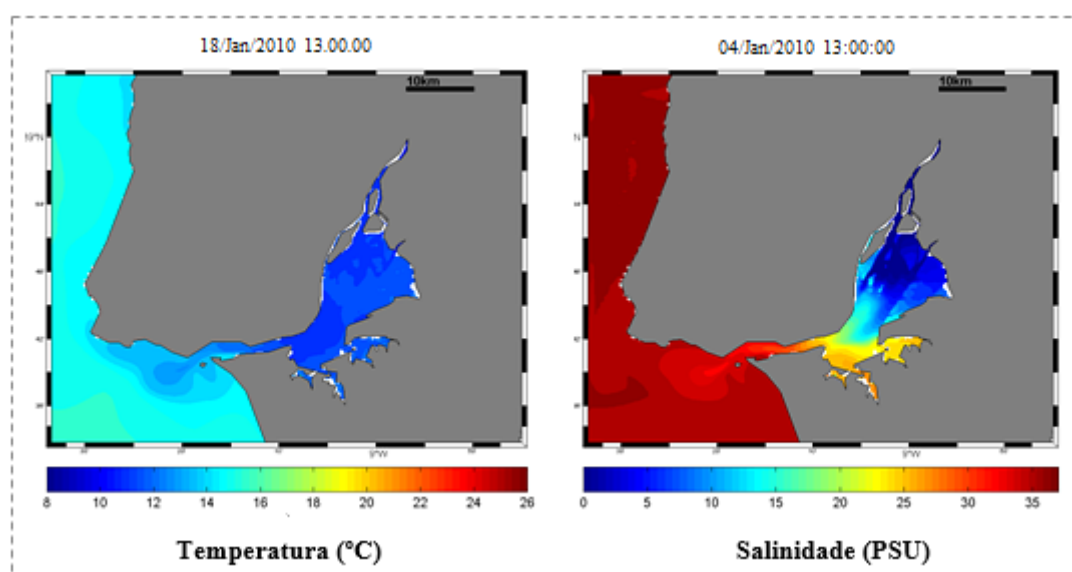


Figura 2.5: Resultados da Modelação Operacional para distribuição de Temperatura (esquerda) e Salinidade (direita) (retirado de <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=x77>).

Junto à embocadura, a circulação hidrodinâmica renova a água do estuário a partir da água localizada próxima da costa. Esta entra no estuário pelo fundo durante a enchente, mistura-se com a água do corredor do estuário, saindo depois na vazante seguinte. A mistura de águas neste local é responsável pelos gradientes de salinidade baixos que aqui se verificam. O estuário do Tejo pode ser classificado de verticalmente misturado ou parcialmente estratificado, no entanto, pode ser considerado bem misturado durante as marés vivas, enquanto durante as marés mortas ocorre estratificação parcial da coluna de água. (CÂMARA et al. 1987 in GAMEIRO, 2009; VALE e SUNDBY, 1987 in GAMEIRO, 2009). A salinidade obedece a um padrão sazonal, com valores menores durante a estação húmida e de maior descarga fluvial, e o gradiente longitudinal de salinidade é mais elevado no troço superior e central do estuário (Figura 2.5).

### 2.3.2. CLIMA

O clima da região é de tipo mediterrânico com influência atlântica, caracterizado por um forte contraste sazonal, com duas estações temperadas, Outono e Primavera, intercaladas pelas estações frias e quentes, Inverno e Verão. A temperatura média anual oscila entre os 16 e os 17.5 °C, sendo o mês de Janeiro o mais frio (10.1 °C) e o mês de Agosto o mais quente (23.6 °C), de acordo com os dados da estação meteorológica de S. Julião do Tojal (20C/01C) para a série histórica de 1940 - 1990. A distribuição mensal da precipitação define-se por uma acentuada irregularidade sazonal, com cerca de 75% da precipitação a ocorrer durante a estação húmida, durante 2 a 4 meses, sendo esporádica nos restantes. Os ventos predominantes sopram do quadrante norte e noroeste, com maior intensidade em Julho e Agosto, no entanto, esta varia de fraca a moderada (8-13 km/h). A insolação média anual situa-se entre as 2900 h e as 3000 h sendo os meses de Julho e Agosto os que registam os valores mais elevados (ARH TEJO, 2010).

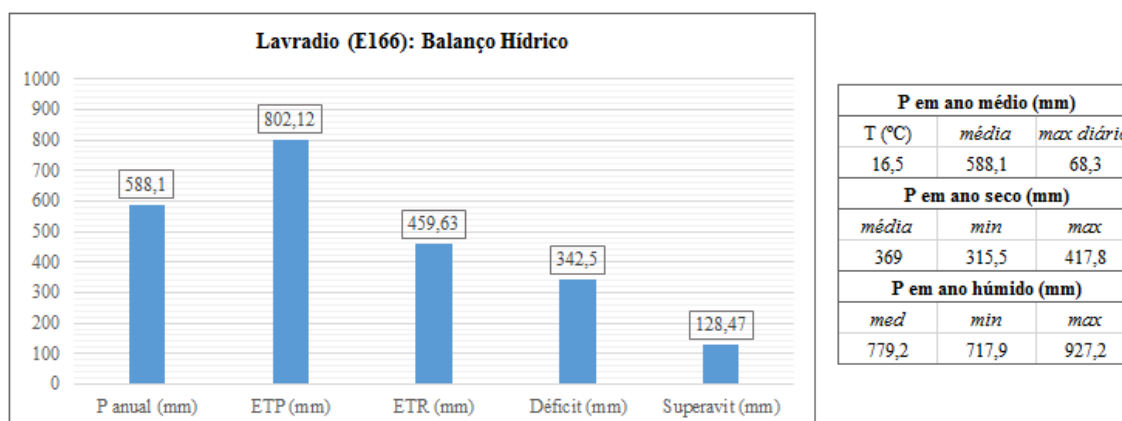


Figura 2.6: Modelo de cálculo do balanço hídrico segundo o método de Thornthwaite-Mather e valores de precipitação anual, mínima e máxima, em condições normais, em anos húmidos e secos para a estação meteorológica do Lavradio (E166) (adaptado de ARH TEJO, 2010).

Os respetivos valores apresentados na figura 2.6 correspondem a um período compreendido entre 1961 e 1990 para a estação meteorológica situada na freguesia do Lavradio (E66) no concelho do Barreiro. Do estudo climatológico para a região hidrográfica do Tejo (ARH TEJO, 2010) resulta uma temperatura média anual de 16.5 °C e uma precipitação média anual de 588.1 mm em ano médio, 369 mm em ano seco e 779.2 mm em ano húmido. De referir que se considera anos húmidos os que apresentam um valor de precipitação anual que exceda 80% do total do período analisado (1961 - 1990) e como anos secos aqueles cuja precipitação é excedida em apenas 20% dos anos estudado. Os excedentes calculados pela diferença entre a precipitação e o *deficit* de água ponderada no solo cifram-se nos 128.47 mm.

### 2.3.3. SISTEMA AQUÍFERO DO TEJO, MARGEM ESQUERDA

O sistema aquífero do Tejo, margem esquerda, juntamente com a margem direita e as aluviões do Tejo, constituem a mais importante unidade hidrogeológica do país. A subdivisão em sistemas, margem esquerda e direita do Tejo, deve-se ao próprio rio, situado no importante acidente geológico, principal eixo drenante da bacia estabelecendo uma divisória hidráulica entre as duas margens. A falha do Tejo teve como consequência a diferenciação de ambientes de deposição, traduzida, sob o ponto de vista hidrogeológico, em diferenças na produtividade e no quimismo das águas (Figura 2.7) (ALMEIDA et al., 2000). O sistema aquífero do Tejo insere-se numa região onde estão presentes áreas com elevada concentração populacional e industrial, fornecendo praticamente a totalidade das águas aqui exploradas, em virtude da elevada produtividade e excelente qualidade das águas subterrâneas. Grande parte dos volumes captados localizam-se na Península de Setúbal, assegurando os numerosos abastecimentos industriais, domésticos e agrícolas (SIMÕES, 1998).

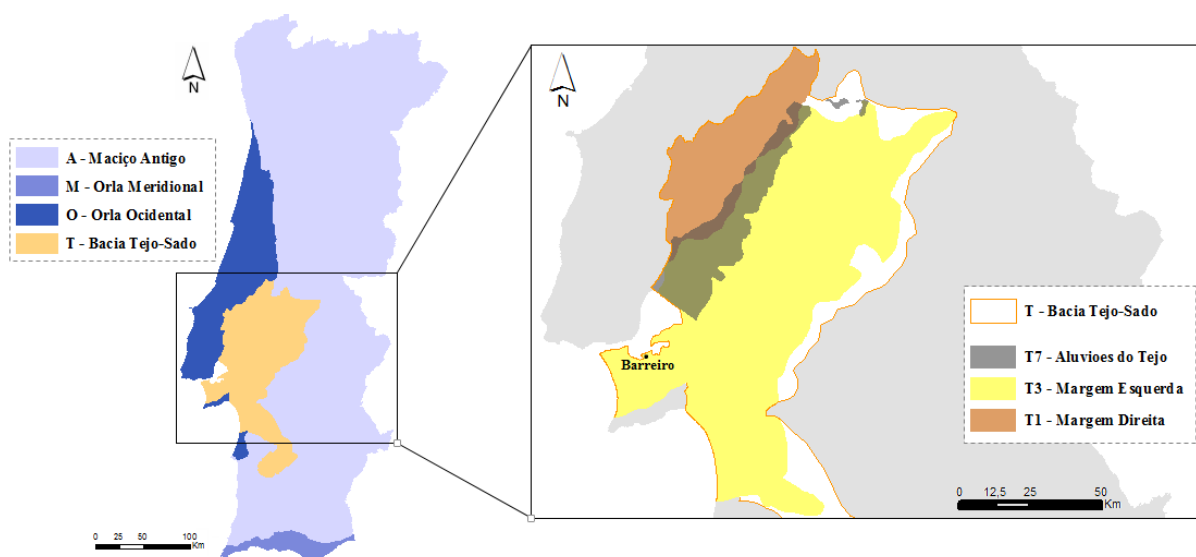


Figura 2.7: Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental e enquadramento hidrogeológico do sistema aquífero do Tejo, margem esquerda (adaptado de <http://snirh.pt/>).

O sistema aquífero é bastante complexo, sendo caracterizado por diversas variações laterais e verticais de fácies que alteram significativamente as características hidrogeológicas. Este é formado por várias camadas porosas, confinadas ou semiconfinadas, e por camadas argilosas de baixa permeabilidade (aquitardos e aquíclusos). Segundo ALMEIDA et al. (2000), o sistema aquífero na Península de Setúbal é constituído por um aquífero superior livre, instalado nos depósitos detríticos recentes e nas camadas arenosas do topo do Pliocénico, sobrejacente a um aquífero confinado ou semiconfinado multicamada, instalado nas camadas da base do Pliocénico e nas camadas greso-calcárias do Miocénico superior a médio (Figura 2.8). Existe ainda um outro aquífero confinado situado a maiores profundidades, nos depósitos greso-calcárias da base do Miocénico, menos produtivo e de qualidade inferior.

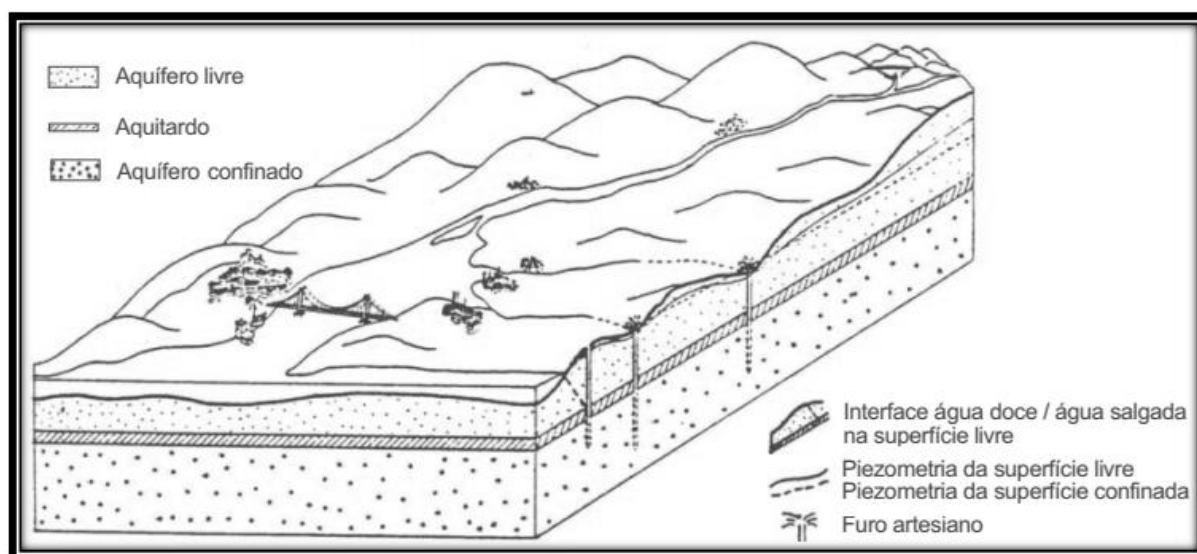


Figura 2.8: Representação esquemática tridimensional do sistema aquífero mio-pliocénico do Tejo e Sado (PNUD, 1980 in MENDONÇA, 2007).

A transmissividade estimada para a região de Almada, Seixal e Barreiro é superior a  $864 \text{ m}^2/\text{dia}$ . Os furos que captam o Miocénico apresentam baixos caudais específicos, entre  $0.02 \text{ l/s/m}$  e  $1.7 \text{ l/s/m}$ , quando comparados com os valores observados em furos que captam o Pliocénico,  $0.03 \text{ l/s/m}$  a  $12.4 \text{ l/s/m}$ . Quando os furos captam simultaneamente os dois aquíferos denota-se grande aleatoriedade nestes valores, em função das características hidrogeológicas dos locais de implantação, nomeadamente da espessura e da condutividade hidráulica resultante (ALMEIDA et al., 2000).

As águas do Pliocénico são pouco mineralizadas, caracterizadas pela baixa salinidade e baixo teor de sódio, ao contrário das águas do Miocénico inferior a médio, mais mineralizadas, de fácies bicarbonatada sódica e/ou cálcica. Por ação da intrusão salina em zonas próximas do estuário, as águas podem tornar-se cloretadas sódicas (SIMÕES, 1998).

Em regime natural, o escoamento subterrâneo no sistema aquífero dá-se preferencialmente, na sua componente transversal, em direção ao rio Tejo, principal eixo drenante da bacia, originando descargas nas aluviões e, segundo uma componente longitudinal, em direção ao Oceano Atlântico (MENDONÇA,

2007) (Figura 2.9). O estuário do Tejo e os seus afluentes constituem as direções preferenciais do escoamento subterrâneo dos aquíferos superficiais, enquanto o Oceano Atlântico poderá ser a zona de descarga do aquífero confinado, que se prolonga sob o estuário do Tejo (ALMEIDA et al., 2000). A recarga dá-se por infiltração direta em toda a bacia, preferencialmente nos depósitos pliocénicos e quaternários das terras altas e planaltos que marginam o rio, cedendo parte dessa recarga por drenância aos depósitos subjacentes do Pliocénico e Miocénico (Figura 2.9).

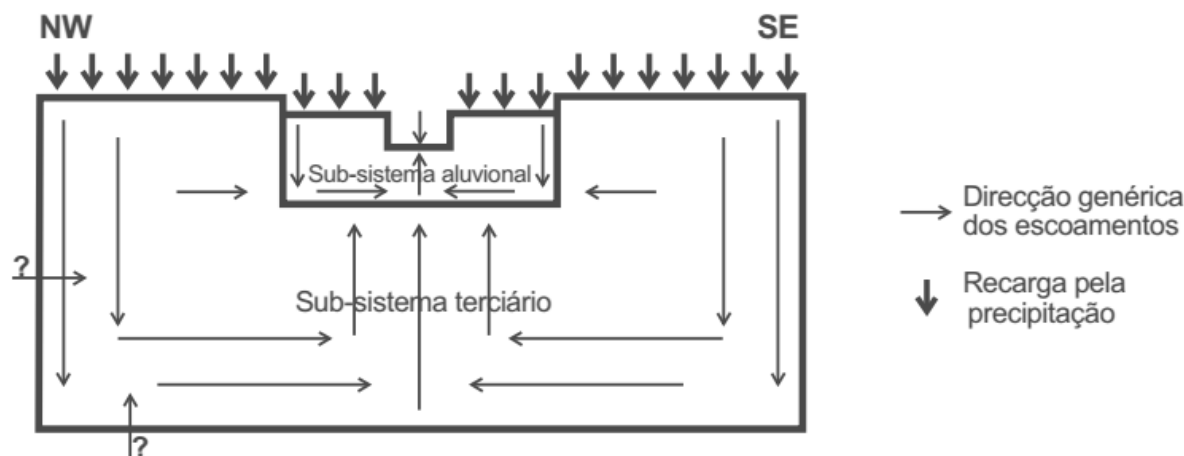


Figura 2.9: Modelo conceptual de fluxo do Sistema Aquífero Tejo-Sado (MENDONÇA, 2007).

O modelo concetual da figura 2.9 resulta das observações de níveis piezométricos na parte central da Bacia do Tejo e Sado e na fase inicial da exploração do sistema aquífero (MENDONÇA, 2007). Em muitas áreas da bacia o sentido do fluxo estará atualmente invertido em consequência da exploração intensiva do sistema aquífero, de onde resulta um potencial hidráulico do aquífero livre superior ao do confinado, contrariamente ao que aconteceria sem exploração. Deste modo, admitindo conexão hidráulica entre os dois aquíferos poderá haver transferências ora do aquífero livre para o confinado e vice-versa, consoante se está em zonas de recarga ou de descarga do sistema (SIMÕES, 1998).

## 2.4. INTERVENÇÕES NO ESTUÁRIO E ALTERAÇÕES AO EQUILÍBRIO DO SISTEMA

### 2.4.1. OBRAS PORTUÁRIAS

O Porto de Lisboa é um dos grandes portos europeus de orientação atlântica, sendo líder nacional no movimento de navios, cargas contentorizadas e de granéis sólidos agroalimentares. Este ocupa áreas de natureza portuária/industrial (definida no Decreto-Lei 336/98 de 3 de Novembro) que abrange na vertente terrestre 11 concelhos da área metropolitana de Lisboa, estendendo-se por 110 km ribeirinhos, e na sua vertente marítimo-fluvial uma superfície de 32500 ha, tendo como limites, a jusante, o alinhamento das Torres de São Julião e Bugio e a montante, Vila Franca de Xira. As conclusões do Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas (PETI3+) ditam que será necessário aumentar a capacidade portuária de Lisboa, para fazer face ao potencial crescimento do tráfego de contentores a

médio e longo prazo No âmbito do Plano Estratégico de Desenvolvimento do Porto de Lisboa (DHV/FBO, 2007), atestou-se então a necessidade da construção de um novo terminal de contentores, dado que o aumento da capacidade das infraestruturas existentes no Porto de Lisboa não seria suficiente para suprir a procura estimada para o horizonte do Plano Estratégico (2025) (APL, 2014).



Figura 2.10: Localização administrativa do projeto do Terminal de Contentores do Barreiro (APL, 2014).

A localização prevista para o novo terminal é a margem esquerda do estuário do Tejo, adjacente ao concelho do Barreiro, distrito de Setúbal, estando as suas acessibilidades terrestres incorporadas na União de Freguesias de Barreiro e Lavradio, nos antigos terrenos do grupo CUF. O terrapleno a ser construído situar-se-á na frente ribeirinha a poente das atuais instalações da Tanquipor, sendo previsto obras para o alargamento dos acessos marítimos (Figura 2.10) (APL, 2014).

#### 2.4.2. FRENTE RIBEIRINHA E ACESSOS MARÍTIMOS

A frente ribeirinha do Barreiro é em geral pouco profunda, constituída por rasos de maré em praticamente toda a sua extensão, caracterizada por fundos de vasa e de vasa arenosa que resultam da maior floculação de sedimentos finos neste setor intermédio do estuário (Figura 2.11). Os rasos de maré ocorrem exclusivamente na margem esquerda do estuário do Tejo, assim como as praias de areia, em virtude das ondas de geração local alinhadas à direção dominante dos ventos. Estes são por norma extensos e sub-horizontais podendo atingir várias centenas de metros. Ao contrário das praias estuarinas, estas constituídas por areias quartzíticas de grão médio a grosseiro, os rasos são arenosos podendo apresentar uma fração silto-argilosa considerável nas zonas distais. Destaca-se ainda a presença de uma

enseada no Barreiro, limitada pelos referidos rasos areno-vasosos, onde se observam duas restingas de areias no limite noroeste da península, contendo na zona interior pequenas manchas de sapal muito degradado sobre substrato vasoso (FREIRE et al., 2006).

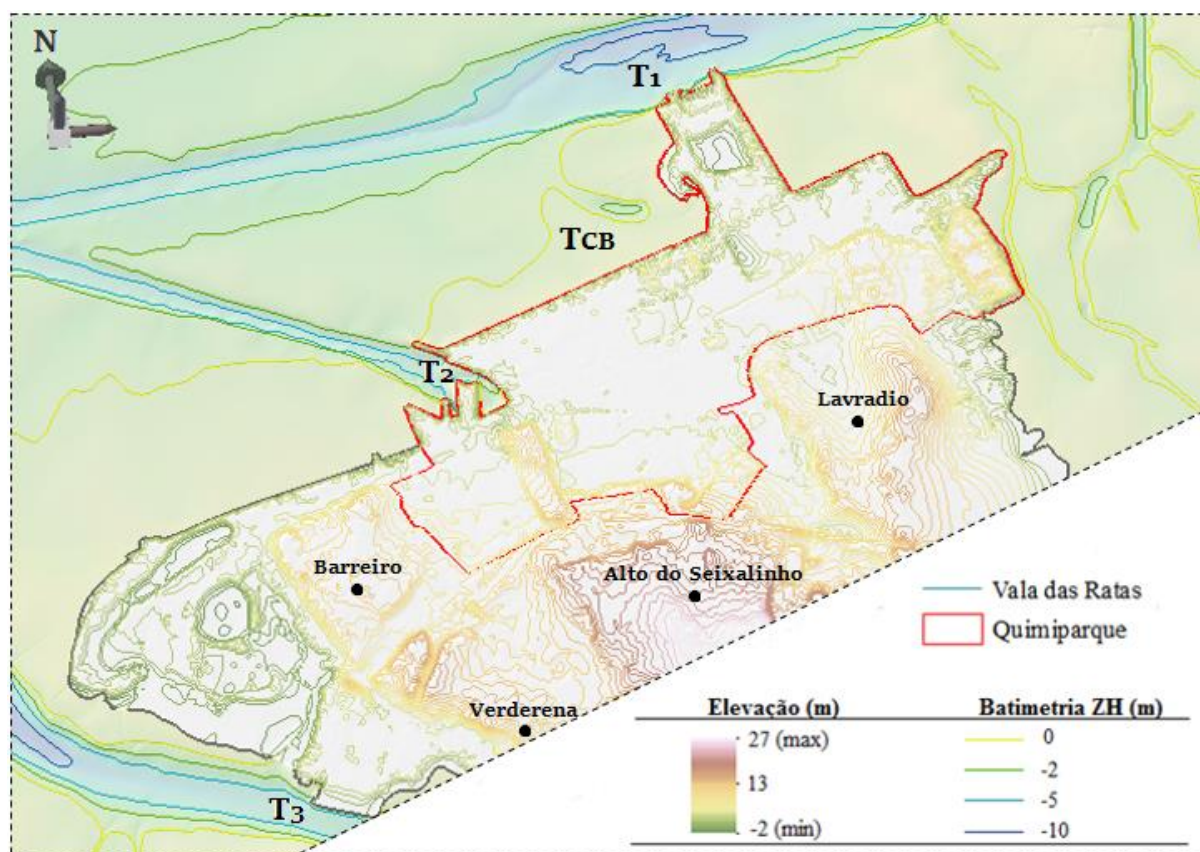


Figura 2.11: Vista em perspectiva (ArcScene) e profundidade da frente ribeirinha do Barreiro: T<sub>1</sub> - Terminal de granéis líquidos (Tanquipor); T<sub>2</sub> - Terminal de granéis sólidos (Atlanport); T<sub>3</sub> - Terminal fluvial do Barreiro (Trastejo & Soflusa); T<sub>CB</sub> - Localização do novo terminal de contentores do Barreiro.

Na figura 2.11 estão representadas as curvas batimétricas da Carta Náutica 26305 (INT 1877) – Porto de Lisboa para a frente ribeirinha no Barreiro, sendo importante referir que o zero hidrográfico (ZH) fixado para o Porto de Lisboa é de 2.08 m abaixo do nível médio do mar. O Barreiro dispõe atualmente de dois terminais para carga contentorizada, um de granéis líquidos da LBC Tanquipor e um de granéis sólidos da Atlanport. Estes terminais portuários têm fundos de 9.5 m (ZH) e 10.5 m (ZH) respetivamente, cujos canais de acesso coincidem em determinado ponto do estuário não visível na figura 2.11.

### 2.4.3. INTERVENÇÕES E ALTERAÇÕES PREVISTAS NO ESTUÁRIO

O novo terminal de contentores será destinado à operação de grandes navios porta contentores, essencialmente vocacionado para a exportação de serviços para o *hinterland* internacional e o *transshipment*, à semelhança do Porto de Sines. Atendendo a este fator e à natureza do local escolhido, são esperadas profundas e alargadas dragagens para o desenvolvimento e manutenção das acessibilidades marítimas e extensas terraplanagens na zona do terminal para “ganhar” espaço ao rio. O

projeto é então constituído por uma parte terrestre, terrapleno, retenções marginais e estrutura de acostagem e uma parte marítima/fluvia, canal de acesso, bacia de manobra e bacia de acostagem, composto por estes principais elementos funcionais (APL, 2014):

- Terrapleno: construído por aterros de materiais agregados provenientes das dragagens para as acessibilidades marítimas, cujo volume de materiais previstos para a construção é de 11 Mm<sup>3</sup>, com uma área de implantação de aproximadamente 95 ha.
- Estrutura de acostagem: fundeada aos -17 m (ZH) com um comprimento total de aproximadamente 1500 m, sendo projetada para absorver os esforços impostos pelos navios, permitindo fundos disponíveis ao longo de todo o paramento acostável.
- Canal de acesso: dragagem de um canal de acesso com largura de rasto adequada ao navio de projeto com possibilidade de navegação em sentido único (*one-way channel*), situado próximo dos canais já existentes (CUF, Líquidos do Barreiro e Montijo), numa extensão total de cerca de 6590 m e fundos de -16.0 m (ZH).
- Bacia de manobra: prevê-se uma bacia dragada à cota de -16 m (ZH) na proximidade da estrutura acostável, com geometria a definir em fase de estudo prévio.
- Bacia de acostagem: prevê-se a construção de uma bacia retangular dragada à cota -17 m (ZH), em toda a extensão do cais, adjacente à estrutura de acostagem.

É do conhecimento público que o local dispõe de condições muito desfavoráveis sob o ponto de vista construtivo e de navegabilidade. Dada a pouca profundidade e sedimentação agressiva da frente ribeirinha do Barreiro estima-se que seja necessário um grande volume de dragagens para o estabelecimento dos acessos marítimos e manutenção dos canais e bacias de manobra. Esse volume foi referenciado por CEREJEIRA (2014) na ordem dos 18 Mm<sup>3</sup> e por MOREIRA (2015) na ordem dos 21 Mm<sup>3</sup>, não se sabendo porém a profundidade ZH considerada para o cálculo. Para além dos elevados custos associados, ronda os 90 milhões de euros segundo MOREIRA (2015), estas operações obrigam a especial atenção no Estudo de Impacte Ambiental sob as alterações ao equilíbrio hidrodinâmico local.

#### **2.4.4. IDENTIFICAÇÃO DOS POTENCIAIS IMPACTES RELEVANTES**

Em função das características, localização e dimensão do projeto, são esperados impactos ambientais significativos, cuja avaliação exige conhecimentos aprofundados de hidrogeologia e ciências da engenharia. No âmbito da proposta de definição do estudo de impacte ambiental (APL, 2014) foram consideradas particularmente relevantes as repercussões sobre a hidrodinâmica, regime sedimentar e qualidade da água, resultantes das alterações a ser efetuadas na linha de costa e das dragagens previstas no projeto. Para quantificar estas alterações urge a necessidade de desenvolver modelos numéricos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos para a migração de poluentes na área intervencionada.

Entre os objetivos definidos contidos no PDA (APL, 2014) estão a caracterização, quantitativa e qualitativa, das unidades hidrogeológicas e das massas de água afetadas, a identificação das zonas de infiltração máxima indispensáveis à recarga dos aquíferos e a identificação de potenciais fontes de poluição pontual e difusa.

Os estudos de caracterização desenvolvidos pela APL para a zona do Barreiro não revelaram a presença de contaminantes, particularmente metais pesados capazes de condicionarem eventuais operações de dragagem (nos termos do disposto na Portaria nº 1450/2007, de 12 de novembro). No entanto, FIGUEIRA (2014) refere que nos estudos realizados com vista à TTT foram detetados lodos fortemente contaminados (classes 4 e 5) nos locais previstos para a construção dos acessos marítimos e bacia de manobra. Já em terra é publicamente assumido a presença de um passivo ambiental na área industrial do Barreiro, cuja resolução constituirá um dos principais benefícios da execução do projeto. Estes terrenos albergaram durante décadas diversas unidades industriais e fabris, no entanto, encontram-se em acentuado declínio, parcialmente desocupados ou com capacidade de exploração reduzida, assentando-se à degradação do espaço envolvente (APL, 2014).

Depois de serem revogados os projetos relativos à TTT (2008), Plano de Urbanização para o território da Quimiparque e área envolvente (2008) e Ligação Ferroviária de Alta Velocidade (2010), a instalação de uma nova zona portuária e consequentes espaços industriais tornou-se vital para rentabilizar o espaço em desuso, contribuindo para impulsionar a economia local. Neste contexto, podem ser cometidos excessos no que diz respeito à exploração dos recursos hídricos subterrâneos que comprometam a sustentabilidade hídrica do concelho. As alterações da frente ribeirinha e a dragagem avulta de sedimentos, junto ao estuário, aumentarão o contato entre as águas salinas e as águas doces do sistema aquífero que, juntamente com os rebaixamentos piezométricos, poderão ampliar o efeito da intrusão salina, já evidentes nos aquíferos superficiais.



### 3. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1. METODOLOGIA

A metodologia adotada para os objetivos pretendidos contempla diversas etapas, nas quais se pretende obter o modelo conceptual do sistema aquífero para a região e desenvolver o modelo numérico representativo do fluxo subterrâneo para a frente ribeirinha do Barreiro. Na base deste estudo está a avaliação da vulnerabilidade do sistema aquífero à intrusão salina, tendo em conta o regime de extração instalado junto ao estuário e os efeitos de obras portuárias na degradação da qualidade da água do sistema. Para o feito, a metodologia foi agrupada nos seguintes itens, obedecendo à seguinte ordem cronológica de trabalhos: 1) Caracterização geológica e hidrogeológica da área de estudo; 2) Elaboração do modelo conceptual do funcionamento hidráulico; 3) Simulação do fluxo subterrâneo na frente ribeirinha do Barreiro (FEFLOW); 4) Avaliação e caracterização da intrusão salina no sistema aquífero e sensibilidade do local para albergar obras hidráulicas (Figura 3.1).

Os meios de trabalho foram obtidos pela recolha de dados geológicos e hidrogeológicos de sondagens e bibliografia de estudos e trabalhos efetuados na região, publicados em artigos científicos ou de arquivos de organismos da tutela (APA, LNEG, CMB) e Universidades. Procedeu-se à compilação e interpretação dos dados, a fim de se caracterizar a área de estudo. O modelo geológico baseou-se na construção de perfis geológicos, correlacionando as colunas litológicas das sondagens situadas próximo do estuário do Tejo, enquanto o modelo hidrológico foi obtido através do MDT e utilizando as ferramentas do ArcGIS para a caracterização do escoamento superficial.

A interpretação hidrogeológica da informação anteriormente obtida e a análise temporal de um conjunto de níveis estáticos e hidrodinâmicos de sondagens hidrogeológicas conduziu à elaboração do modelo conceptual do funcionamento hidráulico do sistema aquífero. São assim definidas as unidades hidrogeológicas dominantes e o comportamento do fluxo subterrâneo em regime de extração nas proximidades do estuário. Os ensaios de bombeamento permitiram estimar a transmissividade e a condutividade hidráulica do aquífero greso-calcário confinado, única formação explorada economicamente na região ribeirinha do Barreiro.

Na modelação hidrogeológica utilizou-se o *software* FEFLOW, um modelo interativo de simulação, em 2D ou 3D, do fluxo subterrâneo por elementos finitos. Foi adicionada informação de partida gerando assim uma malha 3D, discretizada verticalmente, condicionada pelo modelo conceptual hidrogeológico estabelecido anteriormente. Procedeu-se à simulação do fluxo subterrâneo em estado estacionário adotando os níveis estáticos medidos aquando da abertura dos primeiros furos industriais, aplicando depois diferentes regimes de extração para a simulação em estado transiente. Recorrendo aos mecanismos do modelo foram calculados balanços hídricos, para todo o domínio modelado e individualizados para cada unidade aquífera, e linhas de fluxo regressivas determinadas em função do sistema de captação implantado no setor setentrional do Barreiro.

Em função das características hidrogeológicas e dos resultados obtidos no modelo numérico de fluxo subterrâneo avaliou-se a suscetibilidade do local à contaminação salina na zona de contato com o estuário do Tejo, detalhando a possibilidade de ocorrerem transferências de águas entre as formações aquíferas, nomeadamente das camadas superiores que apresentam sinais evidentes de salinização e das camadas subjacentes ao estuário do Tejo para o aquífero greso-calcário confinado da região.

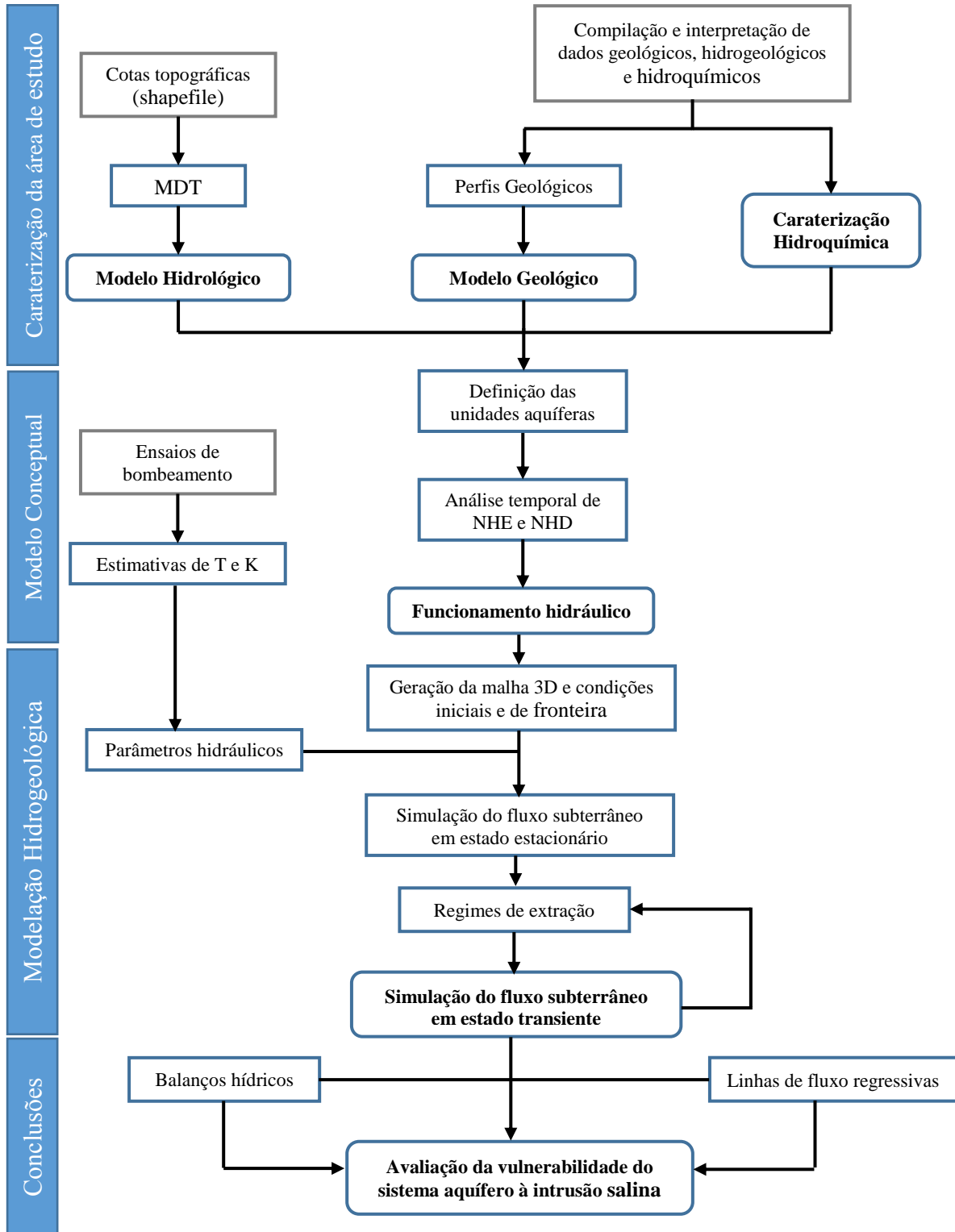


Figura 3.1: Organograma das etapas da metodologia adotadas para este estudo

### 3.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.2.1. INTRUSÃO SALINA E GESTÃO DE AQUÍFEROS COSTEIROS

Designa-se por intrusão salina o fenómeno de mistura de água doce e salgada que ocorre em aquíferos costeiros na interface de contato entre as águas continentais e marinhas impulsionada pelas diferenças de densidade (Figura 3.2). A água salgada, por ser mais densa, mergulha sob a água doce, criando uma interface entre os dois fluidos em forma de cunha. Em condições hidrostáticas estáveis, o gradiente hidráulico existente nos aquíferos costeiros induz um fluxo de água doce em direção ao mar, mantendo a cunha salina em posição de equilíbrio. Este equilíbrio é alterado quando o caudal extraído pelas captações subterrâneas provoca rebaixamentos acentuados ou, no limite, quando o volume de exploração supera a recarga natural do aquífero possibilitando, assim, a penetração das águas salinas no continente. Este fenómeno, natural, é potenciado quando se reduz o gradiente hidráulico nos aquíferos e, conseqüentemente, as descargas subterrâneas para o mar ou por oscilações eustáticas do nível do mar (FELISA et al., 2013).

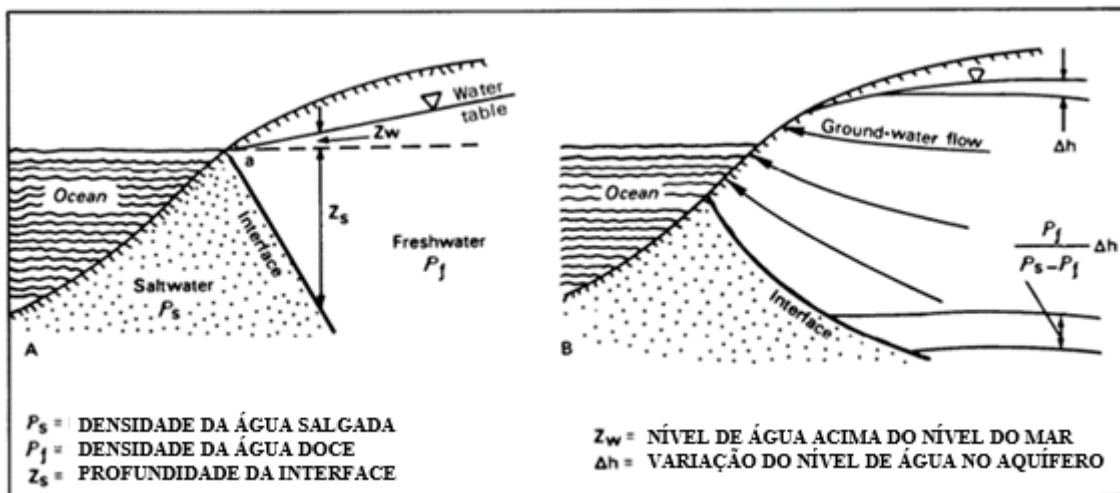


Figura 3.2: A) Posição da interface água doce/água salgada em equilíbrio hidrostático; B) Posição da interface considerando a descarga das águas subterrâneas (adaptado de FREEZE e CHERRY, 1979).

Quando se pretende implementar sistemas de captação de água num aquífero costeiro colocam-se diversas questões relacionadas com o número máximo de captações, os respetivos locais de implantação e a quantidade de água a extrair em cada uma. Estes fatores são ajustados para que sejam suprimidas as necessidades hídricas locais, maximizando o desempenho económico dos sistemas e mantendo sob controlo a intrusão salina. Por norma, as entidades gestoras procuram aumentar o caudal de exploração das captações subterrâneas para corresponder a estas necessidades, induzindo aumento do cone de rebaixamento no aquífero. Se os fluxos laterais não compensarem o caudal extraído, o sistema torna-se inoperante e em virtude das extrações descontroladas dá-se a degradação da qualidade da água doce por mistura com água salina. Neste contexto é importante estudar o fenómeno da propagação salina em função dos locais e dos caudais de extração minimizando assim o risco de salinização das captações

subterrâneas. A progressão da cunha salina dá-se de forma lenta, mas contínua, alcançando gradualmente as captações mais afastadas do mar (FERREIRA DA SILVA e HAIE, 2004).

Por outro lado, a profundidade das captações pode influenciar a posição da cunha salina, nomeadamente na presença de sistemas multicamada. O bombeamento excessivo num aquífero pode induzir recarga nas formações adjacentes por drenância vertical e se esse aquífero estiver contaminado, esta propaga-se pelo sistema (FERREIRA DA SILVA e HAIE, 2004). Se o abandono da captação não for a primeira opção, é desencadeada a necessidade de aumentar a profundidade da mesma, a capacidade das bombas e o consumo energético. A sustentabilidade económica da exploração fica assim comprometida, obrigando a recorrer a alternativas de abastecimento externas à área costeira (CABRAL, 2004).

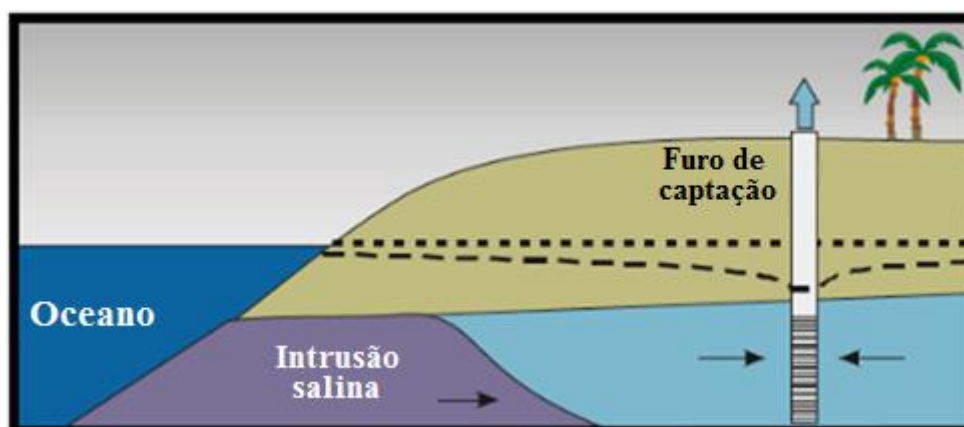


Figura 3.3: Migração da intrusão salina em virtude do rebaixamento piezométrico por bombeamento excessivo em áreas costeiras (adaptado de JOHNSON, 2007).

Nos estuários a distribuição da salinidade e das correntes fluviais pode ser modificadas por alterações no regime dos caudais fluviais causada pela construção de barragens e alterações batimétricas devido à variação do fluxo de sedimentos e à remoção de areias. A circulação de água no interior é essencialmente controlada por forçantes marinhas e fluviais, donde resultam correntes residuais de águas salobras de salinidade intermédia, entre os 5 e os 30 ‰. Enquanto as marés determinam as oscilações no volume da massa de água estuarina e nas respetivas concentrações de sais, as descargas fluviais induzem efeitos de advecção e estratificação vertical da coluna de água. Esta dinâmica gera um gradiente de salinidade do continente em direção ao oceano, cuja intensidade depende dos volumes e das velocidades das correntes marítimas e fluviais (VIEIRA e PINHO, 2010).

Em locais próximos dos estuários existe o risco de invasão das captações pela água salobra, cuja remoção é um processo bastante dispendioso e raramente se apresenta como uma solução economicamente viável. Entre as medidas propostas por FERREIRA DA SILVA e HAIE (2004) para mitigação deste problema estão a redução das extrações de água doce no aquífero, maior controlo de obras de engenharia que quebrem o equilíbrio natural água doce/água salgada e recarga artificial de aquíferos. FERREIRA DA SILVA (2003) salienta que o uso de parte da água superficial disponível na região, das águas pluviais ou das águas residuais devidamente tratadas, constitua um verdadeiro

suplemento para limitar o avanço das águas salgadas e subsequentemente aumento das reservas. Tal pode consistir na criação de uma barreira hidráulica positiva, através da injeção de água doce em furos instalados no local, evitando assim que a água salgada penetre pelo continente (Figura 3.4).

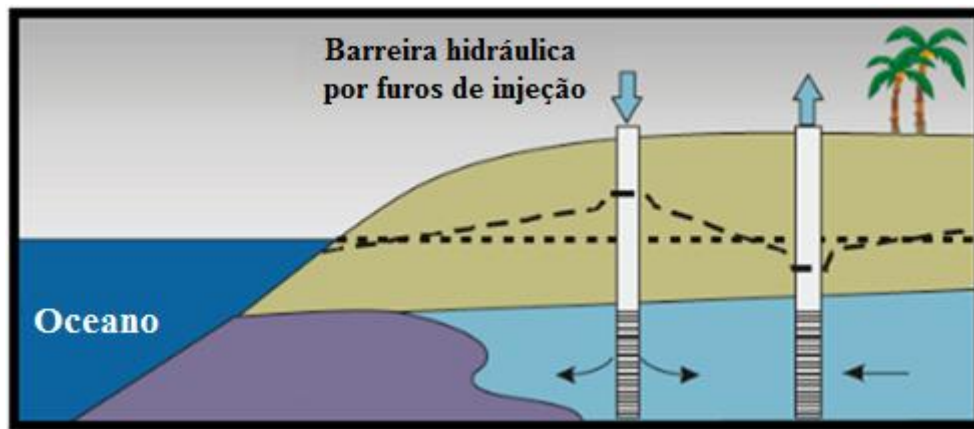


Figura 3.4: Esquema de uma barreira hidráulica positiva criada pela injeção artificial de água para restringir o avanço da intrusão salina em áreas costeiras (adaptado de JOHNSON, 2007).

### 3.2.2. MODELAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os modelos numéricos de sistemas hidrogeológicos são representações matemáticas de situações reais de escoamento subterrâneo que podem incluir ou não transporte de contaminantes, desenvolvidos a partir de um modelo conceptual idealizado com base no levantamento e interpretação de dados geológicos e hidrogeológicos. Simulam a resposta físico-química de aquíferos sujeitos a perturbações, tais como, a injeção ou extração de água ou a migração de um resíduo tóxico. São cada vez mais utilizados na gestão dos recursos hídricos subterrâneos pois possibilitam prever com certo rigor situações futuras, por vezes passadas, auxiliando a tomada de decisões na resolução de diferentes problemáticas. Entre diversas aplicações, os modelos numéricos são utilizados na otimização de sistemas de captação de água, na avaliação de diferentes regimes de exploração em áreas vulneráveis, na definição de zonas de proteção de captações e na prevenção, mitigação e/ou eliminação de uma fonte poluidora (BONGANHA et al., 2007).

Os simuladores numéricos utilizam um conjunto de ferramentas matemáticas para resolver as equações que regem o fluxo subterrâneo de forma a reproduzir o comportamento físico e químico da água no meio subterrâneo. A equação diferencial parcial tridimensional, obtida pela conjugação da equação do balanço de massas e da lei de Darcy, é aplicada em modelos matemáticos como a lei que rege o escoamento subterrâneo. Considerando um volume elementar representativo de um aquífero, num meio heterogéneo, anisotrópico e em estado transiente, com os eixos do sistema de coordenadas a coincidirem com as principais direções do tensor da condutividade hidráulica e a água a uma densidade constante, a equação fundamental de fluxo subterrâneo é representada pela equação (3.1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( Kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t) = S_s \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (3.1)$$

Sendo  $h$  a altura piezométrica (L),  $t$  o tempo (T),  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  os valores das condutividades hidráulicas ( $LT^{-1}$ ) nas 3 direções do espaço,  $W$  as fontes/perdas de água no sistema ( $L^3T^{-1}$ ) e  $S_s$  o coeficiente de armazenamento específico. Para um modelo de transporte de massa, a equação diferencial que descreve o comportamento e transporte de contaminantes da espécie  $k$  num escoamento subterrâneo tridimensional e em regime transiente é dada pela equação (3.2):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (3.2)$$

Sendo  $C^k$  as concentrações das espécies  $k$  dissolvidas ( $ML^{-3}$ ),  $\theta$  a porosidade do meio sub-superficial,  $x_i$  a distância segundo a coordenada cartesiana  $x$  (L),  $D_{ij}$  o tensor do coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $L^2T^{-1}$ ),  $v_i$  a velocidade linear da água nos poros ( $LT^{-1}$ ),  $q_s$  o rácio volumétrico de fluxo por unidade de volume ( $T^{-1}$ ),  $C_s^k$  a concentração das fontes ou perdas de fluxo das espécies  $k$  ( $ML^{-3}$ ) e  $\sum R_n$  o termo que expressa o tipo de reação química ( $ML^{-3}T^{-1}$ ).

Em função da dimensão e natureza do problema a ser estudado e dos dados existentes procede-se a seleção do modelo numérico. Dentro das opções disponíveis deve-se atender as características de cada modelo, nomeadamente, se se pretende um modelo numérico bidimensional (2D) ou tridimensional (3D), de diferenças finitas ou elementos finitos, somente de fluxo subterrâneo ou inclusão do transporte de massa. Este conjunto de fatores é determinado consoante o objetivo do trabalho e complexidade do modelo, tendo em conta as opções de calibração do modelo matemático, de modo a diminuir as incertezas inerentes à representação simplificada de um sistema real (BONGANHA et al., 2007).

### 3.2.3. MODELAÇÃO DA INTRUSÃO SALINA (FEFLOW)

A propagação salina num sistema aquífero pode ser razoavelmente prevista recorrendo a modelos numéricos construídos com base em dados monitorizados, utilizados no planeamento, gestão, proteção e remediação dos recursos hídricos subterrâneos. Modelos de simulação de comportamento permitem estimar caudais de água doce a montante necessários para contrabalançar o efeito da intrusão salina em captações subterrâneas ou estimar a extensão da pluma de água doce nas águas costeiras adjacentes à embocadura fluvial. Os modelos que adotam regimes de fluxo 3D e consideram a heterogeneidade e anisotropia do meio são os que melhor traduzem os problemas relacionados com a intrusão salina. Estes possibilitam caracterizar de forma mais adequada a zona de transição ou interface água doce/água salgada, não considerando uma transição brusca num modelo simplificado. Neste contexto, o modelo numérico FEFLOW constitui uma ferramenta útil para modelação do comportamento dos sistemas hidrogeológicos, contendo todas as valências para prever e resolver problemas.

O FEFLOW consiste num modelo interativo de simulação em 2D ou 3D do fluxo subterrâneo variável em função da densidade e dos processos de transporte de massa e de calor nas águas subterrâneas. O FEFLOW utiliza o método numérico dos elementos finitos (FEM) na resolução de equações diferenciais

parciais do escoamento subterrâneo e transporte de massa. As funcionalidades do modelo permitem entre muitos aspetos a modelação de sistemas aquíferos que se caracterizem pela existência (ou não) de superfícies livres, como é o caso de aquíferos freáticos e aquíferos suspensos, implementando uma aproximação que permite a movimentação dos elementos da malha e modelação de fenómenos de transporte variável em função simultânea das densidades e da temperatura (DIAMANTINO e LOBO FERREIRA, 2002).

A generalidade dos modelos numéricos apoiam-se nos princípios físicos de Ghyben e Herzberg para simular o comportamento da intrusão salina num aquífero costeiro que, considerando o equilíbrio hidrostático entre as duas colunas de água de diferentes densidades, permite calcular a posição da interface água doce/água salgada pela equação (3.3):

$$Z = [\rho_s / (\rho_s - \rho_0)] h_{SL} \quad (3.3)$$

Sendo  $\rho_0$  e  $\rho_s$  respetivamente, a densidade da água doce e salgada ( $ML^{-3}$ ),  $h_{SL}$  a elevação da água doce sobre o nível médio do mar (L) e  $Z$  a posição da interface em profundidade (L). As densidades podem ser determinadas em função da salinidade que para a água salgada é cerca de 2.5% superior em relação à água doce. Assim, se substituirmos na equação (3.3) as respetivas densidades ( $\rho_0 = 1 \text{ kg/m}^3$  e  $\rho_s = 1.025 \text{ kg/m}^3$ ) obtém-se a seguinte relação (3.4):

$$Z = 40h_{SL} \quad (3.4)$$

A equação (3.4) demonstra que a interface se situa a uma profundidade aproximadamente igual a 40 vezes a coluna de água doce sobre o nível do mar. No entanto, esta lei nem sempre descreve corretamente a posição da interface. Apenas se verifica quando a espessura da zona de mistura é mínima em comparação com a profundidade e quando o movimento da água é praticamente horizontal e permanente. Na realidade a transição entre as águas continentais e marinhas não é brusca, constituindo-se na maioria dos casos uma zona de mistura ampla (ROZELL, 2007).

Para o cálculo do nível piezométrico em função da densidade e salinidade da água em cada corpo de água superficial, o FEFLOW utiliza a fórmula (3.5) proposta por DIERSCH (2002) (in DHI-WASY GmbH, 2013), considerando a cota topográfica do aquífero e densidade da água constante em profundidade, sendo os parâmetros utilizados nesta equação determinados pelas equações (3.6) e (3.7):

$$h = -\alpha(z - z_0) \quad (3.5)$$

$$\alpha = (\rho_s - \rho_0) / \rho_0 \quad (3.6)$$

$$\rho_s \approx \rho_0 + 0.7C_s \quad (3.7)$$

Sendo  $h$  o nível piezométrico (L),  $z$  a cota topográfica do aquífero (L),  $z_0$  o nível médio do mar (L),  $\alpha$  a relação de densidades entre os dois fluidos,  $C_s$  a concentração máxima de cloretos na água ( $ML^{-3}$ ),  $\rho_s$  a densidade da água para uma máxima concentração de cloretos ( $ML^{-3}$ ) e  $\rho_0$  a densidade da água doce

( $ML^{-3}$ ). Num modelo que depende da densidade de cada fluido não é necessário especificar valores para este parâmetro. Em vez disso, a densidade ( $\rho$ ) é implicitamente dada pela condutividade hidráulica ( $K$ ), que é aqui definida como a velocidade que o fluido atravessa um meio poroso sem que haja qualquer gradiente de pressão. A condutividade hidráulica é influenciada pela permeabilidade intrínseca do fluido ( $k$ ), viscosidade ( $\mu$ ), peso específico ( $\rho$ ) e aceleração gravítica ( $g$ ), considerando as equações (3.8) e (3.9):

$$K = k \mu_0 \rho_0 g \quad (3.8)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot (C - C_0/C_S - C_0)) \quad (3.9)$$

Para o modelo de fluxo e transporte de massa em função da densidade dos corpos de água presentes, o FEFLOW assume uma relação linear entre a concentração ( $C$ ) e o peso específico ( $\rho$ ) (Figura 3.5), dada pela equação (3.9). Os valores inicialmente atribuídos para  $\rho_0$  e  $C_0$  no modelo são  $1000 \text{ kg/m}^3$  e  $0 \text{ mg/l}$ , respetivamente, valores referência representativos da água doce, no entanto, estes podem ser alterados, considerando a concentração inicial de cloretos na água doce. A concentração máxima atribuída à água salina ( $C_S$ ) pode ser escolhida arbitrariamente, sendo que o FEFLOW adota um valor inicial de  $35000 \text{ mg/l}$ .

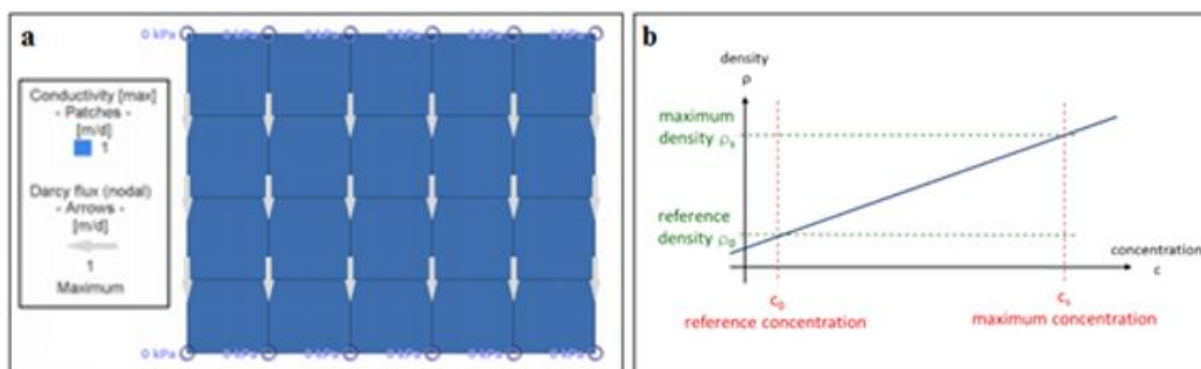


Figura 3.5: a) Ilustração da definição da condutividade hidráulica; b) relação concentração/densidade de soluto adotada no modelo FEFLOW (DHI-WASY GmbH, 2014).

## 4. ANÁLISE DE DADOS

### 4.1. DADOS INVENTARIADOS

#### 4.1.1. DADOS DA CMB

Este município forneceu dados relativos a 11 captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público realizadas, entre 1987 e 2012, pelas empresas A. Cavaco, SA., Furúgua Lda. e Renato Azenha Lda. Dentro da informação recolhida foram compilados os dados técnicos e das características hidráulicas das captações, nomeadamente, o posicionamento dos níveis hidrostáticos e hidrodinâmicos à data da abertura dos furos, os caudais de ensaio e de exploração e os perímetros de proteção propostos em 2013.

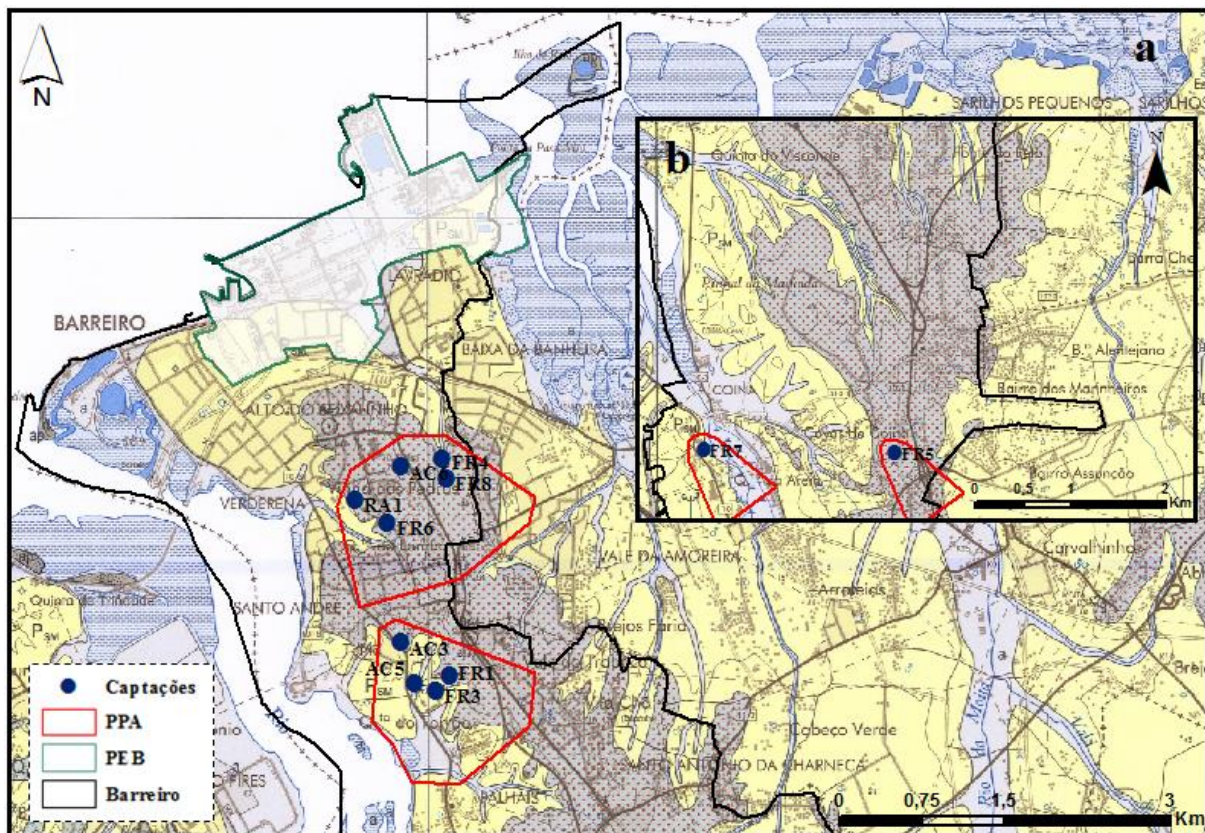


Figura 4.1: Localização das captações para abastecimento público da Câmara Municipal do Barreiro e respetivos perímetros de proteção alargados (PPA): a) sector norte e intermédio e b) sector sul.

As captações alcançam profundidades entre os 266 e 320 m e intercetam as camadas arenosas pliocénicas e greso-calcárias miocénicas. Pela profundidade a que se encontram os ralos, estas captam predominantemente nos níveis confinados arenosos da base do Pliocénico e camadas greso-calcárias permeáveis do Miocénico. Esta tendência verifica-se em praticamente todos os furos abertos na região para uso industrial, com tubos ralos posicionados nos níveis aquíferos situados entre os 150 e 300 m, estando as captações cimentadas nos primeiros metros de perfuração. As captações públicas do Barreiro estão distribuídas por 3 setores municipais: no sector norte, no Alto de Seixalinho e Lavradio, localizam-

se as captações AC6, RA1, FR4, FR6 e FR8, no sector intermédio, em Santo André, as captações AC3, AC5, FR1 e FR3, e no sector sul, em Coina, as captações FR5 e FR7 (Figura 4.1).

Este mesmo organismo disponibilizou também as cotas topográficas para toda a área do concelho do Barreiro, em formato shapefile, permitindo assim fazer o Modelo Digital do Terreno (MDT) para a área em estudo e obter as cotas para os restantes pontos inventariados, corrigindo algumas diferenças verificadas nos dados do SNIRH e LNEG, de forma a facilitar a sua correlação. Para as áreas não abrangidas pela shapefile, Baixa da Banheira, Vale da Amoreira e Alhos Vedros, situadas no concelho da Moita, partiu-se do formato digital da Carta Militar 443 – Moita, para desenvolver a shapefile com informação topográfica que viria a complementar o modelo anteriormente obtido.

#### 4.1.2. DADOS DO SNIRH

No site do SNIRH ([www.snirh-pt](http://www.snirh-pt)) estão disponíveis dados relativos a 5 pontos de água subterrânea na área em estudo e são referentes à rede de monitorização do sistema aquífero T3 - Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda. Destes, um pertence à rede de quantidade (442/241) e os outros quatro à rede de qualidade (442/536), (442/38), (442/412) e (443/48), sendo que um deles (443/48) está localizado no município da Moita (Figura 4.2).

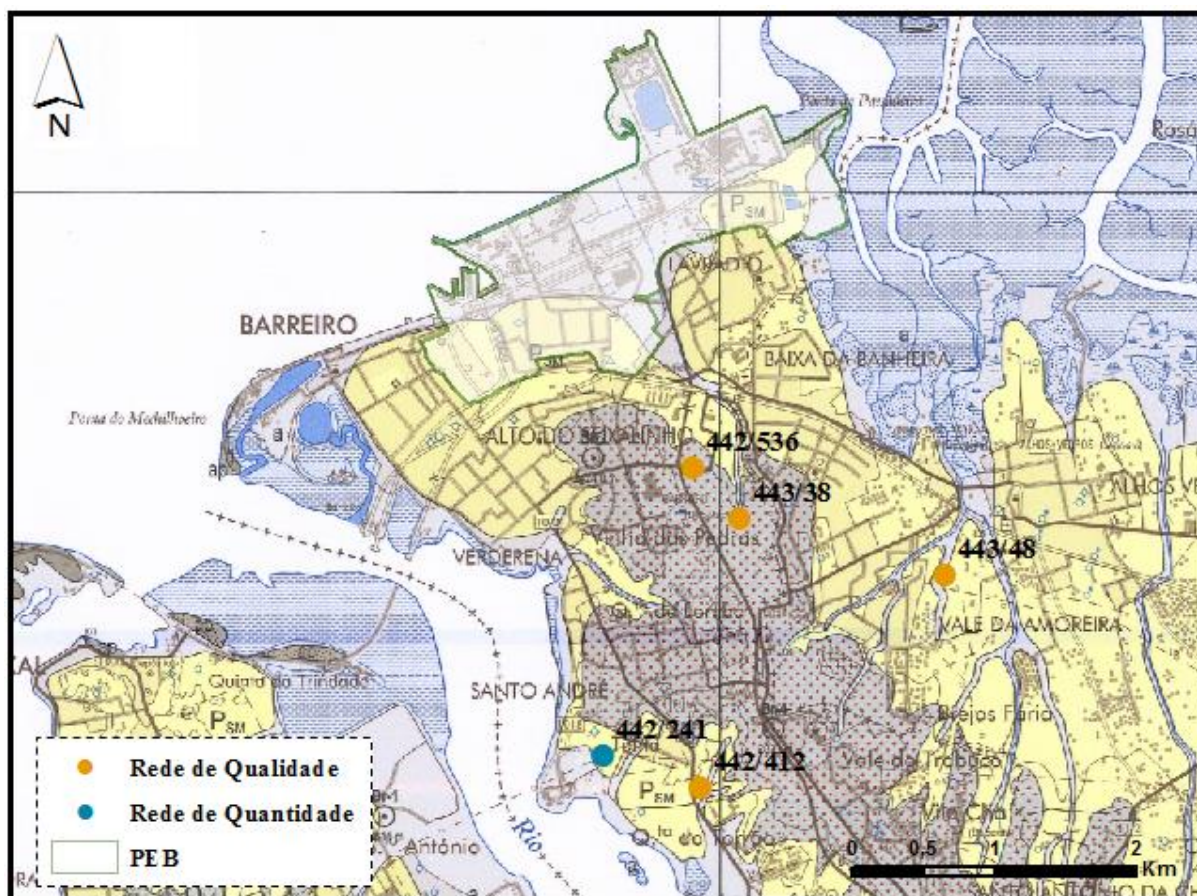


Figura 4.2: Localização dos pontos de água da rede de monitorização do SNIRH considerados neste estudo.

As características geológicas e hidrogeológicas destes pontos são pouco explícitas e de difícil interpretação, pelo que apenas se consideraram as medições periódicas dos níveis piezométricos e os dados da qualidade referentes à concentração de cloreto e condutividade. O ponto de água 442/241 pertence à rede de monitorização nacional ou de vigilância de quantidade e está localizado junto ao esteiro do rio Coina, na Azinheira Velha (Santo André). Este piezómetro com 14.3 m de profundidade está ativo desde 2000, registando a evolução temporal dos níveis freáticos na superfície livre. Os valores observados entre Janeiro de 2010 e Abril de 2015 (Figura 4.3) mostram uma tendência crescente dos níveis de água, variando estes entre os 5 e os 7.8 m de profundidade. Na mesma figura (4.3) é possível observar que os níveis freáticos medidos para o de ano hidrológico 2014/2015 se situam acima da média registada durante o período de 1999/2000 a 2014/2015.

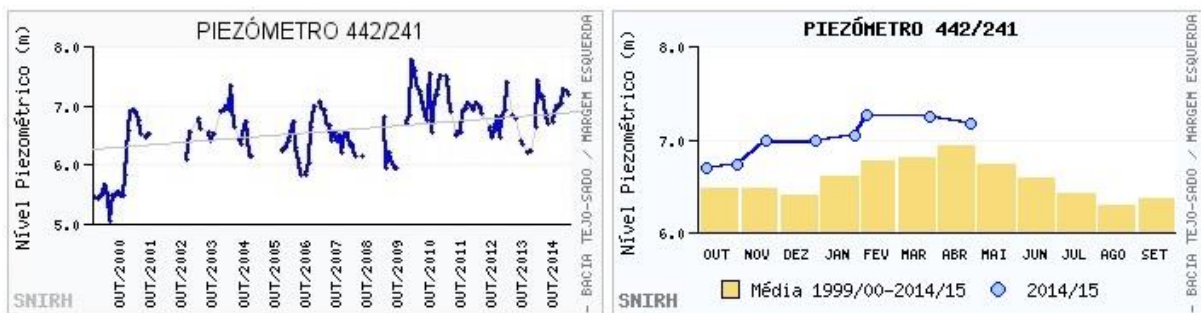


Figura 4.3: Representação gráfica da evolução do nível piezométrico (2000 - 2015) no ponto 442/241 da rede de monitorização e análise comparativa com o ano hidrológico de 2014/2015 (SNIRH, 2015).

#### 4.1.3. DADOS DO LNEG

Nos arquivos do LNEG constam 46 relatórios de sondagens hidrogeológicas, com particular interesse para este estudo, efetuadas nos concelhos do Barreiro, Seixal e Moita para prospeção e eventual exploração de água. Os furos atingem profundidades variáveis entre os 60 e 602 m, captando em diferentes níveis aquíferos do sistema mas, tal como acontece nas captações municipais, as camadas da base do Pliocénico e as gresos-calcárias do Miocénico são as mais exploradas. Dos 46 relatórios de sondagens recolhidos, 22 estão inseridos nos terrenos administrativos do Parque Empresarial do Barreiro. Estes relatórios contêm dados técnicos, litológicos e de ensaios de caudal de furos, abertos desde 1955 a 1981, utilizados para abastecimento industrial de empresas que por aqui passaram, estando alguns já desativados. No total foram inventariados 67 pontos de água das entidades LNEG, CMB e SNIRH correspondentes a sondagens hidrogeológicas, poços, furos de captação e monitorização, dos quais, apenas 37 possuem relatórios detalhados das litologias atravessadas (Anexo I).

As sondagens hidrogeológicas que constam da base de dados do LNEG situadas no setor setentrional do Barreiro concederam a informação de partida que possibilitou a construção do modelo numérico de fluxo subterrâneo, 3D, um dos principais objetivos deste estudo (Figura 4.4).

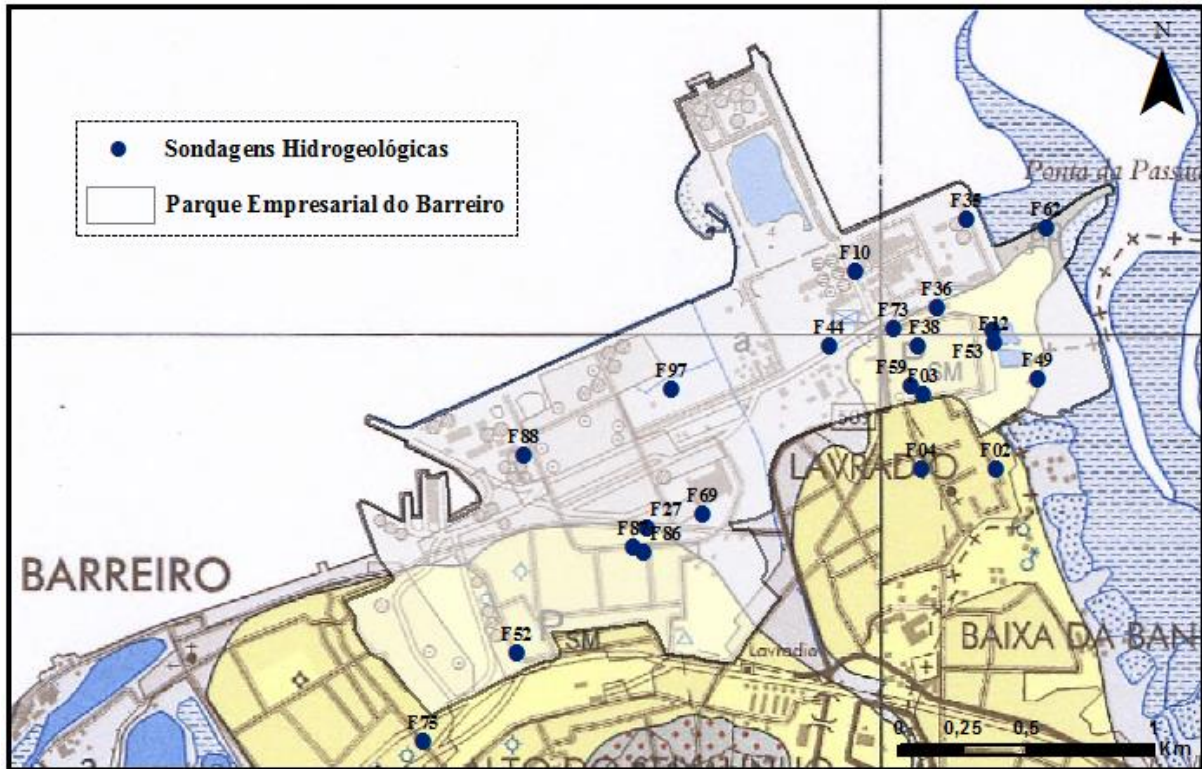


Figura 4.4: Localização das sondagens hidrogeológicas do LNEG no Parque Empresarial do Barreiro

## 4.2. CARATERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

Os pontos 443/38, 442/536, 442/412 e 443/48 pertencem à rede de monitorização nacional de qualidade de água subterrânea, dos quais estão disponíveis registos entre 2000 e 2008. Apoiados na legislação portuguesa (Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto), estes pontos verificam o cumprimento dos critérios e normas para a qualidade da água, através do Valor Máximo Admissível (VMA) e Valor Máximo Recomendado (VMR) estabelecidos para cada parâmetro e em função da utilidade da água. Estes valores não deverão ser ultrapassados sob risco de provocar efeitos adversos para a saúde, sendo que no caso do VMA não pode mesmo ser ultrapassado. No caso dos cloretos, principal indicador da contaminação por intrusão salina, o VMR situa-se nos 200 mg/l para águas subterrâneas destinadas a produção de água para consumo humano.

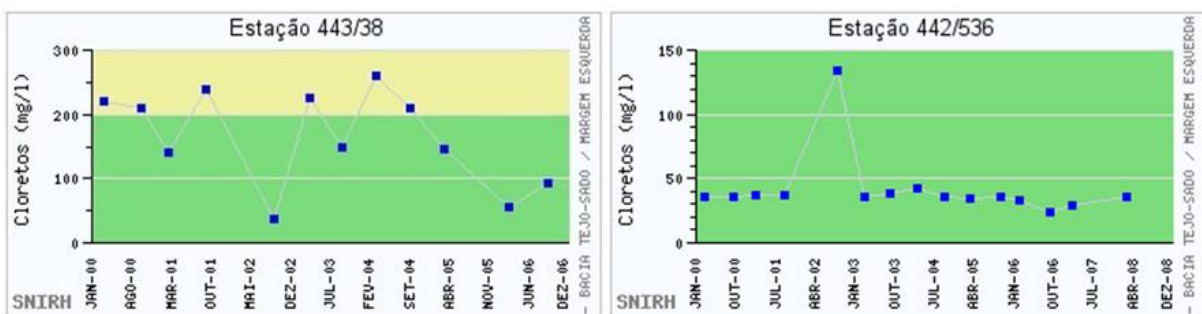


Figura 4.5: Representação gráfica das concentrações de cloretos nas águas subterrâneas nos pontos 443/38 (2000 - 2006) e 442/536 (2000 - 2008) da rede de monitorização nacional de qualidade (SNIRH, 2015).

Na figura 4.5 verifica-se que a concentração de cloretos nas águas subterrâneas no ponto 443/38 ultrapassou várias vezes o VMR, sendo que não existe VMA estabelecido para as águas destinadas à produção de água para consumo humano. O mesmo não sucedeu no ponto 442/536 onde a concentração de cloretos se manteve aproximadamente constante, nos 40 mg/l, com exceção de uma única medição anómala (134 mg/l). Estes pontos distam apenas 400 m entre si e situam-se ambos na localidade do Lavradio, no entanto, como é possível observar, apresentam resultados bastante díspares. A diferença entre as concentrações de cloretos nas águas analisadas pode ser justificada com o posicionamento dos tubos ralos nestas captações, já que ambas têm profundidades semelhantes na ordem dos 300 m. Enquanto o furo 442/536 tem os tubos ralos situados entre os 223 e os 300 m, captando exclusivamente nas camadas greso-calcárias, o furo 443/38 tem ralos abertos entre os 85,5 e os 261,5 m, captando em níveis aquíferos superiores, onde a concentração de cloreto é maior. Os restantes pontos (442/412 e 443/48) da rede de monitorização nacional, situados em zonas mais interiores do Barreiro e Moita (Figura 4.2), não apresentam qualquer valor acima dos VMR, entre 2000 e 2008.

Os pontos 443/38, 442/412 e 442/536 que pertencem à rede de monitorização de águas subterrâneas do SNIRH são, respetivamente, as captações AC2, AC5 e AC6 da CMB para abastecimento público. A captação AC2, cujo gráfico acima (Figura 4.5) apresenta algumas violações dos VMR já não se encontra ativa, não fazendo parte do atual lote de captações subterrâneas públicas do concelho. Nos restantes furos municipais não foram ultrapassados os VMR, num total de 510 análises efetuadas desde 2008, não contabilizando as captações FR5 e FR7, situados no extremo sul do Barreiro (Tabela 4.1).

O ião cloreto é conservativo constituindo um bom indicador da propagação salina e, como tal, não sofre grandes oscilações de concentração, mostrando apenas pequenas oscilações em função dos laboratórios e métodos utilizados para a sua determinação. Neste contexto, procurou-se apenas selecionar as captações que apresentam maior dispersão de resultados, de forma a identificar alguma tendência ou padrão no decorrer destes anos. Obviamente que qualquer captação que infrinja os VMR, não só de cloreto mas também de outros elementos, tem tendência a ser selada. Possivelmente foi o que sucedeu com a captação AC2 e provavelmente com a FR2, não existindo dados posteriores ao acontecimento. A condutividade elétrica é também um bom indicador, pois representa a carga mineral total na água, ou seja, a totalidade de sais dissolvidos na água (salinidade).

A correlação entre estes dois indicadores, determinada pelo coeficiente de Pearson, demonstrou que as captações que apresentam maior variância das variáveis são aquelas que mostram também maior correlação na grandeza dos valores. Se as medições tendem a ser constantes ao longo do tempo, basta existirem pequenas oscilações na condutividade elétrica que podem não estar correlacionadas com a concentração de cloretos, para que a correlação entre os dois indicadores seja baixa. Assim selecionaram-se as captações AC2, FR1 e FR2/RA1 para uma análise da distribuição temporal dos valores obtidos entre os anos de 2008 e 2014 (Figura 4.6 e 4.7).

## CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Valores médios, máximos e mínimos, dispersão e correlação das medições de cloretos (mg/l) e da condutividade elétrica (uS/cm) das águas subterrâneas nas captações para abastecimento público, localizadas no setor intermédio e norte do Barreiro, entre 2008 e 2014.

| Furo                                  | AC2   | AC3   | AC5   | AC6   | FR1   | FR2/RA1 | FR3   | FR4   | FR6   | FR8   |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Cloretos (mg/l)</b>                |       |       |       |       |       |         |       |       |       |       |
| <b>min</b>                            | 26    | 12    | 10    | 22    | 13    | 22      | 15    | 26    | 19    | 20    |
| <b>med</b>                            | 110   | 28    | 37    | 34    | 50,5  | 30      | 26    | 38    | 28    | 31,15 |
| <b>max</b>                            | 150   | 140   | 49    | 86    | 200   | 140     | 130   | 100   | 110   | 46    |
| <b>média</b>                          | 106,6 | 32,1  | 34,9  | 34,2  | 61,1  | 40,2    | 28,7  | 40,0  | 30,6  | 30,8  |
| <b>desvio.p</b>                       | 42,8  | 16,7  | 6,4   | 8,8   | 34,2  | 29,0    | 14,9  | 11,7  | 13,0  | 4,7   |
| <b>Condutividade elétrica (uS/cm)</b> |       |       |       |       |       |         |       |       |       |       |
| <b>min</b>                            | 100   | 170   | 120   | 153   | 180   | 200     | 170   | 200   | 200   | 190   |
| <b>med</b>                            | 440   | 340   | 240   | 390   | 380   | 400     | 330   | 380   | 360   | 380   |
| <b>max</b>                            | 590   | 440   | 390   | 490   | 821   | 1180    | 460   | 460   | 640   | 480   |
| <b>média</b>                          | 423,0 | 315,9 | 241,5 | 378,1 | 401,6 | 414,8   | 322,4 | 368,1 | 371,9 | 364,4 |
| <b>desvio.p</b>                       | 138,1 | 55,8  | 47,1  | 53,8  | 110,9 | 141,3   | 46,5  | 50,0  | 65,2  | 54,5  |
| <b>CP</b>                             | 0,54  | -0,13 | 0,12  | -0,21 | 0,62  | 0,80    | 0,10  | -0,15 | 0,62  | -0,14 |

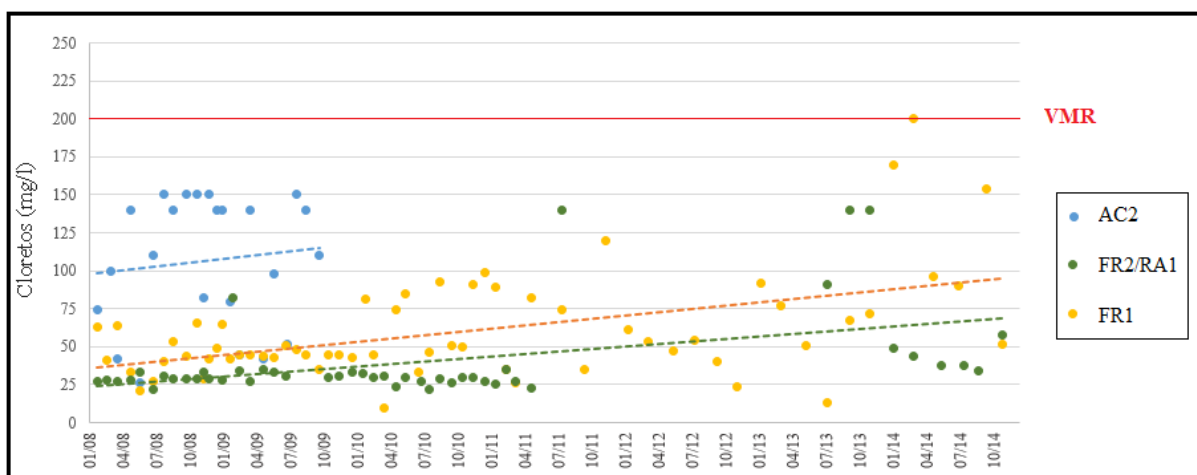


Figura 4.6: Evolução temporal (2008 – 2014) da concentração de cloretos (mg/l) nas captações municipais para abastecimento público AC2, FR2/RA1 e FR1.

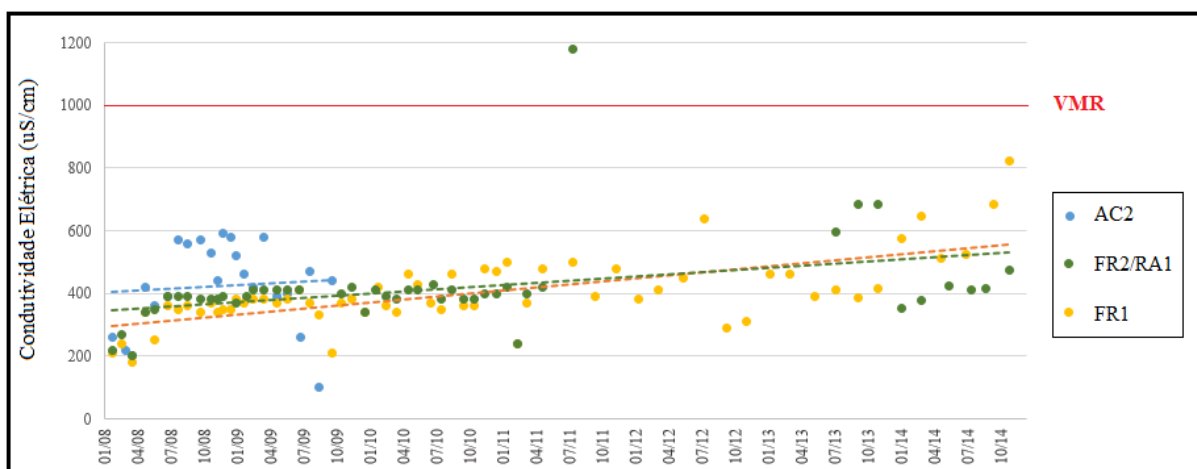


Figura 4.7: Evolução temporal (2008 – 2014) da condutividade elétrica (uS/cm) nas captações municipais para abastecimento público AC2, FR2/RA1 e FR1.

Os gráficos das figuras 4.6 e 4.7 demonstram uma tendência crescente de aumento da concentração de cloreto na água subterrânea durante o intervalo de tempo estudado. Dado o valor conservativo deste elemento, é de esperar que as concentrações continuem a aumentar nos anos, verificando-se o mesmo para a condutividade elétrica. As captações nas figuras (4.6 e 4.7) localizam-se em diferentes setores no Barreiro, a AC2 e FR2/RA1 no setor norte e a FR1 no setor sul, no entanto, estas estão praticamente à mesma distância do esteiro de Coina que se encontra sob influência das águas do estuário. Ainda assim as águas subterrâneas são menos mineralizadas no setor intermédio, verificando-se apenas um ligeiro aumento na concentração de nitrato (Figura 4.8).

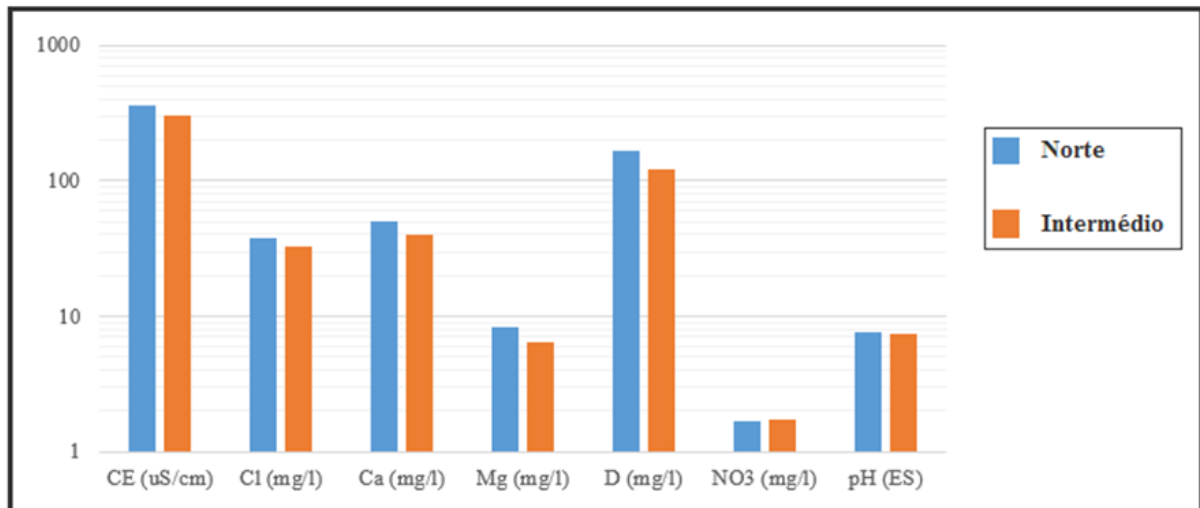


Figura 4.8: Valores médios para a condutividade elétrica, cloretos, cálcio, magnésio, dureza total, nitratos e pH nas captações do setor norte e intermédio do Barreiro para o ano de 2014.

Os dados recolhidos da qualidade da água junto ao estuário são escassos e correspondem apenas ao aquífero greso-calcário. A rede de amostragem no PEB é composta por 4 furos de captação de água subterrânea com cloragem doseada na saída, 1 reservatório elevado, e 12 pontos de amostragem na rede de distribuição de água na torneira do consumidor. As análises estão distribuídas por 4 trimestres ao longo do ano, sendo apenas disponibilizados os resultados das análises para o cloreto, sódio e condutividade elétrica dos anos de 2014 e 2015. Os valores máximos para o cloreto e condutividade elétrica nas águas analisadas foram, respetivamente, 51 mg/l e 454 uS/cm, obtidos no decorrer do ano 2015, enquanto o sódio apresentou um valor máximo 28 mg/l no segundo trimestre de 2014 (BAÍA DO TEJO, 2014 e 2015).

### 4.3. CARATERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

#### 4.3.1. MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

A caraterização hidrológica da área em estudo foi elaborada aplicando as ferramentas do ArcGIS 10.1 sobre a informação topográfica disponível. Gerou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) para o sector

norte da Península do Barreiro a partir da informação digital topográfica em formato vetorial disponibilizada pela CMB para a área do concelho e das curvas de nível e pontos cotados na base cartográfica 1:25000 para a restante área pertencente ao concelho da Moita. Dada a densidade de elementos de entrada, os valores de altitude foram interpolados com a função *Topo to Raster* que permite criar modelos hidrológicamente corretos, ou seja, são impostas restrições para assegurar a conexão da estrutura de drenagem. Com base na projeção anterior foi desenvolvida a rede triangular irregular (TIN) para representar o relevo (Figura 4.9), numa área alargada para S, com o objetivo de se obter uma melhor caracterização do escoamento superficial em direção à frente ribeirinha.

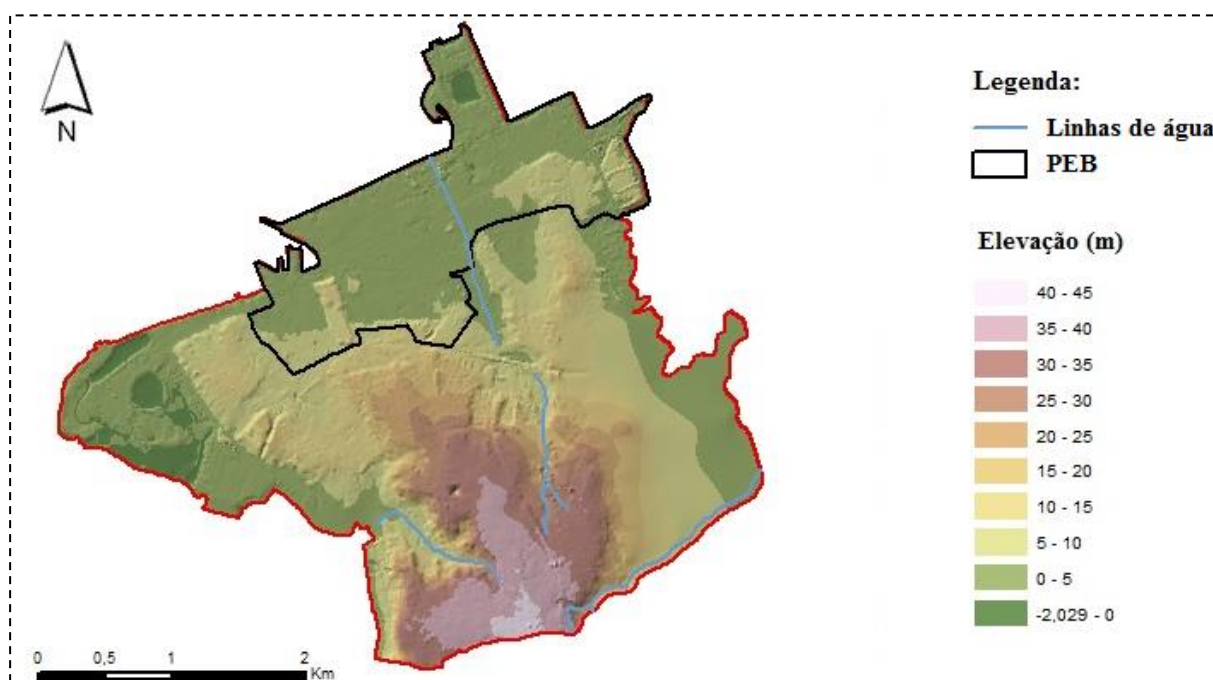


Figura 4.9: Modelo Digital de Terreno (MDT) do sector norte do concelho do Barreiro (representação da superfície topográfica em imagem TIN obtida em ArcGIS 10.1).

Na figura 4.9 observa-se que as cotas no setor setentrional do município do Barreiro oscilam entre os 0 e os 45 m. Na mesma encontra-se ainda representada a antiga área de jurisdição da Quimiparque com aproximadamente 3 km<sup>2</sup> que está atualmente incorporada no Parque Empresarial do Barreiro, situado no extremo norte do concelho frente ao estuário do Tejo. O terreno aqui é praticamente plano, sem grandes oscilações topográficas, elevado a apenas poucos metros acima do nível médio do mar, geralmente não ultrapassando os 5m de altitude. Esta área é enquadrada pelos principais aglomerados populacionais do concelho, Barreiro, Verderena, Alto do Seixalinho e Lavradio, situados em zonas erguidas em relação ao PEB.

Entre a localidade do Lavradio e Alto do Seixalinho existe mesmo uma depressão considerável, drenada por uma das linhas de água da região na Vala das Ratas, que atravessa toda a área do PEB até desaguar no estuário. Na parte central e interior são visíveis as cotas mais elevadas, num planalto que se estende desde a zona sul (Coína) que, em alguns pontos, chega a ultrapassar os 75 m de altitude.

### 4.3.2. MODELO HIDROLÓGICO

O modelo hidrológico foi obtido a partir do MDT utilizando a ferramenta *Fill* para corrigir as pequenas depressões ou espaços vazios gerados no modelo, de forma a evitar pequenas bacias hidrográficas isoladas sem correspondência com a realidade. De seguida, foram utilizadas as ferramentas, *Flow Direction*, *Flow Accumulation* e *Basin*, cujos resultados são apresentados na figura 4.10.

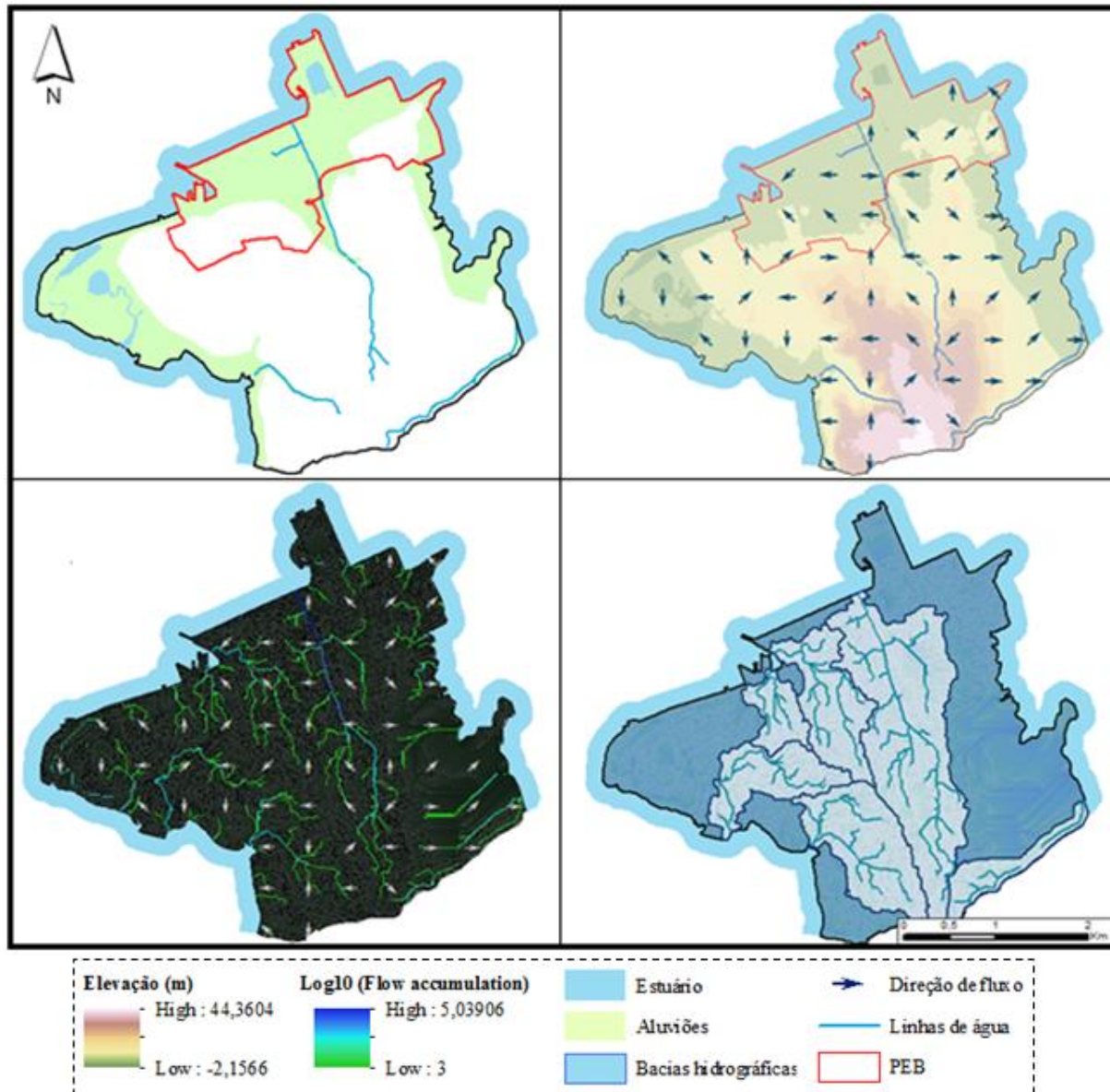


Figura 4.10: a) Representação das linhas de água presentes na carta geológica 34D – Lisboa; b) Desenho do padrão de escoamento superficial (*Flow Direction*); c) Rede de drenagem calculada para o sector norte do concelho do Barreiro (*Flow Accumulation*); d) Principais bacias hidrográficas simuladas para a presente área de estudo através da função (*Basin*).

O padrão do escoamento superficial foi obtido através da ferramenta *Flow Direction*, sendo posteriormente o *raster* convertido numa malha regular, em que cada célula apresenta o sentido de fluxo preferencial nesse espaço (Figura 4.10 b). De seguida, procedeu-se ao cálculo da rede de drenagem (*Flow Accumulation*), onde se utilizou a função logarítmica para condensar os valores obtidos,

selecionando apenas as linhas onde a acumulação de fluxo era considerável (Figura 4.10 c). Por fim, utilizou-se a função *Basin* para se obter as principais bacias hidrográficas, sendo apenas selecionadas as que possuíam área superior a 0.3 km<sup>2</sup> (Figura 4.10 d), pois o recorte da linha de costa origina múltiplas pequenas bacias, criadas por escoamentos locais próximos do estuário.

É difícil fazer correlação entre as simulações obtidas para o escoamento preferencial e a realidade física observada no terreno. A carta geológica 34D – Lisboa apenas evidencia 3 linhas de água (Figura 4.10 a), sendo elas, a norte, a vala das Ratas, a oeste, a vala dos Casquilhos e a este, já no domínio do município da Moita, uma das ramificações da vala da Amoreira. No terreno observa-se que estas são frequentemente interrompidas e, portanto, descontínuas, em zonas de forte ocupação antropogénica e impermeáveis. Aliás este aspeto estende-se a grande parte da área de estudo, à exceção dos terrenos do Parque Empresarial do Barreiro, que se encontram parcialmente desocupados, e às terras altas centrais donde derivam as linhas de água existentes. A zona de influência destes cursos de água é portanto reduzida, sendo as duas principais zonas de descarga o esteiro do rio Coina, na margem esquerda, e o Estuário do Tejo na frente ribeirinha.

#### 4.4. CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Para caraterizar geologicamente a área em estudo foram traçados perfis geológicos (Figura 4.11), cuja interpretação resultou da análise descritiva das colunas litológicas das sondagens. Os pontos escolhidos para o traçado possibilitaram desenhar dois perfis geológicos paralelos à linha de costa (Figura 4.12 e 4.14) e um outro perpendicular desde a área interior do concelho (Figura 4.15).

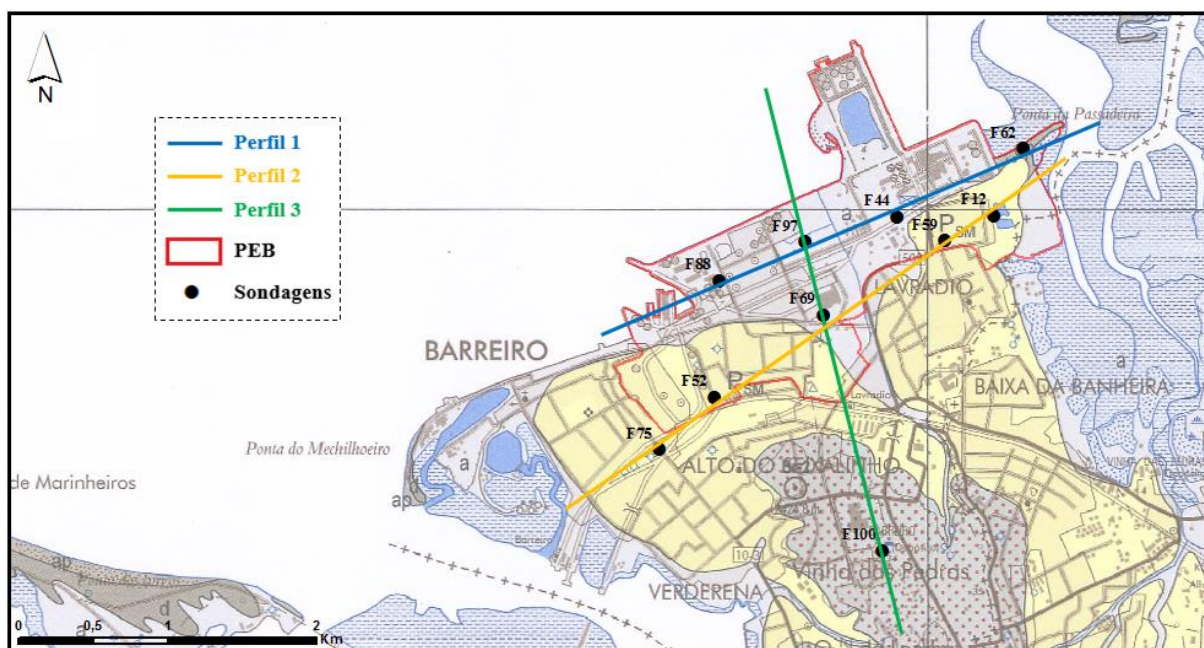


Figura 4.11: Localização dos perfis geológicos e sondagens hidrogeológicas utilizadas na caraterização geológica e construção do modelo hidrogeológico da área em estudo.

Na frente ribeirinha a profundidade das sondagens hidrogeológicas varia entre os 110 e os 312 m, intercetando as camadas mais recentes do Holocénico (aluviões) até ao Miocénico.

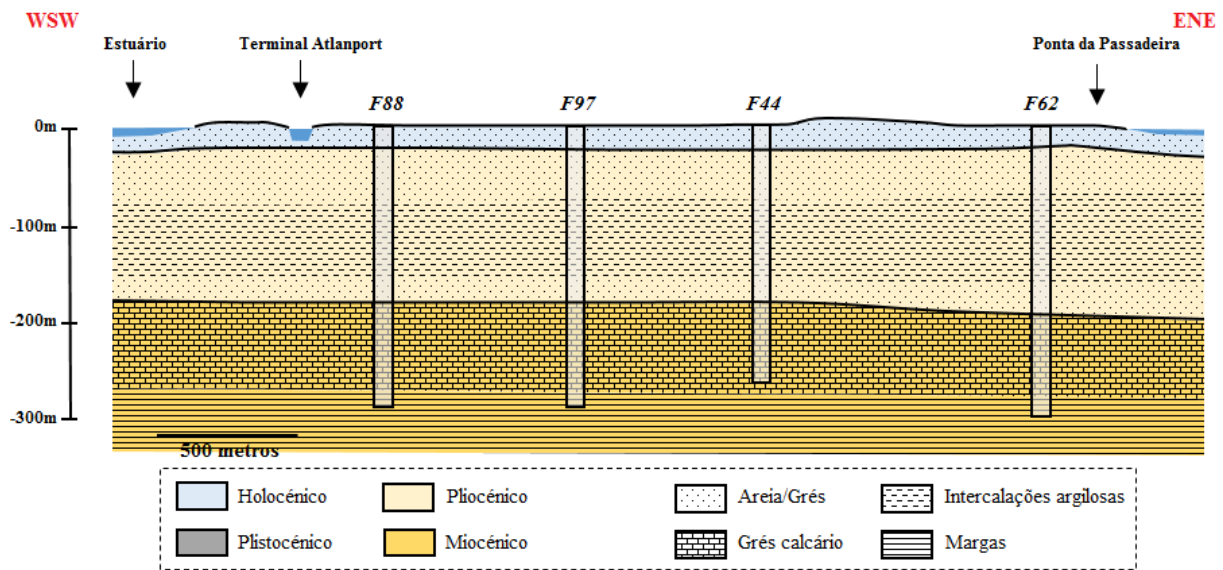


Figura 4.12: Perfil Geológico 1 - Frente ribeirinha do estuário do Tejo na zona norte do PEB.

O perfil 1 (Figura 4.12) foi traçado paralelamente à linha de costa, intercetando as sondagens mais próximas do estuário que se localizam no Parque Empresarial. Estes terrenos são parcialmente ocupados pelas aluviões cujas espessuras máximas, na frente ribeirinha, atingem os 26 m com tendência a aumentar para o interior do estuário. Estas são constituídas por areias de granulometria fina a grosseira, por vezes argilosas, podendo conter seixos grosseiros, conchas e elementos ferruginosos. Por vezes, no topo desta unidade, é possível identificar diferentes materiais de aterro, entre os quais, entulho, cinzas de pirite e saibro. As aluviões distinguem-se das areias pliocénicas pela sua cor castanha e/ou avermelhada, em contraste com o amarelo da formação de Santa Marta.

O Pliocénico que aflora em grande parte da área de estudo é constituído por areias pouco consolidadas de cor amarela ou castanha clara, correspondente a unidade estratigráfica da formação de Santa Marta. Dentro desta unidade é possível distinguir dois tipos preponderantes de comportamento hidráulico do sistema aquífero. As camadas são essencialmente arenosas no topo, onde as argilas aqui presentes são de carácter descontínuo ou de tipo lenticular.

No entanto, existe uma fração argilosa onde predominam areias argilosas, argilas e margas de cor cinzenta esverdeada, cuja espessura é bastante variável na área de estudo. Na frente ribeirinha o início da sedimentação argilosa oscila, por norma, entre os 56 e 79 m, chegando a ultrapassar os 100 m de espessura. Ainda assim, estes depósitos argilosos estão ausentes em determinados locais da bacia ou são de espessura diminuta, como se verifica na sondagem F86. Na base do Pliocénico e com o aumento da profundidade surgem os primeiros grés compactos com fraca componente de finos.

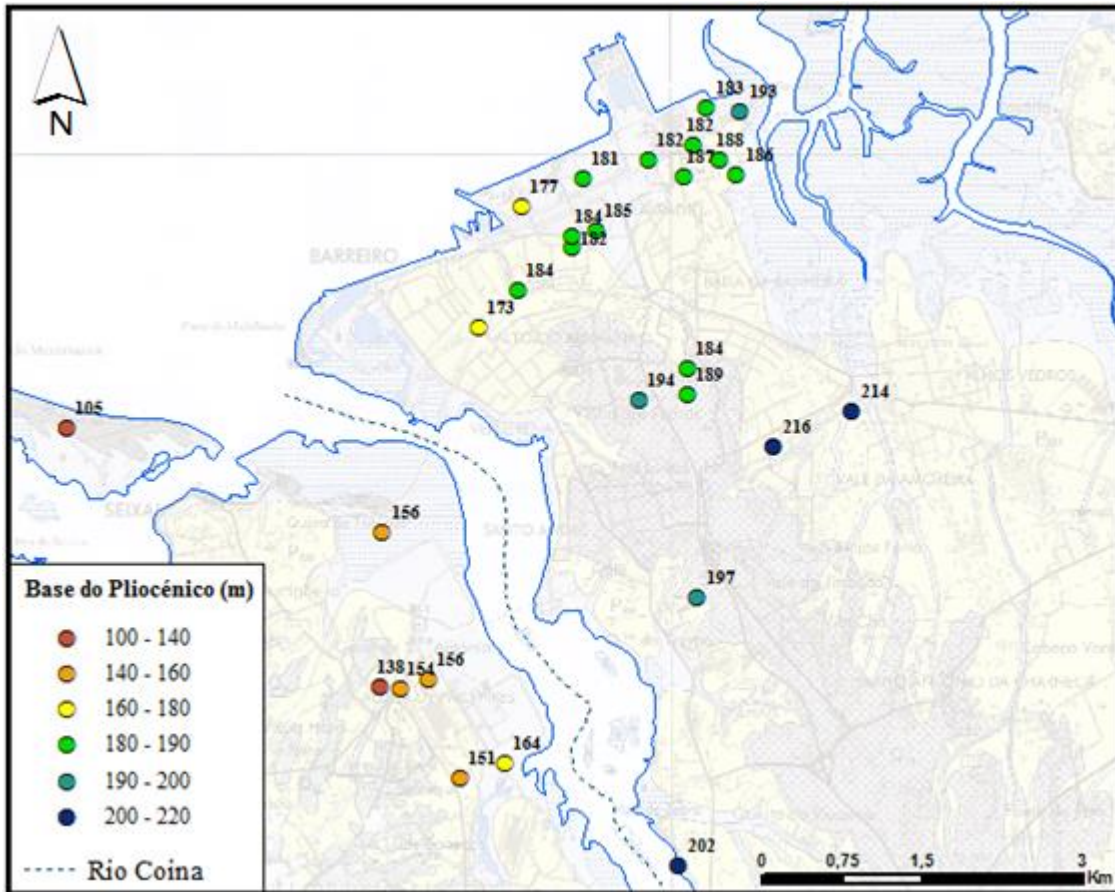


Figura 4.13: Profundidade da base do Pliocénico identificadas nas sondagens hidrogeológicas para o concelho do Barreiro e nas áreas adjacentes do Seixal e Moita.

A base dos sedimentos pliocénicos mergulha preferencialmente para leste, demonstrando uma tendência de afundamento neste sentido nas áreas do Seixal, Barreiro e Moita. Atendendo à profundidade dos furos e às formações que estes intercetam, esta superfície é o limite mais facilmente reconhecível, marcado pelo início da sedimentação carbonatada pertencente ao Miocénico. Entre as margens da ribeira de Coina existe um desnível na superfície basal (Figura 4.13) que poderá estar relacionado com um acidente tectónico existente ao longo da ribeira. Este já havia sido sugerido por AZEVEDO (1983), evidenciado por um desnível de 30 m entre as duas margens num perfil projetado para a formação vermelha de Marco Furado. O próprio traçado do esteiro que culmina no estuário realça a existência deste provável acidente tectónico com mudanças abruptas no sentido do escoamento e encaixadas para NE-SW.

Segundo MONIZ (2010), a base do Pliocénico parece ter uma disposição no geral semelhante à do Miocénico, afundando até aproximadamente no sentido do meridiano da Moita, elevando-se depois até à zona da falha do Pinhal Novo - Alcochete.

Os depósitos pliocénicos assentam, na área de estudo, sobre o Miocénico, marcado pelo aparecimento dos primeiros grés com fração carbonatada. A série greso-calcária marinha é essencialmente constituída por biocalcarenitos de cor amarela e castanha, grés margoso, calcário compacto e margas arenosas. Não são muitas as sondagens que atravessam a espessura completa do Miocénico superior a médio, ainda

assim, é possível estimar possanças que oscilam entre os 82 e 94 m na região do PEB. Entre os 255 e os 276 m de profundidade surge um nível argilo-margoso cinzento, possivelmente equivalente às “Argilas de Xabregas”, que antecedem os grés calcários do Miocénico inferior.

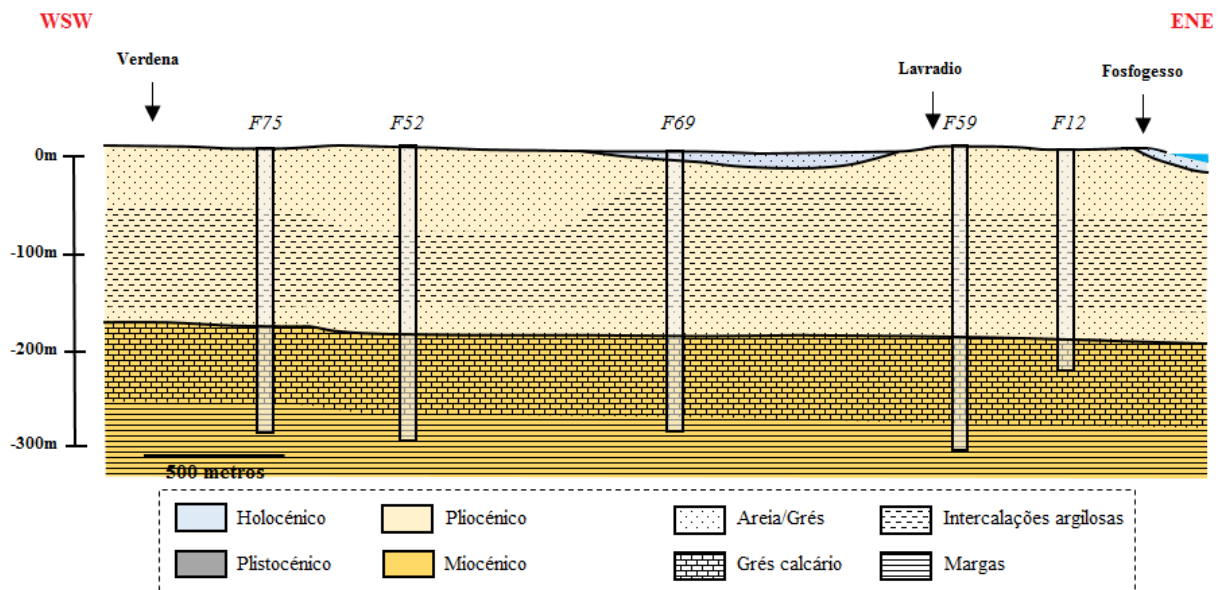


Figura 4.14: Perfil geológico 2: Verderena - baixios do estuário na Moita, atravessando a zona sul do PEB.

O perfil 2 (Figura 4.14) liga a localidade de Verderena aos baixios do estuário na região da Moita, atravessando a zona sul do PEB. Este perfil foi selecionado pela disposição que as argilas adquirem na zona central do perfil. A acumulação de sedimentos finos neste local poderá estar relacionada com uma linha de água ativa durante o Pliocénico que desaguava para o estuário precisamente neste local. A própria disposição cartográfica das aluviões parece indicar tal facto, reconhecido apenas pela coluna litológica da sondagem F69. Sendo assim, a interpretação deste conjunto de fatores denota acumulação de argilas nesta zona do PEB que tende a desaparecer em direção ao estuário, como se observa nos furos F88, F97 e F44.

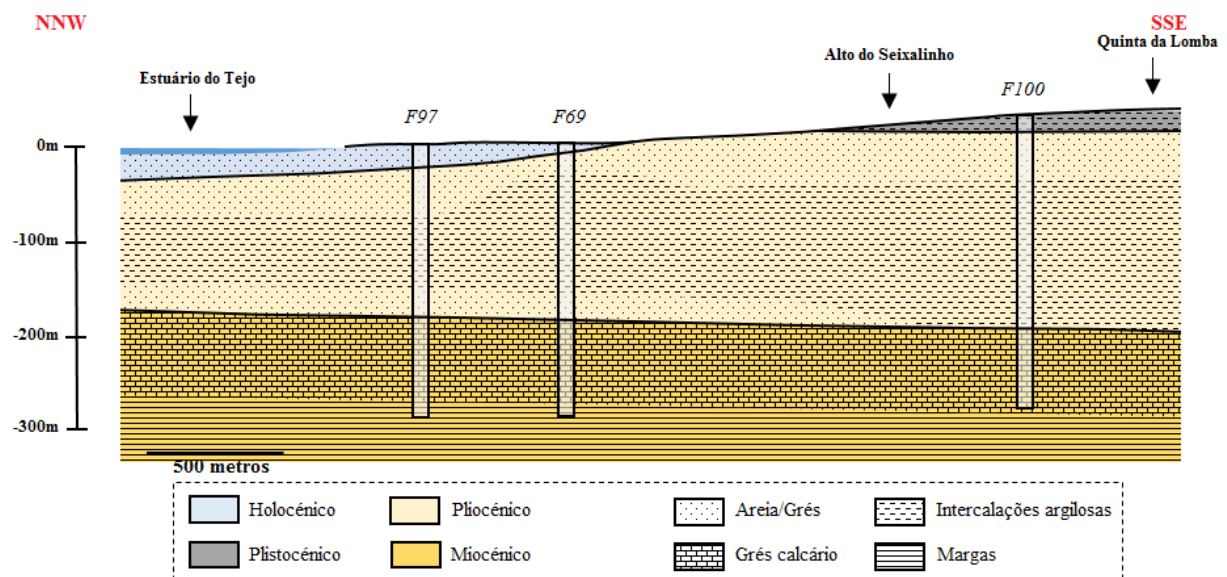


Figura 4.15: Perfil Geológico 3: Estuário do Tejo – Quinta da Lomba.

## CAPÍTULO 4

O perfil 3 foi traçado intercetando a formação do quaternário de Marco Furado até ao interior do estuário do Tejo, onde se localizará o novo terminal portuário. Esta formação está disposta sub-horizontalmente sobre os sedimentos pliocénicos, situando-se a base entre os 15 e 20 m de altitude e, por conseguinte, aflora apenas nas áreas mais elevadas do concelho. É constituída por areias grosseiras, conglomerados e argilas com uma característica tonalidade avermelhada.

O sector intermédio e sul do concelho do Barreiro apresenta características geológicas distintas relativamente ao que é observado na frente ribeirinha e nos terrenos do PEB. Existem níveis superficiais argilosos pertencentes à formação quaternária que confinam os sedimentos arenosos pliocénicos que, neste sector, apresentam uma cor esbranquiçada. No Pliocénico a sedimentação de finos dá-se a uma profundidade menor e estende-se até a base, no entanto, estes nunca chegam a formar um nível suficientemente espesso e contínuo como se observa no sector N e nas proximidades do estuário. A série greso-calcária aparenta ter uma espessura menor neste local como se observa na sondagem F76, de aproximadamente 75 m, ainda que não exista um número suficiente de sondagens profundas nesta zona para permitir conclusões com maior acuidade.

## 5. MODELO CONCEPTUAL DO SISTEMA AQUÍFERO

### 5.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

O aquífero na margem esquerda do rio Tejo (T3) é uma unidade hidrogeológica formada por várias camadas porosas, por norma confinadas ou semiconfinadas, constituídas por depósitos detríticos do Miocénico, Pliocénico e Quaternário. Este sistema multicamada apresenta elevada complexidade resultante das variações laterais e verticais de fácies litológicas. Dada a sua importância para a Península de Setúbal, surge em 1980 um conjunto de estudos efetuados pelo PNUD (1980) onde se considera pela primeira vez a divisão deste sistema em dois aquíferos. O modelo conceptual apresentado fundamenta a existência de um aquífero profundo Mio-Pliocénico e outro superficial Plio-Quaternário, cuja espessura média ronda os 200 a 300 m, separados por lentículas argilosas semipermeáveis que formam um nível praticamente contínuo. Daí surgem diferentes abordagens para o modelo conceptual do sistema aquífero na Península de Setúbal (SIMÕES E VITORINO, 2011), entre os quais: HP (1994) e GESTÁGUA (1996), e próximos da área em estudo no concelho do Seixal, QUENTAL (2011) e FIALHO (2009).

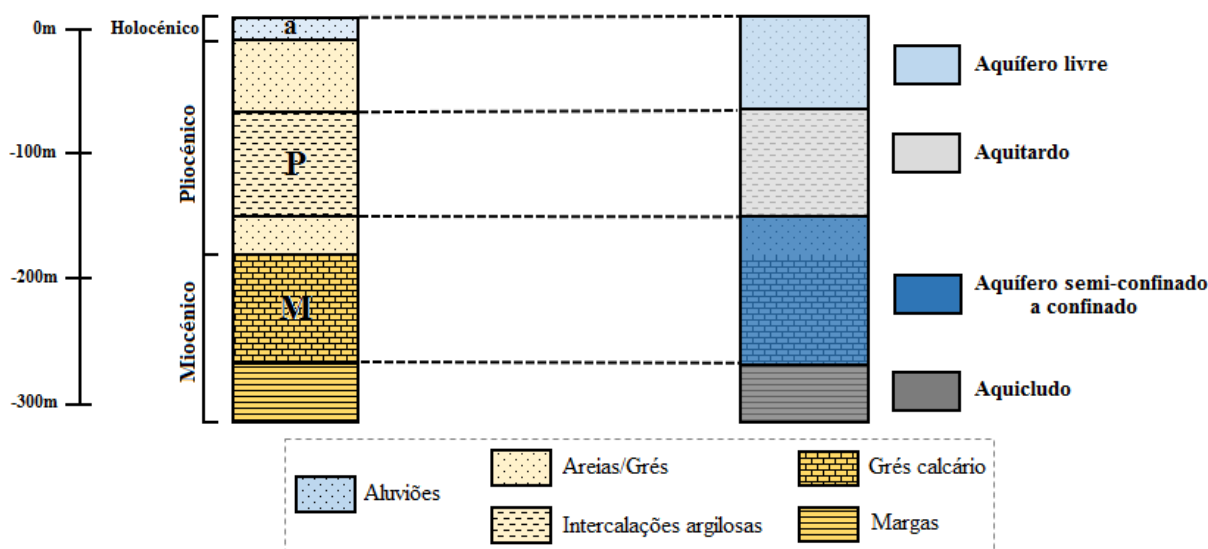


Figura 5.1: Correlação entre as unidades geológicas caracterizadas e as formações hidrogeológicas.

A análise das sondagens hidrogeológicas, com profundidade máxima de 312 m no sector norte do Barreiro, e dos respetivos ensaios de bombeamento, permitiu obter o modelo hidrogeológico para a área de estudo. Da base geológica interpretada no capítulo 4.4, resulta um sistema multicamada constituído por dois aquíferos, um superior livre instalado nas aluviões quaternárias e arenosas do Pliocénico, e um confinado nas camadas da base do Pliocénico e nas camadas greso-calcárias do Miocénico (Figura 5.1). Estas duas unidades aquíferas estão separadas por um nível arenoargiloso semipermeável, que funciona como um aquífero a conectar os dois aquíferos. Na base do aquífero confinado surge um nível argilo-margoso que assume comportamento de aquícluido que separa este aquífero de um outro mais profundo nas camadas da base do Miocénico.

A primeira unidade aquífera é essencialmente suportada pelas areias não consolidadas pliocénicas da formação de Santa Marta. Para o aquífero livre as espessuras máximas reconhecidas na área do PEB são de 55 e 79 m, com propensão a diminuir para o interior do concelho. Embora classificado como livre, o aquífero pode ser, pontualmente, semi-confinado pelos depósitos arenoargilosos da formação de Marco Furado. Portanto, deve-se atribuir a nomenclatura de aquífero superior para o sector meridional do Barreiro e não de livre como se verifica junto do estuário do Tejo. Quando presentes, as aluviões constituem o topo do aquífero superior, onde se atribui uma possança média de 20 m na frente ribeirinha.

O aquífero confinado é constituído por arenitos e rochas carbonatadas que têm como suporte as camadas da base do Pliocénico, mas principalmente a série greso-calcária marinha do Miocénico. As espessuras reconhecidas para os grés compactos que antecedem os grés calcários do Miocénico oscilam entre os 18 e 33 m, sendo possível observar nestas camadas algumas lenticulas argilosas com possanças inferiores a 2 m. A profundidade a que se encontram os grés calcários é mencionada na figura 4.10, estendem-se até uma profundidade máxima de 277 m, com sucessivas alternâncias de camadas margosas menos permeáveis. Ambos os aquíferos apresentam características de meio poroso, embora nos grés calcários exista porosidade secundária, controlada por fracturação e dissolução.

As sondagens da Quimiparque e CUF indicam que os primeiros níveis argilosos surgem entre aos 55 e 79 m de profundidade e, como tal, constituem o topo do aquífero. Estes níveis apresentam-se algo descontínuos no topo, no entanto, a frequência com que estes sedimentos finos ocorrem é suficiente para confinar as camadas arenosas subjacentes. Na base, as argilas formam um nível praticamente contínuo com espessuras que podem atingir os 40 m sem sedimentação arenosa, que culmina em média aos 155 m de profundidade. Porém, a sondagem F69, localizada na depressão já mencionada que existe entre o Alto do Seixalinho e Lavradio, pressupõe que o aquífero livre termine aos 31 m, tendo aqui o aquífero uma espessura total de 125 m. Para a frente ribeirinha, esta acumulação de finos em camadas próximas da superfície é apenas identificada na referida sondagem.

No entanto, as sondagens localizadas no sector intermédio e sul do concelho apontam para um sistema aquífero muito mais heterogéneo, sendo difícil identificar um nível argiloso contínuo que permita concluir qual a posição exata do aquífero que separa os dois aquíferos, podendo este não existir em determinados setores da bacia. As colunas litológicas e os ensaios de bombeamento indicam confinamento nas camadas arenosas pouco profundas, no entanto, seguidas por espessos níveis arenosos superiores a 30 m, intercaladas por argilas pouco espessas. Estas camadas arenosas são frequentemente exploradas por furos industriais, ainda assim, as captações municipais mais recentes captam apenas em camadas pliocénicas profundas e no Miocénico, o que pode indicar que a exploração nos níveis superficiais não é viável ou a água é de má qualidade. A heterogeneidade litológica e a pouca profundidade das sondagens dificulta a construção de um modelo hidrogeológico que seja absolutamente representativo para o setor meridional do Barreiro.

## 5.2. TRANSMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Tendo em conta a coluna litológica das sondagens, é de admitir que a permeabilidade do aquífero livre seja superior à do aquífero confinado uma vez que é constituído por sedimentos arenosos não consolidados, ao invés do aquífero confinado, constituído por depósitos greso calcários. Ainda assim, a permeabilidade no sistema aquífero será, em parte, controlada pela presença de níveis argilosos e margosos menos permeáveis. SIMÕES (1998) determinou a transmissividade do sistema aquífero utilizando o método de Theis e Jacob na interpretação de 222 ensaios de bombeamento, em regime variável, realizados em furos de captação no aquífero cenozoico do Baixo Tejo. O estudo estatístico da transmissividade ( $T$ ) e caudal específico ( $Q_s$ ) permitiu traçar a reta de correlação destes dois parâmetros hidráulicos (5.1), com coeficiente de correlação de 99.7% para 62 dos pares de valores:

$$T \text{ (m}^2/\text{dia)} = 100,23Q_s \text{ (l/s/m)} - 7,126 \quad (5.1)$$

FIALHO (2009) determinou a mesma correlação a partir de 45 ensaios efetuados para análise do comportamento hidráulico do sistema aquífero no concelho do Seixal. Os comportamentos hidrogeológicos foram agrupados consoante as camadas ensaiadas, 23 para as arenosas e greso-calcárias, e 22 exclusivamente para as greso-calcárias. O maior coeficiente de correlação resultou para valores de transmissividade obtidos pelo método de Hantush - Jacob, com as seguintes relações nas camadas greso-calcárias (5.2) e nas arenosas e greso-calcárias (5.3):

$$T \text{ (m}^2/\text{dia)} = 98,98Q_s \text{ (l/s/m)} + 5,16 \quad (5.2)$$

$$T \text{ (m}^2/\text{dia)} = 113,79Q_s \text{ (l/s/m)} - 28,15 \quad (5.3)$$

Para estimar a transmissividade no sistema aquífero foram utilizados dados de 40 ensaios de bombeamento de captações no Barreiro e Moita, e os caudais específicos obtidos pela razão entre os rebaixamentos e os caudais de ensaio. Foram utilizadas as equações de SIMÕES (1998) e FIALHO (2009) para determinar as transmissividades, tendo em conta a posição dos ralos na escolha da equação a utilizar.

Os drenos das captações estão instalados na sua maioria no aquífero confinado, explorando os níveis areníticos profundos do Pliocénico e os grés-calcário do Miocénico, a profundidades entre os 150 e 300 m. Na realidade pode-se afirmar que nenhum dos ensaios analisados é representativo do aquífero livre, uma vez que os furos que captam em camadas superficiais têm comprimentos a rondar os 100 m e assim interseam zonas de aquífero. É comum os furos industriais, no sector intermédio a sul do Barreiro, captarem em níveis mais permeáveis no aquífero confinado por motivações económicas e porque a permeabilidade dessas camadas assim o permite. Mas por norma, as captações municipais e da Quimiparque/CUF estão isoladas nos níveis superficiais, captando apenas no aquífero confinado. Posto isto, os ensaios foram agrupados nos que captam exclusivamente no aquífero confinado, aqueles que

CAPÍTULO 5

não alcançam a série greso-calcária do Miocénico e exploram maioritariamente as camadas arenosas superficiais e zonas permeáveis do aquítardo, e furos onde há mistura das águas dos dois aquíferos.

Tabela 5.1: Transmissividades obtidas para o sistema aquífero através da relação entre T e  $Q_s$  de SIMÕES (1998) ( $T_1$ ) e FIALHO (2007) ( $T_2$ ) (Legenda: NHE - Nível Estático, NHD - Nível Dinâmico, S - Rebaixamento,  $Q_e$  - Caudal de Ensaio e  $Q_s$  - Caudal específico).

| ID   | Ralos (m)       | Formação          | NHE (m) | NHD (m) | S (m) | $Q_e$ (l/s) | $Q_s$ (l/s/m) | $T_1$ (m <sup>2</sup> /dia) | $T_2$ (m <sup>2</sup> /dia) |
|------|-----------------|-------------------|---------|---------|-------|-------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| F75  | 159 a 271       | Confinado         | 14,0    | 39,0    | 25,0  | 75,5        | 3,0           | 295,6                       | 304,1                       |
| F52  | 168,5 a 275,5   | Confinado         | 10,3    | 28,1    | 17,8  | 80,0        | 4,5           | 443,3                       | 450,0                       |
| F88  | 165 a 264       | Confinado         | 18,1    | 34,9    | 16,8  | 100,0       | 6,0           | 589,5                       | 594,3                       |
| F69  | 163 a 263,5     | Confinado         | 10,0    | 31,4    | 21,4  | 80,0        | 3,7           | 367,6                       | 375,2                       |
| F97  | 171 a 274,5     | Confinado         | 18,6    | 34,8    | 16,2  | 100,0       | 6,2           | 611,6                       | 616,1                       |
| F44  | 170,5 a 253     | Confinado         | 9,5     | 21,5    | 12,0  | 40,0        | 3,3           | 327,0                       | 335,1                       |
| F59  | 175,4 a 284,5   | Confinado         | 17,1    | 27,0    | 9,9   | 70,0        | 7,1           | 701,6                       | 705,0                       |
| F36  | 171,5 a 257,5   | Confinado         | 11,5    | 20,0    | 8,5   | 70,0        | 8,2           | 818,3                       | 820,3                       |
| F35  | 172,5 a 257,5   | Confinado         | 9,5     | 25,5    | 16,0  | 70,0        | 4,4           | 431,4                       | 438,2                       |
| F12  | 174 a 214       | Confinado         | 5,0     | 21,0    | 16,0  | 55,0        | 3,4           | 337,4                       | 345,4                       |
| F62  | 176,3 a 276,5   | Confinado         | 13,1    | 26,5    | 13,4  | 78,0        | 5,8           | 576,3                       | 581,3                       |
| F49  | 190 a 277,2     | Confinado         | 10,5    | 27,5    | 17,0  | 70,0        | 4,1           | 405,6                       | 412,7                       |
| F51  | 152 a 290       | Confinado         | 10,5    | 22,3    | 11,8  | 45,0        | 3,8           | 375,1                       | 382,6                       |
| AC3  | 189 a 302       | Confinado         | 48,4    | 66,2    | 17,8  | 57,1        | 3,2           | 314,4                       | 322,7                       |
| AC6  | 210 a 297       | Confinado         | 45,8    | 87,7    | 41,9  | 40,0        | 1,0           | 88,6                        | 99,7                        |
| FR1  | 157 a 278,5     | Confinado         | 30,2    | 58,0    | 27,8  | 62,5        | 2,2           | 218,2                       | 227,7                       |
| RA1  | 220,12 a 282,81 | Confinado         | 42,2    | 64,3    | 22,1  | 60,0        | 2,7           | 265,0                       | 273,9                       |
| FR3  | 174 a 284       | Confinado         | 29,5    | 52,9    | 23,4  | 66,0        | 2,8           | 275,6                       | 284,3                       |
| FR4  | 216 a 284,5     | Confinado         | 28,0    | 50,8    | 22,8  | 55,0        | 2,4           | 234,7                       | 243,9                       |
| FR6  | 224 a 255       | Confinado         | 49,5    | 73,2    | 23,7  | 40,0        | 1,7           | 162,0                       | 172,2                       |
| FR8  | 237 a 285       | Confinado         | 38,5    | 58,9    | 20,4  | 50,0        | 2,5           | 238,5                       | 247,8                       |
| F15  | 82,5 a 260      | Mistura           | 15,0    | 37,0    | 22,0  | 60,0        | 2,7           | 266,2                       | 282,2                       |
| F16  | 85,5 a 261,5    | Mistura           | 19,9    | 30,3    | 10,4  | 80,0        | 7,7           | 763,9                       | 847,2                       |
| F100 | 104 a 282       | Mistura           | 46,1    | 61,9    | 15,8  | 45,5        | 2,9           | 281,5                       | 299,5                       |
| F23  | 78 a 272,5      | Mistura           | 7,0     | 18,6    | 11,6  | 60,0        | 5,2           | 511,3                       | 560,4                       |
| F76  | 112 a 289       | Mistura           | 15,0    | 36,1    | 21,1  | 62,5        | 3,0           | 289,8                       | 308,9                       |
| F50  | 104 a 253       | Mistura           | 22,7    | 34,7    | 12,0  | 50,0        | 4,2           | 411,9                       | 447,6                       |
| AC5  | 117 a 280       | Mistura           | 15,2    | 28,4    | 13,2  | 50,0        | 3,8           | 372,5                       | 402,9                       |
| F38  | 56 a 102        | Livre + Aquítardo | 7,5     | 31,0    | 23,5  | 10,0        | 0,4           | 35,5                        | 20,3                        |
| F21  | 62,5 a 88,6     | Livre + Aquítardo | 1,2     | 11,2    | 10,0  | 50,0        | 5,0           | 494,0                       | 540,8                       |
| F39  | 71,4 a 157,7    | Livre + Aquítardo | 8,9     | 27,3    | 18,4  | 39,2        | 2,1           | 207,0                       | 214,9                       |
| F95  | 118 a 151       | Livre + Aquítardo | 10,2    | 23,3    | 13,1  | 16,7        | 1,3           | 120,6                       | 116,9                       |
| F26  | 74 a 102        | Livre + Aquítardo | 43,6    | 50,4    | 6,8   | 14,2        | 2,1           | 202,2                       | 209,5                       |
| F25  | 50 a 60         | Livre + Aquítardo | 18,1    | 29,0    | 10,9  | 11,7        | 1,1           | 100,5                       | 94,0                        |
| F37  | 83 a 99         | Livre + Aquítardo | 37,0    | 42,3    | 5,3   | 8,3         | 1,6           | 149,8                       | 150,0                       |
| F86  | 306 a 580,5     | Profundo          | -0,8    | 21,8    | 22,6  | 30,0        | 1,3           | 125,8                       | 136,4                       |

Os dois métodos utilizados para determinar a transmissividade acabam por ser semelhantes, resultando da sua aplicação apenas ligeira variabilidade nos valores obtidos por  $T_2$  por utilizarem equações distintas para aquíferos diferentes. Para o aquífero confinado, captando apenas nos níveis gresosos calcários, as diferenças observadas são diminutas. O sistema aquífero, na área estudada, apresenta uma transmissividade média de 350 m<sup>2</sup>/dia, com 50% dos valores a situarem-se entre os 215 e 450 m<sup>2</sup>/dia (Figura 5.2). Respeitando a categorização dos furos e consoante os níveis explorados, os resultados estatísticos obtidos constam da tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valores estatísticos do caudal específico (l/s/m) e transmissividade (m<sup>2</sup>/dia) das unidades hidrogeológicas estimados nos furos de captação.

| Unidade                                     | Aq. Confinado | Aq. Confinado (PEB) | Mistura de Aquíferos | Aq. Livre + Aquitardo |
|---|---------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>Caudal Específico (l/s/m)</b>            |               |                     |                      |                       |
| <i>min</i>                                  | 0,95          | 3,02                | 2,73                 | 0,43                  |
| <i>max</i>                                  | 8,24          | 8,24                | 7,69                 | 5,00                  |
| <i>média</i>                                | 3,91          | 4,98                | 4,20                 | 1,94                  |
| <i>desvio.p</i>                             | 1,84          | 1,65                | 1,77                 | 1,47                  |
| <b>Transmissividade (m<sup>2</sup>/dia)</b> |               |                     |                      |                       |
| <i>min</i>                                  | 99,65         | 304,08              | 282,19               | 20,27                 |
| <i>max</i>                                  | 820,29        | 820,29              | 847,16               | 540,80                |
| <i>média</i>                                | 392,10        | 498,27              | 449,81               | 192,35                |
| <i>desvio.p</i>                             | 181,99        | 163,19              | 201,19               | 167,82                |

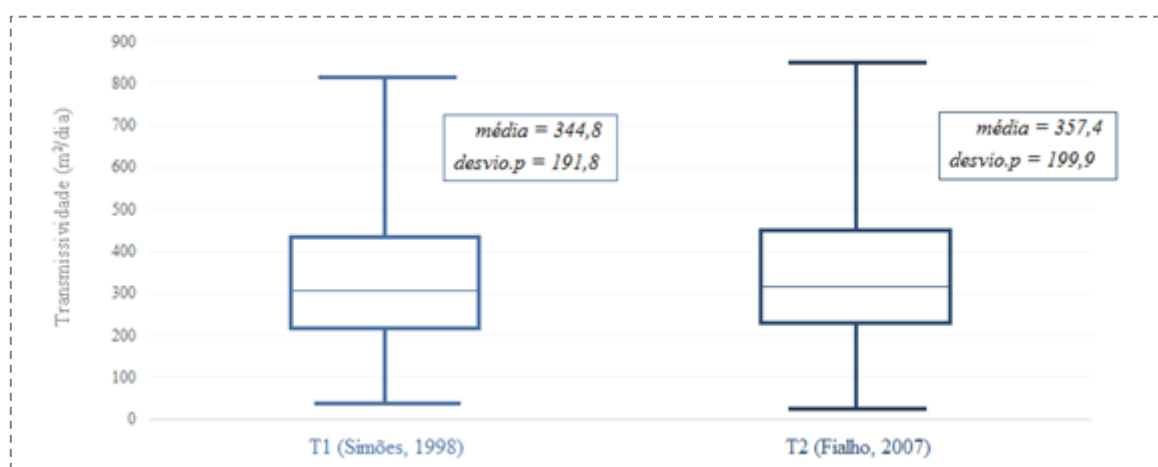


Figura 5.2: Box-Plot representativo dos valores calculados para a transmissividade do sistema aquífero utilizando a relação desta com o caudal específico obtida por SIMÕES (1998) (T1) e FIALHO (2007) (T2).

Os valores da tabela 5.2 foram estimados tendo em conta a localização dos furos de captação, se estavam ou não situados na frente ribeirinha, designados por PEB, ou se exploravam exclusivamente o aquífero confinado. Os resultados mostram que o aquífero confinado é mais permeável junto ao estuário, com uma transmissividade média de 392,1 m<sup>2</sup>/dia. No setor intermédio, a sul do Barreiro, transmissividade média é de 250,2 m<sup>2</sup>/dia. Este facto advém de diversos fatores entre os quais a maior componente argilosa na base do Pliocénico e conseqüente diminuição da espessura do aquífero confinado nestes setores, e ainda das intercalações mais frequentes e espessas de grés margoso na série greso-calcária.

Nos furos que atravessam ambos os aquíferos a transmissividade é elevada, sendo que a espessura explorada também. A transmissividade média do aquífero arenoso superficial é menor, na ordem de 192,3 m<sup>2</sup>/dia, sendo a espessura saturada do aquífero livre relativamente inferior à do confinado.

Na dificuldade em encontrar furos que sejam totalmente penetrantes, que capturem toda a espessura aquífera, selecionaram-se apenas 11 captações situadas no PEB, junto ao estuário, para calcular a condutividade hidráulica do aquífero confinado. Estas têm a particularidade de apenas captarem o aquífero confinado e de estarem integralmente isoladas nas camadas superficiais e no aquífero. As transmissividades calculadas e as espessuras saturadas de cada furo serviram para estimar a condutividade hidráulica do aquífero confinado a partir da equação,  $T = K b$ . Os valores calculados das 11 captações oscilam entre os 3,04 e os 7,32 m/dia, donde resulta uma condutividade hidráulica média de 4,55 m/dia para o aquífero greso-calcário na frente ribeirinha do Barreiro. Como já foi referido, não existem ensaios que permitam determinar a condutividade do aquífero livre, ainda assim é de esperar um valor significativamente superior tendo em conta as colunas litológicas dos furos.

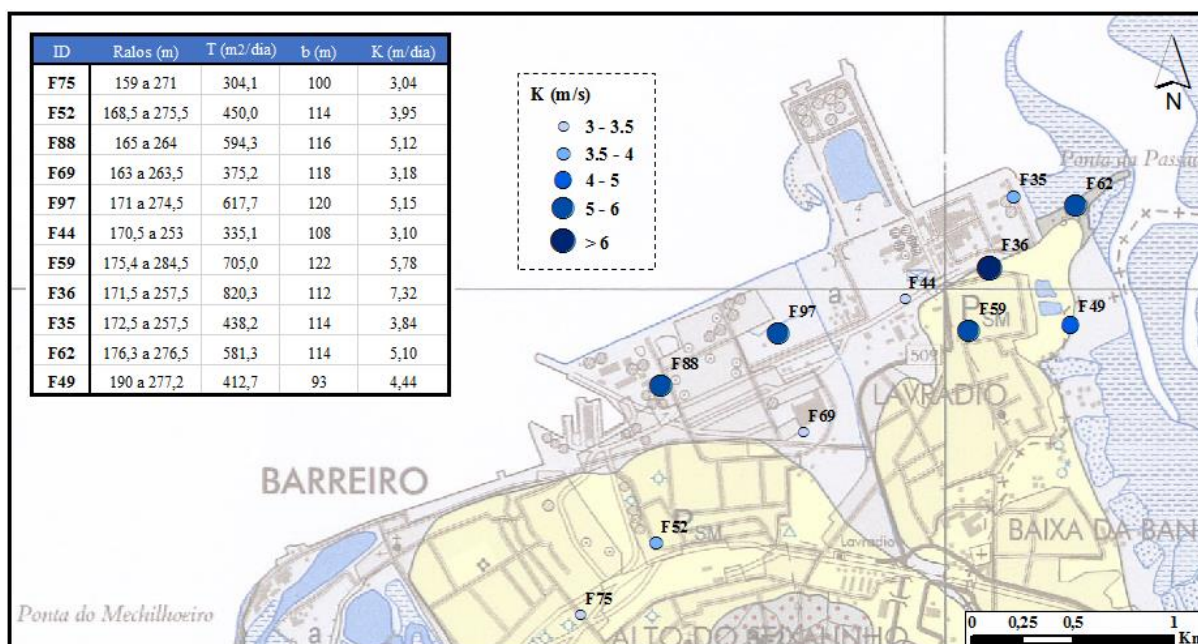


Figura 5.3: Condutividade hidráulica para o aquífero greso-calcário confinado no setor norte do Barreiro (PEB).

### 5.3. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO

Na proximidade ao estuário do Tejo, assume-se que existe descarga e que o fluxo subterrâneo é no sentido SSE - NNW em direção ao estuário. Apenas nas margens da península e na superfície livre o escoamento deve alterar ligeiramente a sua direção para os baixios do estuário, localizados a W, na Moita, e a E, para o esteiro de Coina. As camadas aquíferas que se encontram subjacentes ao estuário estão saturadas, no entanto, apenas existe conexão hidráulica direta com o aquífero livre.

O aquífero confinado, que mergulha sob o estuário, em regime natural terá um potencial hidráulico superior ao aquífero livre e, portanto, a existir drenância vertical entre as formações aquíferas será no sentido ascendente (Figura 5.4). A recarga do sistema aquífero dá-se pela infiltração direta da precipitação nas aluviões e nos depósitos detríticos pliocénicos superficiais, sendo que para o aquífero confinado, semi-confinado na Península de Setúbal, a zona de recarga situa-se no flanco norte da Serra da Arrábida, onde as formações miocénicas afloram. No setor norte do Barreiro o sistema é alimentado pelo fluxo subterrâneo originário das terras altas e zonas interiores do concelho, sendo o gradiente hidráulico aqui relativamente baixo. As linhas de água não devem ser encaradas como zonas de recarga facilitada, pois encontram-se obstruídas e cimentadas e, conseqüentemente, não se encontram em comunicação hidráulica como o aquífero livre.

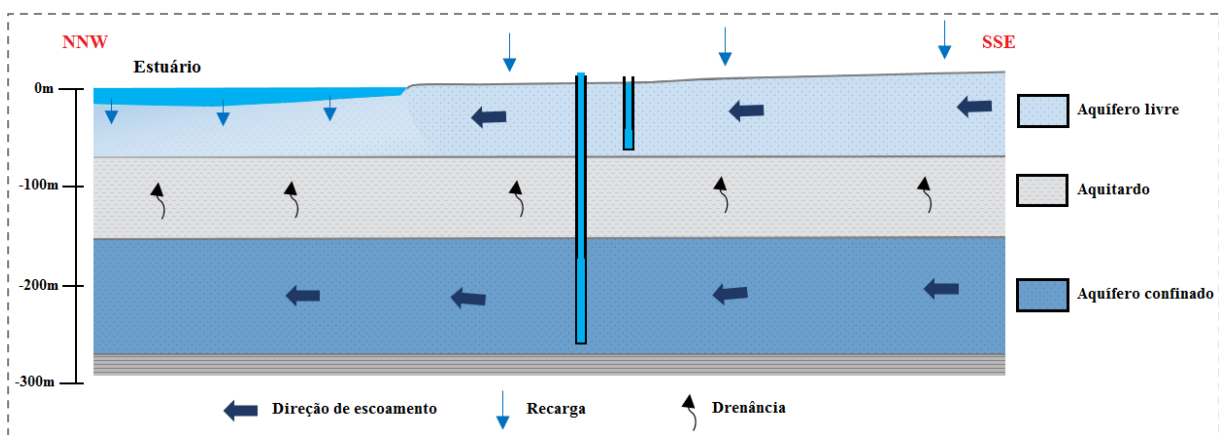


Figura 5.4: Modelo de escoamento para o sistema aquífero em regime natural para um cenário ante-exploração.

Entre a década de 60 e 80 ocorreu a abertura de um aglomerado de furos junto ao estuário que nos anos posteriores abasteceu o complexo industrial da CUF/Quimiparque. A exploração do sistema aquífero aumentou exponencialmente, com maior efeito no aquífero confinado, pois as captações procuravam extrair a partir das camadas greso-calcárias miocénicas. Os dados recolhidos das captações no aquífero confinado indicam que os níveis piezométricos se encontra claramente rebaixados em relação ao estuário (Figura 5.5). Desde os anos 60 que os níveis estáticos medidos na abertura dos furos são na realidade níveis hidrodinâmicos, em virtude dos rebaixamentos acumulados ao longo do tempo na superfície piezométrica do aquífero confinado.

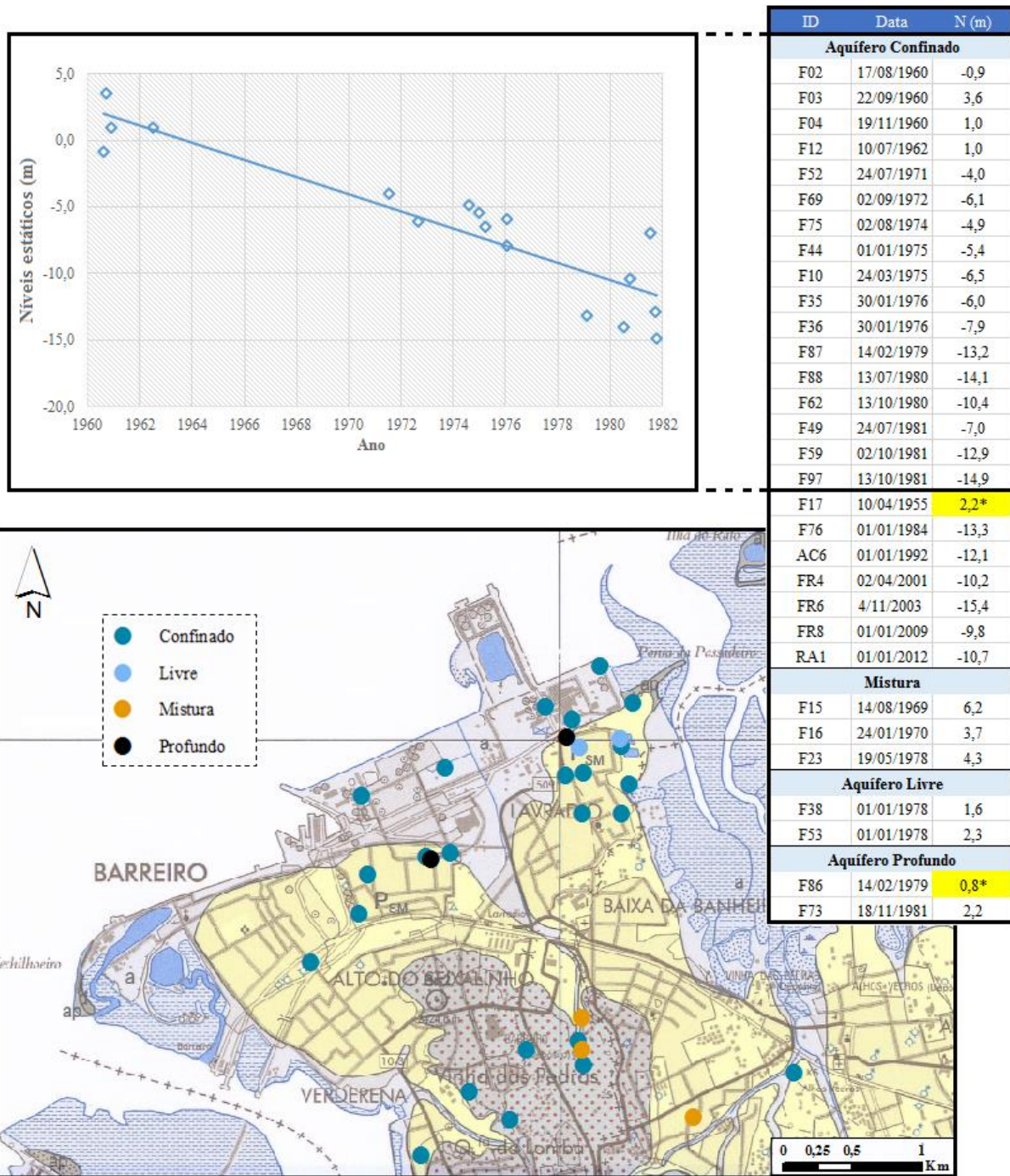


Figura 5.5: Níveis hidrostáticos dos furos abertos na Quimiparque entre a década de 60 e 80 e localização das captações no sector norte do concelho e nas formações hidrogeológicas (\*artesiano positivo repuxante).

Os níveis hidrostáticos atuais mostram que existe provável inversão de fluxo junto ao estuário conduzindo águas salobras para os aquíferos continentais. O aquífero livre, estando em equilíbrio e em conexão hidráulica com o estuário, quando explorado em simultâneo com o aquífero confinado o nível hidrostático resultante aproxima-se do potencial hidráulico do livre, visto que atualmente apresenta um potencial hidráulico superior. O regime de exploração provocou rebaixamentos do potencial hidráulico

## 5. MODELO CONCEPTUAL DO SISTEMA AQUÍFERO

nas camadas confinadas junto ao estuário, promovendo a drenância vertical em sentido contrário, descendente, ou seja, do aquífero livre para o confinado através do aquitardo (Figura 5.6). Assim sendo, a transferência de águas de menor qualidade das camadas superiores para o aquífero confinado representa uma ameaça à qualidade da água do sistema aquífero, que tem neste aquífero a principal fonte de abastecimento público e industrial.

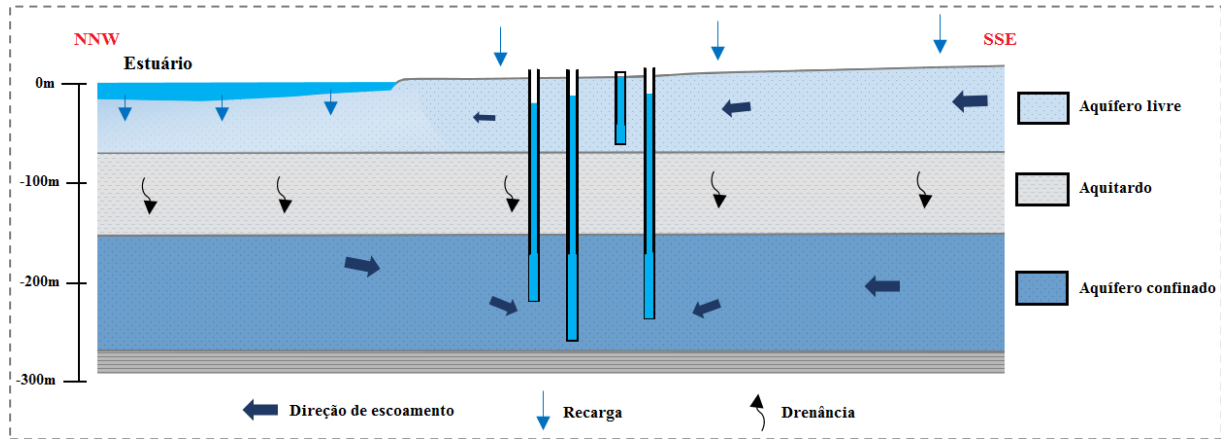


Figura 5.6: Modelo de escoamento num cenário atual considerando a sobre-exploração do sistema aquífero por furos hipotéticos.



## 6. MODELO NUMÉRICO DE FLUXO SUBTERRÂNEO

### 6.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Para definir a variação espacial da piezometria em consequência de diferentes regimes de extração, procedeu-se à modelação em 3D do fluxo subterrâneo no sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado, junto à frente ribeirinha do Barreiro, em regime estacionário e transitório. Para cada aquífero pretende-se obter as superfícies piezométricas nos campos temporais estabelecidos, determinando de que forma as extrações de água nas camadas confinadas influenciam o escoamento subterrâneo nas formações subjacentes. A exploração do sistema aquífero iniciou-se em 1960 e, desde então, decorreu a abertura de diversos furos de captação, maioritariamente localizados junto ao estuário. As extrações de água doce incidem sobre o aquífero greso-calcário, confinado pelas argilas da base do Pliocénico, sendo o fator essencial para análise da vulnerabilidade do sistema a evolução da concentração de sais neste aquífero, que derivam da infiltração de cloretos na superfície livre que contata com as águas do estuário do Tejo.

As etapas que se seguem reproduzem a utilização de um modelo matemático, FEFLOW, para a simulação do fluxo subterrâneo dum sistema aquífero, em estado transiente, influenciado por rebaixamentos piezométricos em virtude de diferentes regimes de extração.

### 6.2. DESENVOLVIMENTO DA MALHA DO MODELO

#### 6.2.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA

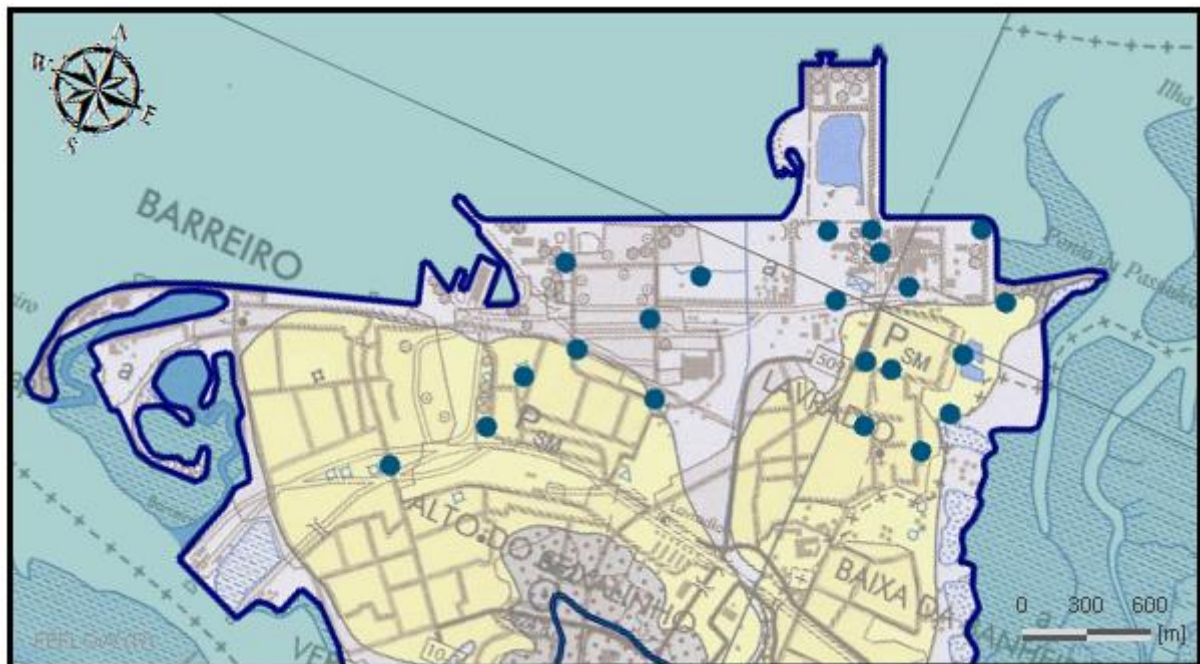


Figura 6.1: Área do sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado, margem esquerda, selecionada para o modelo numérico, na base geológica cartográfica 34D – Lisboa à escala 1:50000.

O sistema aquífero Bacia do Tejo-Sado, margem esquerda, estende-se por quase toda a Península de Setúbal, cujos limites são externos à área de trabalho. Uma vez que o interesse deste estudo se centra na frente ribeirinha e na ausência de barreiras hidrológicas circundantes que pudessem ser consideradas como condições de fronteira, excluindo a linha do estuário do Tejo, optou-se por delimitar a área do modelo a uma distância considerável da linha de costa e das captações subterrâneas, seguindo a topografia e a direção do escoamento, para que as condições de fronteira não restringissem os níveis hidrodinâmicos das camadas inferiores junto ao estuário. A área modelada foi calculada em cerca de 17 km<sup>2</sup> e engloba parte submersa, uma vez que o aquífero greso-calcário está subjacente ao estuário, inclui também a zona de intervenção portuária e os 21 furos de captação para os quais se obteve o registo histórico de exploração. A área do modelo apresenta um formato retangular definido em função da direção do escoamento subterrâneo no aquífero confinado (SSE - NNW) para que se pudessem aplicar as condições de fronteira no limite da malha (Figura 6.1).

### 6.2.2. GERAÇÃO DA MALHA

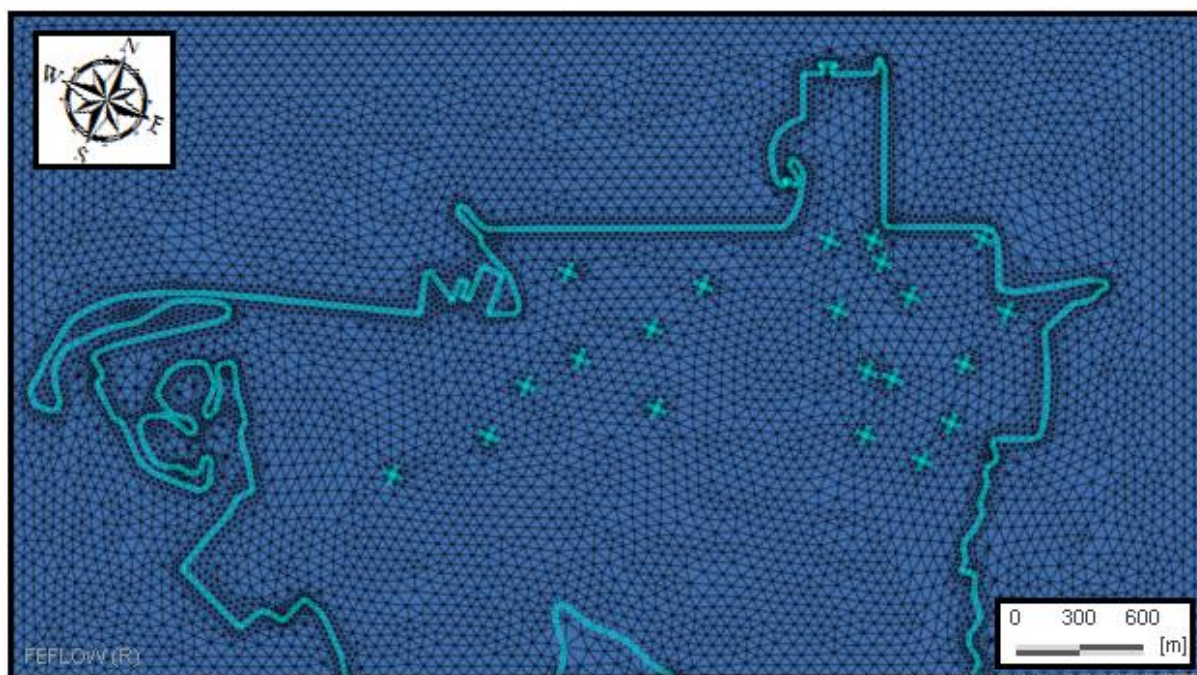


Figura 6.2: Malha de cálculo de elementos triangulares do modelo através do algoritmo GridBuilder.

Para o modelo gerou-se uma malha (*grid*) inicial, com formato retangular, de 7000 elementos finitos triangulares, através do algoritmo GridBuilder desenvolvido por Rob McLaren, indicado para segmentos irregulares e complexos, tais como a linha de costa característica deste sistema. No desenvolvimento da malha utilizaram-se os furos de captação como elementos pontuais e ainda dois elementos lineares, a linha de costa e o limite S ao longo da linha topográfica. Estes dois elementos lineares correspondem às condições fronteira a atribuir ao aquífero livre enquanto para o aquífero confinado estas condições são fixadas nos limites da malha. Como se pretende um maior detalhe na fronteira com o estuário e no raio

de ação próximo das captações, a malha foi refinada nestes locais, aumentando o número de elementos finitos e nós para um total de 16250 e 8251, respectivamente para cada plano, ainda sem a discretização espacial vertical do sistema aquífero (Figura 6.2).

### 6.2.3. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL VERTICAL

A geometria do modelo foi concebida com recurso a ferramentas do ArcGIS 10.1, permitindo importar as cotas dos diferentes limites para o FEFLOW em formato shapefile. O modelo hidrogeológico introduzido resultou do modelo conceptual estabelecido anteriormente (Capítulo 5), constituído por 3 camadas (*layers*) correspondentes ao aquífero livre, aquífero aquitado e aquífero confinado, e os respetivos 4 planos (*slices*) para cada divisão, cuja configuração é a seguinte:

- Plano 1: Superfície do terreno/Topo do aquífero livre
- Plano 2: Base do aquífero livre/Topo do aquífero aquitado
- Plano 3: Base do aquífero aquitado/Topo do aquífero confinado
- Plano 4: Base do aquífero confinado

Para o plano 1 desenvolveu-se uma malha regular de 100 x 100 m na qual se introduziu a cota mais próxima de cada ponto (ArcGIS), evitando a importação de uma densidade elevada de valores. Para os restantes planos foram inseridas as profundidades dos limites de cada unidade hidrogeológica observados nas sondagens e os valores interpolados pelo método da krigagem para a restante malha do modelo (Figura 6.3).

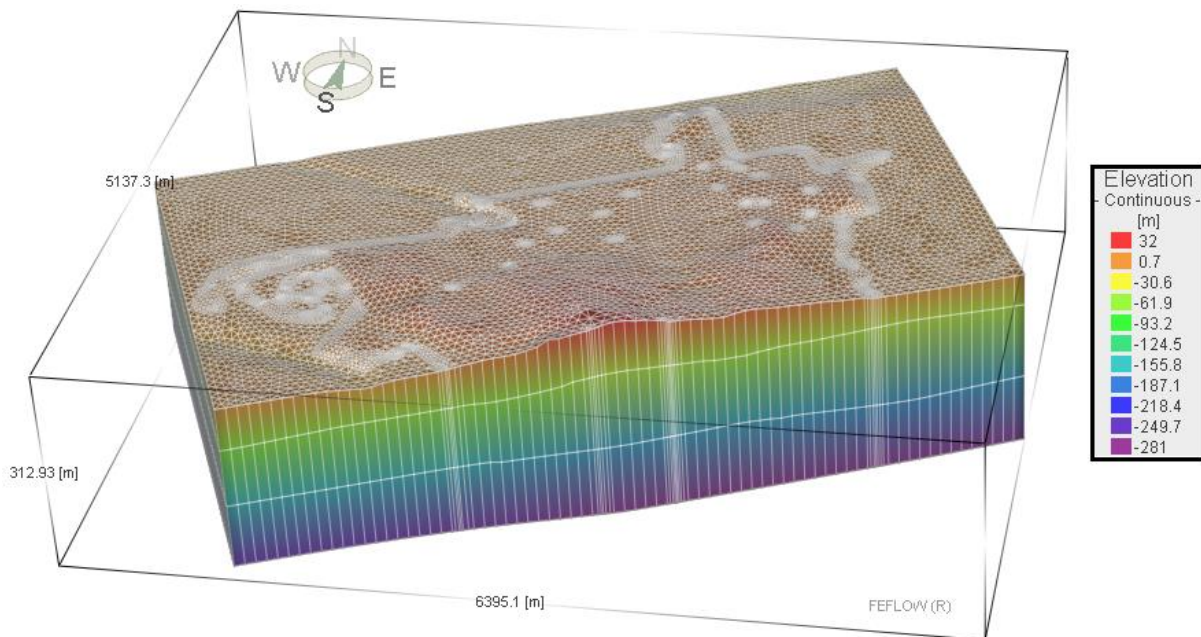


Figura 6.3: Configuração 3D e profundidade das formações hidrogeológicas interpoladas no modelo.

Em função da oscilação do posicionamento dos planos, a espessura do aquífero livre para o modelo varia entre os 35 e 90 m, enquanto o aquífero confinado tem uma espessura oscilante entre os 94 e 123 m, sendo que em nenhum ponto da área modelada se encontram em comunicação hidráulica. Para concluir a configuração 3D, definiu-se o sistema aquífero do tipo não confinado e classificou-se o plano 1 como superfície freática fixa, o plano 2 como não especificado (de modo a que o modelo ajuste a sua posição), o plano 3 como uma superfície fixa que confina a camada subjacente, sendo o plano 4 é automaticamente fixado pelo modelo.

### 6.3. DADOS PARA O MODELO DE FLUXO

#### 6.3.1. CONDIÇÕES INICIAIS E DE FRONTEIRA

As condições iniciais relativas à distribuição espacial dos níveis freáticos e piezométricos foram estabelecidas nos 0 m para todo o modelo. Tal como descrito aquando da geração da malha do modelo, foram consideradas diferentes condições fronteira para os aquíferos (Figura 6.4), uma vez que o estuário apenas se encontra em comunicação hidráulica com o aquífero livre. Neste contexto e no que se refere às condições de fronteira, as condições impostas para o modelo de fluxo são as seguintes:

- **Condição de nível piezométrico imposto (1ª ordem):** nível constante de 0 m para a área do modelo submersa ao estuário nos planos 1 e 2 e, em função da topografia do terreno, foi definida nos mesmos planos uma condição fronteira na zona S do modelo com um nível imposto de 3 m. Nos planos 3 e 4 as condições de fronteira coincidem com os limites da malha, perpendiculares à direção do escoamento para o aquífero confinado, sendo imposto um nível constante de 4 m na fronteira S e de 1 m na fronteira N.
- **Condição de fluxo imposto (2ª ordem):** foi imposta uma restrição de fluxo na base do modelo para o plano 4, visto que não existe drenância importante entre o aquífero confinado e as formações margosas subjacentes.
- **Condição relativa a furos (4ª ordem):** extração de água no sistema aquífero através de 21 captações subterrâneas todas incidentes no aquífero confinado, dos quais se obteve o registo histórico de exploração e o posicionamento dos tubos ralos. Após se introduzir a profundidade máxima e mínima de captação, os furos são representados no modelo pela junção dos nós dos planos limítrofes aproximados, neste caso, os planos 3 e 4.

As condições fronteira impostas na zona Sul do modelo funcionam como entrada de fluxo subterrâneo que alimentam o sistema em função dos níveis atribuídos, recriando os baixos gradientes hidráulicos aqui instalados. Para os planos 1 e 2 foram tidos em conta os níveis freáticos medidos por COSTA e BRITO (2008), situados entre os 0 e 4 metros de profundidade, e o nível de água no estuário medido na

Ponta da Passadeira (Barreiro), oscilante entre os -0.2 e 0.1 m. Nos planos 3 e 4, que limitam o aquífero confinado, os níveis piezométricos impostos são coerentes com os níveis hidrostáticos observados neste aquífero, em ensaios de bombeamento realizados à data da abertura dos furos de captação na década de 60, antes do início da exploração intensiva do sistema aquífero.

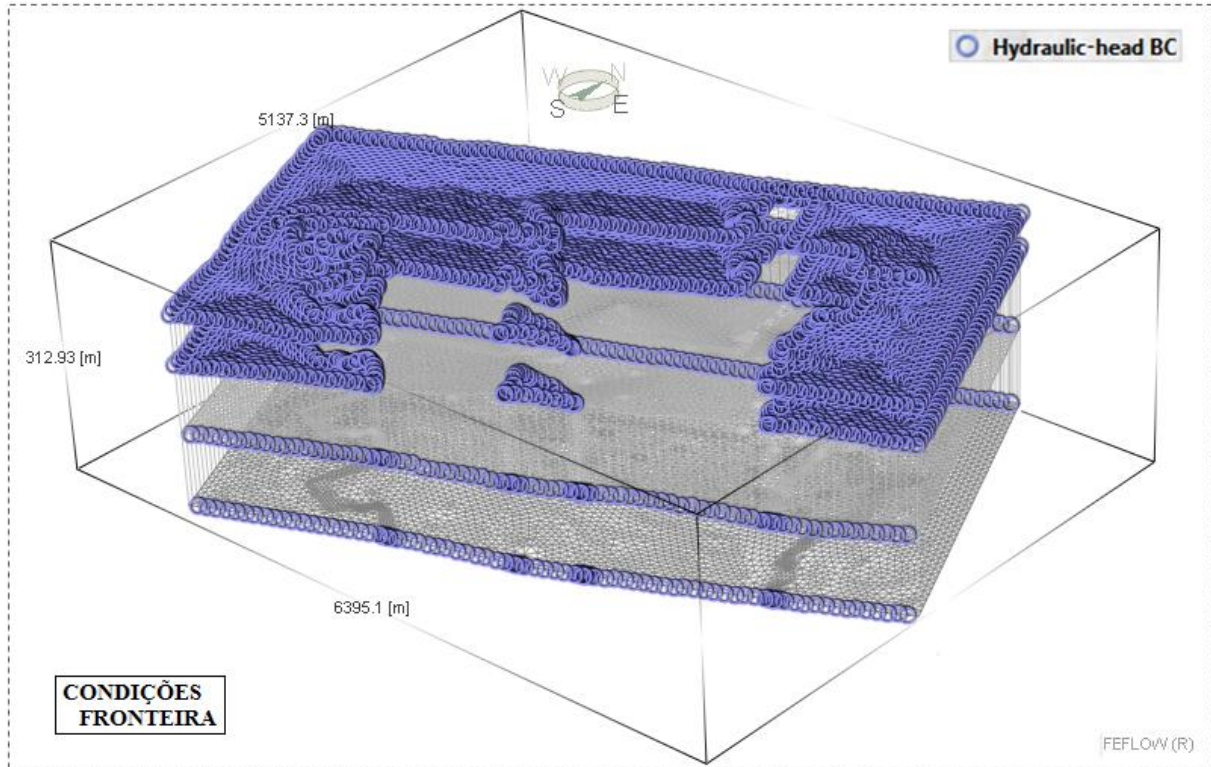


Figura 6.4: Condições de fronteira de 1ª ordem aplicadas no modelo numérico de fluxo subterrâneo.

Dos 26 furos situados no setor setentrional do Barreiro inseridos na área do modelo, apenas foram introduzidos 21 no modelo numérico (Figura 6.5). Os dois furos, que captam as camadas arenosas superficiais, F38 e F53, foram excluídos do modelo dada a sua pouca produtividade e tempo de exploração, enquanto os furos F73 e F86 captam as unidades Miocénicas situadas a profundidade fora do alcance do modelo. Atualmente, em atividade apenas se encontram 11 captações subterrâneas, todas situadas no aquífero confinado. Assim, procedeu-se à definição dos regimes de extração, analisando as datas de abertura e os períodos de exploração dos furos.

Entre 1960 e 1981, foram abertos furos de captação junto ao estuário do Tejo, dos quais existem registos de atividade. Para reproduzir a evolução dos níveis piezométricos ao longo dos anos, introduziram-se sucessivamente no modelo numérico os dados das captações (caudais de exploração) de acordo com os anos em que iniciaram a sua atividade. Em determinados momentos algumas captações foram sendo seladas e substituídas por outras, efetuando-se essas alterações no modelo, estando apenas atualmente em atividade 11 captações subterrâneas no último intervalo de tempo modelado. Consideraram-se dois períodos de extração após 1980, um com a totalidade das captações subterrâneas do relatório do sistema de abastecimento de água do concelho (ENGIDRO, 2010) e outro apenas com as captações que se

encontram em atividade. Em função dos ensaios de bombeamento realizados entre 1960 e 1981 impôs-se um nível hidrodinâmico mínimo para este período em cada captação, ou seja, um rebaixamento máximo para o qual cada nó do modelo poderia ser ultrapassado.

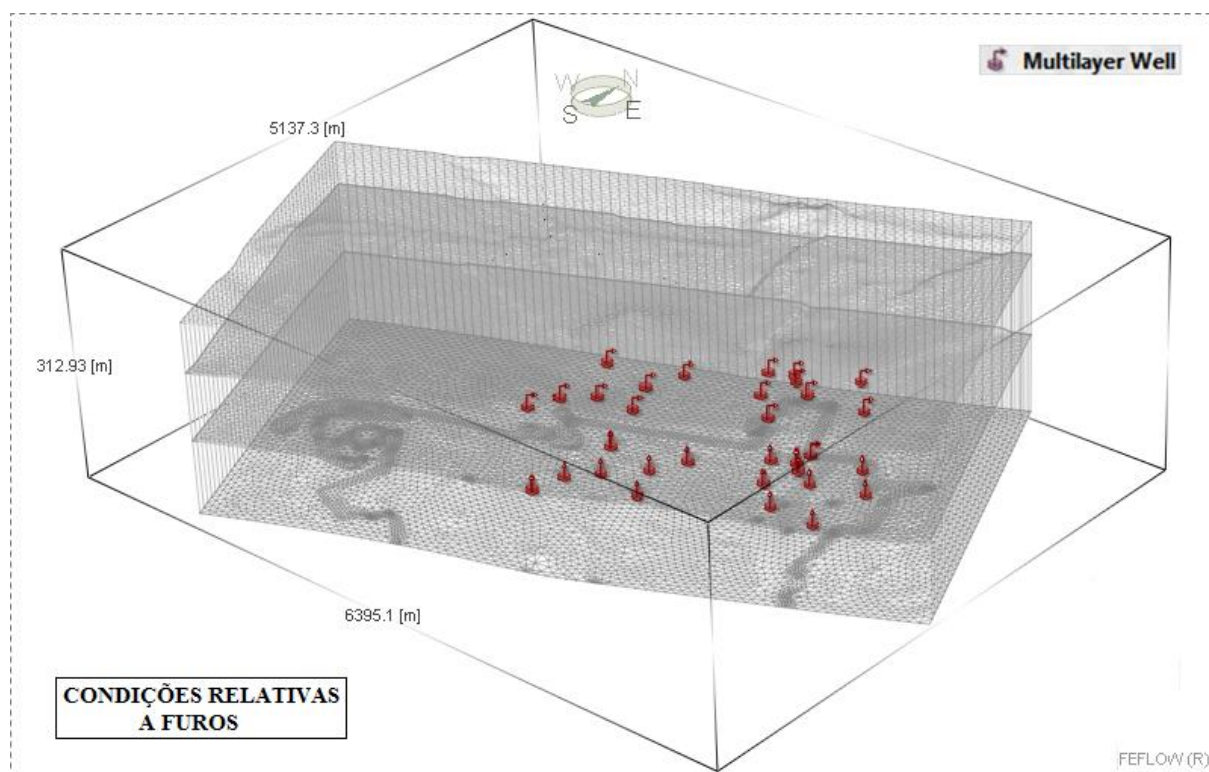


Figura 6.5: Condições relativas a furos de 4ª ordem aplicadas no modelo numérico de fluxo subterrâneo.

### 6.3.2. PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Os parâmetros hidráulicos considerados para as equações de fluxo foram definidos para cada camada (e não aplicados aos planos como as condições fronteira) com a seguinte estrutura:

- **Condutividades hidráulicas ( $K_x$ ,  $K_y$ ):** valores interpolados pelo método da krigagem, disponível nos métodos de regionalização, oscilando entre os 5 e 20 m/dia para o aquífero livre,  $1 \times 10^{-2}$  e  $1 \times 10^{-3}$  m/dia para o aquífero confinado e 3 e 7 m/dia para o aquífero confinado (Figura 6.6).
- **Coefficiente de permeabilidade:** considerou-se um valor de 0.2, fixando valores 5 vezes inferiores para a condutividade hidráulica vertical ( $K_z$ ).
- **Recarga:** considerou-se três zonas distintas para a recarga na camada superficial, 128 mm/ano, correspondente ao valor calculado para os excedentes hídricos na estação meteorológica do Lavradio (E166), 50 mm para áreas urbanas e locais onde aflora a formação arenoargilosa do Quaternário e de 0 mm para as camadas já saturadas subjacentes ao estuário.

- **Porosidade eficaz ( $\epsilon$ ):** valores estabelecidos para as 3 camadas do sistema aquífero, de 0.25, 0.15 e 0.12, respetivamente para o aquífero livre, aquífero confinado e aquífero confinado.
- **Coefficiente de armazenamento específico (SS):** valor definido por defeito  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .

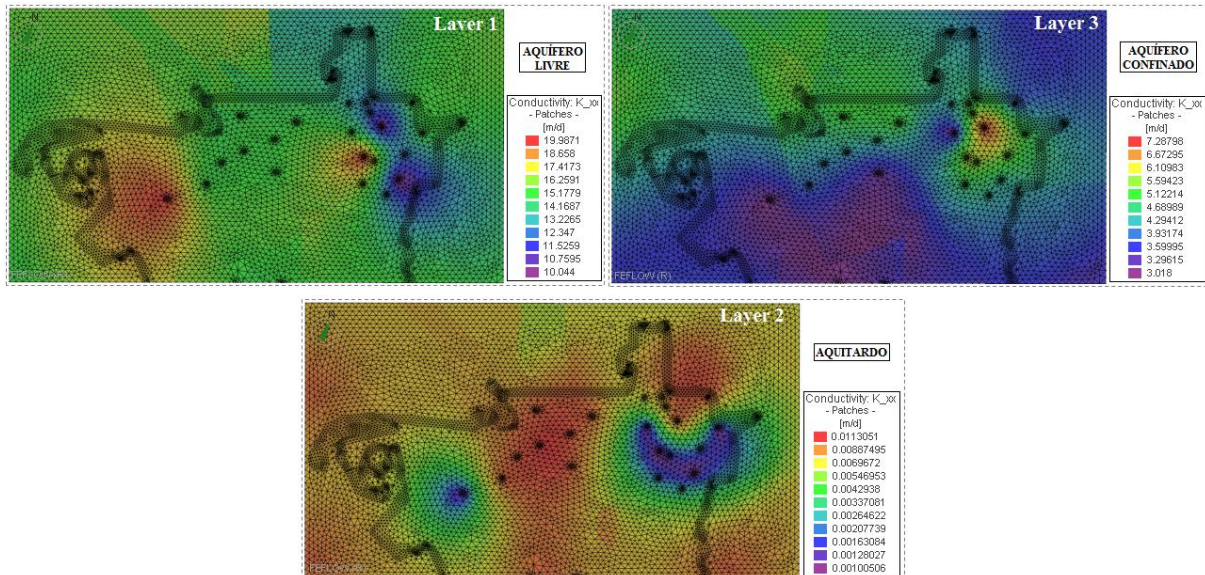


Figura 6.6: Condutividades hidráulicas estimadas para cada camada do sistema aquífero.

Os valores iniciais utilizados para determinar a permeabilidade das diferentes unidades hidrogeológicas foram obtidos através de ensaios de bombeamento realizados na abertura dos furos de captação e na ausência destes, nas camadas superiores, optou-se por se ajustar o valor de  $K$  à composição litológica descrita nas sondagens. Decidiu-se não utilizar o valor empírico de 0.1 para o coeficiente de permeabilidade mas de 0.2, em virtude dos valores elevados de permeabilidade vertical ( $K_z$ ), estimados na sondagem de Belverde por SIMÕES (2010). Para a porosidade eficaz, utilizaram-se valores concordantes com a litologia, de 0.25 para areias finas superficiais, 0.15 para a camada argilosa e 0.12 para os grés calcário, por vezes margosos (FREEZE AND CHERRY, 1979).

#### 6.4. RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO DE FLUXO

A simulação inicial foi efetuada em estado estacionário, sem qualquer extração no sistema aquífero, sendo este o ponto de partida para o modelo de fluxo subterrâneo (Figura 6.7).

Em regime natural, a carga hidráulica do aquífero confinado é superior à do aquífero livre, em todos os elementos modelados, embora a distribuição espacial da piezometria seja distinta. A superfície freática mostra que o escoamento subterrâneo é claramente influenciado pelo estuário, para o qual se impôs um nível constante, enquanto no aquífero confinado a direção de escoamento é constante e as equipotenciais praticamente equidistantes, apenas com alterações ligeiras nas zonas onde a condutividade hidráulica é maior. No geral a piezometria varia entre os 3 e 0 m no aquífero livre e entre 4 e 1 m no aquífero

confinado, sendo o gradiente hidráulico em ambos os aquífero muito baixo, por se tratar de uma zona de descarga do sistema aquífero Bacia do Tejo-Sado.

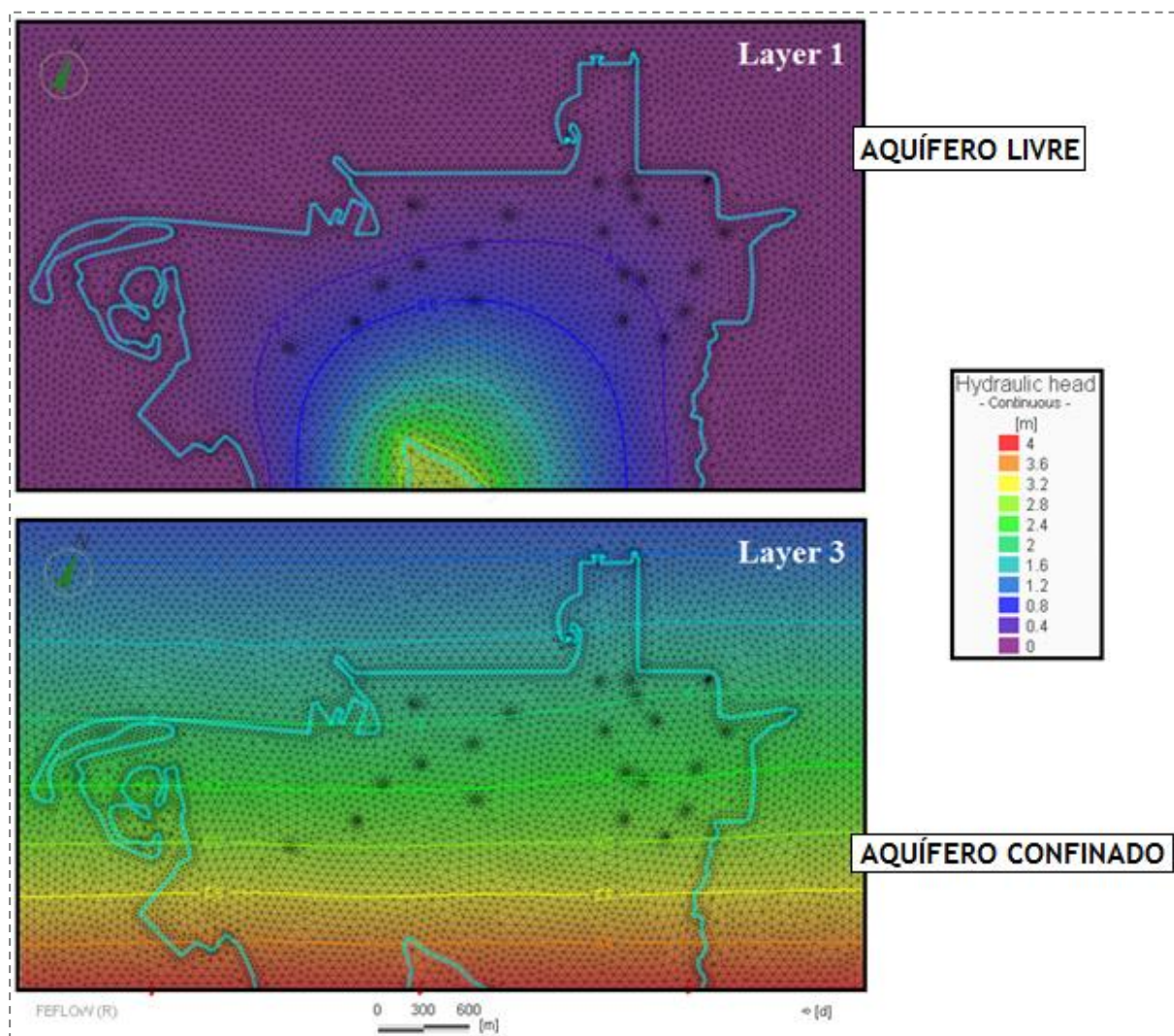


Figura 6.7: Piezometria calculada para o modelo de fluxo em estado estacionário e sem regime de extração para o aquífero livre (layer 1) e aquífero confinado (layer 3).

Os resultados obtidos foram gravados para se dar início à modelação do sistema em estado transiente, sendo estas agora as condições iniciais relativas à distribuição espacial dos níveis potenciométricos. Considerou-se que estas condições correspondiam ao ano 0 do modelo que num cenário verossímil seria equivalente ao ano de 1960. Para a discretização temporal do modelo definiram-se intervalos de tempo constantes de 7.3 dias correspondente à quinquagésima parte de um ano, sendo modelado um período total equivalente a 21900 dias, ou seja, 60 anos.

Na figura 6.8 observam-se os resultados do mapa final de distribuição da piezometria no aquífero gresocalcário para os intervalos de tempo modelados, incluídos num período de 3650 dias (10 anos) (Figura 6.8 a), 7300 dias (20 anos) (Figura 6.8 b), 14600 dias (40 anos) (Figura 6.8 c) e 21900 dias (60 anos) (Figura 6.8 d). São ainda visíveis os dois pontos de observação adicionados ao modelo para acompanhar a evolução da piezometria junto ao estuário, cujos resultados são apresentados na figura 6.9.

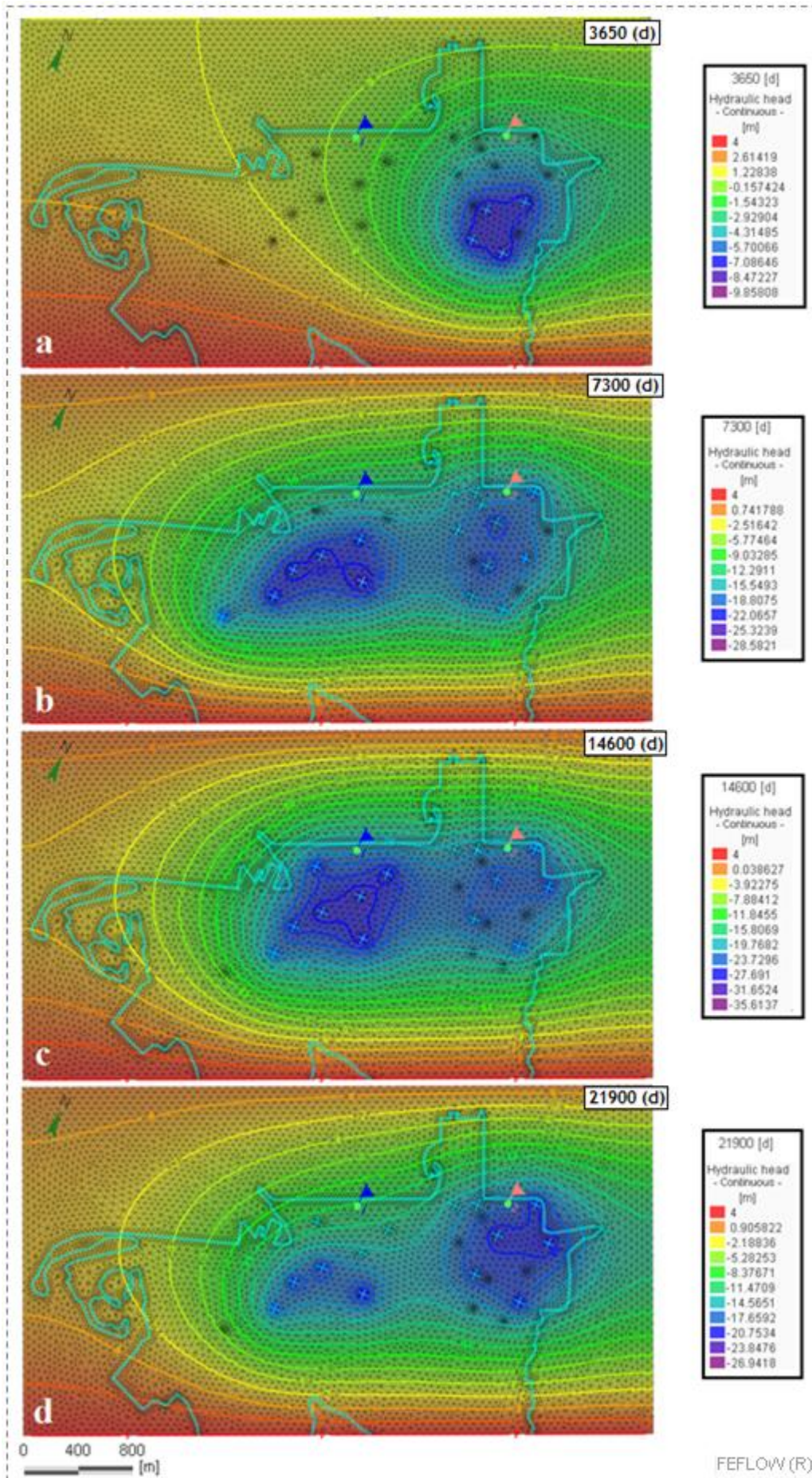


Figura 6.8: Evolução dos níveis piezométricos no aquífero confinado considerando um intervalo de tempo de 60 anos (1960 – 2020).

Os primeiros rebaixamentos efetuados na região ocorreram na margem direita do complexo industrial, e desde então observam-se duas zonas de rebaixamento distintas, cujos proprietários dos furos à época eram a UFA, EDP, FISIFE, CPE e a CUF. Estas duas zonas de rebaixamentos registadas em setores opostos do complexo industrial constituem, em conjunto, uma grande zona de depressão de formato elipsoidal que afeta toda a margem ribeirinha. Os níveis piezométricos no aquífero confinado foram sendo constantemente rebaixados com o aumento da exploração que, segundo a piezometria calculada no modelo, atingiram valores máximos na ordem dos -35 m. Com a selagem de alguns furos por encerramento de algumas indústrias, o rebaixamento atual é inferior ao de outrora, ainda assim, bastante elevado, como se pode observar no intervalo de tempo final da figura 6.8.

Comparando com a figura 6.7 denota-se a inversão de escoamento no aquífero confinado, estendendo-se a zona de captura para N das captações e, portanto, das camadas subjacentes ao estuário do Tejo. Neste contexto, pode considerar-se o sistema aquífero de vulnerável porque pode haver deslocação de água do estuário de menor qualidade. No aquífero superior este efeito não se faz sentir tão intensamente uma vez que o sentido de escoamento não é alterado, sendo os resultados obtidos parcialmente idênticos para este aquífero ao que se verifica num sistema sem exploração.

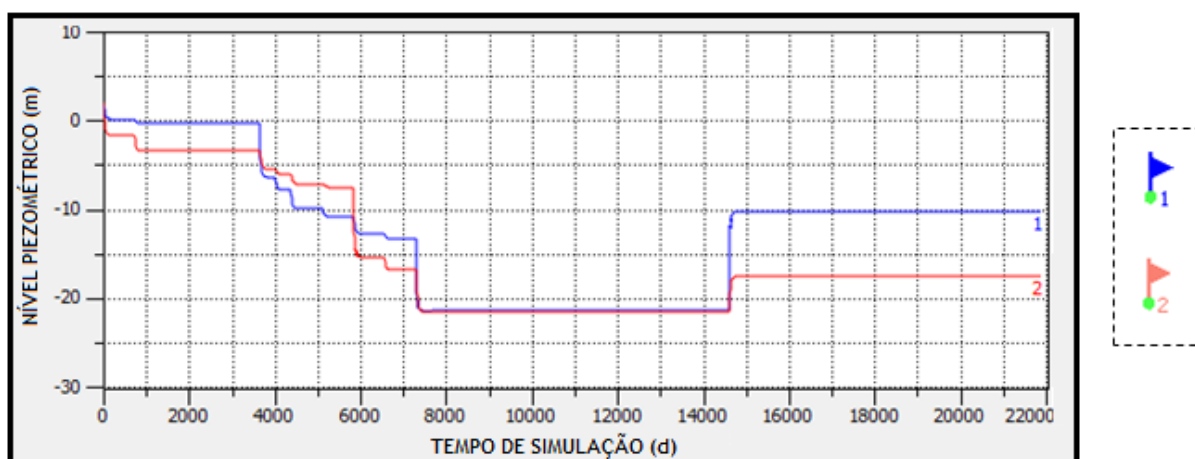


Figura 6.9: Evolução dos níveis piezométricos nos dois pontos de observação localizados em margens opostas do setor norte do complexo industrial durante o período de simulação.

Os dois pontos de observação foram colocados no aquífero confinado, paralelos entre si, acompanhando a evolução dos níveis piezométricos neste aquífero junto ao estuário e em cada setor de exploração. O ponto de observação 1 (azul) acompanha a zona de influência das captações da CUF situadas no lado esquerdo do atual parque empresarial, enquanto o ponto 2 (vermelho) situa-se no lado oposto a verificar os rebaixamentos adjacentes às captações das restantes entidades (EDP, FISIFE, UFA). Os níveis piezométricos nos pontos de observação foram sendo rebaixados a uma velocidade mais ou menos constante, em função dos locais de abertura dos furos durante os dois primeiros períodos simulados, sendo que na fase de exploração máxima são praticamente idênticos. Considerando o regime de

exploração atual o rebaixamento é inferior na localização prevista para o novo terminal de contentores, em consequência do encerramento das captações F88, F97 e F43.

## 6.5. AVALIAÇÃO E CARATERIZAÇÃO DA INTRUSÃO SALINA

O principal aspeto a ter em conta na vulnerabilidade do sistema aquífero é averiguar de que forma o rebaixamento no aquífero confinado influencia a direção e sentido do escoamento subterrâneo no aquífero superior. Os riscos de contaminação salina do aquífero greso-calcário surgem por captação de águas dos níveis aquíferos superiores e de camadas subjacentes ao estuário do Tejo. Assim sendo, recorreu-se às ferramentas do modelo tais como: mapa de velocidade de Darcy para a base do aquífero livre (Figura 6.10), cálculo de balanços hídricos para todo o domínio e subdomínios definidos e para as fronteiras do modelo (Figura 6.11, 6.12 e 6.13) e cálculo de linhas de fluxo regressivas (Figura 6.14).

### 6.5.1. MAPAS DE VELOCIDADE DE DARCY

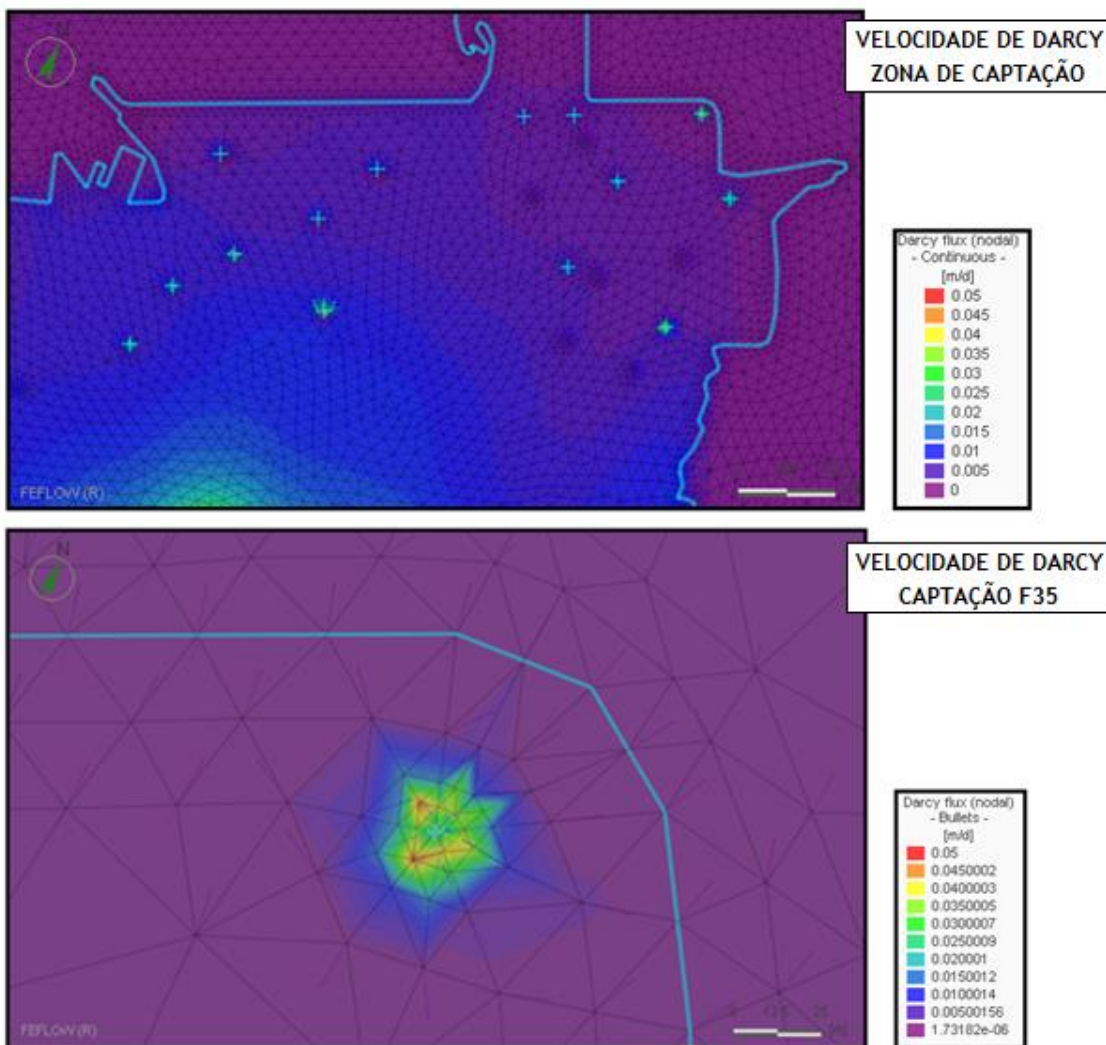


Figura 6.10: Mapa da velocidade de Darcy (m/dia) centrado na zona de captação e na área envolvente à captação F35 na base do aquífero livre (layer 2).

O modelo conceptual idealizado para a frente ribeirinha do Barreiro considerou a existência de um aquífero de espessura considerável a separar os dois aquíferos, porém não se exclui a possibilidade de existirem zonas com permeabilidade elevada. A presença de uma camada pouco permeável é suficiente para que não ocorram rebaixamentos avultados no aquífero livre quando a exploração incide somente no aquífero confinado. Ainda assim, verificam-se pequenos cones de rebaixamento estritamente localizados nas zonas de captação que, dada a dimensão da malha, dificilmente se verificam à escala do modelo. Na figura 6.10 é visível a alteração na velocidade e sentido de escoamento próximo destas captações subterrâneas na base do aquífero livre (plano 2), que se fazem sentir de forma mais prenunciada nos furos de captação situados na frente de escoamento, ou seja, furos situados mais a S.

### 6.5.2. BALANÇOS HÍDRICOS

Durante as simulações efetuadas, procedeu-se ao cálculo de balanços hídricos para todo o domínio e subdomínios definidos, neste caso, para cada camada do modelo e para as fronteiras do sistema.

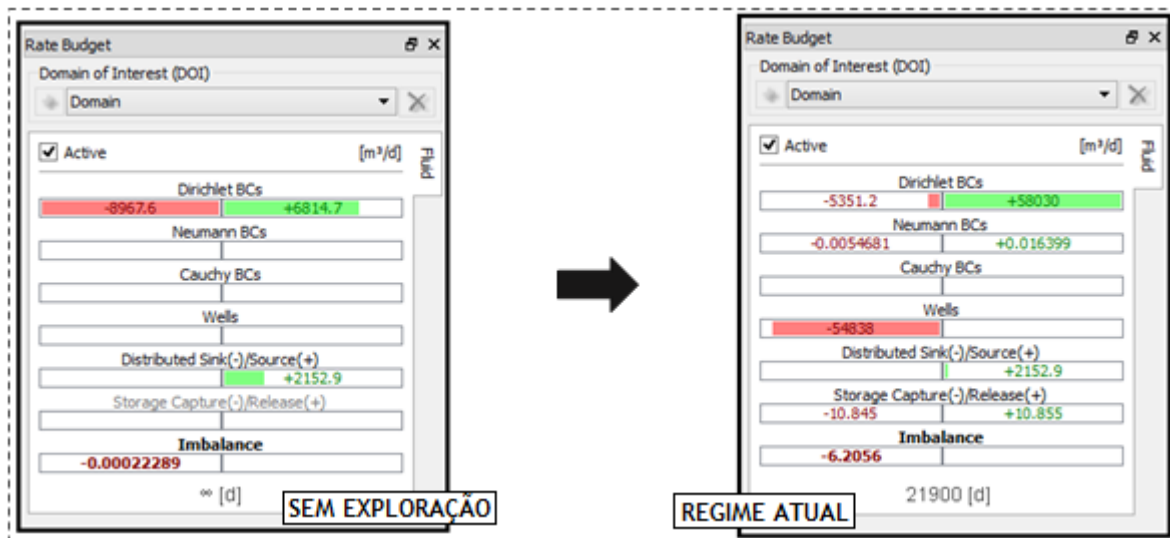


Figura 6.11: Balanço hídrico calculado para todo o domínio do modelo para um cenário sem exploração e em regime estacionário (esquerda) e em estado transiente com os furos atuais em atividade (direita).

A recarga direta proveniente da precipitação eficaz no aquífero superficial pode representar em regime natural 30% da entrada de água no sistema na área modelada, no entanto, esta é praticamente insignificante quando o sistema entra em exploração (Figura 6.11). Os caudais extraídos são claramente desajustados e só podem ser compensados por alimentação lateral. São as condições de fronteira que simulam a recarga no modelo, mantendo o sistema em equilíbrio, pois dada a extensão total do sistema aquífero considera-se este inesgotável no intervalo de tempo modelado. Ainda assim, não foi possível estabilizar o modelo para o período de tempo estabelecido que, segundo o balanço hídrico geral, o sistema está em perda, contabilizando um balanço negativo de  $-6.20 \text{ m}^3/\text{dia}$ , ainda que este seja um valor diminuto tendo em consideração a área modelada pode ter efeitos prejudiciais no equilíbrio hidrodinâmico e hidroquímico do sistema aquífero.



Figura 6.12: Balanço hídrico calculado para cada camada do sistema aquífero considerando um cenário sem exploração e em estado estacionário (acima) e o cenário de exploração atual (abaixo).

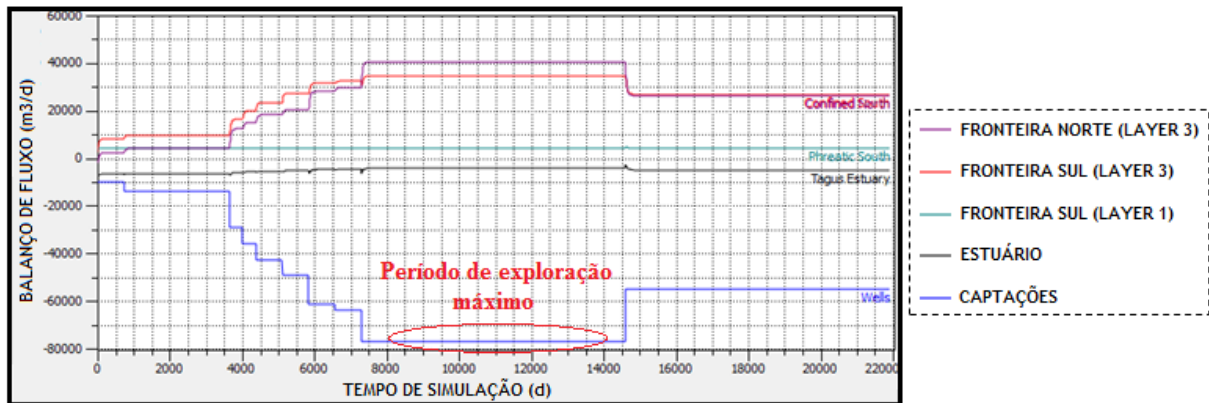


Figura 6.13: Balanço hídrico do sistema considerando as condições de fronteira do modelo

Os balanços hídricos (Figura 6.12) nas diferentes condições, em exploração e sem exploração, mostram diferença notável nos volumes de água captados no aquífero confinado. Estes, representados pelas transferências discretas no balanço hídrico, estão a ser transferidos do aquífero por drenância  $16 \text{ m}^3/\text{dia}$ . O aumento considerável das perdas internas, de 0,3 para  $5241 \text{ m}^3/\text{dia}$  no aquífero livre, e de 515 para  $1652 \text{ m}^3/\text{dia}$  no aquífero, apenas podem ser compensadas pelas condições fronteira ou de áreas distantes das zonas de captação. De salientar que o balanço hídrico no aquífero livre é negativo, na ordem dos

2160 m<sup>3</sup>/dia e semelhante ao valor da recarga (2152 m<sup>3</sup>/dia), não considerada nos cálculos para cada unidade hidrogeológica.

A figura 6.13, diferenciando as fronteiras do sistema para cada aquífero, mostra a evolução temporal dos volumes captados e a sua origem. O estuário do Tejo representa sempre uma fronteira de descarga subterrânea, porém com ligeiras variações durante o intervalo de tempo modelado. Existe uma ligeira redução da descarga do sistema por esta fronteira, causada provavelmente pela drenância vertical de água descendente. No período de máxima exploração a alimentação subterrânea das captações é maioritariamente oriunda de N no aquífero confinado, ou seja, contrária à direção natural de escoamento.

### 6.5.3. CÁLCULO DE LINHAS DE FLUXO REGRESSIVAS

Considera-se um período crítico para o sistema aquífero aquando da abertura das captações F88 e F97 (1980 - 1981), cujos respetivos caudais de exploração, 100 l/s, foram superiores a qualquer outro praticado até à data (2016). Por outro lado, estas captações situadas na frente ribeirinha, mais próximas da área fortemente intervencionada, por fazerem parte do sistema de abastecimento de água ao concelho do Barreiro (ENGIDRO, 2010), estão mais vulneráveis à salinização.

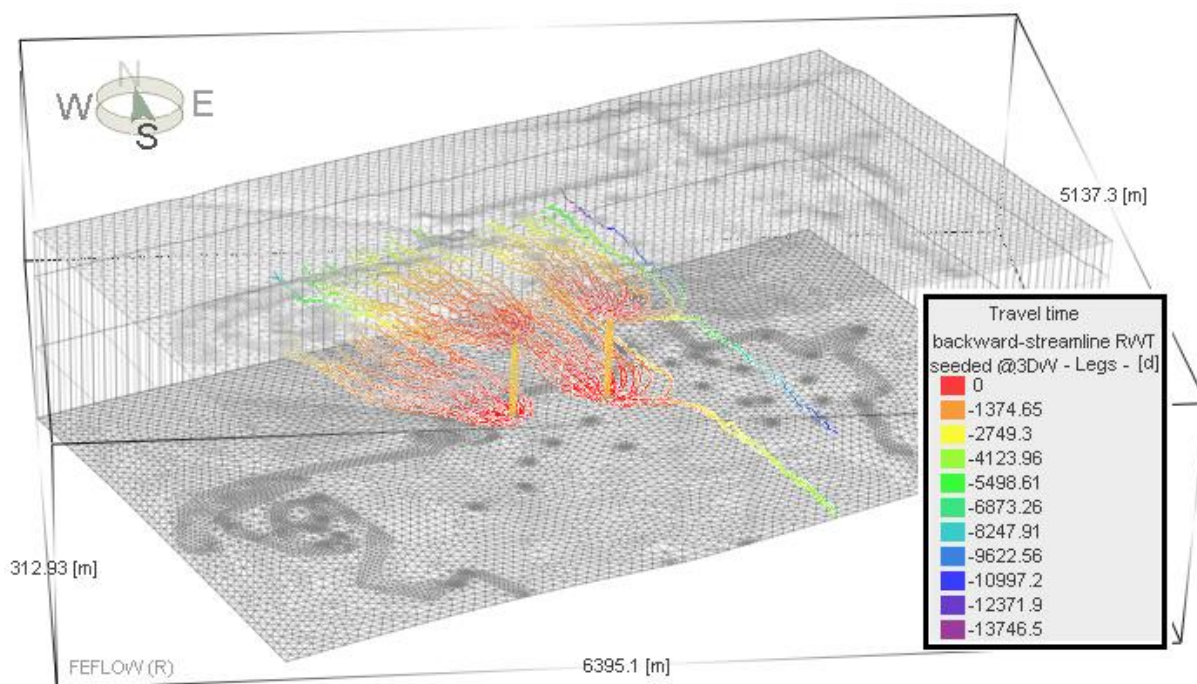


Figura 6.14: Linhas de fluxo regressivas no tempo para as captações F88 e F97.

Procedeu-se à simulação das principais linhas de fluxo que alimentam estas captações no intervalo de tempo correspondente ao período crítico (Figura 6.14). Em relação ao sistema de captação instalado, estes furos estão localizados mais a N, captando maioritariamente a partir desta direção, ou seja, em zona subjacente ao estuário. O tempo previsto para a água alcançar as captações varia de 4 anos, nas áreas mais próximas, e de 37 anos, a partir dos limites do modelo e do aquífero. Pelo descrito estas

captações contribuem significativamente para a vulnerabilidade do sistema aquífero ou qualquer outras que se venham aqui implantar. Estes furos não devem de modo algum ser utilizados no abastecimento de água ao parque empresarial, devendo-se optar por outros situados em locais mais afastados do estuário.

## 6.6. CALIBRAÇÃO DO MODELO DE FLUXO

O modelo de fluxo subterrâneo foi sendo sucessivamente calibrado durante o desenvolvimento das etapas de resolução, de modo que os valores de piezometria calculados se aproximassem, em regime natural, dos valores registados no momento da abertura das primeiras captações e, em regime de exploração, dos rebaixamentos observados nos ensaios de bombeamento. Em regime de exploração a calibração do modelo foi feita em função dos rebaixamentos observados que constam nos relatórios das sondagens hidrogeológicas, produzidos aquando da abertura dos furos.

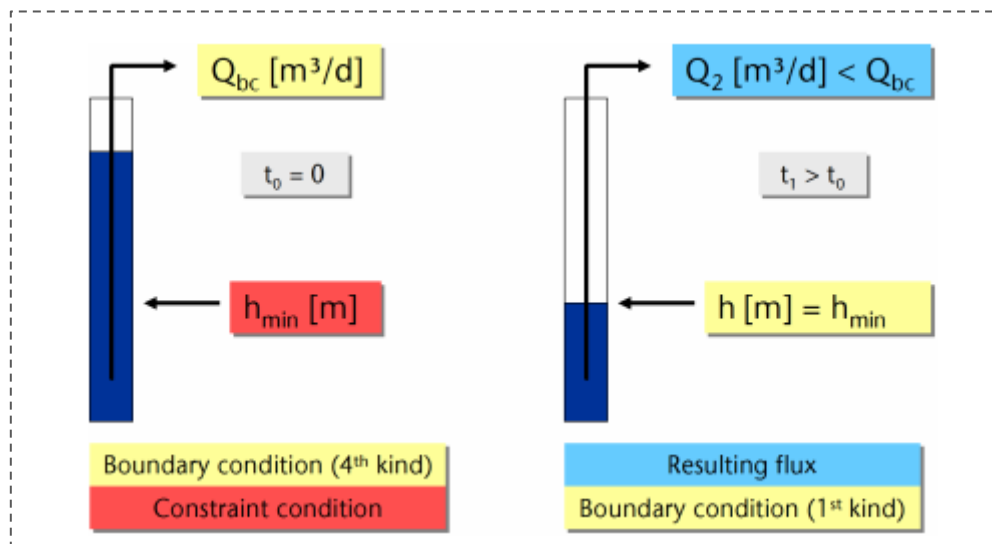


Figura 6.15: Condições de fronteira aplicada a furos com restrição máxima de rebaixamento e passagem para nível piezométrico imposto no caso de esse valor ser atingido (DHI-WASY GmbH, 2014).

A figura 6.15 representa uma das soluções mais adequadas no software FEFLOW para a calibração de um modelo em resposta a um regime de exploração das águas subterrâneas. Sendo assim, nos primeiros dois períodos de tempo modelado, impôs-se em cada nó representativo de uma captação um nível piezométrico mínimo. O valor mínimo, para qual a superfície piezométrica poderia ser rebaixada, foi atingido em algumas captações e quando esse limite foi atingido, surgiu elevação do cone de rebaixamento em redor da captação para suplantar os efeitos do bombeamento. Para não alterar os caudais de exploração a fim de mitigar este efeito, optou-se por utilizar uma condição de fronteira para o aquífero confinado no limite N do modelo que até outrora não existia, ficando apenas definido o nível piezométrico na zona de recarga.



## 7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho foi elaborado o modelo hidrogeológico conceptual do funcionamento hidráulico do sistema aquífero do Tejo-Sado, margem esquerda, na frente ribeirinha do Barreiro e a simulação do fluxo subterrâneo considerando diferentes cenários de exploração, tendo como objetivo avaliar a vulnerabilidade do sistema aquífero à contaminação salina. A área de estudo, inserida na Bacia do Tejo-Sado, possui determinadas características hidrogeológicas que lhe conferem uma grande suscetibilidade à contaminação essencialmente devido à presença de uma superfície livre que contacta diretamente com as águas salinas do estuário do Tejo e às fortes pressões sobre os recursos hídricos subterrâneos resultantes da atividade de empresas instaladas no parque empresarial. Em virtude da sobre-exploração dos aquíferos da região surgem desequilíbrios hidrodinâmicos e hidroquímicos no sistema aquífero promotores e facilitadores da migração de água salobra e transporte de sais para as águas continentais.

No decurso deste estudo foram utilizados 67 pontos de água correspondentes a sondagens hidrogeológicas, poços, furos de captação e monitorização, dos quais se obteve dados geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. Da base geológica interpretada, elaborou-se o modelo conceptual hidrogeológico que consiste num sistema aquífero multicamada constituído por 3 unidades hidrogeológicas: um aquífero livre instalado nas formações aluvionares quaternárias e arenosas do Pliocénico, um aquífero semi-confinado a confinado constituído por arenitos e rochas carbonatadas que têm como suporte as camadas da base do Pliocénico mas principalmente a série greso-calcária marinha do Miocénico e um aquífero que separa estes dois aquíferos, formando um nível predominantemente argiloso, de espessura e posição variável mas praticamente contínuo na frente ribeirinha.

O aquífero livre está em conexão hidráulica com as águas do estuário do Tejo possibilitando a migração de águas salobras para o continente. Estes níveis aquíferos superiores, cujas espessuras máximas reconhecíveis na área de estudo variam entre os 55 e 79 m, não são exploráveis em virtude da má qualidade da água, apresentando elevados níveis de salinização. A exploração incide quase exclusivamente no aquífero greso-calcário confinado, situado em média entre os 155 e os 270 m de profundidade, que alimenta a região para os diversos fins. Na frente ribeirinha e junto ao estuário está implantado, desde a década de 60, um sistema de captação de água para abastecimento industrial que provocou rebaixamentos acentuados dos níveis piezométricos do aquífero confiando nesta região.

Por existir descarga subterrânea na proximidade ao estuário do Tejo, o aquífero confinado, que mergulha sob o estuário, em regime natural tem potencial hidráulico superior ao aquífero livre, ocorrendo drenância vertical no sentido ascendente. No entanto, a sobre-exploração provocou rebaixamentos acentuados dos níveis piezométricos do aquífero confinado na região ribeirinha, promovendo drenância vertical no sentido descendente e transferência de água das camadas superiores e subjacentes ao estuário do Tejo para este aquífero. Estas ameaças tornam o sistema aquífero vulnerável que tem no aquífero greso-calcário confinado o principal recurso hídrico subterrâneo, e possivelmente o único, da região. A

vulnerabilidade deste aquífero é em parte devida à espessura e permeabilidade do aquífero que pode, ou não, facilitar a propagação salina entre as unidades hidrogeológicas.

A construção do modelo numérico hidrogeológico representativo das condições de fluxo subterrâneo na região ribeirinha foi efetuada através dos dados de 21 captações subterrâneas situadas no parque empresarial e de dados meteorológicos. A simulação inicial foi efetuada em estado estacionário, sem qualquer extração no sistema aquífero, sendo este o ponto de partida para o modelo de fluxo subterrâneo em estado transiente. Para reproduzir a evolução dos níveis piezométricos ao longo dos anos, introduziram-se sucessivamente no modelo numérico os dados das captações, caudais de exploração, de acordo com os anos em que iniciaram a sua atividade. Obteve-se assim o mapa final de distribuição da piezometria no aquífero greso-calcário para um período temporal de 10 anos (1960 - 1970), 20 anos (1970 - 1980), 40 anos (cenário de exploração máxima) e 60 anos (exploração atual).

Segundo o modelo de fluxo desenvolvido, os níveis piezométricos foram metodicamente rebaixados entre a década de 60 e 80 para valores consideravelmente inferiores ao estuário do Tejo. Para a situação atual, a piezometria calculada para a zona industrial oscila entre os -10 e -27 m tendo em conta as captações que se encontram ativas, e os -20 e -37 m em regime de exploração máxima. Na área de estudo são observadas duas zonas de rebaixamento distintas que, em conjunto, formam uma zona de depressão de formato elipsoidal que afeta toda a margem ribeirinha. Verifica-se inversão de escoamento no aquífero confinado, estendendo-se a zona de captura para N das captações e, portanto, para as camadas subjacentes ao estuário do Tejo. Denota-se pouca influência destes rebaixamentos nas camadas superiores, aquífero livre e aquífero, não sendo alterada a direção e o sentido de escoamento.

Ainda assim, verificam-se pequenos cones de rebaixamento e alterações no sentido do escoamento estritamente localizados nas zonas de captação, identificados em mapas de velocidade de Darcy desenvolvidos para a base do aquífero livre. Segundo os balanços hídricos calculados, estão a ser transferidos do aquífero, por drenância vertical, 16 m<sup>3</sup>/dia para o aquífero confinado, sendo que o sistema aquífero na área modelada está em perda, contabilizando um balanço negativo de -6.20 m<sup>3</sup>/dia. Estes valores ainda que diminutos, tendo em consideração a área modelada, podem ter efeitos avultados no equilíbrio hidrodinâmico e hidroquímico do sistema aquífero. Das captações estudadas os furos F88 e F97 são os que conferem maior instabilidade ao sistema aquífero, uma vez que os caudais de exploração, 100 l/s, foram superiores a quaisquer outros praticados até à data (2016). As linhas de fluxo regressivas calculadas para estas captações confirmam que a chamada de água é originária de N e, consequentemente, das camadas subjacentes ao estuário do Tejo. Estes furos não devem em nenhuma circunstância ser utilizados no abastecimento de água para fins industriais, devendo-se optar por outros situados em locais mais afastados do estuário, inclusive no exterior do parque empresarial.

A calibração do modelo foi efetuada restringindo os rebaixamentos verificados nos ensaios de bombeamento das captações, aquando da abertura dos furos. A construção do modelo de fluxo baseou-

-se na análise das series temporais de um conjunto de níveis estáticos e hidrodinâmicos que datam na sua maioria entre a década de 60 e 90, sendo previsto os rebaixamentos seguintes para um período temporal coincidente com o ano de 2020. Para uma melhor calibração é necessário proceder à recolha de novos dados representativos da piezometria atual.

O município depende exclusivamente de águas captadas neste sistema aquífero para suprir as necessidades humanas, industria e agricultura. Os recursos hídricos subterrâneos são assim de extrema importância para a região uma vez que as alternativas de fontes de abastecimento são externas à Península de Setúbal e, portanto, muito mais onerosas. A degradação da qualidade da água, principalmente nas captações próximas do estuário, pode agravar-se uma vez que para área em estudo se prevê o alargamento do Porto de Lisboa, cujas obras hidráulicas poderão interferir ainda mais no desequilíbrio do sistema, aumentando a transferência de água do estuário para os níveis subjacentes. Embora de elevada vulnerabilidade o sistema encontra-se protegido pela camada lodosa situada no fundo do estuário do Tejo que pela ação das obras hidráulicas será removida, expondo ainda mais o sistema à intrusão salina. Existe alguma incerteza de como se comporta a propagação salina nos níveis aquíferos que estão subjacentes ao estuário, sendo certo a elevada concentração de cloreto nas águas subterrâneas continentais próximas do estuário. Há registo do abandono de algumas captações subterrâneas por salinização das mesmas, inclusive as que captam níveis mais profundos junto ao estuário. Com a instalação de uma nova unidade portuária a solução mais adequada consiste em desativar as captações subterrâneas no parque empresarial, sendo as unidades industriais aqui presentes abastecidas pelas captações municipais ou outras situadas em zonas interiores do concelho.

Sugere-se a construção de um modelo de transporte, desenvolvido a partir das condições de fluxo subterrâneo simuladas, para determinar de que forma as alterações batimétricas na base do estuário afetam o comportamento da interface água doce/água salgada em profundidade, utilizando o modelo matemático FEFLOW. Este assume uma zona de transição desenvolvida em função das propriedades de miscibilidade dos dois fluidos com densidades diferentes (água doce e água salgada), não simplificando a existência de uma interface brusca na modelação da intrusão salina como tradicionalmente os modelos numéricos em diferenças finitas atuam.



## 8. BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, C., MENDONÇA, J. J. L., JESUS, M. R. e GOMES, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Instituto da Água. Centro de Geologia da Universidade de Lisboa. 661 pp.
- ANTUNES, M. T., ELDERFIELD, H., LEGOINHA, P., NASCIMENTO, A. e PAIS, J. (1999). A stratigraphic framework for the Miocene from the lower Tagus Basin (Lisbon, Setúbal Península, Portugal) Depositional sequences, biostratigraphy and isotopic ages. *Rev. Soc. Geol. Espana*, **12 (1)**: 3 - 15 pp.
- APL (2004). *Proposta de Definição do Âmbito do Estudo de Impacte Ambiental do Terminal de Contentores do Barreiro*. Novembro 2014. 95 pp.
- ARH TEJO (2010). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo. Parte 2 - Caracterização e Diagnóstico da Região*. ARH Tejo, 2010. Relatório Técnico. 376 pp.
- AZEVEDO, M., T. (1983). *O Sinclinal de Albufeira: Evolução pós-miocénica e reconstituição paleogeográfica*. Tese de Doutoramento em Geologia. Faculdade de Ciências de Lisboa, Departamento Geologia, Lisboa. 302 pp.
- BAÍA DO TEJO (2015). *Qualidade da água para consumo humano*. Parque Empresarial do Barreiro. Direcção do Parque, Serviço de Águas.
- BAÍA DO TEJO (2014). *Qualidade da água para consumo humano*. Parque Empresarial do Barreiro. Direcção do Parque, Serviço de Águas.
- BONGANHA, C. A., GUIGUER Jr, N., PEREIRA, S. Y., OLIVEIRA, L. C. e RIBEIRO, M. L. (2007). *Conceitos e Fundamentos da Modelagem Matemática para Gerenciamento de Recursos Hídricos Subterrâneos*. *Revista Analytica*, **30**: 116 - 120 pp.
- CABRAL, J. (1995). *Neotectónica em Portugal Continental*. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, **31**: 265 pp
- CABRAL, J. J. (2004). *Sustentabilidade de aquíferos costeiros*. Suplemento - XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo (Brasil), 2004, ABAS. 13 pp.
- CÂMARA, A. S., CARDOSO DA SILVA, M., RAMOS, L. e FERREIRA, J. G. (1987). *Tejo I: An interactive program for the division of estuaries into homogeneous areas*. *Water, Science and Technology*, **19**: 43 - 51 pp,
- CEREJEIRA, J. M. G. (2014). *Localização do novo Terminal de Contentores no Barreiro*. Sessão na Ordem dos Engenheiros, Lisboa. 15 pp.
- CHOFFAT, P. (1950). *Géologie du Cénozoïque du Portugal*. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*. Suplemento ao Tomo nº XXX. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 182 pp.
- CMB (2014). *Controlo da Qualidade da Água para Consumo Humano*. Departamento de Águas e Resíduos, Divisão de Águas e Saneamento. Relatório Anual de 2014. 36 pp.

## CAPÍTULO 8

CMB (2013). Proposta de delimitação de Perímetros de Protecção de captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público do concelho do Barreiro. Joaquim Capucho. 80 pp.

CMB (2009). Água no Barreiro: Um tesouro escondido. Gota a Gota. Publicação Semestral, A água e o saneamento no concelho do Barreiro. Março 2009, **1**: 12 pp.

COSTA, C., N. e BRITO, G. (2008). TTT Chelas – Barreiro. Nova Travessia do Tejo. Jornadas Tecnológicas da FCT/UNL. Monte da Caparica (Almada), 2008. 18 pp.

COTTER, J.C.B. (1956). O Miocénico marinho de Lisboa. (Obra Póstuma). Comunicações dos Serviços Geológicos De Portugal. Nº XXXVI. Suplemento. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 170 pp.

DHI-WASY GmbH (2014). Training Manual FEFLOW 6.2. Groundwater Modeling with FEFLOW 6.2. Groundwater Modelling Centre. FEFLOW Services. 138 pp.

DHI-WASY GmbH (2013). User Manual FEFLOW 6.2. Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. DHI-WASY Software. 202 pp.

DHV/FBO (2007). Elaboração do Plano Estratégico do Porto de Lisboa. Relatório de Síntese. Administração do Porto de Lisboa. 138 pp.

DIAMANTINO, C. e LOBO FERREIRA, J.P. (2002). Modelação da Intrusão Salina com o Modelo Matemático FEFLOW: Fundamentos Teóricos. Formulação para um caso real de estudo. 6º Congresso da Água. Porto, 2002, APRH. 15 pp.

DÖLL, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. Environ. Res. Lett, **4**: 12 pp.

EEA (2007). Impacts due to over-abstraction. Copenhagen (Denmark). Acedido em 26 de Agosto de 2016, em: <http://www.eea.europa.eu/themes/water/water-resources/impacts-due-to-over-abstraction>. 5 pp.

ENGIDRO (2010). Plano geral de águas e saneamento do concelho do Barreiro. Relatório 3 - Documento síntese do plano geral. Volume I - Sistema de abastecimento de água relatório síntese. Câmara Municipal do Barreiro, Departamento de Águas e Saneamento, Divisão de Projectos e Obras. Relatório Final. 62 pp.

FELISA, G., CIRIELLO, V. e DI FEDERICO, V. (2013). Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers: A Primary Case Study along the Adriatic Coast Investigated within a Probabilistic Framework. Water, **5**: 1830 - 1847 pp.

FERNANDES, R. (2005). Modelação Operacional no Estuário do Tejo. Tese de Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos. Instituto Superior Técnico, Lisboa. 95 pp.

FERREIRA DA SILVA, J. (2003). Gestão otimizada à escala regional de sistemas aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina: Um modelo global para o uso sustentável da água em regiões costeiras. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Guimarães. 410 pp.

FERREIRA DA SILVA, J. F. e HAIE, N. (2004). Localização otimizada de captações em aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina. 7º Congresso Nacional da Água. LNEC (Lisboa), 2004, APRH. 15 pp.

- FIALHO, R. (2009). Caracterização dos parâmetros hidráulicos do sistema aquífero da bacia do Tejo Sado/margem esquerda na área do concelho do Seixal. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- FIGUEIRA, P. (2014). Localização do novo Terminal de Contentores no Barreiro. Acessos Marítimos. Sessão na Ordem dos Engenheiros, Lisboa. 12 pp.
- FREEZE, R. A. e CHERRY, J. A. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall. 604 pp.
- FREIRE, P., TABORDA, R. e ANDRADE, C. (2006). Caracterização das praias estuarinas do Tejo. 8º Congresso da Água. Figueira da Foz (Coimbra), 2006, APRH. 12 pp.
- GAMEIRO, C. (2009). Fitoplâncton do Estuário do Tejo: Dinâmica sazonal, estrutural, interanual, e produção primária. Tese de Doutoramento em Biologia na especialidade de Ecologia. Departamento de Biologia Vegetal, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa. 161 pp.
- GESTÁGUA (1996). Plano director de desenvolvimento do sistema de abastecimento da EPAL - Avaliação das disponibilidades - Origens subterrâneas. Consórcio PROCESL, Compagnie Generale de Eaux Portugal, Profabril, Lisboa.
- GUERREIRO, M., FORTUNATO, A. B., FREIRE, P., RILO, A., TABORDA, R., FREITAS, M. C., ANDRADE, C., SILVA, T., RODRIGUES, M., BERTIN, X. e AZEVEDO, A. (2015). Evolution of the hydrodynamics of the Tagus estuary (Portugal) in the 21st century. Revista de Gestão Costeira Integrada, **15(1)**: 65 - 80 pp.
- HP (1994). Estudo de caracterização dos aquíferos e dos consumos de água na península de Setúbal. Hidrotécnica Portuguesa, estudo realizado para Empresa Portuguesa de Águas Livres, S.A., (EPAL), Lisboa.
- JOHNSON, T. (2007). Battling Seawater Intrusion in the Central & West Coast Basins. Water Replenishment District of Southern California. Technical Bulletin. Fall 2007. Volume **13**: 2 pp.
- KULLBERG, M. C., KULLBERG, J. C. e TERRINHA, P. (2000). Tectónica da Cadeia da Arrábida. Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida. Memórias Geociências. Museu Nac. Hist. Nat. Universidade de Lisboa, **2**: 35 - 84 pp.
- LOBO FERREIRA, J. P. (1998). Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal. 4º Congresso da Água. FIL (Lisboa), 1998, APRH. 16 pp.
- LOBO FERREIRA, J. P. e CABRAL, M. (1991). Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources. in Meeting of the European Institute for Water. Groundwater Work Group Brussels. Feb. 1991.
- LOUREIRO, J. M. (1979). Curvas de duração dos caudais médios diários do rio Tejo. in Nutrientes do estuário do Tejo – Comparação da situação em caudais médios e em cheia, com destaque para alterações na qualidade da água. I Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- MENDONÇA, J. P. (2007). Caracterização geológica e hidrogeológica da Bacia Terciária do Tejo-Sado. in Tágides, os aquíferos das bacias hidrográficas do rio Tejo e das ribeiras do Oeste: saberes e reflexões. ARH Tejo. 59 - 65 pp.

MONIZ, C. (2010). Contributo para o conhecimento da falha de Pinhal Novo – Alcochete, no âmbito da Neotectónica do Vale Inferior do Tejo. Tese de Mestrado em Geologia na especialidade de Geologia Estrutural. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa. 128 pp.

MOREIRA, P. P. (2015). Anteprojecto sobre a viabilidade de um Terminal de Contentores no Barreiro. Contributo para a Reconversão de uma Zona Industrial deprimida e factor de Desenvolvimento e de Sustentabilidade. Em: <http://www.academia.edu/>. 111 pp.

MORFEED (2013). Morphodynamic Feedback of Estuarine Margins to Climate Change. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Departamento de Hidráulica e Ambiente. Final Report. 51 pp.

NOGUEIRA MENDES, R., CEIA, R., SILVA, T., RILO, A., GUERREIRO, M., CATALÃO, J., TABORDA, R., FREITAS, M. C., ANDRADE, C., MELO, R., FORTUNATO, A. e FREIRE, P. (2012). Detecção Remota e Cartografia do Intertidal. O contributo do Projeto MorFeed. Actas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Ed. Instituto Hidrográfico, Lisboa. 341 - 344 pp.

PAIS, J. (2004) The Neogene of the Lower Tagus Basin (Portugal). *Revista Española de Paleontología*, **19 (2)**: 229 - 242 pp.

PAIS, J., CUNHA, P., PEREIRA, D., LEGOINHA, P., DIAS, R., MOURA, D., BRUM DA SILVEIRA, A., KULLBERG, J. e GONZÁLEZ DELGADO, J. A. (2012). The Paleogene and Neogene of Western Iberia (Portugal). A Cenozoic record in the European Atlantic domain. *Springer Briefs in Earth Sciences*. 1st edition. 2012, VI, 156 pp.

PAIS, J., MONIZ, C., CABRAL, J., CARDOSO, J. L., LEGOINHA, P., MACHADO, S., MORAIS, M. A., LOURENÇO, C., RIBEIRO, M. L., HENRIQUES, P. e FALÉ, P. (2006). Notícia Explicativa da Folha 34-D Lisboa. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação. Departamento de Geologia. 53 pp.

PETI3+ (2014). Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas. Horizonte 2014-2020. Governo de Portugal. Ministério da Economia. Lisboa. 121 pp.

PNUD (1980). Étude des eaux souterraines de la péninsule de Setúbal (système aquifère Mio-Pliocène du Tejo et du Sado). Rapport final sur les résultats du project, conclusions et recommandations. Programme des Nations Unies pour le Developpement, Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, Lisboa.

PRANDLE, D. (1981) - Salinity intrusion in Estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, **11**: 1311 - 1324 pp.

QUENTAL, P. (2011). Modelos Geológicos Estocásticos 3D e Interface para Modelos de Simulação de Fluxo. Aplicação à Área Subjacente da Antiga Fábrica da SPEL. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica (Georrecursos). Departamento das Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Almada. 73 pp.

RIBEIRO, A., ANTUNES, M. T., FERREIRA, M. P., ROCHA, R. B., SOARES, A. F., ZBYSZEWSKI, G., ALMEIDA, F. M., CARVALHO, D. e MONTEIRO, J. H. (1979). Introduction à la Géologie Générale du Portugal. Serviços Geológicos de Portugal. Serviços de Portugal. Lisboa. 114 pp.

- RIGHETTI, C., GIGLIUTO, A., CHINI, A. e ROSSETTO, R. (2009). Saltwater intrusion in a coastal contaminated aquifer density-dependent finite element model of flow and transport to assess remediation strategies and saltwater intrusion at a coastal gas plant site. 7 pp.
- ROZELL, D. J. (2007). Quantifying the Impact of Global Warming on Saltwater Intrusion at Shelter Island, New York Using a Groundwater Flow Model. Final Report for the Degree of Master of Science in Geosciences with concentration in Hydrogeology. Stony Brook University, New York. 61 pp.
- SIMÕES, M. (2010). Estimativa da condutividade hidráulica pela curva de distribuição granulométrica do aquífero Plio-quadernário da Bacia do Baixo Tejo, em Belverde (Portugal). *Geociências*, UNESP, São Paulo, 2010. V. 29, n. 3. 375 - 387 pp.
- SIMÕES, M. (1998). Contribuição para o Conhecimento Hidrogeológico do Cenozóico na Bacia do Baixo Tejo. Tese de Doutoramento em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia. Departamento de Ciências da Terra, Universidade NOVA de Lisboa, Monte da Caparica. 310 pp.
- SIMÕES, M., VITORINO, N. (2011). Modelos e balanços do aquífero sedimentar da Bacia do Tejo – Margem Esquerda, na Península de Setúbal. 8º Seminário sobre Águas Subterrâneas, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2011. 4 pp.
- VALE, C. e SÜNDBY, B. (1987). Suspended sediment fluctuations in the Tagus estuary on semi-diurnal and fortnightly time scales. *Estuaries Coastal and Shelf Science*, **25**: 495 - 508.
- VIEIRA, J. M. P., PINHO, J. L. S. (2010). Distribuição salina na embocadura e Estuário do Rio Lima em diferentes regimes hidrodinâmicos. *Recursos Hídricos*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, **31 (2)**: 5 - 14 pp.
- ZBYSZEWSKI, G. (1967). Contributions à l'étude du Miocène de la serra da Arrábida. *Serv. Geol. Portugal, Lisboa*, **51**: 37 – 148 pp.
- ZBYSZEWSKI, G., FERREIRA, O. V., MANUPELLA G. e ASSUNÇÃO, C. T. (1965). Carta geológica de Portugal na escala 1/50000. Notícia explicativa da folha 38-B (Setúbal). *Serv. Geol. Portugal, Lisboa*. 134 pp.

### LEGISLAÇÃO

- Lei n.º 11-A/2013 de 28 de janeiro. Diário da República n.º 19 - 1.ª série. Reorganização administrativa do território das freguesias. Assembleia da República. Lisboa.
- Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto. Diário da República n.º 176 - 1.ª série A. Ministério do Ambiente. Lisboa.
- Decreto-Lei n.º 336/98 de 3 de Novembro. Diário da República n.º 254 - 1.ª série A. Assembleia da República. Lisboa.
- Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto. Diário da República n.º 164 - 1.ª série. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa.

Portaria n.º 1450/2007 de 12 de Novembro. Diário da República n.º 217 - 1.ª série. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Lisboa.

### **CARTOGRAFIA**

CARTA NÁUTICA 26305 (INT 1877) – Porto de Lisboa (de Alcântara ao Canal do Montijo). Instituto Hidrográfico. 6ª Edição – Maio 2013.

IGE (2011). Carta Militar de Portugal Série M783 - Folha 34-2 – Lisboa. Escala de 1:50 000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.

IGE (2009). Carta Militar de Portugal Série M888 – Folha 431 – Lisboa. Escala de 1:25 000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.

IGE (2009). Carta Militar de Portugal Série M888 - Folha 442 – Barreiro. Escala de 1:25 000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.

IGE (2009). Carta Militar de Portugal Série M888- Folha 432 – Montijo. Escala de 1:25 000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.

IGE (2009). Carta Militar de Portugal Série M888- Folha 443 – Moita. Escala de 1:25 000. Instituto Geográfico do Exército. Lisboa.

LNEG (2005). Carta Geológica de Portugal - Folha 34 - D (Lisboa). Escala de 1:50 000. Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Unidade de Geologia, Hidrogeologia e Geologia Costeira. Lisboa.

### **REFERÊNCIAS ELETRÓNICAS**

WIKIPÉDIA (2016). <https://pt.wikipedia.org/wiki/Barreiro>

LNEG (2016). <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html>

APA (2016). <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=x77>

SNIRH (2016). <http://snirh.pt/>

## **ANEXO I**

### **PONTOS DE ÁGUAS RECOLHIDOS PARA O ESTUDO**

## ANEXO 1

| Identificação |      |         |       | Localização |        |                  | Características |           |          | Tipo                    |
|---------------|------|---------|-------|-------------|--------|------------------|-----------------|-----------|----------|-------------------------|
| ID            | Ref. | Fonte   | Carta | M           | P      | Local/Entidade   | Ano             | Prof. (m) | Cota (m) |                         |
| F75           | AC6  | LNEG    | 442   | 118200      | 188400 | CUF              | 1974            | 297       | 8,5      | Sondagem hidrogeológica |
| F52           | AC4  | LNEG    | 442   | 118542      | 188750 | CUF              | 1971            | 303       | 6,2      | Sondagem hidrogeológica |
| F88           | AC8  | LNEG    | 442   | 118567      | 189605 | CUF              | 1980            | 290       | 3,8      | Sondagem hidrogeológica |
| F86           | AC7  | LNEG    | 442   | 119070      | 189150 | CUF              | 1979            | 602       | 3,7      | Sondagem hidrogeológica |
| F27           | AC1  | LNEG    | 442   | 118783      | 189256 | CUF              | 1970            | 220       | 3,3      | Sondagem hidrogeológica |
| F69           | AC5  | LNEG    | 442   | 119300      | 189300 | CUF              | 1972            | 290       | 3,9      | Sondagem hidrogeológica |
| F97           | AC9  | LNEG    | 442   | 119174      | 189806 | CUF              | 1981            | 291,5     | 3,5      | Sondagem hidrogeológica |
| F44           | AC2  | LNEG    | 442   | 119800      | 189960 | CPE              | 1975            | 268       | 4,3      | Sondagem hidrogeológica |
| F59           | TD7  | LNEG    | 443   | 120045      | 189755 | UFA              | 1981            | 312       | 4,2      | Sondagem hidrogeológica |
| F38           | AC2S | LNEG    | 443   | 120150      | 189960 | Quimigal         | 1978            | 110       | 9,1      | Sondagem hidrogeológica |
| F36           | AC2  | LNEG    | 432   | 120088      | 190157 | Fisipe           | 1976            | 270       | 3,6      | Sondagem hidrogeológica |
| F35           | AC1  | LNEG    | 432   | 120290      | 190544 | Fisipe           | 1976            | 270       | 3,4      | Sondagem hidrogeológica |
| F53           | AC3S | LNEG    | 432   | 120440      | 190020 | Quimigal         | 1978            | 110       | 6,5      | Sondagem hidrogeológica |
| F12           | AC1  | LNEG    | 443   | 120450      | 189970 | UFA              | 1962            | 231       | 5,8      | Sondagem hidrogeológica |
| F62           | TD5  | LNEG    | 432   | 120534      | 190276 | UFA              | 1980            | 302       | 2,7      | Sondagem hidrogeológica |
| F49           | TD4  | LNEG    | 443   | 120507      | 189692 | UFA              | 1981            | 320       | 3,4      | Sondagem hidrogeológica |
| F15           | AC1  | LNEG    | 443   | 120160      | 188000 | Barreiro         | 1972            | 269       | 20,3     | Sondagem hidrogeológica |
| F16           | AC2  | LNEG    | 443   | 120160      | 187770 | Barreiro         | 1972            | 280       | 21,2     | Sondagem hidrogeológica |
| F100          | PS1  | LNEG    | 442   | 119700      | 187720 | Barreiro         |                 | 317       | 34,8     | Sondagem hidrogeológica |
| F23           | AC1  | LNEG    | 443   | 120970      | 187280 | Alhos Vedros     | 1978            | 286       | 11,8     | Sondagem hidrogeológica |
| F76           | PS1  | LNEG    | 443   | 121700      | 187600 | Vale da Amoreira | 1984            | 306       | 2,3      | Sondagem hidrogeológica |
| F21           | JK2  | LNEG    | 443   | 120770      | 187670 | Bxa da Banheira  | 1973            | 100       | 17,0     | Sondagem hidrogeológica |
| F50           | JK4  | LNEG    | 443   | 120250      | 185860 | Qta da Lomba     | 1981            | 270       | 27,0     | Sondagem hidrogeológica |
| F39           | SR1  | LNEG    | 443   | 120030      | 185780 | Santo André      | 1967            | 161       | 14,6     | Sondagem hidrogeológica |
| F95           | FR1  | LNEG    | 442   | 120000      | 184200 | Palhais          | 1978            | 160       | 12,1     | Sondagem hidrogeológica |
| F51           | TD1  | LNEG    | 443   | 120080      | 183350 | VI do Zebro      | 1982            | 305       | 2,8      | Sondagem hidrogeológica |
| F26           | F1   | LNEG    | 443   | 121920      | 184600 | St. A. Charneca  | 1978            | 106       | 48,5     | Sondagem hidrogeológica |
| F25           | F1   | LNEG    | 443   | 123100      | 185870 | St. A. Charneca  | 1980            | 60        | 22,0     | Sondagem hidrogeológica |
| F37           | F1   | LNEG    | 443   | 123620      | 184170 | Fonte do Feto    | 1981            | 100       | 45,8     | Sondagem hidrogeológica |
| F47           | P1   | LNEG    | 443   | 123820      | 184100 | Fonte do Feto    | 1981            | 150       | 39,0     | Sondagem hidrogeológica |
| F89           | TD1  | LNEG    | 442   | 114340      | 187450 | Base Naval       | 1981            | 262       | 1,0      | Sondagem hidrogeológica |
| F38           | AC1  | LNEG    | 442   | 117300      | 186480 | Canifa           |                 | 188       | 0,1      | Sondagem hidrogeológica |
| F25           | ACP1 | LNEG    | 442   | 117280      | 185020 | Siderugia        | 1961            | 220       | 9,5      | Sondagem hidrogeológica |
| F107          | SR2  | LNEG    | 442   | 117470      | 185010 | Siderugia        |                 | 260       | 8,0      | Sondagem hidrogeológica |
| F26           | ACP2 | LNEG    | 442   | 117730      | 185090 | Siderugia        | 1961            | 210       | 7,9      | Sondagem hidrogeológica |
| F108          | PS-2 | LNEG    | 442   | 118030      | 184160 | Siderugia        |                 | 270       | 9,0      | Sondagem hidrogeológica |
| F98           | ACP6 | LNEG    | 442   | 118440      | 184300 | Siderugia        | 1981            | 265       | 3,9      | Sondagem hidrogeológica |
| F02           | TD1  | LNEG    | 443   | 120454      | 189476 | UFA              | 1960            | 230       | 4,5      | Furo de captação        |
| F03           | TD2  | LNEG    | 443   | 120170      | 189770 | UFA              | 1960            | 220       | 8,7      | Furo de captação        |
| F04           | TD3  | LNEG    | 443   | 120160      | 189476 | UFA              | 1960            |           | 10,5     | Furo de captação        |
| F06           | TD1  | LNEG    | 443   | 121652      | 187490 | Alhos Vedros     | 1957            | 231       | 3,8      | Furo de captação        |
| F07           | JK1  | LNEG    | 443   | 121763      | 187648 | Alhos Vedros     | 1957            | 69        | 1,9      | Furo de captação        |
| F10           | AC1  | LNEG    | 443   | 119900      | 190250 | UFA              | 1975            | 265       | 3,6      | Furo de captação        |
| F17           | TD1  | LNEG    | 443   | 119000      | 187000 | Qta da Lomba     | 1955            | 194,5     | 17,8     | Furo de captação        |
| F73           | TD6  | LNEG    | 443   | 120050      | 190030 | UFA              | 1981            | 604       | 7,4      | Furo de captação        |
| F87           | AC01 | LNEG    | 442   | 119030      | 189170 | CUF              | 1979            | 282       | 3,9      | Furo de captação        |
| F10           | AC1  | ENGIDRO | 431   | 119900      | 190250 | CPE              | 1975            |           | 3,6      | Furo de captação        |
| F91           | AC1  | ENGIDRO | 431   | 119818      | 190330 | EDP              | 1978            |           | 3,5      | Furo de captação        |
| F93           | AC3  | ENGIDRO | 431   | 119633      | 190243 | EDP              | 1978            |           | 3,3      | Furo de captação        |
| F32           | AC2  | ENGIDRO | 442   | 118605      | 189037 | CUF              | 1970            |           | 8,7      | Furo de captação        |
| F43           | AC3  | ENGIDRO | 442   | 119037      | 189525 | CUF              | 1970            |           | 3,6      | Furo de captação        |
|               | AC3  | CMB     | 442   | 119755      | 186174 | Sete Portais     | 1987            | 320       | 38,8     | Furo de captação        |
|               | AC5  | CMB     | 442   | 119890      | 185808 | Vale Romão       | 1992            | 295       | 9,0      | Furo de captação        |
|               | AC6  | CMB     | 442   | 119756      | 187763 | Alto do Paiva    | 1992            | 307       | 33,6     | Furo de captação        |
|               | FR1  | CMB     | 443   | 120201      | 185877 | Vale Romão       | 1997            | 296       | 28,5     | Furo de captação        |
|               | RA1  | CMB     | 442   | 119346      | 187461 | Pq da Cidade     | 2012            | 300       | 31,1     | Furo de captação        |
|               | FR3  | CMB     | 443   | 120071      | 185742 | Mercado          | 1998            | 298       | 15,6     | Furo de captação        |
|               | FR4  | CMB     | 443   | 120139      | 187836 | Loios            | 2001            | 300       | 20,4     | Furo de captação        |
|               | FR5  | CMB     | 443   | 122515      | 180698 | Penalva          | 2003            | 290       | 3,5      | Furo de captação        |
|               | FR6  | CMB     | 442   | 119640      | 187265 | Pq da Cidade     | 2003            | 266       | 34,2     | Furo de captação        |
|               | FR7  | CMB     | 443   | 120501      | 180733 | Coina            | 2004            | 300       | 73,8     | Furo de captação        |
|               | FR8  | CMB     | 443   | 120176      | 187658 | Loios            | 2009            | 300       | 28,4     | Furo de captação        |
| F241          | SR3  | SNIRH   | 442   | 119190      | 186030 | Santo André      |                 | 14,3      | 9,9      | Rede de Quantidade      |
| F412          | AC5  | SNIRH   | 442   | 119880      | 185800 | Vale Romão       |                 | 295       | 9,0      | Rede de Qualidade       |
| F536          | AC6  | SNIRH   | 442   | 119820      | 188060 | Lavrado          |                 | 307       | 25,8     | Rede de Qualidade       |
| F38           | AC2  | SNIRH   | 443   | 120160      | 187700 | Loios            |                 | 280       | 27,1     | Rede de Qualidade       |
| F48           | JK2  | SNIRH   | 443   | 121600      | 187300 | VI. da Amoreira  |                 | 100       | 6,2      | Rede de Qualidade       |