



MIGUEL MARTINS REIS CARNEIRO

Licenciado em Engenharia Geológica

Modelo de escoamentos sub-superficiais da área do Parque Empresarial do Barreiro

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022

Modelo de escoamentos sub-superficiais da área do Parque Empresarial do Barreiro

MIGUEL MARTINS REIS CARNEIRO

Licenciado em Engenharia Geológica

Orientadora: Doutora Sofia Barbosa,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadora: Doutora Maria da Graça Brito
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Paulo do Carmo Sá Caetano,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Doutora Maria Teresa Condesso de Melo,
Professora Auxiliar, IST

Orientador: Doutora Maria da Graça Brito,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Modelo de escoamentos sub-superficiais da área do Parque Empresarial do Barreiro

Copyright © Miguel Martins Reis Carneiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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,

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAThesis Word.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação trata-se da conclusão de um ciclo de estudos académicos que não teria sido possível sem a ajuda de várias pessoas que foram, em várias situações, acima e além do que seria esperado e por isso não posso deixar de expressar os meus agradecimentos:

Ao Conselho de Administração da Baía do Tejo, S.A pela oportunidade e acesso à informação e dados necessários para o desenvolvimento do tema.

À Professora Maria da Graça Brito, pela sugestão do tema e por estar sempre disponível praticamente a todas as horas para esclarecer dúvidas.

À Professora Sofia Barbosa, por toda a ajuda que me deu, pelas horas que perdeu a olhar para os meus modelos e pela paciência que demonstrou a lidar com as minhas ocasionais incompetências.

Ao Professor Joaquim Simão, por todas as voltas de bicicleta que deu comigo, que me ajudaram a manter a sanidade ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

À Dr. Fátima Silva pela paciência que teve em lidar comigo aos longo dos anos.

Ao Departamento de Ciências da Terra da FCT NOVA, nomeadamente a todos os docentes e não docentes não aqui referidos, pelas conversas de apoio e conhecimentos transmitidos ao longos dos anos.

À minha família, por ocasionalmente verificar se ainda estava vivo.

E finalmente, mas não menos importante à Mariana, por todo o apoio e conversas e sem a qual esta tese nunca teria sido desenvolvida.

Careful. We don't want to learn from this.

- Bill Watterson," Calvin and Hobbes"

RESUMO

O Parque Empresarial do Barreiro (PEB) localiza-se no concelho do Barreiro e corresponde ao território da antiga Companhia União Fabril (CUF), onde desde o início do século XX, foram desenvolvidas várias atividades industriais.

Na década de 40, a área foi objeto de expansão através da conquista de terrenos ao rio Tejo. Foram utilizados como aterro solos arenosos dragados do rio, resíduos de fosfogesso, resíduos de pirite, lamas diversas, entre outros, resultantes das atividades industriais existentes no local.

Estes materiais possuem características hidráulicas bastante diversificadas, sendo que os mesmos poderão conter também diversos tipos de contaminantes industriais orgânicos, inorgânicos e radiológicos.

Esta expansão causou modificações nos sistemas hidrogeológicos e no modo como o escoamento subsuperficial das águas se desenvolve.

A presente dissertação tem como objetivo principal melhorar o nível de conhecimento sobre o funcionamento do escoamento subsuperficial subterrâneo no local, através da construção de um modelo numérico dos escoamentos ocorrentes nas unidades mais superficiais, observadas nas sondagens realizadas no PEB em 2010.

Este modelo não só poderá servir de suporte à modelação do transporte reativo de diversos tipos de contaminantes como ser atualizado de acordo com as diversas ações de tratamento e remediação que sejam preconizadas na área.

Palavras-chave: Parque Empresarial do Barreiro (PEB), Modelação hidrogeológica, RockWorks20, PMWIN 5.3, Modelo Litológico, Tecnologias de remediação

ABSTRACT

The Barreiro Business Park (PEB) is located in the municipality of Barreiro and corresponds to the territory of the former Companhia União Fabril (CUF), where since the beginning of the 20th century, various industrial activities have been carried out.

In the 1940s, the area was expanded through the conquest of lands belonging to the Tagus River. Sandy soils dredged from the river, phosphogypsum residues, pyrite residues, various muds, among others, that resulted from the industrial activities existing at the site were used as landfill.

These materials have very diverse hydraulic characteristics, and they may also contain different types of organic, inorganic, and radiological industrial contaminants, this expansion caused changes in hydrogeological systems and in the way subsurface water flow develops.

The main objective of this dissertation is to improve the level of knowledge about the functioning of the underground subsurface flow in the area, through the construction of a numerical model of water flow occurring in the most superficial units, observed in the surveys carried out in the PEB in 2010.

This model will not only be able to support the modeling of reactive transport of different types of contaminants, but also be updated according to different treatment and remediation actions that may be advocated in the area.

Keywords: Barreiro Business Park (PEB), Hydrogeological modelling, RockWorks20, PMWIN5.3, Lithological Model, Remediation technologies

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Organização da dissertação	2
2	ÁREA DE ESTUDO	5
2.1	Enquadramento geográfico e social	5
2.2	Enquadramento geológico	7
2.3	Enquadramento hidrológico e hidrogeológico	10
3	METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
3.1	Metodologia	15
3.2	Fundamentos teóricos e metodologia aplicada.....	17
3.2.1	Modelo geológico	17
3.2.2	Modelação numérica dos escoamentos de águas subterrâneas	21
4	TRATAMENTO DE DADOS	27
4.1	Dados litológicos	28
4.1.1	Análise estatística dos litogrupos.....	32
4.2	Dados piezométricos.....	33
5	CASO DE ESTUDO.....	37
5.1	Modelo conceptual	37
5.2	Modelo litológico 3D.....	38

5.3	Modelo hidrogeológico.....	40
5.3.1	Adaptação do modelo litológico	41
5.4	Modelo hidrogeológico.....	42
5.4.1	Malha do modelo.....	42
5.4.2	Condições fronteira	42
5.4.1	Parâmetros hidráulicos	44
5.5	Modelo de escoamento	46
5.6	Análise de sensibilidade	50
5.7	Tecnologias de remediação	52
6	DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Enquadramento da área de estudo em Portugal e no concelho do Barreiro.....	5
Figura 2.2 - Instalações da CUF, zona de adubos e fábrica de ácido sulfúrico no Parque Empresarial do Barreiro (Fonte: Baía do Tejo)	6
Figura 2.3 - Distribuição dos sistemas aquíferos da bacia do Tejo-Sado. (SNIRH).....	7
Figura 2.4 - Unidades hidrogeológicas de Portugal (SNIRH).....	7
Figura 2.5 - Mapa geológico da AMP com os limites das folhas das Cartas Geológicas. (Dias e Pais, 2009)	8
Figura 2.6 - Expansão do Parque Empresarial do Barreiro nos anos 40 (APA, 2007).....	9
Figura 2.7 - Expansão do Parque Empresarial do Barreiro (fonte: Baía do Tejo)	9
Figura 2.8 - Enquadramento geológico do concelho do Barreiro e área em estudo na folha 34-D da Carta geológica de Portugal à escala de 1:50000(LNEG, 2005).....	10
Figura 2.9 - Enquadramento geográfico da RH5 (APA/ARH,2012).....	11
Figura 2.10 - Modelo conceptual do sistema aquífero do Tejo-Sado (PNUD, 1980).....	12
Figura 2.11 - Direção regional do escoamento no sistema aquífero da margem sul (Oliveira, 2009).....	13
Figura 2.12 - Vala real do Barreiro (APA,2016)	13
Figura 2.13 - Carta de limite de deposição de sedimentos (Freire, 2003)	14
Figura 3.1 - Metodologia adotada para a presente dissertação.....	16
Figura 3.2 - Modelação por Closest Point (RockWare Inc.)	18
Figura 3.3 - Modelação por "Lateral Blending" (RockWare Inc.).....	19
Figura 3.4 - Modelação por Lateral "Extrusion" (RockWare Inc.).....	19
Figura 3.5 - Modelo altimétrico da zona (fonte: Baía do Tejo)	21
Figura 3.6 - Discretização de um aquífero hipotético (Harbaugh, 2005)	24
Figura 4.1 - Distribuição das sondagens na zona em estudo	28

Figura 4.2 - Vista lateral das sondagens e litologias	29
Figura 4.3 - Registo sondagem S81.....	32
Figura 4.4 - Registo sondagem S65A	32
Figura 4.5 - Resultado da modelação da piezometria na zona	35
Figura 4.6 - Dados referentes às piezometrias amostradas em fevereiro de 2010.....	35
Figura 5.1 - Modelo conceptual da zona (não está a escala).....	37
Figura 5.2 - Resultado da modelação por "Lateral Extrusion"	38
Figura 5.3 - Resultado da modelação por "Highest Probability"	39
Figura 5.4 - Corte S-N do modelo por Extrusão Lateral	39
Figura 5.5 - Corte S-N do modelo por Highest Probability	40
Figura 5.6 - Condições fronteira "No Flow"	43
Figura 5.7 - Condição fronteira "River"	43
Figura 5.8 - Condição fronteira "Constant Head"	44
Figura 5.9 - Condição permeabilidade e porosidade máxima	44
Figura 5.10 - Litologias e parâmetros hidráulicos presentes em cada unidade do modelo hidrogeológico	46
Figura 5.11 - Detalhe do escoamento e litologias da layer 13.....	48
Figura 5.12 - Detalhe do escoamento e litologias na layer 23.....	48
Figura 5.13 - Perfis laterais de escoamento da layer 13.....	49
Figura 5.14 - Perfis laterais de escoamento da layer 13 na zona da Vala Real.....	50
Figura 5.15 - Escoamento na layer 13 antes e depois da análise de sensibilidade	51
Figura 5.16 - Escoamento na layer 23 antes e depois da análise de sensibilidade	52
Figura 5.17 - Zonas de recarga nula.....	54
Figura 5.18 - Modelação das barreiras impermeáveis.....	54
Figura 5.19 - Detalhe do escoamento modificado nas layers 9 e 16 do modelo	54
Figura 5.20 - Perfis laterais de escoamento da layer 13.....	55
Figura 5.21 - Perfis laterais de escoamento da layer 13 na zona da Vala Real.....	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Litologias presentes nas sondagens e litogrupos definidos	30
Tabela 4.2 - Litogrupo dos Aterros e litologias constituintes.....	31
Tabela 4.3 - Litogrupos e respectivas proporções.....	33
Tabela 4.4 - Dados das marés referentes ao mês de fevereiro de 2010.....	34
Tabela 5.1 - Cotas de topo e base das unidades do modelo	41
Tabela 5.2 - Parâmetros hidrogeológicos considerados para cada litogrupo	44

SIGLAS

AMP	Área Metropolitana de Lisboa
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CUF	Companhia União Fabril
PEB	Parque Empresarial do Barreiro
PMWIN	Processing Modflow for Windows
RCD	Resíduos de construção e demolição
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da disciplina de Dissertação em Engenharia Geológica do Mestrado de Engenharia Geológica com o objetivo de construir um modelo de escoamentos sub-superficiais da área em que se insere o Parque Empresarial do Barreiro.

Esta dissertação pretende estudar o funcionamento dos escoamentos sub-superficiais no local e as suas possíveis interações com o estuário do rio Tejo, potencial recetor dos mesmos e será útil como ferramenta de suporte à gestão e decisão sobre iniciativas e investimentos que garantam um desenvolvimento sustentável da área ao permitir a análise da situação e prever possíveis cenários evolutivos do sistema hidrogeológico local.

Embora existam alguns estudos prévios efetuados na zona, realizados sobre porções do parque, nunca foi realizado um estudo detalhado no qual se engloba toda a área pertencente ao PEB.

O desenvolvimento sustentável consiste em parte na gestão e proteção adequada dos recursos naturais, a água sendo é um recurso natural e essencial a vida, está incluído nesta categoria, sendo a sua gestão e proteção dependente do conhecimento que se possui sobre os sistemas com que esta interage e atravessa (Lobo-Ferreira et al., 2015).

Com o aumento dos problemas ambientais causados pelas ações antrópicas, têm-se verificado um aumento na perceção sobre a importância em se garantir uma adequada gestão dos sistemas hidrogeológicos, para tal têm sido desenvolvidos vários projetos com o intuito de recolher informação relevante sobre este recurso (Feinstein et al., 2004; Lobo-Ferreira et al., 2015; Novo et al., 2018).

O objetivo destes estudos é variado, mas passa por situações tais como a quantificação de caudais de água em aquíferos e sua consequente utilização para extração de água para abastecimento público e industrial, criação de buffers de proteção de sistemas aquíferos, modelação de situações de contaminações em terrenos e aquíferos, etc (Vilas-Boas, 2008; Duarte, 2017; Ferreira e Martins, 2019; Ganesh, 2011; Góis, 2015).

Nas últimas décadas houve um progresso substancial no sentido de melhorar a qualidade das massas de água existentes na Europa através da introdução de diretivas que têm como objetivo de reduzir impactos negativos da poluição, da extração excessiva de água e de outras pressões exercidas sobre a água, e garantir a disponibilidade de uma quantidade suficiente de água de boa qualidade, tanto para uso humano como para o ambiente (AEU,2018).

Associado aos esforços e compromissos da UE em relação a gestão correta de recursos hídricos estão também os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) das Nações Unidas, dos quais os objetivos da Saúde de qualidade, Água potável e saneamento, Produção e Consumo Sustentáveis, Proteger a Vida Marinha e Proteger a Vida Terrestre são relevantes ao tema abordado pela presente dissertação.

A modelação dos escoamentos através de modelos numéricos pode ser uma ferramenta relevante em estudos hidrogeológicos, pois para se estudar um sistema é necessário saber as características que o compõem, sendo que estes modelos podem ser uma representação simplificada, mas fiável de sistemas reais, criados através de equações matemáticas (Ferreira e Martins,2019).

Estes modelos de fluxo são construídos utilizando programas como o Modflow (Harbaugh et al., 2017) que modelam o fluxo de águas subterrâneas e processos associados, o Modflow em particular pode depois ser combinado com modelos de bacias hidrográficas tais como PMRS, SWAT e HSPF e com modelos de transporte de solutos tais como MOC3D, M3TD e M3TDMS (Hughes et al., 2022)

Estes modelos podem depois ser aplicados em várias áreas tais como a educação (Gunckel et al.,2022), investigação e gestão de recursos (Feinstein,2004; Zemni et al.,2022) e em situações de foco legal.

1.2 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos com a organização delineada abaixo:

- I. Objetivos e enquadramento da dissertação - consiste num texto introdutório onde se descreve a problema abordado, é feito o enquadramento do tema e se descrevem os objetivos a atingir;
- II. Enquadramentos da área em estudo - é feita uma descrição da história e situação geológica do parque empresarial do Barreiro, neste capítulo é possível compreender e analisar o modelo litológico criado através da informação existente e disponibilizada para este efeito;

- III. Metodologia e fundamentos teóricos - são apresentados os fundamentos teóricos usados para a criação dos modelos litológico e de escoamentos numéricos e a metodologia usada ao longo do trabalho;
- IV. Tratamento de dados - descreve-se o tratamento de dados realizado face à informação de base disponibilidade e constrangimentos surgidos e inerentes ao uso dos programas de modelação considerados e devidos à complexidade da zona estudada;
- V. Construção do **Modelo Geológico** - é descrita a construção do modelo geológico e as adaptações feitas para construção do modelo numérico de escoamentos;
- VI. Construção do **Modelo Numérico de Escoamentos** - descreve-se a forma como foi construído o modelo de escoamentos e informações relacionadas, os resultados da análise de sensibilidade do modelo e os cenários de resposta das ações físicas de remediação propostas;
- VII. Conclusões e considerações finais - são apresentados os resultados do modelo, as considerações e comentários finais;

ÁREA DE ESTUDO

2.1 Enquadramento geográfico e social

A zona de estudo ocupa uma área outrora ocupado pela antiga Companhia União Fabril (CUF) do Barreiro, atualmente Parque Empresarial do Barreiro (PEB), localizada no concelho do Barreiro, a Sul de Lisboa, na margem esquerda do Rio Tejo (fig.2.1).

É limitada a Oeste pelo concelho do Seixal, a Este pelo concelho da Moita e Palmela, a Sul pelo concelho de Setúbal e finalmente a Norte pelo estuário do Rio Tejo.

O concelho do Barreiro encontra-se representado 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.

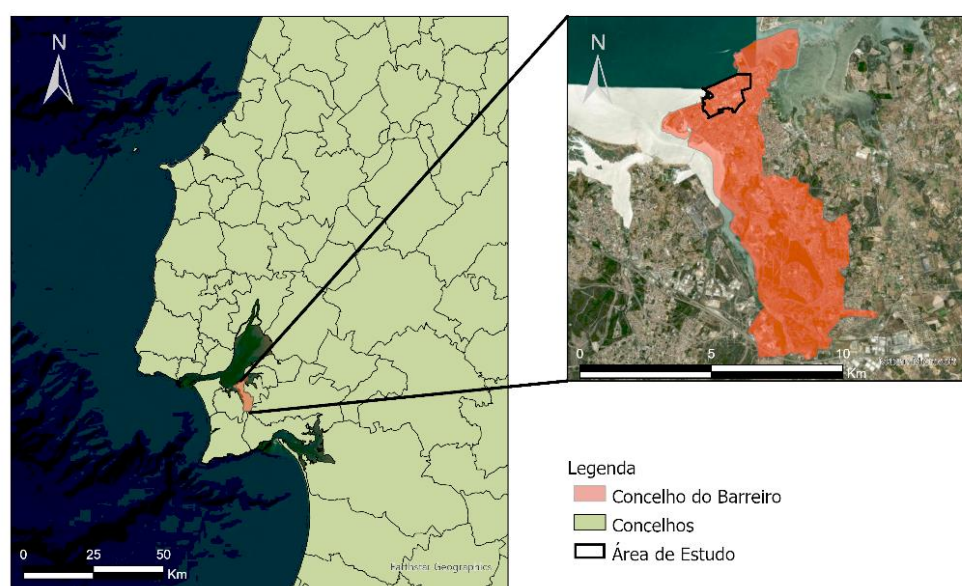


Figura 2.1 - Enquadramento da área de estudo em Portugal e no concelho do Barreiro

A área do presente estudo trata-se de uma secção com cerca de 3 km² considerada para a construção do modelo de escoamento de águas sub-superficiais.

A história do Parque Empresarial do Barreiro começa em 1861 com a abertura da linha de caminho de ferro que ligou o Barreiro a Vendas Novas. Esta ligação permitiu o desenvolvimento da indústria corticeira que teve grande importância na zona até a 1ª Guerra Mundial (Faria & Mendes, 2010).

Em 1907, Alfredo da Silva compra um lote de terreno, dando início ao uso dos terrenos pela Companhia União Fabril (CUF). No final dos anos 50 a CUF albergava mais de 8000 operários e estava dividida em 5 grandes zonas de produção (APA, 2016) (fig.2.2):

- Indústria Química Orgânica, na refinação de óleos, azeites, sabões, farinhas e rações;
- Indústria Química Inorgânica, no fabrico dos Ácidos;
- Indústria Química Metalúrgica, cobre, chumbo, ouro e prata e tratamento de cinzas de pirite;
- Indústria Metalomecânica, com oficinas de ferro, bronze e fabrico de aço especial para a indústria do ácido sulfúrico;
- Indústria Têxtil, primitivamente para sacaria e embalagem de adubos e posteriormente, alargada à produção de tecidos diversos.

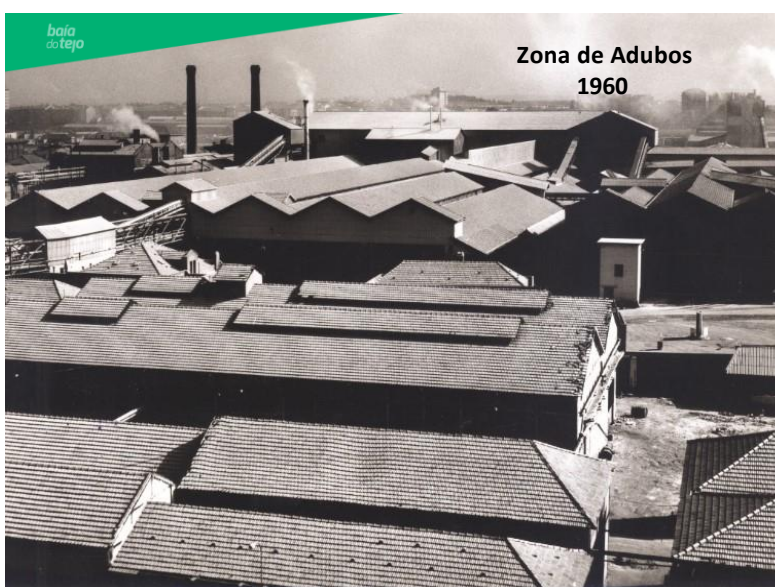


Figura 2.2 - Instalações da CUF, zona de adubos e fábrica de ácido sulfúrico no Parque Empresarial do Barreiro (Fonte: Baía do Tejo)

2.2 Enquadramento geológico

A área de estudo localiza-se na Bacia Cenozoica do Tejo-Sado (fig.2.3), nomeadamente na subunidade da Bacia Terciária do Baixo Tejo da Margem Esquerda (fig.2.4), enquadrada na carta geológica de Portugal 34-D (Pais et al.,2005) (fig.2.5).

A Bacia Terciária do Baixo Tejo corresponde a uma extensa unidade estrutural com direção aproximada de NE-SW, que se estende desde o litoral ocidental da Península de Setúbal até à área de Placência, em Espanha. Ocupa todo o Ribatejo, grande parte do Alto-Alentejo e a região sul da Beira Baixa, prolongando-se para Espanha e testemunha afloramentos compreendidos entre o Paleogénico com litologias pertencentes à Formação de Benfica e o Holocénico com litologias compostas pelos sedimentos atuais do rio Tejo e areias de cobertura (Almeida et al., 2000).

Esta bacia corresponde a uma estrutura de subsidência complexa com forma alongada com direção aproximada NE-SW. A subsidência nesta teve início durante o Miocénico inferior o que levou a um episódio transgressivo sendo que desde então a sedimentação na região de Lisboa e da península de Setúbal ocorre numa interface oceano-continente, com oscilações da linha de costa dependentes das variações do nível do mar e dos efeitos da tectónica (Dias & Pais, 2009; Pais, 2021).

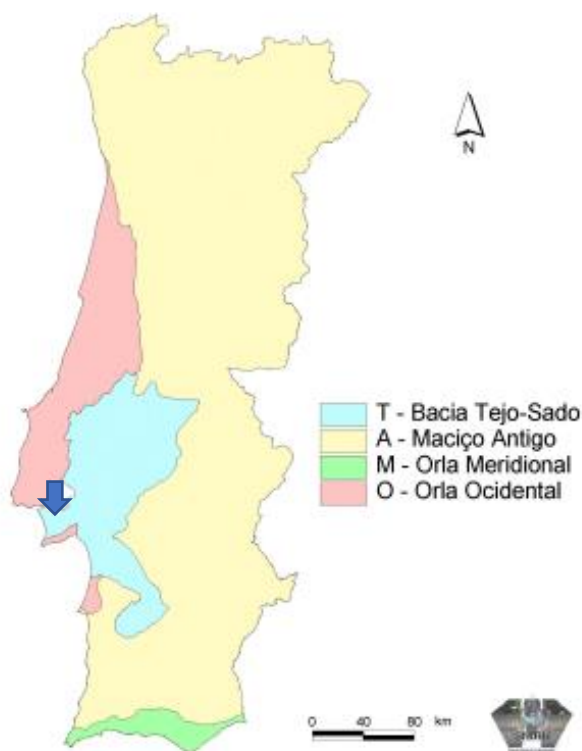


Figura 2.3 - Distribuição dos sistemas aquíferos da bacia do Tejo-Sado. (SNIRH)

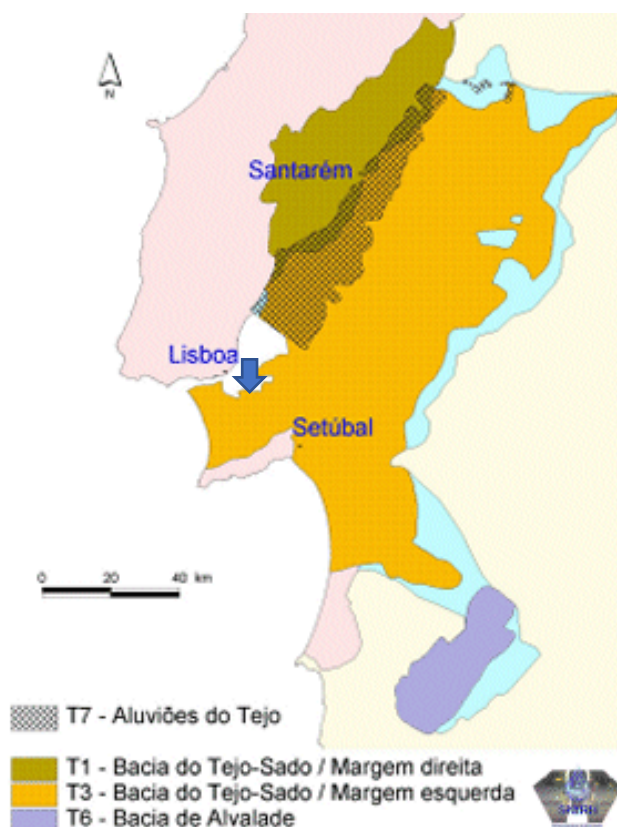


Figura 2.4 - Unidades hidrogeológicas de Portugal (SNIRH)

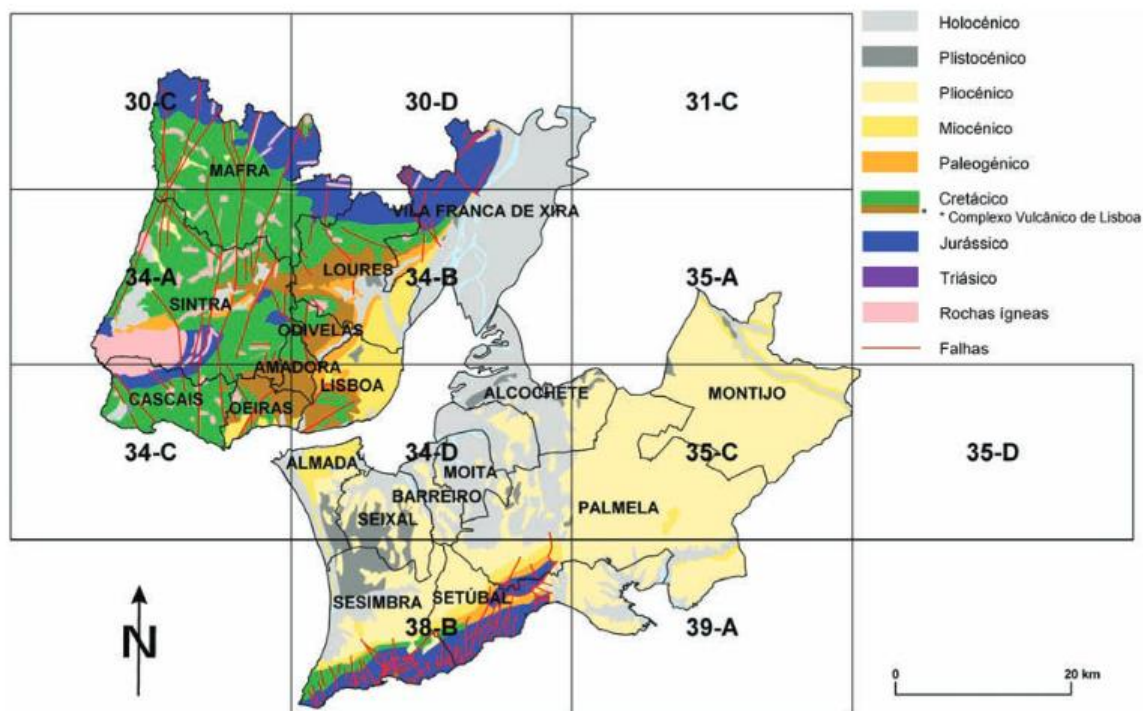


Figura 2.5 - Mapa geológico da AMP com os limites das folhas das Cartas Geológicas.
(Dias e Pais, 2009)

A geologia da zona reflete a evolução geodinâmica destas duas bacias, os depósitos sedimentares existentes são sub-horizontais a ligeiramente inclinados, nada ou pouco perturbados por acidentes tectónicos (Pais et al., 2006). Esta bacia é considerada como uma bacia ante-país gerada durante um regime compressivo que desencadeou a inversão tectónica da Bacia Lusitânica, situada a W, durante a convergência do continente africano em relação à Ibéria (Pais et al., 2006).

A evolução durante o Quaternário foi caracterizada por uma passagem de deposição associada a processos de agração, para erosão fluvial associada a uma descida relativa do nível do mar devido a levantamento regional do continente (Pais et al., 2006).

A região do Baixo Tejo é ainda considerada como tectonicamente ativa, com base nos eventos sísmicos decorridos em 1531, 1755, 1909 e 1969, relacionados com falhas cuja localização e características são pouco conhecidas. Estas falhas encontram-se cobertas por aluviões e outros depósitos modernos não sendo fácil o seu reconhecimento, pressupõem-se, no entanto que se encontram a W do vale do Tejo nomeadamente na região da bacia Lusitânica (Pais et al., 2006).

De uma forma genérica as formações geológicas da bacia são as seguintes (Pais et al., 2006):

- Arcoses, depósitos conglomeráticos arenito-arcóicos e calcários margosos do paleogénico (65.5-23 Ma);
- Depósitos continentais alternados com depósitos marinhos (23-5.3 Ma);

- Depósitos fluviais arenosos intercalados com lenticulas de argilas (5.3-2.6 Ma);
- Sedimentos areno-argilosos (2.6 Ma a cem mil anos);

A Bacia do Baixo Tejo é limitada a Oeste e Norte pelas formações da orla meso-cenozoica ocidental, a Sul pelo Oceano Atlântico e nas restantes direções por terrenos pertencentes ao Maciço Hespérico sendo que a zona em estudo se encontra localizada no flanco norte do sinclinal da albufeira.

Como consequência da necessidade de expansão do território para uso industrial entre os anos 1950-1957 e 1960-1968 (Faria & Mendes, 2010; APA, 2016), foram conquistados terrenos ao Tejo através da construção de aterros, em zonas previamente ocupados com areias de duna e aluviões, com materiais de diversas proveniências, desde materiais provenientes da dragagem dos canais de navegação a materiais provenientes das atividades industriais decorrentes na altura, a escala destas alterações pode ser vista na fig.2.6 e 2.7 que representam prévia e posterior à instalação dos aterros na década de 40.

Esta expansão culminou num ganho de área útil correspondente a uma expansão da faixa litoral com cerca de 2 km por 300m.



Figura 2.7 - Expansão do Parque Empresarial do Barreiro (fonte: Baía do Tejo)

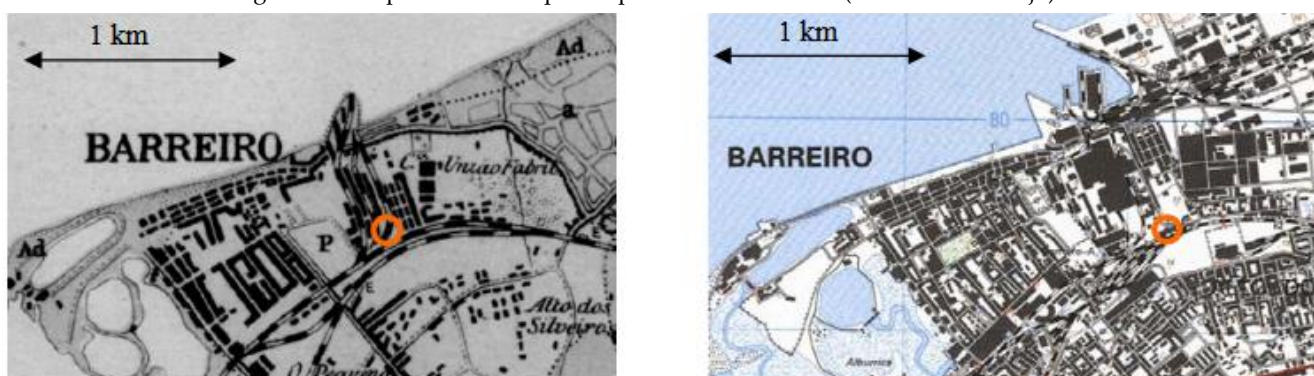


Figura 2.6 - Expansão do Parque Empresarial do Barreiro nos anos 40 (APA, 2007)

As unidades geológicas que afloram na zona são, segundo a carta geológica 34-D (fig.2.8), as seguintes:

- Formação de Santa Marta (Pliocénico/Neogénico) - Aflora na zona sul da área e é composta principalmente por sedimentos arenosos de granulometria fina a grosseira e de natureza arcósica, na base dão lugar a conglomerados pouco espessos e descontínuos cuja espessura pode variar entre os 320m e os 50 m.
- Aluviões e/ou Aterros (recente/quaternário).

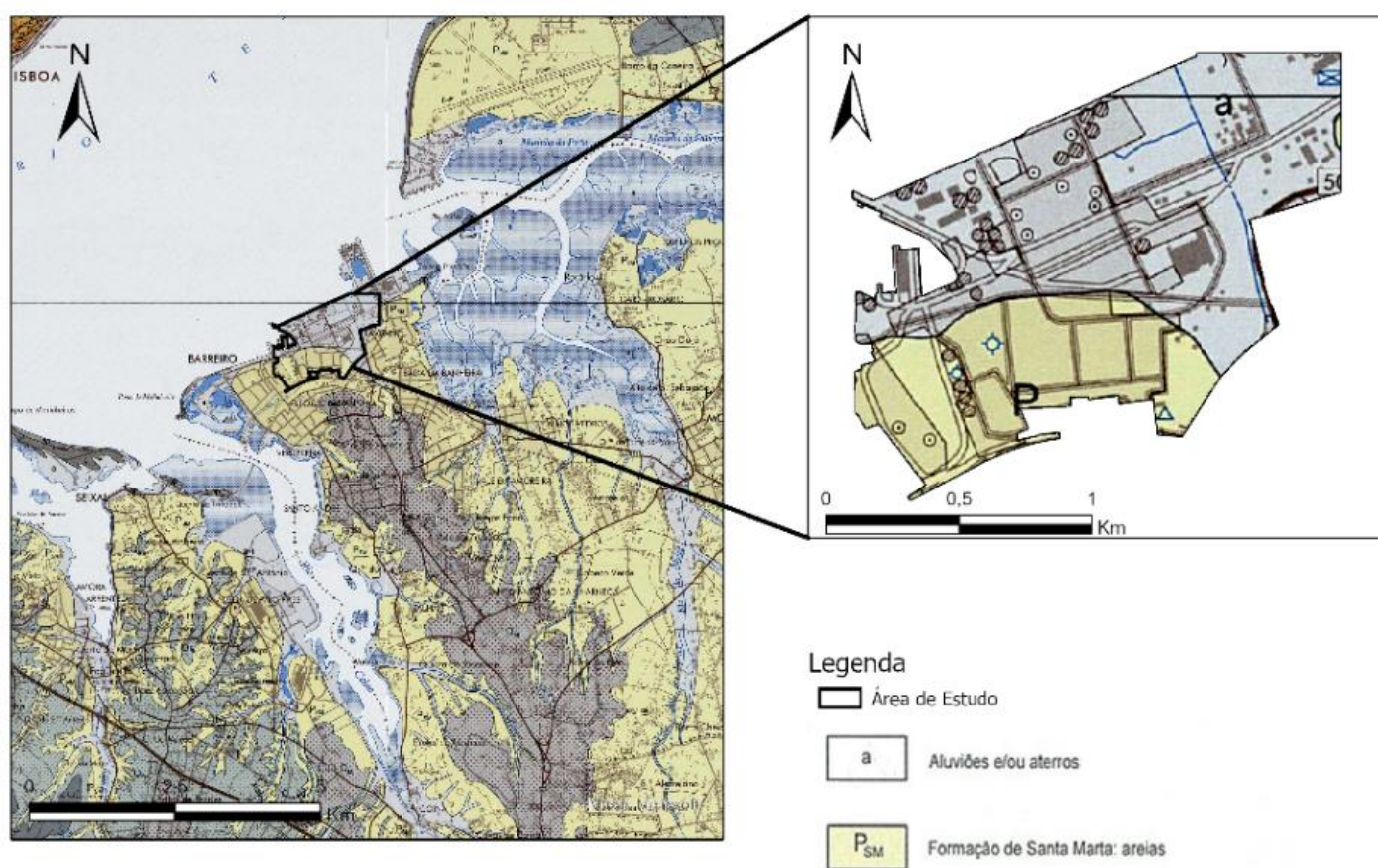


Figura 2.8 - Enquadramento geológico do concelho do Barreiro e área em estudo na folha 34-D da Carta geológica de Portugal à escala de 1:50000(LNEG, 2005)

2.3 Enquadramento hidrológico e hidrogeológico

Em termos hidrográficos a área em estudo insere-se na RH5, denominada bacia hidrográfica do Rio Tejo com uma área aproximada de 81 310 km², dividida entre Portugal e Espanha.

A orientação do troço principal em Portugal segue aproximadamente a do Tejo em Espanha, infletindo a meio do território nacional para sudoeste, desenvolvendo-se então numa extensa planície aluvionar (fig.2.9) (APA/ARH do Tejo, 2012).



Figura 2.9 - Enquadramento geográfico da RH5 (APA/ARH,2012)

Em termos hidrogeológicos a zona está inserida na Unidade Hidrogeológica da Bacia do Tejo-Sado, o maior sistema aquífero do território nacional, localizada numa região onde estão presentes algumas das áreas de Portugal com as mais elevadas concentrações populacionais e industriais.

Mais especificamente, a zona encontra-se localizada na subunidade da Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda, esta é constituída fundamentalmente por formações Miocénicas, Pliocénicas e Quaternárias, estando definido como um sistema multicamada constituído por um aquífero livre, um aquífero localmente semi-confinado e um aquífero confinado (fig.2.10) (Oliveira, 2009).

A presença de níveis ou lenticulas argilo-margososas e unidades greso-calcárias são as formações de base do aquífero semi-confinado, devido a variabilidade existente estas unidades conferem um comportamento complexo que faz corresponder em certas zonas a um aquífero com superfície livre, mas também com zonas semi-confinadas, níveis suspensos e zonas não saturadas, separadas por camadas de baixa permeabilidade (Simões, 2009).

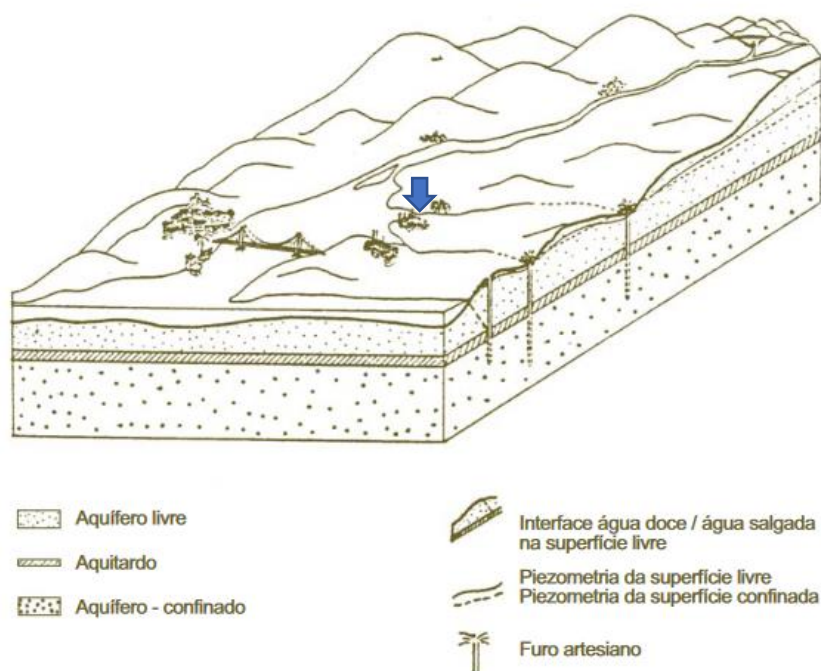


Figura 2.10 - Modelo conceptual do sistema aquífero do Tejo-Sado (PNUD, 1980)

O aquífero superior encontra-se instalado nas camadas do topo do Pliocénico e nos depósitos detríticos mais recentes, sendo composto por areias finas, médias e grosseiras com intercalações argilosas e argilo arenosas.

O aquífero semi-confinado está instalado nas unidades de base do Pliocénico e unidades areníticas, calco-areníticas e margosas do Miocénico médio a superior.

Finalmente o aquífero confinado está instalado nas base do Miocénico e é composto por formações greso-calcárias (Almeida et al., 2000).

A recarga dos aquíferos é feita principalmente por infiltração directa nos depósitos quaternários embora estes também possam receber água directamente nos locais onde afloram, os sistemas de escoamento regional têm como local de descarga o estuário do Tejo, independentemente do local onde se faz a recarga do sistema (fig.2.11).

A zona é constituída por um aquífero livre de areias de granulometria média, que apresentam grande variabilidade quanto ao teor em siltes, sendo que em algumas zonas estas surgem em maior expressão, parecendo ocorrer uma camada a maior profundidade com elevado teor argiloso.

O sentido do fluxo das águas subterrâneas é geralmente na direção do rio Tejo no sentido sul-norte. No entanto, a existência da Vala Real do Barreiro (fig.2.12) na zona Este da área, com sentido aproximadamente sul-norte, provoca inicialmente um escoamento secundário das zonas em redor para este canal e de seguida para o Rio Tejo (APA, 2016).

O escoamento subterrâneo é dominado pelo Rio Tejo e há uma forte influência das marés no nível piezométrico sendo que o impacto destas foi medido, em estudos anteriores, até uma distância de cerca de 200 m da zona de margem do rio e nas imediações da vala real (APA, 2016).

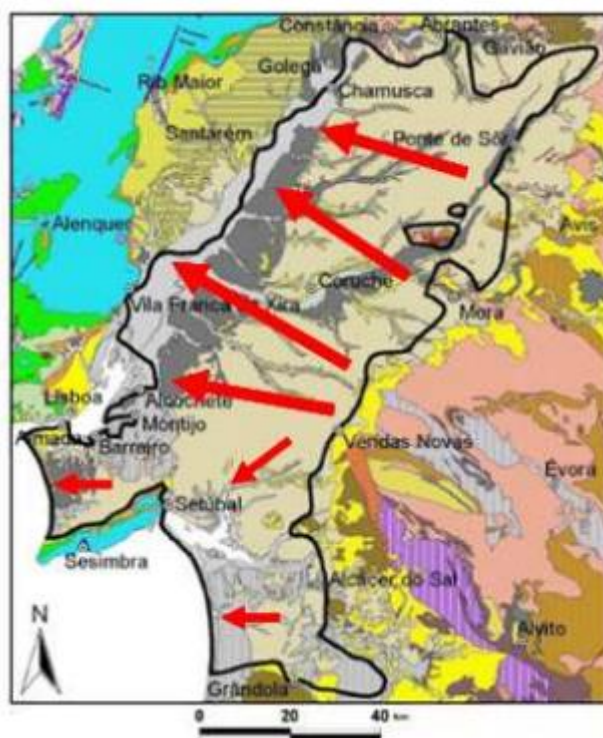


Figura 2.11 - Direção regional do escoamento no sistema aquífero da margem sul (Oliveira, 2009)



Figura 2.12 - Vala real do Barreiro (APA, 2016)

O estuário do Tejo no local é caracterizado por um canal estreito e profundo na zona de contacto com o oceano e por uma zona interior pouco profunda denominada Mar da Palha, este estuário é do tipo lagunar sujeito aos efeitos das marés (APA, 2016; Freire, 2006).

Este meio é caracterizado por uma cobertura aluvionar detrítica recente associada a sedimentação no estuário. Estes sedimentos são influenciados pela origem das fontes sedimentares e agentes modeladores atuantes naturais e antrópicos (Freire, 2003; Freire et al., 2006).

Os sedimentos de natureza silto-argilosa são de origem continental, transportados em suspensão pelas correntes fluviais e distribuídos pelas correntes de maré, enquanto os sedimentos arenosos têm origem principalmente marinha, sendo transportados para dentro e fora do estuário pela ação das correntes de maré (Freire et al., 2006).

Segundo Freire (2003), Cacilhas corresponde ao limite montante dos sedimentos provenientes do oceano (fig.2.13), sugerindo que os sedimentos que alimentam as praias do estuário têm origem resultante da erosão pluvial e hidrográfica dos afloramentos miocénicos, pliocénicos e quaternários da margem sul.

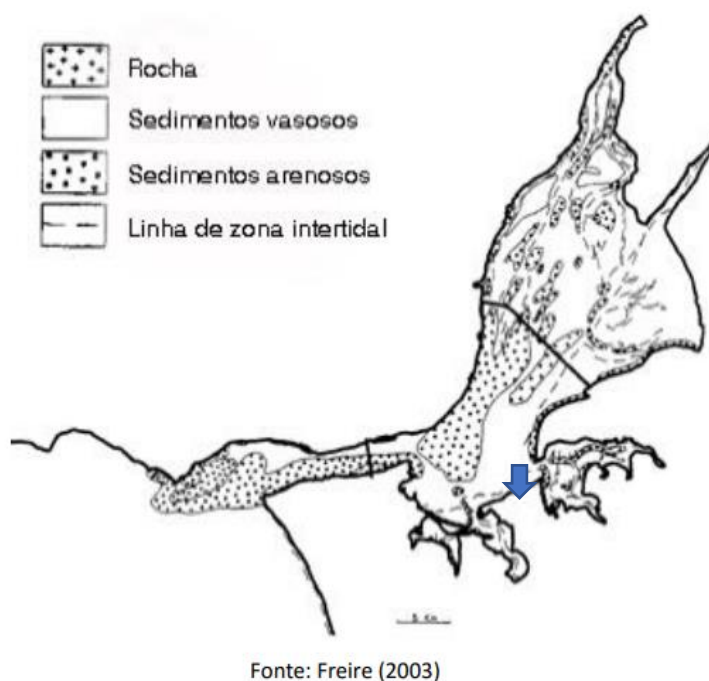


Figura 2.13 - Carta de limite de deposição de sedimentos (Freire, 2003)

METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Metodologia

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de escoamento superficial construído com base num modelo litológico 3D de alta resolução do PEB para tal foram utilizados os softwares RockWorks20, ArcGIS Pro e o PMWIN 5.3.

O desenvolvimento da dissertação realizou-se segundo as três fases descritas abaixo:

- Fase de construção do modelo litológico;
- Fase de tratamento e processamento de dados com subsequente construção e adaptação das malhas de entrada do modelo numérico de escoamentos;
- Fase de construção e desenvolvimento do modelo de escoamento;

Estas fases são apresentadas em maior detalhe na fig.3.1, onde se encontram descritas as metodologias de trabalho aplicadas.

A informação de partida é proveniente de 145 de sondagens realizadas na área durante o ano de 2010, disponibilizadas pela empresa Baía do Tejo, bibliografia proveniente de estudos e trabalhos prévios, publicados em artigos científicos ou de arquivos de empresas, organizações públicas e universidades.

Através da informação estudada na bibliografia foi realizada caracterização da situação de referência da área de estudo, e de seguida, através dos dados litológicos das sondagens fornecidos foi desenvolvido um modelo litológico representativo da zona.

O modelo de escoamentos foi definido tendo por base o modelo de altimetria da zona e as características hidrogeológicas das unidades que compõem o modelo litológico.

Foram definidas as características hidrogeológicas das litologias, sempre que possível com informações existentes, sendo que devido à existência de aterros compostos por materiais com pouca ou nenhuma informação bibliográfica existente, algumas destas características foram extrapoladas com base em materiais com comportamentos semelhantes ou em opiniões de peritos.

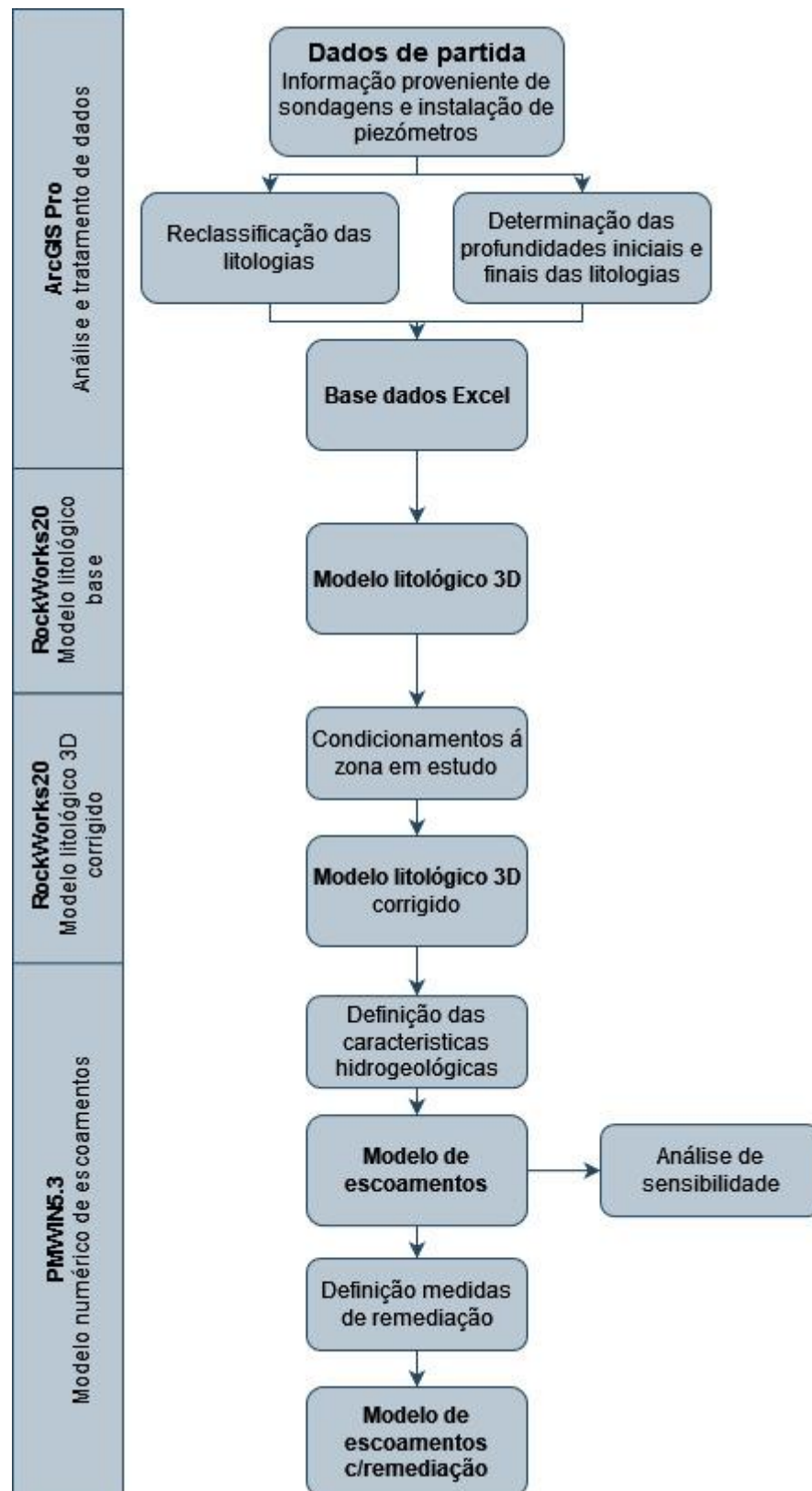


Figura 3.1 - Metodologia adotada para a presente dissertação

3.2 Fundamentos teóricos e metodologia aplicada

3.2.1 Modelo geológico

Um modelo geológico é uma representação de um volume de material, das estruturas geológicas presentes e outros dados, quer sejam estes geológicos, geofísicos ou de outro tipo, obtidos em estudos.

Estes modelos podem representar diferentes variáveis em estudo tal como a litologia, mineralizações, dados geoquímicos e geofísicos e outras características, a construção destes modelos serve de base nos processos de estimação de volumes de recursos, sendo que se trata uma aproximação à realidade de qualquer depósito existente.

O modelo 3D criado para este trabalho trata-se de um modelo litológico, sendo que este foi modelado de modo implícito através do software RockWorks20 da empresa RockWare Inc., utilizando o módulo de construção de modelos litológicos.

Foi utilizado um modelo litológico ao invés de um modelo estratigráfico devido ao facto da zona estudada se encontrar praticamente toda localizada no interior de uma única formação a que se associam aterros antrópicos a topo, o que impossibilita a definição de uma estratigrafia.

Estes modelos são construídos através de dados obtidos a partir das sondagens, mapeamentos superficiais e características regionais e, antes de serem utilizados devem ser validados em relação a situação real.

Para a situação em estudo, o modelo litológico construído permitiu compreender a complexidade a 3D da zona e serviu de base a construção das malhas dos parâmetros hidrogeológicos usados no modelo numérico de escoamentos.

3.2.1.1 Construção do modelo litológico através do Software RockWorks20

O RockWorks20 é um software de modelação que surgiu em 1985 criado pela Rockware Inc.. Permite visualizar superfícies, fazer a gestão de sondagens, fazer a criação de modelos sólidos, cálculos de volumes, etc. É amplamente utilizado pelas indústrias mineiras, petrolíferas e para estudos de âmbito ambiental.

O software integra informação a partir de um conjunto de bases de dados, construídas com base nas informações de partida provenientes de sondagens, fotos aéreas, entre outros.

A partir dessas bases de dados e no módulo necessário, através de um conjunto de algoritmos que o utilizador pode escolher é gerado o modelo em questão

Este software funciona criando um bloco “imaginário” onde uma qualquer zona em estudo é dividida em várias células tridimensionais denominadas de “voxel”, os valores atribuídos a estas células são baseados com base na proximidade à sondagem mais próxima.

Para a presente dissertação e tendo em mente as características da zona, o modelo foi criado com base nos algoritmos de modelação para modelos litológicos.

Para a construção de modelos litológicos o Rockworks20 possui 4 algoritmos disponíveis:

- I. "Closest Point": É o algoritmo mais básico, nesta situação o valor da célula é igual ao valor da sondagem mais próxima independentemente da distância ao ponto e dos valores dos "voxels" em redor (fig.3.2), este algoritmo é útil quando se esta a modelar uma variável discreta.

Closest Point Solid Modeling

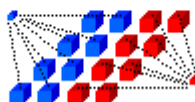


Figura 3.2 - Modelação por Closest Point (RockWare Inc.)

- II. "Highest Probability": Constrói uma tabela com todos os valores únicos existentes e para cada um destes valores cria um modelo probabilístico baseado no inverso do quadrado da distância.
- III. "Lateral Blending": Este algoritmo trabalha horizontalmente, em círculos de diâmetro cada vez maior. Inicialmente atribui as células imediatamente ao redor de cada poço o valor litológico de seguida, avança e atribui ao próximo "círculo" de células o valor de litologia mais próximo, continua a atribuir valores até atingir um ponto a cerca de um terço da distância da sondagem mais próxima. De seguida, nas áreas de contacto entre as duas litologias, aplica um algoritmo de randomização para minimizar as mudanças abruptas entre litologias (fig.3.3).
- IV. "Lateral Extrusion": Tal como o algoritmo anterior, este trabalha horizontalmente, em círculos de diâmetro cada vez maior. Inicialmente atribui às células imediatamente ao redor de cada poço o valor litológico de seguida, avança uma célula e atribui ao próximo "círculo" de células, o valor de litologia mais próximo e continua a atribuir valores até atingir meia distância entre a sondagem original e a sondagem mais próxima ou o até atingir o limite do modelo (fig.3.4).

Os algoritmos "Closest Point" e "Lateral Blending" não foram considerados devido ao facto de o primeiro ser um algoritmo demasiado simples para a situação em questão e o segundo criar situações aleatórias nas zonas de contacto, sendo que no modelo a construir não existe necessidade de suavizar os contactos.

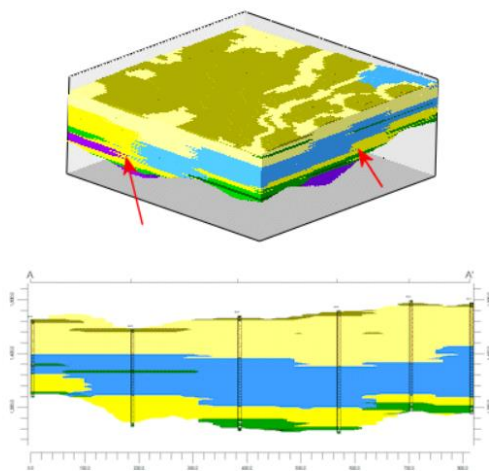


Figura 3.3 - Modelação por "Lateral Blending"
(RockWare Inc.)

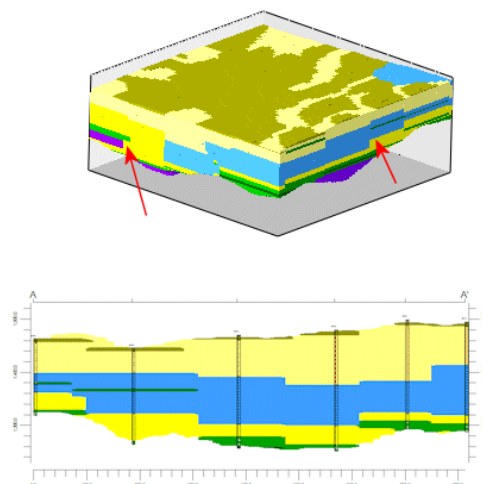


Figura 3.4 - Modelação por Lateral "Extrusion"
(RockWare Inc.)

O algoritmo de "Highest Probability", ou seja, modelação pelo inverso do quadrado da distância é adequado para analisar variações de pequena amplitude entre dados irregularmente distribuídos. Sendo que apenas considera a distância, não havendo ponderação das correlações espaciais e assumindo que a variável é isotrópica, devendo-se evitar utilizar quando se tratam de situações cujos dados se encontram agrupados e em situações onde há falta de informação (Landim, 2000).

Caso fosse usado o algoritmo da "Highest Probability", este criaria uma situação de incerteza vertical no modelo, nomeadamente como este algoritmo realiza uma estimacão em todas as direções em redor ao ponto em análise, haverá também uma estimacão vertical da variável em análise. Na situação em estudo, as litologias de aterros foram dispostas de maneira controlada, depositadas horizontalmente e devido as diferenças entre as cotas atingidas pelas sondagens tal causaria a modelação de certas litologias de modo que não é conforme a situação real.

Foi escolhido o algoritmo de "Lateral Extrusion" nomeadamente devido as características das litologias presentes e descritas acima.

O primeiro passo para a construção do modelo consiste na importação do ficheiro de dados para o software após o qual este atribui um conjunto de valores únicos (G-Value) a cada litologia. O software então, modela as litologias num cubo 3D, onde atribui valores G a cada célula do modelo com base nas sondagens mais próximas.

Antes da construção do modelo são definidas condições de topo e base do modelo, nomeadamente a imposição da topografia na fronteira a topo e imposição da cota mínima a modelar. A condição de topo obriga o modelo a atribuir litologias até a cota definida pela topografia, o que pode causar a extensão de algumas litologias para zonas onde estas não existem. Neste caso a condição de base obriga o modelo a ser estendido até a cota -4.9m.

A modelação inclui também processos de "declustering" e "smoothing" de modo a eliminar elementos geometricamente mais anómalos que possam surgir durante o processo.

A primeira fase para a construção do modelo litológico 3D passa pela criação de uma base de dados em formato Excel para ser importado para o Rockworks20, com informação da localização, cota da boca da sondagem, profundidade total e as profundidades de cada litologia para cada sondagem.

De seguida define-se a área de estudo, neste caso como um bloco de 1820m x 1620m x 14m, com uma malha de 10x10x0.5.

A malha horizontal foi definida com base na área de estudo enquanto a malha vertical foi definida com base nas espessuras mínimas das litologias existentes, embora ainda existam litologias com espessura inferior a 0.5 metros, que pertencem ao litogrupo do tout-venant e foram consideradas como tendo influência desprezável e consequentemente não foram modeladas.

De seguida no módulo da litologia, criou-se um sólido 3D através do algoritmo de extrusão lateral onde se impõe a condição de a superfície de topo ser igual a altimetria da zona (fig.3.5). O modelo altimétrico utilizado refere-se ao estado da zona em 2010 visto que desde aí devido a trabalhos de remediação feitos na zona, houve alteração dos perfis dos terrenos em certas zonas. Tal como esperado a altimetria da zona é superior na zona sul e vai diminuindo na direção norte até chegar ao limite norte da zona, que neste caso é o Rio Tejo. A zona é relativamente aplanada sem grandes variações de declive com exceção nas zonas em redor ao bairro operário.

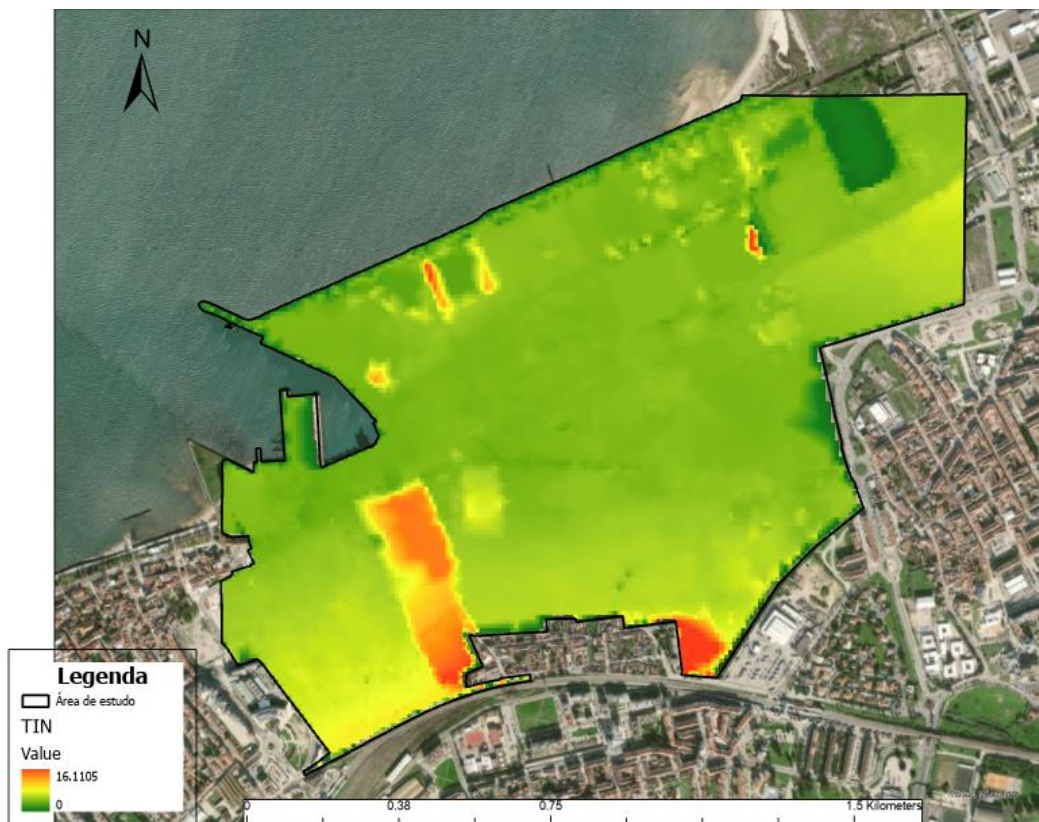


Figura 3.5 - Modelo altimétrico da zona (fonte: Baía do Tejo)

3.2.2 Modelação numérica dos escoamentos de águas subterrâneas

Os sistemas de águas subterrâneas tratam-se de sistemas complexos e em várias situações é essencial possuir informações detalhadas sobre os padrões de fluxo e drenagem. Para tal, podem ser construídos modelos numéricos que representem, tanto quando possível, os escoamentos ocorrentes nos sistemas hidrogeológicos (Reilly & Harbaugh, 2004).

Estes modelos são representações matemáticas de escoamentos subterrâneos desenvolvidos com o intuito de representar o mais próximo possível a realidade existente, estes modelos são baseados em modelos conceptuais litológicos e hidrogeológicos, conceptualizados com base em dados geológicos e hidrogeológicos recolhidos da zona em estudo.

Para a construção destes modelos de escoamento é necessário possuir um conhecimento inicial da área em estudo, sendo esse o objetivo do modelo conceptual. Estas informações iniciais possibilitam a criação de uma adaptação simplificada da realidade num modelo que permite que seja feita uma interpretação das variações laterais e verticais das características existentes.

De seguida com base nos dados existentes, nomeadamente sondagens, informação geofísica, cartografia ou dados obtidos através de outros métodos de investigação dos terrenos,

é definido um modelo hidrológico que permite atribuir a uma malha ou conjunto de superfícies, as diferentes litologias e características hidrogeológicas em estudo.

A qualidade destes modelos hidrogeológicos está associada ao nível de detalhe que é considerado aquando da sua construção, nomeadamente relacionado com as simplificações impostas pela informação de base existente e pelo facto de se realizar de uma tradução de uma situação real para um modelo de blocos ou superfícies (Barbosa,2010).

As simplificações mencionadas referem-se ao nível de discretização considerado para a construção do modelo, estas podem ser em relação às litologias existentes, à dimensão da malha considerada, à existência ou não de falhas ou fraturas entre outros, sendo que o grau de simplificações aplicado condiciona o realismo do modelo (Barbosa,2010).

Estes modelos devem ser o mais simplificados o suficiente, mas ao mesmo tempo ser representativo de todos os elementos do sistema que estão a ser tomados em consideração.

É nesta última fase que se faz a simulação do fluxo das águas subterrâneas e a sua importância é derivada da capacidade que se obtém de permitir a compreensão dos fenómenos físicos associados aos escoamentos subterrâneos e ao transporte físico e reativo de contaminantes a partir do qual pode depois ser simulada a resposta provável do aquífero a situações tais como extração de águas, plumas de contaminação etc. e as soluções de natureza física que que podem ser aplicadas caso necessário.

Para a modelação de águas subterrâneas existem vários softwares tal como o Modflow, GW Vistas, GMS, FEFLOW, etc., sendo que estes utilizam um dos seguintes métodos de cálculo para a construção do modelo:

- Método das diferenças finitas - Neste método os parâmetros do modelo são atribuídos a um nó que se encontra no centro de um bloco, numa malha de células retangulares e a equação diferencial de fluxo é ajustada através da aproximação por séries de equações algébricas.
- Método dos elementos finitos - Neste método os parâmetros do modelo são atribuídos a uma célula triangular e a equação diferencial de fluxo é resolvida através de equações diferenciais parciais.

Segundo Reilly (2001) a construção destes modelos de escoamento deve seguir o conjunto de passos descritos abaixo:

- I. Definição do problema - Análise da literatura, recolha de dados e análise preliminar;
- II. Construção do modelo conceptual - Condições fronteira, definição dos parâmetros hidrogeológicos e recolha de dados;
- III. Escolha do modelo matemático a utilizar;
- IV. Calibração - Análise de sensibilidade e comparação com dados reais;
- V. Aplicação do modelo ao caso de estudo;

VI. Reavaliação do problema e objetivos com base nos resultados obtidos se necessário;

Para o desenvolvimento do modelo de escoamento do PEB, o software escolhido para a modelação foi o PMWIN5.3.

3.2.2.1 Construção do modelo numérico de escoamentos através do Software "Processing Modflow for Windows"

O software PMWIN é uma interface para o programa de modelação de águas subterrâneas Modflow criado nos anos 80 pela USGS, foi originalmente desenvolvido para um projeto de recuperação de um aterro sanitário numa região costeira do norte da Alemanha em 1989 (Chiang, 2006).

As principais diferenças entre o Modflow e o PMWIN tratam-se do modo de como os dados de entrada são processados, o Modflow apenas permite a entrada de dados na forma de ficheiros de texto enquanto o PMWIN permite utilizar arquivos Excel, malhas Surfer, GIS e dados do AutoCAD o que expedita o tempo de montagem do modelo, permite também criar mapas de cor, mapas de contornos e tabelas dos modelos criados facilitando a interpretação dos dados finais.

A estrutura do PMWIN baseia-se numa interface entre um programa principal e um conjunto de módulos independentes, cada conjunto destes módulos diz respeito a uma característica específica do sistema hidrogeológico a simular (Chiang & Kinzelbach, 1998).

O PMWIN é baseado no modelo matemático de diferenças finitas e encontra-se direcionado para modelação de fluxos subterrâneos e modelos de transporte de contaminantes e tal como foi dito anteriormente, este encontra-se dividido em vários módulos sendo que cada um modela uma característica do sistema hidrogeológico em estudo.

O fluxo de águas subterrâneas, assumindo que mantém densidade constante pode ser descrito através da resolução da seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Equação 3.1 Equação diferencial parcial de fluxo de águas subterrâneas

Onde:

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} - referem-se às condutividades hidráulicas nas 3 direções principais do eixo(m/s).

h - Cota piezométrica(L).

W - Recargas e descargas de água no sistema (L^3/T).

S_s - Coeficiente de armazenamento do meio.

t - Representa o tempo (T).

Para a resolução desta equação, o PMWIN utiliza o método das diferenças finitas onde o sistema contínuo descrito na equação é substituído por um conjunto finito de pontos no

tempo e no espaço e as derivadas parciais são substituídas por termos calculados através das diferenças das alturas piezométricas nesses pontos.

Para tal é necessário discretizar o sistema aquífero num bloco 3D cujas células representam um volume de material (fig.3.5). No centro de cada uma destas células existe um ponto cuja piezometria é calculada.

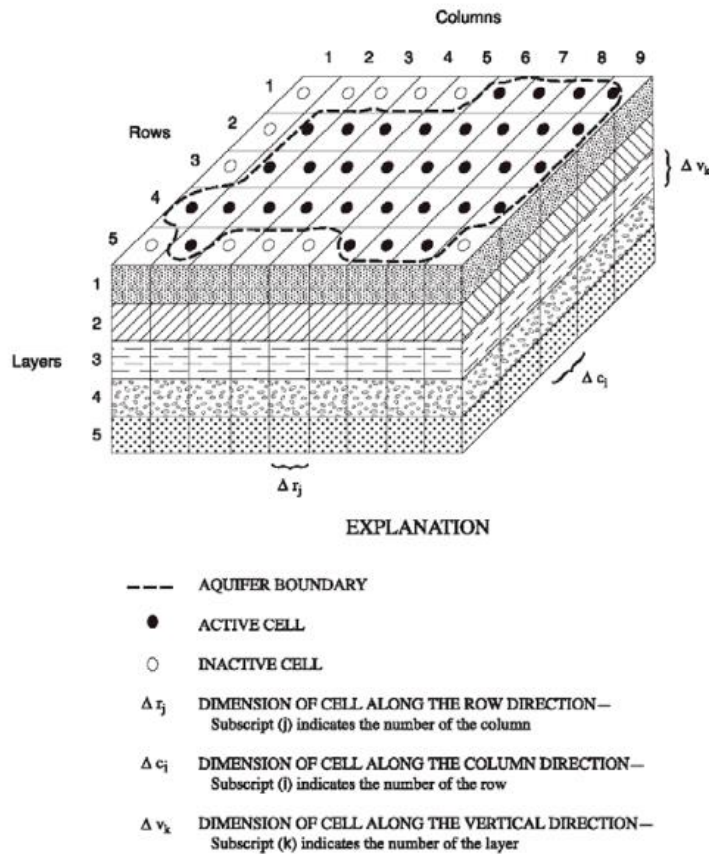


Figura 3.6 - Discretização de um aquífero hipotético (Harbaugh, 2005)

O fluxo em cada célula do modelo é calculado assumindo-se que o caudal de entrada e saída de cada célula é igual à taxa de variação do armazenamento, se se considerar que a densidade da água é constante, a expressão que define o fluxo numa célula é:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

Equação 3.2 - Equação descritiva do caudal numa dada célula

Onde:

Q_i - Caudal de entrada na célula (L³/T).

S_s - Representa o armazenamento específico (L⁻¹)

V - Representa o volume da célula (L^3)

h - Representa a altura piezometria (L)

t - Representa o tempo. (T)

TRATAMENTO DE DADOS

Foi considerada toda informação de base disponibilizada referente a sondagens e instalação de piezómetros que se realizaram na zona no âmbito de estudos para a caracterização geoambiental da zona (Brito, 2005; Golder, 2010) durante o ano de 2010 sendo que foram selecionadas as litologias presentes desde a superfície do terreno até à cota -4.9 metros.

O primeiro passo no tratamento de dados consistiu na organização dos dados obtidos em estudos anteriores e seguiu a metodologia seguinte:

- I. Correção das coordenadas das sondagens e da informação adicional para o sistema de coordenadas Hayfor-Gauss, Datum Lisboa, sempre que necessário;
- II. Estudo das colunas litológicas de cada sondagem na área de estudo para estabelecimento das litologias existentes na zona;
- III. Estudo dos níveis piezométrico a partir da informação proveniente das campanhas de amostragem realizadas;
- IV. Criação de um documento Excel com informação de cada sondagem, nomeadamente nome da sondagem, coordenadas da boca da sondagem, litologias e profundidades inicial e final;

4.1 Dados litológicos

O tratamento de dados da componente litológica consistiu na análise e categorização das litologias provenientes de 145 sondagens para recolha de amostras e instalação de piezómetros, realizadas na área de estudo (fig.4.1). Esta análise permitiu a compreensão do nível de complexidade litológica da zona.

Existe uma grande variabilidade na profundidades atingidas pelas várias sondagens realizadas na zona sendo que a profundidade máxima atingida foi de 13.5 m e a mínima de 0.5 m. A média das profundidades atingidas foi de aproximadamente 6 m e a disparidade de profundidades atingidas é visível na fig.(4.2).

Através da análise das sondagens, bibliografia estudada e da análise da carta geológica da zona é possível afirmar que a zona é principalmente composta por areias e alguns níveis com intercalações ou teores de argilas/siltos.

Após o estudo das informações provenientes das sondagens foram determinadas cerca de 60 litologias diferentes, estas foram analisadas e reclassificadas em litogrupos com características semelhantes, neste caso por semelhança de permeabilidades (tab.4.1).

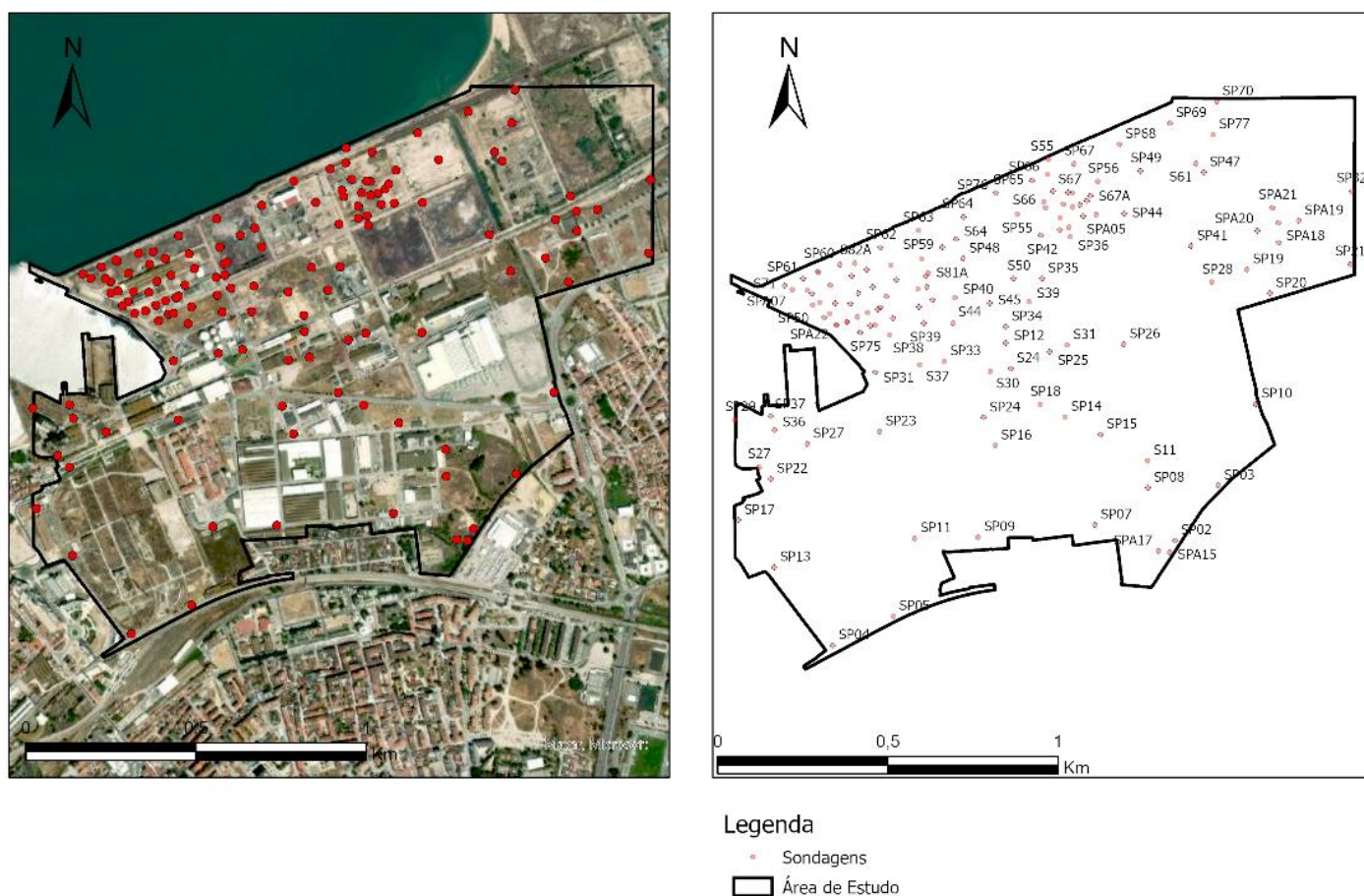


Figura 4.1 - Distribuição das sondagens na zona em estudo

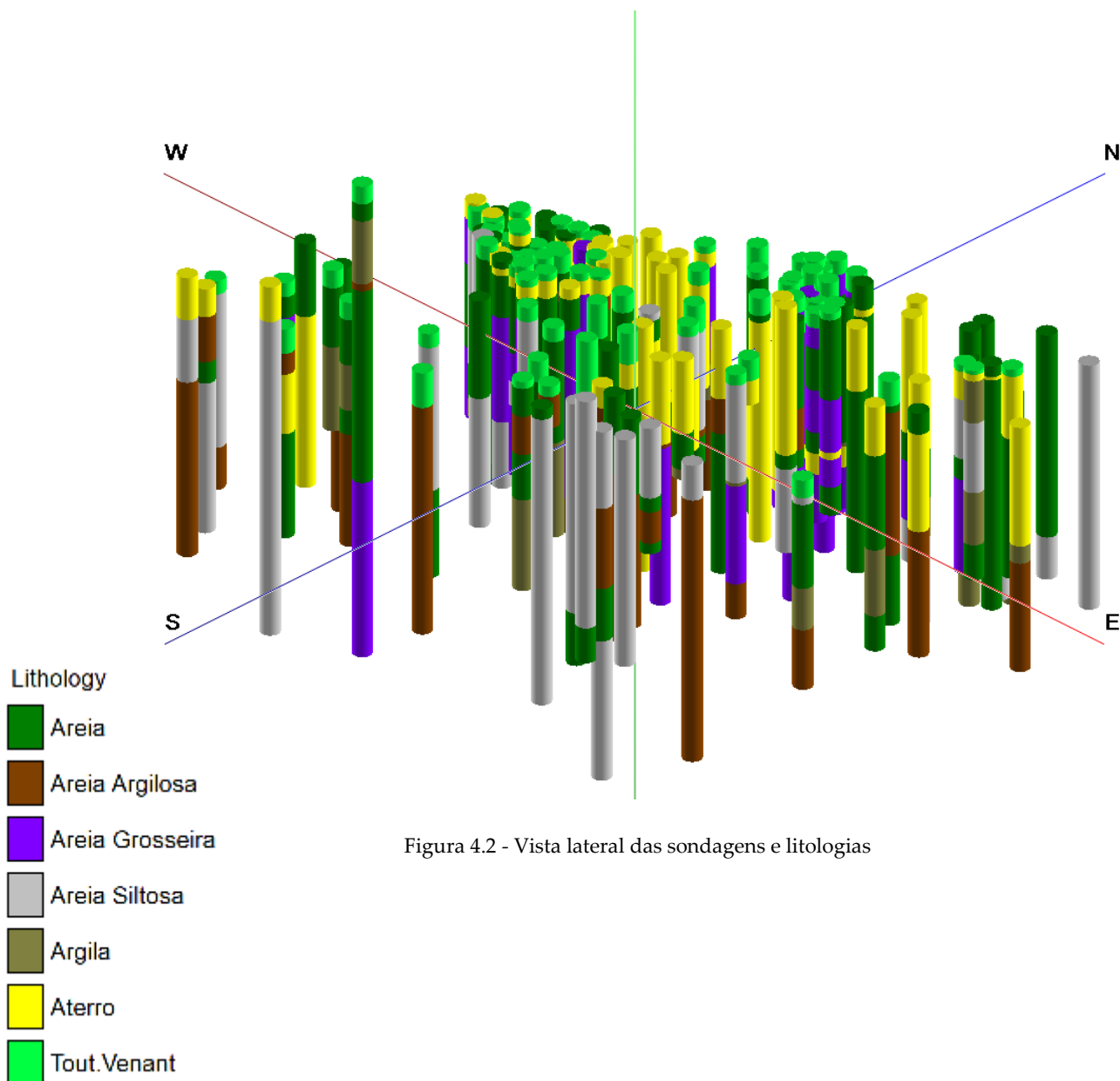


Figura 4.2 - Vista lateral das sondagens e litologias

Tabela 4.1 - Litologias presentes nas sondagens e litogrupos definidos

Nº	Litogrupo	Litologias
1	Areias	Areias finas a médias
		Areias médias a finas(c/seixos)
2	Areias Argilosas	Areias médias argilosa
		Areias fina argilosas
		Areias médias a finas argilosas
		Areias média a fina lodosa
		Areias com intercalações argilosas
3	Areias Grosseiras	Areias médias a grosseiras (c/seixos e restos de conchas)
		Areias médias a grosseiras
		Areias grosseiras
4	Areias Siltosas	Areias médias a grosseiras
		Areias médias a finas siltosas(c/seixos e restos de conchas)
5	Argilas	Argilas
		Argilas arenosas
		Lodos
6	Aterros Pirite	
7	Aterros Fosfogesso	
8	Aterros RCD	
9	Aterros Cal	
10	Lamas de Zinco	
11	Litologias com misturas de aterros	
12	Tout-Venant	Tout-venant
		Areias com tout-venant

As litologias compostas unicamente por areias na zona foram divididas em Areias e Areias Grosseiras, onde as Areias consistem em todas as areias presentes cuja granulometria varia entre o fino e o médio e as Areias Grosseiras todas as areias cuja granulometria varia entre o médio e o grosseiro.

Nos raros casos onde a granulometria da areia não foi indicada considerou-se essa areia como uma areia média e por esse modo colocada no litogrupo das areias.

Os litogrupos das Areias Argilosas, Areias Siltosas, Argila e Tout-Venant consistem em todas as litologias de areia argilosas, areias siltosas, argila e tout-venant agrupadas respetivamente.

Para criação do modelo numérico de escoamento foi necessário agrupar as várias litologias de aterro num único litogrupo de aterro. Para tal passou-se de 12 litogrupos considerados para apenas 7.

O litogrupo dos Aterros (tab.4.2) consiste no agrupamento de todas as litologias compostas por aterros, estes foram considerados um único litogrupo ao invés de litogrupos individuais devido ao facto de estes com alguma frequência surgirem ambos na mesma unidade litológica e devido a falta de estudos realizados sobre as suas características hidrogeológicas.

Tabela 4.2 - Litogrupo dos Aterros e litologias constituintes

Nº	Litogrupo	Litologias
6	Aterros	Aterros Pirite
		Aterros Fosfogesso
		Aterros RCD
		Aterros Cal
		Lamas de Zinco
		Litologias com mistura de aterros

Durante o tratamento de dados para criação da base de dados necessária para o RockWorks20 foi feita uma simplificação na informação proveniente das sondagens, nomeadamente nas sondagens onde existem mais que uma litologia de aterro, podendo estas ser iguais ou diferentes, classificou-se as litologias entre esses dois aterros como aterro também.

Esta simplificação foi feita por duas razões:

- I. Em algumas sondagens, estas litologias intermédias possuem uma espessura inferior a 1 metro ao que se considerou que a sua influência seria baixa. Ex. fig.4.3 - sondagem S81;

- II. Nas restantes, com a ideia de modelação de transporte de contaminantes, há casos onde a espessura dos aterros é inferior a um metro, mas sendo a sua existência importante considerou-se que seria necessário agrupar essas litologias como aterro para que houvesse representatividade; Ex. fig.4.4 - Sondagem S65A;

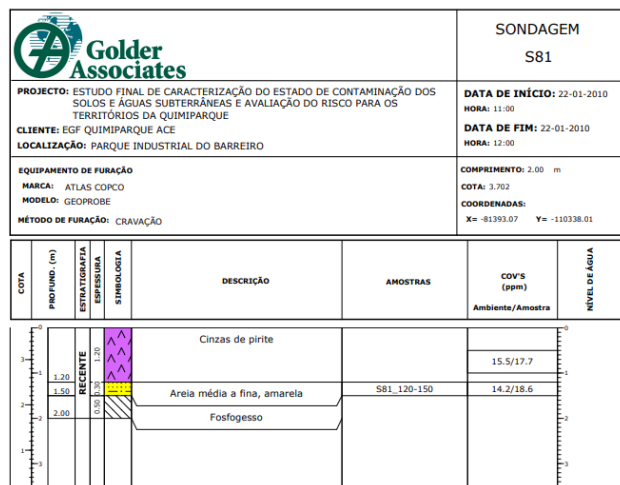


Figura 4.3 - Registo sondagem S81

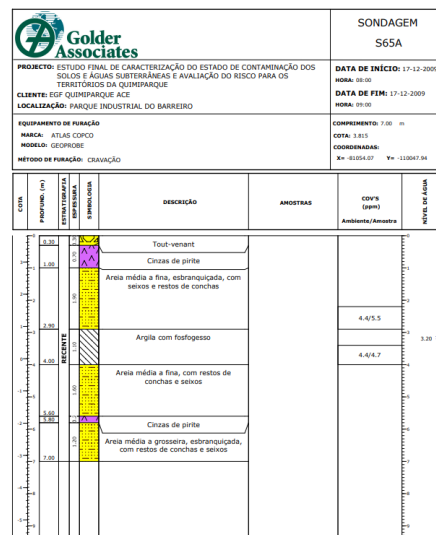


Figura 4.4 - Registo sondagem S65A

4.1.1 Análise estatística dos litogrupos

Foi feita também uma análise estatística aos litogrupos definidos de modo a mostrar a representatividade destes na zona, para tal foram contabilizados os troços de cada litogrupo e respetiva espessura após o qual se calculou as proporções existentes, o resultado está exposto na tab.4.3.

Rapidamente se verifica que as areias são o litogrupo mais representado na área, seguido pelo litogrupos dos aterros e as areias siltosas/grosseiras/argilosas, a argila e o tout-venant. Tal está em concordância com a situação esperada, tendo em conta a posição da zona estudada na carta geológica de Portugal 34-D, as formações presentes são a Formação de Santa Marta e formações de aterros e/ou areias, ambas predominantemente compostas por areias.

Tabela 4.3 - Litogrupos e respectivas proporções

Litogrupo	Troços	Espessura total (m)	%
Areia	138	269.1	31.276
Areia siltosa	55	146.2	16.992
Areia grosseira	77	140.5	16.329
Areia argilosa	40	84.3	9.798
Argila	35	35.7	4.149
Aterros	87	153.5	17.84
Tout-venant	75	31.1	3.615
	Total	860.4	100%

4.2 Dados piezométricos

Os dados piezométricos são provenientes de 106 piezómetros instalados na zona cujos dados foram recolhidos em várias rondas de amostragens durante os meses de janeiro, fevereiro, março, maio, junho, julho e agosto de 2010.

Para o tratamento de dados foi feita a consulta dos dados das marés referentes ao ano de 2010, durante as horas onde se estava a proceder a recolha das piezometrias e registo dos parâmetros físico-químicos, através dos dados disponíveis para consulta do Instituto Hidrográfico (tab.4.4) relativamente à bóia mais próxima da área em estudo, a qual, neste caso se refere aos dados provenientes da bóia de Lisboa.

O número de piezómetros amostrados varia de mês para mês. Com o intuito de criar um mapa estimado de piezometrias para a zona foram considerados apenas os meses com o maior nº de amostragens.

Inicialmente os meses escolhidos foram os meses de fevereiro e maio com 59 e 42 amostragens respetivamente. Sendo que a zona está sujeita a variações de marés torna-se necessário ainda dividir os resultados recolhidos em amostragens durante a preia-mar e a baixa-mar. Após este tratamento de dados, a piezometria escolhida foi a do mês de fevereiro durante a preia-mar (fig.4.5).

Estes dados foram então importados para o ArcGIS Pro de modo a modelar um mapa piezométrico (fig.4.6), por krigagem normal, para uso na construção do modelo de escoamentos no PMWIN.

Este mapa apresenta alguns artefactos nas zonas mais afastadas devido à falta de pontos para integrar na modelação, a matriz resultante desta modelação vai ter todos os pontos acima do limite norte da zona convertidos em zero, sendo que estes correspondem ao Rio Tejo e para o modelo de escoamentos assumiu-se que a sua cota piezométrica é zero.

A piezometria é máxima nos limites a Sul e Sudoeste e os níveis piezométricos diminuem em direção a Norte como seria de esperar embora haja uma diminuição acentuada na zona sudoeste devido a presença da Vala Real, sendo que esta e o Rio Tejo servem como pontos de descarga.

Tabela 4.4 - Dados das marés referentes ao mês de fevereiro de 2010

Data	Preia-Mar	Baixa-Mar
10/2/2010	7:04 - 13:28	13:28 - 19:14
18/2/2010	11:17 - 17:46	5:29 - 11:17
		17:46 - 23:29
19/2/2010	11:29 - 18:19	6:02 - 11:29
22/10/2010	14:16 - 21:03	8:23 - 14:16
23/10/2010	15:19 - 22:36	9:51 - 15:19
24/10/2010	4:50 - 11:28	11:28 - 17:21
25/10/2010	6:10 - 12:43	12:43 - 18:32
26/2/2010	7:10 - 13:41	13:41 - 19:27

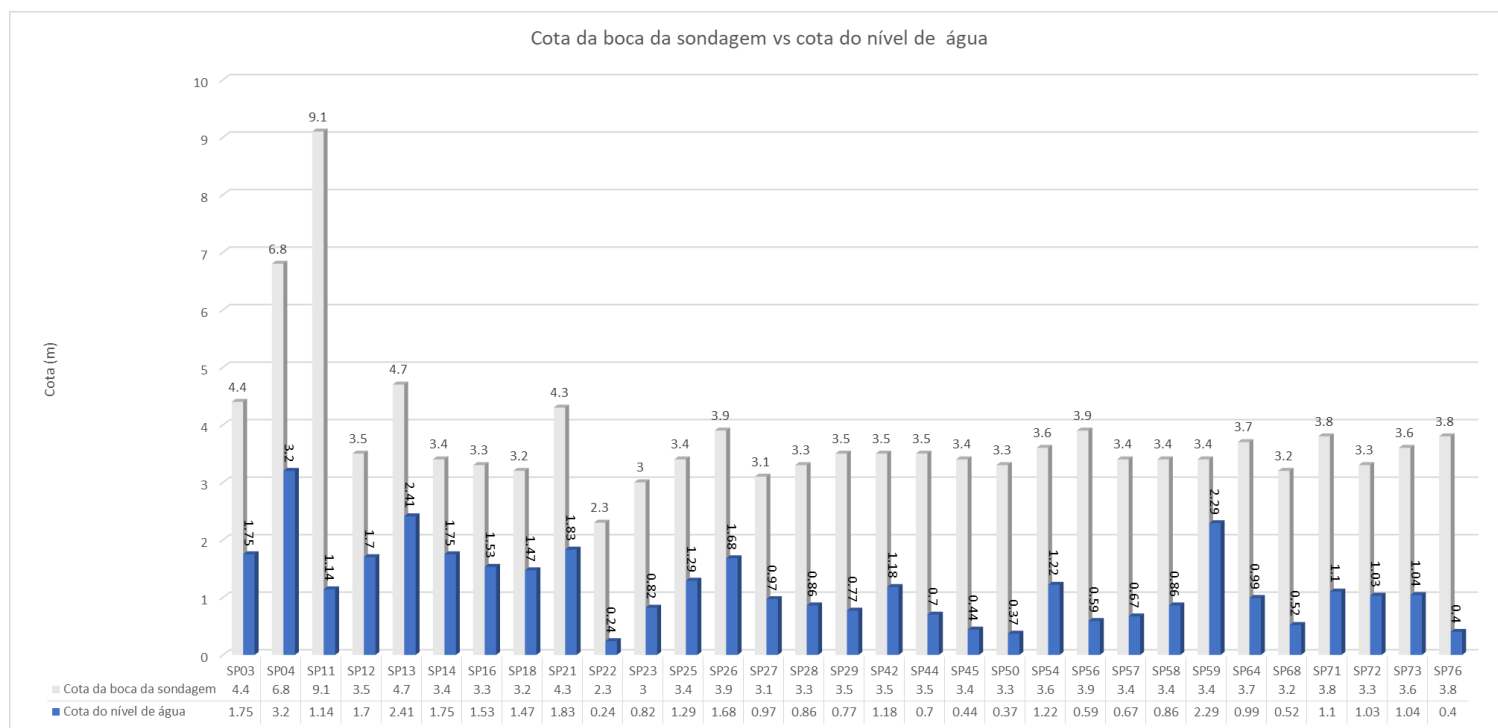


Figura 4.6 - Dados referentes às piezometrias amostradas em fevereiro de 2010

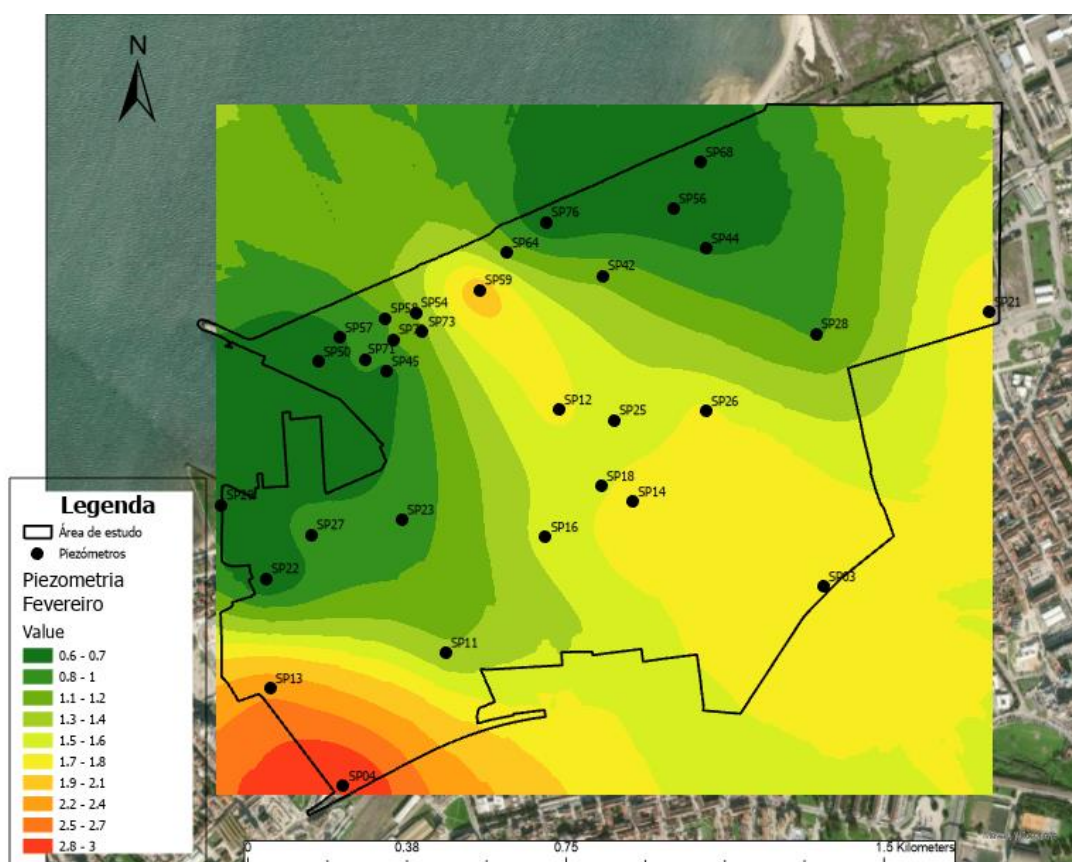


Figura 4.5 - Resultado da modelação da piezometria na zona

CASO DE ESTUDO

5.1 Modelo conceptual

A zona em si, como já foi referido anteriormente, trata-se de uma área extremamente complexa em termos da sua heterogeneidade litológica, esta teve origem nos projetos de expansão dos terrenos do PEB pela CUF, através de materiais provenientes de dragagens do rio Tejo e materiais provenientes da laboração das indústrias, que levaram a ocorrência de variações horizontais e verticais de características hidrológicas significativas.

Com base nos dados iniciais das campanhas de sondagens realizadas na zona durante o ano de 2010, da análise da Carta Geológica 34-D e estudo dos parâmetros hidrogeológicos das litologias existentes foi possível definir vários modelos conceptuais que abrangem a litologia e a hidrogeologia do sistema de aquífero presente.

O modelo conceptual litológico (fig.5.1) encontra-se individualizado em 2 unidades, sendo uma desta composta por depósitos sedimentares pertencentes ao Pliocénico e Holocénico, estes depósitos constituem as unidades litológicas de areias que servem de base ao modelo.

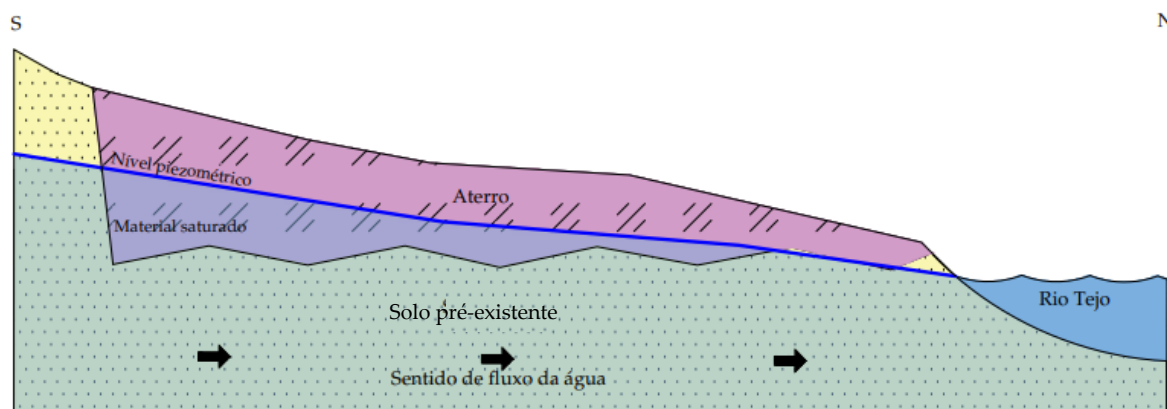


Figura 5.1 - Modelo conceptual da zona (não está a escala)

A topo destes depósitos sedimentares encontra-se a segunda unidade composta por níveis de aterros de origens industriais, intercalados com níveis compostos por areias, areias com teores de siltes ou argilas e argilas.

Sendo o objetivo da presente dissertação o aumento do nível de conhecimento sobre o funcionamento dos escoamentos subterrâneos é necessário também considerar um modelo conceptual hidrogeológico. Este caso de estudo considera apenas as litologias até a cota de -4.9m, significando que se encontra enquadrado totalmente no aquífero livre superficial da zona do PEB, logo, terá total correspondência com o modelo litológico conceptual estabelecido.

O foco de estudo serão as unidades de aterro industriais e as suas características e influência nos fluxos de águas e na forma como alteram os fluxos originais espectáveis, caso não existissem depósitos destes materiais alóctones.

O modelo conceptual do sistema aquífero no local é caracterizado por uma piezometria que, de modo geral, diminui para norte na direção do Rio Tejo, esta diminuição causa níveis piezométricos baixos na zona o que leva à existência de algumas litologias de aterro que não estão em contacto com a zona saturada.

5.2 Modelo litológico 3D

O resultado da modelação realizada através do software RockWorks20 é o modelo apresentado na fig.5.2, foi feito também um modelo pelo algoritmo de "Highest Probability"(fig.5.3) para comparação, sendo que existem superficialmente algumas diferenças pontuais,

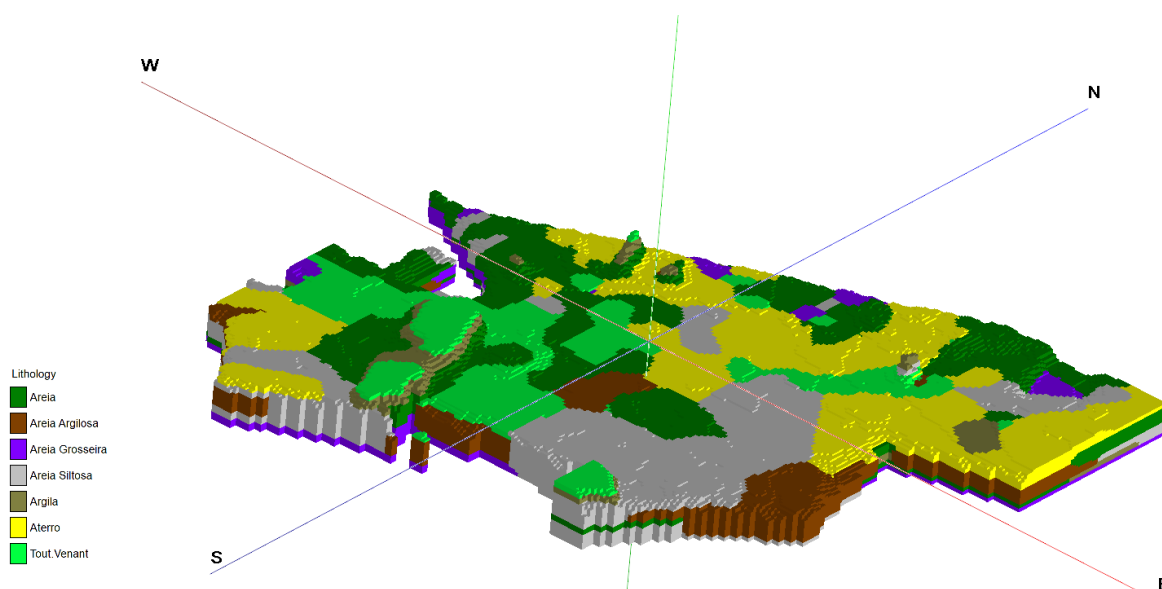


Figura 5.2 - Resultado da modelação por "Lateral Extrusion"

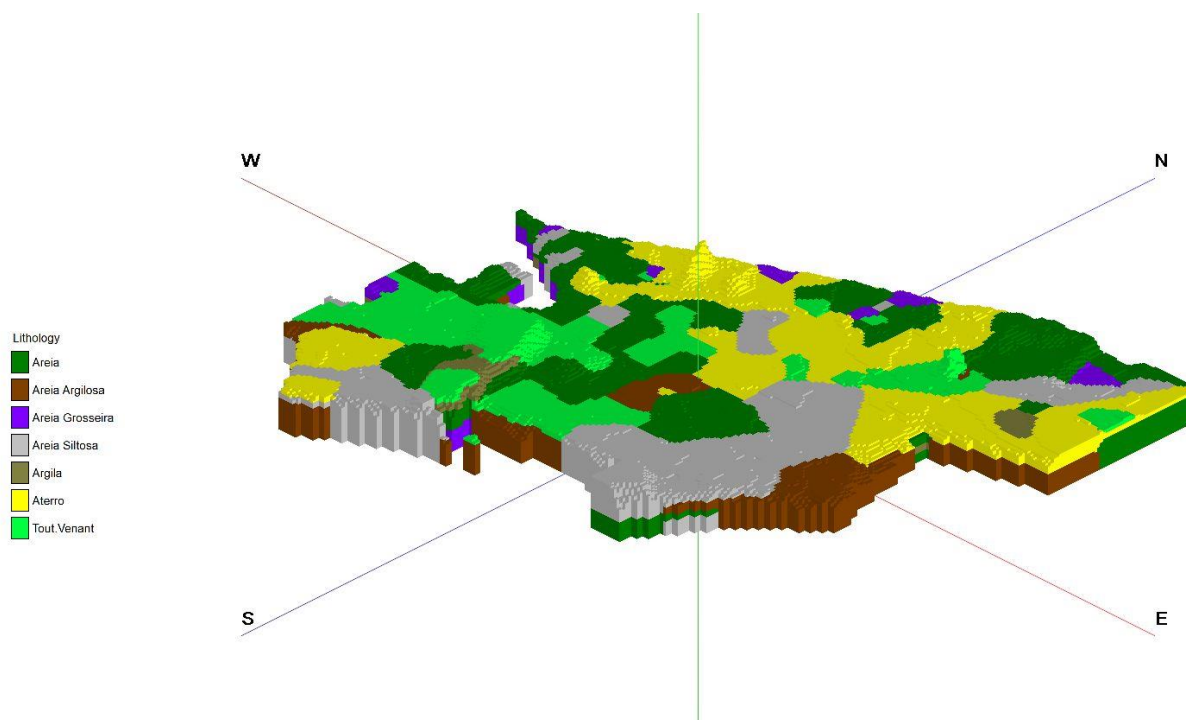


Figura 5.3 - Resultado da modelação por "Highest Probability"

mas no geral estes são semelhantes, a maior diferença surge quando se analisa o desenvolvimento em profundidade (fig.5.4 e 5.5) onde, como já tinha sido referido anteriormente o algoritmo de "Highest Probability" dá continuidade vertical litologias.

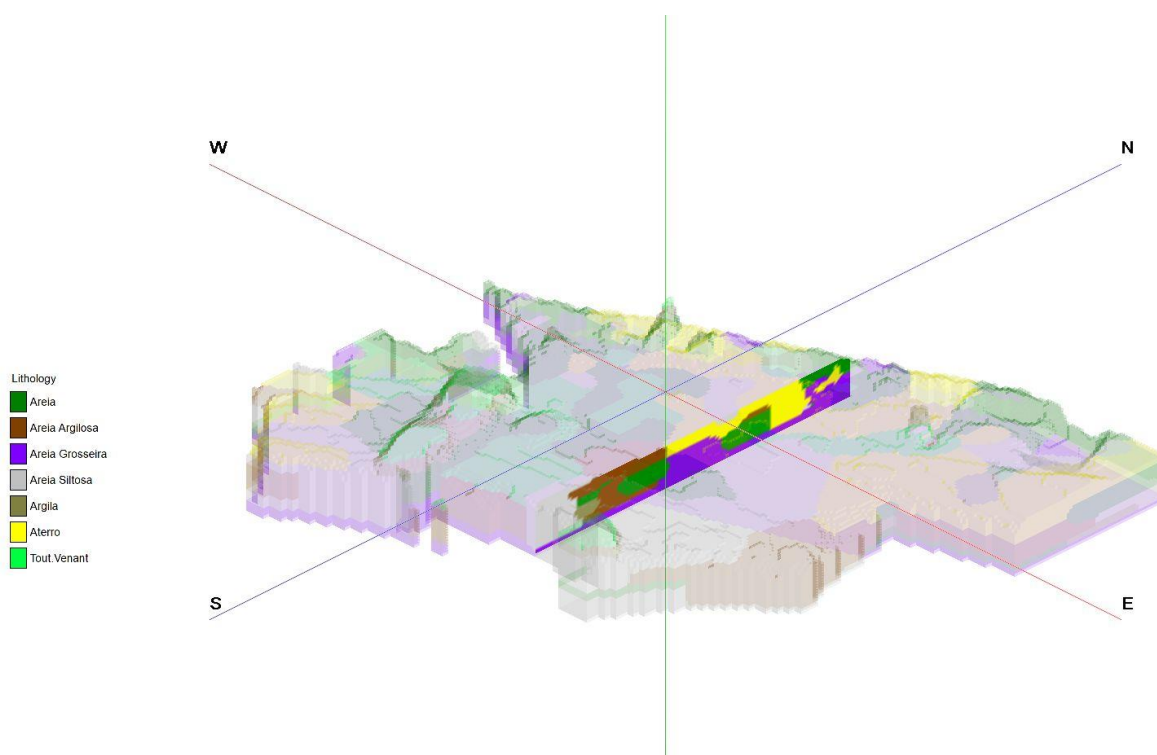


Figura 5.4 - Corte S-N do modelo por Extrusão Lateral

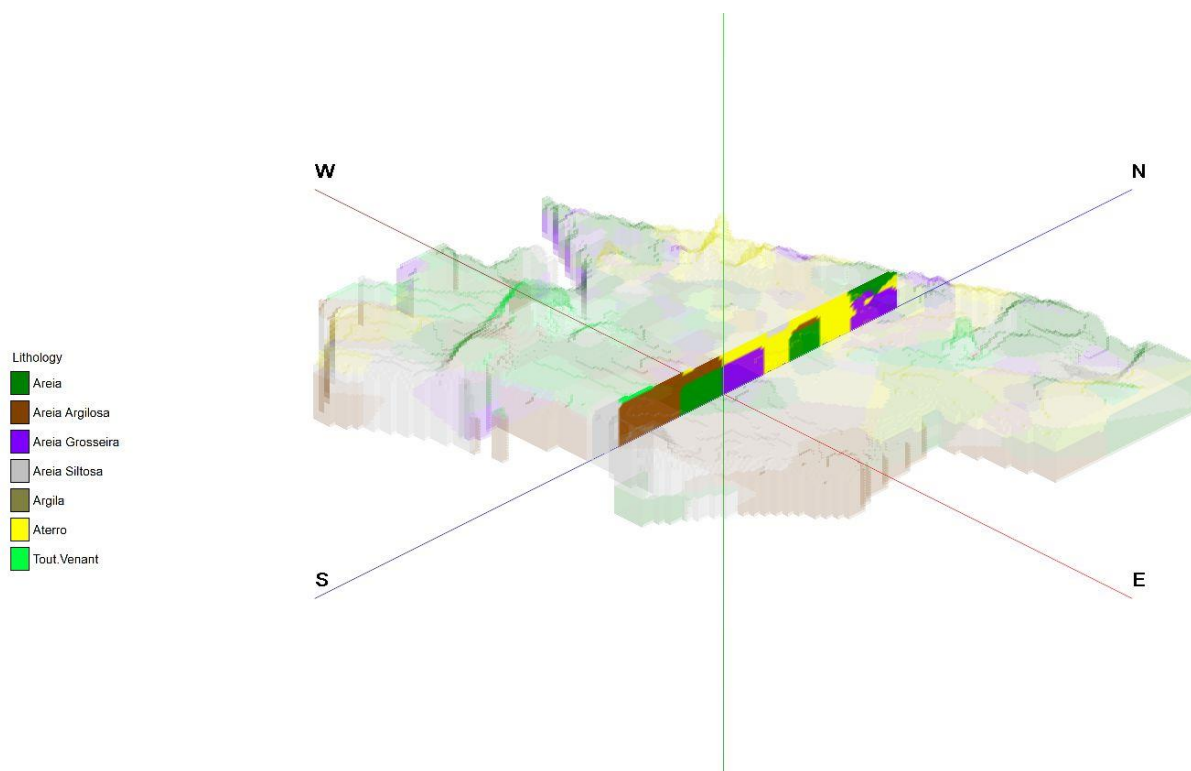


Figura 5.5 - Corte S-N do modelo por Highest Probability

5.3 Modelo hidrogeológico

Devido às características inerentes da zona em estudo, tal como na construção do modelo litológico 3D, existem alguns desafios na construção de um modelo hidrogeológico que impossibilitam que este seja completamente representativo para o Parque Empresarial do Barreiro. Esta dificuldade provém nomeadamente da alta heterogeneidade litológica e da pouca profundidade atingida pelas sondagens

Para além dos problemas acima referidos é também necessário indicar que aquando da construção do modelo litológico foi necessário considerar uma escala vertical elevada visto que se trata de um modelo em que apenas se estuda uma única unidade hidrogeológica, nomeadamente o aquífero livre, até a cota -4.9 m.

Devido a estas características e a alguns constrangimentos impostos pelo PMWIN foi necessário primeiro fazer uma adaptação do modelo litológico 3D para que este pudesse ser usado na construção do modelo numérico de escoamentos

A maior preocupação proveniente desta adaptação encontra-se na necessidade de minimizar a perda de qualidade de informação de modo que o modelo final de escoamentos seja o mais próximo possível da realidade.

5.3.1 Adaptação do modelo litológico

O RockWorks20 não permite uma exportação direta de dados para o PMWIN, sendo necessário exportar previamente o modelo como um ficheiro ASCII GRID para o ARCGIS PRO, onde depois é necessário transformar a malha de pontos em ficheiros raster que representem as unidades individuais do modelo. No total foram definidas 24 layers (tab.5.1) em que cada um destes representa uma fatia do modelo geológico num dado intervalo de cotas.

Nesta situação, como foi referido anteriormente, a única unidade hidrogeológica que está representada é o aquífero livre, sendo este então o objeto de estudo. Este sistema irá variar lateralmente e em profundidade nas suas propriedades hidrogeológicas conforme as intersecções de materiais alóctones e variações na granulometria.

Como não foi possível obter os dados das litologias existentes na base do rio Tejo e sendo estas necessárias à modelação, as mesmas foram definidas como areias siltosas com base nas bibliografias consultadas.

Tabela 5.1 - Cotas de topo e base das unidades do modelo

Layer	Cota topo (m)	Cota base (m)
1	Superfície altimétrica	7.1
2	7.1	6.6
3	6.6	6.1
4	6.1	5.6
5	5.6	5.1
6	5.1	4.6
7	4.6	4.1
8	4.1	3.6
9	3.6	3.1
10	3.1	2.6
11	2.6	2.1
12	2.1	1.6
13	1.6	1.1
14	1.1	0.6
15	0.6	0.1
16	0.1	-0.4
17	-0.4	-0.9
18	-0.9	-1.4
19	-1.4	-1.9
20	-1.9	-2.4
21	-2.4	-2.9
22	-2.9	-3.4
23	-3.4	-3.9
24	-3.9	-6

5.4 Modelo hidrogeológico

5.4.1 Malha do modelo

Para a estruturação do modelo hidrogeológico no PMWIN, que posteriormente serviu para o cálculo do modelo de escoamentos, modelou-se a área de estudo segundo os mesmos parâmetros utilizados para a construção do modelo litológico, ou seja, uma matriz com 182x162.

Visto que as últimas duas unidades do modelo litológico são idênticas estas foram agrupadas, logo a malha (grid) do modelo de escoamento está dividida em 24 unidades, onde cada uma destas corresponde a um "layer" proveniente do modelo litológico. Todas as unidades são definidas como unidades do tipo aquífero livre onde a transmissividade varia.

A partir da unidade 16, devido a modelação da condição fronteira de River e sendo que não foi possível obter a batimetria do Rio Tejo, foi definido um declive artificial de -1.5m ao longo de 3 células adjacentes as células cuja cota é 0 de modo a simular a variação de profundidade do rio na direção norte.

5.4.2 Condições fronteira

Devido à complexidade e geometria da zona considerou-se adequado estabelecer as seguintes condições fronteiras:

Condição fronteira "No Flow" (fig.5.7) – Em cada unidade do modelo são apenas consideradas ativas as células onde existe uma litologia definida pelo modelo geológico e cuja cota se encontra dentro da gama de valores de cota definidos para essa unidade, como seria de esperar o número de células ativas aumenta a medida que se desce no modelo até a unidade 16, sendo que a partir desta unidade a condição fronteira se mantém igual até a base do modelo.

Condição fronteira "River" (fig.5.8) – Esta condição fronteira foi definida na unidade 16, que corresponde as cotas altimétricas entre -0.4 a 0.1 m, a condição fronteira foi imposta nesta unidade pois considerou-se que a superfície do rio se encontra a cota 0.

A condutância do rio é definida pela equação abaixo:

$$C = \frac{KLW}{M}$$

Equação 5.1 Condutância de um rio no PMWIN

Onde:

K - Condutividade hidráulica do sedimento que compõe o leito do rio

L - Comprimento da célula

W - Largura da célula

M - Espessura de sedimento na base do rio

Para a situação em estudo definiu-se a condutância com o valor de 0.0025, onde os sedimentos de base do rio foram definidos como areia siltosa, com espessura de 0.10m e $k=2.5 \times 10^{-6}$ m/s. M e L foram definidos com a mesma dimensão que as células do modelo. Note-se que para efeitos de modelação apenas se considera uma estreita interface com o rio e não uma extensão mais considerável do mesmo. Pretende-se, assim, ter uma ideia das afluências ao rio e não estudar as inter-relações entre os sistemas "rio" e "unidade aquífera superficial".

Condição fronteira "Constant Head" (fig.5.9) – Esta condição fronteira foi aplicada na fronteira sul do modelo da layer 25 até layer 10.

Condição de permeabilidade e porosidade máxima (fig.5.10) – Esta condição serve para modelar a existência da Vala Real, sendo que esta atravessa a zona Este do modelo, com sentido aproximadamente sul-norte, tendo início fora da zona e terminando no Rio Tejo. Foi definida da layer 9 a layer 15.

Condição fronteira "Recharge" - Foi definida com o valor de 146.3 mm, que foi o valor registado pelo SNIRH para o mês de fevereiro de 2010.

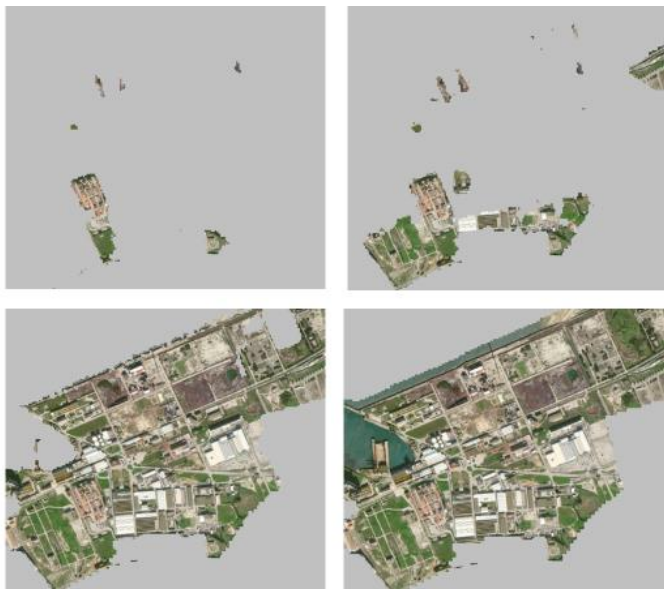


Figura 5.6 - Condições fronteira "No Flow"

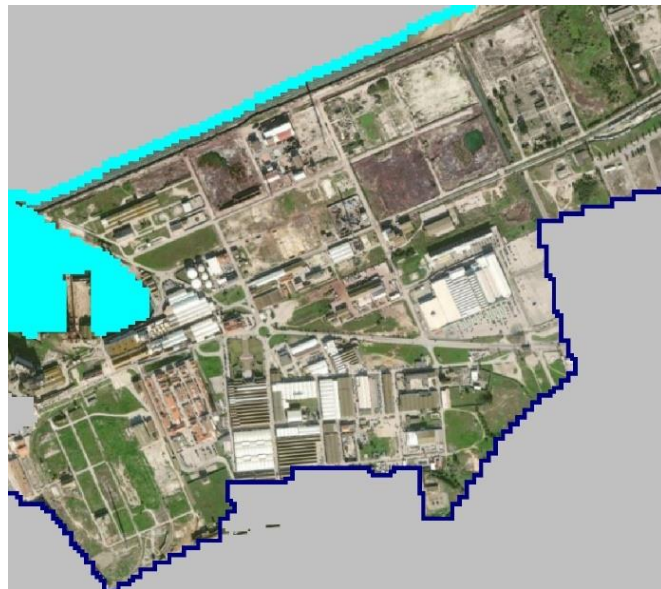


Figura 5.7 - Condição fronteira "River"



Figura 5.8 - Condição fronteira "Constant Head"



Figura 5.9 - Condição permeabilidade e porosidade máxima

5.4.1 Parâmetros hidráulicos

Os parâmetros hidrogeológicos utilizados para cada um dos litogrupos foram definidos de acordo com a tabela abaixo (tab.5.2) a partir das seguintes bibliografias: Das, B(2008), Rotz, (2021), Portelinha, F.(2012) e Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of Soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers

Tabela 5.2 - Parâmetros hidrogeológicos considerados para cada litogrupo

Litogrupo	1	2	3	4	5	6	7
Litologia	Areia	Areia argilosa	Areia grosseira	Areia siltosa	Argila	Aterro	Tout-venant
Porosidade efetiva (%)	0.31	0.15	0.3	0.2	0.095	0.2	0.285
K_h (m/s)	2.23×10^{-3}	2.75×10^{-6}	1×10^{-2}	2.5×10^{-6}	2.53×10^{-8}	1×10^{-5}	1×10^{-1}
K_v (m/s)	2.23×10^{-4}	2.75×10^{-7}	1E^{-3}	2.5×10^{-7}	2.53×10^{-9}	1×10^{-6}	1×10^{-2}

Para estes parâmetros, na bibliografia consultada, no caso de existir uma gama de valores, foi considerado o valor médio.

Existem vários fatores que influenciam estes parâmetros e estes devem ser tomados em consideração. No entanto como não existem dados disponíveis sobre alguns dos materiais existentes na zona (particularmente informações referentes aos resíduos) foi necessário recorrer a valores teóricos gerais. Esta decisão pode causar algumas situações anómalas adiante aquando da construção do modelo de fluxo e levar á necessidade de reajustamentos na fase de análise de sensibilidade do modelo. Esta falta de informação é parte da razão pela qual se agruparam os vários aterros de materiais diferentes num único litogrupo com um comportamento semelhante.

O consenso é que estes materiais são de baixa permeabilidade com comportamentos semelhantes a areias argilosas ou siltes, mas a falta de estudo impossibilita a análise das variações espaciais dentro das litologias presentes no aquífero o que pode vir a ter consequências na fiabilidade do modelo final em certas regiões específicas.

Foram feitas tentativas de as recriar variações dos parâmetros hidrogeológicos entre os vários tipos de resíduos existentes, no entanto as soluções derivadas desses modelos exibiam comportamentos pouco realistas e não representativos da realidade existente. Só após estes serem agrupados é que se alcançou soluções que podem ser consideradas como aceitáveis.

É ainda de referir que existem alguns valores calculados em laboratório para a zona, em estudos anteriores para as areias siltosas e areias mal graduadas, sendo que estes valores estão dentro da gama de valores presentes em bibliografias para estas litologias.

No caso dos aterros compostos por cinzas de pirite, lamas de zinco, cal, etc. não há estudos realizados que permitam definir valores objetivos, no entanto a APA comenta o comportamento do fosfogesso como semelhante ao de uma silte.

Com base nos parâmetros definidos as unidades do modelo foram definidas do modo apresentado pela fig.5.11.

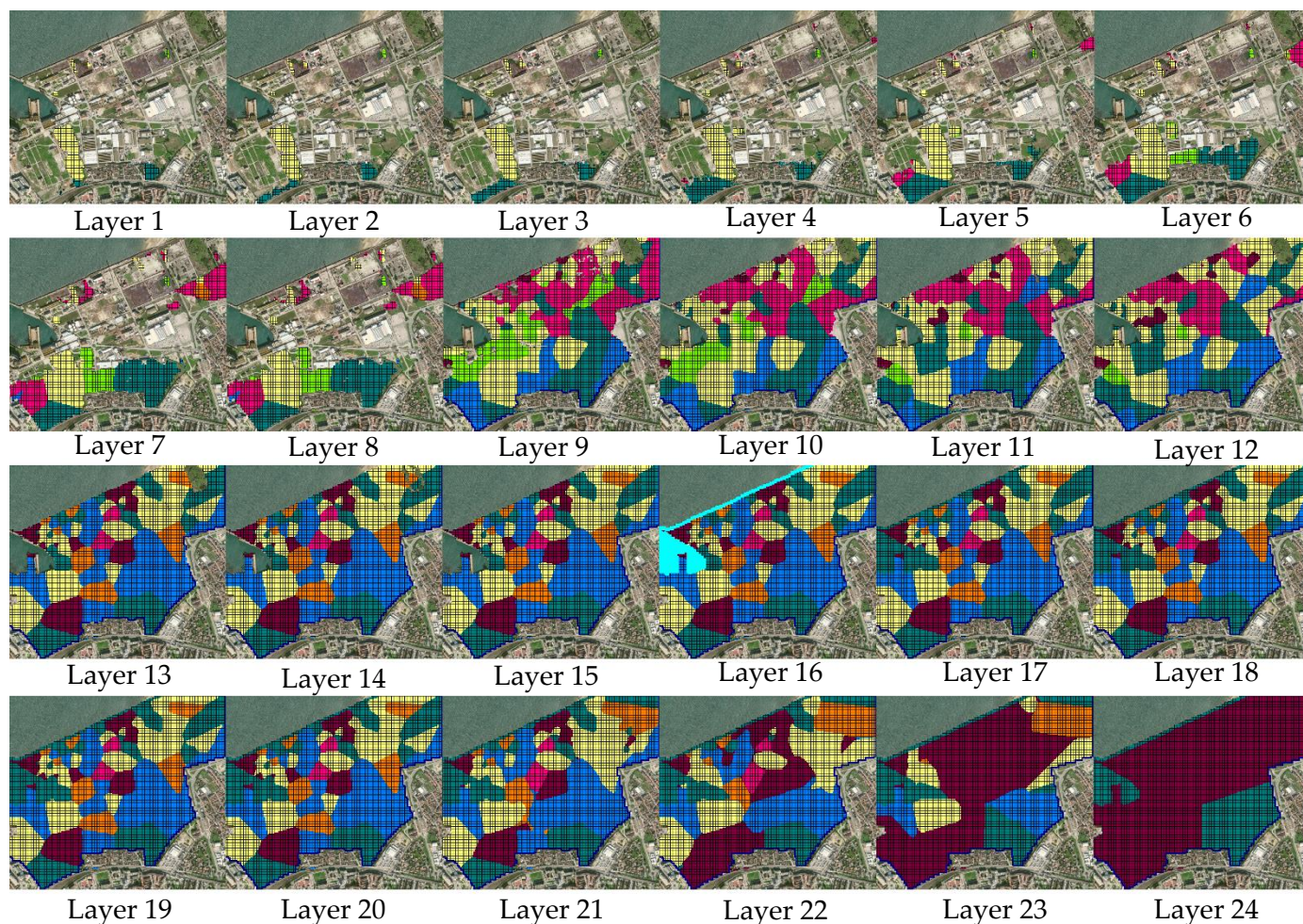


Figura 5.10 - Litologias e parâmetros hidráulicos presentes em cada unidade do modelo hidrogeológico

Cor	Nº	Litogrupo	Porosidade efectiva (%)	K_h (m/s)	K_v (m/s)
Amarelo	1	Areia	0.31	2.23×10^{-3}	2.23×10^{-4}
Verde	2	Areia Argilosa	0.15	2.75×10^{-6}	2.75×10^{-7}
Vermelho	3	Areia Grosseira	0.3	1×10^{-2}	1×10^{-3}
Azul	4	Areia Siltosa	0.2	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-7}
Laranja	5	Argila	0.095	2.53×10^{-8}	2.53×10^{-9}
Roxo	6	Aterro	0.2	1×10^{-5}	1×10^{-6}
Verde Claro	7	Tout-Venant	0.285	1×10^{-1}	1×10^{-2}

5.5 Modelo de escoamento

Com o modelo conceptual hidrogeológico obtido e as características hidrogeológicas das unidades litológicas presentes é de se esperar que o fluxo verificado na zona seja baixo, isto

deve-se, como já foi referido, as permeabilidades muito baixas dos materiais que compõem os aterros.

O modelo de escoamento criado com o software PMWIN, foi analisado em detalhe através do seu módulo PMPATH. Este módulo permite visualizar seções do modelo, efeito das isopiezas e de rebaixamento hidráulico e analisar possíveis fenómenos de transporte advectivo.

O modelo de escoamento da área, de facto apresenta velocidades de fluxo baixas, sendo que as exceções existentes estão associadas à existência da Vala Real e as unidades de areias e areias grosseiras nas zonas limite da área, no contacto entre o parque empresarial e o rio Tejo.

A direção do fluxo, em todas as unidades, possui um sentido principal para NNW em direção ao estuário e secundário nas litologias em redor a Vala Real, sendo que este se processa inicialmente em direção a vala e após volta para a direção principal de NNW.

O fluxo é altamente influenciado pela elevada heterogeneidade das características hidrogeológicas dos materiais presentes. A água, no seu deslocamento natural para o ponto piezométrico mais baixo, cria canais preferenciais de passagem associados as litologias com maior permeabilidade havendo exceções nas litologias em redor a Vala Real, estas têm o fluxo em direção a vale independentemente das características das unidades em redor.

Para análise do modelo foi feita uma observação em detalhe da unidade 13, esta unidade é a primeira que se pode considerar como descritiva da área abaixo do N.F, ou seja solo saturado.

As manchas a vermelho no modelo de escoamento fig.5.12 representam as zonas de maior fluxo que se encontram associadas a zonas de maior permeabilidade, descritas a branco no modelo litológico e são compostas pelos litogrupos pertencentes às areias e areias grosseiras. A restante área é composta por litologias menos permeáveis, a cinzento no modelo litológico.

As camadas inferiores são praticamente idênticas em termos de fluxo, sendo este extremamente baixo, a percolação horizontal e vertical nestas camadas é mínima o que causa com que a água fique retida nestas.

Só a partir da layer 22 (fig.5.13) é que existe uma diferença significativa no comportamento do escoamento, na layer 23 e 24 o escoamento é feito através das unidades de areias grosseiras e areias, onde se criam canais preferenciais de passagem rodeados pelas unidades menos permeáveis.

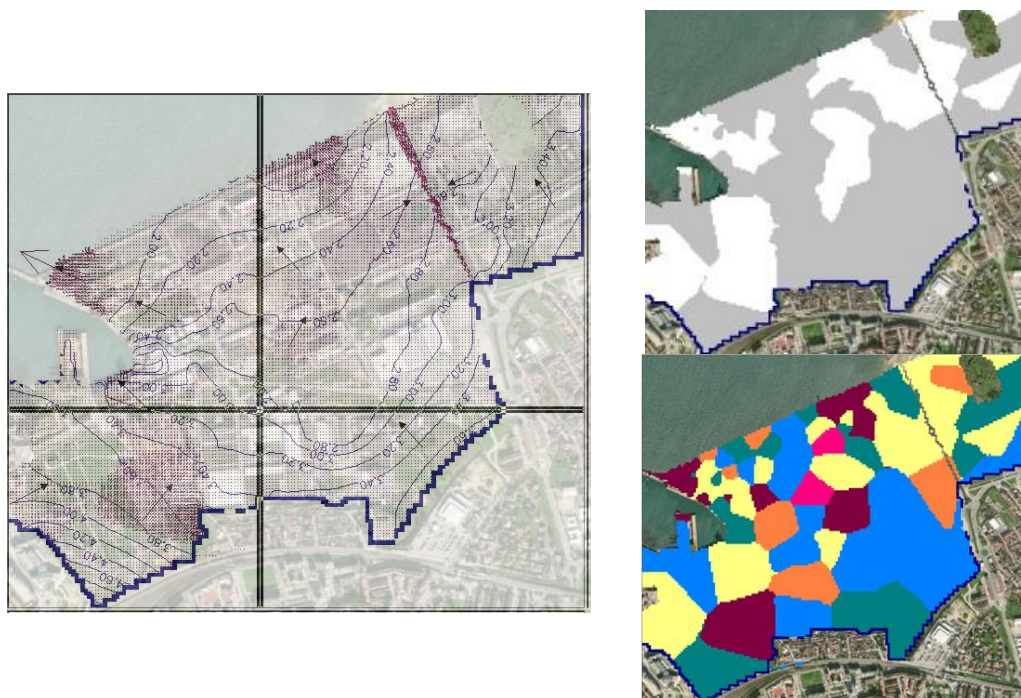


Figura 5.11 - Detalhe do escoamento e litologias da layer 13

Em perfil, o fluxo desloca-se horizontalmente até atingir unidades com permeabilidades superiores que permitam a sua percolação em profundidade para as unidades inferiores.

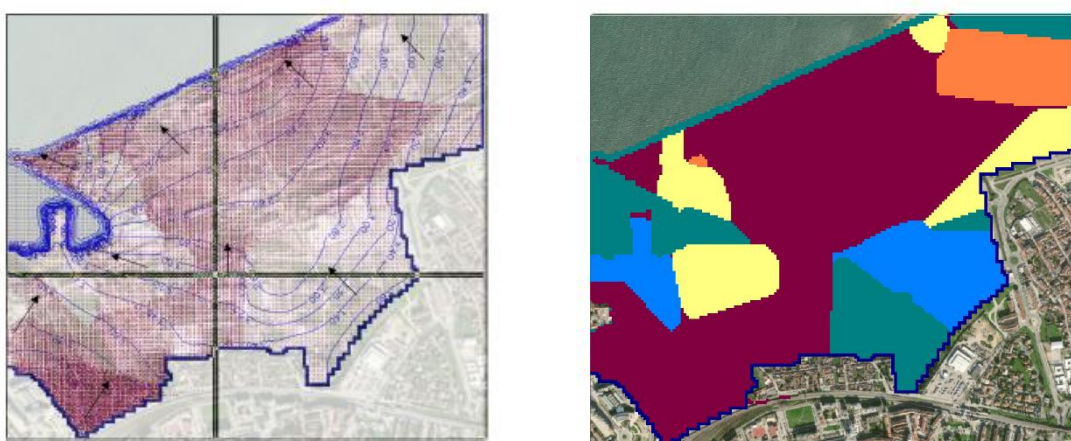


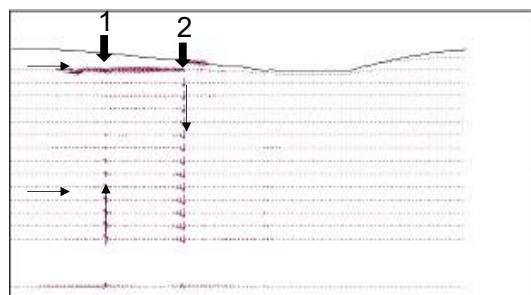
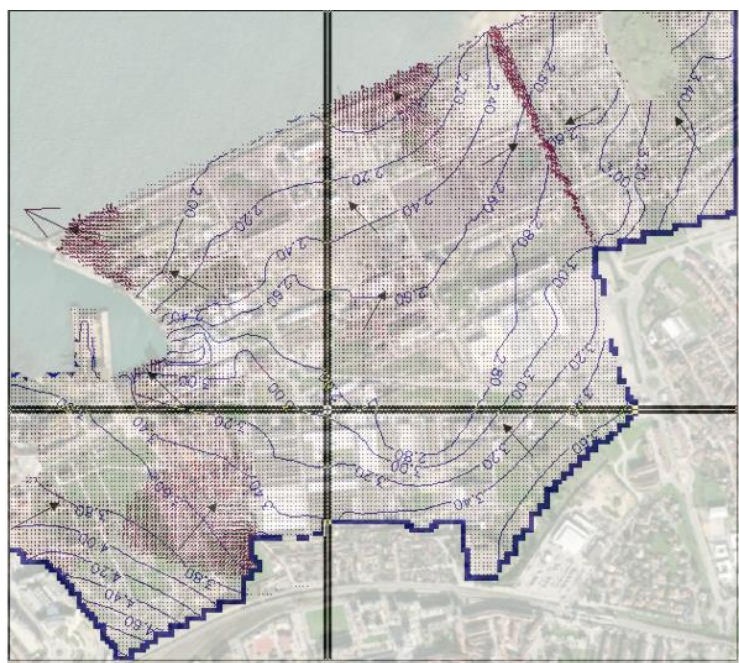
Figura 5.12 - Detalhe do escoamento e litologias na layer 23

Cor	Nº	Litogrupo	Porosidade efectiva (%)	K_h (m/s)	K_v (m/s)
Amarelo	1	Areia	0.31	2.23×10^{-3}	2.23×10^{-4}
Verde	2	Areia Argilosa	0.15	2.75×10^{-6}	2.75×10^{-7}
Vermelho	3	Areia Grosseira	0.3	1×10^{-2}	1×10^{-3}
Verde Escuro	4	Areia Siltosa	0.2	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-7}
Laranja	5	Argila	0.095	2.53×10^{-8}	2.53×10^{-9}
Roxo	6	Aterro	0.2	1×10^{-5}	1×10^{-6}
Verde Claro	7	Tout-Venant	0.285	1×10^{-1}	1×10^{-2}

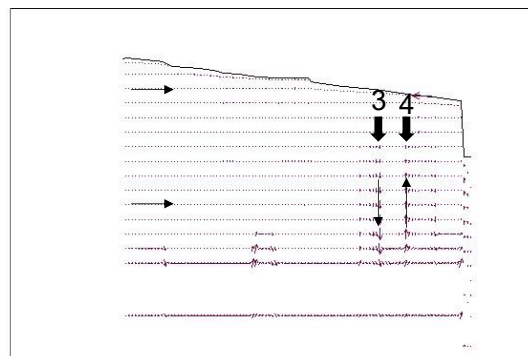
Existem zonas preferenciais onde esta percolação é mais eficiente e que podem ser claramente observadas na fig.5.14 onde o ponto 2 e 3 correspondem a litologias de areias rodeadas de areias argilosas.

O ponto 1 e 4 na figura correspondem a situações no modelo onde o fluxo é vertical, estas situações têm origem na heterogeneidade de valores de permeabilidade existentes na zona e nos valores estabelecidos através de bibliografia para as litologias existentes. Devido aos baixos valores de permeabilidade considerados estas litologias acabam por servir como barreiras praticamente impermeáveis onde é impossível que o fluxo continue a ser horizontal.

A presença da Vala Real facilita a percolação da água como pode ser observado no ponto 5 da fig.5.15. Existe um aumento das velocidades de escoamento verticais e horizontais em redor a vala à medida que a água se aproxima desta.

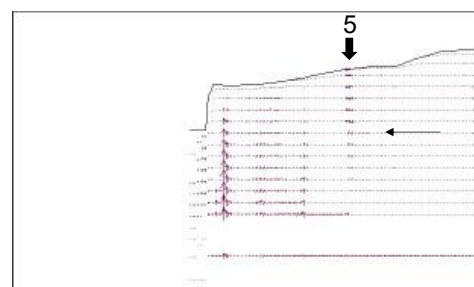
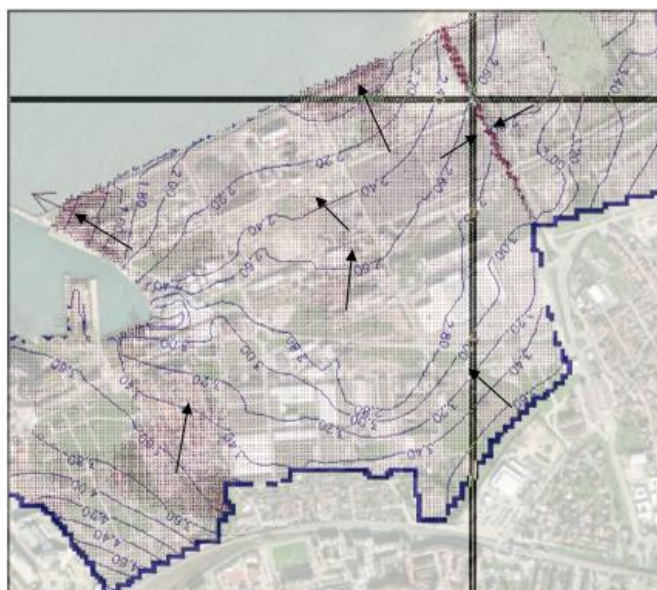


Perfil lateral de escoamento E-O

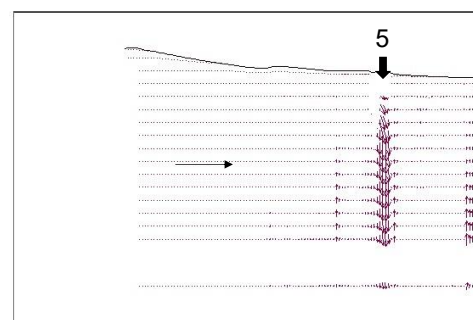


Perfil de lateral escoamento S-N

Figura 5.13 - Perfis laterais de escoamento da layer 13



Perfil lateral de escoamento E-O



Perfil de lateral escoamento S-N

Figura 5.14 - Perfis laterais de escoamento da layer 13 na zona da Vala Real

Em resumo, devido à baixa permeabilidade de grande parte das litologias existentes a água acaba retida nas litologias menos permeáveis e a sua percolação pelo sistema é mínima tanto horizontalmente como verticalmente.

5.6 Análise de sensibilidade

A modelação de processos hidrológicos é uma tarefa complexa que envolve a seleção e utilização de inúmeros parâmetros de modo que estes possam ser representativos das condições reais que se estão a modelar.

Para a criação de modelos hidrogeológicos a análise de sensibilidade serve para verificar a sensibilidade de um modelo à variação dos parâmetros considerados, ou seja, permite verificar a influência que um ou vários parâmetros possuem nos resultados.

Estas análises de sensibilidade podem ser realizadas em relação a um parâmetro mantendo os restantes constantes ou variando todos os parâmetros (Brighenti et al., 2017; Song et al., 2015).

Para verificar os sentidos de escoamento na vertical existentes no modelo é necessário fazer uma análise de sensibilidade aos parâmetros de permeabilidade e porosidade, nomeadamente para os valores considerados para a litologias menos permeáveis.

Considerou-se os valores apresentados na tab.5.3 para a análise.

Tabela 5.3 - Parâmetros testados para análise de sensibilidade

Valor	Original	Análise sensibilidade	Original	Análise sensibilidade
Litologia	Areia argilosa	Areia argilosa	Areia siltosa	Areia siltosa
Porosidade efetiva (%)	0.15	0.20	0.2	0.25
K_h (m/s)	2.75×10^{-6}	2.75×10^{-3}	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-3}
K_v (m/s)	2.75×10^{-7}	2.75×10^{-4}	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-4}

O modelo resultante apresenta variações extensas em todas as unidades. O fluxo da água é visivelmente mais rápido havendo uma maior percolação horizontal e vertical.

Comparando o resultado obtido anteriormente e o modelo resultante da análise de sensibilidade (fig.5.16) é possível verificar que a unidade 13 passa a estar parcialmente a seco. O nível piezométrico desce mais rapidamente devido ao aumento da velocidade percolação da água para as camadas inferiores e deixam de existir percursos preferenciais, passando a direção do escoamento a ser mais uniforme.

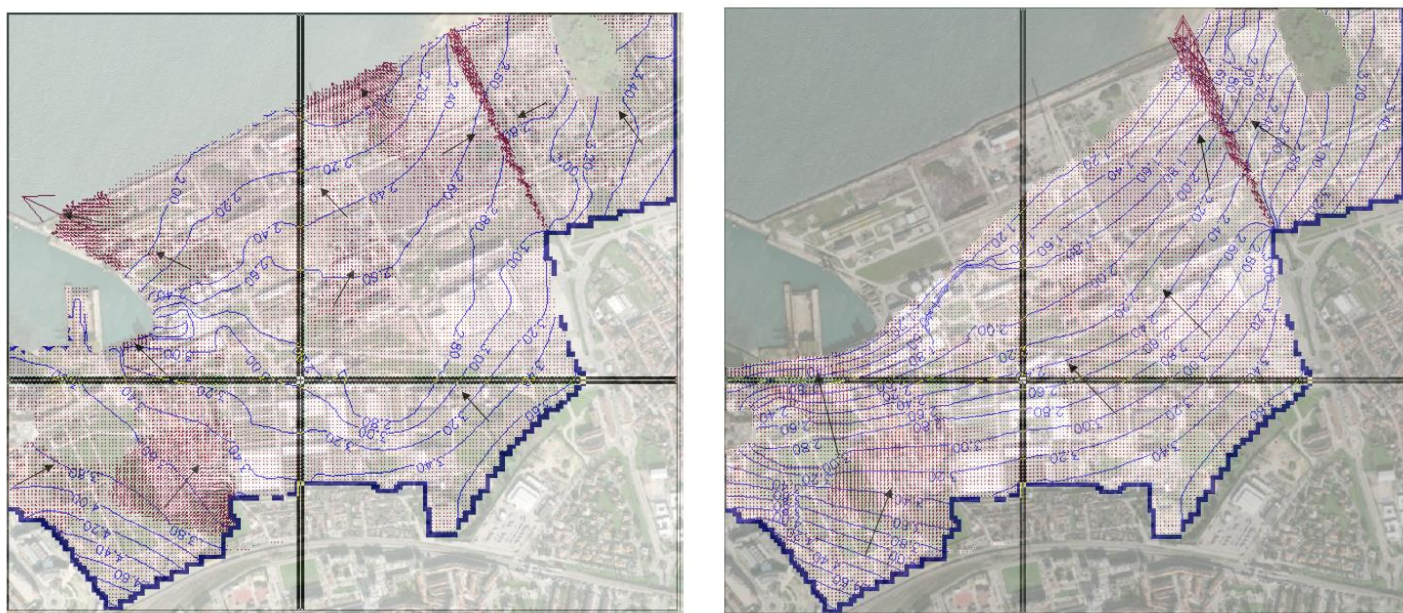


Figura 5.15 - Escoamento na layer 13 antes e depois da análise de sensibilidade

Na layer 23 (fig.5.17), a variação dos resultados é menor, no entanto existe um aumento generalizado das velocidades de percolação. Este aumento da velocidade de percolação causa um escoamento mais uniforme tal como na layer 13 e, embora estes ainda existam, os caminhos preferenciais de percolação não são tão facilmente definidos como na situação original.

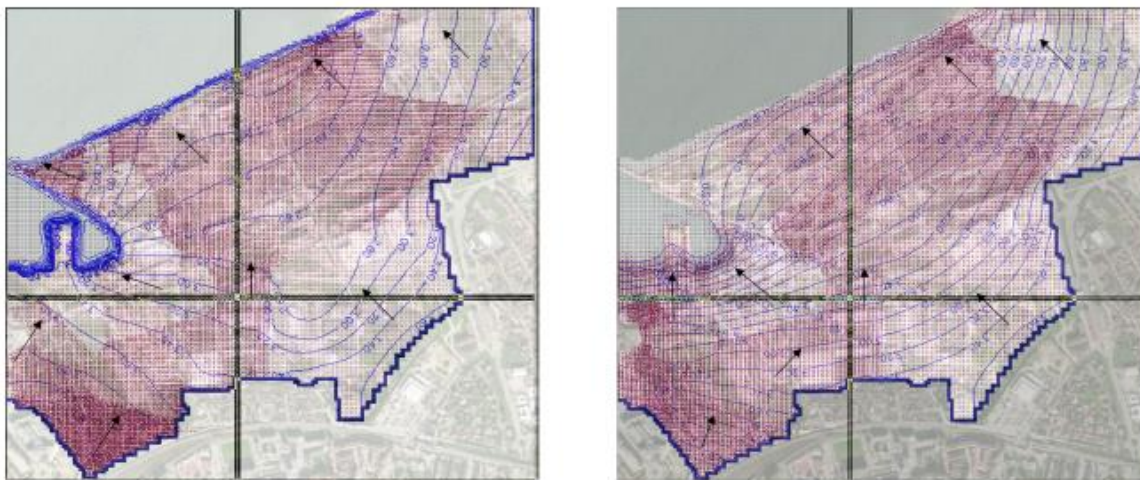


Figura 5.16 - Escoamento na layer 23 antes e depois da análise de sensibilidade

Em perfil, há uma diminuição dos fluxos verticais embora estes ainda existam devido as variações de valores de permeabilidade entre litologias.

Esta variação nos resultados esta associada à resolução considerada para construção do modelo, trata-se de um nível de detalhe elevado numa zona que possui uma heterogeneidade de materiais elevada.

Com este nível de detalhe qualquer variação dos parâmetros dos materiais irá afetar o comportamento global do modelo.

Foram testados também a variação dos valores de recarga e condutância do rio, mas estes pouco ou nenhum efeito mostram no resultado final.

5.7 Tecnologias de remediação

As tecnologias de remediação, neste caso, remediação de solos, consistem no ato de remover contaminantes do solo com o objetivo de melhorar a qualidade do solo, água e ar de modo a se aproximar o mais possível de um ambiente saudável.

A remediação de um sítio contaminado deverá ter como objetivos a proteção da saúde pública e o do ambiente e ao mesmo tempo reabilitar o local afetado e possibilitar o uso futuro do solo em condições ambientalmente favoráveis (Brito, 2005).

Existem vários métodos de remediação e o uso destes dependem das condições existentes no local, origem do contaminante, tipo de contaminação, uso futuro do solo entre outros.

Estes sistemas precisam de ser flexíveis com a capacidade de serem expandidos ou reduzidos consoante as necessidades apresentadas

Hyman & Dupont (2001) dividem os métodos de remediação em cinco categorias:

- i. Nenhuma ação;
- ii. Ações institucionais;

- iii. Contenção;
- iv. Tratamento in situ;
- v. Remoção de solos, tratamento e deposição em aterro próprio;

Com base nas características da zona e dos tipos de materiais que constituem os aterros, poderiam ser considerados todos os tipos de remediação que envolvem uma metodologia ativa de intervenção.

No entanto, através do PMWIN só é possível modelar duas das opções consideradas, nomeadamente contenção e remoção de solos.

A remoção de solos, tratamento e deposição em aterro próprio implica a necessidade da existência de uma instalação que seja capaz de lidar com o tipo de material a escavar, o transporte até à dita instalação e não é adequado a situações onde existem contaminantes voláteis e seja necessário remover material abaixo de 6m de profundidade (Hyman & Dupont, 2001).

Esta solução pode ser aplicada na zona em estudo nas unidades mais superficiais que se encontrem acima do N.F. Abaixo do N.F também seria possível, mas seria necessário repor o material escavado, pois esta zona foi conquistada ao rio Tejo através da deposição destes mesmos aterros e a sua remoção significaria uma perda de área significativa.

A solução considerada para a área trata-se de uma combinação de várias ações de contenção e remoção de solos, nomeadamente a contenção através de geo-membranas aplicadas no topo do terreno, barreiras horizontais impermeáveis e remoção dos aterros superficiais acima do N.F.

A remoção dos níveis superficiais de aterro foi modelada através da definição das células pertencentes a esse litogrupo como células inativas, esta solução foi apenas aplicada na zona central da área de estudo pois os aterros localizados nas periferias Oeste e Este do modelo possuem vários metros de material a topo tornando-se contraindicada a sua remoção.

Na zona central foram desativadas todas as células consideradas de aterro da layer 1 à layer 9, o que perfaz, no máximo, uma escavação de cerca de 4.5 metros. No total foram desativadas 2571 células o que corresponde a um volume de material de $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3$.

O efeito das geomembranas foi modelado definindo zonas extra de recarga nula para além das já definidas anteriormente, em todas as áreas onde não existe construção e existem litologias de aterro (fig.5.18).

As barreiras horizontais impermeáveis foram aplicadas nas fronteiras Sudoeste e Sudeste do modelo, em redor a vala real e a Sul do centro do modelo (fig.5.19) para causar o desvio do fluxo de águas das litologias de aterros existentes.

O fluxo de água é de facto tão baixo na zona que a instalação destas barreiras seca as unidades mais superficiais e nas unidades inferiores é possível verificar que o escoamento segue a linha das barreiras impermeáveis até chegar ao rio Tejo (fig.5.20).

Este conjunto de soluções de remediação parece ser efetivo no desvio do fluxo de águas para fora das zonas críticas.



Figura 5.17 - Zonas de recarga nula

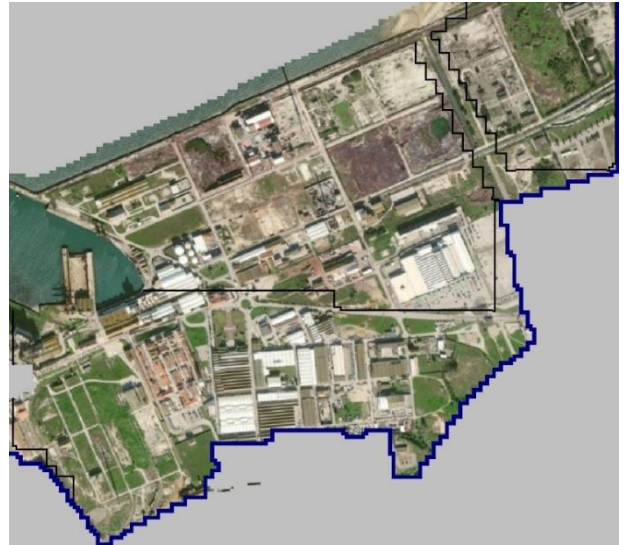


Figura 5.18 - Modelação das barreiras impermeáveis

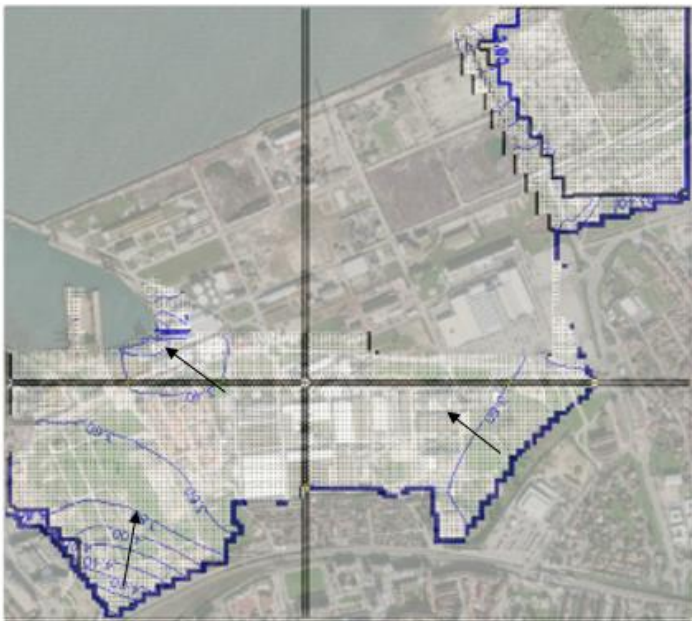


Figura 5.19 - Detalhe do escoamento modificado nas layers 9 e 16 do modelo

Em perfil (fig.5.21), a velocidade de escoamento é muito baixa, embora as direções de fluxo se mantenham semelhantes, na situação sem remediação é difícil de observar a existência de caminhos de percolação preferenciais.

Em redor a Vala Real, ponto 1 na fig.5.22 o escoamento em direção a esta é completamente impedido ou praticamente nulo com a instalação das barreiras.

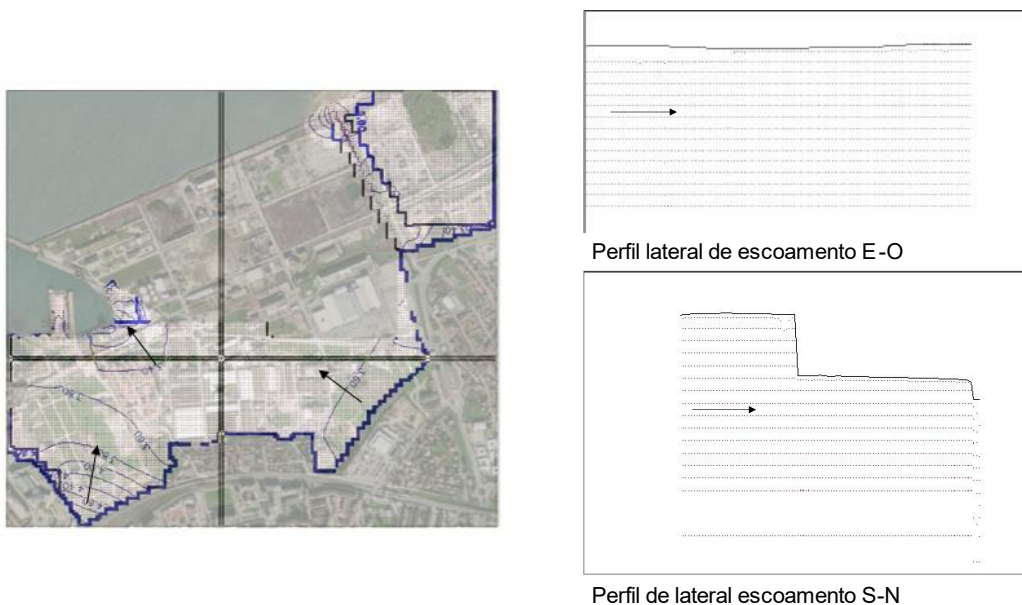


Figura 5.20 - Perfis laterais de escoamento da layer 13

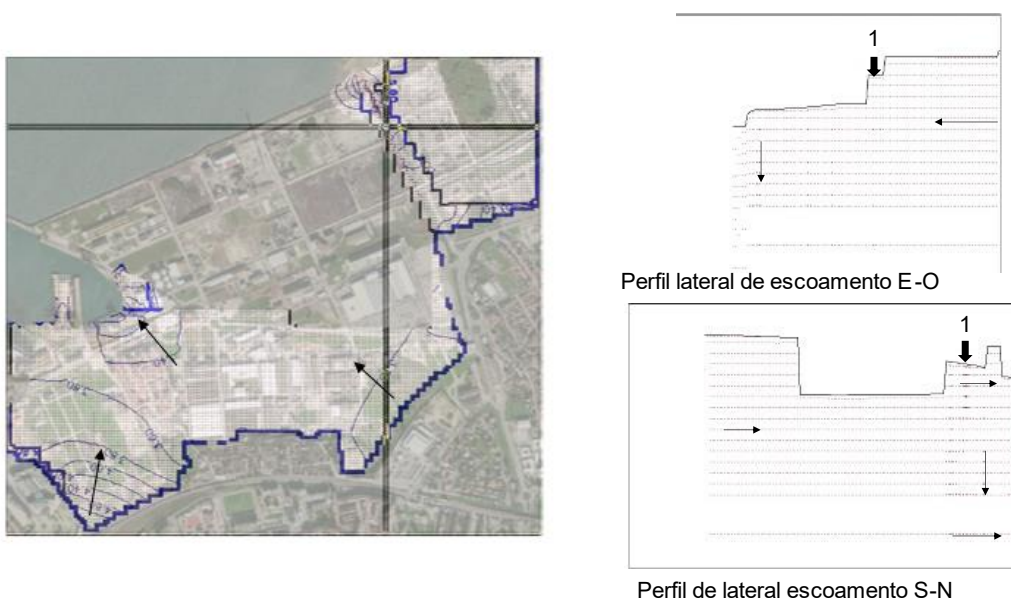


Figura 5.21 - Perfis laterais de escoamento da layer 13 na zona da Vala Real

DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo principal melhorar o nível de conhecimento sobre o funcionamento dos escoamentos subterrâneos no local, através da construção de um modelo de fluxo de água das unidades mais superficiais, que se encontravam dispostas na unidade industrial em 2010 até à cota -4.9 m. Este modelo foi desenvolvido em várias etapas e foi possível retirar algumas conclusões e comentários.

A área de estudo possui uma heterogeneidade de características que tornam o seu estudo detalhado difícil e a construção de um modelo de escoamento está condicionado pela informação existente e disponível.

A construção do modelo litológico foi condicionada pela variação de profundidades atingidas pelas sondagens realizadas em 2010. Para além disso existem também áreas não amostradas, e estas, conjugadas com o descrito no ponto anterior diminuem o grau de precisão do modelo litológico final devido à metodologia utilizada para a modelação,

O modelo hidrogeológico foi condicionado pela variação temporal das campanhas de recolha de amostras e medição de piezometrias. Estas foram espaçadas ao longo de 3 campanhas que foram realizadas ao longo de diferentes meses. Este facto dificultou a criação de um modelo de piezometrias.

A falta de estudos realizados sobre elementos que constituem os aterros depositados na zona criam uma falta de informação sobre as características hidrogeológicas. Foi necessário utilizar valores provenientes de literatura. Sendo estes os parâmetros que mais influenciam os resultados, como demonstrado através da análise de sensibilidade, é desejável que estes sejam o mais fiáveis. Para se aumentar a precisão dos resultados obtidos através deste modelo deveriam ser realizados estudos adicionais sobre estes materiais.

Devido ao horizonte temporal considerado para o desenvolvimento desta dissertação não foi possível efetuar a calibração/análise de sensibilidade do modelo em relação à realidade existente. É um passo importante que fica em falta para realizar futuramente e deve ser feito antes de se poder dar uso ao modelo em situações reais.

Em relação às técnicas de remediação consideradas, a solução apresentada pode ser considerada como adequada visto que condiciona o fluxo de águas para fora das zonas de aterros. É provável que existam outras soluções, mas essas dependem dos objetivos em mente.

Como a área em estudo apresenta piezometrias relativamente baixas na zona central é possível realizar a remoção dos materiais acima da zona saturada. Esta remoção dos materiais acima do N.F implicaria a substituição destes mesmos de modo a evitar que ocorra uma diminuição de área útil do PEB.

Resumidamente a zona apresenta um fluxo de águas subterrâneas com sentido geral de Sul para Norte. As velocidades de fluxo existentes são muito baixas e encontram-se condicionadas pelas litologias muito pouco permeáveis pertencentes ao litogrupo dos aterros, que causam com que se criem canais preferenciais de passagem sempre em direção às litologias mais permeáveis.

BIBLIOGRAFIA

- AEA, (2018) - Utilização da água na Europa — A quantidade e a qualidade enfrentam grandes desafios. <https://www.eea.europa.eu/pt/sinais-da-aea/sinais-2018/artigos/utilizacao-da-agua-na-europa>
- Almeida, C., Mendonça, J., Jesus, M., & Gomes, A. (2000). Sistemas aquíferos de Portugal continental, Volume III. *Instituto Da Água, Lisbon, Portugal*. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Sistemas+aquíferos+de+Portugal+continental#0>
- APA, (2007). Estudo de Impacte Ambiental do Projecto “Alterações Funcionais e de Melhoria Ambiental na Instalação de Transferência e Armazenagem de Resíduos Industriais” Resumo Não Técnico. <https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA1715/RNT1715.pdf>
- APA/AHR do Tejo, (2010). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo - Relatório Técnico Parte 2 - Caracterização e Diagnóstico da Região Hidrográfica. https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Planos/PGRH5-TEJO/RB%5Cpgrhtejo_p2.pdf
- APA/AHR do Tejo, (2012). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo - Parte complementar A - Relatório Ambiental. https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Planos/PGRH5-TEJO/AAE%5CPGRHTEjo_AAE_RA.pdf
- APA, (2016). Elaboração do Estudo Prévio e Estudo de Impacte Ambiental do Terminal do Barreiro, Estudo de Impacte Ambiental - Rev.1. https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA2945/rs_eia_terminal%20barreiro_t1_rev1201751811136.pdf
- Barbosa, S. V (2012) - Modelação de atributos hidrogeológicos do maciço envolvente à antiga área mineira da Quinta do Bispo. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Brighenti, T., Bonuma, N., Chaffe, P., Grison, F., & Kobiyama, M. (2017). *Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: estudo de caso do modelo SWAT. (Sensitivity analysis as the first step for hydrological modeling: a swat model case study)*.
- Brito, M.G., 2005 - Metodologia para a Avaliação e Remediação da Contaminação por metais pesados em Áreas Industriais Degradadas. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Geológica, Especialidade de Engenharia Geológica Ambiental, pela Universidade Nova de Lisboa. 286 p. + Anexos

- Chiang, W.-H., & Kinzelbach, W. (1998). *Processing MODFLOW—a Simulation System for Modelling Groundwater Flow and Pollution*.
- Chiang, W. (2006). Processing Modflow Pro - A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes. <https://www.simcore.com/files/pm/v7/pmwinpro.pdf>
- Das, B., *Advanced Soil Mechanics - Third edition*. Taylor & Francis, London & New York, 2008
- Dias, R., & Pais, J. (2009). Homogeneização da Cartografia Geológica do Cenozóico da Área Metropolitana de Lisboa (AML) Homogenization of the Cenozoic Geological Mapping of the Lisbon Metropolitan Area (AML). In *Comunicações Geológicas*.
- Faria, M. F. de., & Mendes, J. Amado. (2010). *Actas do Colóquio Internacional Industrialização em Portugal no século XX: o caso do Barreiro: centenário da CUF no Barreiro, 1908-2008*. Universidade Autónoma de Lisboa.
- Feinstein, D. T., Hart, D. J., Krohelski, J. T., & Survey, U. S. G. (2004). The value of long-term monitoring in the development of ground-water-flow models. In *Fact Sheet*. <https://doi.org/10.3133/fs11603>
- Ferreira, J., Martins, T., (2019) - Modelos matemáticos de escoamento subterrâneo e modelação do transporte de poluentes em águas subterrâneas - <https://www.aprh.pt/14silusba/docs/Curso-Tecnico1.pdf>
- Freire, P. (2003). *Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas. Estuário do Tejo, Portugal*. Tese de Doutoramento apresentada à Universidade de Lisboa, LNEC, TPI 28, 380 pp., 2003
- Freire, P., Taborda, R., & Andrade, C. (2006). Caracterização das praias estuarinas do Tejo. *8º Congresso Da Água*, 12.
- Ganesh, K.C., (2011) - NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER IN KATHMANDU VALLEY, NEPAL, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro - <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/7589/1/final%20report%20Ganesh%20KC-Groundwater%20modeling%20of%20Kathmandu%20valley%20Nepal.pdf>
- Góis, A., (2015) - MODELAÇÃO DE CENÁRIOS DE EXPLORAÇÃO NO SISTEMA AQUÍFERO LUZ-TAVIRA, Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve - <https://sapientia.ualg.pt/handle/10400.1/7680>
- Golder, 2010 - Estudo final de caracterização do estado de contaminação dos solos e das águas subterrâneas e avaliação do risco para os territórios da Quimiparque. Relatório 2 – Relatório Final de Caracterização do Estado de Contaminação dos Solos e das Águas Subterrâneas. Relatório num. 09510220031_RE-FASE2-E de 18 de outubro de 2010. 238p. + Anexos

- Gunckel, K., Covitt, B., Berkowitz, A., Caplan, B., Moore, J. (2022) - Computational Thinking for Using Models of Water Flow in Environmental Systems: Intertwining Three Dimensions in a Learning Progression
- Harbaugh, A.W. (2005). U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF.htm>
- Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., and Konikow, L. F., 2017, MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017, <http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G>
- Instituto Hidrográfico. (2022). <https://www.hidrografico.pt/>
- Hughes, J. D., Russcher, M. J., Langevin, C. D., Morway, E. D., & McDonald, R. R. (2022). The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling and Software*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257>
- Hyman, M., & Dupont, R. R. (2001). *Groundwater and Soil Remediation*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784404270>
- J. M. Lourenço. The NOVAthesis LATEX Template User's Manual. NOVA University Lisbon. 2021. url: https://github.com/joaomlourenco/novathesis_word/raw/master/novathesis_word-FINAL-EN.pdf.
- Landin, P (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20 pp. 2000. <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>
- Lobo-Ferreira, J. P., Leitão, T. E., & Oliveira, M. M. (2015). Portugal's river basin management plans: groundwater innovative methodologies, diagnosis, and objectives. *Environmental Earth Sciences*, 73(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3462-8>
- Novo, M. emília, Oliveira, M., Martins, T., & Henriques, M. (2018). *Projecto Bingo: O Impacto das Alterações Climáticas na Componente Subterrânea do Ciclo Hidrológico BINGO PROJECT: Impacts of Climate Change on Water Cycle's Groundwater Component* Maria Emília Novo. 39, 59–74.
- Oliveira, M (2009). Aspectos Quantitativos Dos Sistemas Aquíferos do Baixo Tejo. http://repositorio.lnec.pt:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/17564/271109_oliveira.pdf?sequence=2&isAllowed=y, acedido a 18 de agosto de 2022
- 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.

- Pais, J. (2021). The neogene of the Lower Tagus Basin (Portugal). *Spanish Journal of Palaeontology*, 19(2). <https://doi.org/10.7203/sjp.19.2.20534>
- 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
- Portelinha, F (2012) - AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DO AVANÇO DO UMEDECIMENTO NO COMPORTAMENTO DE MUROS DE SOLOS FINOS REFORÇA DOS COM GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-18062013-110750/publico/portelinha.pdf>
- Reilly, T (2001). System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation - Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey Book 3 - Applications of Hydraulics. https://pubs.usgs.gov/twri/twri-3_B8/pdf/twri_3b8.pdf
- Reilly, T. E., & Harbaugh, A. W. (2004). Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models: Scientific Investigations Report 2004-5038. *USGS: Scientific Investigations Report 2004-5038*.
- RockWare, Lateral Extrusion Solid Modeling, https://help.rockware.com/rockworks/WebHelp/solid_model_latextr.htm (consultado a 20/7/2022).
- RockWare Inc. Lateral Blending solid Modeling, https://help.rockware.com/rockworks/WebHelp/solid_model_lithoblend.htm (consultado a 20/7/2022).
- Rotz, R. (2021). Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. *Groundwater*, 59. <https://doi.org/10.1111/gwat.13085>
- Simões, M. (2009). The cenozoic aquifer system of the Lower Tagus Basin: A description of the hydrogeological situation in the Almada region (Portugal). *Hydrogeology Journal*, 17, 999–1009. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0450-2>
- SNIRH (2022). <http://snirh.pt/>
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523, 739–757. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.02.013>
- Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers. (n.d.). , <https://www.geotechdata.info/parameter/permeability> consultado a 3 de agosto de 2022

Zemni, N., Slama, F., Bouksila, F., Bouhlila, R., (2022) - Simulating and monitoring water flow, salinity distribution and yield production under buried diffuser irrigation for date palm tree in Saharan Jemna oasis (North Africa)



2022

Miguel Carneiro

Modelo de escoamentos sub-superficiais da área do Parque Empresarial do Barreiro

