



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Afonso Rolo Miranda

**VULNERABILIDADE E RISCO DO SISTEMA
AQUÍFERO DAS ALUVIÕES DO MONDEGO
NO SECTOR COIMBRA-MONTEMOR-O-
VELHO**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, na Área de Especialização em Recursos Geológicos, orientada pelo Professor Doutor José Manuel Martins Azevedo e pela Professora Doutora Joana Paula Machado Ribeiro, e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Mestre.

Outubro de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

VULNERABILIDADE E RISCO DO SISTEMA AQUÍFERO DAS ALUVIÕES DO MONDEGO NO SECTOR COIMBRA-MONTEMOR-O-VELHO

Afonso Rolo Miranda

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, na Área de Especialização em Recursos Geológicos, orientada pelo Professor Doutor José Manuel Martins Azevedo e pela Professora Doutora Joana Paula Machado Ribeiro, e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2021

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Resumo

Com o intuito de contribuir para o conhecimento hidrogeológico do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6, os objetivos principais da presente dissertação foram a quantificação da vulnerabilidade intrínseca e do risco à contaminação hídrica expressos pelo aquífero aluvionar freático que evolui no setor compreendido entre Coimbra e Montemor-o-Velho.

O domínio em estudo está inserido no troço intermédio-terminal da Bacia Hidrográfica do rio Mondego, e está implantado em depósitos aluvionares holocénicos que assentam sobre formações sedimentares do Mesozoico.

A nível hidrogeológico, a unidade aquífera e massa de água em estudo situam-se na Unidade Hidrogeológica portuguesa da Orla Ocidental, mais precisamente no setor centro-leste do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego. A unidade aquífera estudada apresenta as seguintes características gerais:

A Vulnerabilidade intrínseca (VI) foi avaliada através do método DRASTIC. Os resultados obtidos apontam para uma considerável vulnerabilidade intrínseca (compreendida no intervalo de 140 a 179), ocupando cerca de 90% da área em estudo.

O Risco à contaminação hídrica (R) foi determinado através da soma ponderada da vulnerabilidade intrínseca com a Perigosidade (equivalente ao Uso e ocupação do solo), através da fórmula $R = 0.6 VI + 0,4 LU$. Os resultados expressam a ocorrência de um risco mais alto à contaminação, na maioria da extensão do domínio em estudo, ocupando este cerca de 89%, resultante das características específicas relativas ao LU impostas nesta zona.

Palavras-chave: Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego; Contaminação hídrica; Vulnerabilidade Intrínseca; Risco; Método DRASTIC.

Abstract

In order to contribute to the hydrogeological knowledge of the Mondego Alluvial Aquifer System-O6 (Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6 - SAAM), the main objectives of this dissertation were the quantification of the Intrinsic vulnerability (IV) and the Risk to groundwater contamination expressed by the SAAM in the sector between Coimbra and Montemor-o-Velho.

The studied domain includes in the intermediate-terminal section of the Mondego River Basin, and is implanted in Holocene alluvial deposits that rest on sedimentary formations of the Mesozoic.

At the hydrogeological level Hydrogeologically, the aquifer unit and water body under study are located in the Portuguese Western Hydrogeological Unit (Unidade Hidrogeológica portuguesa da Orla Ocidental), more precisely in the central-eastern sector of the Mondego Alluvial Aquifer System. The studied aquifer unit presents the following general characteristics:

The Intrinsic Vulnerability (VI) was assessed using the DRASTIC method. The results obtained point to a considerable intrinsic vulnerability (comprised in the range of 140 to 179), occupying about 90% of the area under study.

The Risk to water contamination (R) was determined through the combination of Intrinsic vulnerability and Hazard (equivalent to Land use), quantified separately. The results express the occurrence of a higher risk to contamination, in most of the extension of the domain under study, occupying this about 89%, resulting from the specific characteristics regarding Land Use (LU) imposed in this zone.

Keywords: Mondego Alluvial Aquifer System; Water Contamination; Intrinsic Vulnerability; Risk; DRASTIC Method.

Agradecimentos

Desde o meu ingresso no Mestrado em Geociências, até ao final do mesmo culminou com a apresentação deste trabalho que foi sem dúvida um dos mais desafiantes da minha vida. Isto tudo, perante obstáculos, dias menos bons e certas dificuldades que encontrei pelo caminho e na qual um conjunto de pessoas que sempre me apoiaram, contribuíram para a superação dos mesmos, às quais dedico esta secção.

Em primeiro lugar aos meus orientadores, Professor Doutor José Manuel Martins Azevedo e Professora Doutora Joana Paula Machado Ribeiro, pelo apoio incondicional prestado, pela paciência e disponibilidade que demonstraram para me auxiliar nos momentos mais difíceis e em que falhei, e sobretudo, por todo o conhecimento e ensinamentos que me transmitiram ao longo deste percurso.

Ao professor Doutor Nelson Edgar Viegas Rodrigues por toda a disponibilidade e aprendizagens transmitidas em várias questões ao longo desta dissertação.

Aos meus amigos e colegas, pela amizade, pelos bons momentos que me proporcionaram, aos quais, fizeram com que Coimbra fosse a minha cidade de eleição, e pela capacidade de incentivo na realização das minhas obrigações, bem como para me “aliviar” delas.

À Cristiana, por ser a minha maior fonte de inspiração, ajuda e suporte de vida, mas principalmente por todo o amor e carinho depositado em mim todos os dias.

Por fim, à minha família, em especial aos meus pais por todos os sacrifícios diários que fizeram e continuam a fazer para que consiga ter todas as condições necessárias tanto a nível pessoal, académico e profissional. Sem estes grandes sacrifícios (aos quais nunca conseguirei retribuir), educação, valores e apoio, que me inspiram a ser uma pessoa melhor a cada dia que passa, jamais teria chegado até aqui, portanto a eles dedico esta dissertação e esta conquista.

Índice

Índice de Figuras	I
Índice de Tabelas.....	III
Lista de Abreviaturas	V
1. Introdução	1
1.1. Importância da água na Terra.....	1
1.2. Área de estudo	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Estrutura e organização da dissertação	3
2. Enquadramento geral do domínio em estudo.....	5
2.1. Enquadramento geográfico e administrativo	5
2.2. Enquadramento climatológico	6
2.2.1. Temperatura atmosférica	6
2.2.2. Precipitação atmosférica.....	7
2.2.3. Evapotranspiração	8
2.2.4. Escoamento Superficial.....	8
2.3. Enquadramento hidrográfico.....	9
2.4. Enquadramento geológico e tectónico	10
2.5. Enquadramento geomorfológico	14
2.6. Enquadramento hidrogeológico	15
3. Caracterização física do domínio em estudo.....	19
3.1. Topografia local.....	19
3.2. Litologia local	20
3.3. Hidrogeologia local.....	21
3.4. Modelo hidrogeológico (conceptual).....	23
3.5. Hidrografia	25
3.6. Uso e ocupação do solo.....	26
4. Vulnerabilidade, perigosidade e risco de contaminação de águas subterrâneas	30
4.1. Vulnerabilidade e métodos de avaliação	30
4.1.1. Definição de Vulnerabilidade.....	30
4.1.2. Métodos de avaliação da vulnerabilidade	32
4.1.2.1. Método DRASTIC	34
4.2. Perigosidade, risco e métodos de avaliação.....	37
4.2.1. Definição de perigosidade e de risco.....	37
4.2.2. Avaliação da perigosidade e do risco	41
4.2.2.1. Determinação da perigosidade	41
4.2.2.2. Determinação do risco	41

4.3.	Metodologias e dados de base utilizados.....	43
4.3.1.	Metodologias utilizadas	43
4.3.2.	Dados de base.....	43
4.4.	Tratamento de Dados	44
5.	Vulnerabilidade Intrínseca e Risco no Setor centro-este do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6	45
5.1.	Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca (VI) pelo Método DRASTIC.....	45
5.1.1.	Determinação e Análise dos Parâmetros DRASTIC	46
5.1.1.1.	Parâmetro D - Profundidade da água	46
5.1.1.2.	Parâmetro R – Recarga do Aquífero	47
5.1.1.3.	Parâmetro A – Litologia do Meio Aquífero	49
5.1.1.4.	Parâmetro S – Tipo de Solo	50
5.1.1.5.	Parâmetro T – Topografia	52
5.1.1.6.	Parâmetro I – Impacto da Zona Vadosa	53
5.1.1.7.	Parâmetro C – Condutividade Hidráulica	54
5.1.2.	Determinação da Vulnerabilidade Intrínseca (VI).....	55
5.2.	Avaliação da Perigosidade	56
5.3.	Avaliação do Risco	58
6.	Conclusões e Recomendações.....	60
6.1.	Conclusões	60
6.2.	Recomendações.....	62
7.	Referências Bibliográficas.....	64
Anexos	72

Índice de Figuras

Figura 1- Fluxograma das etapas e processos desenvolvidos neste trabalho.	4
Figura 2- Enquadramento do local de estudo nas NUTs de Portugal Continental e na Região Centro (adaptado de CCDR-Centro, 2020).....	5
Figura 3- Localização do domínio em estudo na Carta de Temperaturas médias anuais do PGRHVML (2012).	6
Figura 4- Localização do domínio em estudo na Carta da Precipitação média anual do PGRHVML (2012).	7
Figura 5- Localização do domínio em estudo na Carta da Evapotranspiração potencial média anual do PGRHVML (2012).....	8
Figura 6- Localização do domínio em estudo na Carta do Escoamento superficial médio anual do PGRHVML (2012).	8
Figura 7- Localização do domínio em estudo na Carta das Massas de Águas Artificiais e Fortemente Modificadas do PGRHVML (2012).	9
Figura 8- Localização do domínio em estudo na Carta do Mapa Geológico do PGRHVML (2012).....	13
Figura 9- Principais conjuntos litológicos identificáveis nas aluviões do rio Mondego (adaptado de Mendonça & Dias, 2000; in Andrade, 2004).	13
Figura 10- Localização do domínio em estudo (retângulo preto) na bacia hidrográfica do rio Mondego (retirada de Cunha, 2002; in Andrade, 2004).....	15
Figura 11- Localização do domínio em estudo na Carta do Mapa Hidrogeológico do PGRHVML (2012).	15
Figura 12- Localização do domínio em estudo (retângulo preto) na Carta da Localização e enquadramento litoestratigráfico do sistema aquífero das aluviões do Mondego (Sistemas Aquíferos de Portugal (2000) – Ed. Instituto da Água).....	16
Figura 13- Localização do domínio estudado (retângulo preto) no Sistema aquífero das aluviões do Mondego (adaptado de Almeida et al., 2000).	18
Figura 14- Enquadramento topográfico do local em análise em fragmentos das cartas militares nºs 229, 230, 240 e 241 (escala 1:25.000).	19
Figura 15- Litologias nos furos realizados em trabalhos anteriores no domínio em estudo (Andrade, 2004).	20
Figura 16- Representação da hidrodinâmica subterrânea no local em estudo (Mapa de isopiezas e de fluxo relativo a março (a) e setembro (b) de 2001 em Andrade, 2004).....	22
Figura 17- Modelo esquemático conceptual simplificado do fluxo regional do sistema aquífero das aluviões do Baixo Mondego (Andrade (2004).	24

Figura 18- Uso do solo (%) referente aos rios Vouga, Mondego e Lis em toda a sua extensão (PGRHVML, 2012).	27
Figura 19- Ocupação florestal na zona em estudo (retângulo preto) (adaptado do PGRHVML, 2012).....	27
Figura 20- Aspeto geral da hidrografia e do uso e ocupação do solo na área em estudo (fonte: Google Earth).....	28
Figura 21- Uso e ocupação do solo no domínio em estudo (adaptado de Andrade, 2004)..	29
Figura 22- Representação gráfica simplificada dos conceitos básicos que definem vulnerabilidade intrínseca (a) e específica (b) (adaptado de Filippini et al., 2013).	31
Figura 23- Representação esquemática dos parâmetros do método DRASTIC (adaptado de LNEC, 2002).	35
Figura 24- Esquema conceptual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea (Foster et al., 2006).	39
Figura 25- Localização dos 26 piezómetros na área em estudo (adaptado de imagem <i>Google Earth</i>).	45
Figura 26- Variação espacial do Parâmetro D do método DRASTIC na área em estudo.....	46
Figura 27- Variação espacial do Parâmetro R do método DRASTIC na área em estudo.....	48
Figura 28- Variação espacial do Parâmetro A do método DRASTIC na área em estudo.....	50
Figura 29- Variação espacial do Parâmetro S do método DRASTIC na área em estudo.....	51
Figura 30- Variação espacial do Parâmetro T do método DRASTIC na área em estudo.	52
Figura 31- Variação espacial do Parâmetro I do método DRASTIC na área em estudo.	54
Figura 32- Variação espacial do Parâmetro C do método DRASTIC na área em estudo.....	55
Figura 33- Variação espacial da Vulnerabilidade Intrínseca (VI) na área de estudo.	56
Figura 34- Mapa da distribuição espacial da Perigosidade (P) na área de estudo.....	58
Figura 35- Mapa da distribuição espacial do Risco (R) na área em estudo.	59

Índice de Tabelas

Tabela 1- Características simplificadas do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego- O6. (adaptado Almeida et al., 2000).....	17
Tabela 2- Parâmetros, classes, valores e pesos do método DRASTIC (adaptado de Aller et al., 1987).....	36
Tabela 3- Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC (adaptado de Aller et al., 1987).	37
Tabela 4- Fontes e produtos de poluição da água subterrânea (adaptado de Notenboom et al., 1994).....	38
Tabela 5- Questões principais da avaliação da intensidade do risco, da avaliação da sensibilidade do risco e da gestão do risco (adaptado de Daly et al., 2004).....	40
Tabela 6- Valoração referente ao uso e à ocupação do solo para o cálculo do risco (adaptado de Ribeiro, 2005).....	42
Tabela 7- Classificação do Risco (R) adaptada à situação em estudo.	42
Tabela 8- Fontes de recolha dos dados utilizados para a quantificação dos parâmetros e das metodologias utilizadas.	44
Tabela 9- Valores do Parâmetro D - profundidade média da água – e áreas de influência determinados para o domínio em estudo.....	47
Tabela 10- Valores do Parâmetro R - recarga - e áreas de influência determinados para o domínio em estudo.....	49
Tabela 11- Valores do Parâmetro A – material do aquífero - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.....	50
Tabela 12- Valores do Parâmetro S – tipo de solo - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.....	51
Tabela 13- Valores do Parâmetro T – declive - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.....	53
Tabela 14- Valores do Parâmetro I – impacto da zona não saturada - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.....	54
Tabela 15- Valores do Parâmetro C – condutividade hidráulica do aquífero - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.....	55
Tabela 16- Valores de VI – vulnerabilidade intrínseca - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.....	56
Tabela 17- Perigosidade (P) atribuída a cada LU.....	57
Tabela 18- Classes de P - perigosidade - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.	58
Tabela 19- Classes de R - risco - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.	59

Lista de Abreviaturas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ID – Índice DRASTIC

LPD – Leito Periférico Direito

LU – Land Use

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

P – Perigosidade

PGRHVML – Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis

R – Risco

SAAM – Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego

SIG – Sistemas de Informação Geográfico

SNIRH – Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos

VI – Vulnerabilidade Intrínseca

1. Introdução

1.1. Importância da água na Terra

A água é indispensável à vida e ao equilíbrio ambiental na Terra, sendo um recurso fundamental e extremamente necessário. Contudo, nas últimas décadas assiste-se ao seu consumo crescente e também à sua degradação progressiva. Torna-se por isso fundamental aprofundar o conhecimento científico em relação à origem, estado físico e químico, locais de circulação e armazenamento dos corpos e dos sistemas hídricos. A gestão das massas de água e dos recursos hídricos tem evoluído com uma importância crescente na sociedade atual, principalmente face à elevada dependência humana deste recurso natural, às limitadas reservas existentes no planeta e à escassez crescente muitas vezes resultante da sua utilização descuidada.

A Terra é o planeta sólido do sistema solar que contém água em maior abundância. Todas as estimativas apontam para uma quantidade de água na Terra de, aproximadamente, 1400 milhões de km³, ocupando cerca de 71% da superfície terrestre. Cerca de 97,45% desta corresponde a água salgada e só apenas 2,53% corresponde a água doce, sendo esta última uma componente indispensável à sustentabilidade ambiental e à manutenção de todas as formas de vida na Terra. Por outro lado, presume-se que desses 2,53% de água doce existente, 68,7% está inserida nos glaciares e neves perpétuas, e que 30,1% está localizada nas formações rochosas - massas de água subterrânea. Os restantes 1,2% correspondem a águas superficiais como rios, lagos, pântanos, etc. Concluindo-se, portanto, que as massas de água subterrânea possuem uma relevância acrescida (Shikolamnov et al.,2003).

Nos últimos anos começou-se a assistir a uma crescente consciencialização das comunidades humanas, incluindo em Portugal, para a importância dos recursos hídricos, até então vistos como inesgotáveis e recicláveis. Esta preocupação limitou-se, inicialmente, às águas superficiais, mantendo mais ou menos ignoradas as massas de águas subterrâneas. Só mais recentemente, com o aparecimento de problemas relativos à qualidade da água e à diminuição de reservas em aquíferos, é que os responsáveis pela gestão das águas subterrâneas se dedicaram à problemática da contaminação e exploração aquíferas.

Atualmente, a água é utilizada em vários setores das atividades humanas destacando-se, para além das necessidades mais básicas de manutenção da vida, o uso na indústria, na agricultura, na alimentação, na higiene e saneamento e na produção de energia. Este conjunto de processos leva à exploração intensiva e à contaminação progressivas das massas de água potável. Tendo em conta a elevada importância da água e a diminuta quantidade de água

doce existente na Terra, é necessário gerir e utilizar de forma sustentável as massas de água, que conduzam à preservação deste importante recurso natural. Assim, é necessário a aplicação de medidas para a gestão sustentável das diferentes massas de água e de outros fatores que impliquem a contaminação e sobre-exploração destas, assim como, o conhecimento mais completo possível dos recursos hídricos, particularmente dos sistemas aquíferos. Desta forma será possível desenvolver uma eficiente gestão dos mesmos e, conseqüentemente, promover a proteção destas massas de água e assegurar a futura sustentabilidade. Acresce ainda que é necessário a gestão das atividades industriais de modo a reduzir a emissão de gases de efeito estufa, evidenciando-se a necessidade da realização de estudos hidrogeológicos regionais e locais, que permitam uma melhor compreensão do comportamento das massas de água tanto à superfície como a nível subterrâneo.

Toda a água existente na Terra evolui num ciclo contínuo, designado de ciclo da água. Toda a quantidade de água existente na biosfera, na atmosfera, na hidrosfera, ou na litosfera, está em constante movimento através destes subsistemas, modificando várias vezes o estado da água. As águas subterrâneas apresentam um papel bastante importante, visto que cerca de 30% de toda a água doce disponível para consumo do ser humano, corresponde a águas subterrâneas. Estas massas de água subterrânea evoluem nas formações geológicas com boa capacidade de armazenamento hídrico – aquíferos – e derivam de vários processos, nomeadamente por recarga aquífera. A água subterrânea pode ainda retornar à superfície através de exurgências, e descarga para lagos, oceanos, rios, ou inclusive ser captada por furos, galerias ou poços (LNEG, 2019). O estudo das massas de água subterrânea, deverão, sempre que possível, ser efetuados ao nível da unidade ou sistema aquífero ou da bacia hidrogeológica.

1.2. Área de estudo

O local estudado nesta dissertação encontra-se no distrito de Coimbra, abrangendo zonas dos concelhos de Coimbra, Montemor-o-Velho e Soure. Este estende-se para W de Coimbra até Montemor-o-Velho, com uma extensão de aproximadamente 17 km de comprimento por 4 km de largura.

O domínio em estudo encontra-se inserido na bacia hidrográfica do rio Mondego, estando integrada na área denominada de “Baixo Mondego” de acordo com Almeida et al. (1990).

Segundo Almeida et al. (1990), o Baixo Mondego é parte integrante da bacia hidrográfica do rio Mondego, englobada a uma região conduzida pelo “Mondego Baixo”. Nesta região os elementos da estrutura geológica estabelecem regras ao desenvolvimento essencialmente do lado esquerdo da rede de drenagem o que justifica, em grande parte, o desenvolvimento morfológico, conduzindo o complexo significado do próprio campo. Representa a parte mais ocidental da bacia hidrográfica do rio Mondego localizada a ocidente da Portela (Coimbra Este) e que atravessa unidades da Orla Meso-Cenozóica Ocidental. Estes mesmos autores fazem ainda referência ao conceito de “Baixo Mondego”, que na linguagem comum, corresponde apenas aos campos da planície aluvial que correspondem apenas a uma parte do conceito no sentido mais lato. É nesta planície aluvial, integrante do “Baixo Mondego”, que se insere a área em estudo neste trabalho.

1.3. Objetivos

Esta dissertação pretende contribuir para o melhor conhecimento do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6 (SAAM) e tem como objetivo geral a avaliação da vulnerabilidade e do risco à contaminação a que as massas de água freáticas na zona em estudo estão sujeitas. Pretende-se ainda identificar os agentes de contaminação hídrica e indicar ações de proteção do ambiente e do ordenamento do território.

Nesse sentido, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar a área em estudo considerando os enquadramentos geológico, geomorfológico, climatológico, e hidrogeológico do SAAM;
- Determinar a vulnerabilidade intrínseca no setor em estudo do SAAM através do método DRASTIC;
- Avaliar o risco de contaminação hídrica no sector em estudo do SAAM.

1.4. Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos, nos quais se incluem um primeiro capítulo introdutório, que inclui os objetivos do trabalho e as metodologias utilizadas. No capítulo 2 e 3 são apresentados os enquadramentos gerais e locais da área em estudo, respetivamente. No capítulo 4 apresentam-se as metodologias de análise de vulnerabilidade

e risco e no capítulo 5 os resultados obtidos. O capítulo 6 inclui as conclusões do trabalho realizado.

A realização da presente dissertação incluiu a implementação de sucessivos métodos. As fases principais de desenvolvimento do trabalho que conduziu a construção desta tese estão descritas de forma esquemática na Figura 1.



Figura 1- Fluxograma das etapas e processos desenvolvidos neste trabalho.

2. Enquadramento geral do domínio em estudo

Neste capítulo apresentam-se os vários enquadramentos a nível regional da área de estudo, tais como o geográfico e administrativo, o hidrográfico, o climatológico, o geológico e tectono-estrutural e o geomorfológico.

2.1. Enquadramento geográfico e administrativo

A área em estudo abrange zonas dos concelhos de Coimbra, Montemor-o-Velho e Soure, e insere-se na NUT II - Centro de Portugal e a NUT III - Baixo Mondego (Figura 2). Apresenta uma extensão com aproximadamente 17 km de comprimento por 3 a 4 km de largura e estende-se desde Coimbra W até Montemor-o-Velho. A localização da área de estudo está representada na figura 2. Integra partes representadas nas Cartas Militares à escala 1:25000 dos Serviços Cartográficos do Exército nºs 241 - Coimbra Sul, 240 - Montemor-o-Velho, 230 – Coimbra Norte e 229 - Ançã (Cantanhede). Está compreendida genericamente entre as coordenadas UTM 29TNE 544500, 528990, 4453750 e 4448337.

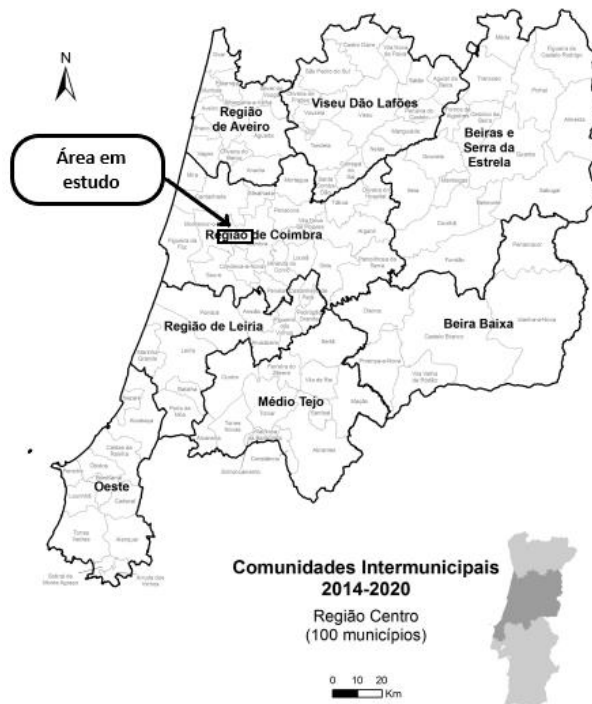


Figura 2- Enquadramento do local de estudo nas NUTs de Portugal Continental e na Região Centro (adaptado de CCDR-Centro, 2020).

2.2. Enquadramento climatológico

O clima em Portugal Continental apresenta uma enorme heterogeneidade, tanto de Norte para Sul, como do Litoral para o Interior do país devido às ações climáticas geradas no oceano Atlântico e no mar Mediterrânico, assim como da variação da orografia ao longo do país (IPMA, 2020).

De acordo com a classificação climática de Koppen-Geiger, referido no Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (PGRHVML, 2012), a região enquadrante da área de estudo apresenta um clima do tipo Csb, que corresponde a um clima mediterrânico de verão fresco, ou seja, com um clima temperado quente e húmido, em que no mês mais chuvoso no inverno ocorre três vezes mais precipitação do que no mês mais seco do verão.

2.2.1. Temperatura atmosférica

Segundo os dados obtidos no Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (PGRHVML, 2012), a temperatura média anual na região enquadrante do domínio em estudo varia entre 15 e 16 °C (Figura 3). A estação mais próxima do local de estudo - estação meteorológica de Montemor-o-Velho - regista uma temperatura média anual de aproximadamente 15,5 °C.

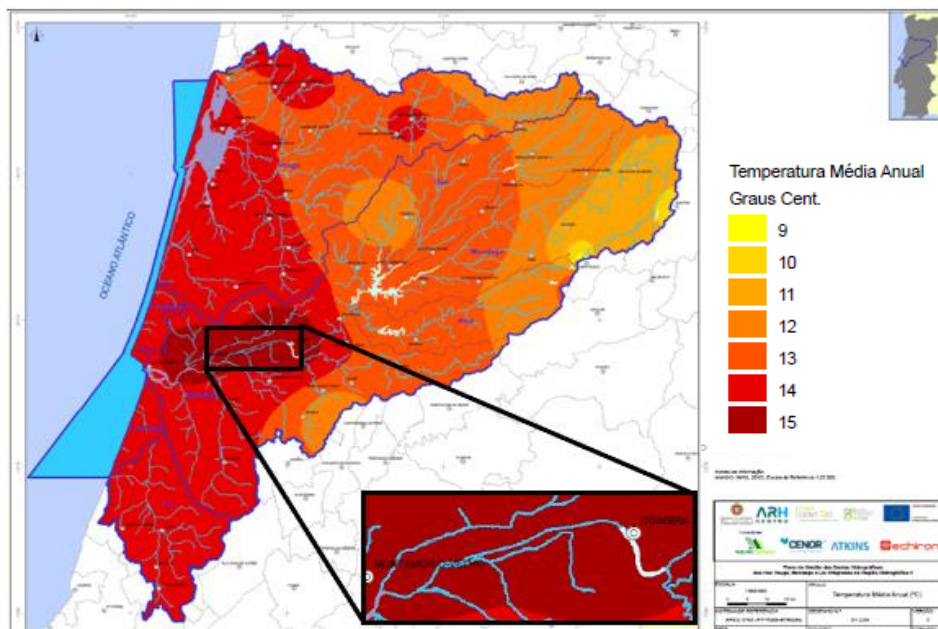


Figura 3- Localização do domínio em estudo na Carta de Temperaturas médias anuais do PGRHVML (2012).

2.2.2. Precipitação atmosférica

De acordo com os dados da Figura 4, a precipitação média anual varia entre 700 mm e 2000 mm no percurso da bacia, atingindo os valores mais elevados a norte e os valores mais reduzidos a sul, correspondendo estes ao período entre 1960 e 1991.

Com base nos dados adquiridos nas várias estações meteorológicas e na figura 4, verifica-se que a precipitação média anual da zona em estudo varia entre 900 e 1000 mm.

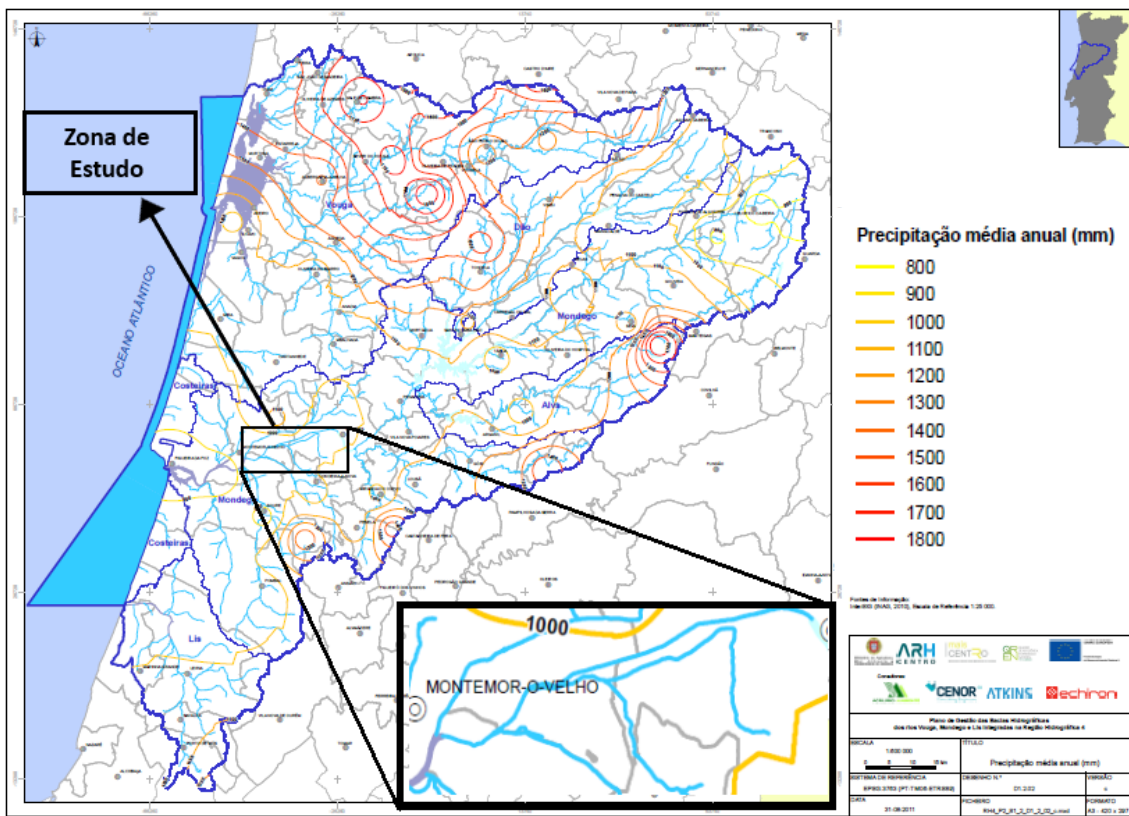


Figura 4- Localização do domínio em estudo na Carta da Precipitação média anual do PGRHVML (2012).

2.2.3. Evapotranspiração

Tendo em conta os dados disponibilizados pelo PGRHVML (2012), a evapotranspiração potencial na região de estudo situa-se próximo do valor de 700 mm na bacia do Mondego, conforme se pode observar na Figura 5.

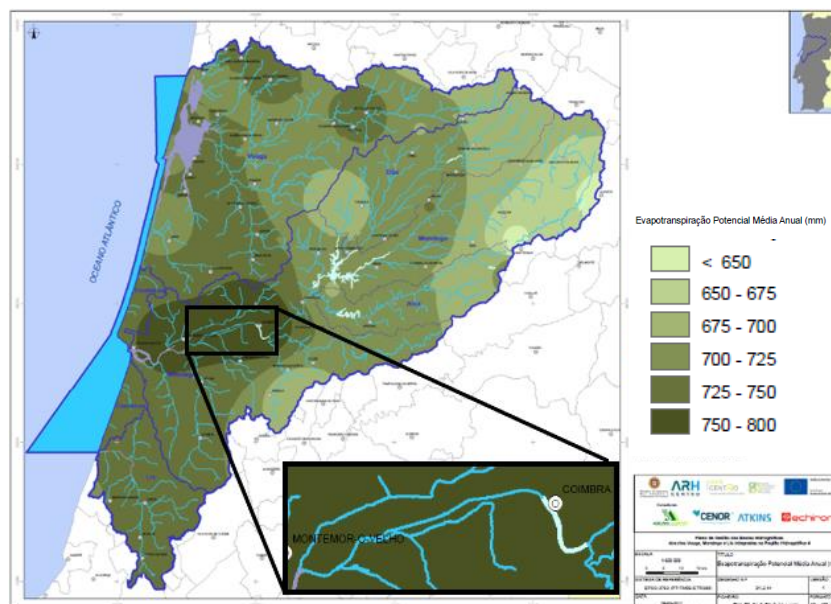


Figura 5- Localização do domínio em estudo na Carta da Evapotranspiração potencial média anual do PGRHVML (2012).

2.2.4. Escoamento Superficial

Tendo em conta os dados expressos no PGRHVML (2012), o local em estudo apresenta, ao longo da bacia hidrográfica, valores compreendidos entre 600 e 800 mm relativamente ao escoamento superficial médio anual (Figura 6).

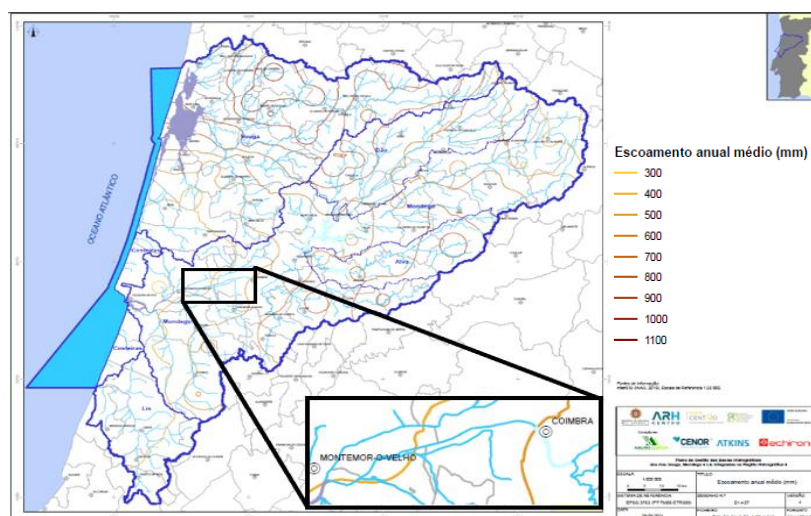


Figura 6- Localização do domínio em estudo na Carta do Escoamento superficial médio anual do PGRHVML (2012).

2.3. Enquadramento hidrográfico

A zona em estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (Figura 7). Esta bacia é limitada a E pela bacia do rio Vouga, a S pela bacia do rio Lis, a NE pela bacia hidrográfica do rio Douro e, por último, a SE pela bacia do rio Tejo e insere-se no Plano da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (PGRHVML, 2012).

A bacia hidrográfica do Rio Mondego apresenta uma forma aproximadamente retangular, com uma orientação preferencialmente NE-SW e com uma área plana de 6659 km², tornando-se assim, a segunda maior bacia (a seguir à do rio Sado) de rios inteiramente portugueses (PGRHVML, 2012).

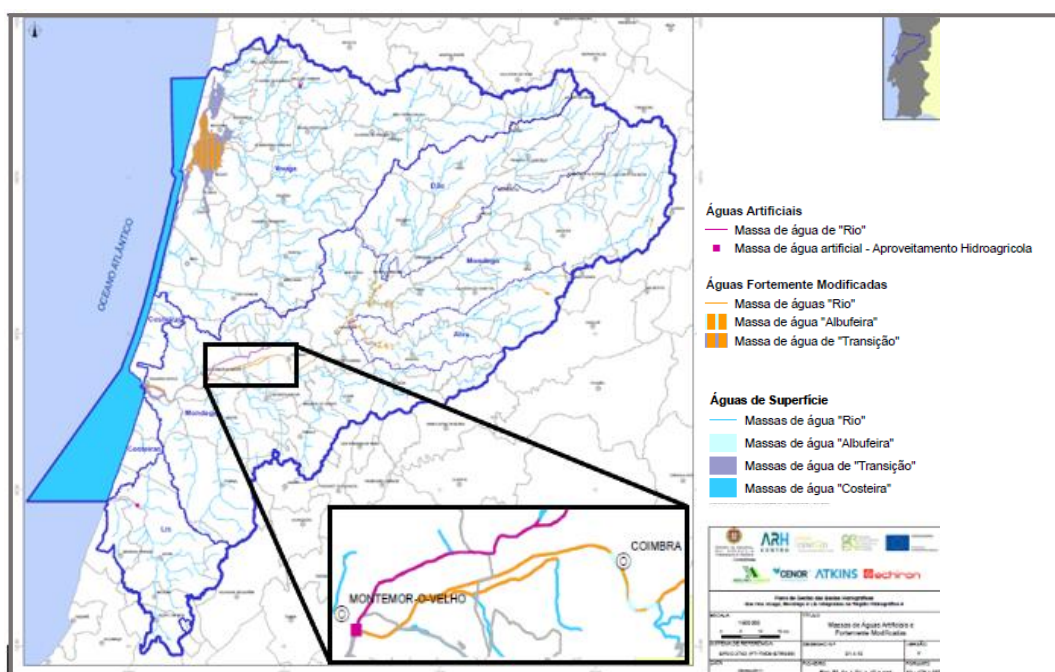


Figura 7- Localização do domínio em estudo na Carta das Massas de Águas Artificiais e Fortemente Modificadas do PGRHVML (2012).

2.4. Enquadramento geológico e tectónico

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo de um aquífero e de uma massa de água subterrânea implantados em depósitos aluvionares holocénicos. Estes depósitos preenchem um troço do fundo do vale do rio Mondego e assentam sobre formações sedimentares do Mesozoico.

A área delimitada está inserida numa região que apresenta um espesso enchimento sedimentar, cujas idades vão do Mesozoico ao Cenozoico (Figura 8). A sucessão sedimentar pode atingir uma espessura máxima de 1200 m, comporta cerca de 49 a 55% de rochas arenosas, essencialmente arcossarenitos a subarcossarenitos, e 43 a 45% de rochas carbonatadas, em especial calcários margosos (Soares et al., 1986 e Soares, 1990 *in* Seabra (1994)). Este enchimento assenta sobre o soco Hercínico constituído por filádios do Complexo Cristalofílico (Pré-Cámbrico), por filitos e metagrauvaques do Grupo das Beiras (Pré-Cámbrico a Cámbrico) e por quartzitos e filitos do Paleozoico.

As formações sedimentares que evoluem na base dos depósitos aluvionares em estudo apresentam a seguinte sequência litostratigráfica (em ordem geocronológica crescente):

- Holocénico: constituído pelos depósitos coluvionares e as aluviões que preenchem o fundo do vale do Mondego.

- Pliocénico médio: com cerca de 30 m de espessura, pode apresentar na base areias finas bem calibradas, sobrepostas por arenitos médios a finos e lutitos, e no topo por arenitos muito grosseiros e conglomerados (Depósito de Santa Luzia);

- Miocénico: inclui os Grés e Argilas de Amor, têm 10-20 m de espessura e são constituídos por uma alternância de arcoses e lutitos;

- Paleogénico: está representado pela Formação de Bom Sucesso, constituída por conglomerados e arcoses, com má calibragem, atingindo nesta região cerca de 50 m de espessura e que assenta em discordância angular nas unidades anteriores.

- Campaniano superior a Eocénico: sucessão areno-argilosa, definida como Areias e Argilas de Taveiro; esta formação pode atingir 120 m de espessura e é essencialmente constituída por uma alternância de espessas camadas tabulares de quartzarenitos de grão médio e de lutitos.

- Cretácico: sobrepõe-se em discordância angular às unidades anteriores; compreende as seguintes unidades: a) Arenitos de Carrascal com 80 a 100 m de espessura e são constituídos por arcoses grosseiras mal calibradas (ricos de matriz argilosa), com intercalações conglomeráticas e, por vezes espessas, camadas lutíticas; b) os Calcários de Tentúgal, com 18 a 35 m de espessura (aumentando para SW), constituídos por calcários e minoritariamente por margas; estes calcários apresentam elevada suscetibilidade ao desenvolvimento de casificação; c) os Arenitos Finos de Lousões, com 15 m de espessura consistindo em arenitos micácios geralmente laminados; d) os Grés Grosseiros Superiores e Grés de Rebolia-Alencarce, totalizando nesta zona cerca de 30 m de espessura de arenitos grosseiros e cascalhentos, com silicificação e ferruginização a teto.

- Jurássico superior: não está representado na área de estudo, pois apenas aflora a ocidente do meridiano de Montemor-o-Velho;

- Jurássico médio: está representado pelas seguintes unidades: a) Calcários margosos de Póvoa de Lomba, com 10 m de espessura; b) Calcários de Ancã, com 260 m e c) Calcários de Andorinha, com 75 m. Estes calcários apresentam-se muito carsificados;

- Jurássico inferior: compreende margas, margas alternantes com calcários margosos e calcários margosos. Na sucessão sedimentar desta área foram definidas as seguintes unidades litostratigráficas: a) Camadas de Pereiros, com 50 a 60 m de espessura, na base essencialmente areno-dolomíticas e superiormente apresentam espessas margas, localmente evaporíticas e calco-dolomíticas; b) Camadas de Coimbra, com cerca de 100 m, compreendem espessas camadas dolomíticas e calcários dolomíticos; c) Margas e calcários margosos de Eiras, com cerca de 60 m de espessura e compreendem margas encimadas por uma dezena de metros de espessura de calcários margosos; d) Margas e calcários margosos de Pedrulha, com 270 m, englobando um espesso membro margoso sobreposto por duas dezenas de metros de calcários margosos;

- Triásico terminal: a) Camadas de Conraria - atingindo 50 m de espessura e em que a conglomerados basais se sucedem arenitos finos laminados; b) Camadas de Castelo Viegas - com 170 a 190 m de espessura, unidade constituída por espessos arenitos, de cor beije, por vezes conglomeráticos e com intercalações lutíticas (Carvalho, 1950);

A nível tectónico e de acordo com o esboço geológico do Baixo Mondego da autoria de Soares e Margues (*in* Almeida et al, 1990), a região evidencia os seguintes sistemas de fraturas que afetam o enchimento sedimentar Meso-Cenozoico:

- ENE-WSW: integrando as falhas que condicionaram o desenvolvimento da planície aluvial do Mondego, desde Coimbra a Montemor -o-Velho. A atuação recente deste sistema de fracturação justifica o maior desenvolvimento da rede de drenagem da margem esquerda do Mondego e o desencontro altimétrico dos níveis de terraços presentes nas duas margens do vale. A Norte de Coimbra, este sistema rejoga à esquerda falhas N.S. Por observação de fotografia aérea, Tavares (1999) inferiu que fraturas com esta direção apresentam grande continuidade e exibem alguma relação com a representação altimétrica dos terraços.

- NNE-SSW: existe a importante falha de Condeixa-Coimbra-Sargento Mor, com importante rejogo fini-Miocénico a Quaternário (Cunha, 1992), bem como a que afeta o bordo ocidental da Serra de Montemor-o-Velho.

- Direção submeridiana: pode salientar-se a zona de falhas verticais que se definem segundo o meridiano de Coimbra e uma outra zona que se alinha por Verride-Montemor-o-Velho.

- NW-SE: corresponde essencialmente a uma zona de falhas subverticais que definem a fossa de Antuzede-Cavaleiros (Soares, 1966), com rejogo posterior ao Grés Grosseiro Superior (Cretácico) e no essencial anterior aos Depósitos de Cordinha (Placenciano), dado que estes cobrem estas falhas não estão rejogados por elas.

- WNW-ESSE: destaca-se a falha de Quintos-Santa Eulália responsável pelo levantamento da Serra da Boa Viagem, com basculamento SE das unidades mesozoicas e terciárias, bem como pela maior altitude onde se situam os terraços fluviais e marinhos (atribuídos ao Quaternário) compartimento soerguido. Com direção WNW-ESE também se destaca Presalves-Brunhos (Verride) e as que estão expressas no Maciço de Sicó.

Ocorrem ainda na região duas estruturas relevantes, nomeadamente: a) o anticlinal de Montemor-o-Velho com eixo NNE-SSW mergulhante para N; b) o sinclinal de Alencarce-Relves

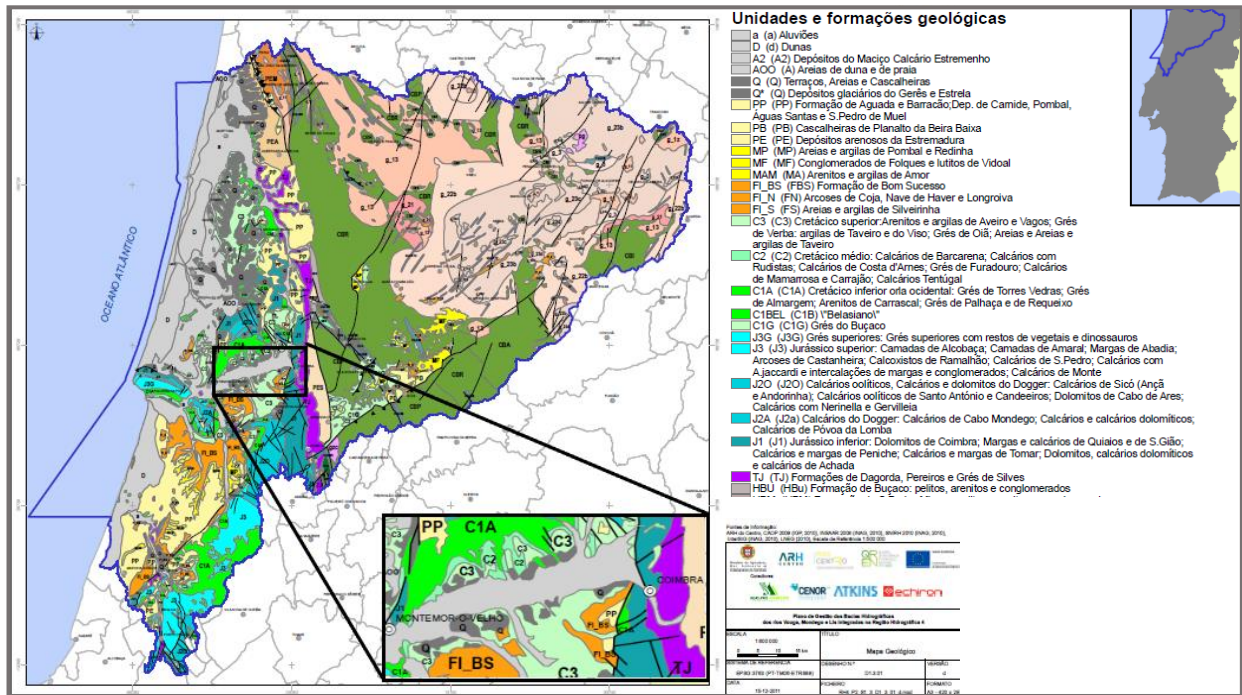


Figura 8- Localização do domínio em estudo na Carta do Mapa Geológico do PGRHVML (2012).

Na área em estudo, o substrato do sistema aquífero é constituído por calcários, arenitos e argilas do Cretácico (Almeida et al., 2000), como se verifica na Figura 9. Nos campos do Bolão, imediatamente a Este da área de estudo, as dolomias, os calcários dolomíticos e os calcários margosos do Jurássico inferior constituem o muro deste sistema aquífero; na zona da Ereira, a jusante de Montemor-o-Velho, o substrato é constituído pelas margas evaporíticas do Hetangiano a Triásico superior (Peixinho de Cristo, 1998).

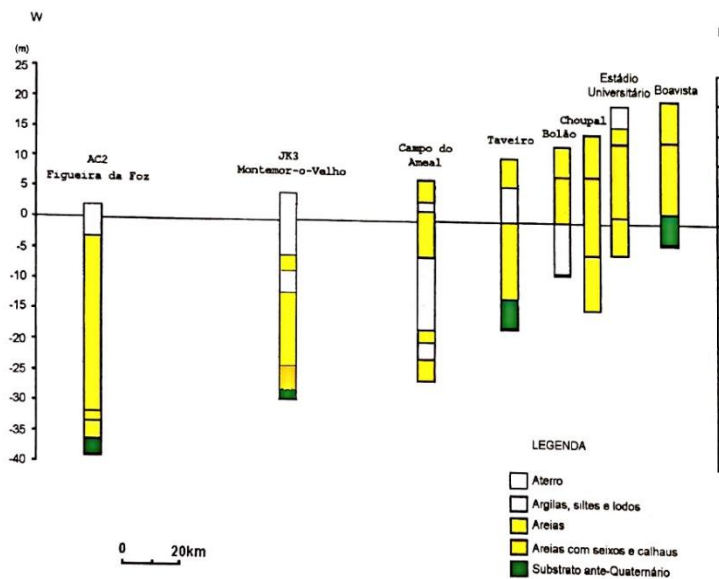


Figura 9- Principais conjuntos litológicos identificáveis nas aluviões do rio Mondego (adaptado de Mendonça & Dias, 2000; in Andrade, 2004).

2.5. Enquadramento geomorfológico

No que diz respeito à geomorfologia do Baixo Mondego, região enquadrante do domínio em estudo, podem ser consideradas quatro grandes unidades geomorfológicas (Almeida et al., 1990): as serras e os planaltos calcários, as colinas gresosas, a planície aluvial e a planície litoral.

A área de estudo está inserida na Planície aluvial. No contexto global da paisagem do Baixo Mondego, na Planície aluvial segundo a interpretação de Almeida et al. (1990), podem-se distinguir quatro sectores que são o reflexo da forma como o rio se instalou e de como a Planície evoluiu (Figura 10):

- Campos do Bolão: com uma espessura média de sedimentos possivelmente superior a 40 m, condicionada pelo amplo meandro do rio e pela confluência da Ribeira de Fomos na margem direita, numa zona de cruzamento de dois sistemas de fraturas quase ortogonais.

- Campos do Bolio: até à proximidade de Montemor-o-Velho é mais regular em termos morfológicos e com uma largura entre 3 a 4 km, onde o retoque tectónico parece estar limitado a uma possível flexura para sul resultando no desencontro dos níveis de terraço nas duas margens. Nas proximidades de Montemor-o-Velho, a presença de rochas calcárias mesozoicas nas duas margens (Serra de Montemor, na margem direita e Costa de Ames, na margem esquerda) impõe um estreitamento da planície pela sua maior resistência e pelo movimento das estruturas a elas associadas.

- Campo da Ereira ou de Verride: é mais marcado pela tectónica, apresenta contornos quase circulares com influência das condicionantes estruturais ligadas a fenómenos diapíricos. Este sector que se liga ao estuário do rio através da garganta de Lares (a oeste da Abrunheira) recebe a confluência dos rios Anunca e Foja.

- Garganta de Lares: apresenta clara imposição estrutural com dois estrangulamentos impostos nas duas margens pelas rochas mesozoicas, condicionando a morfologia da planície aluvial.

A área de estudo insere-se nos Campos do Bolio e é uma zona relativamente plana com cotas variáveis entre os 13,2 m próximo de Coimbra e os 4,0 m junto a Montemor-o-Velho.

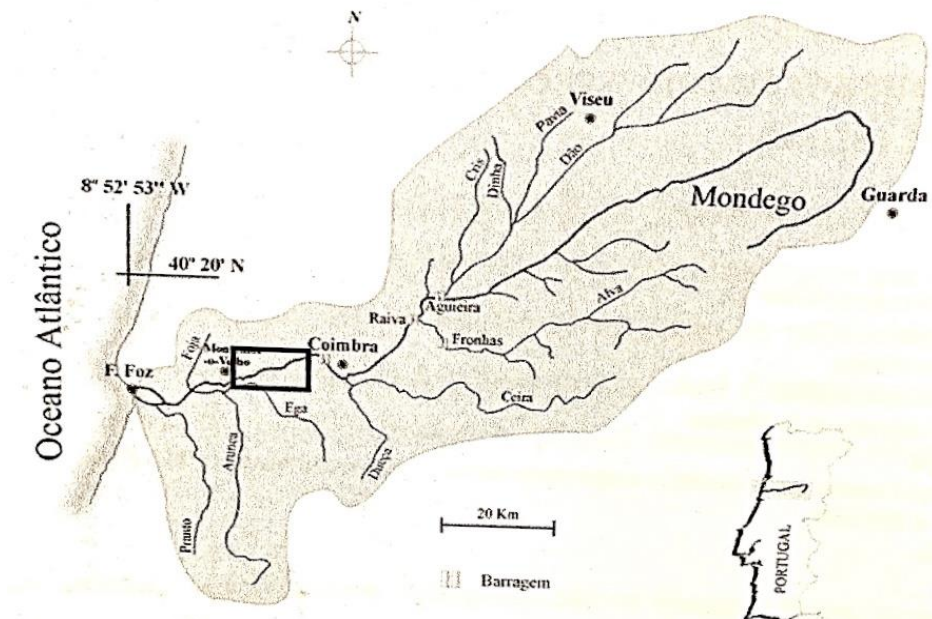


Figura 10- Localização do domínio em estudo (retângulo preto) na bacia hidrográfica do rio Mondego (retirada de Cunha, 2002; in Andrade, 2004)

2.6. Enquadramento hidrogeológico

O domínio em estudo implanta-se na Unidade Hidrogeológica portuguesa da Orla Ocidental (Figura 11), mais precisamente no setor central do SAAM-O6 (Figura 12) (Almeida et al. 2000).

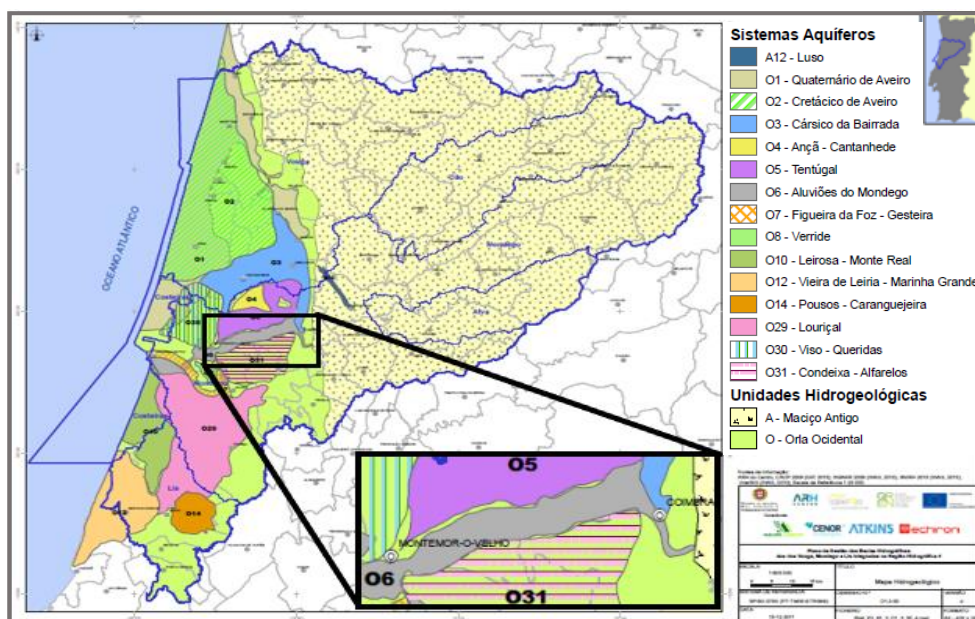


Figura 11- Localização do domínio em estudo na Carta do Mapa Hidrogeológico do PGRHVML (2012).

A Unidade hidrogeológica da Orla Ocidental é um domínio constituído fundamentalmente por depósitos e rochas sedimentares, com uma geomorfologia suave, com colinas calcárias e vales amplos, pouco profundos e com aluvionamento significativo. Apresenta também grande variabilidade litológica, textural e estrutural, predominando as rochas carbonatadas, os arenitos e os argilitos e, na cobertura quaternária ou plio-quaternária, materiais arenosos desagregados que propiciam fácil infiltração da água das chuvas.

A tectónica e a organização sequencial dos sedimentos, têm um significado hidrogeológico bastante importante. A organização sequencial dos sedimentos individualiza verticalmente as formações com comportamento hidrogeológico diverso, criando alternâncias, mais ou menos cíclicas de aquíferos, aquíferos e aquíferos e dando origem, com frequência, a sistemas aquíferos multicamada. No que diz respeito às estruturas tectónicas desenvolvidas no decurso da evolução da Bacia Lusitaniana proporcionaram o afloramento das diversas unidades geológicas anteriormente descritas, constituindo assim subdomínios onde as formações aquíferas são recarregadas superficialmente pela infiltração da água das chuvas.

No que respeita à circulação e armazenamento da água subterrânea individualizam-se dois tipos de sistemas e unidades aquíferos: os cársicos e os porosos.

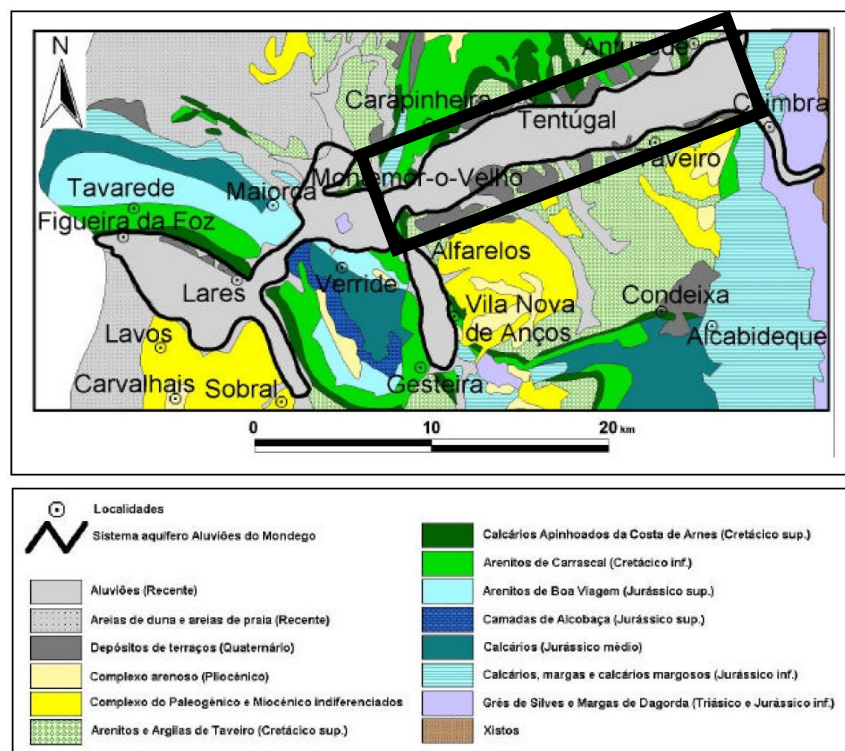


Figura 12- Localização do domínio em estudo (retângulo preto) na Carta da Localização e enquadramento litoestratigráfico do sistema aquífero das aluviões do Mondego (Sistemas Aquíferos de Portugal (2000) – Ed. Instituto da Água).

O Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego -O6 (Figura 12) onde se insere a unidade aquífera em estudo apresenta genericamente as características apresentadas na tabela 1.

Tabela 1- Características simplificadas do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego- O6. (adaptado Almeida et al., 2000).

Formações Aquíferas Dominantes	Aluviões
Litologias Dominantes	Areias, areias com seixos e calhaus, com intercalações de argilas, lodos e siltes; a espessura máxima é de 50 m.
Características Gerais	Sistema aquífero livre a confinado/semiconfinado, poroso, multicamada.
Produtividade (l/s)	Mediana=21,8
Parâmetros Hidráulicos	Mediana da Transmissividade (m^2/dia) =1475
Funcionamento Hidráulico	O sistema recebe recarga direta da precipitação e de influência dos cursos de água superficiais.
Piezometria / Direções de Fluxo	Nível próximo da superfície do terreno; escoamento subterrâneo em direção aos cursos de água que atravessam o sistema aquífero.
Balanço Hídrico	Recursos renováveis entre 45 a 50 hm^3/ano .
Fácies Química	Mista; bicarbonatada cálcica ou sódica; cloretada sódica.

Segundo Almeida et al. (2000), na zona do Baixo Mondego, considera-se um sistema aquífero, denominado Aluviões do Mondego, que é poroso, multicamada (lenticular) e livre a confinado/semiconfinado decorrente da relação espacial e das condições estruturais e texturais dos sucessivos estratos aluvionares. Estes mesmos autores referem que o Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego apresenta uma área de 148 km^2 , sendo limitado a montante pelo meridiano de Coimbra, onde o Mondego deixa o Maciço Hespérico e entra na Orla Meso-Cenozóica Ocidental.

A área deste sistema aquífero é, assim, praticamente idêntica à área considerada para o campo aluvionar entre Coimbra e Figueira da Foz, 15000 hectares (Figura 13). As unidades aquíferas pertencentes a este sistema aquífero são constituídas por areias, com intercalações de argilas e lodos (Almeida et al., 2000), verificando-se que, a jusante de Coimbra, nomeadamente entre Taveiro e o Ameal (Figura 8), o sistema aquífero aluvionar é constituído frequentemente por duas sub-unidades aquíferas: uma freática, sobrejacente a um conjunto de níveis lodosos e outra semi-confinada ocorrente imediatamente abaixo (Peixinho de Cristo,

1998). Porém, é importante referir que devido à descontinuidade lateral dos níveis lodosos, o confinamento ou semi-confinamento é de carácter local.

Considerando o objetivo principal deste trabalho, e devido à grande extensão da bacia hidrográfica do Rio Mondego, a zona em estudo corresponde aproximadamente ao setor intermédio e recuado da bacia hidrográfica, totalizando uma área plana de 54,3 km².

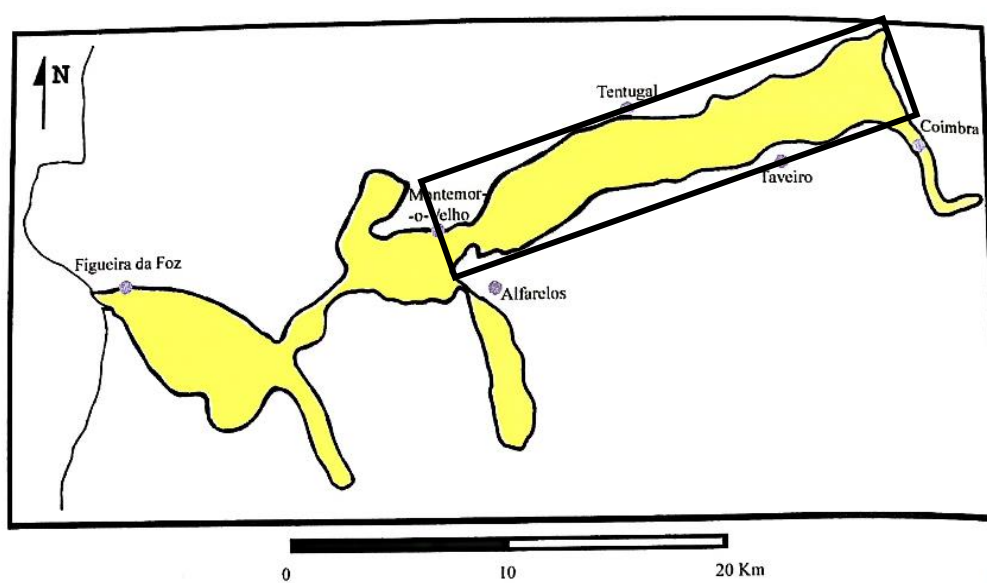


Figura 13- Localização do domínio estudado (retângulo preto) no Sistema aquífero das aluviões do Mondego (adaptado de Almeida et al., 2000).

3. Caracterização física do domínio em estudo

Neste capítulo apresenta-se uma caracterização física sintética do domínio em estudo, nomeadamente aos níveis topográfico, litológico e hidrogeológico.

3.1. Topografia local

A área em estudo está representada da nas Cartas Militares nºs 229 - Ança (Cantanhede), 230 - Coimbra, 240 – Montemor-o-Velho e 241 – Coimbra Sul, à escala 1:25000 (Figura 14).

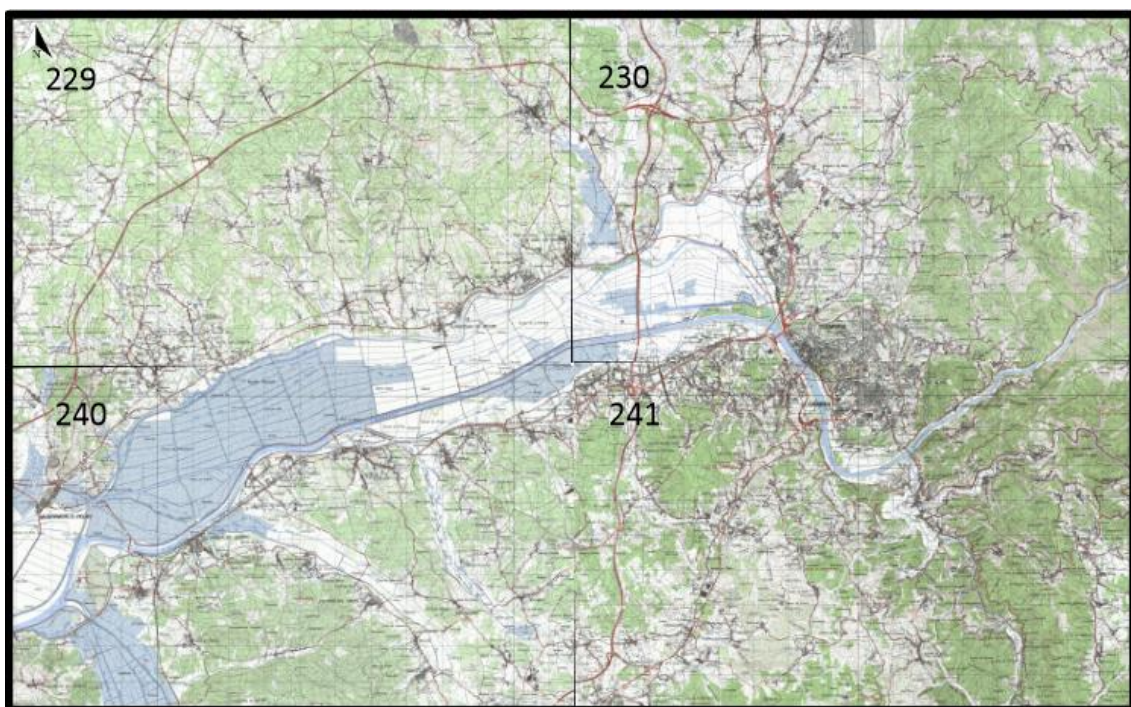


Figura 14- Enquadramento topográfico do local em análise em fragmentos das cartas militares nºs 229, 230, 240 e 241 (escala 1:25.000).

Topograficamente a área estudada apresenta um relevo pouco acentuado. As cotas são variáveis entre os 13,2 m próximo de Coimbra e os 4,0 m junto a Montemor-o-Velho., em concordância com o relevo.

3.2. Litologia local

A massa de água subterrânea em estudo situa-se próximo da superfície e está implantada em depósitos aluvionares.

No local em análise estes depósitos apresentam as seguintes características gerais:

- Cascalho contendo seixos ou calhaus;
- Areias muito grosseiras cascalhentas;
- Areias grosseiras a finas;
- Siltes (por vezes lodosos);
- Lodos.

Segundo Andrade (2004), durante a abertura de furos realizados na área de estudo na parte superior das aluviões, apurou-se uma grande complexidade e irregularidade estratigráficas, com o sistemático atravessamento de níveis muito diferenciados. A instalação dos piezómetros nas aluviões do rio Mondego e conseqüentemente nos seus tributários, ocorreu predominantemente nas formações aluvionares, compostas maioritariamente por areias na margem direita do leito periférico direito e na zona central próxima de Coimbra, passando predominantemente a siltosas, na zona central, na aproximação a Montemor-o-Velho, como se verifica na Figura 15.

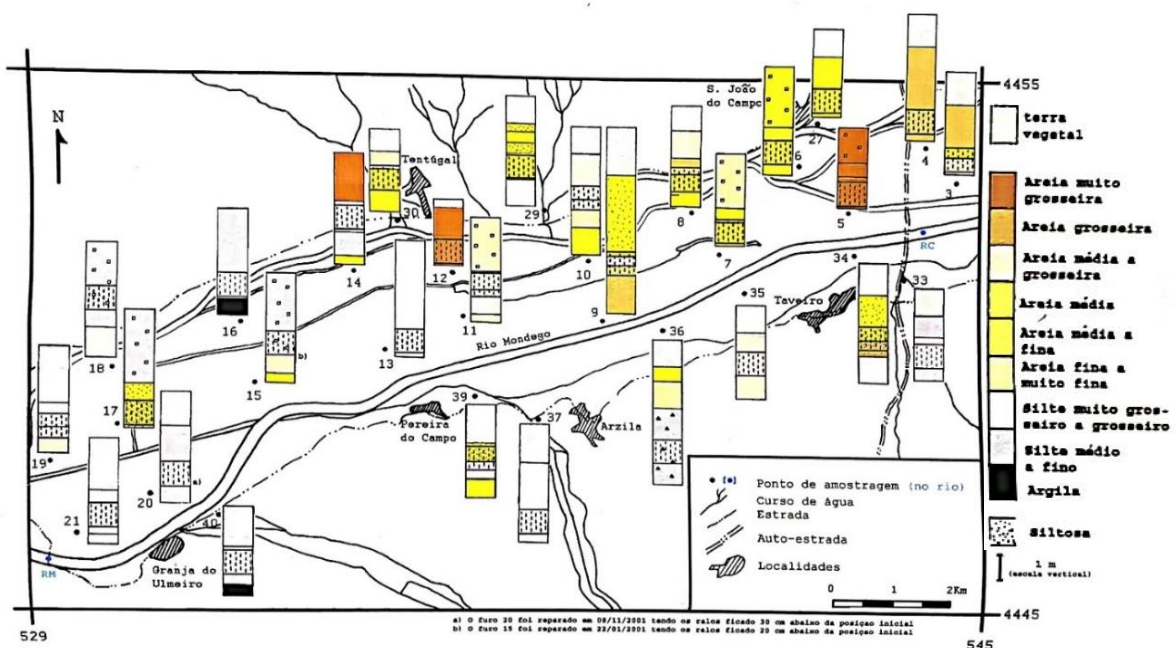


Figura 15-Litologias nos furos realizados em trabalhos anteriores no domínio em estudo (Andrade, 2004).

3.3. Hidrogeologia local

A massa de água subterrânea em estudo está implantada em depósitos aluvionares (meio poroso) e está limitada superiormente pelo nível freático e não apresenta confinamento hidráulico (aquífero freático). Esta unidade aquífera pertence ao SAAM – O6.

Na área abrangida neste estudo, situada entre os campos do Bolão e Montemor-o-Velho, a espessura das formações e a ocorrência de camadas espessas de areia condicionam a produtividade das captações, podendo ser encontrados furos produtivos e não produtivos. O sector inferior do aquífero aluvionar é aquele que é captado na maioria dos furos, sendo o que, à partida, apresenta melhores características hidrogeológicas.

Uma vez que este estudo incidiu essencialmente sobre o sector superior das aluviões, os furos/piezómetros intercetaram nas zonas arenosas os domínios sub-superficiais do aquífero livre definido por Peixinho de Cristo (1998). As zonas com litologia preferencialmente siltosa, constituem unidades com características de aquitardos.

Segundo Andrade (2004), a hidrodinâmica subterrânea no local onde evolui a massa de água em estudo apresenta as seguintes características gerais (Figura 16):

- o rio é quase sempre drenante, na zona E (piezómetros 3 e 4);
- a partir do piezómetro 29, o leito periférico direito (LPD) aparenta recarregar o aquífero; a montante deste furo, genericamente, drena-o;
- o escoamento entre o leito principal do rio e o LPD é convergente para a zona central entre estes leitos.

Ainda na margem direita, a W, na zona dos piezómetros 17 a 21, o escoamento da água do corpo aluvionar ocorre geralmente na direção do leito principal do rio, com descarga para este. Contudo, em março de 2001, após a situação de cheia, o escoamento nesta zona fazia-se na direção do LPD e de Montemor-o-Velho. Esta direção preferencial do escoamento subterrâneo coincidiu com a direção preferencial do escoamento à superfície verificada durante o período de cheias após a destruição dos diques das duas margens do LPD, junto a Montemor-o-Velho, e a rutura da margem direita do leito principal do rio na zona de Pereira - escoamento ao longo do leito velho do rio (localizado entre os piezómetros 20 e 21 e os piezómetros 15, 17 e 19).

Na margem esquerda, a partir de Março de 2002, as aluviões passam a receber água do rio (o mesmo tinha acontecido em 2000 e 2001), até ao período de cheia. A partir de Maio de

2001 e até Janeiro de 2002 o escoamento é longitudinal. Nesta margem parece clara a influência da ribeira de Cernache (ribeira do Paul de Arzila) que se faz sentir pela descarga hídrica das aluviões para o rio na zona do piezómetro 39. Esta descarga verifica-se a partir de Abril de 2001.

O gradiente hidráulico na zona variou entre 0,004, próximo dos piezómetros 20 e 21, e 0,00015, na zona central da margem direita o que traduz uma progressão hídrica intra-Sistema aquífero muito lenta.

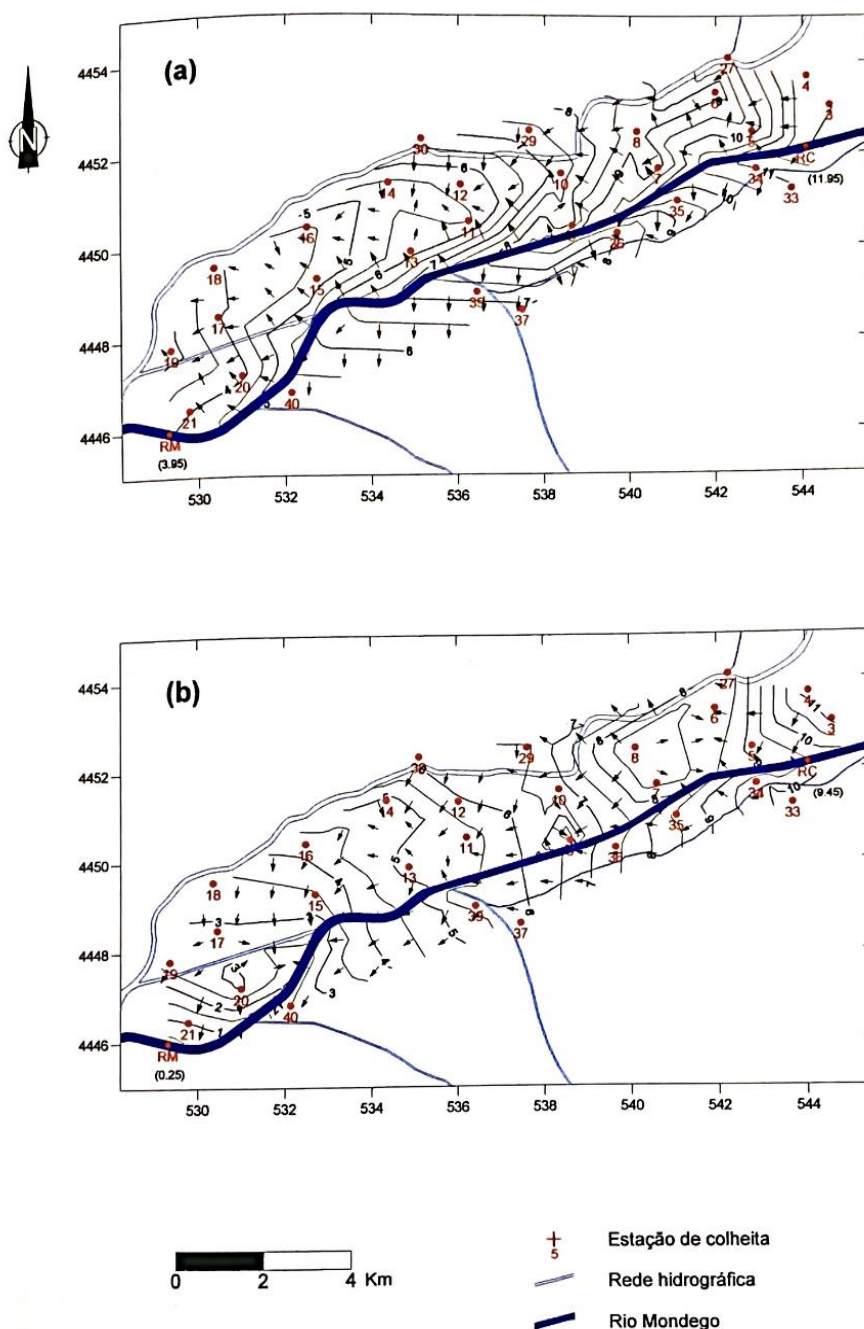


Figura 16- Representação da hidrodinâmica subterrânea no local em estudo (Mapa de isopiezias e de fluxo relativo a março (a) e setembro (b) de 2001 em Andrade, 2004).

3.4. Modelo hidrogeológico (conceptual)

Em linhas gerais, o escoamento subterrâneo intra-aquífero ocorre em direção aos cursos de água que atravessam longitudinalmente o sistema aquífero e ao longo do volume aluvionar até ao estuário (Almeida et al., 2000).

A recarga deste sistema aquífero far-se-á:

1. Por infiltração direta da precipitação;
2. Pela infiltração de parte dos excedentes da rega (efetuada geralmente entre abril e setembro, maioritariamente com água do rio - sistema de rega da zona emparcelada);
3. De forma direta ou por drenância ascendente e lateral (descarga oculta) através dos escoamentos com origem nas formações hidrogeológicas adjacentes. O sistema aquífero aluvionar do Baixo Mondego está delimitado por formações que constituem vários sistemas aquíferos nomeadamente, na zona em estudo, o sistema aquífero de Condeixa-Alfarelos e o sistema aquífero de Tentúgal¹ constituídos por formações aquíferas de idade Cretácica. Estas formações constituem o substrato do sistema aquífero aluvionar. Apesar da falta de existência ou até mesmo escassa da informação, é seguro que estas unidades aquíferas adjacentes possuam água com cotas piezométricas mais elevadas que a cota piezométrica da água no Sistema aquífero das aluviões e assim promovam a transferência de água para este último. Almeida et al. (2000) admitem que a planície aluvionar do Mondego deve ser a principal estrutura drenante do sistema aquífero de Condeixa-Alfarelos e que deve constituir também uma zona importante de descarga oculta do sistema aquífero de Tentúgal. Assim, à semelhança do que acontece com o escoamento superficial, em que o rio Mondego é o grande e principal eixo de drenagem, o corpo aluvionar constitui a zona de receção da descarga dos escoamentos subterrâneos das formações aquíferas adjacentes.
4. Através da descarga dos cursos de água que o atravessam e da escorrência superficial das encostas adjacentes. Para além da relação hidrodinâmica com as formações envolventes, referida no ponto 3, e que aparenta ser permanente e exógena, o Sistema aquífero aluvionar tem uma relação hidráulica de natureza sazonal (influyente ou efluente) com as linhas de água que o atravessam (nomeadamente com o leito principal do rio e os leitos periféricos). Esta

¹ O primeiro é constituído essencialmente pelos Arenitos e Argilas de Taveiro do Cretácico superior, pelos depósitos terciários que os recobrem e, mais a Sul, pelas unidades litostratigraficamente inferiores - Arenitos Finos de Lousões, os Calcários Apinhoados da Costa de Arnes e os Arenitos do Carrascal do Cretácico Superior a Inferior. No Sistema aquífero de Tentúgal as formações aquíferas correspondem, da mais antiga para a mais recente aos Arenitos de Carrascal, aos Calcários de Tentúgal (equivalentes dos Calcários da Costa de Arnes) e aos Grés do Furadouro (equivalentes dos Arenitos finos de Lousões).

relação atinge uma situação extrema aquando das cheias, onde o nível de água no rio sobe claramente acima do nível piezométrico do aquífero. As descargas das barragens de montante ou o efeito da maré no sector de jusante podem resultar também numa subida do nível da água no rio acima do nível piezométrico do aquífero. Nestas situações, a água evolui do rio para as margens, dando lugar a um armazenamento nos terrenos marginais que gradualmente se propaga pelo Sistema aquífero e se manifesta pela elevação da superfície freática. Logo que o nível da água no rio desce, inverte-se o sentido do fluxo subterrâneo, e a água do armazenamento marginal passa a ser responsável pelo aumento do caudal da linha de água, passando o rio a ser efluente.

As oscilações do nível piezométrico no sistema aquífero devidas à relação rio-aquífero devem-se à sobreposição de duas componentes: a) oscilações do nível da água no rio e b) variações no nível piezométrico resultantes de recarga ou descarga natural, ou artificial, no sistema aquífero.

A descarga deste sistema aquífero é, segundo Peixinho de Cristo (1998), feita essencialmente para o rio. No entanto, localmente efetuam-se extrações em furos. Os recursos renováveis do sistema aquífero do Baixo Mondego foram estimados entre 45 e 50 hm/ano por Peixinho de Cristo (1998). Na maior parte da sua extensão, as reservas do sistema são muito inferiores aos recursos exploráveis, beneficiando as explorações da infiltração da água do rio induzida pelo rebaixamento dos níveis piezométricos (Almeida et al., 2000).

Na Figura 17 apresenta-se um modelo esquemático conceptual simplificado do fluxo regional do sistema aquífero das aluviões do Baixo Mondego.

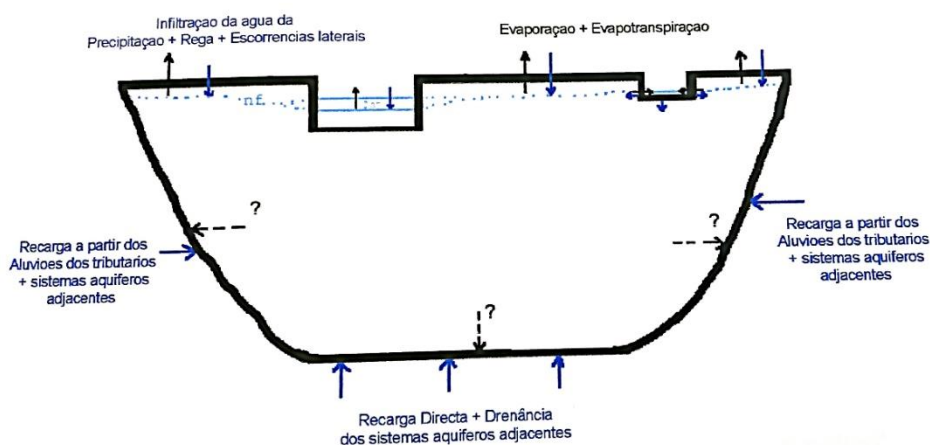


Figura 17- Modelo esquemático conceptual simplificado do fluxo regional do sistema aquífero das aluviões do Baixo Mondego (Andrade (2004)).

3.5. Hidrografia

O rio Mondego a partir da Portela (a Este de Coimbra), ao entrar nos terrenos da Orla Meso-Cenozoica, começa a ser um rio velho (Martins, 1940), significando isto que apresenta um perfil e uma morfologia "madura". Na zona em estudo tem três afluentes principais: na margem direita a ribeira de Ançã e na margem esquerda a ribeira de Cernache (ribeira do Paul de Arzila) e o rio Ega. Para além destes afluentes principais existem ainda outros que foram englobados neste estudo: na margem direita a ribeira de Vila Verde e a ribeira de Moinhos e na margem esquerda a ribeira de Frades.

Até à regularização do rio efetuada no seguimento do projeto hidráulico de 1962, que iniciou a sua concretização a partir de 1975, o regime hidrológico irregular do rio e o facto de o Baixo Mondego (sentido estrito) ser uma zona de topografia plana resultava muito frequentemente em cheias que inundavam e destruíam os campos agrícolas. Estas inundações não só assoreavam os campos com as areias abandonadas e danificavam as colheitas, mas também cortavam as vias de comunicação na área (Lourenço, 1986) e inundavam as povoações ribeirinhas.

As cheias do Mondego constituíam um fenómeno que de há alguns séculos (pelo menos desde finais do século XIII) vinha a atormentar não só os campos do Baixo Mondego, mas também a população de Coimbra e as localidades ribeirinhas na zona. Várias foram as providências ordenadas e as obras projetadas, mas, segundo Martins (1940), os resultados mostravam que não se tinha escolhida a melhor opção.

Já em 1791, o Padre Estêvão Cabral tinha concebido um plano para encanamento com o seu desvio mais para sul, entre Coimbra e Santo Varão, e com um traçado em linha reta plano esse que em parte se concretizou já no século XIX (Martins, 1940). A mudança do álveo do rio para sul deixou as águas dos vales localizados a nordeste da Geria e do campo do Bolão sem canais de escoamento, pelo que mais tarde foi decretado o encanamento destas águas até à vala de Ança e o melhoramento desta até desaguar no rio, constituindo a vala Norte. O atraso do início das obras provocou que em 1864, os prejuízos no campo fossem enormes, tendo estes trabalhos início em 1865 ficando a vala Norte com 24 km de comprimento (Sanches, 1996).

No entanto, a obra que se foi mantendo ao longo dos tempos não resolveu o problema (Lourenço, 1986), tendo o encurtamento do percurso do leito tornado as cheias ainda mais violentas (Ribeiro, 1998). Em 1960, na sequência de cheias que destruíram as searas de milho e de arroz em mais de 5000 ha, o agravamento do estado dos campos era tal que o

governo teve que prever um regime de redução ou mesmo isenção de contribuição predial e financiar os produtores de milho e de arroz. Impôs-se assim a premência de uma intervenção corretora por parte do Estado, visto que o trabalho nos campos constituía o sustento económico principal das famílias rurais da região (Hespanha & Reis, 1987).

O último projeto hidráulico baseou-se no plano geral de 1962 (DGRN, 1988 in Mendes, 1997).

O objetivo das obras de regularização fluvial foi a criação de um sistema de leitos estáveis, um leito central e dois leitos periféricos (um direito e outro esquerdo) que permitissem o escoamento dos caudais líquidos e sólidos afluentes à área a beneficiar (Lourenço, 1986). Segundo Mendes (1997), o caudal de cheia centenária foi reduzido de 4000 m³/s para 1200 m³/s, considerando a construção de barragens, entre as quais a Aguieira (no rio Mondego) e a de Fronhas (no rio Alva).

Para além de resolver os problemas provocados pelas frequentes inundações que limitavam o uso dos campos agrícolas às épocas de primavera e de verão, este projeto visava também a resolução de problemas relacionados com: a) as condições de drenagem que retardavam a época das sementeiras; b) a disponibilidade de água para rega; c) a salinização dos solos, a jusante de Montemor-o-Velho, com a elevada concentração de sal nas águas usadas para rega; d) a fragmentação da estrutura agrária da região do Baixo Mondego e e) a predominância de sistemas de produção de monocultura (Mendes, 1997).

3.6. Uso e ocupação do solo

De acordo com o Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios do Município de Coimbra (2018) e o Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios do Município de Montemor-o-Velho (2014), tendo estes valores muito semelhantes, conclui-se que a atividade florestal nesta região é a que apresenta uma maior percentagem de ocupação do solo, correspondendo a cerca de 47,74%. O segmento que ocupa a segunda maior dimensão é o correspondente à agricultura (31,96%). Os espaços urbanos apresentam-se ainda como o terceiro segmento com maior taxa de ocupação, correspondendo a 14,66%. Porém, existem outros segmentos, com uma taxa mais residual de ocupação, apresentando a sua devida importância, como o caso de matos e pastagens (3,80%), as águas interiores e zonas húmidas (1,39%) e por último os improdutivos (0,45%) (Figura 18).

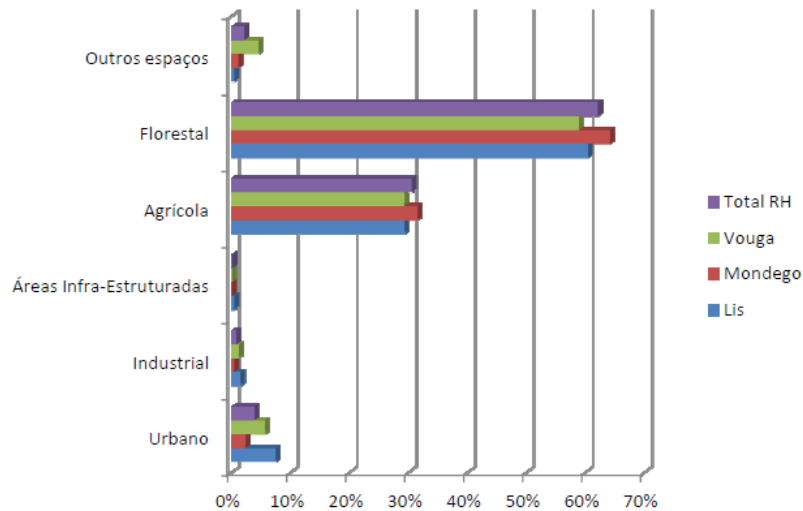


Figura 18- Uso do solo (%) referente aos rios Vouga, Mondego e Lis em toda a sua extensão (PGRHVML, 2012).

A área florestal encontra-se pelo concelho todo, com exceção do setor noroeste, que correspondem aos campos do Mondego, apresentando maioritariamente ocupação agrícola e ao setor central, que corresponde a uma ocupação maioritariamente urbana.

No que diz respeito à ocupação florestal, predominam as árvores como o eucalipto e o pinheiro bravo, correspondendo a 83% do concelho, levando à promoção de indústrias de serração e carpintarias. Com base na Figura 19 além de nos dar uma percepção desta ocupação florestal a nível da bacia hidrográfica completa, também nos remete para esta mesma ocupação na nossa zona em estudo.

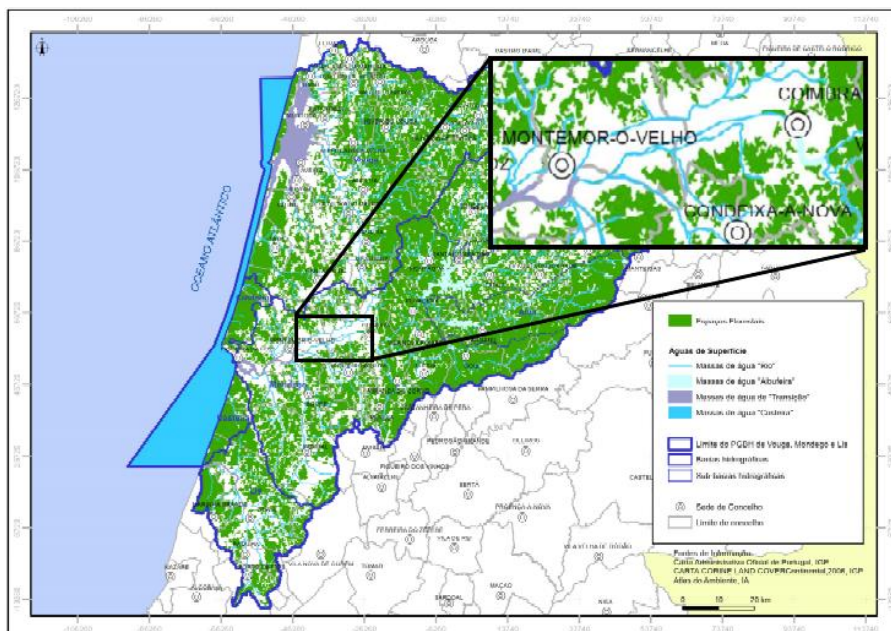


Figura 19- Ocupação florestal na zona em estudo (retângulo preto) (adaptado do PGRHVML, 2012).

O conhecimento do uso e ocupação do solo é um aspeto bastante importante para avaliação e monitorização dos recursos hídricos existentes na área em estudo, assim como no controlo de potenciais fontes de contaminação.

No domínio em estudo o uso e ocupação do solo apresenta as seguintes características gerais (Figura 20):

- Atividades agrícolas, predominando o cultivo de milho e arroz;
- Zonas urbana.

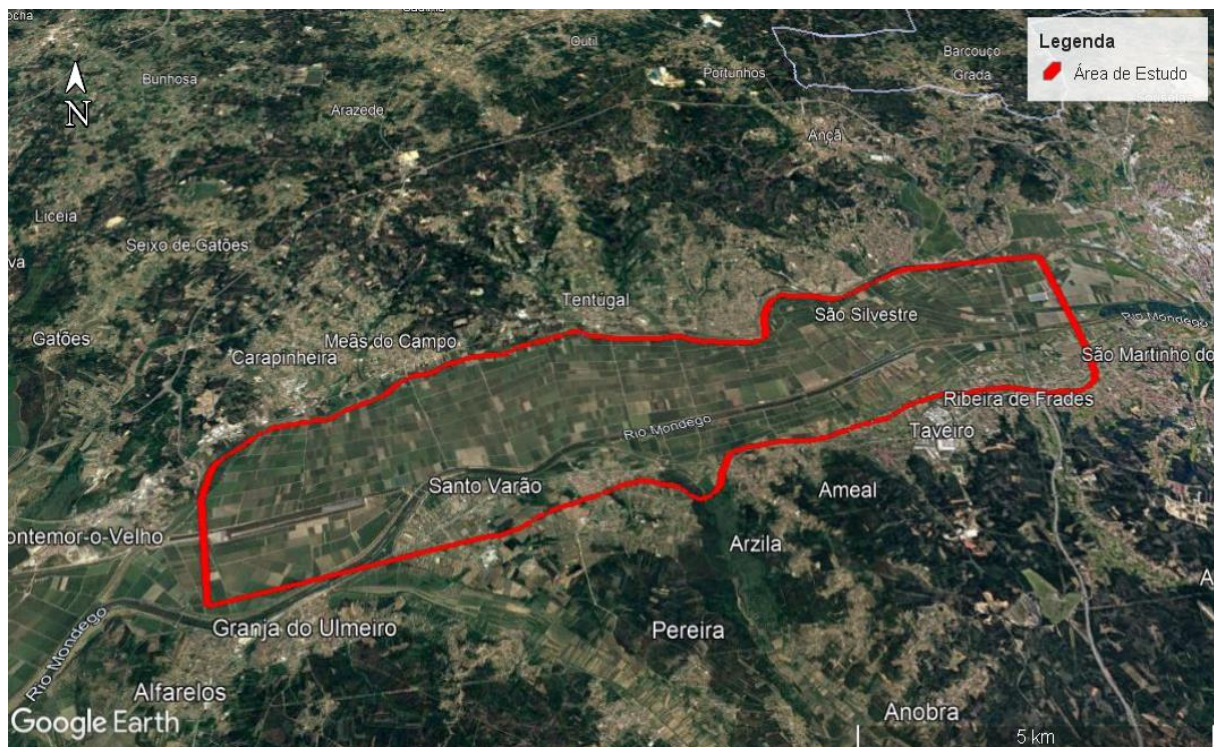


Figura 20- Aspeto geral da hidrografia e do uso e ocupação do solo na área em estudo (fonte: Google Earth).

No que diz respeito à zona em estudo nesta dissertação, esta está inserida maioritariamente numa zona de ocupação agrícola e uma pequena parte numa ocupação mais urbana (Figura 21). Quer a atividade agrícola, quer a área urbana podem constituir potenciais fontes de contaminação das águas subterrâneas nesta zona. Neste contexto, evidencia-se a agricultura intensiva com a possível utilização de fertilizantes bem como a decomposição de resíduos orgânicos nos solos. Além disso, a atividade doméstica como por exemplo derrame de resíduos domésticos ou problemas de mau funcionamento da rede de saneamento, pode provocar igualmente a contaminação hídrica local.

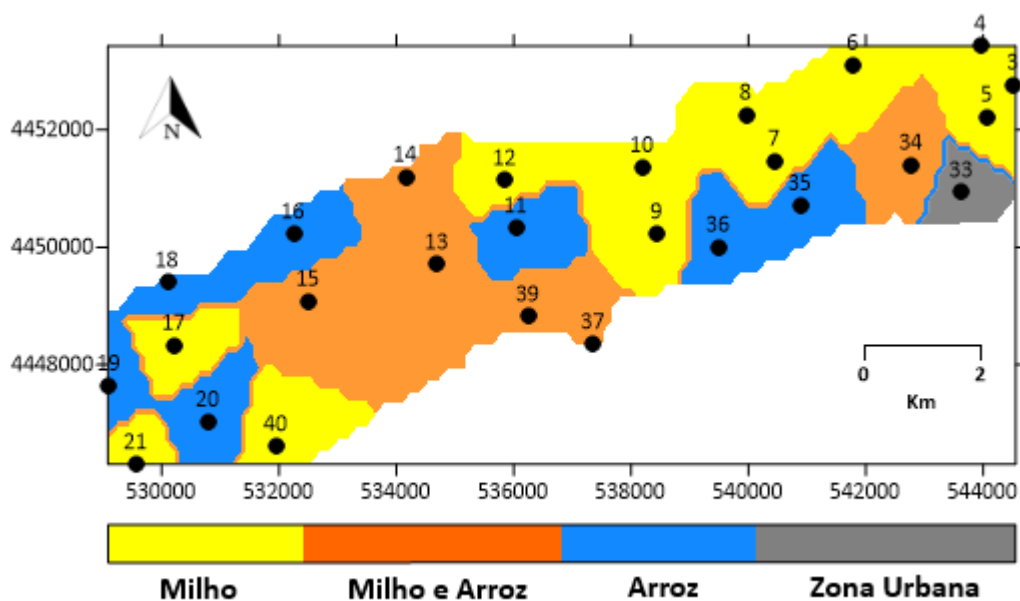


Figura 21- Uso e ocupação do solo no domínio em estudo (adaptado de Andrade, 2004).

4. Vulnerabilidade, perigosidade e risco de contaminação de águas subterrâneas

Atualmente os aquíferos e as massas de água subterrânea estão frequentemente expostos a contaminação pelas atividades antrópicas.

4.1. Vulnerabilidade e métodos de avaliação

4.1.1. Definição de Vulnerabilidade

O termo vulnerabilidade começou a ser utilizado por Margat (1968) ao referir que a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição é proveniente de um conjunto de fatores, que atuam de forma diferente de acordo com o tipo de poluição; definiu esses fatores designando-os como possíveis bases de uma cartografia de classificação resultante da combinação de diversas zonalidades. Albinet & Margat (1970, 1971) indicam que a vulnerabilidade do aquífero corresponde à possibilidade de percolação e difusão de contaminantes da superfície do solo para reservatórios naturais de água, em condições naturais. Estes autores evidenciaram que a proteção fornecida pelo ambiente natural varia de lugar para lugar, promovendo a representação em mapa do grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas aos contaminantes como função das condições hidrogeológicas (Albinet, 1970). Foster & Hirata (1991) referem que a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação hídrica representa a sua suscetibilidade para ser adversamente afetado por uma carga contaminante. No entanto, Custodio (1995) assinala que a vulnerabilidade à poluição expressa a incapacidade do sistema aquífero absorver as alterações, tanto naturais como as antrópicas. Auge (1995) refere que a vulnerabilidade é “um conceito qualitativo, que na generalidade se refere ao grau de proteção natural de um aquífero face à contaminação”. Por isso, é também conhecida como proteção ou defesa natural.”

A vulnerabilidade de um aquífero à contaminação pode ser estabelecida em função do tipo de litologia que lhe está associado. São mais vulneráveis os aquíferos freáticos associados a depósitos sedimentares detríticos (por exemplo, depósitos aluvionares) e os aquíferos em calcários muito fissurados ou carsificados e em formações fortemente fraturadas. Em meios aquíferos com elevada heterogeneidade ou onde ocorram alternância de materiais permeáveis e impermeáveis ou associados a formações vulcânicas, o grau de vulnerabilidade é mais difícil de estabelecer. A vulnerabilidade de um aquífero pode considerar-se baixa em aquíferos aos quais estejam associadas formações de materiais impermeáveis, tais como

formações sedimentares impermeáveis (margas e argilas) ou áreas graníticas e metamorfizadas pouco alteradas.

Zaporozec (1994) e Almeida et al. (2000) consideram que a vulnerabilidade é uma propriedade intrínseca de um sistema de águas subterrâneas que depende da sensibilidade/suscetibilidade desse sistema a impactes antropogénicos ou naturais. Zaporozec (1994) distingue entre vulnerabilidade intrínseca (ou natural), que é definida exclusivamente como função de fatores hidrogeológicos (características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas do aquífero e do solo sobrejacente), e vulnerabilidade específica (ou integrada), que inclui potenciais impactes humanos, associados ao uso do solo e ao tipo de contaminante, que podem ser prejudiciais, no espaço e no tempo, à atual e futura utilização do recurso hídrico. A Figura 22 ilustra de forma simples a distinção entre estes dois conceitos.

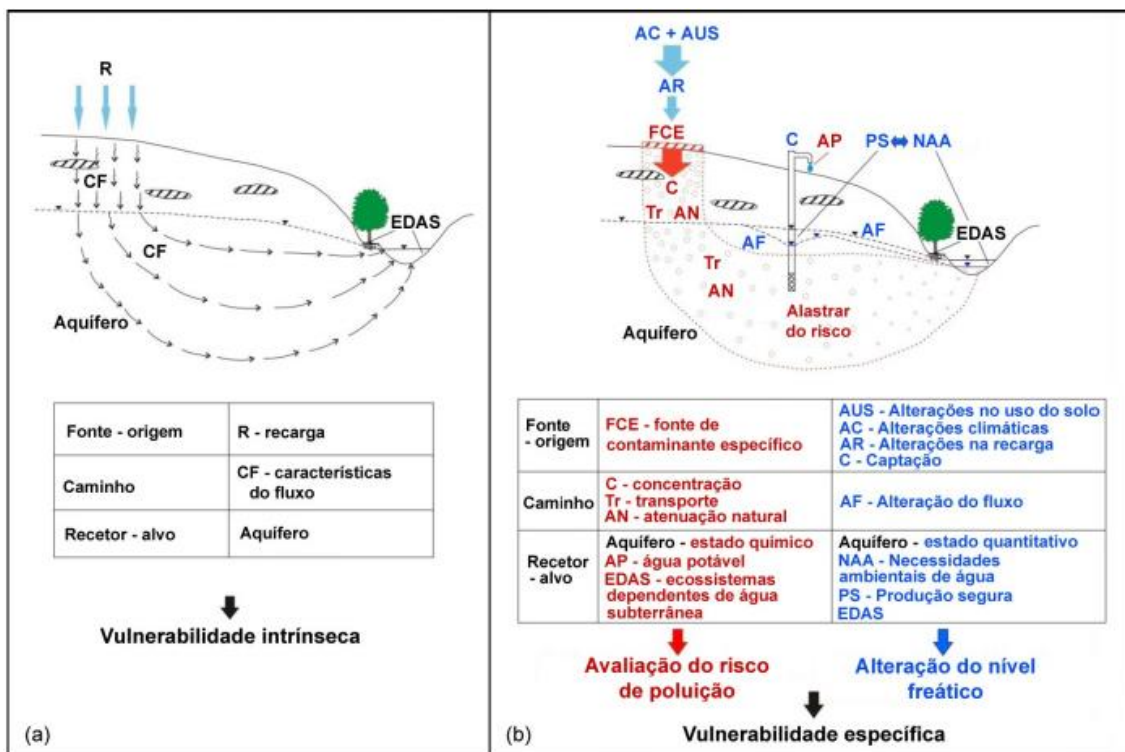


Figura 22- Representação gráfica simplificada dos conceitos básicos que definem vulnerabilidade intrínseca (a) e específica (b) (adaptado de Filippini et al., 2013).

Daly & Warren (1998) apresentam a definição de vulnerabilidade como representando as características geológicas e hidrogeológicas que determinam a facilidade com que a água subterrânea pode ser contaminada pelas atividades humanas.

Em Portugal, Lobo Ferreira & Cabral (1991) propuseram que o conceito de vulnerabilidade associado à poluição de águas subterrâneas fosse definido como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero, na sequência das conclusões da conferência internacional “Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants” (Matthess, 1987).

Vrba & Zaporozec (1994) salientam que a vulnerabilidade das águas subterrâneas é uma propriedade relativa, não mensurável e adimensional, em que a precisão da sua avaliação depende sobretudo da quantidade e qualidade de dados representativos e fidedignos. A avaliação da vulnerabilidade nem sempre é uma tarefa fácil e a simplificação excessiva ou a descrição inadequada do sistema hidrogeológico ou as dificuldades na obtenção de dados de campo fiáveis, pode constituir uma séria limitação na qualidade dos mapas de vulnerabilidade (Stigter et al., 2006). No entanto, Foster (2007) defende que, apesar das simplificações envolvidas, os mapas de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição são ferramentas valiosas. Lobo Ferreira (1998) refere que o mapeamento específico de vulnerabilidade é, do ponto de vista científico, mais consistente; no entanto, em geral, o número de dados disponíveis não é suficiente para a elaboração do mapeamento específico.

Do exposto verifica-se que o conceito de vulnerabilidade pode se focar em duas perspetivas diferentes: uma que se baseia na análise da envolvente natural do aquífero e nas suas próprias características – a vulnerabilidade intrínseca, e outra, designada vulnerabilidade específica, cuja análise, para além do comportamento do meio, contempla também o tipo e a carga contaminante. Desta forma, a avaliação da vulnerabilidade intrínseca é mais relevante em termos de ordenamento do território e das massas de água subterrâneas, permitindo definir áreas mais sensíveis do território. Por sua vez, a vulnerabilidade específica é preponderante no que se refere à avaliação do perigo inerente à deterioração da qualidade das águas subterrâneas face a específicas substâncias contaminantes.

4.1.2. Métodos de avaliação da vulnerabilidade

Em simultâneo com a definição de vulnerabilidade, desenvolveram-se várias metodologias de avaliação e de mapeamento da vulnerabilidade, nomeadamente, os métodos DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD (Foster, 1987; Foster & Hirata, 1988), SINTACS (Civita, 1994), AVI (Van Stempoot et al., 1992; 1993), entre outros.

Muitos dos métodos inicialmente desenvolvidos não consideram as características especiais dos sistemas cárscicos, que são particularmente vulneráveis à contaminação, uma vez que devido aos solos finos, à concentração do fluxo na zona cárscica e aos pontos de recarga através de orifícios, os contaminantes podem facilmente chegar à água subterrânea e rapidamente ser transportados ao longo de grandes distâncias através das condutas carsificadas (Andreo et al., 2006). Entretanto, métodos mais específicos foram sendo desenvolvidos, como, por exemplo, EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998), COP (Vias et al., 2004; 2006) e PaPRIKa (Huneau et al., 2013).

Alguns dos métodos incluem a determinação de índices de vulnerabilidade obtidos através de parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido, que possibilita o seu mapeamento. A vantagem é que os métodos fornecem algoritmos ou árvores de decisão relativamente simples e são apropriados para usar com os sistemas de informação geográfica (Majandang & Sarapirome, 2013).

No entanto, mais recentemente, autores como Yu et al. (2010) referem que os índices de vulnerabilidade correspondem a uma aproximação grosseira, sendo necessários estudos quantitativos sobre esses indicadores de vulnerabilidade, e apresentam no seu trabalho uma abordagem com simulação de transporte e uma tentativa de fornecer validação ou melhoria dos sistemas de índice. Abordagem semelhante está implementada no trabalho de Eberts et al. (2012), com avaliação de vulnerabilidade em termos de tempos médios de percurso ou distribuição de tempos de percurso da água.

Genericamente, o pressuposto a todos estes métodos é que os contaminantes são transportados para o nível freático por recarga, logo, áreas com maior taxa de recarga são mais vulneráveis do que as de menor taxa de recarga (Healy, 2010); no entanto, não existe um padrão universalmente aceite pelo qual a vulnerabilidade do aquífero seja estimada.

Afonso et al. (2010) salientam que a maioria dos métodos de avaliação da vulnerabilidade consideram meios homogêneos e isotrópicos, e que a uma escala regional a simplificação do ambiente geológico permite avaliar a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos; no entanto, a uma escala local a variabilidade dos parâmetros pode limitar a utilidade dos métodos.

De seguida apresentar-se-á o método DRASTIC com maior detalhe, uma vez que foi o método utilizado no trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação.

4.1.2.1. Método DRASTIC

A avaliação e cartografia de vulnerabilidade através do método DRASTIC foi proposto por Aller et al. (1987). A avaliação do índice de vulnerabilidade intrínseca do SAAM, através da aplicação do método DRASTIC, baseou-se nos critérios definidos por Aller et al. (1987), com algumas adaptações inerentes à escala do trabalho e à disponibilidade de dados.

O método DRASTIC (Aller et al., 1987), cuja designação resulta de um acrónimo com as iniciais dos sete parâmetros contemplados (Figura 23): (D - *Depth to water*; R - *net Recharge*; A - *Aquifer media*; S - *Soil Media*; T - *Topography*; I - *Impact of vadose zone* e C - *hydraulic Conductivity of the aquifer*), tem aplicação na avaliação da vulnerabilidade intrínseca resultando da ponderação de sete índices hidrogeológicos atribuídos aos sete parâmetros referidos anteriormente. Fornece um índice relativo de potencial à contaminação de águas subterrâneas e a valoração de cada parâmetro depende da sua importância relativa, em função de características intrínsecas da própria hidrogeologia da região em estudo. Estes parâmetros e respetiva valoração são analisados e atribuídos em pontos específicos de amostragem e análise, que no conjunto representam a malha de amostragem. Em cada ponto de amostragem, a cada um destes parâmetros atribuem-se valores de 1 a 10, que estão relacionados com as condições locais (valores mais elevados correspondentes a maior vulnerabilidade), e pesos de 1 a 5 de acordo com a sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade, atribuindo-se pesos maiores aos parâmetros com maior importância.

Na Tabela 2 consta a síntese destes elementos referidos anteriormente e na Figura 23 a representação esquemática dos parâmetros.

Após a fase de atribuição de valores gera-se a cartografia de cada variável ou parâmetros DRASTIC: mapa de profundidade do nível freático (D), mapa de recarga do aquífero (R), mapa do tipo de aquífero (A), mapa de tipo de solos (S), mapa de topografia (T), mapa de impacto da zona não saturada (I) e o mapa de condutividade hidráulica (C).

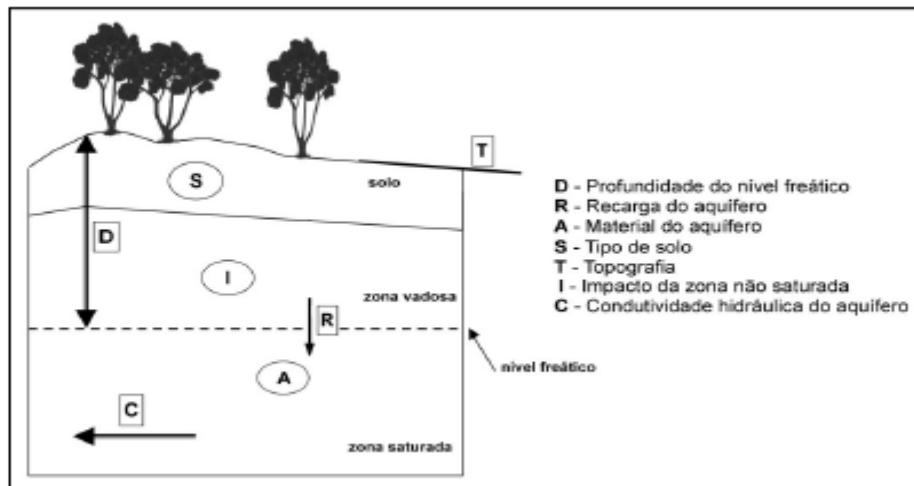


Figura 23- Representação esquemática dos parâmetros do método DRASTIC (adaptado de LNEC, 2002).

O índice DRASTIC (ID) resulta da soma dos produtos dos pesos (p) pelos valores (v) atribuídos a cada parâmetro, segundo a equação [1] estabelecida por Aller *et al.* (1987):

$$ID = D_v \times D_p + R_v \times R_p + A_v \times A_p + S_v \times S_p + T_v \times T_p + I_v \times I_p + C_v \times C_p \quad [1]$$

Os valores do ID são distribuídos por 8 classes e variam entre, ≤ 79 e ≥ 200 , sendo que quanto maior for o ID maior é a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas. Na Tabela 3 apresentam-se estas classes e a correspondência em termos qualitativos de vulnerabilidade assim como a escala de cores atribuídas.

Tabela 2- Parâmetros, classes, valores e pesos do método DRASTIC (adaptado de Aller et al., 1987).

Parâmetro	Classes	Valor DRASTIC (v)	Peso (p)
D Profundidade do nível freático (m)	0 - 1,5	10	5
	1,5 - 4,6	9	
	4,6 - 9,2	7	
	9,2 - 15,3	5	
	15,3 - 22,9	3	
	22,9 - 30,5	2	
	≥ 30,5	1	
R Recarga (mm/ano)	0 - 50,8	1	4
	50,8 - 101,6	3	
	101,6 - 177,8	6	
	177,8 - 254,0	8	
	> 254	9	
A Material do aquífero	Xisto Argiloso	1 - 3	3
	Rocha metamórfica / ígnea	2 - 5	
	Rochas metamórficas e ígneas alteradas	3 - 5	
	Tilitos	4 - 6	
	Arenito, calcário e argilito estratificados	5 - 9	
	Arenito maciço	4 - 9	
	Calcário maciço	4 - 9	
	Areia e cascalho	4 - 9	
	Basalto	2 - 10	
Calcário carsificado	9 - 10		
S Tipo de solo	Fino ou ausente	10	2
	Cascalho	10	
	Areia	9	
	Turfa	8	
	Argila expansível	7	
	Franco arenoso	6	
	Franco	5	
	Franco siltooso	4	
	Franco argiloso	3	
	Lodo	2	
Argila não expansível	1		
T Topografia (%)	0 - 2	10	1
	2 - 6	9	
	6 - 12	5	
	12 - 18	3	
	> 18	1	
I Impacto da zona não saturada	Camada confinante	1	5
	Argila / Silte	2 - 6	
	Xisto argiloso, argilito	2 - 5	
	Calcário	2 - 7	
	Arenito	4 - 8	
	Calcário, arenito e argilito estratificados	4 - 8	
	Areia e cascalho com significativa percentagem de silte e argila	4 - 8	
	Rochas metamórficas e ígneas	2 - 8	
	Areia e cascalho	6 - 9	
	Basalto	2 - 10	
Calcários estratificados	8 - 10		
C Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	< 4	1	3
	4 - 12	2	
	12 - 29	4	
	19 - 40	6	
	40 - 82	8	
	> 82	10	

Tabela 3- Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC (adaptado de Aller et al., 1987).

Classes	Nulo	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Considerável	Alto	Muito alto
ID	≤ 79	80 - 99	100 - 119	120 - 139	140 - 179	180 - 199	≥ 200

4.2. Perigosidade, risco e métodos de avaliação

4.2.1. Definição de perigosidade e de risco

Um conceito associado à vulnerabilidade é o risco que, segundo Paralta (2009), pode ser definido como a probabilidade de ocorrência de determinado cenário de contaminação acima de valores limites pré-estabelecidos, tomando em conta a vulnerabilidade da área estudada. No entanto, Zwahlen et al. (2004) referem que o termo risco é usado para definir a probabilidade de uma determinada consequência adversa, dependendo da probabilidade dos poluentes se desenvolverem e das consequências para a água subterrânea.

O risco de poluição vai depender não só da vulnerabilidade, mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo, causado não só pelas características intrínsecas do aquífero, particularmente muito estáveis, mas também pela existência de atividades poluentes, fator dinâmico que, em princípio, pode ser controlado (Lobo Ferreira et al., 1995; LNEC, 2002).

Daly et al. (2004) indicam que, considerando o modelo "origem-caminho-alvo", o risco de contaminação da água subterrânea depende de três elementos: o perigo de uma atividade potencialmente poluente (equivalente à origem), a vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea à contaminação (equivalente ao caminho) e as potenciais consequências de um evento de contaminação (o alvo é a água subterrânea). Neste contexto, o perigo é definido como uma fonte potencial de contaminação resultante de atividades humanas que ocorrem, principalmente à superfície (De Ketelere et al., 2004). Na Tabela 4 apresenta-se algumas fontes de poluição, pontuais e difusas, das águas subterrâneas.

Tabela 4- Fontes e produtos de poluição da água subterrânea (adaptado de Notenboom et al., 1994).

Tipo de poluente	Tipo de fonte	Fonte
Metais pesados	Difusa	Fertilizante químico e natural; Deposição atmosférica; Sistemas de esgotos; Pesticidas com metais; Vias de comunicação (estradas, caminhos-de-ferro, etc).
	Pontual	Áreas urbanas, Zonas industriais e Aterros; Cemitérios; Minas e escombrelras abandonadas.
Pesticidas	Difusa	Agricultura e deposição atmosférica.
Orgânicos naturais e de origem artificial	Difusa	Deposição atmosférica.
	Pontual	Áreas urbanas, Zonas industriais; Aterros; Cemitérios; Escombrelras de minas; Fugas de tanques de contenção de líquidos;
Fertilizantes (azoto e fósforo)	Difusa	Agricultura e infiltração de águas poluídas;

Em síntese, o risco é o resultado da interação entre vários componentes: perigo ou perigosidade, vulnerabilidade intrínseca, exposição e mitigação. Como tal, Foster (1987) define risco como sendo o perigo de deterioração da qualidade da água armazenada num aquífero, pela existência real ou potencial de cargas contaminantes na sua envolvente. Em contrapartida Vrba & Zaporozec (1994) assimilam o risco com a vulnerabilidade específica na medida em que ambos se referem ao perigo de contaminação da água subterrânea face a um contaminante. Foster & Hirata (1991) referem que a contaminação aquífera se define como a probabilidade de que as águas subterrâneas contenham algum elemento ou substância em concentrações acima dos valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde para a qualidade da água destinada ao consumo humano.

Pelas definições citadas, a caracterização mais aproximada da ideia de risco de poluição de água subterrânea resulta da associação e da interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero (intrínseca) e a carga contaminante aplicada no solo ou em sub-superfície (Figura 24). Assim, a avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas depende de dois conjuntos principais de fatores:

- Do conjunto de parâmetros que controlam a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, nomeadamente, da espessura da zona não saturada (profundidade do nível da água), tipo de porosidade (primária ou secundária), tipo de rocha ou solo, velocidade das águas subterrâneas e a recarga do aquífero.
- Da presença, do tipo, quantidade e forma de lançamento do poluente no solo; o tipo de poluente será mais perigoso quanto mais móvel e persistente for nos meios saturados e não saturados. Além disso, se a quantidade lançada de poluente for grande, poderá superar a capacidade atenuante do solo. Em regiões muito chuvosas, mesmo uma pequena quantidade de poluentes pode chegar rapidamente ao aquífero por efeito de transporte das águas provenientes das chuvas.

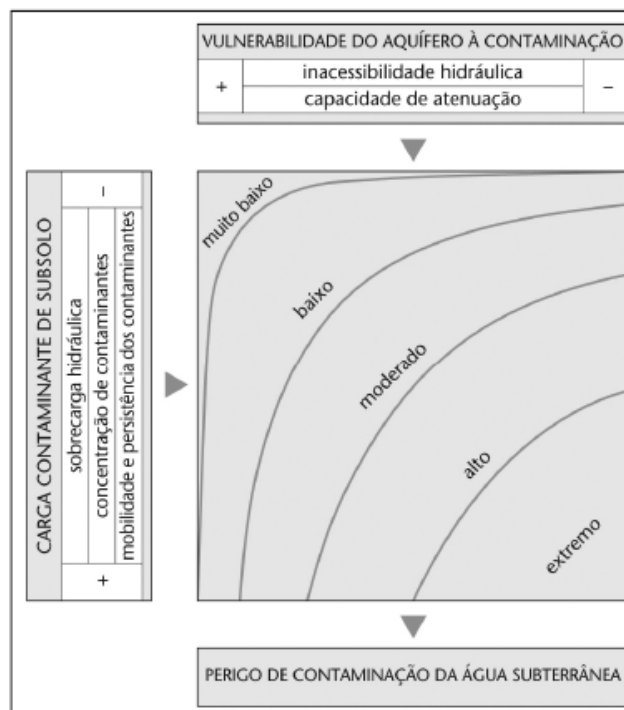


Figura 24- Esquema conceptual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea (Foster et al., 2006).

O segundo conjunto de fatores associados às atividades antrópicas locais e regionais refere-se ao uso de solo, muitas vezes designado por *Land Use* (LU).

A avaliação do risco constitui um processo sistemático para estimar o impacto potencial de um agente químico, biológico ou físico na água subterrânea. A avaliação do risco ou análise do risco identifica os riscos, existentes ou potenciais, e as vias de exposição da contaminação, de modo a proporcionar uma base para a identificação de medidas que garantam a proteção da água subterrânea (Daly et al., 2004). Estes autores salientam que a análise do risco deve

ser realizada em duas fases: a avaliação da intensidade do risco e a avaliação da sensibilidade ao risco. Ambos são componentes essenciais para a avaliação global do risco, que constitui a base para uma gestão sustentável do risco (Tabela 5).

Tabela 5- Questões principais da avaliação da intensidade do risco, da avaliação da sensibilidade do risco e da gestão do risco (adaptado de Daly et al., 2004).

<p>O que pode correr mal? Identificação dos perigos e das consequências</p> <p>Qual a probabilidade de correr mal? Estimativa da probabilidade destas consequências</p> <p>Até que ponto pode o impacto perigoso atingir o alvo? Estimativa da possibilidade de redução do impacto (ou estimativa da vulnerabilidade)</p>	<p>Avaliação da intensidade do risco</p>
<p>O que pode acontecer ao alvo se algo correr mal? Avaliação da sensibilidade do alvo versus o Impacto (análise da consequência)</p> <p>O risco é aceitável e pode ser reduzido? Avaliação do dano considerando o valor ambiental e económico</p>	<p>Avaliação da sensibilidade ao risco</p>
<p>AVALIAÇÃO GLOBAL DO RISCO</p>	
<p>Que decisões resultam da avaliação do risco?</p> <p>Que medidas de controlo são necessárias para minimizar o risco?</p>	<p>Gestão do risco</p>

As cartas de risco constituem uma forma espacial de sintetizar os resultados de avaliação global do risco, que integram todos os aspetos do procedimento de avaliação. São a conjugação das cartas de intensidade do risco (que englobam a combinação das cartas de perigosidade e de vulnerabilidade das cartas de sensibilidade do risco que retratam a sensibilidade de água subterrânea contra um certo impacte considerando o valor económico e ecológico do recurso). A gestão do risco baseia-se na análise e no cruzamento de informação diversa, como por exemplo, o uso do solo, a carga contaminante no subsolo e a vulnerabilidade do aquífero, de modo a alcançar uma resposta ao risco que integre a avaliação e seleção de um conjunto de opções, bem como a implementação de medidas para prevenir, ou minimizar, a probabilidade de um evento de contaminação e as suas consequências, caso este venha a ocorrer. Isto inclui, por exemplo, uma gestão de utilização do solo que restrinja as intervenções às zonas de menor risco, uma política de construção que tenha em consideração a vulnerabilidade e o valor da água subterrânea, e a implementação de redes de monitorização e de práticas operacionais especiais (Daly et al., 2004).

4.2.2. Avaliação da perigosidade e do risco

De um modo geral, a avaliação da Perigosidade (ou Land Use) foi identificada a partir das atividades humanas que possam colocar em perigo a estabilidade da massa de água subterrânea do SAAM, enquanto a avaliação do risco resulta da combinação dos resultados obtidos para a vulnerabilidade intrínseca e do Land Use (uso e ocupação do solo).

4.2.2.1. Determinação da perigosidade

Sendo a vulnerabilidade intrínseca calculada com base numa metodologia (método DRASTIC) previamente existente e testada, em contrapartida a determinação da perigosidade baseia-se na metodologia RUN, que é um método não tao amplamente conhecido e utilizado em relação ao método DRASTIC. O método RUN foi implementado por Matias (2010), cujas siglas remetem para os três fatores/parâmetros considerados, nomeadamente a rede viária (R), uso do solo (U) e nitratos (concentração na água subterrânea). Neste trabalho são propostas adaptações a este método que resultam das características da zona em estudo, uma vez que na sua grande maioria é utilizada para uso agrícola.

A determinação da perigosidade resultou na análise do uso do solo (Land Use), evidenciando a presença de 4 parâmetros que podem afetar adversamente a qualidade da água subterrânea, nomeadamente, zonas urbanas, zonas de cultivo de milho, zonas de cultivo de arroz e, por último, zonas onde há o cultivo de ambos, ou seja, milho e arroz em simultâneo. A qualidade da água subterrânea pode ser afetada com a introdução de potenciais poluentes resultantes de lixos, fertilizantes e pesticidas, entre outros, cujos lixiviados poderão chegar aos níveis freáticos.

4.2.2.2. Determinação do risco

A avaliação do risco de contaminação da água subterrânea pressupõe a conjugação da vulnerabilidade intrínseca com a perigosidade e a ocupação do solo.

Nesta dissertação, optou-se por fazer separadamente a quantificação da vulnerabilidade intrínseca e da perigosidade para, posteriormente, se calcular o risco.

A metodologia de determinação do risco (R) seguiu a proposta por Ribeiro (2005), que resulta na soma dos produtos da vulnerabilidade intrínseca (VI) e do uso do solo (LU -Land Use), conforme a equação (2).

$$R = 0,186 D + 0,212 R + 0,256 A + 0,121 T + 0,222 LU \quad [2]$$

Em que o D corresponde à profundidade do nível freático, o R à recarga, o A ao material do aquífero, o T à topografia, relativos à vulnerabilidade intrínseca, e o LU (Land Use) que corresponde ao uso do solo.

Uma vez que a zona em estudo é muito homogênea, esta equação foi adaptada, atribuindo maior peso ao LU (Land Use), neste caso de 0,4 e aos parâmetros da vulnerabilidade intrínseca (VI) um peso de 0,6, resultando na equação (3):

$$R = 0,6 VI + 0,4 LU \quad [3]$$

Na Tabela 6 e 7 apresenta-se a pontuação atribuída aos diferentes tipos de uso e ocupação do solo (LU) e as classes de valores, assim como, a correspondente classificação do Risco (R) atribuída e adaptada ao domínio em estudo, respetivamente.

Tabela 6- Valoração referente ao uso e à ocupação do solo para o cálculo do risco (adaptado de Ribeiro, 2005).

Uso e ocupação do solo		Pontuação
Áreas agrícolas	Milho	45
	Arroz	55
	Milho/Arroz	50
Áreas artificiais	Áreas urbanas contínuas, aeroportos	75
Áreas naturais	Ambientes aquáticos	50
	Florestas e zonas seminaturais	0

Tabela 7- Classificação do Risco (R) adaptada à situação em estudo.

Valores	Classes	Risco
90 -100	I	Mais baixo
100 - 110	II	Intermédio
>110	III	Mais alto

4.3. Metodologias e dados de base utilizados

4.3.1. Metodologias utilizadas

No presente estudo pretende-se determinar a Vulnerabilidade Intrínseca (VI), a Perigosidade (P) e o Risco (R) à contaminação do aquífero freático que evolui no sector centro-este do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6.

Para a avaliação da VI utilizou-se o método DRASTIC, que contempla uma série de parâmetros que de forma qualitativa definem o grau de vulnerabilidade da água subterrânea face a potenciais situações de contaminação. De certa forma, procura-se definir o grau de proteção natural que o sistema possui face a elementos externos que podem vir a afetar o seu equilíbrio natural.

A avaliação da Perigosidade (P) baseou-se na identificação das atividades humanas que possam colocar em perigo a estabilidade da massa de água subterrânea do SAAM, procurando-se qualificá-las em função do potencial de ameaça e da probabilidade de virem a afetar o equilíbrio do subsistema aquífero, independentemente, da maior ou menor vulnerabilidade atual.

Por fim, a definição do Risco (R) de contaminação aquífera e a sua distribuição espacial baseou-se na combinação dos resultados obtidos para a VI e para a P, decorrente das atividades humanas que são desenvolvidas na área.

4.3.2. Dados de base

Para a avaliação da vulnerabilidade (VI) e do risco (R) de contaminação do aquífero freático no domínio em estudo, fez-se o levantamento e recolha de dados publicados e referentes aos parâmetros incluídos nas metodologias utilizadas (Tabela 8).

Tabela 8- Fontes de recolha dos dados utilizados para a quantificação dos parâmetros e das metodologias utilizadas.

Parâmetro	Designação	Fonte de recolha
D	Profundidade do nível freático	Andrade (2004)
R	Recarga	PGRH4
A	Material do aquífero	Andrade (2004)
S	Tipo de solo	Andrade (2004)
T	Topografia	Google Earth/SNIRH
I	Impacto da zona não Saturada	Andrade (2004)
C	Condutividade hidráulica	PGRH4
LU	Land Use	Andrade (2004)

Estes dados foram obtidos a partir de uma Tese de Doutoramento (Andrade, 2004), do Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos (SNIRH) e da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), nomeadamente do Plano de Gestão de Região Hidrográficas do Vouga, Mondego e Lis (PGRHVML, 2012). A adequação dos dados aos objetivos traçados para este trabalho exige que lhes seja feita uma análise ponderada, resultante também da obtenção de informação representativa da área em estudo.

Na Tabela do Anexo A2 apresenta-se a matriz com os 26 pontos selecionados e os respetivos valores atribuídos para cada metodologia.

4.4. Tratamento de Dados

O tratamento de dados recolhidos constitui um processo é uma parte importante para o sucesso da implementação das metodologias de determinação da sua vulnerabilidade, perigosidade e do risco. Neste sentido, os sistemas de informação geográfica (SIG) são uma importante ferramenta na execução de análises de ordem espacial. Um SIG, não é mais do que uma integração organizada de hardware, software, dados geográficos e pessoas, capazes de executar procedimentos de aquisição, entrada, armazenagem e análise dos referidos dados, tendo em vista a resolução dos problemas propostos.

Tendo por base o sistema operativo Windows 10, o processamento de texto, bem como alguns dos gráficos apresentados, serão realizados com recurso às ferramentas do Microsoft Office™ (Word e Excel). No que diz respeito a ferramentas SIG, utilizadas para gerir toda a informação geográfica, recorreu-se ao produto da *GoldenSoftware*™, nomeadamente à versão 19 e 20 do Surfer, empregue na modelação bidimensional do terreno para a realização de todas as tarefas de análise espacial, no que diz respeito aos mapas. Estes mapas produzidos têm todos por base o sistema de referência *World Geodetic System 1984*, zona 29N.

5. Vulnerabilidade Intrínseca e Risco no Setor centro-este do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6

Neste capítulo serão apresentados os resultados da avaliação feita para o domínio em estudo.

Numa primeira fase para a determinação da Vulnerabilidade Intrínseca (VI) utilizou-se o método de DRASTIC e os elementos físicos de 26 piezómetros de Andrade (2004) (Figura 25).

Por último, determinou-se o Risco de contaminação hídrica (R), que resulta da interação entre o perigo (Perigosidade – P) do objeto exposto (neste caso, a massa de água subterrânea) face à sua Vulnerabilidade Intrínseca (VI).

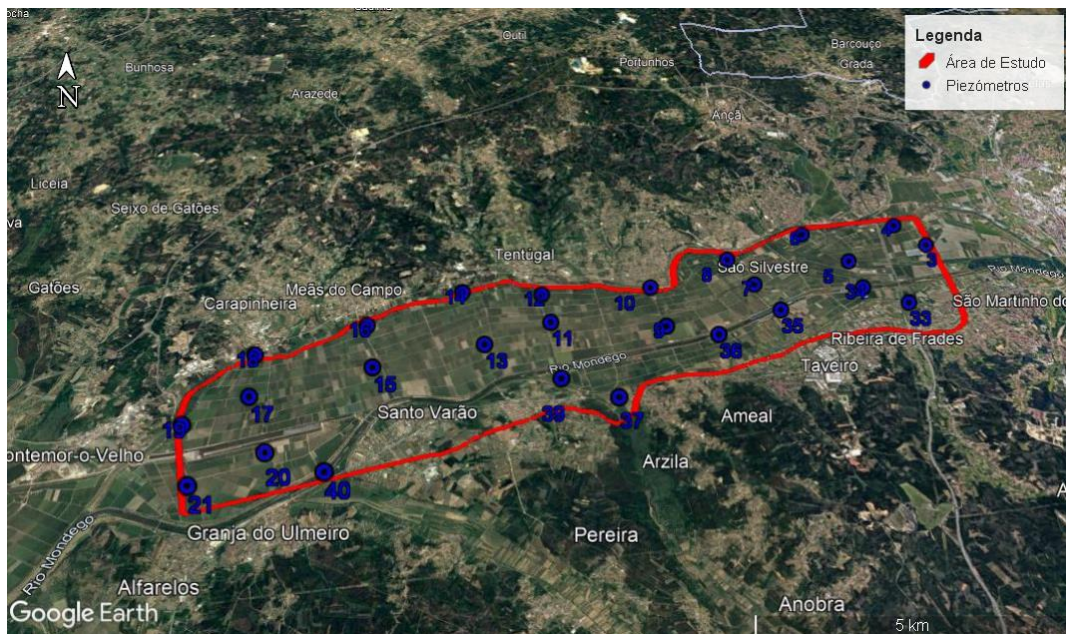


Figura 25- Localização dos 26 piezómetros na área em estudo (adaptado de imagem *Google Earth*).

5.1. Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca (VI) pelo Método DRASTIC

A avaliação de VI no domínio em estudo pela aplicação do método DRASTIC, baseou-se nos critérios e procedimentos definidos por Aller et al. (1987), com alguns ajustamentos inerentes à escala do trabalho, à disponibilidade de dados e às características físicas locais, nomeadamente aos dados dos referentes aos 26 piezómetros utilizados (sintetizados na Tabela A1, em anexo).

5.1.1. Determinação e Análise dos Parâmetros DRASTIC

5.1.1.1. Parâmetro D - Profundidade da água

A profundidade da água (parâmetro D), juntamente com o Impacto da zona vadosa (parâmetro I), são aqueles que apresentam um maior peso (5) na determinação da VI pelo método DRASTIC.

A determinação de D baseou-se nos valores dos níveis freáticos medidos nos 26 locais localizados dentro da área em estudo.

A profundidade da água corresponde à profundidade do nível freático em determinado momento (neste estudo utilizaram-se os valores medidos nos anos hidrológicos de 2000/2001 e 2001/2002) e local de observação. Quanto maior o valor de D maior a espessura desta zona vadosa (ou não-saturada) e tendencialmente menor o valor de VI.

Com base nos valores de D registados nos pontos de observação foi produzida a Figura 26 que representa a distribuição espacial da Profundidade da água no domínio em estudo.

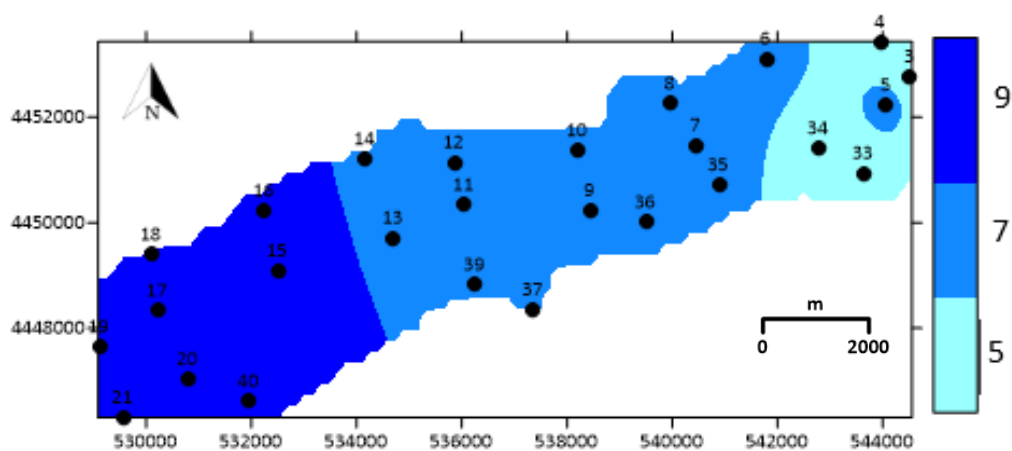


Figura 26- Variação espacial do Parâmetro D do método DRASTIC na área em estudo.

Na Tabela 9 apresentam-se os valores do parâmetro D, com as suas respectivas áreas de influência determinadas.

Tabela 9- Valores do Parâmetro D - profundidade média da água – e áreas de influência determinados para o domínio em estudo.

Profundidade do nível freático (m)	Valor DRASTIC	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
1,5 - 4,6	9	13,7	25
4,6 - 9,2	7	19,2	35
9,2 - 15,3	5	21,4	39
TOTAL		54,3	100

Da observação da Figura 26 e da Tabela 9 ressaltam os seguintes aspetos:

- A W encontram-se os menores valores de D; profundidades (inferiores a 4,6 metros);
- A zona Central, onde a profundidade do nível freático varia entre os 4,6 m e os 9,2 m, valores entre os quais se situa a maioria dos piezómetros e que são representativos para mais de 35 % da área em estudo;
- Na zona E, situada mais para interior e com altitudes mais elevadas, os valores sobem para a classe seguinte (9,2 a 15,3 metros).

Na rega local utilizam água superficial (sistema de rega do Baixo Mondego), não afetando na sua grande maioria a profundidade do nível freático,

No geral, tendo em conta apenas este parâmetro, a VI poderá ser considerada moderada a alta no domínio em análise, pois, considerando que a escala de análise varia entre 1 e 10, por volta de 40% da área é atribuído valor de 5, mais de 30% igual a 7, e por último a classe próxima do máximo (9 valores) superior a 20%.

5.1.1.2. Parâmetro R – Recarga do Aquífero

A recarga aquífera (R) é o terceiro parâmetro mais importante (peso 4) na determinação da VI.

De forma simplista, e considerando que toda a água que atinge o solo e não se evapora alcança o aquífero, isto é, constitui recarga, num domínio com as características do estudado (praticamente sem escoamento superficial), R pode ser estimada através da equação:

$$R = P - ETR$$

em que R = Recarga aquífera; P = Precipitação atmosférica e ETR = Evapotranspiração Real

Segundo Andrade (2004), o valor de recarga do aquífero no domínio em estudo, é da ordem dos 300 mm anuais. No caso em estudo foram, atribuídas duas classes de R em função do tipo de solo e da zona vadosa:

- Recarga superior a 300 mm anuais nos piezômetros implantados em meios mais grosseiros (valor de 9 para este parâmetro);
- Recarga inferior a 300 mm anuais atribuído nos piezômetros implantados em meios menos grosseiros (valor de 8 para este parâmetro).

Com base nestas classes, foi produzido o mapa da Figura 27 que representa a distribuição espacial da recarga e determinadas as respectivas áreas de influência apresentados na Tabela 10.

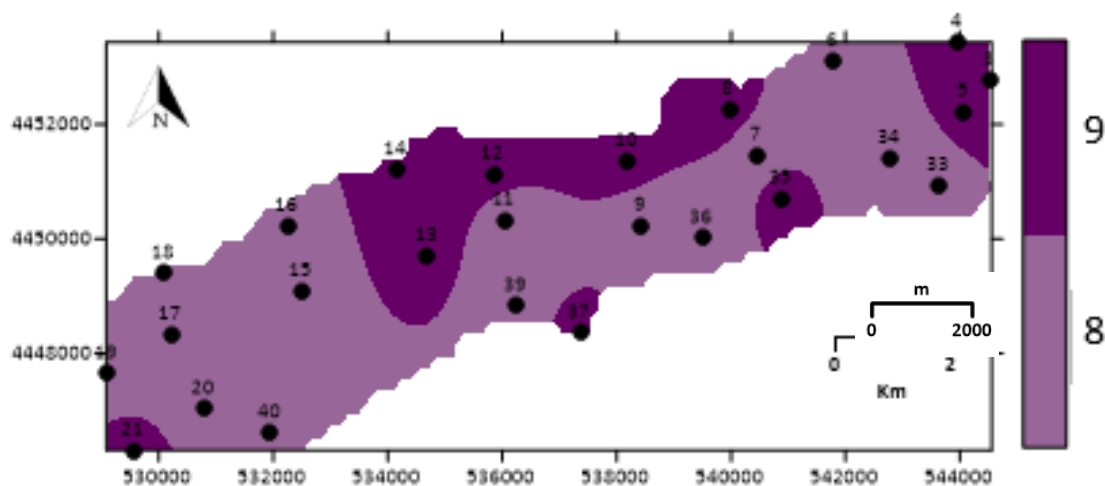


Figura 27- Variação espacial do Parâmetro R do método DRASTIC na área em estudo.

Devido à dependência direta da precipitação (Figura 4, subcapítulo 2.2.2.) que aumenta de NE para SW e as classes atribuídas na Tabela 8, a maior ocupação da área em estudo, com 75% desta, representa a classe de menor vulnerabilidade estipulada pelo DRASTIC, com uma recarga entre os 178 e os 254 mm anuais, aproximadamente. A restante área (25%) registra valores acima dos 254 mm anuais.

Seja qual for a forma de determinação de R – $R=30\%$ de P, ou $R=P-ETR$, a recarga no domínio em estudo encontrar-se-á sempre nas classes máximas e de maior índice DRASTIC, como se verifica na Tabela 10 e na Figura 27.

Tabela 10- Valores do Parâmetro R - recarga - e áreas de influência determinados para o domínio em estudo.

Recarga (mm/ano)	Valor DRASTIC	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
177,8 - 254,0	8	40,82	75
> 254,0	9	13,48	25
TOTAL		54,30	100

5.1.1.3. Parâmetro A – Litologia do Meio Aquífero

O material que constitui o meio aquífero – parâmetro A – possui peso 3 (numa escala de 1 a 5) para a determinação do índice DRASTIC.

A sua avaliação teve por base a análise dos *logs* litológicos dos 26 piezómetros utilizados, possibilitando estipular cinco classes de A com valores: 4- Siltes, 5- Areia fina, 6- Areia, 7- Areia grosseira e 8- Areia grosseira + seixo, considerando arenitos, margas e siltes. A maioria dos piezómetros atravessa níveis aquíferos de natureza detrítica arenosa: cinco em areias finas a muito finas, seis em areias médias a grosseiras e sete em areias grosseiras a muito grosseiras; os restantes oito são referentes a silte médio a fino.

A Figura 28 apresenta o mapeamento das áreas de ocorrência das classes referidas anteriormente e na Tabela 11 indicam-se as respetivas áreas de influência.

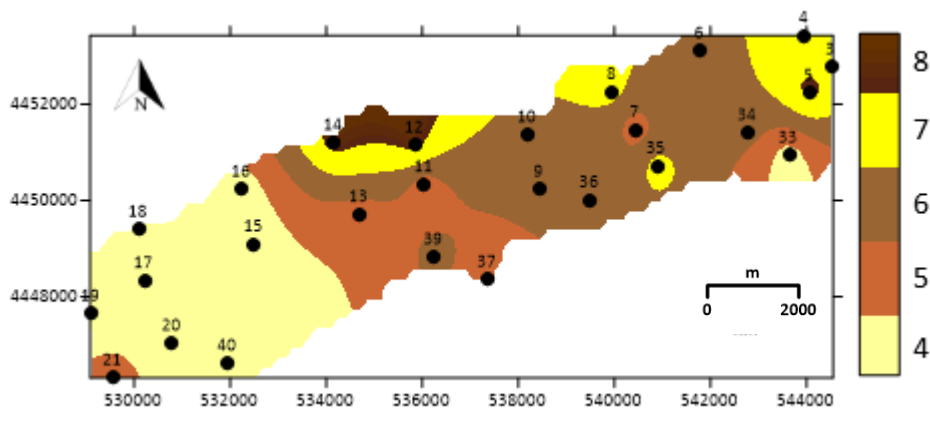


Figura 28- Variação espacial do Parâmetro A do método DRASTIC na área em estudo.

Tabela 11- Valores do Parâmetro A – material do aquífero - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Material do Aquífero	Valor DRASTIC	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
Silte	4	16,3	30
Areia fina	5	9,7	18
Areia	6	16,9	31
Areia grosseira	7	4,8	9
Areia grosseira + seixo	8	6,6	12
TOTAL		54,3	100

De acordo com a Figura 28 e a tabela 11, as areias finas a muito finas caracterizam o meio aquífero da zona central do domínio em estudo, cobrindo cerca de 18%. As areias médias a grosseiras cobrem cerca de 31%, as areias grosseiras numa pequena fração de aproximadamente 9% e as areias muito grosseiras cobrem uma área de 12%. Os siltes médios a finos cobrem cerca de 30% da área.

5.1.1.4. Parâmetro S – Tipo de Solo

O solo é o segundo parâmetro com menor peso (2) dos sete em que a metodologia DRASTIC se baseia.

No domínio em estudo apenas é encontrado um tipo de solo, designado por aluviossolo (Andrade, 2004), que segundo a IUSS - Working Group WRB (2006), base de referência mundial para os recursos do solo, estes possuem maior teor de argila em profundidade do

que na superfície do solo, têm argilas de elevada atividade ao longo do horizonte argílico e uma alta saturação por bases em determinadas profundidades. Apresentam ainda uma textura franco arenosa ou mais fina, com pelo menos 8% de argila.

Com base na textura (granulometria) dos solos da zona em estudo, dividiu-se a área em 3 classes (Tabela 12):

- franco siltoso (valor de vulnerabilidade 4) a cobrir a maioria da sua área (70%),
- franco arenoso (valor de vulnerabilidade 6) com uma cobertura de 26% da área
- arenoso (vulnerabilidade 9) ocorre numa pequena porção de cerca de 3%.

Na Figura 29 apresenta o mapeamento das áreas de ocorrência das classes referidas anteriormente do parâmetro S e na Tabela 12 indicam-se as suas respetivas áreas de influência determinadas.

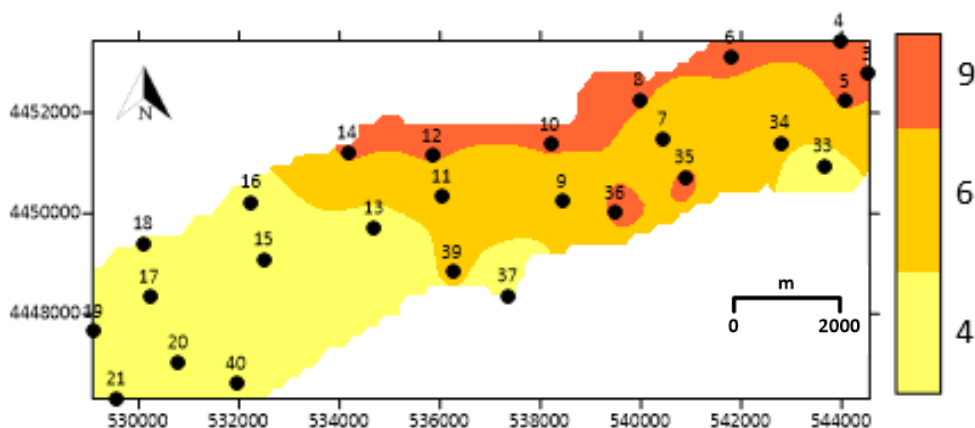


Figura 29- Variação espacial do Parâmetro S do método DRASTIC na área em estudo.

Tabela 12- Valores do Parâmetro S – tipo de solo - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Tipo de solo	Valor DRASTIC	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
Areia	9	1,9	3
Franco arenoso	6	14,2	26
Franco siltoso	4	38,2	70
TOTAL		54,3	100

A presença de aluviosolos resulta da grande quantidade de argilas existente da área em estudo. São solos que se encaixam na classe dos solos pouco profundos ou ausentes, definida pelo DRASTIC. Assim, todos estes solos, apresentam-se como fracos filtros para a contaminação, atribuindo um índice de vulnerabilidade aquífera acentuado para toda a área neste parâmetro.

5.1.1.5. Parâmetro T – Topografia

A superfície topográfica do terreno é o parâmetro de menor peso (1) para o DRASTIC.

No entanto, a influência deste parâmetro no índice de vulnerabilidade do domínio em estudo é considerável pela predominância de baixos declives, que propicia a infiltração, e promove a maior possibilidade de transporte de poluentes para o aquífero.

Os valores dos declives locais foram obtidos através da modelação digital do terreno (com base em dados do *Google Earth*). Os dados foram organizados em dois intervalos, um para declives compreendidos entre os 2 e 6% e entre os 6 e os 12%, como se verifica no capítulo 4.1.2.1., na Tabela 2, e consequentemente classificados com o respetivo valor.

Na Figura 30 apresenta-se o mapeamento das áreas de ocorrência das classes referidas anteriormente do parâmetro T e na Tabela 13 indicam-se as suas respetivas áreas de influência determinadas.

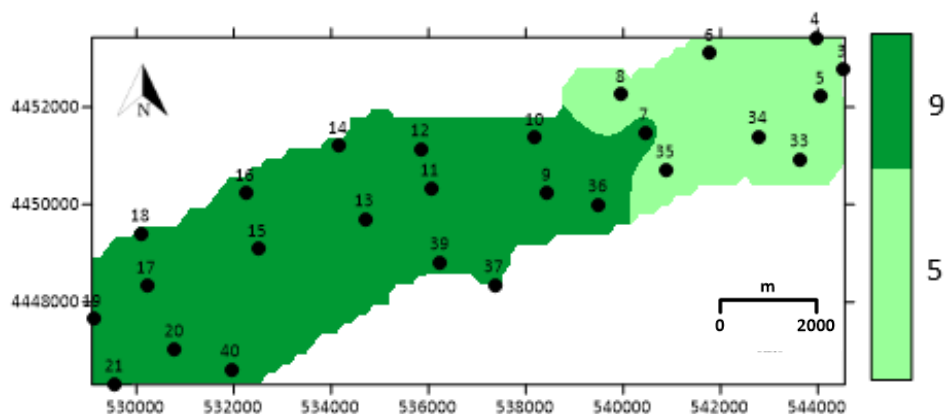


Figura 30- Variação espacial do Parâmetro T do método DRASTIC na área em estudo.

Tabela 13- Valores do Parâmetro T – declive - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Declive (%)	Valor DRASTIC	Área de influência (km²)	Área de influência (%)
2 - 6	9	36,4	67
6 - 12	5	17,9	33
TOTAL		54,3	100

Constata-se que aproximadamente 67% da área caracteriza-se por apresentar declives até 6% (zona SW e Central da área em estudo), e os declives superiores, compreendidos entre 6 e 12%, ocupam cerca de 33% da área (zona NE da área em estudo).

5.1.1.6. Parâmetro I – Impacto da Zona Vadosa

Juntamente com a profundidade do nível freático (igual à espessura da zona vadosa), este é um dos parâmetros de peso máximo (5) na definição de VI do DRASTIC.

Tal como o parâmetro da litologia do meio aquífero, também a avaliação de I baseou-se na análise litológica dos *logs* dos piezómetros seleccionados.

Na avaliação deste parâmetro foram atribuídas duas classes:

- meio com silte (mais argiloso) com o valor 3;
- meio arenoso (areia e cascalho) com o valor de 7.

Na Figura 31 apresenta-se o mapeamento das áreas de ocorrência das classes anteriormente referidas do parâmetro I e na Tabela 14 indicam-se as suas respetivas áreas de influência determinadas.

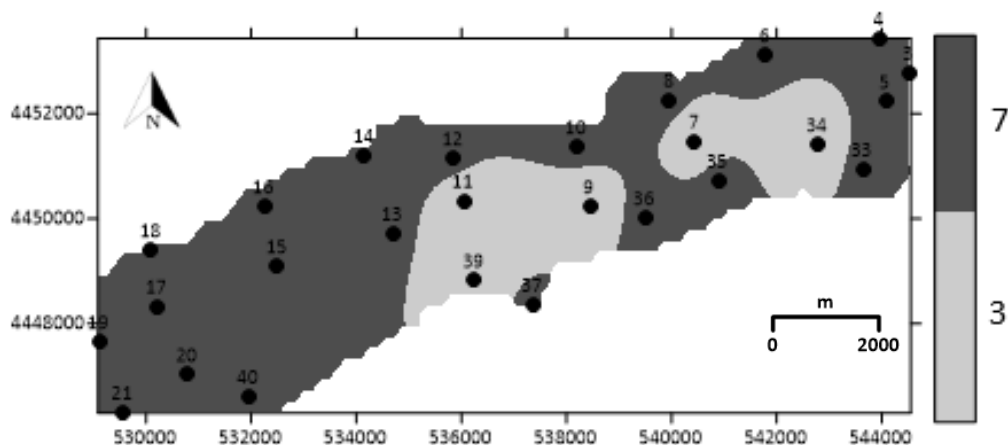


Figura 31- Variação espacial do Parâmetro I do método DRASTIC na área em estudo.

Tabela 14- Valores do Parâmetro I – impacto da zona não saturada - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Impacto da zona não saturada	Valor DRASTIC	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
Silte	3	16,0	29
Areia e cascalho	7	38,3	71
TOTAL		54,3	100

O valor mais baixo de I ocupa 29% da área estudada e o valor mais alto, correspondente a areia e cascalho, ocupa cerca de 71%.

5.1.1.7. Parâmetro C – Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica – K, parâmetro com peso 3 no método DRASTIC, foi determinada com base em elementos da bibliografia especializada, nomeadamente em valores apresentados em Peixinho de Cristo (1998). Nesta publicação são atribuídos os seguintes valores de K: $2,5 \times 10^{-3}$ m/s (220 m/dia), para a zona a montante de Coimbra, e $4,2 \times 10^{-4}$ m/s (40 m/dia), para a zona compreendida entre Montemor-o-Velho e o estuário do Mondego. Assim, foi usado o valor de $4,2 \times 10^{-4}$ m/s (40m/dia) correspondente à classe de valor 7 para toda a área em estudo, que está situada entre Montemor-o-Velho e Coimbra.

Na Figura 32 apresenta-se o mapeamento da área de ocorrência da classe anteriormente referida do parâmetro C e na Tabela 15 indicam-se as suas respectivas áreas de influência determinadas.

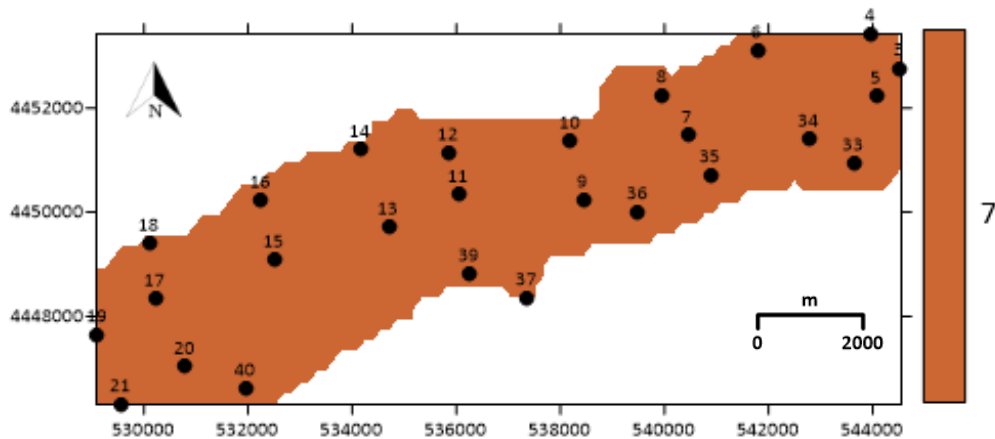


Figura 32- Variação espacial do Parâmetro C do método DRASTIC na área em estudo.

Tabela 15- Valores do Parâmetro C – condutividade hidráulica do aquífero - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	Valor DRASTIC	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
40	7	54,3	100
TOTAL		54,3	100

5.1.2. Determinação da Vulnerabilidade Intrínseca (VI)

A determinação da VI (ou índice DRASTIC) para a zona em estudo foi feita através: (1) da soma ponderada dos parâmetros DRASTIC para cada um dos 26 locais seleccionados, de acordo com a equação [1] e, (2) na fase seguinte, com o traçado das áreas de influência de cada ponto de observação, utilizando o *software Surfer*.

Na Figura 33 e na Tabela 16 apresentam-se, respetivamente, o mapeamento das áreas de ocorrência das classes de vulnerabilidade intrínseca (VI) e as suas respectivas áreas de influência determinadas.

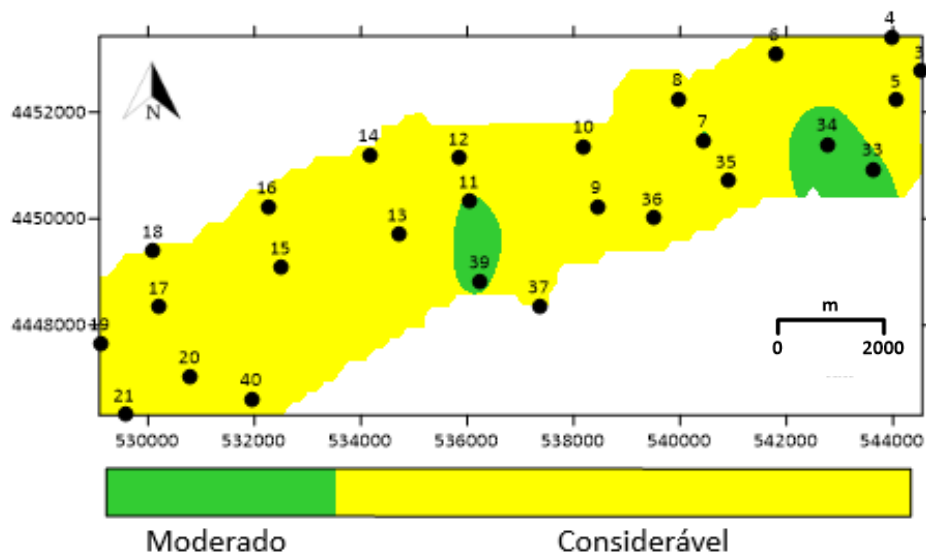


Figura 33- Variação espacial da Vulnerabilidade Intrínseca (VI) na área de estudo.

Tabela 16- Valores de VI – vulnerabilidade intrínseca - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Índice DRASTIC	Cor	VI	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
120 - 139	Verde-claro	Moderado	5,3	10
140 - 179	Amarelo	Considerável	49,0	90
TOTAL			54,3	100

Os valores do índice DRASTIC estão compreendidos entre 120 e 179 e a VI entre moderada a considerável. A maioria da área (cerca de 90%) situa-se no intervalo 140 a 179, com classe de vulnerabilidade considerável e a restante área (cerca de 10%) situa-se no intervalo entre 120 a 139, com classe de vulnerabilidade moderada.

5.2. Avaliação da Perigosidade

Considerando que a Perigosidade (P) está diretamente associada ao Uso e ocupação do solo (ou *Land Use* – *LU* – Ribeiro, 2005), na zona em estudo este parâmetro (descrito no Capítulo 3, subcapítulo 3.6 e Figura 21) expressa 4 tipologias: (1) ocupação com cultivo de milho; (2) ocupação com cultivo de milho e arroz em simultâneo; (3) ocupação com cultivo de arroz e (4) ocupação urbana.

De acordo com este enquadramento e atendendo à potencial produção de contaminantes hídricos de cada ocupação do solo (Andrade, 2004), e com base nas tabelas 17 e 18, optou-se por atribuir 4 classes de P, nomeadamente (Tabela 17):

- **Perigosidade muito alta:** atribuída às zonas de ocupação urbana; esta ocupação do solo corresponde ao valor de $P = 75$; representa uma área de influência bastante reduzida, com cerca de 2% da área em estudo;

- **Perigosidade alta:** atribuída às zonas de cultivo de arroz; esta ocupação do solo corresponde ao valor de $P = 55$; representa cerca de 26% da área em estudo;

- **Perigosidade intermédia:** atribuída às zonas de cultivo de arroz e milho em simultâneo; esta ocupação do solo corresponde ao valor de $P = 50$; representa cerca de 30% da área em estudo;

- **Perigosidade baixa:** atribuída às zonas de cultivo de milho; esta ocupação do solo corresponde ao valor de $P = 45$; representa a maior área de influência, com cerca de 42% da área em estudo.

Tabela 17- Perigosidade (P) atribuída a cada LU.

Pontuação	LU (Uso e Ocupação do Solo)	Perigosidade
45	Milho	Baixa
50	Arroz/Milho	Intermédia
55	Arroz	Alta
75	Zonas Urbanas	Muito Alta

Na Figura 34 e na Tabela 18 apresentam-se, respectivamente o mapeamento das áreas de ocorrência das classes de perigosidade (P) e as suas respectivas áreas de influência determinadas.

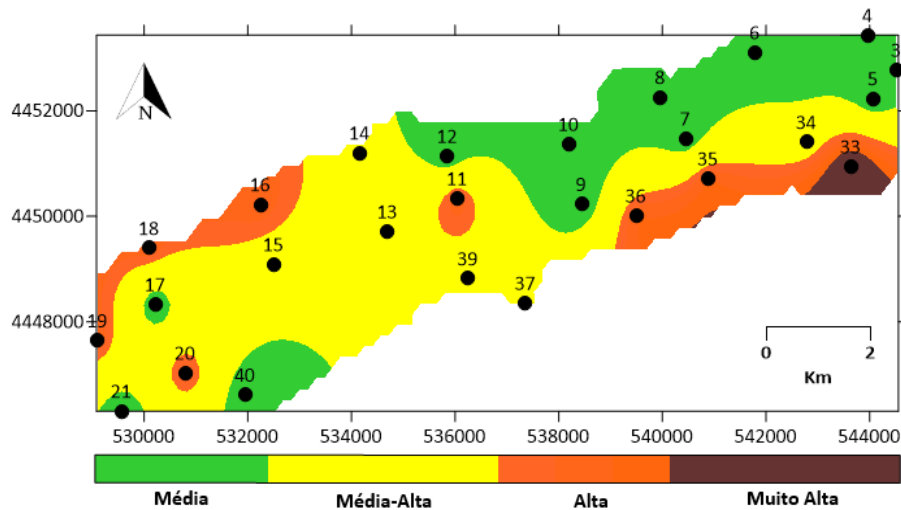


Figura 34- Mapa da distribuição espacial da Perigosidade (P) na área de estudo.

Tabela 18- Classes de P - perigosidade - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Perigosidade	LU (Uso e Ocupação do Solo)	Área de influência (km ²)	Área de influência (%)
75	Zonas Urbanas	1,2	2
55	Arroz	14,0	26
50	Arroz/Milho	16,4	30
45	Milho	22,7	42
TOTAL		54,3	100

5.3. Avaliação do Risco

A avaliação do Risco (R) no domínio em estudo seguiu a metodologia de determinação do Índice de suscetibilidade proposta por Ribeiro (2005). Assim, utilizou-se a Equação 3 apresentada no ponto 4.2.2.2. e, numa primeira fase determinou-se o valor de R para cada um dos 26 piezômetros. Na fase seguinte construiu-se a carta da variação espacial de R

através do traçado das áreas de influência de cada ponto de observação, utilizando o *software Surfer*.

Na Figura 35 e na Tabela 19 apresentam-se, respetivamente o mapeamento das áreas de ocorrência das classes de Risco (R) e as suas respetivas áreas de influência determinadas.

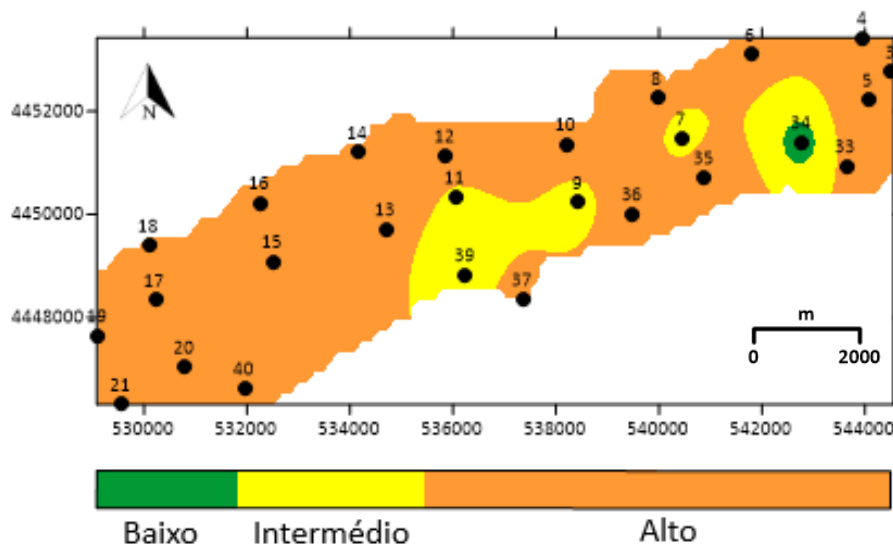


Figura 35- Mapa da distribuição espacial do Risco (R) na área em estudo.

Tabela 19- Classes de R - risco - e áreas de influência determinadas para o domínio em estudo.

Valores	Classes	Risco	Área (km ²)	Área (%)
90 -100	I	Mais Baixo	0,4	1
100 - 110	II	Intermédio	5,6	10
>110	III	Mais Alto	48,4	89
TOTAL			54,3	100

Com base na Figura 35 e na Tabela 19, verificamos que a maioria da totalidade do domínio em estudo, apresenta um risco de contaminação aquífera mais alta de classe III, ocupando cerca de 89% da área em estudo. Estes resultados vão de encontro aos determinados para a perigosidade, os quais acabam por se sobrepor aos elevados índices de vulnerabilidade intrínseca (Tabela 16 e Figura 35), Este facto confirma a regra de que um sistema ou unidade aquífera pode apresentar vulnerabilidade elevada ou muito elevada, contudo se não houver elementos externos potencialmente contaminantes da água subterrânea (perigosidade alta) o risco não se manifesta.

6. Conclusões e Recomendações

Neste capítulo apresentam-se de uma forma resumida algumas evidências verificadas neste trabalho, bem como os resultados alcançados com o presente estudo. Este capítulo finda com a indicação de algumas recomendações relevantes para um melhor desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego.

6.1. Conclusões

A área estudada corresponde ao setor centro-este do Sistema aquífero das Aluviões do Mondego-O6 e está inserida na bacia hidrográfica do Rio Mondego, no setor designado por Baixo Mondego.

A hidrografia local é claramente dominada pelo rio Mondego. No que diz respeito à topografia do setor da bacia estudado, apresenta um relevo muito aplanado, mergulhando suavemente para SW.

A área em estudo encontra-se maioritariamente implantada em depósitos aluvionares, que assentam sobre formações sedimentares do Mesozoico de natureza siliciclástica e carbonatada.

A massa de água em estudo evolui numa unidade aquífera aluvionar não-confinada. O nível freático situa-se entre os 2 e 12 m e a hidrodinâmica subterrânea caracteriza-se geralmente por na zona E o rio ser quase sempre drenante, no LPD aparenta recarregar o aquífero (a partir do piezómetro 29), enquanto que, a montante deste, drena-o e o escoamento entre o leito principal e o LPD é convergente para a zona central destes. A recarga aquífera faz-se por infiltração direta da precipitação, pela infiltração de parte dos excedentes da rega, de forma direta ou por drenância ascendente e lateral através dos escoamentos com origem nas formações hidrogeológicas adjacentes e ainda através da descarga do rio.

Os resultados obtidos – índices e distribuição espacial – para a **Vulnerabilidade Intrínseca** (VI) expressam a ocorrência de duas classes – considerável e moderada –; isto significa:

- Em termos espaciais, as áreas de VI moderada encontram-se sobretudo na zona central e na zona SE do domínio em estudo, onde se nota uma clara influência de um dos parâmetros mais relevantes na ponderação do método – o impacto da zona não saturada (I).

- As áreas em que os valores de I são mais baixos, ou seja, a espessura da zona não saturada (vadosa) é maior, correspondem a VI moderada.

Estas situações devem-se ao facto de todos os parâmetros apresentarem classes de vulnerabilidade altas, fazendo com que qualquer alteração num deles se reflita no resultado final. Isto acontece maioritariamente:

- Nas zonas com silte, aos quais foram atribuídos valores de DRASTIC 3, valor este que é relativamente baixo, proporciona uma diferenciação no resultado final, comparativamente com as zonas compostas por areias.
- Outra área que se destaca, por apresentar índices de VI mais elevados, situa-se na zona centro-norte; estes valores estão associados a uma litologia (parâmetro A) caracterizada pela presença de areias muito grosseiras (detetada nos piezómetros 12 e 14) recebendo um valor DRASTIC 8;
- Na restante área foram atribuídos aos domínios envolventes os valores que diferem entre 4, 5, 6 e 7; valores estes que são relativamente altos particularmente num parâmetro com um peso máximo de 3 na ponderação total do índice VI.

Na determinação da **Perigosidade (P)**, o método utilizado baseou-se exclusivamente no parâmetro Uso e ocupação do solo (ou *Land Use* – LU), estando a zona de estudo coberta por uma intensa exploração agrícola (milho e arroz), sendo portanto este um bom indicador de potenciais fontes poluentes da água subterrânea.

Os resultados obtidos – classes e distribuição espacial – para a Perigosidade (P) indicam:

- Numa maior ocupação do solo da área em estudo, classes de perigosidade entre média a média-alta derivado à maior parte do uso do solo do domínio em estudo ser para cultivo de milho. Esta prática de cultivo usa menor quantidade de pesticidas, sendo portanto menos contaminante;
- Numa menor ocupação do solo, temos o cultivo de arroz, apresentando uma classe de alta perigosidade, devido à sua prática implementar um meio saturado em água, com a utilização de uma maior quantidade de pesticidas;
- As zonas urbanas, apenas localizadas nas proximidades do piezómetro 33, proporcionam uma perigosidade muito alta devido à produção de efluentes líquidos e resíduos sólidos derivados das atividades domésticas, hortícolas e pecuárias.

No que diz respeito ao **Risco** de contaminação das águas subterrâneas (R), o seu valor resulta da interação da VI do aquífero com a carga poluidora que é aplicada no solo ou em sub-superfície expressa por P.

Os resultados obtidos – classes e distribuição espacial – para o Risco (R) no domínio em estudo, indicam:

- A presença de apenas 3 classes:
 - classe I representando um risco mais baixo
 - classe II referente a risco intermédio
 - classe III correspondente a um risco mais alto.
- A classe III predomina na área estudada estendendo-se a 89% da área total.

Esta situação deriva do domínio em estudo:

- ser uma zona plana com grande infiltração;
- ser usado numa intensa prática agrícola;
- conter uma baixa profundidade do nível freático;
- conter uma espessura da zona não saturada (vadosa), na sua maioria, pouco espessa, proporcionando um maior risco de determinados contaminantes atingirem mais facilmente as massas de água subterrâneas.

6.2. Recomendações

Com este estudo pretendeu-se contribuir para um melhor conhecimento hidrogeológico do Sistema Aquífero das Aluviões do Mondego-O6 (SAAM) e, particularmente, para a avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas no seu setor centro-este.

Considera-se, no entanto, que os estudos e determinações da Vulnerabilidade intrínseca (VI), e do Risco (R) de contaminação no SAAM devem prosseguir, nomeadamente com a inclusão de novos dados e outros elementos relativos a:

- Medição piezométrica em maior escala, aprofundando a representação da cartas de fluxo hídrico subterrâneo;
- Alargar o estudo a sistemas aquíferos vizinhos, possibilitando, por exemplo, analisar possíveis inter-relações hidrodinâmicas existentes entre sistemas e unidades aquíferos;

- Avaliar o risco de contaminação das massas de água subterrâneas vizinhas;
- Aplicar outros métodos de avaliação da Vulnerabilidade intrínseca, referidos no sub-capítulo 4.1.2., ou até mesmo variantes desses métodos, adequando-os às características do domínio em estudo;
- Analisar e quantificar com maior detalhe a ocupação da superfície e os diversos tipos de poluentes;
- Avaliar os possíveis impactos para a saúde humana associados à contaminação hídrica, considerando a relação entre concentrações e exposição;
- Testar outras ferramentas SIG para uma análise espacial mais pormenorizada (por exemplo ArcMap, QGis, etc).

De acordo com os dados obtidos para a VI e para R, recomendam-se as seguintes medidas objetivas para a preservação e a sustentabilidade da massa de água em estudo nesta Dissertação:

- Controlar e monitorizar as massas de água através da medição regular dos níveis piezométricos e realização de análises químicas;
- Controlar e monitorizar as atividades antrópicas da zona em estudo, nomeadamente as atividades agrícolas (cultivo de arroz e milho) e restringir as atividades domésticas;
- Controlar e monitorizar as captações públicas e/ou privadas na região;
- Reformular e adaptar os métodos de determinação dos perímetros de proteção das captações de água subterrânea (apesar de na zona em análise não existirem captações públicas) atribuindo maior relevância à zona vadosa (não saturada) a que se apresenta como a primeira e a mais eficaz barreira contra a contaminação.

7. Referências Bibliográficas

- Afonso, M.J.; Pires, A.; Chaminé, H.I.; Marques, J.M.; Guimarães, L.; Guilhermino, L. & Rocha, F.T. (2010) - Aquifer vulnerability assessment of urban areas using a GIS-based cartography: Paranhos groundwater pilot site, Porto, NW Portugal. In: B.S. Paliwal (Editor). Global Groundwater Resources and Management - Selected papers from The 33rd International Geological Congress General Symposium: Hydrogeology, Oslo (Norway) aug. 2008. Scientific Publishers, Jodhpur, India, pp. 259-278
- Albinet, M. (1970) - Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Document 70 SGN 325 HYD, BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- Albinet, M. & Margat, J. (1970) - Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, Buletin BRGM deuxième série, Section III (4) pp. 13-22.
- Albinet, M. & Margat, J. (1971) - Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Proceedings of the Moscow Symposium. Groundwater Pollution, JAHS-AISH Publ. 103, 1975, Moscow, pp. 58-70.
- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J.H.; Petty, R. & Hackett, G. (1987) - DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S.
- Almeida, A. C.; Soares, A. F.; Cunha, L. & Marques, J. F. (1990) - Proémio ao estudo do baixo Mondego. Biblos, LXVI, pp. 17-47.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Duarte, R.S; Quina, A.P. & Neves, J.R. (2000) - Glossário de Termos Hidrogeológicos, Centro de Geologia & Instituto da Água.
- Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R. & Gomes, A.J. (2000) - Sistemas aquíferos de Portugal Continental. Instituto da Água/Centro de Geologia da Universidade de Lisboa, Lisboa, 3 volumes.
- Andrade, A. (2004) - Hidrogeoquímica e caracterização da contaminação hídrica nos corpos aluvionares do Mondego entre Coimbra e Montemor-o-Velho. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra.

- Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo, I.; Vias, J.M.; Neukum, C.; Sinreich, M.; Jiménez, P.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Perles, M.J. & Zwahlen, F. (2006) - Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain), *Science of the Total Environment*, vol 357 (1-3) Elsevier, pp. 54-73.
- Auge, M. (1995) - Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. UBA: 1-65. Buenos Aires.
- APA. (2012) - Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis, Integrados na Região Hidrográfica 4, Relatório Técnico, Parte 2- Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Cabral, J. & Ribeiro, A. (1988) - Carta Neotectónica de Portugal Continental. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Carvalho, G. S. (1950) - Considerações sobre a estratigrafia das formações mais antigas da Orla Meso-Cenozóica Ocidental de Portugal. *Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra* 27, pp. 17-27.
- Civita, M. (1994) - Data needs and presentation. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editors). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 16. IAH - International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 57-73.
- Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional [CCDR], (2020) – NUTs.
- Cunha, P. P. (1992) - Estratigrafia e sedimentologia dos depósitos do Cretácico Superior e Terciário de Portugal central, a leste de Coimbra. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra.
- CCRC (1988) - Programa de desenvolvimento da região Centro. Vol. 1. Comissão de Coordenação da Região Centro. Minist. Plan. e Adm. Do Território, Coimbra
- Custodio E. (1995) - Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. II Seminario Hispano – Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. *Serie Correlación Geológica* 11, 99-122. San Miguel de Tucumán.

- Daly, D. & Warren, W. P., (1998), Mapping groundwater vulnerability; the Irish perspective, In: N. S. Robins (Editor), Ground water pollution, aquifer recharge and vulnerability Geological Society Special Publication No 130, London.
- Daly, D.; Hötzl, H. & De Ketelaere, D. (2004) - Risk definition. In: François Zwahlen (Editor), Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. 106-107.
- De Ketelaere, D.; Hötzl, H.; Neukum, C.; Civita, M. & Sappa, G. (2004) - Hazard analysis and mapping. In: François Zwahlen (Editor). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate- General for Research, Luxembourg, pp. 86-105.
- Doerfliger, N. & Zwahlen, F. (1998) - Practical guide: groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern.
- Eberts, S.M.; Böhlke, J.K.; Kauffman, L.J. & Jurgens, B.C. (2012) - Comparison of particle tracking and lumped-parameter age-distribution models for evaluating vulnerability of production wells to contamination. *Hydrogeology Journal* 20 (2). Springer, pp. 263-282.
- Filippini, M.; Gargini, A.; Gkemitzi, A.; Kvaerner, J.; Meeks, J.; Stumpp, C.; Rózanski, K.; Wachniew, P. Witczak, S. & Zurek, A. (2013) - Critical review of methods for assessment of vulnerability of groundwater systems. GENESIS - Groundwater and Dependent Ecosystems: New Scientific and Technological Basis for Assessing Climate Change and Land-use Impacts on Groundwater. Seventh Framework Programme of the European Community.
- Foster, S. (1987) - Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: W. van Duijvenbooden & H.G. van Waegeningh (Editors), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands. TNO Committee on Hydrological Research. Delft, The Netherlands, pp. 69-86.
- Foster, S. & Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/ HPE-CEPIS Publication, Lima, Peru.

- Foster, S. & Hlirata R. (1991) - Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes. CEPIS: 1-81. Lima.
- Foster, S. (2007) - Aquifer pollution vulnerability concept and tools - use, benefits and constraints. In: Andrzej J. Witkowski, Andrzej Kowalczyk & Jaroslav Vrba (Editors). Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping. IAM - Selected Papers, vol 11. Taylor & Francis, pp. 1-9.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M. & Paris, M. (2006) - Proteção da qualidade da água subterrânea- um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, Washington, D,C.
- Healy, R.W, (2010) - Estimating Groundwater Recharge, Cambridge University Press.
- Hespanha, P. & Reis, J. (1987) - O desenvolvimento do Baixo Mondego: economias regionais e intervenção do Estado Centro de Estudos Sociais da Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra. Comissão de Coordenação da Região Centro. Ministério do Planeamento e da Administração do Território.
- Huneau, F.; Jaunat, J.; Kavouri, K.; Plagnes, V.; Rey, F. & Dörfliker, N. (2013). Intrinsic vulnerability mapping for small mountainous karst aquifers, implementation of the new PaPRIKa method to Western Pyrenees (France). Engineering Geology, 161, pp. 81-93.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera [IPMA], (2020) - O clima de Portugal.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia [LNEG], (2019) – Água Subterrânea, Conhecer para Proteger e Conservar.
- LNEC (2002) - Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterráneas do concelho de Montemor-o-Novo utilizando o método DRASTIC. Proc. 607/1/14252, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterráneas, Lisboa.
- Lobo-Ferreira, J.P. & Cabral, M. (1991) - Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Alias of Groundwater Resources. In: Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group Brussels, feb. 1991.
- Lobo-Ferreira, J.P.; Oliveira, M.M & Ciabatti, P. (1995) - Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterráneas de Portugal, vol 1. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia

Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa.

Lobo-Ferreira, J.P.; Oliveira, M.M. & Moinante, M.J. (1995) - Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portuga, vol 2. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica, Grupo de investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa.

Lourenço, L. (1986) - Aproveitamento hidráulico do Vale do Mondego. In: Problema do Vale do Mondego. IV Colóquio Ibérico de Geografia. Coimbra.

Majandang, J. & Sarapirome, S. (2013) - Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. Environmental Earth Sciences, vol 68 (7), Springer, pp. 2025-2039.

Margat, J. (1968) - Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution; Bases de sa cartographie. Document 68 SGL 198 HYD, BRGV - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans. France.

Martins, A. F. (1940) - O esforço do homem na bacia do Mondego. Tese de Licenciatura. Universidade de Coimbra.

Matias, J. M. G. (2010) – Subsistema Aquífero da Mata do Urso: Vulnerabilidade Natural e Risco de Contaminação. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Matthess, G. (1987) - Summary, conclusions and recommendations, in: W, van Duijvenbooden & H.G. van Waegeningh (Editors), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, Proceedings and Information No. 38 of the international Conference held in the Netherlands, TNO Committee on "Hydrological Research. Delft, The Netherlands, pp. 29-38.

Mendes, H. C. V. S. P. M. A. (1997) - Estudo bio-hidráulico de canais de drenagem na região do baixo Mondego. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra.

Mendonça, J. L. & Dias, J.L.F. (2000) - Sistemas aquíferos aluvionares na bacia hidrográfica do rio Mondego. Recursos hídricos, 21, 2, pp. 63-70.

Naime, R.; (2011) - Águas superficiais.

- Notenboom, J.; Plénet, S. & Turquin, M.J. (1994) - Groundwater contamination and its impact on groundwater animals and ecosystems. In: Janine Gibert, Dan L. Danielopol & Jack A. Stanford (Editors). Groundwater Ecology. Academic Press, San Diego, pp. 477-504.
- Peixinho de Cristo, F. (1998) - Águas Subterrâneas no Baixo Mondego. Projecto Praxis XXI 2/2.1/CTA - 156/94.
- Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios de Coimbra, (2018) - Caderno I. Município de Coimbra.
- Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios de Montemor-o-Velho, (2014) - Caderno I. Município de Montemor-o-Velho.
- Ribeiro, O. (1998) - Portugal, o Mediterrâneo e o Atlântico, Livraria Sá e Costa. 7.^a ed.
- Ribeiro, L. F. (2005) - Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos; Formulação e Aplicações. 7^o SILUSBA. APRH – Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Évora, Portugal. Comunicação 60P.
- Sanches, R. (1996) - O problema secular do Mondego e a sua resolução. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Seabra, A. E. O. (1994) - Estudo das Aluviões do Baixo Mondego Baseado nos Métodos de Prospecção Eléctrica e Electromagnética. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra.
- Shikolamnov & Rodda (Eds.). (2003). World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century. Unesco. Cambridge University Press.
- Soares, A.F. (1966) - Estudo das formações pós-Jurássicas da região entre Sargento-Mor e Montemor-o-Velho (margem direita do rio Mondego). Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra.
- Soares, A.F., Lapa, M.L.R. & Marques, J.F. (1986) - Contribuição para o conhecimento da litologia das unidades meso-cenozóicas da Bacia Lusitânica a norte do "acidente" da Nazaré (sub-zona setentrional). Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra.
- Stigter, T. Y.; Ribeiro, L. & Carvalho Dill, A.M.M. (2006) - Evaluation of an intrinsic and a specific Vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation

- and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal* vol. 14 (1-2). Springer, pp. 79-99.
- Tavares, A. O. (1999) – Condicionantes físicas ao planeamento. Análise da suscetibilidade no espaço do concelho de Coimbra. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L. & Wassenaar, L. (1992) - AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada. PPWB Report n° 114, Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L. & Wassenaar, L. (1993). Aquifer Vulnerability Index: A GIS - compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, vol 18 (1), pp. 25-37.
- Vias, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. & Jiménez, P. (2004) - The COP method. In François Zwahlen (Editor). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912*. European Commission, Directorate- General for Research, Luxembourg, pp. 163-172.
- Vias, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. & Jiménez, P. (2006) - Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14 (6), pp. 912-925.
- Vrba, J. & Zaporozec, A. (1994) - Executive Summary. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editors). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 1G. IAH-International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. XV-XXIII.
- Yu, C.; Yao, Y.; Hayes, G.; Zhang, B. & Zheng, C. (2010) - Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport simulation, Huangshuihe catchment, China. *Science of the Total Environment* 408 (24). Elsevier, pp. 6108-6116.
- Zaporozec, A. (1994) - Concept of groundwater vulnerability. In: Jaroslav Vrba & Alexander Zaporozec (Editor). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, vol 16, [IAH - International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology). Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 3-7.

Zwahlen, F.; Drew, D.; Goldscheider, N.; Hötzl, H.; Ketelaere, D.; Kralik, M.; Mudry, J. & Neale, S. (2004) - Summary. In: François Zwahlen (Editor). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST Action 620) - EUR 20912. European Commission, Directorate-General for Research, Luxembourg, pp. III-VI.

Anexos

Tabela A 1 - Dados utilizados referentes aos 26 piezómetros.

Tabela A 2 - Matriz de valores atribuídos a cada ponto para cada metodologia.

Tabela A 1- Dados utilizados referentes aos 26 piezômetros.

Piezômetros	Coordenadas		D Prof. Nível freático	R Recarga	A Material do aquífero	S Tipo de solo	T Topografia	I Impacto da zona não saturada	C Condutividade hidráulica	LU Uso do solo (Land use)
	Longitude	Latitude	m	mm/ano		Aluviossolos	%		m/dia	
3	-8.476775	40.224158	11,2	>300	Areia grosseira	Areia	12	Areia e Cascalho	40	Milho
4	-8.483253	40.230119	11,3	>300	Areia grosseira	Areia	12	Areia e Cascalho	40	Milho
5	-8.482064	40.219308	9,0	>300	Areia grosseira + Seixo	Areia	11	Areia e Cascalho	40	Milho
6	-8.508856	40.227308	8,1	<300	Areia	Areia	12	Areia e Cascalho	40	Milho
7	-8.524697	40.212697	8,7	<300	Areia fina	Franco Arenoso	6	Silte	40	Milho
8	-8.530306	40.219767	8,4	>300	Areia grosseira	Areia	9	Areia e Cascalho	40	Milho
9	-8.548347	40.201611	5,5	<300	Areia	Franco Arenoso	6	Silte	40	Milho
10	-8.551144	40.211842	6,5	>300	Areia	Areia	6	Areia e Cascalho	40	Milho
11	-8.576475	40.202633	5,2	<300	Areia fina	Franco Arenoso	5	Silte	40	Arroz
12	-8.578681	40.209906	5,4	>300	Areia grosseira + Seixo	Areia	5	Areia e Cascalho	40	Milho
13	-8.592333	40.197058	5,4	>300	Areia fina	Franco Siltoso	6	Areia e Cascalho	40	Milho e Arroz
14	-8.598569	40.210528	5,0	>300	Areia grosseira + Seixo	Areia	6	Areia e Cascalho	40	Milho e Arroz
15	-8.618164	40.191547	4,1	<300	Silte	Franco Siltoso	5	Areia e Cascalho	40	Milho e Arroz
16	-8.621103	40.201811	4,0	<300	Silte	Franco Siltoso	4	Areia e Cascalho	40	Arroz
17	-8.645056	40.184833	3,1	<300	Silte	Franco Siltoso	4	Areia e Cascalho	40	Milho
18	-8.646367	40.194447	3,5	<300	Silte	Franco Siltoso	5	Areia e Cascalho	40	Arroz
19	-8.658128	40.178711	2,0	<300	Silte	Franco Siltoso	3	Areia e Cascalho	40	Arroz
20	-8.638333	40.173078	3,3	<300	Silte	Franco Siltoso	5	Areia e Cascalho	40	Arroz
21	-8.652811	40.166625	2,0	>300	Areia fina	Franco Siltoso	4	Areia e Cascalho	40	Milho
33	-8.487233	40.207722	10,1	<300	Silte	Franco Siltoso	12	Areia e Cascalho	40	Zona Urbana
34	-8.497267	40.211972	10,4	<300	Areia	Franco Arenoso	11	Silte	40	Milho e Arroz
35	-8.519569	40.205828	8,9	>300	Areia grosseira	Areia	11	Areia e Cascalho	40	Arroz
36	-8.535981	40.199542	7,3	<300	Areia	Areia	6	Areia e Cascalho	40	Arroz
37	-8.561150	40.184758	5,8	>300	Areia fina	Franco Siltoso	6	Areia e Cascalho	40	Milho e Arroz
39	-8.574164	40.189003	6,5	<300	Areia	Franco Arenoso	6	Silte	40	Milho e Arroz
40	-8.624747	40.169311	2,9	<300	Silte	Franco Siltoso	5	Areia e Cascalho	40	Milho

Tabela A 2- Matriz de valores atribuídos a cada ponto para cada metodologia.

Piezómetros	D Prof. Nível freático		R Recarga		A Material do aquífero		S Tipo de solo		T Topografia		I Impacto da zona não saturada		C Condutividade hidráulica		Índice de Vulnerabilidade (IV)	Perigosidade (P)	Risco (R)
	P1	ID1	P2	ID2	P3	ID3	P4	ID4	P5	ID5	P5	ID5	P6	ID6			
3	5	25	9	36	7	21	9	18	5	5	7	35	7	21	161	45	115
4	5	25	9	36	7	21	9	18	5	5	7	35	7	21	161	45	115
5	7	35	9	36	8	24	9	18	5	5	7	35	7	21	174	45	122
6	7	35	8	32	6	18	9	18	5	5	7	35	7	21	164	45	116
7	7	35	8	32	5	15	6	12	9	9	3	15	7	21	139	45	101
8	7	35	9	36	7	21	9	18	5	5	7	35	7	21	171	45	121
9	7	35	8	32	6	18	6	12	9	9	3	15	7	21	142	45	103
10	7	35	9	36	6	18	9	18	9	9	7	35	7	21	172	45	121
11	7	35	8	32	5	15	6	12	9	9	3	15	7	21	139	55	105
12	7	35	9	36	8	24	9	18	9	9	7	35	7	21	178	45	125
13	7	35	9	36	5	15	4	8	9	9	7	35	7	21	159	50	115
14	7	35	9	36	8	24	9	18	9	9	7	35	7	21	178	50	127
15	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	50	117
16	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	55	119
17	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	45	115
18	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	55	119
19	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	55	119
20	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	55	119
21	9	45	9	36	5	15	4	8	9	9	7	35	7	21	169	45	119
33	5	25	8	32	4	12	4	8	5	5	7	35	7	21	138	75	113
34	5	25	8	32	6	18	6	12	5	5	3	15	7	21	128	50	97
35	7	35	9	36	7	21	9	18	5	5	7	35	7	21	171	55	125
36	7	35	8	32	6	18	9	18	9	9	7	35	7	21	168	55	123
37	7	35	9	36	5	15	4	8	9	9	7	35	7	21	159	50	115
39	7	35	8	32	6	18	6	12	9	9	3	15	7	21	142	50	105
40	9	45	8	32	4	12	4	8	9	9	7	35	7	21	162	45	115
PESOS	5		4		3		2		1		5		3		0,6		0,4