

# HIDROGEOLOGIA LOCAL E MODELO DE ESCOAMENTOS SUBTERRÂNEOS SIMULADO DA ÁREA DE EXPLORAÇÃO DE CAULINOS DE CASTELO VENTOSO (ALCÁCER DO SAL)

Relatório 1 - Pontos 1, 2, 3, 4, 5, 7 e parte de 8

Enquadramento hidrogeológico regional, Geologia e unidades hidrogeológicas locais  
Modelos de escoamento subterrâneo para a situação atual e cenários de exploração futuros

# Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

1	Âmbito e objetivos do estudo.....	4
1.1	Intervenientes.....	4
1.2	Informação considerada .....	4
2	Enquadramento hidrogeológico regional e local.....	5
3	Geologia local e unidades hidrogeológicas.....	8
4	Modelos de escoamentos subterrâneos desenvolvidos.....	11
4.1	Enquadramento e pressupostos teóricos .....	11
4.2	Etapas da modelação hidrogeológica .....	12
4.3	Considerações e pressupostos dos modelos desenvolvidos .....	14
4.4	Parâmetros de entrada dos modelos.....	15
4.5	Análise de sensibilidade do modelo e calibração .....	21
4.6	Resultados de simulação do modelo de escoamentos – Situação Atual.....	23
4.7	Resultados de simulação do modelo de escoamentos – Possíveis Cenários futuros.....	26
5	Conclusões .....	29
6	Referências bibliográficas .....	30

## Índice de Figuras

Figura 2-1 Concessão Mineira de Castelo Ventoso: enquadramento hidrogeológico regional e sistema aquífero (fonte da informação: Geoportal, LNEG, <a href="https://geoportal.lneg.pt/">https://geoportal.lneg.pt/</a> ) .....	7
Figura 3-1 Localização dos dispositivos de monitorização existentes na área da concessão mineira e dos furos da rede SNHIR com informação geológica e piezométrica usados como referência nas interpretações (fontes da informação: Geoportal, LNEG, <a href="https://geoportal.lneg.pt/">https://geoportal.lneg.pt/</a> e SNHIR <a href="https://snirh.apambiente.pt/">https://snirh.apambiente.pt/</a> ) .....	9
Figura 3-2 Correlação entre as litologias e estratigrafias dos dispositivos de monitorização existentes na área da concessão mineira e dos furos da rede SNHIR com informação geológica e piezométrica usados como referência nas interpretações (fonte da informação: SNHIR <a href="https://snirh.apambiente.pt/">https://snirh.apambiente.pt/</a> ). .....	10
Figura 3-3 Unidades litoestratigráficas e hidrogeológicas locais .....	10
Figura 4-1 Malha, células, furos de observação hipotéticos e reais dos modelos .....	16
Figura 4-2. Cotas do horizonte de base da Unidade Hidrogeológica 1. ....	18
Figura 4-3 Condições fronteira e simulação dos efeitos de bombagem na lagoa .....	19
Figura 4-4. Cotas piezométricas estimadas na Unidade Hidrogeológica 1. ....	20
Figura 4-5 Geometria das lagoas/ cortas de exploração para a Situação Atual e os Cenários Intermédio e Futuro .....	21
Figura 4-6. Comparação entre os valores de piezometria medidos e estimados para a situação de partida do modelo. ....	22
Figura 4-7 Situação Atual (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 1. ....	24
Figura 4-8 Situação Atual (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 3. ....	24
Figura 4-9 Situação Atual (mês 1, maio): fluxos de escoamento subterrâneos simulados a montante e jusante da área da lagoa. ....	25
Figura 4-10. Evolução temporal dos níveis piezométricos nos furos de monitorização da rede SNHIR 484/8, 458/28, 476/20 e 472/21 (informação disponível no site do SNHIR <a href="https://snirh.apambiente.pt/">https://snirh.apambiente.pt/</a> e conforme localização indicada na Figura 3-2) .....	25
Figura 4-11. Possível Cenário Intermédio (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 1. ....	26
Figura 4-12. Possível Cenário Intermédio (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 3. ....	27
Figura 4-13. Possível Cenário Intermédio (mês 1, maio): fluxos de escoamento subterrâneos simulados a jusante da área da lagoa(esquerda) e a montante das áreas da lagoa e da escavação (direita). ....	27
Figura 4-14. Possível Cenário Final (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 1. ....	28
Figura 4-15. Possível Cenário Final (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 3. ....	28
Figura 4-16. Possível Cenário Final (mês 1, maio): fluxos de escoamento subterrâneos simulados a montante (esquerda) e a jusante (direita) das áreas da lagoa e da escavação. ....	29

## Índice de Tabelas

Tabela 2-1 Formações aquíferas da Herdade da Comporta (fontes: [4] e [5]) .....	6
Tabela 3-1 Dispositivos de monitorização existentes no local da exploração.....	8
Tabela 4-1 Síntese da informação recolhida e considerada para a construção dos modelos.....	17
Tabela 4-2 Tipos de fronteiras dos modelos. ....	18
Tabela 4-3 Níveis piezométricos medidos e arbitrados para reconstituição da superfície piezométrica do modelo .....	19
Tabela 4-4 Tabela de Síntese dos parâmetros do modelo após as análises de sensibilidade e calibração .....	22

# 1 Âmbito e objetivos do estudo

## 1.1 Intervenientes

O presente Relatório foi desenvolvido no âmbito da Prestação de Serviços “**Estabelecimento do Plano de Monitorização Hidrogeológica da área de exploração de Caulinos de Castelo Ventoso (Alcácer do Sal)**”. No desenvolvimento deste relatório participaram e deram contributos os seguintes intervenientes:

- Professora Dr.<sup>a</sup> Eng.<sup>a</sup> Sofia Barbosa (FCT-NOVA);
- Mariana Pinto, licenciada em Eng.<sup>a</sup> Geológica (FCT-NOVA) e aluna do Mestrado em Eng.<sup>a</sup> Geológica (FCT-NOVA) que contribuiu com a pesquisa bibliográfica, e em parte, com o Enquadramento Hidrogeológico e Geológico Regional apresentado;
- Dr. Eng.<sup>o</sup> Gilberto Charifo (GoldFluvium) que em muito apoiou o presente estudo prestando conhecimentos históricos de detalhe do local, disponibilizando informações e relatórios de trabalho e acompanhando no local o desenvolvimento de trabalhos de campo, todos essenciais e necessários para o correto desenvolvimento deste estudo.

## 1.2 Informação considerada

De entre a diversa informação consultada que pode ser verificada nas referências bibliográficas, destacam-se aqui pela sua relevância e contributos os seguintes trabalhos e relatórios:

- Antunes, M. T. (1983) - Notícia Explicativa da Carta Geológica da folha 39-C (Alcácer do Sal), Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa;
- IGM (2003) - Sondagens em Castelo Ventoso. Relatório de trabalho para Sifucel;
- IGM (2003) - Interpretação dos resultados das sondagens do areeiro da Sifucel - Alcácer do Sal (Casal Ventoso);
- GoldFluvium (2013) - Relatório Final das Sondagens. Mina de Casal Ventoso – Alcácer do Sal;
- CVRM (2003) - Relatório Síntese do Estudo de Impacte Ambiental do Projeto da Pedreira de Areia de Casal Ventoso;
- ARROW4D (2021) - Relatório Técnico da Prestação de serviço “Prospecção geofísica com ERT no Castelo Ventoso (Alcácer do Sal)”;
- Renato Azenha (2021) - Relatório final dos trabalhos de aferição de níveis e ensaio de caudal em 4 piezómetros e furo existente na mina de Castelo Ventoso (Alcácer do Sal).

## 2 Enquadramento hidrogeológico regional e local

A área de estudo encontra-se na unidade hidrogeológica da Bacia do Tejo-Sado, da Margem Esquerda, na qual a Bacia do Sado se insere (**Figura 2-1**). Esta unidade é formada, essencialmente, por um sistema aquífero multicamada [1]. Segundo os autores de [2] este sistema aquífero é caracterizado por alternância de sequências sedimentares com comportamento hidrogeológico diferente e com variabilidade espacial de fácies continentais e marinhas, permitindo assim a criação de sistemas aquíferos livres, semi-cativos e confinados, resultantes da existência de aquíclodos e aquítardos. Estas estruturas desempenham um papel fundamental, respetivamente, na limitação geométrica das unidades aquíferas e na drenagem dos canais que constituem os aquíferos [1].

No concelho de Alcácer do Sal, a produtividade média é da ordem dos 15 l/s, proveniente das características do aquífero anteriormente mencionadas.

Com base na informação presente na Notícia Explicativa da Folha 39-C [3], a Bacia do Sado é formada por 3 unidades com potencial hidrogeológico que são os depósitos dunares, a Formação da Marateca e a Formação de Alcácer do Sal.

- **Depósitos moderno (dunas)** – conferem uma boa permeabilidade e bom caudal em toda a sua extensão, sendo esta maior entre contactos com níveis de diferente permeabilidade, como se verifica nos contactos com a Formação de Marateca. Esta apresenta, muitas vezes, camada arenosa de alteração com boa permeabilidade, pelo que a maior parte do escoamento processa-se subterraneamente;
- **Formação de Marateca** - tem condições hidrológicas favoráveis, embora variem com a litologia e a espessura. Trata-se de um sistema composto semi-confinado que apresenta, em certas zonas, superfícies piezométricas acima do solo, justificando o artesianismo repuxante observado em alguns furos de captação (por exemplo, próximo de Alcácer do Sal, em Telhada e em Borbulegão);
- **Formação de Alcácer do Sal** - apresenta condições favoráveis à obtenção de bons caudais, embora, às vezes, as condições hidrológicas sejam menos favoráveis.

Da pouca informação de detalhe disponível sobre a região, relevam-se os dados encontrados sobre a Auditoria realizada em 2008 pela TARH [4], relativamente a trabalhos de captação de água na Herdade da Comporta [5], que se localiza a NW da área de estudo e a informação presente na Notícia Explicativa da Folha 39-C. Por este motivo, e apesar de ser possível realizar algumas extrapolações, a informação agora apresentada deve ser considerada de modo conservativo. Assim, e como consta nos relatórios [4] e [5], localmente as 3 unidades hidrogeológicas referenciadas no enquadramento hidrogeológico regional contribuem para a existência de dois subsistemas aquíferos, separados por um aquítardo mal definido no espaço e que se passam a descrever:

- Um subsistema aquífero superficial, não-confinado, com espessura de 50 metros e espessura saturada da ordem de 20 metros, captando nas dunas do Holocénico e em alguns locais a parte superior Formação Miocénica da Marateca. Neste subsistema as captações podem ter, em média, um caudal de exploração de 20 l/s. As transmissividades medianas são de 377 m<sup>2</sup>/d;
- Um subsistema semi-confinado com espessuras de 150 metros nas formações miocénicas da Formação de Alcácer do Sal. As captações têm um caudal de exploração médio de cerca 50 l/s e transmissividades medianas de 267 m<sup>2</sup>/d.

É usual o aquífero profundo alimentar o aquífero superficial sendo o nível piezométrico do subsistema profundo ligeiramente superior ao superficial. É igualmente de referir que alguns sectores apresentam artesianismo positivo em épocas de águas altas.

A **Tabela 2-1** sintetiza as características das formações aquíferas da Herdade da Comporta e as suas características de vulnerabilidade [4].

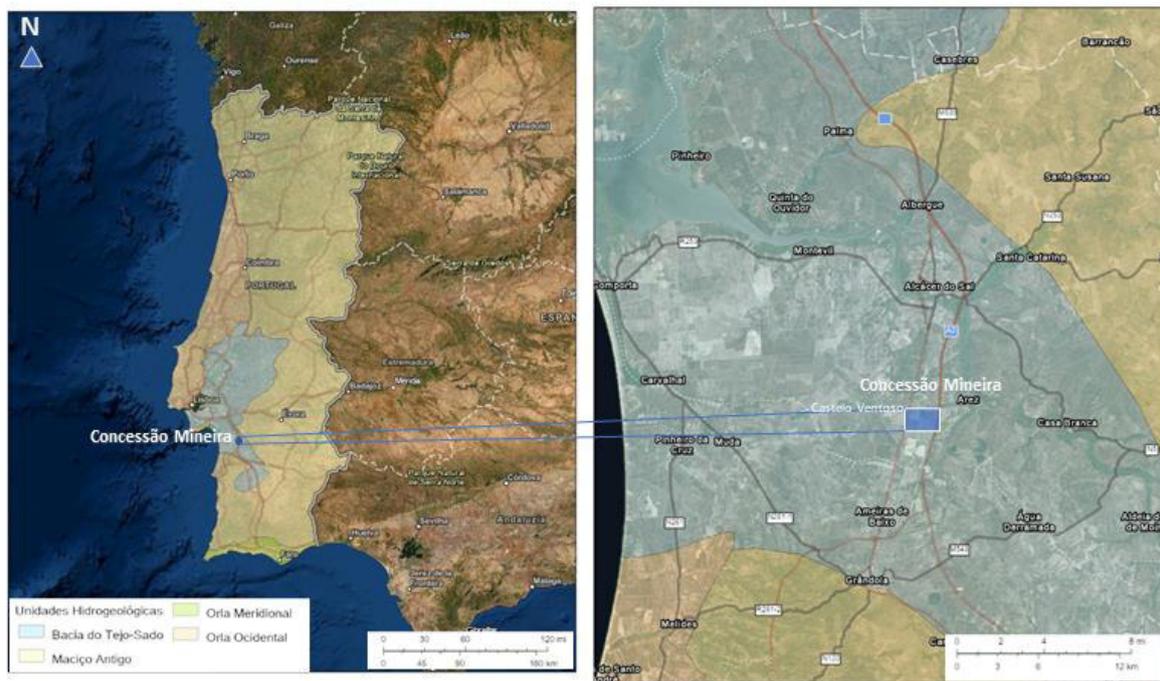
**Tabela 2-1** Formações aquíferas da Herdade da Comporta (fontes: [4] e [5])

Tipologia dos Aquíferos	Espessura (m)	Grau de Confinamento	Tipo de Porosidade	Transmissividade (m <sup>2</sup> /dia)	Mineralização Total (mg/l)	Vulnerabilidade	Prior. das Captações (m)	Captações (l/s)
Holocénico	Até 50	Não confinado	Intergranular não consolidado	370	100	média elevada	50	20
Plio-Plistocénico								
Miocénico	150 a 200	Semi confinado	Intergranular predominante	270	200	média baixa	80	50
Formação da Marateca							180	
Miocénico <sup>1</sup> Formação de Alcácer do Sal								
Oligocénico Formação do Vale do Guiso	>180	Confinado (localmente é aquífero)	Intergranular predominante	Muito baixa	>6000	baixa	350	2

Da informação disponível na Notícia Explicativa da Folha 39-C, a Formação de Marateca apresenta caudais que variam entre 7,5 e 10 l/s, com nível estático de 20 a 23 m de profundidade e rebaixamentos de 10 a 15 m. A Formação de Alcácer do Sal apresenta caudais que variam de 5 a 15 l/s, com nível estático entre 16 e 27m e rebaixamentos importantes (20 a 30m).

Localmente, e a partir da observação de taludes de escavação das zonas em exploração, da consulta dos registos de piezómetros de monitorização do SNHIR, da análise das informações sobre sondagens de prospeção e para a construção de piezómetros ([6], [7] e [8].) e considerando, ainda, a informação disponibilizada sobre um novo piezómetro de monitorização entretanto construído em 2021 (SD4) por método de furação destrutiva, contacta-se que a área da concessão atual e futura terá **incidência direta nos depósitos de areias eólicas e dunares do Holocénico. Subjacentemente ocorrem as unidades detríticas da Formação da Marateca, datadas do Miocénico Superior.** A espessura destas formações é variável bem como as suas variações locais de granulometria, grau de alteração e cor. Na extremidade nordeste, ao longo do vale da Ribeira de Albergaria, afloram ainda unidades aluvionares, igualmente datadas do Holocénico e que corresponderão a uma unidade mais recente.

## Enquadramento Regional: Unidades Hidrogeológicas



## Recursos Hídricos: Sistemas Aquíferos



Figura 2-1 Concessão Mineira de Castelo Ventoso: enquadramento hidrogeológico regional e sistema aquífero (fonte da informação: Geoportal, LNEG, <https://geoportal.lneg.pt/>)

### 3 Geologia local e unidades hidrogeológicas

De acordo com os trabalhos de sondagem realizados, os depósitos de areias eólicas e dunares são demarcados pela existência na sua parte mais superior por areias quartzosas soltas, finas a médias, puras a muito puras que transitam em profundidade para fácies granulometricamente mais heterogêneas, em que ocorrem níveis mais grosseiros, por vezes de natureza conglomerática, muitas vezes intercalados por níveis mais finos de natureza siltosa. De um modo geral, observa-se na base destes depósitos, a existência de um nível relativamente fino, de natureza argilosa mais pronunciada, que é considerado como referência para o avanço em profundidade das escavações da exploração. Este nível poderá ocorrer em profundidades que variam localmente entre os 9 e os 15 metros de modo aparentemente concordante com a profundidade dos depósitos dunares.

Estes depósitos apresentam boa capacidade transmissiva podendo apresentar escoamentos bastante rápidos quando a capacidade de carga dos terrenos e o seu grau de saturação estão próximo dos máximos sendo de referir, neste contexto, que a área de intervenção é considerada como sendo zona de máxima infiltração. Localmente estes depósitos alimentam um sistema subjacente, semi-confinado a confinado que aparentemente, e pelo menos na sua parte mais superficial, apresenta uma natureza mais argilosa.

Os modelos de escoamentos subterrâneos desenvolvidos e apresentados no âmbito do presente estudo incidem sobre o comportamento em termos dos escoamentos destes depósitos de areias eólicas e dunares relativamente à situação atual em termos de exploração e prováveis evoluções futuras em resultado da futura ampliação da concessão mineira. De referir que na área se encontram disponíveis 4 piezómetros superficiais (S1, S2, S3 e SD4) e um furo profundo (FH) que podem ser usados para efeitos de monitorização (**Tabela 3-1**). Na **Figura 3-1** apresenta-se a localização destes dispositivos relativamente aos sistemas hidrogeológicos que são conhecidos e monitorizados na região. Para este efeito, foram considerados como referência os furos com informação hidrogeológica disponível no site do SNHIR e que se apresentam mais próximo da área da concessão (furos com referências 476/20, 476/21 e 458/28). Considerando-se esta informação e a relativa aos dispositivos de monitorização do local (**Figura 3-2**) estabeleceram-se as unidades locais do modelo (**Figura 3-3**), tendo-se por base as unidades litoestratigráficas estabelecidas e conhecidas à escala 1:50 000 [3] e referenciadas em furos conhecidos (**Figura 3-2**).

**Tabela 3-1 Dispositivos de monitorização existentes no local da exploração.**

Referência	Coordenadas EPSG 3763 X (m)	Coordenadas EPSG 3763 Y (m)	Ano de construção	Profundidade de construção (m)	Espessura dos depósitos de areias eólicas e dunares (m)
S1	-33454,502	-154167,730	2002	25	17,6
S2	-33015,873	-153111,029	2002	25	19,5
S3	-33101,312	-152555,858	2002	15	12,5
SD4 (SPD)	-33611,683	-152921,252	2021	30	12,0
Furo FH	-33715,456	-153147,851	2002	130	8,0

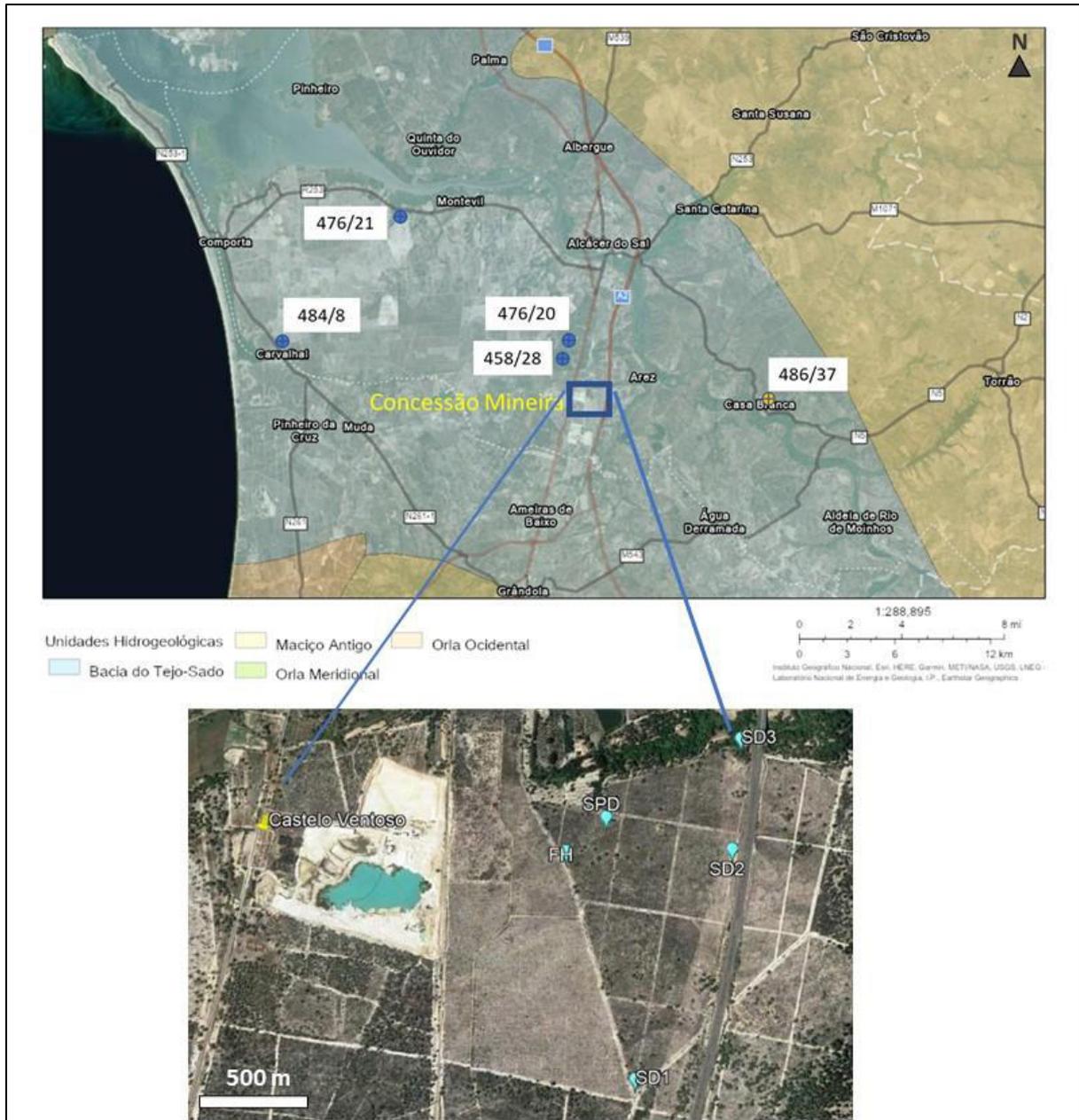


Figura 3-1 Localização dos dispositivos de monitorização existentes na área da concessão mineira e dos furos da rede SNHIR com informação geológica e piezométrica usados como referência nas interpretações (fontes da informação: Geoportal, LNEG, <https://geoportal.lneg.pt/> e SNHIR <https://snirh.apambiente.pt/>).

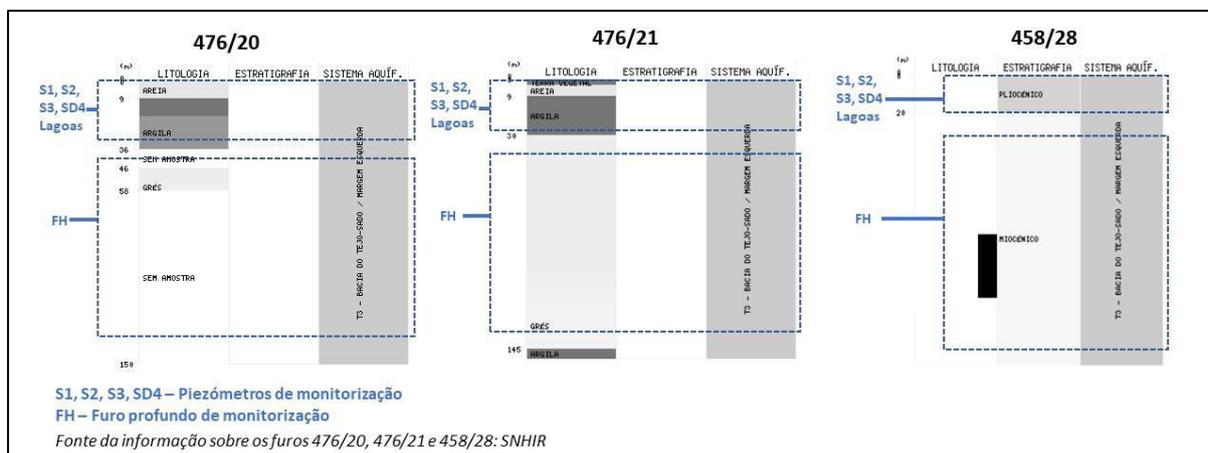


Figura 3-2 Correlação entre as litologias e estratigrafias dos dispositivos de monitorização existentes na área da concessão mineira e dos furos da rede SNHIR com informação geológica e piezométrica usados como referência nas interpretações (fonte da informação: SNHIR <https://snirh.apambiente.pt/>).

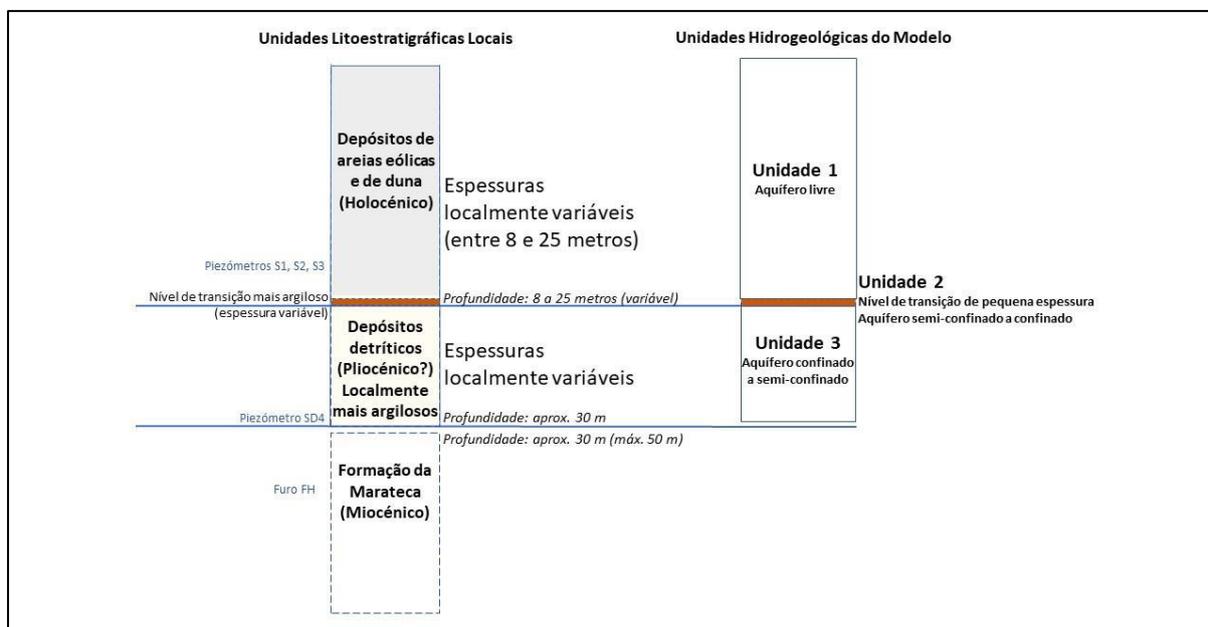


Figura 3-3 Unidades litoestratigráficas e hidrogeológicas locais

## 4 Modelos de escoamentos subterrâneos desenvolvidos

### 4.1 Enquadramento e pressupostos teóricos

Os modelos são ferramentas que correspondem a representações simplificadas de uma situação real, baseando-se em observações, medidas *in situ* e em interpretações profissionais dos locais em estudo. A aplicação de um modelo permite, neste sentido, sistematizar informações, funcionando como um instrumento de planeamento e previsão de situações reais. Um modelo hidrogeológico é, por sua vez, uma representação de um sistema hidrogeológico subterrâneo natural, podendo incluir a natureza geoquímica da área em estudo ([10], [11]).

O desenvolvimento de modelos de águas subterrâneas pode ter três objetivos: (a) Previsão, o que corresponde a um quadro de previsão das condições futuras, de acordo com determinadas ações; (b) Interpretação, utilizada para o estudo da dinâmica do sistema e para a sistematização de informação; (c) Generalização, cuja finalidade é a análise de sistemas hidrogeológicos hipotéticos.

Os modelos de águas subterrâneas podem ser demarcados em modelos de fluxo e em modelos de transporte de massa. Os modelos de fluxo constituem uma representação física ou numérica que executa simulações por meio de equações do escoamento da água com base em registos ou informações dos fluxos naturais dos aquíferos, recargas e extrações ocorridas no aquífero. Os modelos de transporte de massa analisam o transporte e dispersão de uma substância poluente que atingiu um aquífero.

Relativamente aos tipos de modelo existentes, estes podem ser classificados como físicos ou matemáticos. Os modelos físicos simulam o fluxo de água subterrânea indiretamente, com base em leis, para representar processos físicos que ocorrem no sistema. Os modelos matemáticos podem ser classificados como analíticos ou numéricos. Os analíticos utilizam soluções matemáticas deduzidas para situações simplificadas e os numéricos dão uso a equações diferenciais do fluxo subterrâneo resolvido, utilizando para tal efeito técnicas de aproximação numérica, obtidas através da discretização do aquífero e da solução de um sistema de equações com as incógnitas obtidas desse processo [10].

Atualmente os modelos hidrogeológicos mostram enormes potencialidades, por se apresentarem como ferramentas essenciais na avaliação do comportamento de um aquífero, de forma a exponenciar o conhecimento hidrogeológico. A sua grande importância reside na fomentação do planeamento e da gestão dos recursos hídricos (através da avaliação de políticas alternativas) e na sua capacidade de previsão de impactos no meio hídrico ou desenvolvimento de cenários.

Do ponto de vista ambiental, são fundamentais no apoio à resolução de questões de remediação ou recuperação ambiental, aliando-se a projetos e à otimização de soluções de eficiência económica de sistemas de remediação ambiental. Neste contexto, permitem executar uma avaliação quantitativa dos recursos hídricos, ou seja, a determinação das entradas e saídas de água no sistema, caudais de bombagem e processos de armazenamento nos aquíferos.

O movimento das águas subterrâneas é regido por princípios hidráulicos estabelecidos. O fluxo através dos aquíferos, na sua maioria são meios porosos naturais, possuem energia mecânica, térmica, e diferentes formas químicas. As quantidades de energia variam espacialmente, forçando as águas subterrâneas a movimentarem-se de um ponto para outro na tentativa da natureza eliminar essas diferenças de energia. O fluxo de águas subterrâneas é, portanto, regido pelas leis da física e da termodinâmica. As equações matemáticas que descrevem o fluxo de águas subterrâneas, através de um meio poroso, são baseadas principalmente pela **lei de Darcy**. Esta lei, conforme desenvolvida inicialmente, aplicava-se a escoamentos unidimensionais. No entanto pode ser generalizada para

escoamentos multidimensionais, tal como se pode exemplificar através da prática com o fluxo de águas subterrâneas em duas ou três direções nos aquíferos.

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \text{grad}h \quad [\text{Equação 4-1}]$$

Representa-se, aqui,  $q$  como o vetor velocidade aparente, formado por componentes nas três direções principais de anisotropia ( $X, Y, Z$ ),  $K$  o tensor de condutividade hidráulica e  $\text{grad}h$  o gradiente de carga hidráulica, que indica como varia a carga hidráulica ao longo de cada uma das direções. O sinal negativo indica que o fluxo da água ocorre no sentido dos potenciais decrescentes, ou seja, no sentido contrário ao gradiente de  $h$ .

A modelação de escoamentos e fluxos de águas subterrâneas integra também a **Equação da continuidade (Conservação da Massa de água)**. Segundo esta lei, a quantidade de água que entra e sai de um bloco unitário de solo é contante, não existindo perdas de fluxos nos elementos unitários (células). Esta equação é indicativa de que a água pode apenas ser transportada de um ponto para o outro e armazenada em algum lugar.

$$\frac{\partial \eta \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \eta \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta \rho V_z}{\partial z} = - \frac{\partial \eta \rho}{\partial t} \quad [\text{Equação 4-2}]$$

Representa-se, aqui,  $\eta$  como o coeficiente de viscosidade do fluido,  $\rho$  massa volúmica do fluido e  $V$  componentes de velocidade em cada uma das direções ( $X, Y, Z$ ). Os três primeiros elementos da equação indicam a quantidade de água que entra no sistema em cada uma das direções dos eixos principais e o segundo membro indica a variação do armazenamento no local.

Aplicando a lei de Darcy para o caso tridimensional na equação de continuidade obtém-se a **Equação geral do fluxo subterrâneo**:

$$\text{div}(\eta \rho v) = - \frac{\partial \eta \rho}{\partial t} \quad [\text{Equação 4-3}]$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Rv = Se \frac{\partial h}{\partial t} \quad [\text{Equação 4-4}]$$

Onde,

$\eta$ : coeficiente de viscosidade do fluido

$\rho$ : massa volúmica do fluido

$K$ : condutividade hidráulica

$h$ : carga hidráulica

$Rv$ : taxa de recarga por unidade de volume

$Se$ : armazenamento específico

$Rv$  é positivo se a água entra no sistema e negativo se a água sai do sistema.

## 4.2 Etapas da modelação hidrogeológica

A **modelação hidrogeológica** envolve várias etapas desde a definição do objetivo até a apresentação de resultados finais modelados, promovendo, por norma, uma análise continua no tempo. Na elaboração de um modelo conceptual parte-se de uma idealização da realidade tendo como base pressupostos, segundo um princípio de simplicidade, retendo-se um grau de complexidade suficiente que permita a representação dos elementos físicos do sistema.

Para a elaboração de um **modelo conceptual** são necessárias informações sobre os parâmetros e variáveis da zona de estudo. A resposta do aquífero depende significativamente da variação espacial e temporal dos parâmetros do aquífero, das condições de fronteira e das tensões nesse mesmo aquífero. Nesse sentido, quanto mais precisos forem os parâmetros do aquífero, mais eficientes serão os modelos.

No contexto da modelação hidrogeológica utilizam-se os modelos matemáticos a partir de equações matemáticas, de condições iniciais e de fronteira para descrever o fenómeno físico em questão. Entre os diversos métodos numéricos desenvolvidos há dois principais na atualidade. Esta afirmação baseia-se não apenas na sua relevância, mas, sobretudo, no seu grau de utilização dentro do contexto da resolução dos problemas de fluxo. Estes são os métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos.

O **método das diferenças finitas** é o mais frequente na modelação numérica. Através deste método é possível obter soluções aproximadas da equação diferencial para uma série de localizações pontuais nas quais se discretiza um certo volume em estudo. A descrição do sistema é feita através de células, blocos ou elementos a cada um dos pontos no espaço, num sistema contínuo, representando uma porção limitada do aquífero a ser modelado. Deste modo, os parâmetros atribuídos a uma dessas porções são considerados constantes para a região que ele representa, o que significa que quanto maior o número de pontos, mais próximo da realidade estará o modelo. **Em hidrogeologia os modelos numéricos em diferenças finitas têm por objetivo o cálculo do valor da cota piezométrica em cada nó.**

A construção do modelo passa por pôr em prática os resultados da conceptualização, notabilizar os objetivos e demonstrar a complexidade do modelo. Para isso é necessário conhecer detalhadamente o contexto hidrogeológico do local em que o modelo vai ter efeito. Os dados necessários são do tipo físico e do tipo hidrogeológico.

Os **dados físicos** correspondem à geometria do aquífero incluindo a sua extensão e espessura. Os **dados hidrogeológicos** incluem informações sobre porosidade, condutividade hidráulica, cargas hidráulicas, fluxos e coeficientes de armazenamento. Para a definição da geometria o modelador poderá recorrer a perfis litológicos disponíveis, obtidos por meio de sondagens diretas, mapas e perfis geológicos, mapas de contorno estrutural, entre outros. Somente através da análise das informações obtidas por estes meios é que se pode definir a área de ocorrência e a forma do aquífero, a sua profundidade, a sua espessura, entre outras características da mesma.

Os **parâmetros hidrodinâmicos do aquífero**, transmissividade, armazenamento e condutividade hidráulica são obtidos por meios de testes ao aquífero. Os valores dos parâmetros têm que ser inseridos no modelo, sendo baseados nos dados disponíveis que provêm de trabalhos de campo e de literatura especializada.

A **calibração** de um modelo é uma etapa fundamental, mas não suficiente, para que o modelo represente previsões o mais próximo da realidade. A calibração do modelo é influenciada pela incerteza, devido à dificuldade de definir a distribuição espacial e temporal exata dos valores de parâmetros no domínio do problema. De outra forma, a calibração é vista como uma fase de ajuste das variáveis independentes (parâmetros e fluxos) do modelo para que os dados simulados convirjam com os dados reais e dessa forma possibilitem a compreensão da relação dos resultados com os parâmetros de partida. Os métodos de calibração efetuam o ajustamento dos valores desconhecidos ou com incerteza associada até que se encontre a melhor solução, ou seja, uma que corrobore com a informação conhecida. Este processo pode envolver a otimização da parametrização do modelo, das propriedades hidráulicas, das condições fronteira e a configuração de novos modelos conceptuais. A calibração induz ainda uma análise de sensibilidade das variáveis e parâmetros do modelo, que deve

ser considerada na avaliação da respetiva importância relativa. Uma análise de sensibilidade é executada em ordem do efeito de incerteza do modelo calibrado.

### 4.3 Considerações e pressupostos dos modelos desenvolvidos

O presente estudo simula condições que dizem respeito a um único momento de monitorização, realizado em maio de 2021. Tratando-se de um estudo de natureza hidrogeológica e, portanto, fortemente dependente das condições hidrológicas locais, o mesmo deverá ser considerado como factual, devendo a intenção de desenvolvimento de um modelo hidrogeológico mais aprofundado para a área ser acompanhada do futuro alargamento do período de acompanhamento e monitorização para pelo menos um ano hidrológico completo.

Os modelos numéricos foram desenvolvidos com recurso a um programa de domínio público de acesso livre e gratuito: PMWIN, *Processing Modflow* versão 5.3.3.que contém um algoritmo para resolver numericamente o modelo matemático. Este programa é baseado no código MODFLOW, desenvolvido pelo *US Geological Survey* (McDonald e Harbaugh, 1988), as equações são resolvidas pelo método de diferenças finitas.

A execução do modelo foi conseguida através da introdução de um conjunto de dados físicos e hidrogeológicos da área. Esta etapa exige sempre muito cuidado no estabelecimento dos parâmetros inseridos, uma vez que a estimativa de parâmetros é uma tarefa fulcral na qualidade da modelação. Os dados introduzidos no modelo incluem o dimensionamento da malha, a geometria do aquífero definida pela topografia, as condições limite e a seleção preliminar de valores para os parâmetros do aquífero.

Os resultados de simulação apresentados foram calibrados para a campanha de medições de níveis piezométricos realizada em maio de 2021, cujos dados foram fornecidos pela GoldFluvium. De modo integrar efeitos de bombagem e de inexistência de recarga aquífera, foi desenvolvido um modelo em regime transiente para a situação atual, respeitante a seis meses de um ano hidrológico completo (maio a outubro). Este modelo diz respeito, muito aproximadamente, ao período de deficit hídrico que se encontra referenciado para esta área (junho-outubro, conforme a referência [9]).

O processo de modelação seguiu o princípio dos “meio contínuos equivalentes”, aplicável ao tipo de formações geológicas em causa, de natureza detrítica e sedimentar. Foram introduzidos nos modelos os efeitos da bombagem do processo de lavra que presentemente se realizam na área em circuito fechado, ou seja, com descarga aproximadamente nula ocorrendo restituição para a lagoa da totalidade da água de exploração que é originalmente bombada na polpa). Propositadamente, o processo de modelação e simulação foi desenvolvido de forma conservativa, considerando-se um cenário pessimista em que foram só considerados os meses de deficit hídrico da região, com situação de partida em maio e sem recarga aquífera, e perdas totais nos caudais de água restituídos para as lagoas de 30%.

Foram igualmente simulados os possíveis efeitos nos escoamentos subterrâneos que se poderão vir a verificar para dois cenários de exploração futura possíveis: um respeitante a uma situação “Situação Intermédia” e um outro relativo a uma “Situação Final” para a fase de extensão da concessão mineira. Estes cenários e modelos simulados são indicativos uma vez a calibração teve apenas em conta uma campanha de medição de níveis, podendo os mesmos vir a ser aferidos e mais adequadamente confirmados com novas campanhas de medição de piezometrias que se venham realizar no futuro.

A modelação foi realizada dando especial enfoque ao funcionamento da camada de areias eólicas e dunares e sua interligação com as formações detríticas subjacentes da Formação da Marateca, a Ribeira de Albergaria situada a nordeste e afluyente do Rio Sado, e a lagoa presentemente existente em resultado da exploração. Os horizontes de topo e base da camada de areias eólicas e dunares considerados no modelo foram estabelecidos tendo em consideração a interpretação conjunta da topografia local, a informação sobre sondagens e furos de monitorização previamente existente (relatórios 2003 e 2013) e a resultante da execução de um novo furo de monitorização na área (SD4), assim como os resultados de perfis de geofísica de resistividades elétricas, estes últimos realizados em suporte ao presente estudo. Ainda neste contexto, foi igualmente realizado um ensaio de bombagem na área, num furo profundo existente no local (furo FH) que permitiu aferir as condições de transmissividade locais das formações detríticas subjacentes às areias eólicas e dunares.

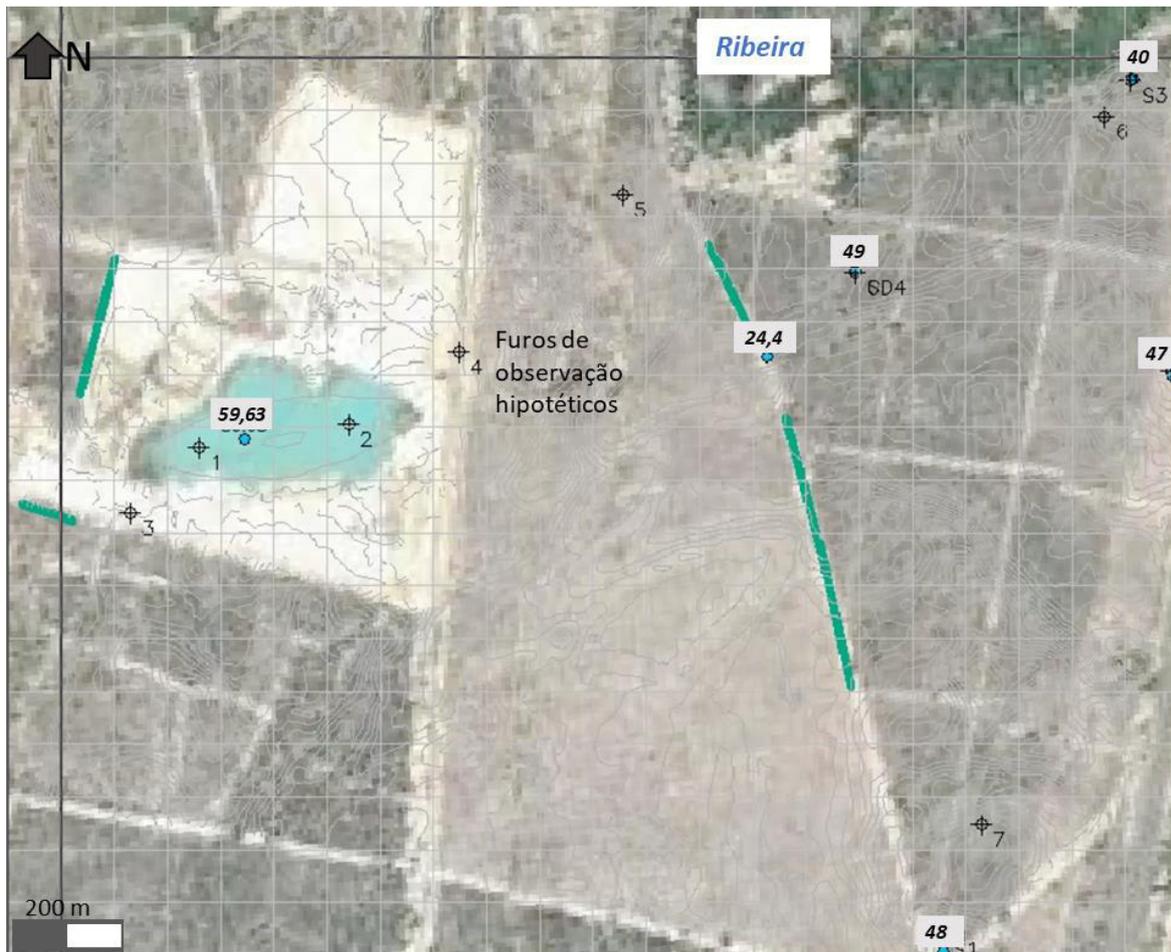
O modelo foi desenvolvido e calibrado para a situação de partida (maio) dos depósitos de areias eólicas e dunares tendo-se realizado diversas análises de sensibilidade sobre as respostas obtidas considerando-se distintos valores para os parâmetros de entrada “Condutividade Hidráulica (k)”, “Porosidade”, “Coeficiente de Armazenamento”, “Rendimento Específico” e “Drenância” das unidades hidrogeológicas locais e da “Condutância hidráulica” da ribeira localizada no extremo nordeste do modelo.

Construiu-se, assim, um modelo de partida que, posteriormente, serviu de base ao desenvolvimento de dois outros modelos que permitem estabelecer uma situação de comparação em termos indicativos entre os cenários intermédio e final previstos para a fase de alargamento da área da concessão.

#### 4.4 Parâmetros de entrada dos modelos

A **malha do modelo numérico** delimita e gera uma partição para a área em estudo. A dimensão das células é um critério definido *a priori* dependendo do detalhe com que se pretende configurar o modelo. O refinamento da malha é aplicado em locais de maior interesse e onde é expectável um maior gradiente hidráulico (zonas de rio ou pontos de descontinuidade geológica ou hidrológica). A dimensão das células é sempre um compromisso entre o detalhe com que se quer implementar o modelo, a dimensão da área de estudo e o tempo de execução do modelo em computador.

Considerando a informação cartográfica existente, as dimensões da área a modelar e a localização dos dispositivos de monitorização existentes na área, foi desenvolvido um modelo com malha composta por células de dimensões 100mx100m, de dimensões totais de 2200mx1800m (**Figura 4-1**), tendo-se ensaiado os resultados alcançados considerando primeiramente um modelo de duas camadas (composto pelas unidades 1 e 3, conforme **Figura 3-3**) e posteriormente de três camadas (composto pelas unidades 1, 2 e 3, conforme **Figura 3-3**). Os resultados encontrados aproximaram-se mais do modelo conceptual e dos resultados reais conhecidos para a situação do **modelo de 3 camadas**, sendo que em termos de modelação a unidades de maior peso nos resultados são as 1 e 3. A unidade 2, de espessura quase negligenciável no modelo, pretende apenas expressar um horizonte de transição de uma fácies mais arenosa para uma outra, distinta, de natureza mais silto-argilosa que se sabe existir, a partir das informações recolhidas e consultadas sobre a área.



**Figura 4-1 Malha, células, furos de observação hipotéticos e reais dos modelos**

O primeiro passo na construção de um modelo de escoamentos passa pela definição de um modelo conceptual com a definição da estrutura geológica da área de estudo, incluindo o número de camadas, a espessura de cada camada, a litologia e a estrutura das unidades aquíferas envolventes. Estes dados são classicamente obtidos a partir da informação geológica, incluindo mapas geológicos, registos de poços e furos, seções transversais, geofísica e mapeamento de campo adicional. Através da construção do quadro geológico é possível definir um quadro hídrico que permita identificar os limites do sistema hídrico, as unidades hidrogeológicas, o reconhecimento de recargas e a definição de um sistema de fluxo. Na **Tabela 4-1** apresenta-se uma síntese da informação mais relevante considerada para a construção dos modelos de escoamentos.

Na **Figura 4-2** apresenta-se um dos horizontes mais relevantes reconstituído para estabelecimento da **Geometria** do modelo: a camada de base da unidade hidrogeológica 1. Nesta figura, a cor vermelha, são indicados alguns dos valores conhecidos ou extrapolados com base na informação constante em [6], [7], [8], [9] e [12].

Tabela 4-1 Síntese da informação recolhida e considerada para a construção dos modelos

Dados para construção modelo	Aspetos a definir	Informação Recolhida
<b>Malha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Dimensões do modelo a 3-D (extensão horizontal e vertical da área de estudo)</li> <li>◆ Nº linhas</li> <li>◆ Nº colunas</li> <li>◆ Localização de furos de observação e hipotéticos</li> </ul>	<p>Notícia Explicativa da Carta Geológica, escala 1:50 000, Folha, folha 39-C (Alcácer do Sal), Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, pp 5-31, 1983;</p> <p>Carta Militar de Portugal Série M888 – escala 1:25 000, Folha 485 (Ervideira do Sado – Alcácer do Sal);</p>
<b>Geologia e hidrogeologia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Unidades hidrogeológicas</li> <li>◆ Tipos de aquífero</li> <li>◆ Processos de recarga e descarga</li> <li>◆ Mecanismos de escoamento</li> </ul>	<p>Relatórios de trabalhos anteriores, <i>Logs</i> de sondagens, furos e relatórios de execução cedidos pela Sifucel ([6]-[8]);</p>
<b>Geometria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Profundidade e espessura de unidades aquíferas</li> <li>◆ Topografia de cada camada: topo e base</li> </ul>	<p>Relatório Técnico de uma campanha geofísica por métodos de resistividades elétricas realizada na área da concessão [12];</p>
<b>Condições Fronteira</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Zonas impermeáveis</li> <li>◆ Zonas de caudal constante</li> <li>◆ Zonas de caudal específico</li> </ul>	<p>Topografia à escala 1:5000 fornecida pela Sifucel;</p>
<b>Condições Iniciais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Níveis piezométricos</li> </ul>	<p>Relatórios de trabalhos anteriores. Informações de instituições públicas, de empresas privadas e relatórios técnicos ([4], [5] [9], [14] e [15])</p>
<b>Parâmetros do aquífero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Condutividade vertical e horizontal</li> <li>◆ Porosidade efetiva</li> <li>◆ Recarga aquífera</li> <li>◆ Transmissividade</li> <li>◆ Anisotropia</li> <li>◆ Coeficiente de armazenamento</li> <li>◆ Rendimento Específico</li> </ul>	<p>Campanha de medição de níveis piezométricos promovida pela Sifucel em maio de 20021</p> <p>Resultados de ensaio de bombagem realizado na área da concessão e incidente nas formações do Miocénico [13]</p>



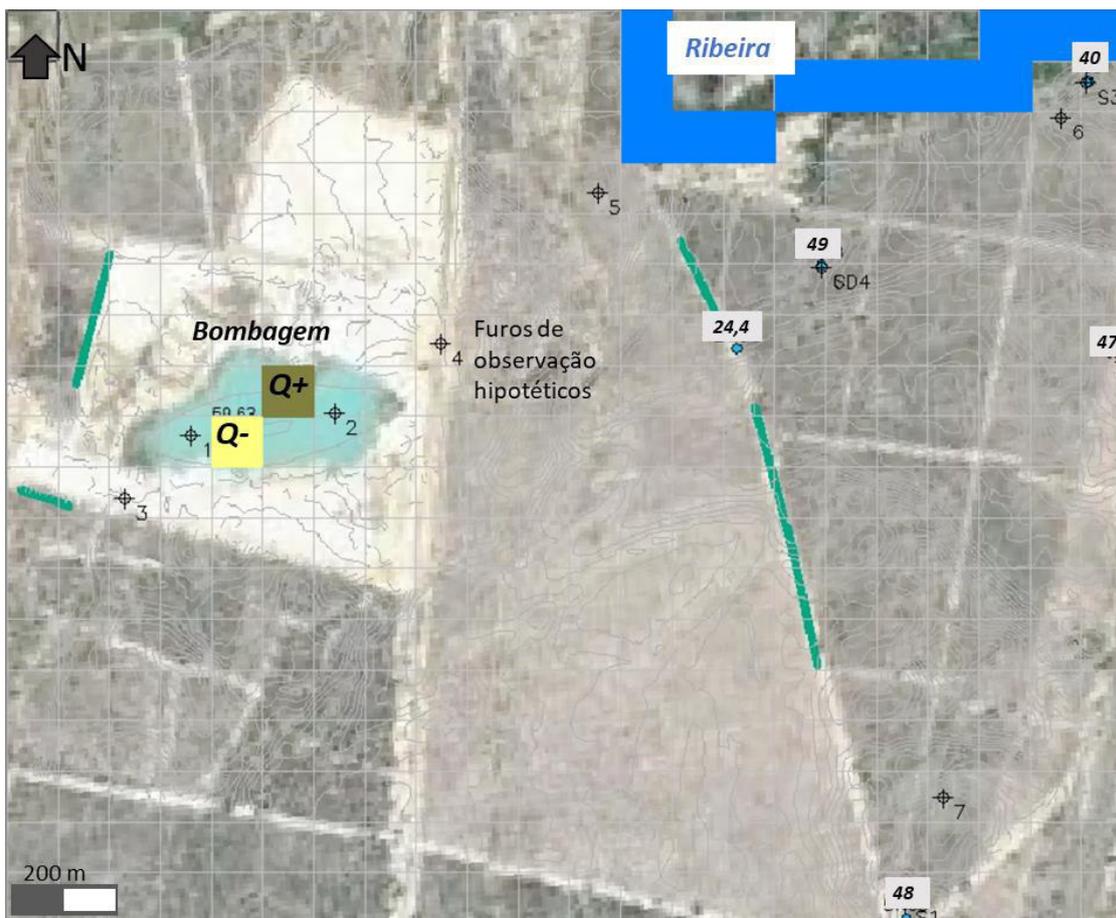
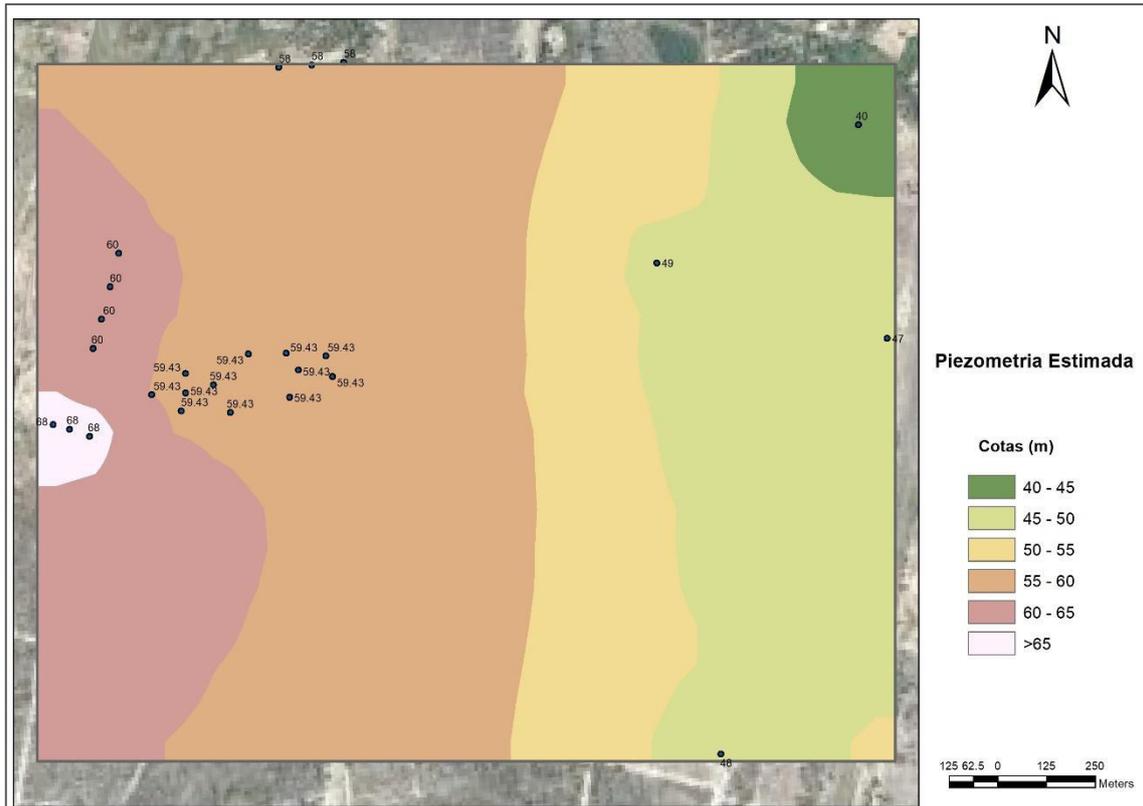


Figura 4-3 Condições fronteira e simulação dos efeitos de bombagem na lagoa

A superfície piezométrica de partida do modelo foi reconstituída tendo por base os resultados fornecidos pela GoldFluvium e que dizem respeito a uma campanha realizada em maio de 2021. Na Tabela 4-3 apresentam-se os valores de piezometria medidos nesta campanha e na Figura 4-4 a superfície piezométrica interpolada. De referir que a cada célula do modelo tem sempre de ser associada uma certa cota piezométrica que depois é geralmente aferida no processo de calibração.

Tabela 4-3 Níveis piezométricos medidos e arbitrados para reconstituição da superfície piezométrica do modelo

Referência	Coordenadas EPSG 3763 X (m)	Coordenadas EPSG 3763 Y (m)	Nível piezométrico medido (m) Formação	Nível piezométrico arbitrado em função de informação histórica (m)
S1	-33454,502	-154167,730	48,00	—
S2	-33015,873	-153111,029	47,00	—
S3	-33101,312	-152555,858	—	40,0
SD4 (SPD)	-33611,683	-152921,252	49,00	—
Furo FH	-33715,456	-153147,851	24,4	—



**Figura 4-4. Cotas piezométricas estimadas na Unidade Hidrogeológica 1.**

Para a **situação de partida** e os dois cenários (**intermédio e final**) os modelos foram construídos individualmente, mas sequencialmente uma vez que os horizontes de topo e base da unidade hidrogeológica 1 (depósitos de areias eólicas e dunares) se alteram em virtude do alargamento das zonas afetadas pela exploração (**Figura 4-5**).

A **recarga hidrológica média do sistema** foi considerada nula, uma vez que o período de modelação corresponde à fase de déficit hídrico, entre maio e outubro. Optou-se assim por um cenário mais pessimista. No entanto, encontrando-se toda a área do modelo classificada como zona de infiltração máxima, sendo a mesma, portanto, bastante sensível aos efeitos de recarga hidrológica, numa fase subsequente, de alargamento do modelo ao intervalo de tempo de um ano hidrológico completo, os valores de recarga a considerar devem ser calculados com base no cálculo do balanço hidrológico tendo por base informação o mais atualizada possível e para período de acumulado de 20 anos (situação ideal).



**Figura 4-5 Geometria das lagoas/ cortas de exploração para a Situação Atual e os Cenários Intermédio e Futuro**

#### 4.5 Análise de sensibilidade do modelo e calibração

Para o modelo respeitante à situação atual (ou seja, a situação que é mais bem conhecida) foi realizada uma análise de sensibilidade sobre os valores de entrada a considerar para os principais parâmetros do modelo. Ensaíram-se, em média, e por parâmetro, entre 5 a 10 corridas distintas e individuais do modelo. Na **Tabela 4-4** apresenta-se uma síntese dos parâmetros de entrada com os melhores resultados alcançados após os ensaios. Estes parâmetros foram considerados e considerados nas simulações apresentadas.

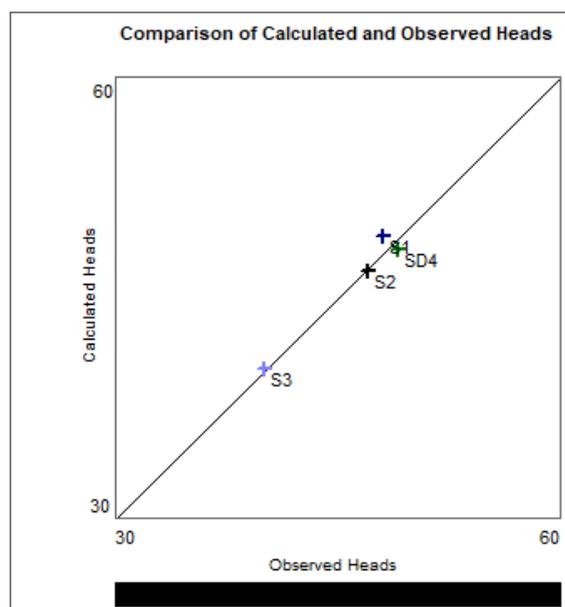
Os resultados encontram-se calibrados para a situação de partida, para as medições de níveis piezómetros da campanha de maio de 2021 respeitantes dos dispositivos que monitorizam a evolução de níveis da unidade hidrogeológica 1, ou seja, S1, S2, S3 e SD4 (**Figura 4-6**).

É de referir que o modelo se revelou extremamente sensível aos valores de permeabilidade e drenância da unidade hidrogeológica 2 (de transição) chegando a haver situações nos cenários encontrados onde as diferenças de cargas hidráulicas entre as unidades 1 e 3 deixam de se fazer sentir caso o carácter impermeável desta unidade não seja mais acentuado nos modelos. De facto, durante o processo de análise de sensibilidade, constatou-se que as unidades 1 e 3 chegaram a possuir as mesmas cotas piezométricas estimadas para os casos onde os valores de permeabilidade foram aumentados na unidade 2, o que não se verifica na realidade, pelo que se optou sempre por assegurar nos modelos finais que esta unidade 2 é substancialmente mais impermeável. Conceptualmente a existência desta unidade 2, de transição, justifica-se assim, para os resultados de simulação encontrados e explicam as diferenças medidas de cotas piezométricas entre as unidades

hidrogeológicas 1 e 3 que correspondem respectivamente, a um aquífero livre de cobertura e um sistema confinado de maiores profundidades.

**Tabela 4-4 Tabela de Síntese dos parâmetros do modelo após as análises de sensibilidade e calibração**

Parâmetro	Unidade 1 Aquífero livre	Unidade 2 Aquífero semi-confinado	Unidade 3 Aquífero semi-confinado a confinado
K horizontal	4,28E-5	1,00E-10	3,13E-5
K horizontal - lagoas	1	1,00E-10	3,13E-5
K vertical	4,28E-7	1,00E-10	3,13E-7
K vertical	1	1,00E-10	3,13E-7
Porosidade Efetiva	2,50E-4	1,00E-5	2,50E-5
Porosidade Efetiva - lagoas	1	1	1
Coefficiente de armazenamento específico	1,00E-4	1,00E-2	1,00E-4
Drenância vertical	1,00E-3	1,00E-8	1,00E-4
<p>Condição fronteira "rio":            K, condutividade hidráulica dos sedimentos 1,00E-4            L, comprimento máximo da condição fronteira rio na célula: 100            W, comprimento máximo da condição fronteira rio na célula: 5            Espessura máxima de sedimentos:1            Alturas mínima e máxima da coluna de água: 0,25 a 0,5            Condutância média 0,05</p>			
<p>Bombagem com restituição e 30% perdas            Q+=0,07; Q-=0,05</p>			
<p>Tempo de corrida do modelo: 182,6 dias, 1,578E+07 segundos            Regime Transiente com simulação de Efeitos de Bombagem e Recarga nula (período de seis meses - maio a outubro)            Unidades físicas do modelo: L=m (metros) T=s (segundos)</p>			



**Figura 4-6. Comparação entre os valores de piezometria medidos e estimados para a situação de partida do modelo.**

#### 4.6 Resultados de simulação do modelo de escoamentos – Situação Atual

Nas **Figura 4-7** e **Figura 4-8** apresentam-se os resultados das simulações para a situação atual conhecida (mês 1, maio), respetivamente para as unidades hidrogeológicas 1 e 3. Os resultados gerados mostram que a área da lagoa de exploração atualmente existente, e a zona imediatamente envolvente a Sul/Sudoeste desta, funcionam como áreas de recarga nos sentidos Norte, Nordeste e Este sendo inclusivamente um facto que a lagoa atual, nas suas condições presentes de exploração, não induz efeitos de rebaixamento que possam ser sentidos a maiores distâncias, a não ser os evidenciados na sua periferia imediata durante a fase de maior déficit hidrológico (**Figura 4-7**). As incidências associadas a rebaixamentos locais verificam-se no modelo simulado até uma distância máxima de 500 metros e ascendem a rebaixamentos na área da lagoa de 2,0 metros para a situação de partida, que é conhecida (**Figura 4-7** e **Figura 4-8**). Conforme se pode verificar, a área da lagoa apresenta os seus níveis em continuidade com os da envolvente apresentando um efeito de rebaixamento bastante localizado. A simulação foi desenvolvida para um cenário pessimista do ponto de vista da recarga hidrológica e em termos dos presumíveis efeitos de bombagem da exploração pelo que os resultados de rebaixamento se encontram com algum agravamento propositadamente induzido. Os sentidos dos escoamentos subterrâneos mostram que a área da lagoa e todo o sector Oeste do modelo alimentam as áreas de jusante. A unidade 1 contribui para a recarga subterrânea da ribeira e das unidades subjacentes ocorrendo efeitos de drenância em profundidade por vezes pronunciados (**Figura 4-7**, **Figura 4-8** e **Figura 4-9**). Por sua vez, os escoamentos na unidade 3 são regulares e seguem a tendência piezométrica local sem qualquer alteração, drenando no sentido da ribeira. Esta ribeira receberá diretamente as águas da unidade 1 por contacto entre esta unidade e os depósitos aluvionares.

A lagoa é hidrologicamente alimentada a Oeste/ Sudoeste (**Figura 4-7**, **Figura 4-8** e **Figura 4-9**) e, portanto, a haver efeitos de rebaixamento a partir da atual dragagem, os mesmos deverão fazer-se sentir sempre primeiramente nestas direções. Note-se que o modelo foi desenvolvido para a fase de déficit hídrico, ou seja, para o pior dos cenários possíveis em termos hidrológicos pelo que não é expectável que possam ocorrer modificações comportamentais inversas nos escoamentos subterrâneos nas restantes fases do ciclo hidrológico, que são de recuperação ou de excedente hídrico. Para a situação atual os efeitos da lavra não se fazem sentir no sistema subjacente confinado a semi-confinado (unidade hidrogeológica 3).

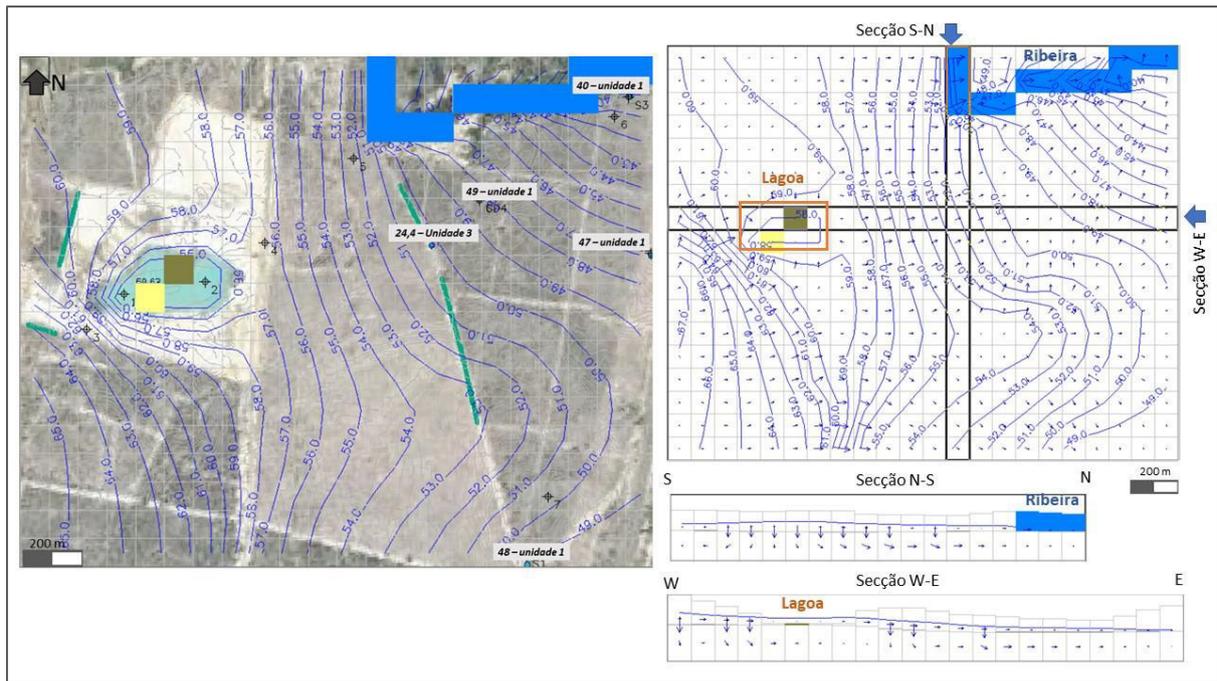


Figura 4-7 Situação Atual (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 1.

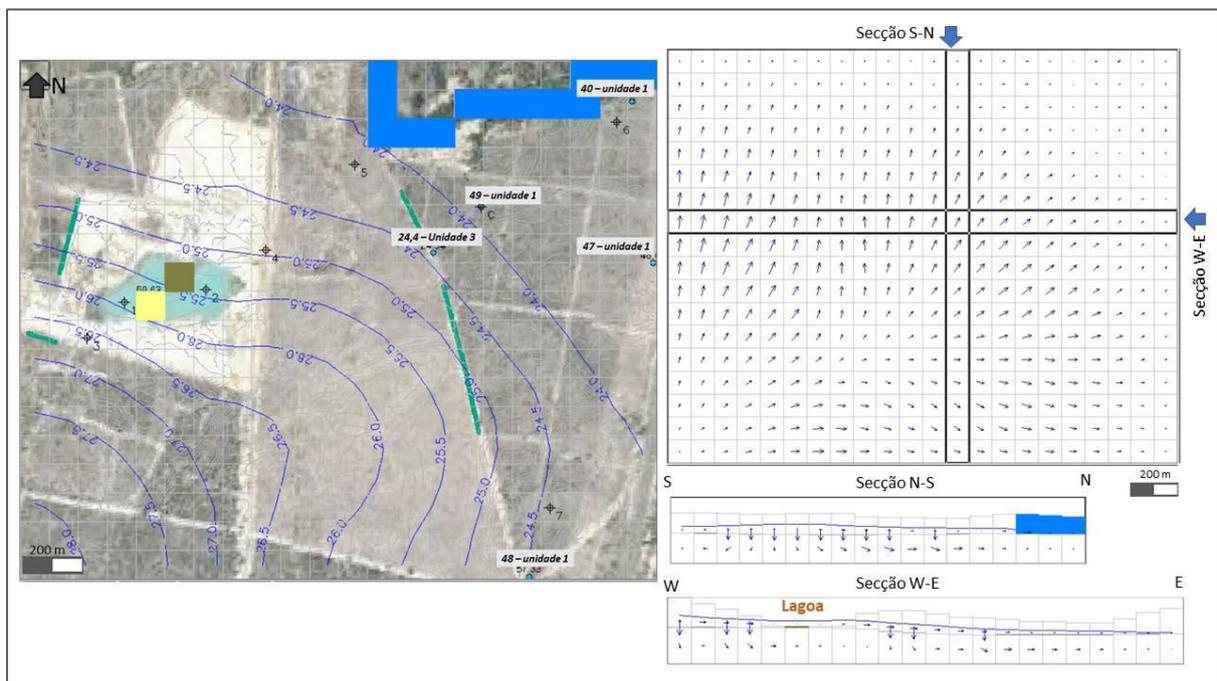
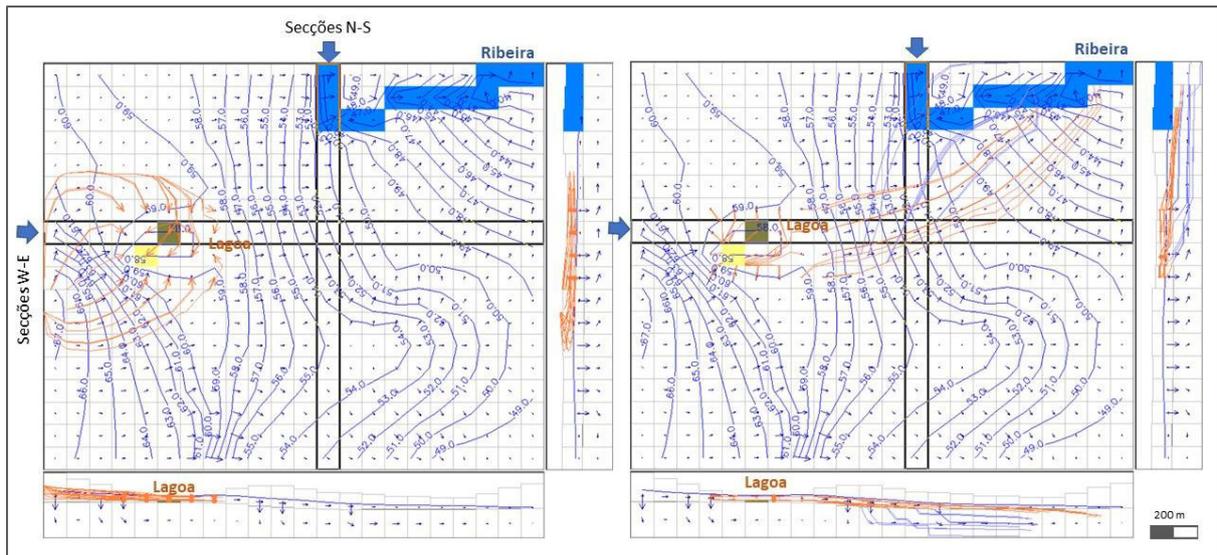


Figura 4-8 Situação Atual (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 3.

O modelo de escoamentos simulado enquadra na tendência regional identificada em estudos anteriores para esta área ([9]), que identificavam a zona de Borbolegão-Pedrogão como sendo a zona de recarga do sistema e a Ribeira de Albergaria como o sistema de descarga.



**Figura 4-9 Situação Atual (mês 1, maio): fluxos de escoamento subterrâneos simulados a montante e jusante da área da lagoa.**

Uma análise breve do histórico de dados disponibilizado no SNHIR (**Figura 4-10**) evidencia claramente que na área de Alcácer do Sal se tem vindo a verificar uma redução drástica geral dos níveis de água em piezómetros de monitorização, o que poderá estar a refletir o contexto presente e mais sentido nesta última década de maior seca. Com efeito, existem efeitos de rebaixamento regionais que se farão sentir por toda a região e inclusivamente, localmente, na própria área da exploração. Estes efeitos de rebaixamento regionais, se confrontados com eventuais ações e origens devidas à exploração per si, deverão sê-lo com cautela, e as necessárias certezas, pois a evidências até agora encontradas mostram uma não-relação direta de efeitos de rebaixamento a maiores distâncias (superiores a 500 metros) ou outras incidências em termos de indisponibilidades hídricas a nível regional devidos à presentes ações da exploração mineira.

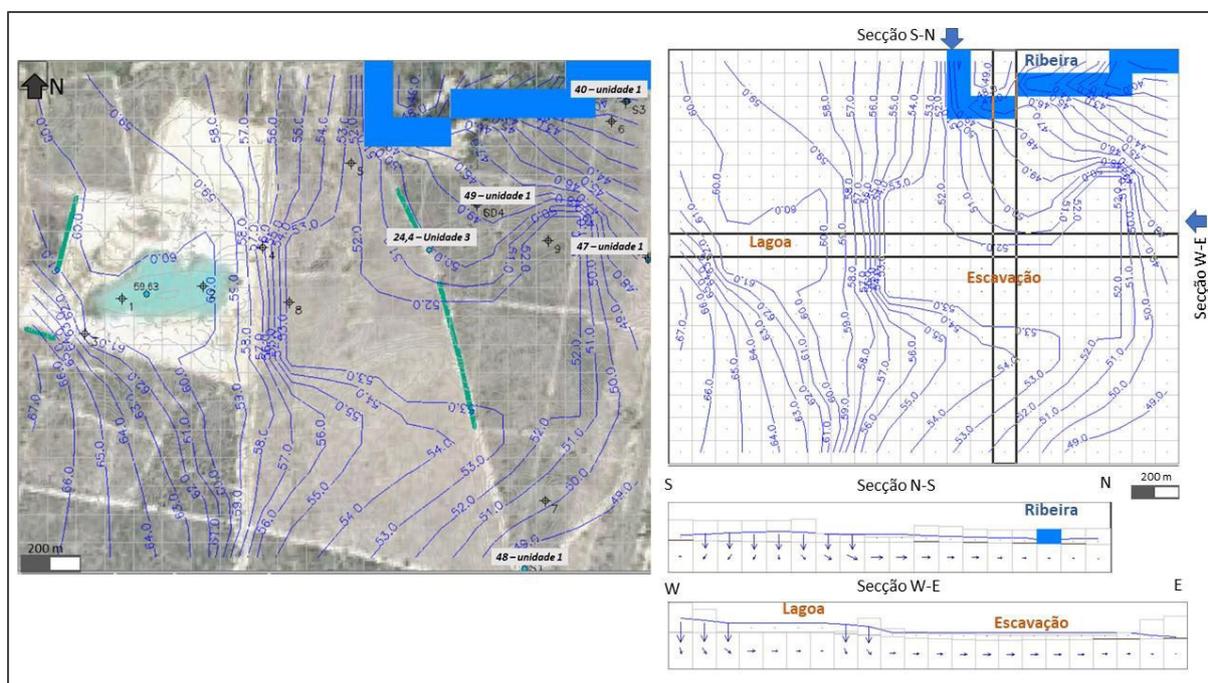


**Figura 4-10. Evolução temporal dos níveis piezométricos nos furos de monitorização da rede SNHIR 484/8, 458/28, 476/20 e 472/21 (informação disponível no site do SNHIR <https://snirh.apambiente.pt/> e conforme localização indicada na Figura 3-2)**

#### 4.7 Resultados de simulação do modelo de escoamentos – Possíveis Cenários futuros

O modelo de escoamentos anteriormente apresentado foi, entretanto, ajustado para dois cenários futuros possíveis resultantes do plano de alargamento da concessão e exploração mineira. Estes cenários correspondem a uma situação “Intermédia” em termos de exploração e “Final”, tendo-se efetuado um ajuste próximo, na medida dos possíveis, em termos de áreas afetadas, de acordo com o previsto no plano de lavra e em função da malha geométrica dos modelos de escoamentos. Para ambos os cenários não foram simulados efeitos de bombagem.

Nas **Figura 4-11**, **Figura 4-12** e **Figura 4-13** apresentam-se os resultados de modelação para um cenário intermédio hipotético de uma situação de partida semelhante aquela que é presentemente conhecida (ou seja, mês de maio 2021) mas em que se verificam trabalhos de escavação a Este e o alargamento da lagoa atualmente existente. Verifica-se que a área da lagoa atualmente existente continua a alimentar o sector este, as unidades subjacentes e a nova área de exploração prevista escavar a Este. Embora de um modo mais condicionado do que o da situação de exploração atual, o sistema continuará a ter capacidade de alimentação a jusante (**Figura 4-13**). A ribeira continuará, assim, a receber a contribuição local desta área, facto que se constata pela observação dos sentidos do transporte advectivo das águas (**Figura 4-13**). As áreas de recarga subterrânea do sistema mantêm-se a Oeste e Sudoeste da Lagoa (**Figura 4-12** e **Figura 4-13**). Nas condições simuladas, a nova escavação e o alargamento da lagoa não afetam o sistema subjacente confinado sendo este recetor das unidades sobrejacentes (unidade hidrogeológica 3,



**Figura 4-11. Possível Cenário Intermédio (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 1.**

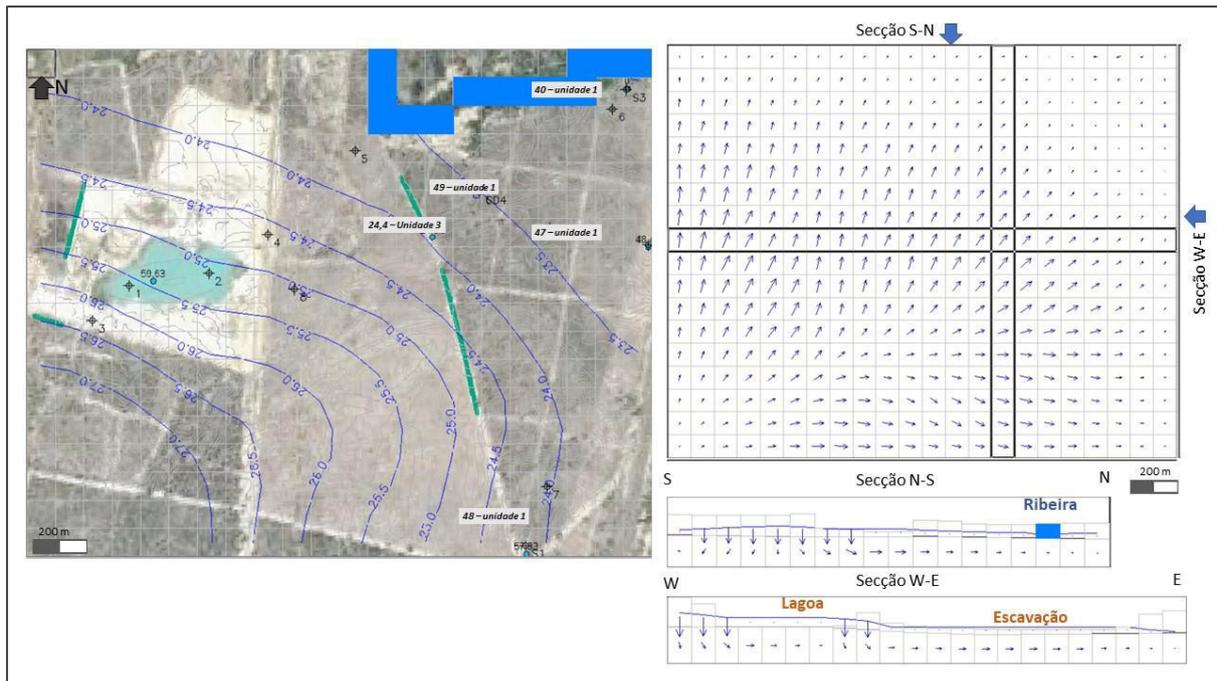


Figura 4-12. Possível Cenário Intermédio (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 3.

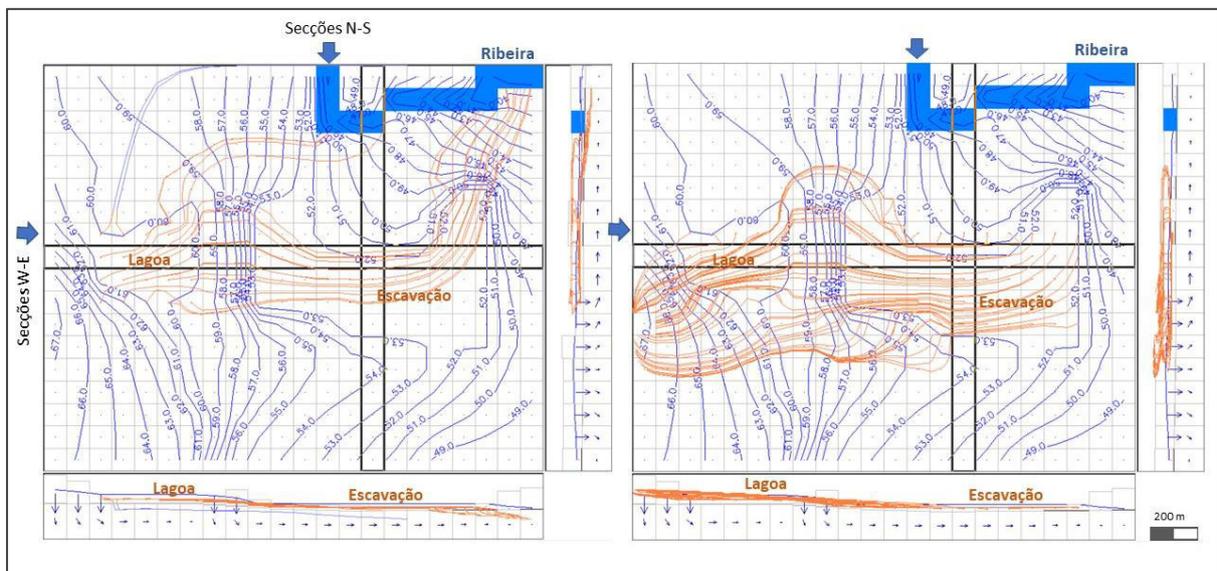


Figura 4-13. Possível Cenário Intermédio (mês 1, maio): fluxos de escoamento subterrâneos simulados a jusante da área da lagoa(esquerda) e a montante das áreas da lagoa e da escavação (direita).

As figuras que se seguem (Figura 4-14, Figura 4-15 e Figura 4-16) dizem respeito a possíveis resultados de simulação para uma situação hipotética final da lava. Para este cenário, continua a ocorrer recarga em profundidade da unidade hidrogeológica 1 para as unidades subjacentes. A ribeira continua a ser alimentada pelas áreas da lagoa e da escavação e as áreas de alimentação aquífera aumentam na direcção Sudoeste (Figura 4-16). Os níveis aquíferos em profundidade permanecem estáveis para a situação simulada (Figura 4-15 e Figura 4-16).

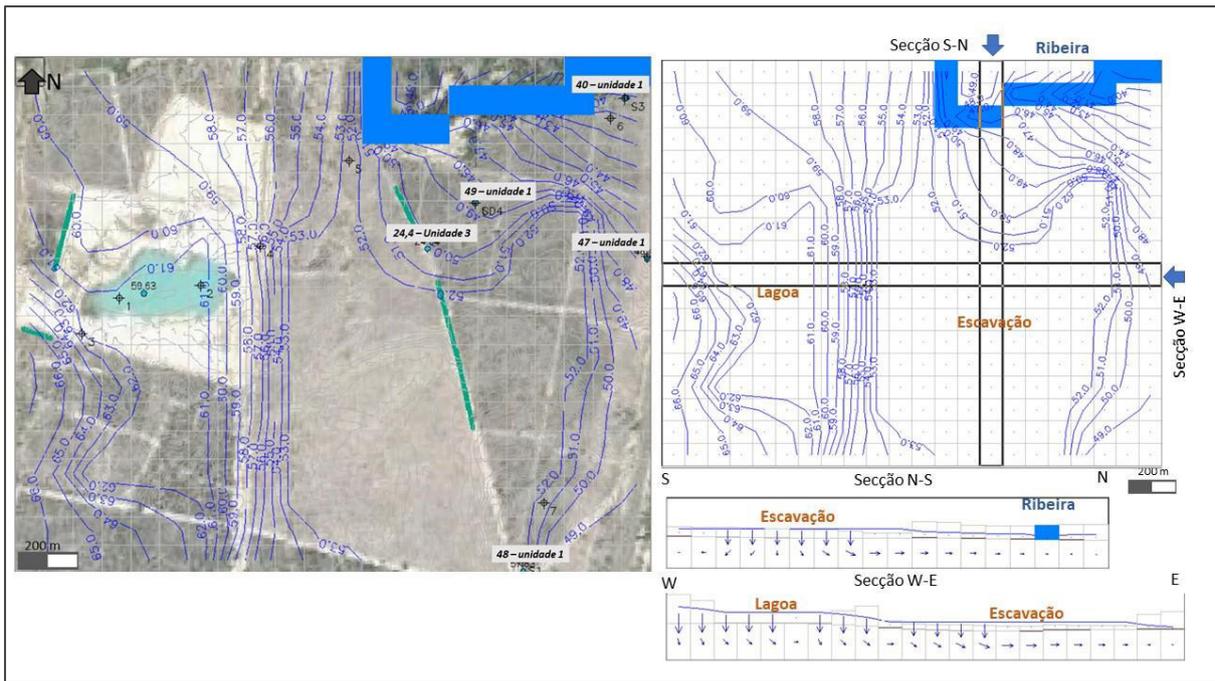


Figura 4-14. Possível Cenário Final (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 1.

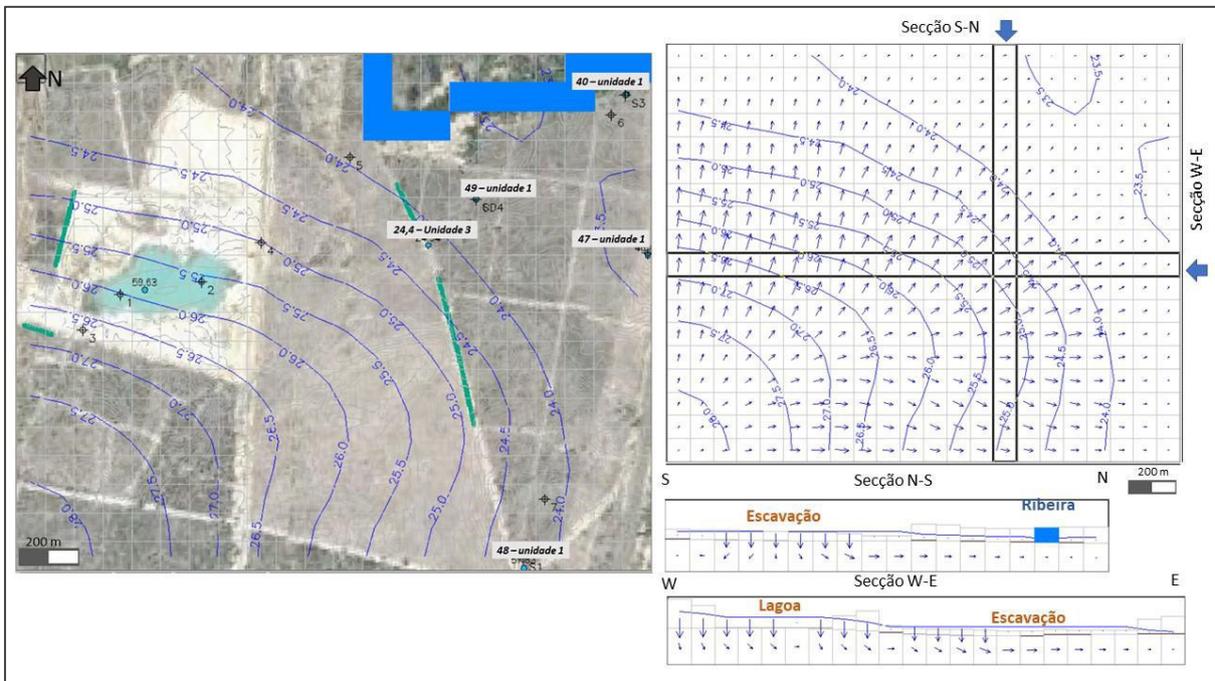
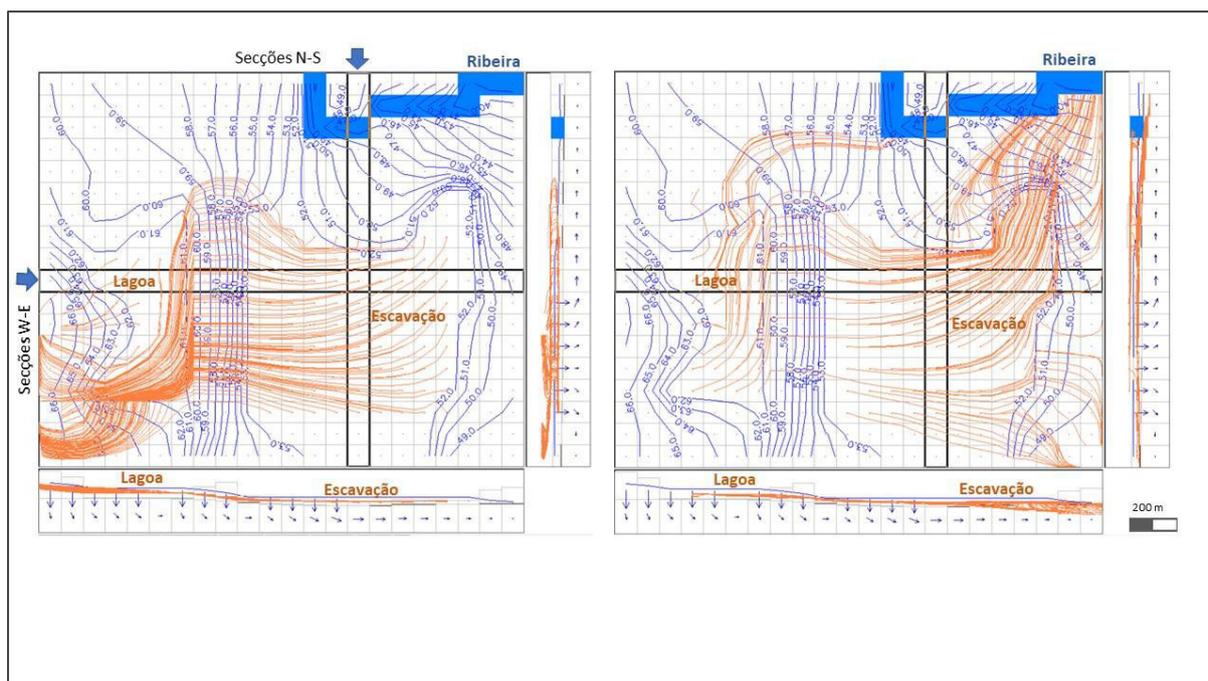


Figura 4-15. Possível Cenário Final (mês 1, maio): Piezometria e fluxos de escoamento subterrâneos simulados na unidade hidrogeológica 3.



**Figura 4-16. Possível Cenário Final (mês 1, maio): fluxos de escoamento subterrâneos simulados a montante (esquerda) e a jusante (direita) das áreas da lagoa e da escavação.**

## 5 Conclusões

Os resultados apresentados dizem respeito a modelos que simulam os escoamentos subterrâneos na dependência de todo um conjunto de condições locais que devem sempre de ser cautelosamente verificadas em termos de aplicabilidade. Tratando-se de modelos de simulação desenvolvidos com base em informação espacial dotada de padrões de descontinuidade e heterogeneidade muito específicos, tais modelos devem ser sempre considerados como aproximações da realidade, não devendo os seus resultados serem entendidos ou usados como verdades absolutas mas sim como possibilidades de resposta do meio hídrico subterrâneo em função de diversos tipos de incidências naturais, que advém da evolução do ciclo hidrológico a nível local e regional, e incidências de origem antrópica, como é este o caso. Tratam-se, pois, de modelos, simulados, que se encontram sempre associados a certo nível de incerteza que advém, não só da qualidade dos dados de entrada usados nos modelos, assim como da forma como os mesmos são interpretados e utilizados. Acresce a esta incerteza a que se encontra sempre presente em trabalhos desenvolvidos com base em modelações e interpretações de natureza geológica o que também se aplica no contexto do presente estudo.

Os resultados das campanhas de medição de níveis e os modelos de escoamentos numéricos gerados mostram que a área da lagoa de exploração atualmente existente, e a zona imediatamente envolvente a Oeste e Sudoeste desta, funcionam como áreas de recarga nos sentidos Norte, Nordeste e Este sendo inclusivamente um facto que a lagoa atual, nas suas condições presentes de exploração, não induz quaisquer efeitos de rebaixamento que possam ser sentidos a maiores distâncias, a não ser os evidenciados na sua periferia imediata, até uma distância máxima de 500 metros, para a situação modelada que é conhecida (mês de maio do ano hidrológico).

Para a situação atual e conforme evidenciado neste estudo, existem de facto efeitos de rebaixamento regionais que se farão sentir por toda a região e localmente na própria área da exploração. Eventuais efeitos de rebaixamento na envolvente regional, a serem explicados por eventuais ações e origens

devidas a esta exploração per si, deverão, pois, ser apresentados com cautela e certeza, e com uma clara constatação factual suportada em dados e medições reais. Para a situação atual, as evidências até agora encontradas mostram uma não-relação de efeitos de rebaixamento a maiores distâncias ou outras incidências em termos de indisponibilidades hídricas que possam ser devidos às presentes ações resultantes da exploração.

Para os cenários ensaiados, relativos à fase de alargamento da concessão efeitos a maiores distâncias, não são evidentes nos modelos simulados efeitos muito além dos limites da área de concessão. A ribeira continuará presumivelmente a ser alimentada por esta área no troço em que a intersecta, existindo um alargamento em direcção a sul da zona de recarga subterrânea e de alimentação da lagoa e das escavações preconizadas.

A recarga hidrológica dos modelos simulados é nula, uma vez que o período de modelação corresponde à fase de déficit hídrico, entre maio e outubro. Optou-se, assim, por um cenário mais pessimista. No entanto, encontrando-se toda a área do modelo classificada como zona de infiltração máxima, numa fase subsequente de alargamento dos modelos a um intervalo de tempo mais abrangente (preferencialmente o de um ano hidrológico completo), os valores de recarga a introduzir nestes novos modelos deverão ter em conta um balanço hidrológico atualizado e, se possível, para um período cumulativo de 20 anos (situação ideal).

Apesar de se verificar em ambos os cenários simulados a existência de incidências que se encontram bastante circunscritas às envolventes imediatas da lagoa e das áreas a escavar, tratando-se de simulações com base numa campanha única de medições de níveis, os resultados devem ser considerados com alguma cautela. Igualmente, durante a fase da estação seca, e apesar de não se perspetivar rebaixamentos de níveis de água que possam ir além da área da concessão e os mesmos serem circunscritos às explorações, é possível que a ribeira reduza os seus caudais no troço em que a mesma intersecta a área da concessão por carências que poderão ter uma explicação em termos regional. Aconselha-se, assim, que as fases subsequentes de alargamento da exploração tenham um acompanhamento e monitorização hidrogeológica mais cuidados, sugerindo-se ações de controlo e medição de caudais na ribeira e de medições de níveis em pontos de água além das fronteiras da concessão e com uma certa periodicidade.

## 6 Referências bibliográficas

- [1] Costa, E.F. (1994) *Notícia explicativa das folhas 7 e 8 da Carta Hidrogeológica de Portugal*, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, pp 83.
- [2] Fernandes, G.P.; Silva, O.M. (1997) Contribuição para a caracterização hidrogeológica do sistema aquífero da bacia do sado. 4.º Congresso da Água, A água como recurso estruturante do desenvolvimento, Centro de congressos da FIL, Lisboa APRH, 1998.
- [3] Antunes, M. T. (1983). *Notícia Explicativa da Carta Geológica da folha 39-C (Alcácer do Sal)*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, pp 39-47;
- [4] TARH (2008) *Auditoria hidrogeológica e plano director do sistema de captação de água subterrânea da Herdade da Comporta*. 41 Pag+Figuras. Relatório inédito para a Herdade da Comporta, Fundo Especial de Investimento Imobiliário Fechado. Sacavém
- [5] Outras Paisagens (2009) *Estudo de impacte ambiental do campo de golfe da ADT3 da Herdade da Comporta*. Volume II – Relatório Síntese. 276 pag. Relatório inédito para a Herdade da Comporta, Fundo Especial de Investimento Imobiliário Fechado.

- [6] IGM (2003). Sondagens em Castelo Ventoso. Relatório de trabalho para Sifucel. 4 páginas
- [7] IGM (2003). Interpretação dos resultados das sondagens do areeiro da Sifucel - Alcácer do Sal (Casal Ventoso). 27 páginas
- [8] GoldFluvium (2013). Relatório Final das Sondagens. Mina de Casal Ventoso – Alcácer do Sal. 18 páginas.
- [9] CVRM (2003). Relatório Síntese do Estudo de Impacte Ambiental do Projecto da Pedreira de Areia de Casal Ventoso. 168 páginas.
- [10] Feitosa, F.; Filho J.; Feitosa, E.; Demetrio, J. (2008). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM, Laboratório de Hidrogeologia, 3ª Edição, Rio de Janeiro, 687-698.
- [11] Barbosa, S.; Almeida, J. A. & Chambel, A. (2015). Simulação estocástica da transmissividade em formações graníticas alteradas e fracturadas. 10.º Seminário sobre Águas Subterrâneas, Universidade de Évora, Abril 2015, 4pp.
- [12] ARROW4D (2021). Relatório Técnico da Prestação de serviço “Prospecção geofísica com ERT no Castelo Ventoso (Alcácer do Sal)”. 30 páginas + Anexos.
- [13] Renato Azenha (2021). relatório final dos trabalhos de aferição de níveis e ensaio de caudal em 4 piezómetros e furo existente na mina de Castelo Ventoso (Alcácer do Sal). 12 páginas + Anexos.
- [14] Geoportall LNEG, <https://geoportall.lneg.pt/>
- [15] SNHIR <https://snhir.apambiente.pt/>