



Avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos em regiões de montanha: Serra da Estrela (Centro de Portugal).

Pedro Castro Miguéis Vieira

Mestrado em Geologia

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

2018/2019

Orientador

Prof. Doutor. Jorge Manuel Espinha Marques, professor auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Coorientador

Prof^a. Doutora Lia Bárbara Cunha Barata Duarte, professor auxiliar convidado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

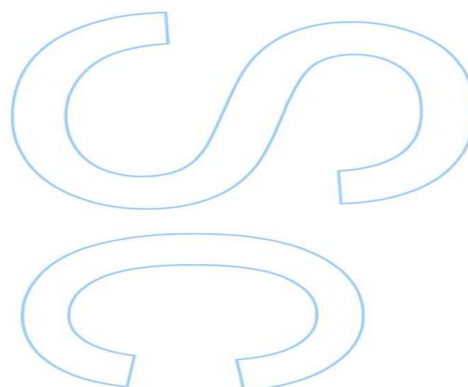
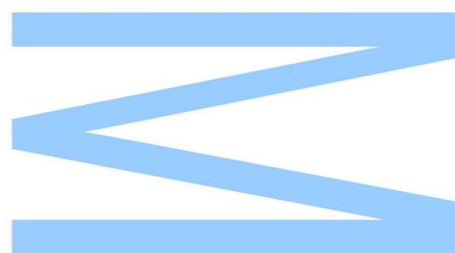




Todas as correções determinadas
pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____ / ____ / ____



Agradecimentos

Os agradecimentos são destinados principalmente a duas pessoas: ao Professor Jorge Espinha Marques e à Professora Lia Duarte.

Ao Professor Jorge Espinha Marques pela orientação do trabalho, pela paciência, pela disponibilidade total, pelas observações e pelo conhecimento transmitido. O que foi imprescindível à conclusão deste trabalho.

À Professora Lia Duarte pela enorme disponibilidade e apoio que me deu na aplicação informática da parte experimental do trabalho.

Agradecendo igualmente o apoio de todos aqueles que me acompanharam nesta jornada.

Resumo

A água é uma substância, apesar de comum, de suma importância (em todos os seus estados) para a vida no planeta Terra e regulação do seu clima. À escala da Humanidade, este valor aumenta pelo relevo que possui para o seu estilo de vida atual e todas as suas benesses. Devido à importância da sustentabilidade dos recursos do planeta, especialmente da água (particularmente, a água subterrânea) e da sua vulnerabilidade à poluição, nas últimas décadas têm sido efetuados estudos sobre este tema, incluindo a criação de Índices e o estabelecimento de programas de monitorização. Para reforçar os estudos de vulnerabilidade de aquíferos tem-se vindo a usar os sistemas de informação geográfica pois estes possuem métodos fáceis e eficazes para manipular, analisar e incorporar dados geográficos com informação geológica e hidrogeológica.

Em consequência desta facilidade tecnológica e dos dados recolhidos durante os estudos de campo, o *software* QGIS foi utilizado no mapeamento da vulnerabilidade da água subterrânea à poluição através dos índices GOD e DRASTIC.

A criação dos mapas de vulnerabilidade da água subterrânea consoante os índices e métodos indicados, permitiu avaliar a vulnerabilidade à poluição de aquíferos existentes na bacia do rio Zêzere, entre a Nave de Sto. António e a vila de Manteigas, na região da Serra da Estrela.

Palavras-Chave

Vulnerabilidade à poluição; água subterrânea; DRASTIC; GOD; QGIS

Abstract

Water is a substance, though common, of great importance to life on planet Earth and to the regulation of its climate. To the Humanity, this importance increases for its current lifestyle and all its benefits. Due to the importance to the sustainability of the planet's resources, especially water, namely, groundwater, and its vulnerability to pollution, which has been studied in recent decades, including the creation of Indexes and the establishment of monitoring programs. In order to reinforce aquifer vulnerability studies, geographic information systems have been used because they have easy and effective plugins to manipulate, analyze and incorporate geographic data with geological and hydrogeological information.

As a result of this technological ability and the data collected during the field campaigns, the QGIS *software* was applied to map groundwater vulnerability to pollution by means of the GOD and DRASTIC indexes.

Creating groundwater vulnerability maps according to the indexes and methods indicated on QGIS, will allow assessing the vulnerability to pollution of aquifers existing in the river Zêzere basin, located between the Nave de Sto. António and the village of Manteigas, in the region of Serra da Estrela.

Key Words

Vulnerability to pollution; underground water; DRASTIC; GOD; QGIS

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstrat	II
Palavras – Chave	II
Key Words	III
1. Introdução	7
2. Estado da arte	8
3. Enquadramento hidrogeológico da área do estudo	22
4. Metodologia	33
5. Resultados e discussão	44
6. Conclusões	58
7. Referências bibliográficas	60

Índice de Abreviaturas

BZMM – Bacia do rio Zêzere, a montante de Manteigas.

ft – Feet (Pé), unidade de medida correspondente a 30 cm.

in – Inch (Pulgada), unidade de medida correspondente a 2.54 cm.

MDT – Modelo Digital de Terreno.

Índice de Figuras

Figura 1 – Serra da Estrela em contexto da Península Ibérica.	7
Figura 2 – Diagrama esquemático do ciclo hidrológico em uma estrutura fissurada de rocha cristalina (Fitts, 2013; adaptado de Chaminé <i>et al.</i> , 2013).	8
Figura 3 – Diagrama da condição de fluxo típico de uma encosta de rocha com um leito de rocha impermeável com indicação da direção do fluxo de água dentro da rede de descontinuidade (Scesi & Gattinoni, 2009).	10
Figura 4 – Comportamentos hidrogeológicos e hidrológicos da água em diversos períodos do ano (USGS, 1998).	11
Figura 5 – Esquema representativo das principais fontes de contaminação das águas subterrâneas (Zaporozev, 2004).	12
Figura 6 — Representação do que se define como (a) vulnerabilidade intrínseca e (b) vulnerabilidade específica (Wachniew <i>et al.</i> , 2016).	14
Figura 7 – Geologia da região da Serra da Estrela com área de estudo delimitada a verde escuro. (simplificado de Oliveira <i>et al.</i> , 1992).	25
Figura 8 – Vale do rio Zêzere (adaptado de Espinha Marques <i>et al.</i> , 2013).	28
Figura 9 – Relevo da Serra da Estrela e região envolvente (Espinha Marques, 2007)	29
Figura 10 – Vale do rio Zêzere.	30
Figura 11 – Depósitos glaciários no vale do rio Zêzere.	30

Figura 12 – Nave de Santo António com depósitos glaciários.	31
Figura 13 – Vulnerabilidade intrínseca e os seus respetivos intervalos propostos para aplicações do método DRASTIC, com base nas cargas variáveis determinadas por Aller <i>et al.</i> (1987) (Extraído de Melo Junior, 2008).	40
Figura 14 – Modelo conceptual do parâmetro D (Duarte <i>et al.</i> , 2017).	45
Figura 15 – Mapa geológico da área de estudo.	46
Figura 16 – Mapa do parâmetro D.	47
Figura 17 – Mapa do parâmetro R.	48
Figura 18 – Mapa do parâmetro A.	49
Figura 19 – Mapa do parâmetro S.	50
Figura 20 – Mapa do parâmetro I.	51
Figura 21 – Mapa do parâmetro T.	52
Figura 22 – Mapa do índice DRASTIC.	53
Figura 23 – Mapa do parâmetro O.	54
Figura 24 – Mapa do parâmetro D.	55
Figura 25 – Mapa do índice GOD para a área de estudo.	56

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Condutividade Hidráulica (Van Stempoot <i>et al.</i> , 1992).	19
Tabela 2 – Valores de resistência hidráulica e classes de vulnerabilidade correspondentes (Van Stempoot <i>et al.</i> , 1992).	20
Tabela 3 – Pesos associados a cada fator do índice DRASTIC, (Adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987).	35
Tabela 4 – Classes e Classificações para o parâmetro D (distância à superfície freática), adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	36
Tabela 5 – Classes e Classificações para o parâmetro R (Recarga do aquífero), adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	36
Tabela 6 – Classes e Classificações para o parâmetro A (Tipo de Aquífero), adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	37
Tabela 7 – Classes e Classificações para o parâmetro S (Tipo de Solo), adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	38
Tabela 8 – Classes e Classificações para o parâmetro T (Topografia), adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	38
Tabela 9 – Classes e Classificações para o parâmetro I (Impacto da zona não saturada) adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	39
Tabela 10 – Classes e Classificações para o parâmetro C (condutividade hidráulica), adaptado de Aller <i>et al.</i> , 1987.	39

Tabela 11 – Informação relativa aos fatores do índice DRASTIC (adaptado de Neshat et al., 2013; Aller et al., 1987). 41

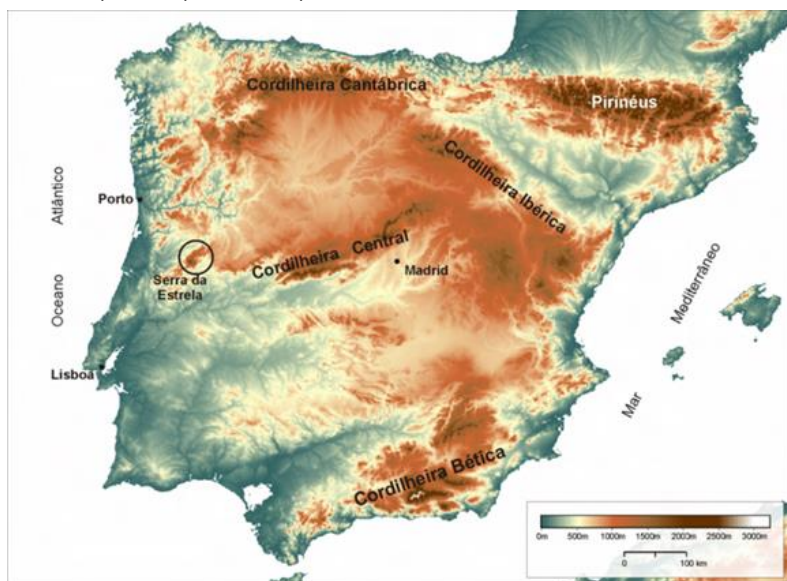
Tabela 12 – Informação relativa aos fatores do índice GOD (adaptado de Neshat et al., 2013; Aller et al., 1987). 42

1. Introdução

A água é um recurso importante não só para a vida existente no planeta Terra mas também é fundamental para o desenvolvimento da humanidade pois é utilizada em três grandes setores da sociedade atual: o setor industrial, o agropecuário e o ambiente doméstico. Neste contexto, a pressão da procura de água de qualidade é grande, considerando o aumento populacional e as suas necessidades básicas e também o aumento da sua poluição muitas vezes por negligência humana e o facto de todos os aquíferos serem vulneráveis a contaminantes caracterizados pela sua persistência e mobilidade, gerados por uma atividade significativa numa dada região (Foster *et al.*, 1988).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho de investigação é avaliar a vulnerabilidade à poluição de um sistema aquífero numa região de montanha, aplicando os métodos DRASTIC e GOD, e recorrendo a um software SIG desenvolvido com o programa QGIS.

A Serra da Estrela (compreendida entre as latitudes 40° 03' 26"N e 40° 31' 51.03"N e as longitudes 8° 12' 53" W e 7° 13' 19.7"W) localizada na Zona Centro Ibérica, está incorporada na Cordilheira Central Ibérica (Figura 1), é uma cadeia montanhosa com a orientação ENE-WSW, correspondendo a uma morfoestrutura do género “montanha em blocos” (Ribeiro, 1954), com cerca de 500 km de extensão e 40 km de largura, estendendo-se desde a Serra da Lousã até Somosierra, a norte de Madrid. As principais unidades de relevo da Cordilheira Central são, de oeste para leste, as Serras da Lousã, Açor, Gardunha, Estrela, Gata, Gredos, Guadarrama e Somosierra. Excluindo as duas primeiras, as serras



referidas estão divididas por corredores aplanados de direção NE-SW, oblíquos à direção geral da Cordilheira (Daveau, 1969; Vegas *et al.*, 1990). Em que a área de estudo é Bacia do rio Zêzere, a montante da vila de Manteigas (Espinha Marques *et al.*, 2013).

Figura 1 – Serra da Estrela em contexto da Península Ibérica (Espinha Marques, 2007).

2. Estado da Arte

A quantidade de fluxo de água subterrânea, caso exista, em rochas cristalinas são de baixa porosidade primária, vai depender essencialmente da densidade, conectividade e abertura das fraturas presentes. O fluxo de água em meio fraturado é estudado consoante o relacionamento espacial das fraturas, no seu conjunto, que funcionam como um meio contínuo ou como um meio descontínuo (Domenico & Schwartz, 1990; Figura 2).

Quando se abordam as fraturas como meio contínuo, o meio fraturado é substituído por um meio contínuo representativo em que os valores de condutividade hidráulica, porosidade e compressibilidade são definidos. Para o volume necessário de rocha para se aplicar os valores anteriormente referidos e a lei de Darcy, denomina-se por Volume Elementar Representativo (VER), chegando a atingir, caso existam, grandes valores (Freeza & Cherry, 1979).

Quanto à abordagem fornecida ao meio descontínuo, considera-se como o mais adequado o estudo da hidráulica do fluxo de fraturas individuais devido a melhor condutividade e caminhos preferenciais para a circulação e transporte de contaminantes em zonas de fraturas ou em fraturas individuais (Fernandes, 2008).

A identificação e a caracterização do sistema de fraturas nas rochas cristalinas é bastante importante tendo em conta que a sua porosidade primária (caracterizada por intergranularidade como aluviões ou rochas cristalinas bastante meteorizadas) é quase inexistente e o armazenamento e a movimentação da água subterrânea ocorre através da porosidade secundária (caracterizada pela meteorização, fracturação, falhas, foliações e/ou lineamentos de rochas cristalinas como ocorre em maciços graníticos ou em cavernas de meios cárnicos) (Anovitz & Cole, 2015; Kumar et al., 2014).

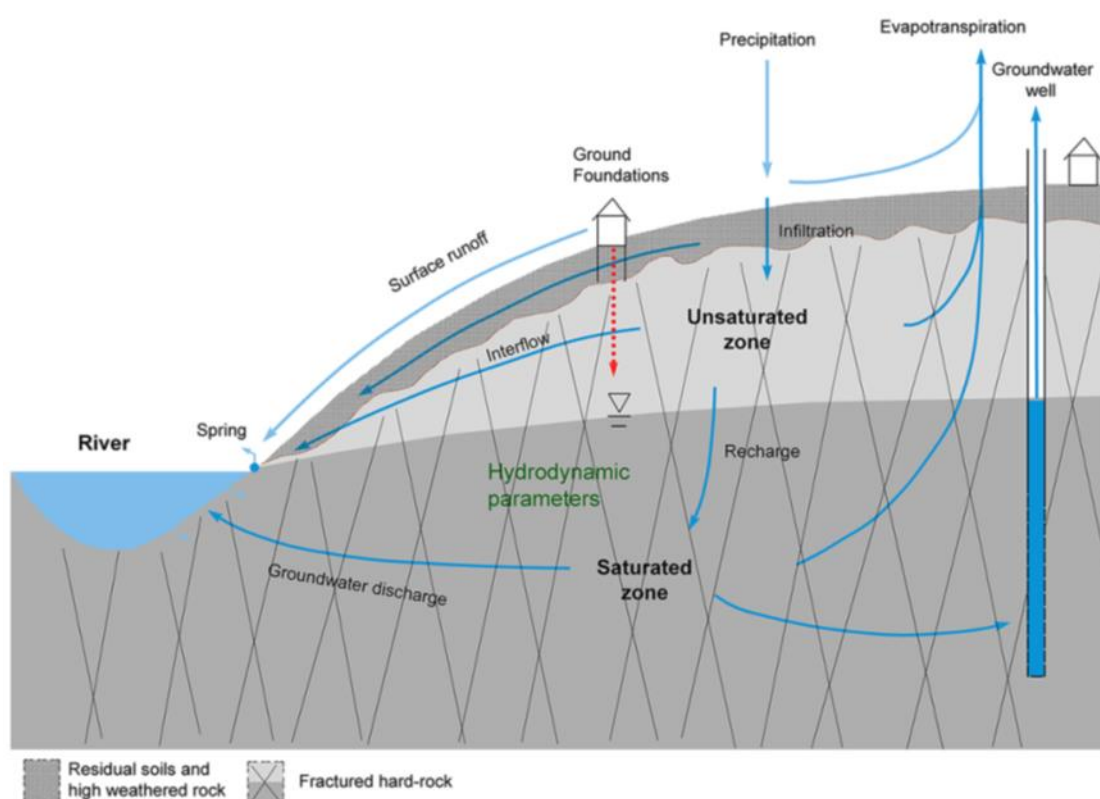


Figura 2 – Diagrama esquemático do ciclo hidrológico em rochas cristalinas fissuradas (Fitts, 2013; adaptado de Chaminé et al., 2013).

O fluxo da água subterrânea em sistemas de fraturas é complexo e difícil de analisar por diversas razões. Uma razão consiste no fluxo através das fraturas de menor dimensão em que se desconhecem as suas propriedades e a sua distribuição. Outra razão foca-se no fluxo nas fraturas de maior dimensão que pode ser de regime turbulento, por isso a lei de Darcy não deverá ser aqui aplicada (Singhal & Gupta, 2010; Fitts, 2013). Devido a isto e às dimensões do sistema de fraturas e/ou às dimensões da área de estudo, a quantificação da água existente neste tipo de aquíferos é extremamente difícil acrescentando a isto as estações secas e/ou mudanças climáticas.

O armazenamento de água em rochas cristalinas não meteorizadas, ou muito pouco meteorizadas, é restrito ao sistema interconectado de fraturas na rocha. Tais aberturas são principalmente o resultado de fenómenos tectónicos.

O escoamento em aquíferos fraturados (Figura 3) é um processo difícil de analisar devido ao escoamento que ocorre através de fraturas independentes entre si. Assim sendo, a distribuição e as propriedades são sobretudo indistintas (o que impossibilita o mapeamento com a localização e a orientação das fraturas que contêm água ou mesmo as dimensões das

mesmas) e o escoamento em algumas fraturas mais largas é turbulento em vez de laminar, não sendo possível aplicar a lei de Darcy a estas fraturas (Singhal & Gupta, 2010; Fitts, 2013).

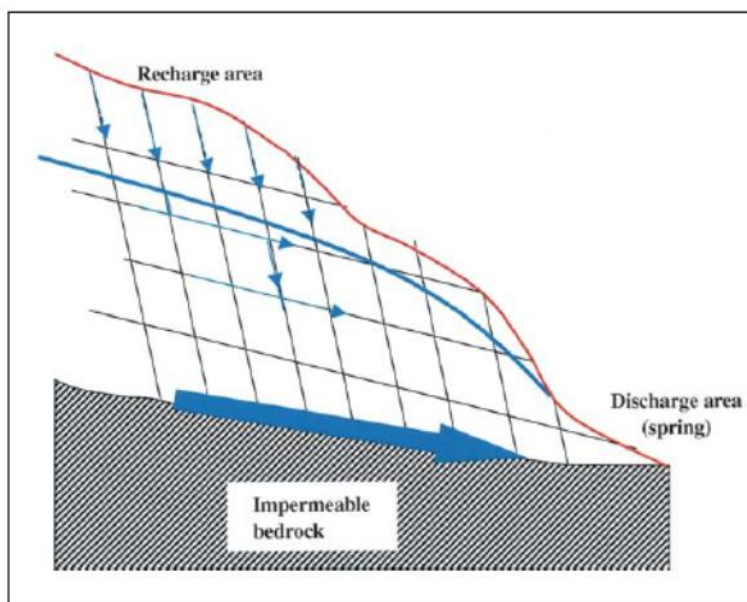


Figura 3 – Diagrama da condição de fluxo típico de uma encosta de rocha com um leito de rocha impermeável com indicação da direção do fluxo de água dentro da rede de fraturas (Scesi & Gattinoni, 2009).

No planeta, as regiões montanhosas contribuem para uma melhor distribuição geográfica dos recursos hídricos, possuindo uma importância hidrológica e hidrogeológica especial relativamente aos rios, permitindo uma redistribuição do escoamento originado pela precipitação de inverno (que poderá ser através de chuva, neve e/ou granizo), e que ocorre parcialmente na primavera e no verão, o que reduz a variabilidade dos fluxos nas planícies a jusante (Viviroli et al., 2003; Viviroli & Weingartner, 2008).

Assim, os recursos hídricos de regiões montanhosas são uma parte substancial da água potável disponível e devido a este facto, a gestão ambiental dessas regiões tem-se revelado cada vez mais crucial (Viviroli & Weingartner, 2008; Espinha Marques et al., 2009). Este reconhecimento tem vindo a acentuar-se nas últimas décadas, considerando as regiões de montanha como áreas estratégicas do ponto de vista humano e ecológico, como foi reconhecido pela Unesco através de International Hydrological Programme (IHP), reforçando-se assim a necessidade de prevenção destas áreas geográficas e dos seus recursos hídricos (Espinha Marques et al., 2010; Carvalho et al., 2012).

Caracterizando-se assim por uma grande variabilidade de precipitação sazonal e movimentos de água por razões morfológicas e climáticas (USGS, 1998).

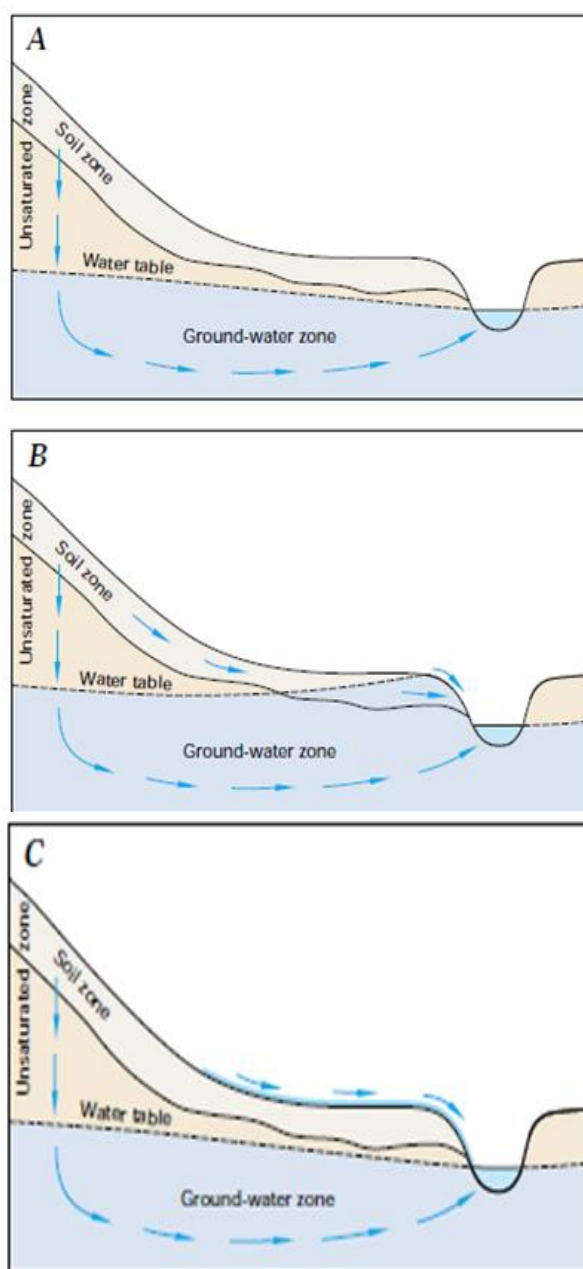


Figura 4 – Comportamento dos sistemas hidrogeológicos em diversos períodos do ano (USGS, 1998).

Perto da base do vale, a superfície freática poderá atingir a superfície topográfica o que resulta no aflorar da água à superfície através de fontes. Um processo comum que resulta na presença de zonas húmidas em alguns vales montanhosos é a descarga ascendente da água subterrânea causada pela mudança na inclinação da superfície freática devido à encosta do vale ser íngreme e de passar a relativamente plana no vale. Caso estes dois casos

Nestas regiões a água, consoante o período do ano, possui diferentes comportamentos hidrogeológicos e hidrológicos. Entre os períodos de grande precipitação e/ou de degelo ou durante a estação seca, a água superficial existente em linhas de água é suportada pela descarga dos aquíferos livres (Figura 4A).

Durante o período de maior precipitação e/ou de degelo, a água sofre escorrência superficial até a linha de água no vale e em simultâneo, a quantidade em excesso que atravessa o solo e a zona vadosa e chega aos aquíferos faz com que esta atinja a superfície (Figura 4B). No caso das regiões montanhosas mais áridas, onde a vegetação é pouco comum e o solo mais poroso, a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo resultando por isso em escorrência superficial da água (Figura 4C).

ocorram em regiões de montanhas estas áreas extremamente húmidas, são designadas por pântanos (USGS, 1998).

Dada a importância da hidrologia e da hidrogeologia das regiões montanhosas é fundamental saber quão vulnerável é um aquífero à poluição, pois a carga poluente pode ser controlada (ou modificada) ao contrário da vulnerabilidade natural que é uma propriedade intrínseca de um aquífero (Foster et al., 1988). A quantidade de fatores que poderão influenciar a contaminação dos aquíferos é importante, assim como é importante conhecer os seus mecanismos de recarga, o tipo de aquífero, a atenuação natural do perfil do solo, o enquadramento geológico e a localização geográfica.

Relativamente à água superficial (lagos e cursos de água) apesar de ser a mais comumente poluída, os processos para o seu tratamento são relativamente céleres e mais ou menos dispendiosos. Já os aquíferos possuem um conjunto de cuidados mais específico. Para além de não lhe ser dada tanta importância, estes possuem as maiores reservas de água doce líquida. Com a sua poluição não só a quantidade de água inutilizada para fins humanos é enorme, como o seu tratamento, caso possível, é dispendioso e moroso, sendo o melhor método de “tratamento” contra a poluição, a prevenção. Assumindo assim, a prevenção local a vários níveis e o respetivo benefício, a todos os níveis (Figura 4).

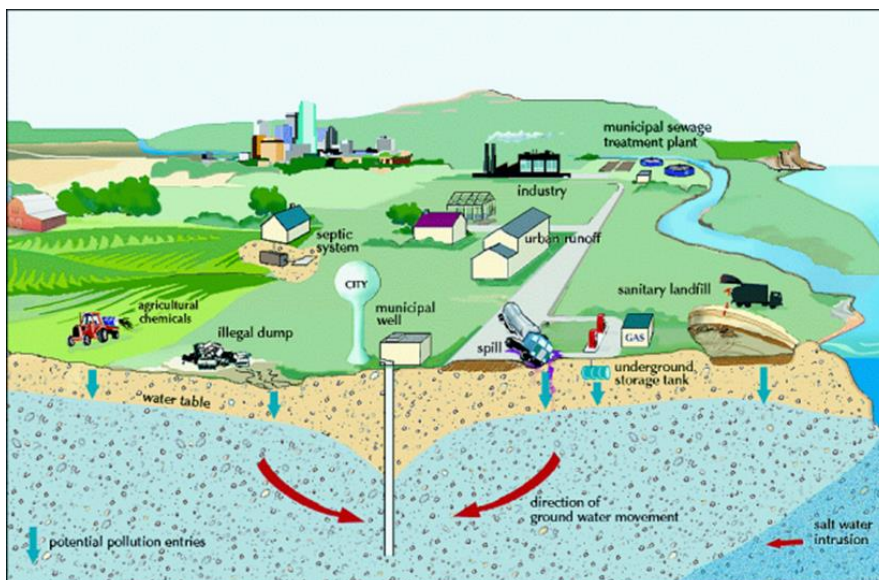


Figura 5 – Esquema representativo das principais fontes de contaminação das águas subterrâneas (Zaporozec, 2004).

Geralmente, a proteção de água subterrânea é considerada um tema de importância mundial e visa principalmente preservar a quantidade e a qualidade da mesma, prevenindo

igualmente derrames químicos que podem causar um risco real para a qualidade das águas subterrâneas (Granlund et al., 1993; Zaporozec, 2004; Witkowski et al., 2007). A necessidade de proteger os aquíferos aumentou em consequência da pressão exercida pela sua procura em vários quadrantes da sociedade.

Para se colocar em prática o conceito de prevenção, têm de ser considerados vários fatores: a importância da investigação e estudos científicos para se conhecer o sistema hidrogeológico, respetivas zonas de vulnerabilidade e das várias atividades antrópicas. O conjunto destes fatores e o seu conhecimento possibilitam, assim, a proteção das zonas de maior vulnerabilidade.

O conceito de risco de poluição, segundo Lobo Ferreira (1998), depende não só da vulnerabilidade intrínseca do aquífero (representada esquematicamente na figura 12, assim como a vulnerabilidade específica) mas igualmente da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo.

Considerando também a definição de Civita e De Maio (2004), a vulnerabilidade de um aquífero é também definida como uma função de vários parâmetros entre os geológicos (como a litologia, estrutura, geometria do sistema hidrogeológico), o tipo de descarga e o processo de recarga/descarga, as interações de processos químicos que regulam a água subterrânea e o impacte que eventuais contaminantes possam ter no sistema.

É também importante assinalar que as definições anteriormente apontadas se referem à vulnerabilidade intrínseca do aquífero, mas também podem abranger os processos de atenuação físicos e biogeoquímicos específicos de compostos que controlam o destino de contaminantes específicos, referindo-se assim à vulnerabilidade específica (Wachniew et al., 2016).

Quanto à contaminação de aquíferos, esta pode ser definida, segundo Adamcova et al. (2016), devido à ocorrência generalizada de contaminantes assim como da sua toxicidade aguda e crónica.

Em suma, a vulnerabilidade intrínseca consiste na influência das características geológicas do aquífero e da área onde se enquadra (Figura 6a) enquanto a vulnerabilidade específica referece à atividade antrópica na área onde o aquífero se encontra e do possível uso que lhe é dado (Figura 6b).

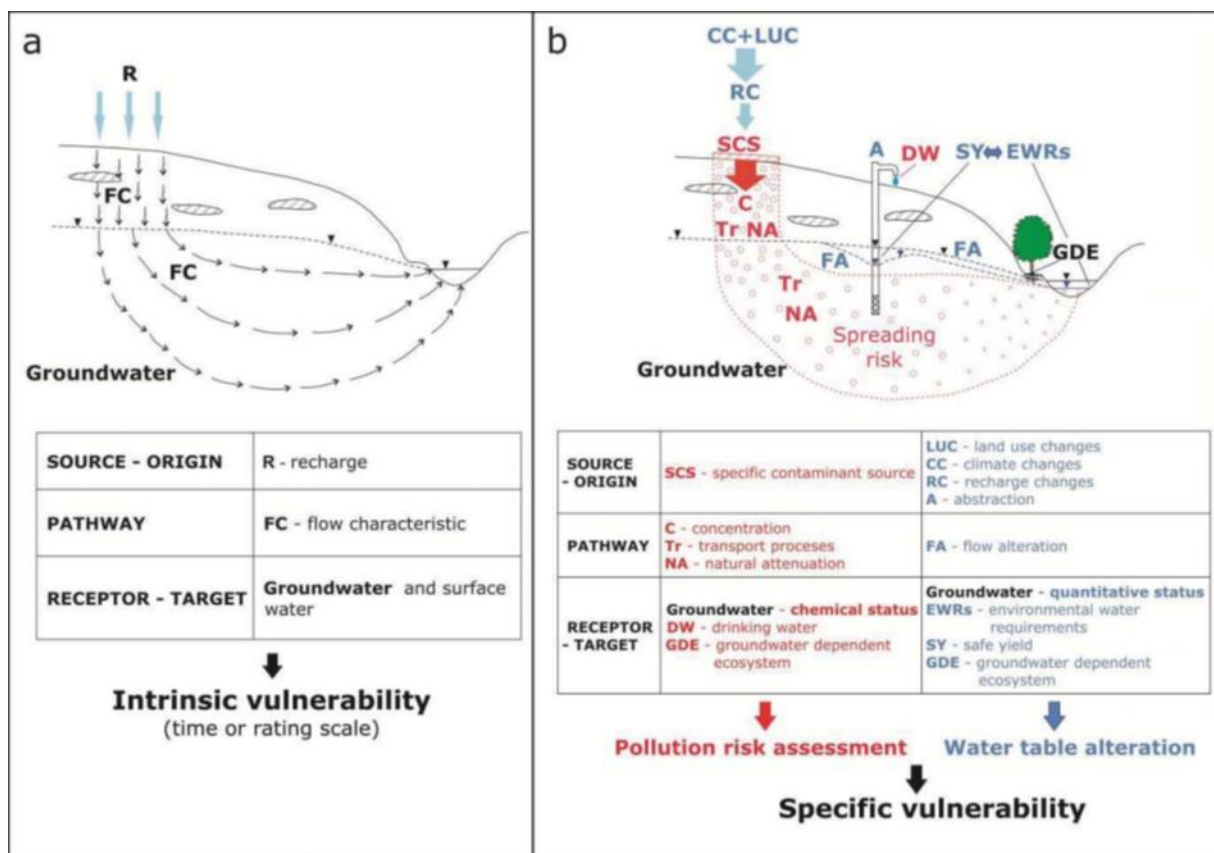


Figura 6 – Representação do que se define como (a) vulnerabilidade intrínseca e (b) vulnerabilidade específica (Wachniew et al., 2016).

O conceito de mapeamento da vulnerabilidade da água subterrânea é baseado em propriedades hidrogeológicas e assume que o meio físico (constituído por solo, massa rochosa e água subterrânea) pode fornecer auto-purificação ou atenuação natural. A partir do mapa de vulnerabilidade, que geralmente é feito usando um Sistema de Informação Geográfica, as zonas de proteção de águas subterrâneas são definidas com maior rigor.

A vulnerabilidade dos aquíferos quanto à poluição e ao rebaixamento e ao nível freático tem sido um objeto importante em todo o Mundo. Para identificar esses riscos, assim como a necessidade de melhor monitorizar as águas subterrâneas, foram realizados numerosos estudos para se avaliar a sua vulnerabilidade. Relativamente ao risco de poluição, foram usados vários índices e métodos hidrogeológicos como os índices DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD (Foster et al., 2002), DISCO (Pochon et al., 2003), COP (Vias et al., 2006; Polemio et al., 2009; Doummar et al., 2012), EPIK (Doerfliger and Zwahlen, 1995), SINTACS (Civita et al., 2004), AVI (Stempvoort et al., 1993), GALDIT (Moghaddam et al., 2015) e métodos como o SI (Stigter et al., 2005), ISIS (Civita & De Regibus, 1995; Sappa &

Lega, 1998) e o SEEPAGE (Moore and John, 1990; Navulur and Engel, 1996; Richert et al., 1992). Sublinhando para os índices e método utilizados para este trabalho: os índices DRASTIC (o mais popular a nível mundial para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, e.g., Gogu & Dassargues, 2000; Shirazi et al., 2012) e GOD.

O Índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) é um método composto por sete parâmetros diferentes, em que cada um dos parâmetros exerce um grau de importância diferente para o cálculo da vulnerabilidade.

O Índice GOD (Foster *et al.*, 2002), utilizado inicialmente na América Latina, é um índice empírico em que se utilizam três parâmetros para a avaliação onde cada um deles é igualmente importante no resultado final.

O índice DISCO (do francês DIScontinuités – COuverture protectrice; Pochon *et al.*, 2003) visa definir as zonas de proteção para captação de água subterrânea tendo em consideração a heterogeneidade do ambiente, principalmente ambiente geológico altamente fissurados, onde é aplicado. Baseia-se numa avaliação da vulnerabilidade intrínseca que leva em conta os fatores geológicos e hidrogeológicos que condicionam o funcionamento do aquífero e o possível transporte de poluentes. Ao avaliar a vulnerabilidade, a convenção será referir-se a condições hidrogeológicas relativamente desfavoráveis.

A aplicação do índice DISCO desenrola-se em quatro etapas: a primeira consiste na avaliação e no mapeamento de parâmetros de "descontinuidade" e "cobertura protetora" em toda a área de captação, organizado em polígonos elementares com propriedades homogêneas para cada parâmetro, a segunda baseia-se no Cálculo do Fator de proteção intermediário Fint para cada polígono elementar da bacia hidrográfica, para isso, adiciona-se os valores dos parâmetros "descontinuidades" e "cobertura protetora", a terceira etapa é referente ao caso do fator Fint ser fraco ou muito fraco, o parâmetro "runoff" é levado em consideração para determinar o fator de proteção final F, por último, a quarta etapa é caracterizada pela delimitação das zonas S com base em uma relação de equivalência entre o valor do fator de proteção final F e as zonas S1, S2 e S3.

O método COP (Polemio *et al.*, 2009), assim como o método EPIK, é um método criado especialmente para o estudo da vulnerabilidade em meios cárscicos. Este método, por um lado, assenta na capacidade dos vários horizontes do solo e da zona não saturada de atenuarem os agentes poluentes. Por outro lado, como os aquíferos cárscicos são caracterizados por uma infiltração difusa e concentrada, o fator C define a importância dos

processos de infiltração, enquanto o fator P ressalta o papel das condições climáticas, nomeadamente a precipitação na definição de vulnerabilidade (Vias *et al.*, 2006).

O método COP é constituído por 3 parâmetros: C, O, P.

O fator C representa os tipos de infiltração que ocorrem na bacia hidrográfica e a concentração do escoamento no mapa. Os meios cársticos são caracterizados por uma dualidade de infiltração, onde a infiltração pode ocorrer de forma difusa em toda a área de captação e / ou concentrada em cavidades ou dolinas (vias de fluxo rápido). Neste método a captação é dividida por duas zonas principais. A primeira zona inclui a área de recarga das características do carse, principalmente dolinas ou sumidouros (Equação 1). A segunda zona consiste na área restante, onde nenhum recurso de superfície carse foi identificado (Equação 2).

Para a primeira zona consiste na multiplicação de três componentes (equação 1): distância ao *swallow hole* (dh), vegetação e declive (sv) e distância à corrente subterrânea(ds).

Equação 1: $C = dh.ds.sv$

Equação 2: $C = sf.sv$

O segundo parâmetro representa camadas mais superficiais, nomeadamente os vários horizontes do solo (O_s) sobrepostos ao leito rochoso ou litologia (O_L).

O fator O_s representa duas das principais características dos solos, a textura e espessura. Quanto maior a cobertura do solo, maior a probabilidade de atenuação do contaminante. Os solos de textura fina (solos argilosos) têm menor condutividade hidráulica e, portanto, são caracterizados por tempos de trânsito maiores. Além disso, devido à sua capacidade de sorção para espécies iónicas, os solos argilosos são mais propensos a atenuar alguns tipos de agentes poluentes. É ainda de sublinhar que o valor deste parâmetro aumenta com o aumento da espessura.

O fator O_L representa a zona não insaturada, isto é, as camadas imediatamente acima do aquífero. É calculado pela equação representada em baixo, onde o produto de “ly” e “m” é calculado separadamente, reclassificado e multiplicado pelo grau de confinamento. Quanto menor o valor do produto de “ly” e “m” maior é a vulnerabilidade.

Equação 3: $O_L = [ly.m].cn$

Os valores representativos para cada tipo de litologia são dados aos vários tipos de rochas que afloram na área de captação. Quanto maior o valor, menor a vulnerabilidade.

O parâmetro P representa as condições climáticas na bacia hidrográfica. É a soma de dois fatores (P_Q e P_I) que definem, respetivamente, a quantidade e intensidade da precipitação anual. O fator P_Q a quantidade de precipitação, com valores entre 0,2 e 0,4. O fator P_I reflete a intensidade da precipitação, ou seja, a proporção da quantidade de precipitação e o número de dias chuvosos. Os valores deste fator variam entre 0,2 e 0,6.

O parâmetro P considera que quanto maior a precipitação, maior a probabilidade de recarga e maior a intensidade durante os eventos de precipitação, a área investigada é mais vulnerável.

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1995) é usado para avaliar a vulnerabilidade intrínseca de uma bacia hidrográfica cársica e é constituído por quatro parâmetros de grande importância neste método: Epikarst (E), Camada protetora (P), Condição de infiltração (I) e rede cársica (K). A soma destes quatro parâmetros produz um parâmetro de proteção (F) a ser atribuído a cada divisão feita na bacia estudada.

O parâmetro Epikarst (E) refere-se à zona altamente carsificada abaixo da cobertura do solo. É principalmente representativo do armazenamento de água. Este parâmetro é classificado em três categorias.

A Camada protetora (P) é definida essencialmente pela espessura do solo ou outras formações geológicas não cársicas que cobrem o aquífero principal. Quanto maior a cobertura protetora, mais significativa é a proteção, isto é, quanto maior o valor de P. Este parâmetro é dividido em quatro categorias principais, variando de 1 a 4.

A Infiltração (I) refere-se ao tipo de recarga ou infiltração, quer seja difundida ou concentrada. Nos meios cársicos, as áreas com concentração difusa são geralmente consideradas menos vulneráveis que as áreas com infiltração concentrada. Este parâmetro é dividido em quatro categorias.

A rede cársica (K) refere-se ao grau de carsificação de um meio cársico. É principalmente definido com base nas características da superfície e na presença de uma rede cársica (grutas, etc) no subterrâneo. A rede cársica é dividida em três categorias.

A soma dos quatro parâmetros usando os valores que lhes são atribuídos produz um Fator de Proteção (F) para as diferentes áreas da área estudada de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Equação 4: } F = 3E + 2P + 1I + 3K$$

O Índice SINTACS (Civita *et al.*, 2004) é uma evolução do índice DRASTIC adaptado às condições da bacia do Mediterrânico. Este índice pertence a um grupo de índices em que cada um dos valores a atribuir em cada parâmetro varia consoante as condições da área em estudo tendo em conta as características ambientais. Este índice conta com sete parâmetros: a profundidade do nível freático (S), a infiltração efetiva (I), zona não saturada (N), tipo de solo (T), características hidrogeológicas do aquífero (A), condutividade hidráulica (C) e declive topográfico (S).

A cada fator é dado um valor entre 0 e 10 de acordo a sua importância para a vulnerabilidade. Para além disso, o valor a considerar para cada parâmetro está relacionado com as especificidade ambientais e/ou antropogénicas da área em foco. O índice SINTACS considera 5 possíveis condições: áreas normais, áreas com fontes de poluição generalizadas, áreas com intensa perda de água de redes hidráulicas para os aquíferos, áreas cársicas e áreas com fenómenos fissurais.

$$\text{Equação 5: } I_{\text{SINTACS}} = \sum_{j=1}^7 P_j * W_j$$

Em que P_j é o valor que cada um dos parâmetros que o índice considera e W_j o peso relativo.

O Índice AVI (Aquifer Vulnerability Index; Van Stempvoort *et al.*, 1992) baseia-se em dois parâmetros físicos, a espessura (d) que cada camada sedimentar acima da superfície freática e a condutividade hidráulica estimada (k) de cada camada sedimentar. A espessura é determinada por logs realizados através de sondagens e/ou pela província geológica do estudo. Relativamente à condutividade hidráulica, esta poderá não estar disponível para cada unidade sedimentar por isso criaram-se tabelas com valores estimado. A condutividade hidráulica, já previamente calculada (Tabela 1), é influenciada pela a geologia do aquífero.

Tabela 1 – Condutividade Hidráulica (Van Stempoot *et al.*, 1992).

Tipo de Sedimento	Código Padrão	Condutividade Hidráulica
Cascalho	A	1000 m/d
Areia	B	10 m/d
Areia siltosa	C	1 m/d
Silte	D	10^{-1} m/d
Till, argila ou xisto fraturados (profundidade entre os 0 e 5 m)	E	10^{-3} m/d
Till, argila ou xisto fraturados (profundidade entre 5 a 10 m)	F	10^{-4} m/d
Till, argila ou xisto fraturados (profundidade superior a 10 m com a meteorização baseada na cor, castanho ou amarelo.)	F	10^{-4} m/d
Grande concentração de til ou mistura de areia-silte-argila	G	10^{-5} m/d
Grande concentração de argila ou xisto	H	10^{-6} m/d

Baseando-se nos parâmetros “d” e “K”, a resistência hidráulica (c) pode ser calculada segundo a seguinte expressão:

$$\text{Equação 6: } c = \sum d_i / K_i$$

Para camadas 1 a i

Este terceiro parâmetro é um fator teórico utilizado para descrever a resistência desde um aquífero a uma escorrência vertical.

A resistência hidráulica (Tabela 2) possui dimensão temporal, o que indica o tempo aproximado em que a água se move, por advecção, através dos vários meios porosos acima da superfície superior do aquífero. Contudo, este pormenor não deverá ser visto no sentido estrito. O resultado do cálculo deste parâmetro poderá ser usado, diretamente, para gerar mapas com curvas de isorresistência.

Tabela 2 – Valores de resistência hidráulica e classes de vulnerabilidade correspondentes (Van Stempfort *et al.*, 1992).

Resistência hidráulica (ano)	Vulnerabilidade (AVI)
0 – 10	Extremamente alta
10 – 100	Alta
100 – 1000	Moderada
1000 – 10000	Baixa
>10000	Extremamente baixa

O método GALDIT (Moghaddam *et al.*, 2015) é um método que se foca na vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, especialmente na vulnerabilidade dos aquíferos costeiros à intrusão da água marinha (Chachadi e Lobo-Ferreira 2001, 2007; Chachadi *et al.* 2003).

Este método, semelhante ao método SINTACS, é um sistema paramétrico com valores e importâncias diferentes para cada um dos seis parâmetros. Os parâmetros que descrevem os fatores mais importantes que controlam a intrusão da água do mar são os seguintes: ocorrência de água subterrânea (G), condutividade hidráulica do aquífero (A), nível freático acima do nível da água do mar (L), distância à costa (D), o impacto do estado existente da intrusão da água do mar (I) e a espessura do aquífero (T). Cada parâmetro foi avaliado com base em suas características e suscetibilidade à intrusão da água do mar as pontuações alternativas são 2,5 (vulnerabilidade mais baixa) 5, 7,5 e 10 (vulnerabilidade mais alta). Em cada célula da grade, os parâmetros de classificação atribuídos são multiplicados pelos valores do peso. Os valores do peso receberam um valor de 1 (o fator menos significativo) a 4 (o fator mais significativo). O índice final de vulnerabilidade em cada célula da grade foi a soma das pontuações desses seis parâmetros:

$$\text{Equação 7: } GALDIT = (\sum_{i=1}^6 Wi Ri) / (\sum_{i=1}^6 Wi)$$

Onde R corresponde ao valor e W corresponde ao peso dado. O valor final deste método varia de 2.5 a 10 e é dividido em três classes de vulnerabilidade: Alta (>7.5), moderada (5 a 7.5) e baixa vulnerabilidade (<5). Quanto mais alto o valor obtido maior a vulnerabilidade à intrusão marinha.

O método SI (Stigter *et al.*, 2005) consiste numa simplificação do índice DRASTIC, preservando os parâmetros D, R, A e T mas acrescentando o parâmetro LU, específico para o uso do solo (agricultura, pastorícia, etc) em estudo.

O método ISIS (Civita & De Regibus, 1995; Sappa & Lega, 1998) considera sete parâmetros: a recarga média anual, a topografia, o tipo do solo, a litologia da zona insaturada, a profundidade do nível freático, a litologia do aquífero e a espessura do aquífero. Os resultados do ISIS, tal como do SINTACS, são calculados de forma semelhante ao DRASTIC (assim como o peso de alguns dos parâmetros) mas o ISIS adapta as classificações do DRASTIC e do SINTACS e pesos do GOD.

O método SEEPAGE (Navulur and Engel, 1996; Richert *et al.*, 1992) foca-se nas propriedades do solo e considera seis parâmetros: a inclinação do solo, a profundidade do nível freático, o material da zona vadosa, o material do aquífero, a profundidade do solo e o potencial de atenuação. Este último parâmetro é depois dividido em seis parâmetros: textura do solo à superfície, textura do subsolo, o pH à superfície, a matéria orgânica presente à superfície, o tipo de drenagem do solo e a permeabilidade do solo. Cada fator recebe um peso entre 1 e 50. O valor final é obtido através da soma dos valores dados a cada um dos seis parâmetros individuais, resultando em quatro categorias de vulnerabilidade.

Como já foi referido anteriormente, no presente estudo serão utilizados os índices DRASTIC e GOD, que terão uma melhor explicação mais à frente.

3. Enquadramento hidrogeológico da área do estudo

No contexto nacional, a Serra da Estrela constitui o sector mais elevado e mais oriental do alinhamento montanhoso com a direção SW-NE e está compreendida entre a Guarda e a Serra de Lousã, ao longo de 115 km, 25 km de largura (Lautensach, 1932; Daveau, 1969) e 1993 metros de altitude no Alto da Torre (Malhão Grosso). A Serra da Estrela está bem individualizada, do ponto de vista morfológico, pois a sudoeste, o planalto granítico marca o alto da montanha e a Nordeste a serra vai perdendo altitude até atingir o nível da superfície da Meseta, nas proximidades da Guarda (Ribeiro, 1954; Daveau, 1969). Os flancos sudeste e noroeste da montanha são constituídos por vertentes abruptas com comandos próximos de 1000 e de 1200 m, respetivamente, que contactam através de vários patamares com as plataformas da Meseta e do Mondego.

O clima da Serra da Estrela é de influência mediterrânica com verões quentes e secos. A estação húmida prevalece de outubro a maio (Daveau et al., 1977), com uma precipitação anual de 2500 mm (quer em neve quer em chuva) nas zonas mais altas. O lado Ocidental da Serra é mais chuvoso do que o lado oriental em consequência da orientação da inclinação em relação aos padrões de circulação de ar do Atlântico Norte e à altitude (Daveau et al., 1977, 1997; Mora, 2006). A temperatura média anual no planalto (acima dos 1400 m) é de quase 7° C e na zona da Torre é de 4° C (Vieira & Mora, 1998) mas, contudo, a topografia influencia, de forma complexa, a temperatura do ar devido à variação espacial dos ventos, as direções dominantes são oeste e noroeste (Mora, 2010). Esta classificação é igualmente confirmada pela classificação de Köppen-Geiger: o clima Csb, corresponde a temperaturas amenas (que originam Verões amenos e secos) comuns no noroeste da Serra da Estrela, enquanto a sudeste o clima é Csa, corresponde a temperaturas que originam Verões quentes e secos (AEMET-IM 2011).

A Serra da Estrela, do ponto de vista tectónico, tem a sua origem num processo tectónico de uplift que a caracterizou como um enorme horst. Atualmente, os processos tectónicos responsáveis pela formação da Serra da Estrela continuam ativos manifestando-se através de sismos. O modelo de “montanha em blocos” da Serra da Estrela (identificado por Ribeiro, 1954 e Daveau, 1969) aplica-se, num contexto mais generalista, a toda cordilheira Central Ibérica.

Relativamente à neotectónica presente na região da Serra da Estrela há várias megadescontinuidades, respetivamente, como a Falha de Gouveia-Seia-Lousã, de direção

NE-SW, e a Falha de Bragança-Vilariça-Manteigas de direção NNE-SSW. Estas estruturas, geradas no episódio mais recente da fraturação tardi-varisca (Ribeiro et al., 1979), apresentam movimentação predominantemente inversa, com atividade neotectónica importante (Cabral & Ribeiro 1988, 1989).

A geologia da Serra da Estrela é caracterizada pela ocorrência de rochas graníticas (essencialmente granitos com moscovite e biotite de grão grosseiro porfiróide, instalados durante a orogenia hercínica numa sequência metassedimentar ante-ordovícica), com origem durante o ciclo Varisco, e de rochas metassedimentares de idades entre o Proterozóico Superior e o Câmbrio Inferior, que estão incorporadas no Grupo das Beiras do Complexo Xistograuváquico. Em áreas mais específicas encontram-se rochas sedimentares, mais especificamente depósitos de cobertura de natureza aluvionar, glaciária e fluvioglaciária, e sedimentos arcósico-argilosos (Teixeira et al., 1967, 1974; Ferreira & Vieira 1999).

As rochas graníticas presentes na Serra da Estrela, devido ao magmatismo varisco de onde se originaram, possuem fácies e classificações diferentes e estão cartografadas segundo a textura, granularidade e composição mineralógica, respetivamente (Teixeira et al., 1961, 1963a, 1963b, 1967, 1974, Ferreira & Vieira 1999, Vieira et al., 2005). Nesta região o granitóide mais comum é um granito de duas micas, porfiróide e de grão grosseiro, já no interior do maciço granítico, que corresponde a um plutão com estrutura zonada, ocorrem granitos moscovíticos juntamente com granitos de duas micas (Ferreira & Vieira 1999, Vieira et al., 2005). O contacto entre as rochas graníticas e as rochas metamórficas deu origem a uma auréola de metamorfismo que pode atingir cerca de um quilómetro de largura.

Segundo Neiva et al. (1987) os granitóides da Serra da Estrela dividem-se, de modo geral, em granodioritos, granitos de duas micas, pórfiros graníticos e granitos moscovíticos.

É também definido por Neiva et al. (1987) de que a variedade petrográfica dos granitos existentes na Serra da Estrela está relacionada com a cristalização fracionada in situ de um magma parental granodiorítico, provavelmente formado pela fusão parcial de metassedimentos. A variedade moscovítica deve estar associada à diferenciação por difusão termogravítica, o magma granodiorítico deve ter-se alojado a 720°C e a partir dele, formaram-se os granitos e pórfiros graníticos a 690°C, mas apenas cristalizaram completamente a 520-400°C. Posteriormente, a partir de temperaturas de 400-350°C e até 260-230°C, os granitos de grão grosseiro estiveram sujeitos à alteração hidrotermal localizada, dando origem às variedades róseas e avermelhadas.

A classificação dos granitóides, que são designados de seguida, tem como base a carta geológica simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela na escala 1:75.000 (Ferreira e Vieira, 1999):

a) Granito da Estrela – É um granito moscovítico de grão médio, podendo haver sectores de grão grosseiro e de tendência porfiróide. É essencialmente alcalino, mas em alguns setores, pode ter tendência calco-alcalina. Tem como minerais essenciais: quartzo, albite, oligóclase, microclina-pertite, pertite, microclina e moscovite (Teixeira et al., 1974). Os granitos da Estrela ocupam uma área que apresenta a forma de ferradura, aberta para a Nave de Santo António, integrando-se no seu interior, a área do Terroeiro, Alto da Torre e a cabeceira do Vale da Candeeira.

b) Granito da Pedrice – É um granito de duas micas de grão fino que se localiza entre o interflúvio de Taloeiros e o Vale de Alforfa. Os minerais essenciais são o quartzo, albite, albite-oligóclase, oligóclase, microclina, microclina-pertite, micropertite, biotite e moscovite (Teixeira et al., 1974).

c) Granito do Curral do Vento – É um granito de duas micas de grão médio de tendência porfiróide, que se estende do Planalto do Curral do Vento até à vertente norte do Covão do Ferro. De um modo geral, é um granito alcalino e os minerais essenciais são o quartzo, albite, oligóclase, microclina-pertite, microclina, biotite e moscovite (Teixeira et al., 1974).

d) Granito da Covilhã – É um granito de duas micas porfiróide de grão médio frequentemente orientado, reflectindo o fluxo magmático (Ferreira e Vieira, 1999). Os minerais essenciais são o quartzo, microclina-pertite, oligóclase, albite, microclina, micropertite, oligóclase-andesina, biotite e moscovite (Teixeira et al., 1974).

e) Granito de Seia – É um granito porfiróide de duas micas, características que são próximas das do Granito da Covilhã, mas o grão é grosseiro e os fenocristais têm contornos mal definidos, encontrando-se normalmente sem orientação no seio da matriz (Ferreira e Vieira, 1999).

f) Granito de Manteigas – É um granito biotítico de grão médio, não porfiróide, com encaves melanocráticos (dioritos quartzícos), e com composição calco-alcalina com tendência granodiorítica. Os minerais essenciais são o quartzo, oligóclase-andesina, andesina, oligóclase, microclina, micropertite, microclina-pertite e biotite (Teixeira et al.,

1974). Este tipo de granito aflora na área de Manteigas, numa mancha alongada na direção NW-SE, entre o Chão das Barcas e o Cabeço do Moreira.

g) Granito do Covão do Curral - É um granito biotítico de grão fino de tendência porfiróide, em cuja matriz surgem pequenos cristais de quartzo globular, rodeados de biotite (Ferreira e Vieira, 1999). Aflora a norte da Lagoa Comprida, numa pequena mancha de contorno irregular.

Além dos granitos acima descritos, também se encontram na Serra da Estrela massas e filões aplíticos, aplitopegmatíticos e pegmatíticos, cortando principalmente os granitos de Seia e da Covilhã (Figura 7). São também frequentes os filões de quartzo com direções NE-SW e NNE-SSW e, em alguns locais, ocorrem filões básicos, principalmente compostos por doleritos, instalados ao longo de falhas hercínicas (Neiva et al., 1987).

O Complexo Xisto-Grauváquico, na sua origem, possui uma sequência sedimentar marinha essencialmente turbidítica organizada em série de flysch. Em consonância com a sequência de Bouma (1962) para os turbiditos, foram identificadas como formações (Ferreira & Vieira 1999): a Formação de Malpica do Tejo (constituída essencialmente por filitos, mas com alguns níveis de metagrauvaques) e a Formação do Rosmaninhal. Esta segunda formação é constituída essencialmente por metagrauvaques e, em menor medida, por filitos e metaconglomerados. Estas duas formações foram afetadas por metamorfismo regional de baixo grau (da fácies dos xistos verdes).

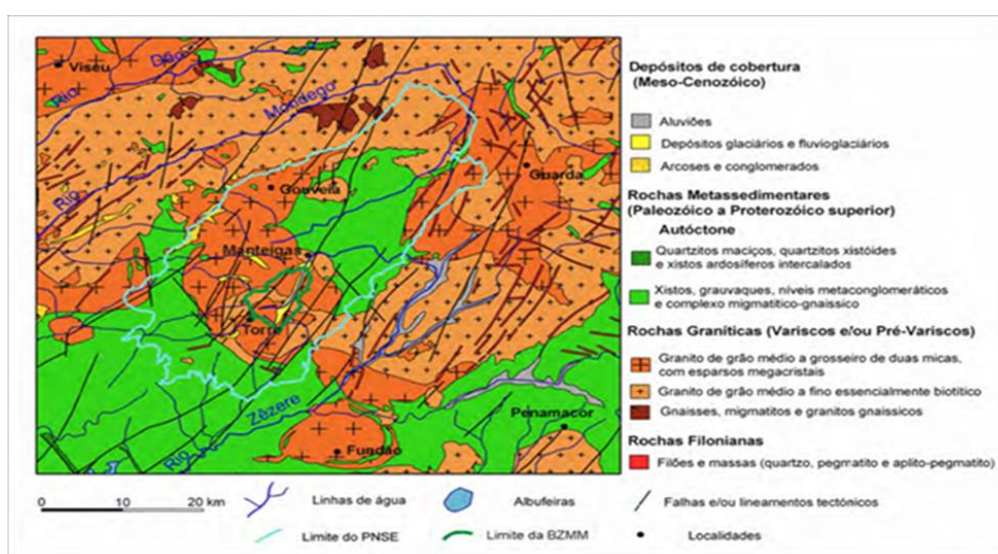


Figura 7 – Geologia da região da Serra da Estrela (simplificado de Oliveira et al., 1992) com a área de estudo delimitada a verde escuro.

A secção portuguesa da Cordilheira Central, do ponto de vista geomorfológico caracteriza-se pela continuidade e pelo marcado contraste morfológico com os territórios envolventes (O. Ribeiro, 1954; Daveau, 1969, 2004; Brum Ferreira, 1998).

A Serra da Estrela é um importante relevo (Figura 9) com orientação geral NE-SW, que se eleva acima das áreas aplanadas envolventes, a plataforma do Mondego, a noroeste, a Superfície da Meseta (Brum Ferreira, 2005), a este, e a depressão da Cova da Beira, a sudeste, sendo delimitado por vertentes de acentuado declive, donde resulta um desnível de cerca de 1000 m, no flanco sudeste, e de 1200 m, no flanco noroeste. A Serra da Estrela é mais elevada para sudoeste, atingindo a máxima altitude na Torre (1993 m). Para nordeste, a montanha perde gradualmente altitude, estando, nas imediações da Guarda, a apenas cerca de 100 m acima da Plataforma da Meseta.

Uma característica da Serra da Estrela é o cariz planáltico dos interflúvios. A superfície planáltica possui altitudes superiores a 1400 m, mas está fortemente dissecada pelo alinhamento submeridiano dos vales do Zêzere e Alforfa, que a divide, segundo Vieira (2004), em dois setores: a oeste, entre as Penhas Douradas e o Alto da Torre (ou Malhão Grosso) encontra-se a parte mais alta, com altitudes entre os 1500 e os 2000 m, designado por Planalto Ocidental e a este, entre o Curral da Nave e o Alto da Pedrice, a altitudes entre 1450 e 1760 m, encontra-se o Planalto Oriental.

O Planalto Oriental pode-se definir, segundo Vieira (2004), em várias subunidades:

- Planalto do Curral da Nave (1450 m): localiza-se na parte norte do Planalto oriental, entre os vales de Beijames e do Zêzere, e prolonga-se para sul, contornando o interflúvio do Curral do Vento.

- Planalto do Curral do Vento (1600-1700 m): encontra-se a norte do Vale da Ribeira das Cortes (Penhas da Saúde), e estende-se entre os vértices geodésicos dos Poios Brancos e do Curral do Vento, dominando o Planalto do Curral da Nave.

- Planalto do Alto da Pedrice (1700-1750 m): situa-se no limite sul do Planalto Oriental. Quanto ao Planalto Ocidental, identificam-se três patamares principais:

- Planalto das Penhas Douradas (ca. 1500-1550 m): situa-se na parte norte do Planalto Ocidental, prolonga-se do Corgo das Mós (Penhas Douradas) até à área de Vale das Éguas.

- Planalto do Curral do Martins (ca. 1650-1760 m): é limitado a norte pelo interflúvio da Fraga das Penas, e prolonga-se a sul, até ao Piornal, e a oeste, até ao interflúvio setentrional do Vale da Lagoa Comprida.

- Planalto da Torre (acima de 1800 m): constitui a superfície culminante da montanha, e prolonga-se desde o interflúvio do Rodeio Grande (a noroeste), até ao Alto da Torre (a sudeste), incluindo também o interflúvio da Penha dos Abutres.

Relativamente aos vales, o mais importante, e o único que realmente penetra no interior do maciço central da Serra da Estrela, é o vale do Zêzere (a montante de Manteigas, Figuras 8, 10 e 11) e, como já anteriormente referido, divide os planaltos ocidental e oriental. A sul do vale do Zêzere, e no mesmo alinhamento tectónico encontra-se o Vale de Alforfa com um traçado simétrico ao primeiro, com o qual contacta através da ampla portela aplanada da Nave de Santo António (Figura 12).

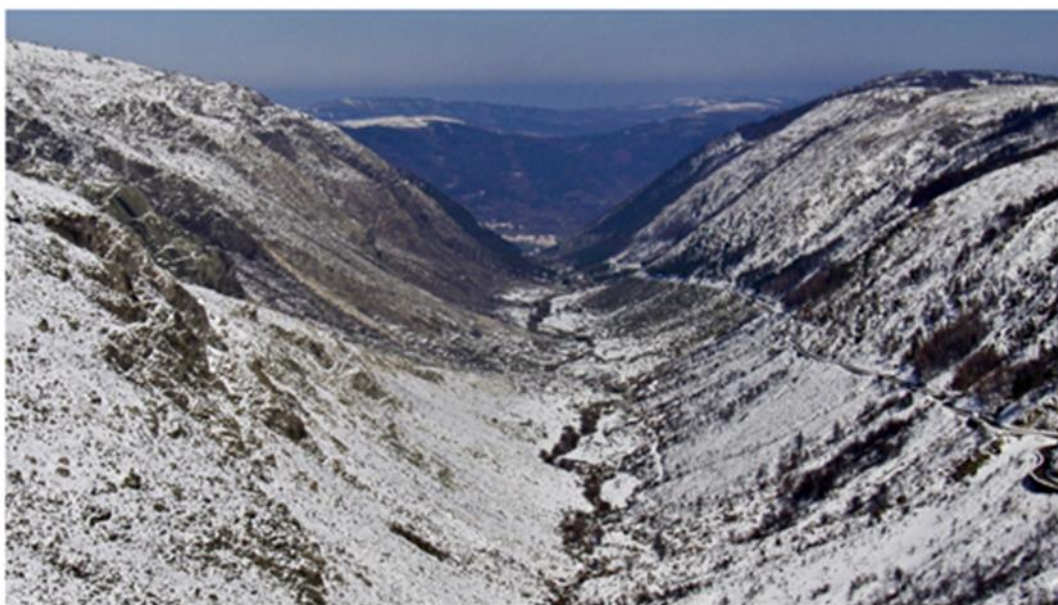


Figura 8 – Vale do rio Zêzere (adaptado de Espinha Marques et al., 2013).

Para além do eixo Zêzere-Alforfa, existem, segundo Gonçalo Vieira (2004), vários vales que entalham as orlas dos planaltos e que são referidos de seguida, de noroeste para sudeste:

- Vale do Alva, um importante afluente do Mondego, ramifica-se próximo da vila do Sabugueiro (1080 m) em vales tributários, que se estendem pelos planaltos das Penhas Douradas e do Curral do Martins.

- Vale da Ribeira da Caniça, a montante do Porto das Vacas (990 m), penetra no Planalto do Curral do Martins através do Vale da Lagoa Comprida. A parte mais elevada da bacia vertente, situada entre os vértices geodésicos do Rodeio Grande e do Cume (ca. 1860 m), drena o Planalto da Torre.

- Vale de Loriga, com uma altitude acima de 780 m, penetra no lado ocidental do Planalto da Torre e drena a maior parte da sua área. É um magnífico exemplo de vale glaciário, com um clássico perfil transversal em “U”, uma sequência de 4 covões em escadaria bem desenvolvidos (Areia, Nave, Meio e Boieiro), e várias lagoas no contacto com o planalto.

- Vale de Alvoco, a sudoeste do Planalto da Torre, não o chega a entalhar.

- Vale da Estrela, pequeno tributário do Vale de Alforfa, situa-se a sul do Planalto da Torre e a sua característica mais interessante do ponto de vista geomorfológico, é o circo glaciário que se desenvolveu na sua cabeceira.

- Vale da Ribeira das Cortes, entalha a orla sul e sudeste do Planalto do Alto da Pedrice, prolonga-se para montante, até a orla sul do Planalto do Curral do Vento.

- Vale da Ribeira de Beijames entalha o Planalto do Curral da Nave por este, estendendo-se até à portela da Lagoa Seca.

- a norte encontra-se o Vale do Mondego, que entalha a serra num sentido SW-NE, contactando com a parte norte do Planalto das Penhas Douradas.

No ponto de vista mais estrito, a região de estudo é constituída pelo vale do rio Zêzere, de traçado retilíneo, de direção NNE-SSW e com a forma típica em “U aberto” (Vieira, 2004) onde se destacam dois grandes planaltos: a oeste o planalto Torre – Penhas Douradas (com altitudes entre 1450 e 1993 metros) e a este, o planalto de Alto da Pedrice – Curral do Vento (com altitudes entre 1450 e 1760 metros). Resultado, essencialmente, do encaixe ao longo do alinhamento tectónico que vai de Unhais da Serra até Bragança, permitiu uma maior erosão glaciária e a posterior, no período paraglaciário contribuiu para a regularização das vertentes.

A área de estudo foi definida no sector BZMM (Figura 9).

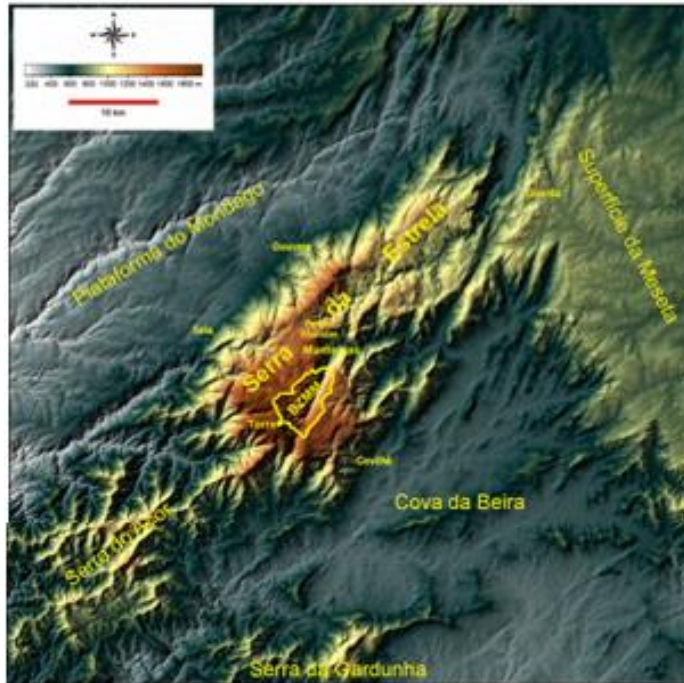


Figura 9 — Relevo da Serra da Estrela e região envolvente (Espinha Marques, 2007).

Do ponto de vista hidrogeológico e considerando o enquadramento geológico, os aquíferos em meios fraturados são considerados uma importante fonte de água subterrânea em grandes áreas do planeta. Esta fraturação das rochas possui um duplo papel pois, por um lado, atuam como sistemas hidráulicos, proporcionando fluxo preferencial e por outro, funcionam como barreiras, o que impede o fluxo através deles, contribuindo para o controle da dispersão de contaminantes (Singhal & Gupta, 2010).

Muitos fatores controlam os fluxos de águas subterrâneas e o impacto sobre a potencial entrada de contaminantes nestas mesmas águas, o que, por sua vez, leva à vulnerabilidade das águas subterrâneas e à contaminação em graus variados. Estes fatores incluem litologia, geomorfologia, rede de fraturas, declive, grau de meteorização, permeabilidade, padrão de drenagem, clima e uso do solo (Granlund et al., 1993; Zaporozec, 2004; Witkowski et al., 2007).



Figura 10 – Vale do rio Zêzere.

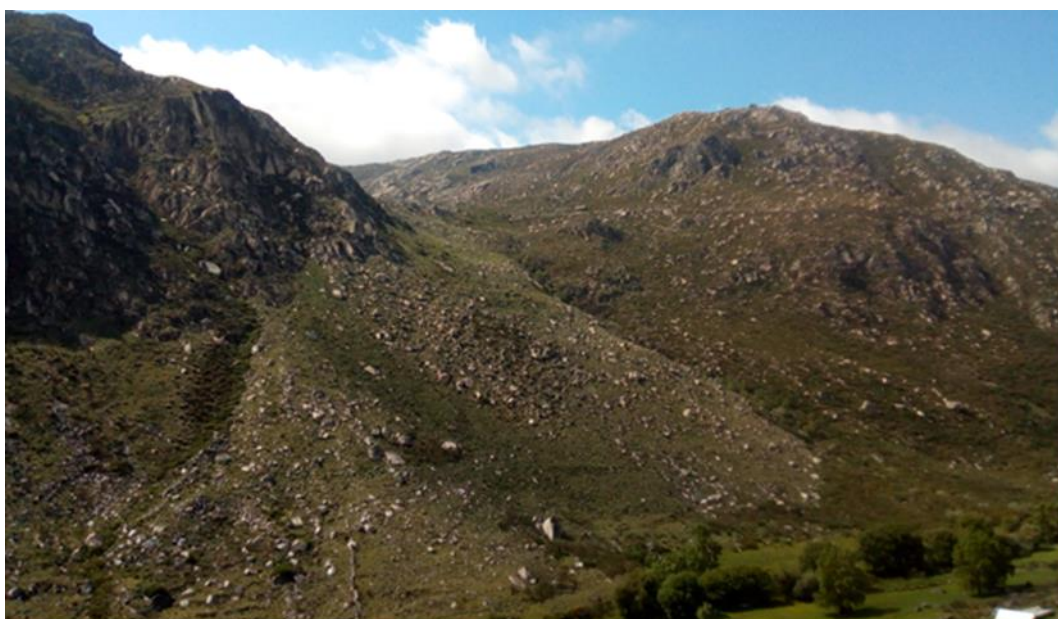


Figura 11 – Depósitos glaciários no vale do rio Zêzere.

As condições geológicas e tectónicas determinaram a maioria das fraturas e processos hidrogeológicos como a infiltração, a hidrogeoquímica, a recarga dos aquíferos, o tipo de fluxo (que se pode dar através de poros ou fraturas) e/ou o tipo de percursos da água subterrânea (Espinha Marques et al., 2013). A fraturação utilizada pela água ocorre essencialmente nas rochas graníticas e metassedimentares pouco alteradas e a porosidade ocorre nos aluviões e depósitos glaciários como nas rochas graníticas e metassedimentares mais deteoradas. A água subterrânea ocorre através de aquíferos (formações geológicas subterrâneas capazes de armazenar água), quer os aquíferos sejam livres ou confinados ou aquíferos. Os aquíferos ocorrem em rochas de diferentes tipos (ígneas, metamórficas e sedimentares).

Quanto à pedologia da área de estudo, os solos reconhecidos e classificados (FAO, 1998) são Umbrissolos Húmicos (áreas de relevo côncavo, associados a depósitos de cobertura de granulometria relativamente fina), Umbrissolos Lépticos (áreas de encosta e planalto com substrato granítico, variadamente ocupadas), Umbrissolos Esqueléticos (relevo côncavo e de base de encosta, associados a depósitos de cobertura de granulometria grosseira, ocupados de forma diversificada), Leptossolos Líticos (áreas de encosta e planalto com substrato granítico, ocupação diversificada), Leptossolos Úmbricos (zonas de encosta e planalto com substrato granítico, ocupação diversificada), Fluvissolos (margens do rio principal e afluentes importantes, em depósitos fluviais) e Afloramentos rochosos (substrato granítico, duro e contínuo, surgindo à superfície (Espinha Marques et al., 2006; Espinha Marques, 2007; Espinha Marques et al., 2009).



Figura 12 – Nave de Santo António com depósitos glaciários.

4. Metodologia

Desde a segunda metade do séc. XX que se tem vindo a dar mais importância aos recursos hídricos subterrâneos e, em consequência do aumento da população humana e das suas atividades, da sua poluição. No último quarto do séc. XX foram-se desenvolvendo técnicas de mapeamento de vulnerabilidade e várias técnicas e índices de vulnerabilidade.

Através da maior sensibilidade governamental à poluição dos aquíferos, à maior pressão populacional e do inconveniente de cada país desenvolvido possuir o seu próprio índice de vulnerabilidade, foram criados vários índices (e várias derivações) não só para vários ambientes geográficos mas também com vários fatores importantes e com os objetivos de facilitarem a definição de quão vulnerável é um dado aquífero assim como de uniformizar internacionalmente o uso do mesmo índice, facilitando a sua leitura em qualquer parte do mundo.

O índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) foi desenvolvido inicialmente pela agência de proteção ambiental dos E.U.A para identificar a vulnerabilidade das águas subterrâneas. É baseado no(s) conceito(s) do(s) meio(s) hidrogeológico(s), lidando unicamente com a “configuração” hidrogeológica e não descreve a influência da poluição. Os meios hidrogeológicos possuem um leque de situações complexas devido à combinação de fatores geológicos e hidrogeológicos que influenciam a recarga do aquífero, o caudal de cada aquífero e as características de cada aquífero.

Para além disto é um sistema de ranking numérico (possuindo três partes importantes: pesos, classes e classificações) utilizando uma equação para contabilizar a vulnerabilidade do (s) aquífero (s) em estudo.

Equação 8: $DRASTIC = (D_R * D_W) + (R_R * R_W) + (A_R * A_W) + (S_R * S_W) + (T_R * T_W) + (I_R * I_W) + (C_R * C_W)$,

Onde R representa a classificação atribuída a cada classe, ou seja, os fatores do índice DRASTIC que não podem ser modificados e W, o peso atribuído a cada fator das variáveis nos seus respetivos intervalos de ocorrência, cujo valor varia de acordo com o nível identificado pelo usuário do método (Tabela 3, Figura 13).

Este índice possui sete parâmetros: a profundidade da superfície freática (D), a recarga do aquífero (R), o tipo de aquífero (A), o tipo de solo (S), a topografia (T), o impacte da zona não saturada (I) e a condutividade hidráulica (C).

A profundidade da superfície freática (D), utilizada essencialmente para aquíferos não confinados, indica a distância entre a superfície topográfica e a superfície freática, e quanto mais profunda for a superfície freática menor a probabilidade de ocorrência de contaminação (Tabela 4). No caso específico dos aquíferos confinados, as zonas saturadas abaixo do topo do aquífero não serão consideradas separadamente.

A recarga do aquífero (R) refere-se à quantidade total (em mm) de água que se infiltra no solo e no aquífero anualmente numa bacia hidrográfica (Tabela 5). A fonte principal da água que se infiltra é a precipitação.

O tipo de Aquífero (A) refere-se às propriedades do material (areia, cascalho, calcário, granito, etc) que constituem o aquífero e que tem o potencial de possuir o armazenamento de água. As propriedades do material poderão atenuar a poluição (que dependerá da mobilidade através do material constituinte do aquífero) em que o comprimento do percurso é um controlo importante (a par da condutividade hidráulica e do gradiente hidráulico) no que diz respeito à determinação do tempo disponível para os processos de atenuação como sorção, reatividade e dispersão e, também, o espaço de área efetiva dos materiais que contactam com o aquífero (Tabela 6).

Em regra, num aquífero, quanto maior a intergranularidade e quanto mais fraturas ou aberturas existirem dentro do aquífero, maior é a sua permeabilidade e menor é a sua capacidade de atenuação dos agentes poluentes. Devido a isto, o potencial de poluição é maior.

O tipo de solo (S) refere-se à parte superior da zona não saturada, caracterizado pela maior atividade biológica. Por ser a zona por onde a água se infiltra tem, como consequência, um impacte significativo na quantidade de recarga que se pode infiltrar e como tal na capacidade de um contaminante se mover verticalmente na zona não saturada. Aumentando esta dificuldade de movimento dos agentes poluentes (assim como o aumento dos processos de atenuação ou filtração, da biodegradação, da sorção e da volatilização) em solos bastante espessos e/ou com argila e silte. A avaliação deste parâmetro depende da permeabilidade do solo (Tabela 7).

A topografia (T) refere-se à inclinação e à respetiva variação na superfície. Este pormenor de existência de inclinação (e de quanto é a inclinação) ajuda a uma maior ou menor infiltração. A topografia também é importante da perspetiva de que o gradiente e direção do fluxo podem frequentemente ser inferidos pelas condições da superfície freática a partir da inclinação principal do terreno (Tabela 8).

O impacto da zona vadosa (I) é definido pelo espaço insaturado (ou descontinuamente saturado) acima do nível freático e abaixo do solo. O controlo dos elementos poluentes ocorre principalmente nesta zona intermédia (Tabela 9).

A condutividade hidráulica (C) indica a capacidade da transmissão de água pelos materiais do aquífero, o que controla o fluxo da água. O fluxo de água subterrânea controla também o grau de mobilidade de um contaminante. A condutividade hidráulica é controlada pela quantidade e interação de espaços vazios dentro do aquífero, que estão relacionados com vários fatores como a porosidade intergranular, fracturação e planos de estratificação (Tabela 10).

Tabela 3 – Pesos associados a cada fator do índice DRASTIC, onde 5 é atribuído ao fator mais relevante e 1 ao fator menos significativo. Desta forma, os parâmetros mais relevantes para a avaliação da vulnerabilidade são o impacto da zona não saturada e a distância à superfície freática. (Adaptado de Aller *et al.*, 1987).

Parâmetro	Peso associado
Distância à superfície freática (D)	5
Recarga do aquífero (R)	4
Tipo de Aquífero (A)	3
Tipo de Solo (S)	2
Topografia (T)	1
Impacto da zona não saturada (I)	5
Condutividade hidráulica do Aquífero (C)	3

Tabela 4 – Classes e Classificações para o parâmetro D (distância à superfície freática), adaptado de Aller *et al.*, 1987.

Distância à superfície freática (D)	
Classes (ft)	Classificação
0-5	10
5-15	9
15-30	7
30-50	5
50-75	3
75-100	2
>100	1

Tabela 5 – Classes e Classificações para o parâmetro R (Recarga do aquífero), adaptado de Aller *et al.*, 1987.

Recarga do Aquífero (R)	
Classe (in)	Classificação
0-2	1
2-4	3
4-7	6
7-10	8
>10	9

Tabela 6 – Classes e Classificações para o parâmetro A (Tipo de Aquífero), adaptado de Aller *et al.*, 1987.

Tipo de Aquífero (A)		
Classes	Classificação	Classificação típica
Calcário Maciço	1-3	2
Rochas Ígneas/Metamórficas	2-5	3
Rochas Ígneas/Metamórficas alteradas	3-5	4
Till glacial		
Arenito, calcário e argilito estratificados	5-9	6
Arenito maciço	4-9	6
Calcário maciço	4-9	6
Areia e balastro	4-9	8
Basalto	2-10	9
Calcário carsificado	9-10	10

Tabela 7 – Classes e Classificações para o parâmetro S (Tipo de Solo), adaptado de Aller *et al.*, 1987.

Tipo Solo (S)	
Classes	Classificação
Delgado ou ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila expansiva e/ou agregada	7
Franco Arenoso	6
Franco	5
Franco Siltoso	4
Franco Argiloso	3
Lodo	2
Argila não agregada e não expansível	1

Tabela 8 – Classes e Classificações para o parâmetro T (Topografia), adaptado de Aller *et al.*, 1987.

Topografia (T)	
Classes (% de inclinação)	Classificação
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Tabela 9 – Classes e Classificações para o parâmetro I (Impacte da zona não saturada) adaptado de Aller *et al.*, 1987.

Impacte da Zona não Saturada (I)		
Classe	Classificação	Classificação Típica
Xisto argiloso/argilito	2-5	3
Argila/Silte	1-2	1
Calcário	2-7	6
Arenito	4-8	6
Arenito, Calcário e argilito estratificados	4-8	6
Areia e balastro com teor significativo de silte e argila		
Rocha ígnea/metamórfica	2-8	6
Areia e Balastro	6-9	8
Basalto	2-10	9
Calcário carsificado	8-10	10

Tabela 10 – Classes e Classificações para o parâmetro C (condutividade hidráulica), adaptado de Aller *et al.*, 1987.
As unidades foram convertidas para metros por dia, de modo a facilitar a compreensão dos dados.

Condutividade hidráulica (C)	
Classes (m/dia)	Classificação
<4.1	1
4.1-12.2	2
12.2-28.5	3
28.5-40.7	6
640.7-81.5	8

>81.5	10
-------	----

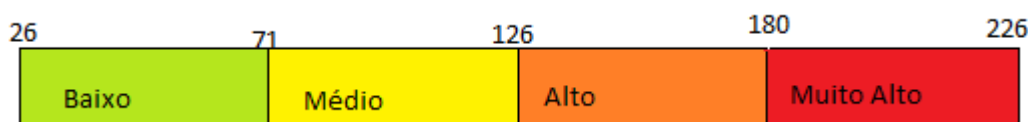


Figura 13 – Vulnerabilidade intrínseca e os seus respetivos intervalos propostos para o índice DRASTIC, com base nas cargas variáveis determinadas por Aller *et al.* (1987) (adaptado de Melo Junior, 2008).

No que diz respeito ao Índice GOD, este é um método de aplicação simples, bastante utilizado na América Latina e Caraíbas (Foster *et al.*, 2002), e é constituído por três parâmetros: o grau de confinamento da água subterrânea (G), a classificação do aquífero (O) e a profundidade do nível freático ou teto do aquífero confinado (D). E tal como no método DRASTIC, neste método é dado um determinado valor a cada parâmetro num intervalo entre 0 e 1 e possui uma fórmula própria.

$$\text{Equação 9: } I_{\text{GOD}} = I_G * I_O * I_D$$

O grau de confinamento da água subterrânea (G) baseia-se na identificação do tipo e do confinamento do aquífero, classificando-se numa escala de 0 a 1.

A zona não saturada ou a camada confinante (O) possui como objetivo a caracterização da zona não saturada e é dado o valor numa escala entre 0.4 e 1.

A profundidade do nível freático (D) similar ao fator D do Índice DRASTIC, pressupõe a determinação do nível de água do aquífero e é expresso numa escala entre 0.6 e 1.

O produto dos três parâmetros é expresso, como já indicado anteriormente, numa escala entre 0 e 1 e permite, em termos relativos, calcular a suscetibilidade à poluição (Foster e Hirata, 1988).

Através dos dados recolhidos, ao longo do trabalho desenvolvido, para cada fator pode-se resumi-los na Tabela 11.

**Avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos em regiões de montanha: Serra da Estrela
(Centro de Portugal).**

Tabela 11 – Informação relativa aos fatores dos índices DRASTIC e GOD (adaptado de Neshat *et al.*, 2013; Aller *et al.*, 1987).

Fator	Valores/Descrições	Classificação	Peso
Profundidade da superfície freática (m, D)	(0 – 1.5)	10	5
	(1.5–4.6)	9	
	(4.6–9.1)	7	
	(9.1–15.2)	5	
	(15.2–22.8)	3	
	(22.8–30.4)	2	
	(>30.4)	1	
Recarga do Aquífero (mm, R)	(0–50.8)	1	4
	(50.8–101.6)	3	
	(101.6–177.8)	6	
	(177.8–254)	8	
	(>254)	9	
Tipo de Aquífero (A)	Aluviões e depósitos glaciários	(4-9)	3
	Rochas ígneas e metamórficas	(2-5)	
Tipo de solo (S)	Aluviões e depósitos glaciários	6	2
	Rochas ígneas e metamórficas	10	
Topografia (% da inclinação, T)	(0–2)	10	1
	(2–6)		
	(6–12)		
	(12–18)		
	(>18)		
Zona Vadosa (I)	Aluviões e depósitos glaciários	(6-9)	5
	Rochas ígneas e metamórficas	(2-8)	
Condutividade hidráulica (cm/s, C)	Aluviões e depósitos glaciários	10^{-2}	3
	Rochas ígneas e metamórficas	10^{-4}	

Tabela 12 – Informação relativa aos fatores do índice GOD (adaptado de Neshat et al., 2013; Aller et al., 1987).

Fator	Valores/Descrições	Classificação
Grau de confinamento da água subterrânea (G)	Aquífero livre	0-1
Zona não saturada (O)	Aluviões e depósitos glaciários Rochas ígneas e metamórficas	0.4-1
Profundidade do nível freático (D)	(0 – 20)	0.6-1

O trabalho de campo consistiu na observação do terreno de estudo nas suas características geomorfológicas como o tipo de vale e depósitos glaciários (Figuras 3, 5, 6 e 7), bem como os vários tipos de ocupação do solo (como a ocupação agrícola no vale do rio Zêzere e as suas encostas utilizadas para a pastorícia, Figura 5).

O *software* utilizado neste trabalho foi o QGIS, especificamente a versão 2.18.13, um programa gratuito, livre e de código aberto, onde foi desenvolvida a aplicação DRASTIC Model (Duarte *et al.*, 2015). O QGIS foi iniciado em 2002 por Gary Sherman (QGIS, 2014) e está licenciado sob uma licença GNU Generic Public License (GPL). O QGIS é um software de código aberto, portanto respeita as quatro liberdades de Stallman (a liberdade de executar um programa, para qualquer finalidade; a liberdade de estudar como o programa funciona, e adaptá-lo às necessidades de cada utilizador; a liberdade de redistribuir cópias; a liberdade de melhorar o programa e de disponibilizar as respetivas melhorias para o público) (Stallman, 2007).

O seu uso neste trabalho justifica-se, não só pela sua gratuitidade, pela facilidade e rapidez no desenvolvimento de novos *plugins* através do uso da linguagem Python (Teodoro & Duarte, 2013; Duarte *et al.*, 2015, 2017) mas também pelo acesso a aplicações provenientes de bibliotecas de informação geográfica.

Foi utilizada uma aplicação, DRASTIC Model, anteriormente produzida por Duarte *et al.* (2015, 2017), que originalmente fora desenvolvida inicialmente com o índice DRASTIC e que posteriormente foi incorporado o índice GOD.

A aplicação DRASTIC requer como dados de entrada: o mapa geológico da área de estudo (Ferreira e Vieira, 1999) e o Modelo Digital de Terreno (MDT). A informação relativa à taxa de recarga dos aquíferos e à zona não saturada foi extraída de Espinha Marques (2007) e Espinha Marques *et al.* (2013).

O MDT foi obtido do ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)" com a resolução espacial de 30 metros (<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>) e quanto ao mapa geológico este foi digitalizado com a definição das litologias e da respetiva condutividade hidráulica na tabela de atributos.

5. Resultados e discussão

Como anteriormente referido, foi utilizado o *software* QGIS e todos os mapas foram criados com uma resolução espacial de 30 m.

O processo iniciou-se com a digitalização da área de estudo a partir do mapa geológico (Figura 14). Este processo foi iniciado com a criação de um novo ficheiro *shapefile* indo ao menu *Layer* e depois *New Shapefile Layer*. Nesta opção, quando o painel estava aberto escolheu-se o polígono e especificou-se o sistema cartográfico (EPSG:3763 – ETRS89 / Portugal TM06). Depois de se ter criado a *shapefile* utilizou-se a ferramenta *Snapping Options* do menu *Settings* para escolher as opções *Enable topological editing* e *Enable snapping on intersection*. Com esta criação ativou-se a ferramenta *Toggle Editing* também através do menu *Layer* e iniciou-se o processo de digitalização.

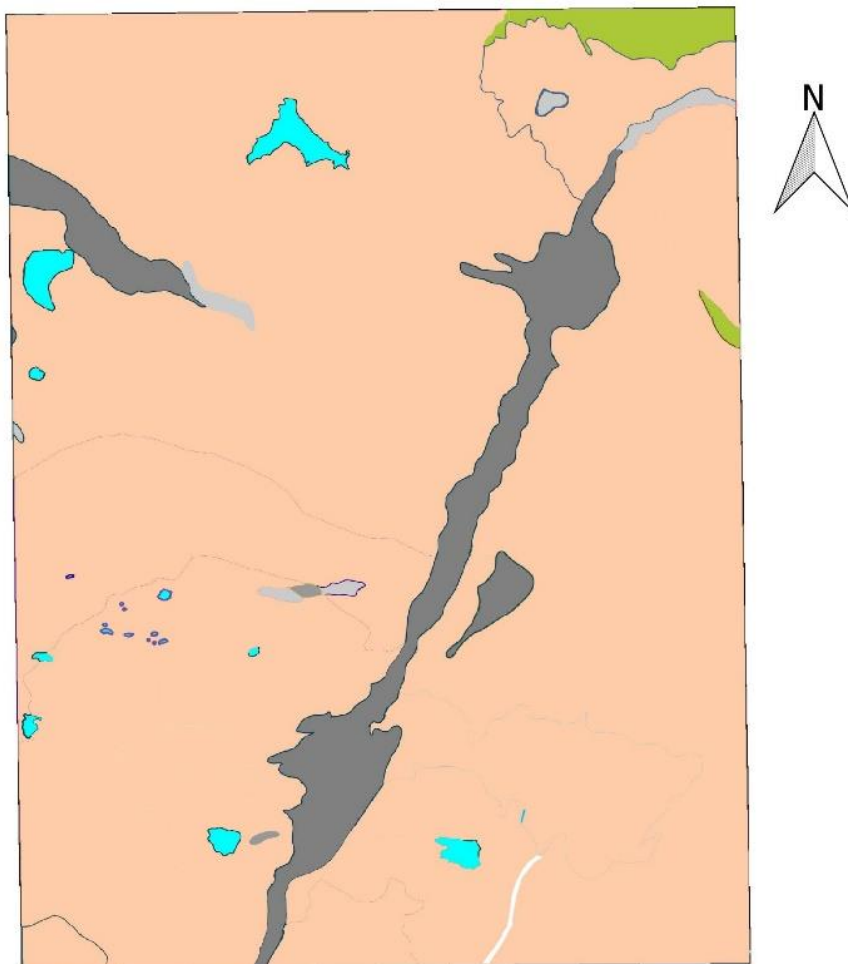


Figura 14 – Mapa geológico da área de estudo.

Depois de feita a digitalização, a tabela de atributos foi devidamente formada, isto é, constituída pelos três tipos de litologia (aluviões e depósitos glaciários, granitos e metassedimentos) e com a respetiva condutividade hidráulica utilizada na criação do mapa do parâmetro C do método DRASTIC (Figura 14).

Com a funcionalidade produziram-se os ficheiros e os mapas referentes aos sete fatores constituintes deste índice, como anteriormente definidos, e o mapa final do índice DRASTIC. Através da aplicação DRASTIC Model produziram-se os mapas referentes aos setes fatores do índice bem como o mapa final do mesmo.

Para o primeiro parâmetro, referente à distância ao nível freático, através do MDT, que se fez o download, criou-se uma superfície através de uma rede de segmentos de

drenagem (linhas de água). Com a nova superfície obtida, os valores variaram desde 0 metros, até ao máximo valor de profundidade, que pode ser modificado pelo utilizador. O utilizador pode definir uma distância para o valor dos segmentos (neste caso foi utilizada o valor de 200 m) e, se a distância é menor que este limite, os valores de profundidade são interpolados entre 0 metros (junto das linhas de água) e a profundidade máxima (em locais localizados na distância máxima definida).

Na área remanescente, onde a distância aos segmentos é igual ou maior a 200 metros, a profundidade à água subterrânea atinge o valor máximo de 20 metros (Figura 15). Neste caso, a criação da rede de drenagem adaptada à área de estudo necessitava das observações que se irão realizar no campo. Neste caso, o mapa do fator D gerado através do MDT possuiu uma condição onde foi criada a superfície da profundidade a partir do MDT com valores que variam entre 0 e 20 metros (Duarte et al., 2015, 2017). Este intervalo de valores resultou de observações de campo (Figura 16).

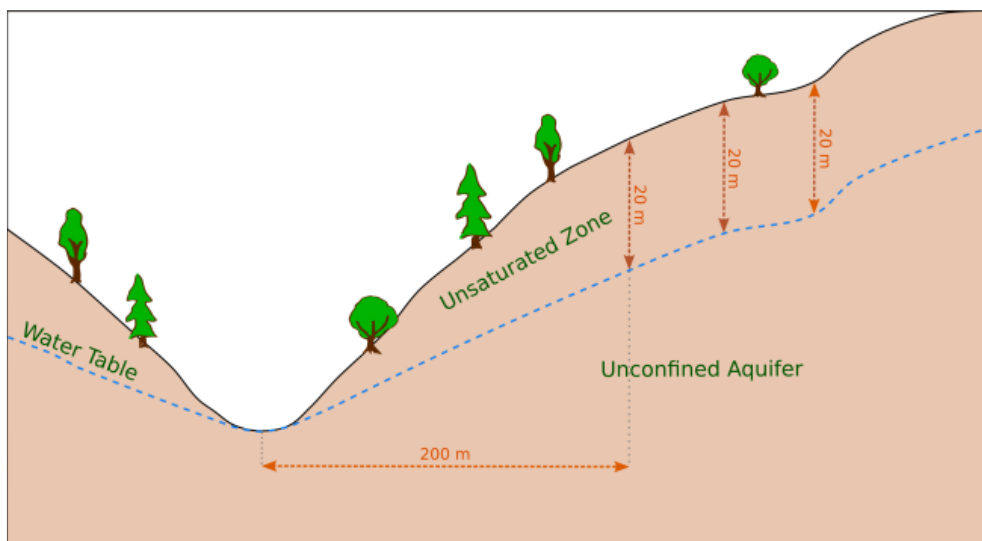


Figura 15 – Modelo conceptual do parâmetro D (Duarte et al., 2017).

Parâmetro D

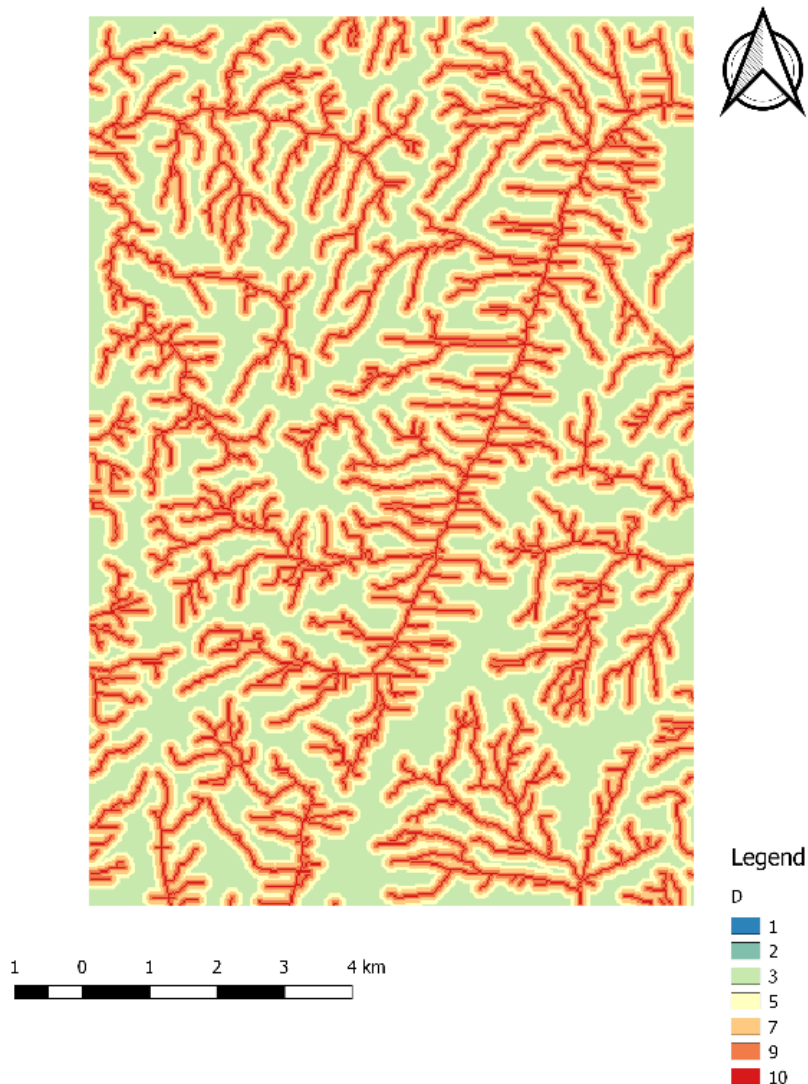


Figura 16 – Mapa do parâmetro D.

No que diz respeito à criação do mapa referente ao parâmetro R (Figura 17), a distribuição espacial da precipitação foi calculada através do MDT, combinado com um modelo de regressão, que expressa a precipitação como uma função da altitude. Foi aplicado o modelo de regressão a partir de Espinha *et al.* (2001 a, b), e, através do MDT, foi calculada a distribuição espacial da média anual da precipitação. O modelo de regressão é composto

pela expressão $y = 0.99x + 542.22$, onde y representa a precipitação média anual em milímetros e x a altitude, em metros. Para gerar este mapa foi aplicada a taxa de recarga do aquífero regional de 15%, calculado por Espinha Maques *et al.* (2001 a, b) para esta zona de estudo. Tendo em conta que são consideradas a vegetação, a topografia, a geologia, a pedologia e outros fatores que poderão influenciar a quantidade de água infiltrada e consequentemente a recarga do aquífero.



Figura 17 – Mapa do parâmetro R.

Os mapas do tipo de aquífero (A), do tipo de solo (S), do impacto da zona não saturada (I) e da condutividade hidráulica (C) foram produzidos com base no mapa geológico. Relativamente à condutividade hidráulica, os valores utilizados para as rochas ígneas e metassedimentares foi de 10^{-4} cm/s e para as aluviões e para os depósitos glaciários foi de

10^{-2} cm/s (Duarte, 2015) e foram inseridos na tabela de atributos do mapa geológico. Segundo Aller *et al.* (1987) estes valores encontrar-se-ão com a mesma classificação resultando num mapa com valor constante. As figuras 18, 19 e 20 apresentam, respetivamente, os mapas obtidos para o parâmetro A, parâmetro S, e parâmetro I.



Figura 18 – Mapa do parâmetro A.

Parâmetro S



Figura 19 – Mapa do parâmetro S.



Figura 20 – Mapa do parâmetro I.

Para obter o parâmetro T, apesar de haver diferentes métodos para ser obtido, foi novamente utilizado o MDT (Figura 21), especificando-o como ficheiro *input*. Como também já acontecera anteriormente, o declive é calculado e reclassificado.

Parâmetro T

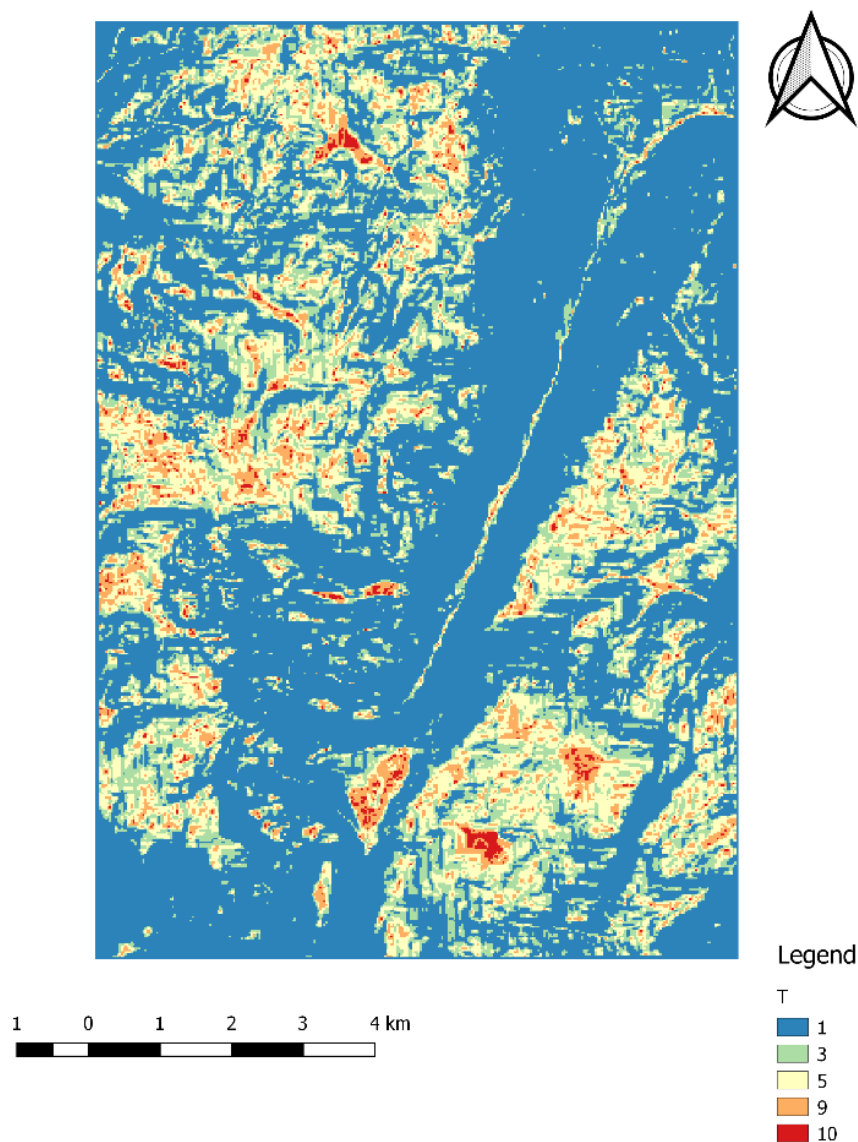


Figura 21 – Mapa do parâmetro T.

O mapa final do índice DRASTIC foi obtido a partir dos diferentes mapas produzidos, introduzidos como *inputs* na última ferramenta referente ao índice DRASTIC na aplicação. A ferramenta da aplicação que produz o mapa final é composta por sete ficheiros *input* que correspondem aos ficheiros *raster* que representam cada parâmetro do índice e o mapa final

resulta da multiplicação dos sete mapas obtidos e soma por cada peso definido na equação 4. A figura 22 apresenta o mapa do índice DRASTIC obtido.

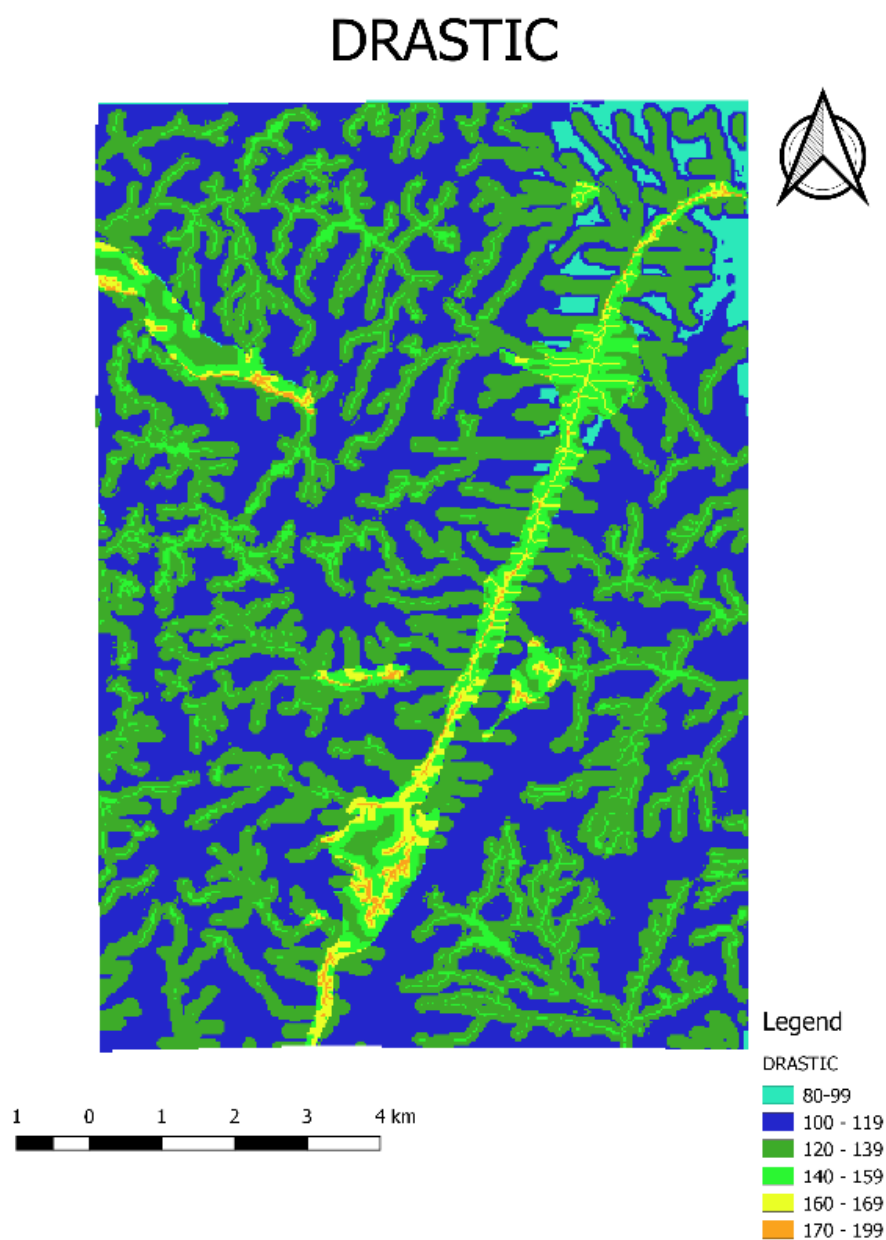


Figura 22 – Mapa do índice DRASTIC.

Com o índice GOD produziram-se os ficheiros e os mapas referentes aos três fatores constituintes deste índice, como anteriormente definidos, e o mapa final do índice GOD. Os

mapas da vulnerabilidade à poluição baseados no índice GOD foram criados segundo a ferramenta *GOD index* da aplicação.

Os mapas referentes aos fatores G e O foram produzidos com base no mapa geológico. No caso do fator G, o valor adotado para o grau de confinamento do aquífero foi o mesmo, uma vez que estamos perante um aquífero livre, originando um mapa uniforme.

No caso do parâmetro O (Figura 23), o valor de 0.7 foi adotado para a zona não saturada e grau de consolidação da mesma (correspondendo aos depósitos glaciários e aluvionares) e o valor de 0.6 foi adotado para as rochas ígneas, metamórficas e metassedimentares.



No que respeita ao fator D (figura 24), o mapa foi gerado através da utilização do MDT, de modo análogo ao índice DRASTIC, tendo como base a classificação estabelecida por Foster et al., 2002 para a distância que foi desde a superfície topográfica à superfície freática. Assim sendo, junto às linhas de água a distância à superfície freática é inferior a 5 metros,

aumentando com a distância às mesmas. Em zonas onde o relevo é mais acentuado, a distância à superfície freática encontra-se entre os 20 metros e os 50 metros e 5 e 20 metros.

Parâmetro D

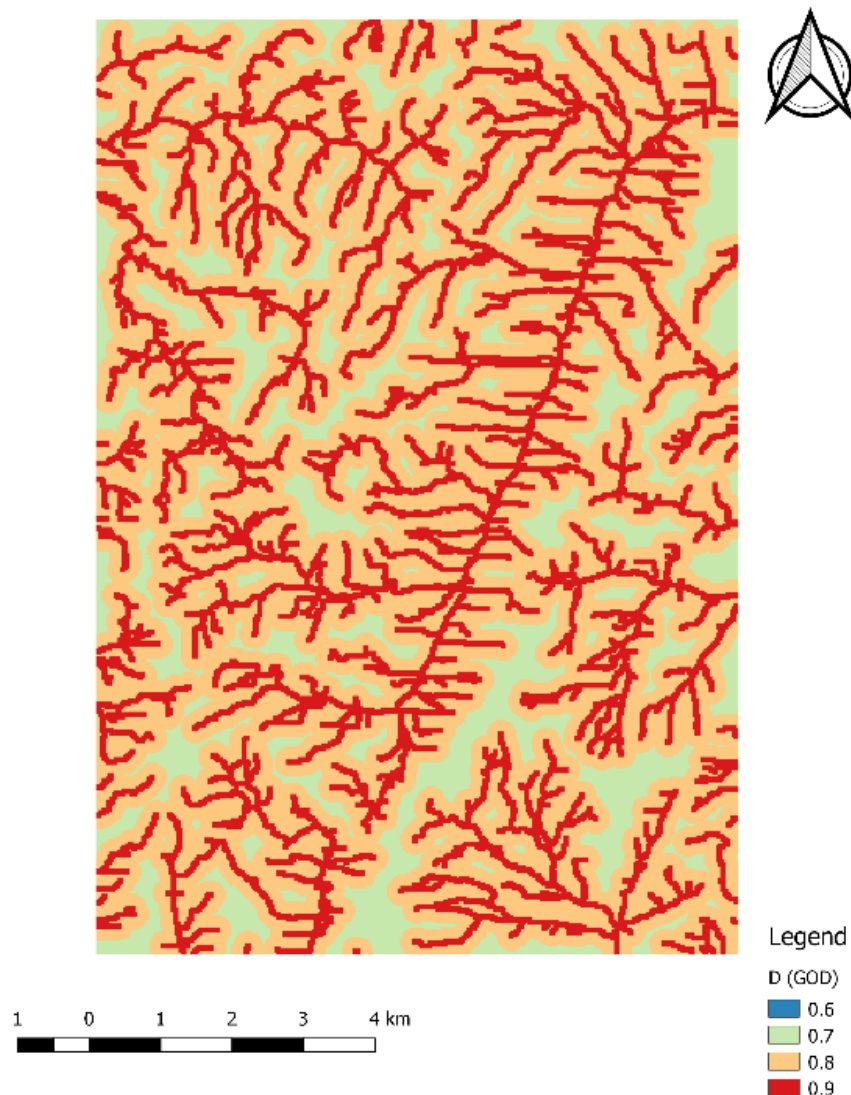


Figura 24 – Mapa do parâmetro D.

O mapa final do índice GOD foi obtido a partir dos diferentes mapas produzidos, introduzidos como *inputs* na respetiva ferramenta na aplicação. Nesta ferramenta, o mapa

final resulta da multiplicação dos três mapas obtidos para cada parâmetro como definido na equação 5. A figura 25 apresenta o mapa do índice GOD obtido.

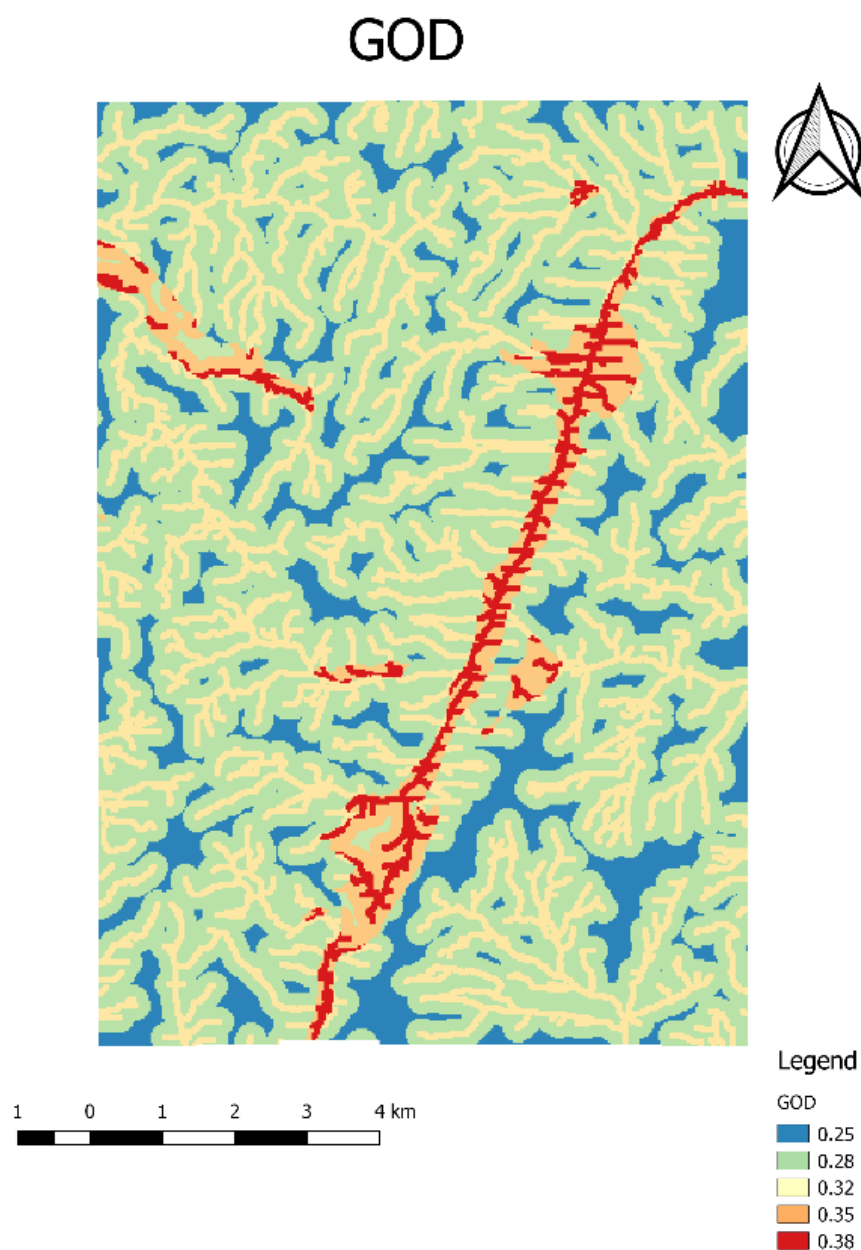


Figura 25 – Mapa do índice GOD para a área de estudo.

Com a obtenção do mapa do índice DRASTIC foi possível diferenciar com facilidade as áreas com graus de vulnerabilidade diferente. As áreas correspondentes aos valores 80 a 159 indicam as zonas de menor vulnerabilidade, enquanto as áreas correspondentes aos valores 160 a 199 indicam zonas mais vulneráveis.

As zonas de maior vulnerabilidade correspondem, de um modo geral aos fundos de vale, onde a superfície freática está mais próxima da superfície topográfica e são constituídas por depósitos fluvioglaciários sendo, por isso, áreas mais permeáveis para a passagem de agentes poluentes. Abrange a Nave de Santo António e o vale do rio Zêzere até à vila de Manteigas. As zonas de menor vulnerabilidade encontram-se nas encostas constituídas essencialmente por rochas graníticas ou metamórficas (metassedimentos), normalmente, com reduzida meteorização.

Quanto ao mapa do índice GOD este pode ser definido por duas grandes zonas. A primeira zona, com os valores entre 0.25 e 0.32, corresponde às encostas constituídas essencialmente por rochas graníticas e metassedimentares. A segunda zona, correspondendo ao fundo do vale do rio Zêzere, possui os valores entre 0.35 e 0.38, o que indica uma maior vulnerabilidade.

6. Conclusões

Os mapas resultantes da aplicação de métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos como os índices DRASTIC e GOD, utilizados neste trabalho, demonstraram ser de grande valor, tomando em conta os fatores geológicos e hidrogeológicos inerentes, para identificar a vulnerabilidade à contaminação de uma determinada área geográfica e, em simultâneo, uma via útil e de fácil interpretação. Os referidos métodos são, igualmente de grande utilidade para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Os mapas de vulnerabilidade são produzidos com base em dados de diferentes origens, incluindo as observações de campo, recorrendo a ferramentas tecnológicas como *softwares* SIG e *plugins* adaptados para o efeito.

A interação entre programas de SIG, como o QGIS, utilizado neste trabalho, e a incorporação de aplicações que integram a capacidade de produzir mapas de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição criados através de métodos de avaliação desenvolvidos ao longo das últimas décadas e com várias perspetivas e especificidades originou importantes avanços na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

A aplicação DRASTIC Model possui um conjunto de vantagens que permite simplificar o seu uso para uma variedade de áreas para além da hidrogeologia tal como engenharia civil, planeamento urbano, ecologia, etc.

A possibilidade de modificar os valores dos pesos e das classificações de cada fator em casos específicos é uma grande vantagem de utilidade desta aplicação. Em acrescento, o utilizador pode modificar os campos de descrição ou até mesmo importar a tabela de atributos e atribuir as classificações.

Outra vantagem é a existência do menu de ajuda, o qual fornece as informações necessárias sobre os recursos da aplicação informática e os resultados obtidos. Depois da sua criação, os mapas (quer referentes aos fatores quer ao mapa final de cada índice) são apresentados em janelas individuais o que permite a sua análise crítica, avaliação e a possibilidade de os completar.

Por ter sido desenvolvido num software de código aberto, o DRASTIC Model (desenvolvido para ser usado na área da hidrogeologia, bem como em outras áreas relacionadas com os recursos hídricos) é mais fácil de obter e usar. O utilizador tem a

vantagem acrescida de poder modificar o código e adaptá-lo (disponível em <http://www.fc.up.pt/pessoas/amteodor/QGIS/DRASTIC.rar>), permitindo assim que qualquer utilizador possa modificar de acordo com as suas necessidades.

A metodologia aplicada no presente estudo, através dos SIG, tem como principal vantagem ajudar, a definir as zonas de maior ou menor vulnerabilidade da água subterrânea de uma determinada área geográfica para melhor planificação do território, minimizando a possibilidade de os aquíferos ficarem poluídos.

7. Referências bibliográficas

Adamcova, D., Vaverková, M. D., Barton, S., Havlíček, Z., Broušková, E., 2016. Soil contamination in landfills: a case study of a landfill in Czech Republic. *Solid Earth*, vol. 7, p. 239–247.

Agencia Estatal de Meteorologia (Espanha), Instituto de Meteorologia I. P. (Portugal), 2011. Atlas Climático Ibérico. Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. ISBN: 978-84-7837-079-5.

Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., 1987. Drastic: A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeological settings. National Water Well Association Worthington. Ben.

Anovitz, L., M. & Cole, D., R., 2015. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures. *Mineralogy & Geochemistry*, Vol. 80, p. 61-164.

Brum Ferreira, A., 1998. Short note on the morphology of the Serra da Estrela. In: G.T. Vieira, Ed., *Glacial and Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela, Portugal. Guidebook for the fieldtrip*, Lisboa, p. 19-23.

Brum Ferreira, A., 2005. Formas do Relevo e Dinâmica Geomorfológica. In: *Geografia de Portugal – O Ambiente Físico*. Carlos Alberto Medeiros (Dir. e Coord), Círculo de Leitores, Lisboa, Vol. I, p. 53-256, nett and Williams, inc.

Cabral, J. & Ribeiro, A., 1988. Carta Neotectónica de Portugal Continental na Escala 1/1 000 000. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.

Cabral, J. & Ribeiro, A., 1989. Carta Neotectónica de Portugal Continental na Escala 1/1 000 000, Nota Explicativa, p. 10. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.

Carvalho, A., Espinha Marques, J., Marques, J. M., Carreira, P. M., Moura, R., Guerner Dias, A., Chaminé, H. I., Rocha, F., Saraiva, R., Tavares, M., Mansilha, C., 2012. Contaminação de água subterrânea por substâncias de limpeza da neve em estradas: o caso do sector de Nave de Santo António – Covão do Curral (Serra da Estrela, Centro de Portugal). *LNEG, Comunicações Geológicas*, 99, 1, p. 19-25.

Chachadi, A. G., Lobo-Ferreira, J. P., 2001. Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proceedings of the workshop on modelling in hydrogeology. Anna University, Chennai, India.

Chachadi, A. G., Lobo-Ferreira, J. P., 2005. Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: part 2, GALDIT indicators description. The Fourth Inter-Celt Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources.

Chachadi, A.G., Lobo-Ferreira, J. P., Noronha L, Choudri, B. S., 2003. Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT, APRH/CEAS. Seminário Sobre Águas Subterrâneas, Lisboa.

Chaminé, H.I., Carvalho, J.M., Afonso, M.J., Teixeira, J. & Freitas, L., 2013. On a dialogue between hard-rock aquifer mapping and hydrogeological conceptual models: insights into groundwater exploration. *European Geologist, Journal of the European Federation of Geologists*, 35, p. 26-31.

Christofolletti, A., 1980. *Geomorfologia*. 2ª edição, São Paulo, Edgard Blücher, 1980.

Civita, M. & De Regibus, C., 1995). Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. *Q. Geol. Appl. Pitagora*. Bologna., 3, p. 63–71.

Civita, M. & De Maio, M., 2004. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian “combined” approach. *Geofísica Internacional*, p 513-532.

Daveau, S., 1969. Structure et relief de la Serra da Estrela. *Finisterra, Lisboa*, 4, 7-8: p. 33-197.

Daveau, S., 2004. A Cordilheira Central. In: M. Feio & S. Daveau, Coords, *O relevo de Portugal, Grandes unidades regionais*, Coimbra, Vol.2, p.75-96. Associação Portuguesa de Geomorfologia.

Daveau S., Coelho C., Costa V.G., Carvalho L., 1977. Distribution and rhythm of precipitation in Portugal. *Memórias do Centro de Estudos Geográficos* 3.

Daveau, S., Ferreira, A. B., Ferreira, N. & Vieira, G., 1997. Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela. *Estudos do Quaternário, Lisboa*, 1, p. 41-51.

Doerfliger N. & Zwahlen F., 1995. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karst environment. In: Günay G, Johnson I (eds) *Proceedings 5th International symposium*

and field seminar on karst waters and environmental impacts, Antalya, Sep 1995, Balkema, Rotterdam, p 117–123.

Domenico, P. & Schwartz, F. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Nova York, p. 824.

Doummar, J., Margane, A., Geyer, T., Sauter, M., 2012. Vulnerability Mapping Using the COP and EPIK. Technical Cooperation, Project nº 2008.2162.9, Protection of Jeita Spring, Technical Report nº 7b.

Duarte, L., Teodoro, A. C., Gonçalves, J. A., Guerner Dias, A. J. Espinha Marques, J., 2015. A dynamic map application for the assessment of ground water vulnerability to pollution. Environmental Earth Sciences, 74, p. 2315–2327, doi 10.1007/s12665-015-4222-0

Duarte, L., Pereira, J., Espinha Marques, J., Teodoro, A. C., 2017. Uma aplicação SIG open source para a avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea à poluição: um estudo de caso na Serra da Estrela (Centro de Portugal). LNEG, Comunicações Geológicas (2017) 104, 1, XX-XX ISSN: 0873-948X; e-ISSN: 1647-581X

Espinha Marques, J.M., 2001. Estudo de sistemas hidrominerais: o caso de Caldas do Moledo, 143 pp.; 5 anexos. Universidade do Porto, (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica).

Espinha Marques, J. M., 2007. Contribuição para o Conhecimento da Hidrogeologia da Região do Parque Natural da Serra da Estrela (Sector de Manteigas – Nave de Santo António – Torre). Universidade do Porto, Faculdade de Ciências (Tese de Doutoramento).

Espinha Marques, J., Chaminé, H. I., Martins Carvalho, J., Sodré Borges, F., 2001. Tectónica regional do sector de Caldas do Moledo–Granjão–Cidadelhe (Falha de Penacova–Régua–Verín, N de Portugal): implicações no controlo das emergências hidrominerais. Comun. Inst. geol. min., Lisboa, 88, p. 203-212.

Espinha Marques J., Duarte J. M., Constantino A. T., Martins A. A., Aguiar C., Rocha F. T., Inácio, M., Marques, J. M., Chaminé, H. I., Teixeira, J., Samper, J., Sodré Borges, F., Martins Carvalho, J. M., 2006a. Vadose zone characterisation in a mountain hydrogeologic system: Serra da Estrela (Central Portugal) case study. In: Extended Abstracts of the International Symposium “Aquifer Systems Management”, Dijon, France, 30 May-1 June 2006, CD-rom with Full Texts, Theme 4, p.123-137.

Espinha Marques J., Marques J.M., Aguiar, C., 2009. A groundwater system in a mountain environment (Serra da Estrela, Portugal). In: Evelpidou N., Figueiredo T., Mauro F., Vahap A. & Vassilopoulos A. (Eds). *Natural Heritage in Europe from East to West*. Springer-Verlag, p.163-167.

Espinha Marques, J., Samper, J., Pisani B., Alvares, D., Carvalho, J. M., Chaminé, H. I. Marques, J. M., Vieira, G. T., Mora, C., Borges, F. Sodré, 2011. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environ Earth Science*, 62, p. 1219–1234 DOI 10.1007/s12665-010-0610-7

Espinha Marques, J., Marques, J. M., Chaminé, H. I., Carreira, P. M., Fonseca, P. E., Santos, F. A. M., Moura, R., Sumper, J., Pisani, B., Teixeira, J., Carvalho, J. M., Rocha, F., Boges, F. S., 2013. Conceptualizing a mountain hydrogeologic system by using an integrated groundwater assessment (Serra da Estrela, Central Portugal): a review. *Geosciences Journal* 17(3), p. 371-386. doi: 10.1007/S12303-013-0019-X.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. World reference base for soil resources. *World Soil Resources Reports*, p. 84.

Fernandes, A., J., 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, 29 (1/2), p. 49-72, 2008.

Ferreira, N. & Vieira, G., 1999. Guia geológico e geomorfológico do Parque Natural da Serra da Estrela. Locais de interesse geológico e geomorfológico, p. 112; 1 mapa. Parque Natural da Serra da Estrela. Edição Instituto da Conservação da Natureza/Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Fitts, C.R., 2013. *Groundwater Science*. 2nd Ed., p. 692, Academic Press, Waltham, MA, USA.

Foster, S., Hirata, R. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. Pan American Center for sanity engineering and environmental sciences cepis. Lima, Peru.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M., Paris, M., 2002. *Groundwater: quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies*. First edition The World Bank, Washington D.C..

Freeza, R. A. & Cherry, J. A, 1979. Groundwater. p.604 Prentice Hall, New Jersey.

Granlund, K. A., Nysten, T., & Rintala, J. P., 1993. Protection plan for an important groundwater area a model approach. Groundwater Quality Management Proceedings of the GQM 93 Conference, Tallinn, Finland, p. 393.

Jansen, J. & Sequeira M., P., S., M., 1999. The vegetation of shallow waters and seasonally inundated habitats (Littorelletea and Isoeto-Nanojuncetea) in the higher parts of the Serra da Estrela, Portugal. Mitteilungen des Badischen Landesvereins fur Naturkunde 17:449-462

Kumar, D., Rai, S., N., Thiagarajan, S., Ratna Kumari, Y., 2014. Evaluation of heterogeneous aquifers in hard rocks from resistivity sounding data in parts of Kalmeshwar taluk of Nagpur district, India. Current Science, Vol. 107, Nº 7, p. 1137 – 1146.

Lautensach, H., 1932a. Estudo dos glaciares da Serra da Estrela. Memórias e Notícias, Coimbra, 6: 1-60.

Lobo Ferreira, J. P. C., 1998. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal. APRH, Congresso da Água, 4, Lisboa, comunicações, p. 1-16.

Melo Junior, H. R., 2008. Método DRASTIC: Uma proposta de escala para a normatização dos índices finais de vulnerabilidade. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

Migón, P. & Vieira G., 2014. Granite geomorphology and its geological controls, Serra da Estrela, Portugal. Geomorphology 226, p. 1-14. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.027.

Moghaddam, H. K., Jafari, F., Javadi, S., 2015. Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. Hydrological Sciences Journal, 62:1, p. 137-146, DOI: 10.1080/02626667.2015.1080827

Moore, D. S, and John, S., 1990. SEEPAGE: A system for early evaluation of the pollution potential of agricultural groundwater environments, USDA. SCS, Northeast Technical Center, Geology Technical Note 5.

Mora, C., 2006. Climas da Serra da Estrela, características regionais e particularidades locais dos Planaltos e do Alto Vale do Zêzere, 427 pp. Universidade de

Lisboa. (Dissertação de Doutoramento em Geografia, área de especialização em Geografia Física).

Mora, C., 2010. A synthetic map of the climatopes of the Serra da Estrela (Portugal). *Journal of Maps* 6(1), p. 591-608.

Mora C. & Vieira G., 2004. Radiation balance of the plateaus of Serra de Estrela (Portugal) in a winter morning: methodology and first results, in Spanish. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sec. Geol.)* 99(1-4), p.37-45.

Navulur, K. C. S. & Engel, B. A., 1996). Predicting spatial distributions of vulnerability of Indiana state aquifer systems to nitrate leaching using a GIS. Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. NCGIA, Santa Fe, New Mexico, USA. 12p. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sfinfo.html doi: 10.4113/jom.2010.1112

Neiva, A.M.R., Neiva, J.M.C., Parry, S.J., 1987. Geochemistry of the granitic rocks and their minerals from Serra da Estrela, Central Portugal. *Geochimica e Cosmochimica Acta*, 51, p. 439-454.

Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., Zulhaidi Mohd Shafri, H., 2013 Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran, *Environ Earth Science*, DOI 10.1007/s12665-013-2690-7.

Oliveira, L. M., 1997. A gestão de riscos geológicos urbanos em áreas de carste. Curitiba, MINEROPAR.

Pochon, Alain, Zwahlen, François, 2003. Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissure, p. 30-31. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Polemio, M., Casarano, D., Limoni, P. P., 2009. Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. nº 9, p. 1461–1470.

Ribeiro, A.; Antunes, M.T.; Ferreira, M.P.; Rocha, R.B.; Soares, A.F.; Zbyszewski, G.; Almeida, F.M.; Carvalho, D. & Monteiro, J.H., 1979. Introduction à la géologie générale du Portugal, p. 114, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Ribeiro A, Munhá J, Dias R, Mateus A, Pereira E, Ribeiro L, Fonseca PE, Araújo A, Oliveira JT, Romão J, Chaminé HI, Coke C, Pedro J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics* 26(TC6009), p. 1-24. doi: 10.1029/2006TC002058.

Ribeiro, O., 1954. Estrutura e relevo da Serra da Estrela. *Bol. real. Soc. Esp. Hist. Natur.*, Madrid., Tomo de Homenaje a E. Hernández-Pacheco, p.549-566.

Richert, S. E, Young, S. E, Johnson, C., 1992. SEEPAGE: A GIS model for Groundwater Pollution Potential, Paper No. 922592ASAE 1992, International Winter Meeting, Nashville, Tennessee, p. 15–18.

Sappa, G., and Lega, S., 1998. Comparison between different vulnerability analysis methods applied to a volcanic groundwater system. In D. Moore and O. Hungr (Eds.), *Proceedings, Eighth International Congress, International Association for Engineering Geology and the Environment in Vancouver, Canada: Balkema, Rotterdam*, 2291–2298.

Scesi, L., Gattinoni, P, 2009. *Water circulation in rocks*. Springer, Dordrecht, pp. 165.

Silva Pereira, J. M., 2016, “Aplicação de SIG ao estudo da vulnerabilidade à poluição da água subterrânea na região da Serra da Estrela (Norte de Portugal)”, Universidade do Porto, Faculdade de Ciências (Relatório de Estágio de Licenciatura).

Singhal, B. S., Gupta, R. P., 2010. *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Second Edition, Springer, Heidelberg.

Stallman, P., 2007. Why ‘Open Source’ misses the point of free software, GNU Operating System. <http://www.gnu.org/philosophy/open-sourcemisses-the-point.html>. Accessed February 2011

Stempvoort, D., V., Ewert, L., Wassenaar, Leonard, 1993. Aquifer Vulnerability Index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Revue Canadienne des ressources hydriques*, vol. 18, nº 1.

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*, volume 14, p. 79–99.

Teixeira, C., Brito de Carvalho, L.H., Barros, R.F., Martins, J.A., Haas, W.E.L., Pilar, L. & Rocha, A.T., 1961. *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50.000*. Notícia

Explicativa da folha 17-C – Santa Comba Dão, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, pp. 31.

Teixeira C., Martins, J. Ávila, Medeiros, A. C., Pilar L., Mesquita, L. Pinto de., Ferro, M. Neves, Fernandes A.P & Rocha A., 1963a. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 18-C – Guarda, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, p. 25.

Teixeira C., Medeiros, A.C., Pilar L., Carvalhosa, A., Ferro, M.N, & Rocha, A.T., 1963. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia explicativa da folha 18-A – Vila Franca das Naves, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, p. 27.

Teixeira C., Brito de Carvalho, L. H., Paula Santos, J., Martins Peres, A., Barros, R. F., Pilar, L., Fernandes, A.P. & Rocha, A.T., 1967. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha nº 17-D – Gouveia, 28 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Teixeira, C., Santos, J. Paula, Carvalho, H.F., Fernandes, A. Peinador & Vairinho, M. Margarida, 1974. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 20-B – Covilhã, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, p. 52.

Teixeira, W., Toledo, M. C. M., Fairchild, T. M., Taioli, F., 2001. Decifrando a terra. Oficina de Textos, São Paulo, p. 558.

Unesco, 1984. Ground water in hard rocks. Project 8.6 of the International Hydrological Programme. ISBN 92-3-101980-5

Vegas, R., Vázquez, J.T., Suriñach, E., Marcos, A., 1990. Model of distributed deformation, block rotations and crustal thickening for the formation of Spanish Central System. Tectonophysics, nº 184, p. 367-378.

Vias, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jim'enez, P. 2006. Proposed Method for Groundwater Vulnerability Mapping in Carbonate (Karstic) aquifers: the COP method: Application in Two Pilot Sites in Southern Spain. Hydrological Journal 14 (6), p. 1-14.

Vías, 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, p. 912–925.

Vieira, G., B., G., T., 2004. Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela. Ambiente frios do Plistocénio Superior e dinâmica actual. Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras (Tese de Doutoramento).

Vieira, G., Jansen, J. & Ferreira, N., 2005. Environmental setting of the Parque Natural da Serra da Estrela. In: T. Pinto Correia; R.G.H. Bunce & D.C. Howard, Eds, *Landscape ecology and management of Atlantic mountains*, Landscape Ecology Series, IALE (Publication series number 2: 53-64).

Vieira G., & Mora C., 1998. General characteristics of the climate of the Serra da Estrela. In: Vieira GT, (ed) *Glacial Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela*, Guidebook for the field-trip. IGU Commission on Climate Change and Periglacial Environments, 26-28 August 1998, CEG and Department of Geology, University of Lisbon, p. 26-36.

Viviroli D. & Weingartner R., 2008. Water towersII: a global view of the hydrological importance of mountains. E. Wiegandt (Ed.) *Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge*. *Advances in Global Change Research*, 31, p. 15-20.

Viviroli D., Weingartner R., Messerli B., 2003. Assessing the hydrological significance of the world's mountains. *Mountain Research and Development*, 23, p. 32-40.

Wachniew, P., Zurek, A. J., Stumpp, C., Gemitzi, A., Gargini, A., Filippini, M., Rozanski, K., Meeks, J., Kværner, J., Witczak, S., 2016. Toward operational methods for the assessment of intrinsic groundwater vulnerability: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 46, Nº 9, p. 827–884.

Winter, Thomas C., Harvey, Judson W., Franke, O. Lehn, Alley, William M., 1998. *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, Colorado.

Witkowski, A., Kowalczyk, A., Vrba, J., 2007. *Groundwater vulnerability assessment and mapping*. Taylor & Francis Group, 978-0-415-44561-0.

Zaporozec, A., 2004. Groundwater contamination inventory: a methodological guide with a model legend for groundwater contamination inventory and risk maps. IHP-VI, Series on Groundwater Nº 2, UNESCO, Paris, p. 160.