



**«Vulnerabilidade à contaminação das águas  
subterrâneas. Estudo de caso da bacia hidrográfica  
do Rio Lis»**

«Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas»

«Pedro Manuel Carraca da Cruz»

Leiria, Setembro de 2024

**«Vulnerabilidade à contaminação das águas  
subterrâneas. Estudo de caso da bacia hidrográfica  
do Rio Lis»**

«Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas»

«Pedro Manuel Carraca da Cruz»

Dissertação realizada/o sob a orientação do Professor Doutor Fernando Cruz e da  
Professora Doutora Luísa Gonçalves

Leiria, Setembro de 2024

# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Agradecimentos

A dissertação apresentada corresponde a um percurso académico longo, mas muito rico. Agradeço a todas as pessoas envolvidas que contribuíram para a realização, conclusão e apresentação deste trabalho.

Aos meus orientadores Professor Doutor Fernando Cruz e da Professora Doutora Luísa Gonçalves, agradeço pela disponibilidade e apoio, pelos comentários e sugestões para concluir o trabalho da melhor forma. O meu agradecimento.

À família que sempre me motivou e incentivou, aos amigos mais próximos. Obrigado.

Mãe sem o teu apoio nada disto teria sido possível. À minha irmã e aos meus sobrinhos que sempre torcem por mim.

Dedico esta dissertação de mestrado, à minha mãe e a ti pai que permanecerás sempre presente. Muito obrigado por tudo, as palavras não são suficientes para agradecer ou para demonstrar o que sinto.

Muito obrigado por tudo, irei viver com respeito e dignidade pelos outros, com amor e dedicação, para alcançar as vossas expectativas

# Resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar a vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio Lis, relacionados com as práticas agrícolas e outras atividades poluidoras, bem como a sua elevada exploração.

Serão aplicados métodos de prevenção da contaminação destes recursos como é o caso dos índices de vulnerabilidade. Os mapas de vulnerabilidade são geralmente elaborados a partir do cruzamento de vários níveis de informação (parâmetros geológicos e hidrogeológicos, ocupação do solo, etc.), aos quais podem ser atribuídos fatores de ponderação em função da sua importância na contribuição para a vulnerabilidade do aquífero.

Os modelos de apoio à decisão, usados nesta investigação, como os Sistemas de Informação Geo gráfica (SIG), são a principal ferramenta de auxílio à gestão de águas subterrâneas. Constituem modernas ferramentas de gestão e ordenamento do território com aplicação crescente em todas as áreas das Geociências e do Ambiente.

Desta forma, pretende-se com este estudo avaliar a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Lis, com recurso à utilização dos SIG. Foram utilizados os modelos DRASTIC, DRASTIC Pesticida (Aller et al. 1987) e o Índice de Suscetibilidade (IS) (Ribeiro, 2005) para a avaliação da vulnerabilidade e suscetibilidade dos aquíferos à poluição.

Com o auxílio das ferramentas de SIG, realizou-se o mapeamento dos índices de vulnerabilidade e suscetibilidade, os quais incluíram a análise espacial e o geoprocessamento. Os mapas dos índices DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS mostram que na zona oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Lis a vulnerabilidade varia de intermédia a alta, diminuindo consideravelmente a este, com vulnerabilidade baixa a muito baixa, na zona centro a vulnerabilidade é predominantemente intermédia.

Este estudo permite concluir que o uso do solo em conjunto com a natureza litológica dos terrenos, tem como consequência a potencial contaminação das águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** “Bacia hidrográfica do rio Lis, vulnerabilidade, aquíferos, SIG”

# Abstract

The main objective of this dissertation is to study the vulnerability of groundwater resources in the Lis River Basin, related to agricultural practices and other polluting activities, as well as their high exploitation.

Methods to prevent contamination of these resources will be applied, such as vulnerability indexes. Vulnerability maps are generally prepared by crossing several levels of information (geological and hydrogeological parameters, land use, etc.), to which weighting factors can be assigned according to their importance in contributing to the vulnerability of the aquifer.

The decision support models used in this research, such as Geographic Information Systems (GIS), are the main tool to assist in groundwater management. They are modern land management and planning tools with increasing application in all areas of Geosciences and the Environment.

Thus, this study aims to assess the vulnerability to contamination of groundwater in the Lis River Basin, using GIS. The DRASTIC, DRASTIC Pesticide (Aller et al. 1987) and Susceptibility Index (SI) (Ribeiro, 2005) models were used to assess the vulnerability and susceptibility of aquifers to pollution.

With the help of GIS tools, the vulnerability and susceptibility indices were mapped, which included spatial analysis and geoprocessing. The maps of the DRASTIC, DRASTIC Pesticide and SI indices show that the difference between vulnerability classes is not significantly different. In the western zone of the Lis River Basin, vulnerability varies from intermediate to high, decreasing considerably towards the east, with low to very low vulnerability; in the central zone, vulnerability is predominantly intermediate.

This study allows us to conclude that the land use, together with the lithological nature of the land, have as a consequence the potential contamination of groundwater.

**Keywords:** “Lis River basin, vulnerability, aquifers, GIS

# Índice

<b>ORIGINALIDADE E DIREITOS DE AUTOR .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE QUADROS/TABELAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 GENERALIDADES .....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	17
<b>2. ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL.....	19
2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO LIS.....	25
<b>3. QUANTIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....</b>	<b>27</b>
3.1 VULNERABILIDADE E RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	27
3.2 PRINCIPAIS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	29
3.3 MÉTODO DRASTIC .....	30
3.4 MÉTODO DRASTIC PESTICIDA .....	36
3.5 MÉTODO IS .....	37
3.5.1 PARÂMETRO D - PROFUNDIDADE DO TOPO DO AQUÍFERO .....	38
3.5.2 PARÂMETRO R - RECARGA DO AQUÍFERO.....	39
3.5.3 PARÂMETRO A - MATERIAL DO AQUÍFERO .....	39
3.5.4 PARÂMETRO T - TOPOGRAFIA .....	39
3.5.5 PARÂMETRO LU – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	40
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
<b>5. ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO LIS.....</b>	<b>44</b>
5.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E ADMINISTRATIVO.....	44
5.2 CARATERIZAÇÃO HIDROGRÁFICA .....	46
5.3 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA .....	47
5.4 CARATERIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	48
5.5 GEOMORFOLOGIA .....	50

<b>5.6 CARATERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA .....</b>	<b>51</b>
5.6.1 SISTEMAS AQUÍFEROS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO LIS.....	52
<b>5.7 CARATERIZAÇÃO CLIMÁTICA.....</b>	<b>54</b>
<b>5.8 CARATERIZAÇÃO DOS SOLOS .....</b>	<b>56</b>
<b>5.9 OCUPAÇÃO DO SOLO.....</b>	<b>57</b>
<b>5.10 ORIGENS DOS DADOS UTILIZADOS.....</b>	<b>58</b>
<b>5.11 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
<b>5.12. MAPEAMENTO DOS ÍNDICES DE VULNERABILIDADE .....</b>	<b>71</b>
5.12.1 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC.....	71
5.12.2 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC PESTICIDA .....	72
5.12.3 ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE (IS) .....	73
<b>5.13 DISCUSSÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
<b><u>6. CONCLUSÕES.....</u></b>	<b><u>77</u></b>
<b><u>7. BIBLIOGRAFIA.....</u></b>	<b><u>78</u></b>
<b><u>8. ANEXOS.....</u></b>	<b><u>80</u></b>

## Lista de figuras

Figura 1 - Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental (INAG 2001b) .....	23
Figura 2 - Sistemas Aquíferos da Orla Ocidental (Portal do SNIRH).....	24
Figura 3- Sistemas Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Rio Lis (Portal SNIRH).....	26
Figura 4- Parâmetros incorporados no método DRASTIC .....	30
Figura 5- Localização da Bacia Hidrográfica do Lis (Adaptado de INAG, 2006).....	44
Figura 6- Escoamento da bacia hidrográfica do rio Lis (Adaptado do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Lis, 2001).....	45
Figura 7- Rede Hidrográfica da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003).....	47
Figura 8- Hipsometria Característica da Zona de Influência da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003) .....	48
Figura 9- Carta geológica da BH do Lis (adaptado de LNEG, s.d.).....	49
Figura 10 - Morfologia da área da bacia hidrográfica do rio Lis .....	50
Figura 11- Bacia hidrográfica do rio Lis com as principais sub-bacias .....	54
Figura 12- Representação Cartográfica dos Principais Tipos de Solos característicos da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003).....	56
Figura 13 - Representação Cartográfica dos Principais Tipos de Solos caraterísticos da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003).....	58
Figura 14 - Profundidade ao topo do aquífero (m) na bacia hidrográfica do Rio Lis .....	60
Figura 15- Mapeamento do parâmetro D: Profundidade ao topo do aquífero (D) para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e a Profundidade da zona não saturada para o método IS (À direita) .....	61
Figura 16 - Recarga dos aquíferos (mm/ano) na bacia hidrográfica do Rio Lis .....	62
Figura 17- Mapeamento do parâmetro R: Recarga do aquífero (R) para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e para o método IS (À direita).....	62
Figura 18 - Material dos aquíferos presentes na bacia hidrográfica do Rio Lis.....	63
Figura 19- Mapeamento do parâmetro A: Material do aquífero para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e para o método IS (À direita).....	64

Figura 20 - Tipo de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Lis .....	65
Figura 21- Mapeamento do parâmetro S: Tipo de solo do método DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) .....	65
Figura 22 - Declive do terreno em % na bacia hidrográfica do Rio Lis .....	66
Figura 23- Mapeamento do parâmetro T: Declive do terreno para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e para o método IS (À direita).....	67
Figura 24- Mapeamento do parâmetro I: Influência da zona não saturada do método DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) .....	68
Figura 25 - Ábaco que relaciona a litologia com a condutividade hidráulica (adaptado de Freeze e Cherry, 1979).....	68
Figura 26- Mapeamento do parâmetro C: Condutividade hidráulica do método DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP).....	69
Figura 27-Carta de Mapeamento do parâmetro LU: Ocupação e Uso do Solo (COS2018) .	70
Figura 28- Mapeamento do parâmetro LU: Ocupação do solo do método IS .....	70
Figura 29- Mapeamento do Índice DRASTIC na bacia do rio Lis .....	71
Figura 30- Histograma do Índice DRASTIC .....	72
Figura 31- Mapeamento do Índice DRASTIC Pesticida na bacia do rio Lis .....	72
Figura 32- Histograma do Índice DRASTIC Pesticida .....	73
Figura 33- Mapeamento do IS na bacia do rio Lis .....	74
Figura 34 - Comparação dos mapeamentos dos Índices DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS .....	75

## Lista de quadros/tabelas

Tabela 1- Tempo de residência para diferentes formas de água (Lencastre & Franco, 1984) .....	18
Tabela 2 - Volumes de água utilizados por sector (hm <sup>3</sup> /ano) - PNA 2015.....	20
Tabela 3- Consumos de Água (hm <sup>3</sup> ) segundo a origem por Bacia Hidrográfica (PBH 2022) .....	21
Tabela 4 - Estrutura da origem da água de rega (%). (Fonte Instituto Nacional de Estatística RA09) .....	22
Tabela 5 - Peso de cada parâmetro no Índice Drastic.....	31
Tabela 6- Classes de vulnerabilidade do Índice DRASTIC .....	31
Tabela 7 - Reclassificação da profundidade ao topo do aquífero (D) .....	32
Tabela 8 - Reclassificação da recarga do aquífero (R).....	32
Tabela 9 - Reclassificação do material do aquífero (A) .....	33
Tabela 10 - Reclassificação do tipo de solo (S).....	34
Tabela 11 - Reclassificação do declive do terreno (T) .....	34
Tabela 12 - Reclassificação da influência da zona vadosa (I).....	35
Tabela 13 - Reclassificação da condutividade hidráulica do aquífero (C).....	36
Tabela 14 - Peso de cada parâmetro no Índice Drastic Pesticida .....	36
Tabela 15 - Classes de vulnerabilidade do Índice Drastic Pesticida .....	37
Tabela 16 - Intervalos das classes do Índice Suscetibilidade (IS).....	38
Tabela 17 - Reclassificação da profundidade ao topo do aquífero (D) .....	38
Tabela 18 - Reclassificação da recarga do aquífero (R).....	39
Tabela 19 - Reclassificação do material do aquífero (A) .....	39
Tabela 20 - Reclassificação do declive do terreno (T) .....	39

Tabela 21- Classificação do parâmetro LU: Ocupação do solo com base na COS2018 com base na carta CORINE (CNIG, 1988).....	40
Tabela 22 - Workflow do cálculo dos parâmetros dos índices .....	42
Tabela 23 - Distribuição dos grupos litológicos na área abrangida pela bacia hidrográfica do Lis.....	49
Tabela 24- Recursos Hídricos Subterrâneos (RHS) Renováveis da Bacia Hidrográfica do Rio Lis, adaptado de Almeida et al 2000 .....	54
Tabela 25 - Tipo de Solos Característicos da Bacia Hidrográfica do Lis (Campar et al., 1989).....	57
Tabela 26- Origem dos metadados usados para mapeamento dos parâmetros .....	59
Tabela 27- Recarga dos aquíferos da bacia hidrográfica do rio Lis, adaptado de Almeida et al 2000).....	61

## **Lista de siglas e acrónimos**

APA – Agência Portuguesa do Ambiente;

CCRD – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional;

CE – Comunidade Europeia

COS – Carta de Uso e Ocupação do Solo;

DQA – Diretiva Quadro de Água;

ETRS89 – European Terrestrial Reference System 1989

IDW – Inverse Distance Weight

IS – Índice de Suscetibilidade;

GDB – Geo Data Base

MDT – Modelo Digital de Terreno;

PBH – Planos das Bacias Hidrográficas

PNA – Plano Nacional da Água

REN – Reserva Ecológica Nacional;

RA – Recenseamento Agrícola

RH – Região Hidrográfica

SIG – Sistemas de Informação Geográfica;

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação Ambiental;

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos;

TM06 – Transversa de Mercator 2006

# 1. Introdução

## 1.1 Generalidades

A contaminação das águas subterrâneas deve ser solucionada pela necessidade de proteção dos aquíferos à contaminação. A proteção dos aquíferos tem sido um tema em discussão no seio da União Europeia desde o início dos anos 90, o seu reconhecimento ocorreu na reunião ministerial sobre águas subterrâneas, realizada em Haia, em 1991, correspondendo a ações que visavam evitar a deterioração quantitativa e qualitativa das águas doces, de superfície e subterrâneas. Posteriormente, em 1997, foi apresentada pela Comissão Europeia, uma Proposta de Diretiva-Quadro que estabelece um quadro de ação comunitária no domínio da política da água, simplificada designada por Diretiva Quadro da Água, devido à necessidade de proteção das águas subterrâneas (West *et al.*, 2000).

Com o aumento da preocupação na proteção do recurso água nos países da Comunidade Europeia, o Conselho Europeu criou a Diretiva Quadro de Água (Diretiva 2000/60/CE, de 23 de outubro de 2000, DQA) estabelecendo uma série de parâmetros e medidas a cumprir, pelos Estados Membros da CE para a proteção das águas superficiais, de transição, costeiras e subterrâneas. A Diretiva Quadro da Água prevê a elaboração de Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica e o estabelecimento de programas de medidas destinados a garantir o cumprimento dos objetivos ambientais elaborados de forma integrada para cada bacia hidrográfica (Henriques & West, 2000b).

De acordo com Stigter & Dill (2000), a relação entre as águas subterrâneas e a agricultura baseada nas alterações do uso do solo, e a utilização de fertilizantes a nível mundial, tem como consequência o aumento da concentração de nitratos nas águas subterrâneas., pondo em risco a saúde das populações. Por estas razões, as ferramentas de prevenção da poluição e da contaminação das águas subterrâneas adquiriram, nas últimas décadas, uma maior importância na gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos.

A melhor forma para proteger um aquífero corresponde ao estudo da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos e aos fatores que comprometem a qualidade das águas

subterrâneas e à limitação da ocupação do solo a determinadas atividades antrópicas que tenham como consequência a deterioração das águas subterrâneas (Stigter *et al.*, 2006).

A análise da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação representa para os serviços públicos um parâmetro de atuação ao nível da implementação de políticas de controlo e proteção e da gestão das captações das águas subterrâneas.

A vulnerabilidade de um aquífero à contaminação é definida como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, de acordo com fatores intrínsecos aos aquíferos, nomeadamente características geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas. Esta avaliação permite estimar o grau de proteção natural do aquífero a uma potencial contaminação extrínseca (Almeida *et al.*, 2000).

Para a determinação da vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos foram desenvolvidas ao longo dos anos diferentes metodologias, que na sua maioria recorrem a ferramentas de informação geográfica (SIG), que resolvem problemas de armazenamento, manipulação e análise de grandes volumes de dados geográficos relacionados com os recursos hídricos.

Nos estudos na área do ambiente e em especial na área dos recursos hídricos, a utilização de tecnologias de informação geográfica tornou-se uma ferramenta indispensável, permitindo a aquisição e o processamento de dados georreferenciados. A manipulação e análise desses dados possibilita a elaboração de mapas temáticos e a implementação de sistemas de apoio à decisão, sendo os SIG um instrumento eficaz para armazenar, analisar e exibir dados espaciais, sendo frequentemente utilizados na gestão de recursos hídricos.

Estas ferramentas SIG proporcionam ainda a visualização, análise e interpretação de padrões e tendências através de mapas e modelos conceptuais em 3D, com componente geográfico.

Os métodos mais utilizados de determinação da vulnerabilidade e risco de contaminação e os mais conhecidos são os seguintes:

- o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e DRASTIC Pesticida (Aller *et al.*, 1987), com aplicação a aquíferos porosos;
- o método EPIK (Doerfliger e Zwahlen, 1997), desenvolvido para aplicação em aquíferos cársicos;

- o VULFRAC (Fernandes, 2003) aplicável a aquíferos em rochas fissuradas ou fraturadas;
- o Índice de Suscetibilidade (IS) de Ribeiro (2005);
- o POSH (Foster *et al.*, 2002) e
- Fuzzy (Zhou *et al.*, 1999).

Utilizando métodos de avaliação da vulnerabilidade à poluição agrícola é possível identificar as áreas dos sistemas aquíferos mais suscetíveis à contaminação por nitratos. Os mais eficazes são os específicos já que ao introduzirem o descritor Ocupação do Solo, reduzindo ao mesmo tempo a redundância dos parâmetros diminuem a subavaliação dos mapas de vulnerabilidade (Stigter *et al.*, 2006).

Em Portugal as metodologias mais utilizadas para a caracterização da vulnerabilidade e risco de aquíferos à contaminação têm sido o método DRASTIC e o IS. Estes métodos são de fácil aplicação, e são compatíveis mesmo em aquíferos que não possuam um comportamento de aquíferos porosos. As entidades que tutelam a gestão do ambiente e dos recursos hídricos (Agência Portuguesa do Ambiente, APA, Regiões Hidrográficas, Comissões de Coordenação Regional Desenvolvimento, CCRD) e com competência para a aprovação das propostas de REN apresentadas pelos municípios, aconselham a utilização do método IS (apenas a componente de vulnerabilidade intrínseca), acompanhado do cálculo do Índice de Recarga Efetiva para os aquíferos porosos, o método EPIK (Doerfliger e Zwahlen, 1997) em aquíferos cársicos e o VULFRAC (Fernandes, 2003) em rochas fissuradas ou fraturadas.

O mapeamento da vulnerabilidade e risco da contaminação de aquíferos é assim fundamental para uma correta gestão do solo e dos recursos hídricos subterrâneos, tornando-se imperativo desenvolver modelos mais aproximados à realidade, permitindo melhorar as estimativas dos parâmetros hidrogeológicos e o conhecimento dos processos relacionados com a contaminação das águas subterrâneas.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação incide sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Lis, que inclui os seguintes sistemas de aquíferos:

- O Sistema Aquífero do Lourçal, compartilhado pela Bacia Hidrográfica do Rio Mondego;

- O Sistema Aquífero de Pousos-Caranguejeira, exclusivamente no âmbito da Bacia do Lis;
- O Sistemas Aquífero de Leirosa-Monte Real, compartilhado pela Bacia do Mondego;
- Os Sistemas Aquíferos de Alpedriz, Maceira e Vieira de Leiria-Marinha Grande compartilhados com a Bacia das Ribeiras do Oeste;
- O Sistema Aquífero de Ourém e pelas Bacias do Rio Mondego e Rio Tejo;
- O Sistema Aquífero do Maciço Calcário Estremenho que é compartilhado simultaneamente pela Bacia do Lis e pelas Bacias do Rio Tejo e Bacia das Ribeiras do Oeste.

Esta tese tem como principal objetivo a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas com recurso ao ambiente SIG na bacia hidrográfica do rio Lis. Serão comparadas as seguintes metodologias: Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005), DRASTIC e DRASTIC Pesticida (Aller *et al.*, 1987), com aplicação numa área do território, permitindo a avaliação da vulnerabilidade e risco, intrínseca e específica, e a ocorrência de contaminação nos aquíferos.

### **1.3 Organização da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos. No primeiro capítulo encontra-se a introdução em que é efetuado o enquadramento do tema e apresentados os objetivos. O segundo capítulo aborda o estado das águas subterrâneas em Portugal e na bacia hidrográfica do Rio Lis. No terceiro capítulo é apresentada a descrição dos índices de vulnerabilidade e de risco DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS e no quarto capítulo é descrita a metodologia aplicada para a execução dos objetivos definidos nesta dissertação. No quinto capítulo é caracterizada a área em estudo e os seus sistemas adjacentes e são revelados e discutidos os resultados obtidos. No capítulo sexto são apresentados os mapas dos índices de vulnerabilidade. Por fim, o capítulo sétimo é referente às conclusões do estudo, suas limitações e linhas futuras de pesquisa.

## 2. Estado dos Recursos Hídricos

São considerados recursos hídricos todas as águas superficiais, águas de transição, águas costeiras e águas subterrâneas, que se encontram disponíveis para qualquer tipo de uso numa determinada região (DQA 2000).

O ciclo hidrológico corresponde à alteração do estado da água na natureza, entre os continentes, os oceanos e a atmosfera. Este movimento do ciclo hidrológico verifica-se pela imprescindível ação da energia solar. A atmosfera suporta água sob a forma de vapor, dando origem à precipitação, sobre a forma de chuva, granizo, neve, orvalho e geada. Parte desta precipitação evapora-se durante a queda, retornando à atmosfera. Outra parte é interceptada pelas folhas das plantas e pelos telhados, evaporando-se e voltando à atmosfera (Lencastre & Franco, 1984).

A maior parte da precipitação atinge a superfície da Terra, originando a evaporação e o escoamento superficial na rede hidrográfica, tendo como destino a evaporação para a atmosfera ou o percurso das águas até aos oceanos. Outra parte humedece o solo e infiltra-se neste, alimentando as plantas e regressa à atmosfera, quer por transpiração, ou alimentando os cursos de água ou diretamente para os oceanos, onde será evaporada para a atmosfera, fechando assim o ciclo hidrológico. A parte correspondente ao excesso hídrico, infiltra-se em profundidade e corresponde à recarga dos aquíferos, que irá constituir as denominadas águas subterrâneas.

Como se pode ver no Tabela 1 existe uma grande variação na importância relativa das diferentes reservas hídricas mundiais.

Tabela 1- Tempo de residência para diferentes formas de água (Lencastre & Franco, 1984)

Designação	Volume (M km <sup>3</sup> )	Volume (%)	Tempo de residência
Oceanos e Mares	1370	94	~ 4000 anos
Lagos e Reservatórios	0,13	< 0,01	~ 10 anos
Pântanos	< 0,01	< 0,01	1 ~ 10 anos
Rios	< 0,01	< 0,01	~ 2 semanas
Zona não saturada	0,07	0,01	2 semanas ~ 1 ano
Águas Subterrâneas	60	4	2 semanas - 10 000 anos
Gelos e Glaciares	30	2	~ 10 - 1000 anos
Atmosfera	0,01	< 0,01	~ 10 dias
Biosfera	< 0,01	< 0,01	1 semana

Quase toda a água encontra-se presente nos mares e oceanos, com 94% do total, vindo a seguir as águas subterrâneas com 4% do total e os gelos e glaciares com 2%. Os tempos médios de residências correspondem aos fluxos de renovação, ou seja, tempo médio que uma molécula de água se encontra em cada reservatório.

## **2.1 Águas Subterrâneas em Portugal**

Os recursos hídricos superficiais em Portugal dependem das características da pluviometria verificada ao longo dos anos, tais como:

- Abundância relativa devido à precipitação média anual na ordem dos 950 mm,
- Distribuição espacial irregular, provocada por uma maior abundância no Norte de Portugal Continental e na vertente atlântica, e uma maior escassez a Sul do rio Tejo e na vertente continental,
- Grande sazonalidade, com as precipitações concentradas entre o final do Outono e o princípio da Primavera
- e irregularidade interanual, como consequência do clima atlântico/mediterrânico predominante e condicionado pela hipsometria do território, com as serras da Peneda-Gerês, Marão e Estrela, com os seus vales encaixados, a darem lugar aos principais polos pluviométricos. Quando analisamos o escoamento destes recursos hídricos as suas características são mais acentuadas, com o agravamento das assimetrias regionais, das irregularidades sazonais e inter-anuais.

Relativamente aos arquipélagos dos Açores e da Madeira, os seus climas são tipicamente atlânticos, sendo mais húmidos no primeiro caso e mais temperado no segundo, devido à sua proximidade ao continente africano e posição mais a Sul.

Na generalidade do território, e segundo a classificação de Koppen, o clima é temperado, com Verão e Inverno bem definidos e em que a estação seca ocorre no Verão. (PNA, 2015)

O PNA considera várias regiões hidrográficas, cuja delimitação se encontra definida no Decreto-Lei n.º 347/2007, de 19 de outubro (diploma de delimitação georreferenciada das regiões hidrográficas).

Os planos de gestão de região hidrográfica, são instrumentos de planeamento dos recursos hídricos que visam a gestão, a proteção e a valorização ambiental, social e económica das águas ao nível das bacias hidrográficas integradas numa região hidrográfica. Estes planos

permitem avaliar a importância relativa das diversas origens nas bacias hidrográficas e por sector de atividade.

A utilização destes recursos hídricos em Portugal (Tabela 2), varia desde os usos para o abastecimento urbano que podem encontrar-se em todas as bacias hidrográficas, as águas das bacias do rio Douro e as outras situadas a Norte deste rio, Minho, Lima e Cávado, são utilizadas fundamentalmente para fins hidroelétricos (e alguns regadios tradicionais), as águas das bacias dos rios a Sul do Tejo, Guadiana, Sado, Mira e ribeiras do Algarve para fins hidroagrícolas, fundamentalmente, e as águas do Tejo, Mondego e Vouga para ambos estes fins, sendo aí comuns os aproveitamentos de fins múltiplos.

Os volumes de água utilizados por sector (excluído o sector energético) são os que se apresentam na tabela 2 para as regiões hidrográficas (RH) do Continente:

Tabela 2 - Volumes de água utilizados por sector (hm<sup>3</sup>/ano) - PNA 2015

Sector	RH1	RH2	RH3	RH4	RH5	RH6	RH7	RH8	Total	% do total
Urbano	26	61	161	103	394	25	72	47	889	19,6
Industrial	8	45	7	66	67	32	1	1	227	5,0
Agricultura e pecuária	105	266	684	571	1170	248	243	102	3389	74,7
Turismo	1	2	3	3	10	2	2	11	34	0,7
Total	3332	374	855	743	1641	307	318	161	4339	100,0

Quanto aos recursos hídricos subterrâneos, a sua disponibilidade depende muito da geologia do território, destacando-se:

- Terrenos antemesozóicos do Maciço Antigo (Hespérico), constituídos fundamentalmente por rochas eruptivas, sobretudo granitos, e rochas metamórficas, xistos e grauvaques, sistemas de natureza fissurada cuja produtividade hidráulica é diminuta se excetuarmos as intercalações calcárias que por vezes se encontram;
- Terrenos mesozoicos nas orlas ocidentais (de Espinho a Sines) e no Algarve, formados por rochas sedimentares que conformam aquíferos com produtividade já expressiva e onde estão instaladas captações de água para rega e produção de água potável;
- Terrenos de cobertura, mais recentes, na bacia sedimentar do Tejo e do Sado, constituindo terraços e depósitos de praias antigas.

De acordo com o Plano Nacional da Água (PNA) e os Planos das Bacias Hidrográficas (PBH), Tabela 3, a água subterrânea é a origem mais importante para regadio em todas as bacias, com exceção das Bacias Hidrográficas do Minho, Lima e Neiva (RH1), Sado e Mira (RH6), e Guadiana (RH7). Relativamente aos sectores consumidores de água (excluindo a produção de energia), a rega é o setor dominante, sendo responsável por cerca de 75% dos consumos de água. Tais consumos de água associam-se maioritariamente a origens subterrâneas 64%. Na verdade, apenas 12% da área equipada com regadio está afeta a perímetros públicos, esses sim, maioritariamente supridos com origens superficiais de água. Cerca de 62% dos consumos de água para o sector urbano são de origem subterrânea.

Tabela 3- Consumos de Água (hm<sup>3</sup>) segundo a origem por Bacia Hidrográfica (PBH 2022)

Região Hidrográfica	Bacia Hidrográfica	Volume (hm <sup>3</sup> )	
		Origem Superficial	Origem Subterrânea
RH1	Costeiras	3255	78
	Minho		
	Lima		
	Neiva		
RH2	Cávado	88	165
	Ave	84	218
	Leça	42	29
RH3	Douro	477	991
RH4	Vouga	112	304
	Mondego	246	486
	Lis	25	36
RH5	Ribeiras do Oeste	83	124
	Tejo	899	1462
RH6	Sado	142	42
	Mira	256	183
RH7	Guadiana	288	165
RH8	Ribeiras do Algarve	61	245
Continente	TOTAL	2908	4610

Relativamente ao abastecimento urbano, importará distinguir dois tipos de realidade em termos de origens de água:

- Origens subterrâneas: o método de extração mais comum são as captações do tipo furo vertical, captando na camada de alteração da rocha, em rochas não consolidadas do tipo aluvionar (por vezes no leito de linhas de água ou nas imediações), outras rochas sedimentares (cársicas, areníticas, etc.), ou mesmo, aquíferos do tipo fissural (falhas, diaclases, contactos de formações de naturezas diferentes, etc.);
- Origens superficiais: duas soluções surgem como mais correntes em Portugal, a captação direta em linhas de água (por vezes com sobrelevação da superfície livre promovida pela construção de açudes) e a captação em albufeiras.

“Nestes termos, o conhecimento das origens de água para rega poderia desempenhar um papel importante na previsão da redução da área regada nos anos secos. Esta análise, contudo, está dificultada por uma limitação de carácter concetual, que deriva da própria dificuldade em traçar a fronteira entre águas superficiais e águas subterrâneas. Desde logo porque, muitas vezes, a alimentação das linhas de água (água dita de origem superficial) se faz a partir dos lençóis freáticos, sobretudo no verão (caudal de base). Em seguida, porque não é fácil classificar as chamadas charcas – infraestruturas de captação muito utilizadas pelos agricultores do interior norte e centro. Apesar de nelas o nível da água ser visível (água aparentemente de origem superficial), a situação é mais complexa, na medida em que, com muita frequência, parte significativa da recarga das charcas é assegurada por água de origem subterrânea. Nesse sentido, a DGADR desenvolveu contactos com o INE para, no âmbito do Recenseamento Agrícola 2009 (RA 2009), se detalhar com o máximo rigor quais os volumes, em percentagem de água efetivamente consumidos pela agricultura, por região e por origem de água. O resultado apurado é o que consta do quadro e gráfico apresentado na tabela 4.” (Direção-Geral da Agricultura e do Desenvolvimento Rural)

Tabela 4 - Estrutura da origem da água de rega (%). (Fonte Instituto Nacional de Estatística RA09)

Região Agrária	Superficial			Subterrânea			Outra	
	Albufeira, açude ou charca	Curso de água ou lago natural	Outra (s)	Furo ou poço	Nascente	Outra (s)	Reutilização de águas residuais	Outra (s) da rede pública
CONTINENTE	8,81	16,33	0,60	54,06	19,67	0,27	0,04	0,21
Entre Douro e Minho	6,31	21,49	0,22	31,02	40,61	0,28	0,02	0,06
Trás-os-Montes	8,13	20,72	0,75	45,69	24,23	0,22	0,08	0,19
Beira Litoral	3,58	15,41	0,42	69,41	10,76	0,20	0,04	0,18
Beira Interior	15,24	13,72	0,67	60,19	9,57	0,42	0,03	0,16
Ribatejo e Oeste	5,40	11,94	1,26	79,17	1,23	0,26	0,06	0,67
Alentejo	32,67	5,31	1,66	57,33	2,62	0,12	0,04	0,24
Algarve	19,93	1,86	0,76	72,71	3,53	0,62	0,01	0,59
	25,75			74,00			0,25	

De um modo geral, a atividade agrícola de regadio transfere para a gestão dos recursos hídricos pressões e problemas de diversa natureza dos quais se destacam:

- Cerca de 88% da área de regadio em Portugal é de natureza privada, sendo o conhecimento da utilização da água nessas áreas obtido com periodicidade de 10 anos através do Recenseamento Geral da Agricultura;
- Contabilização muito reduzida dos consumos e sua relação com a eficiência da rega e produtividade das culturas;
- Atividade de regadio intensivo com forte adubação sobre zonas de elevada vulnerabilidade de aquíferos;
- Elevado desajustamento temporal natural entre necessidades de água para rega e as disponibilidades nos sistemas hídricos;
- Reduzido conhecimento das corretas dotações e das eficiências globais dos sistemas de regadio.

Do ponto de vista hidrogeológico ocorrem em Portugal sistemas aquíferos dos mais variados tipos (poroso, fissurado e cársico) que condicionam o armazenamento e transmissão da água subterrânea, interagindo com outros meios aquáticos como sejam os rios, os estuários e os oceanos em diversos ambientes climáticos. Portugal está dividido em 4 grandes unidades hidrogeológicas: o Maciço Antigo (A), a Orla Ocidental (O), a Orla Meridional (M) e a Bacia do Tejo e Sado (T) (Figura 1).

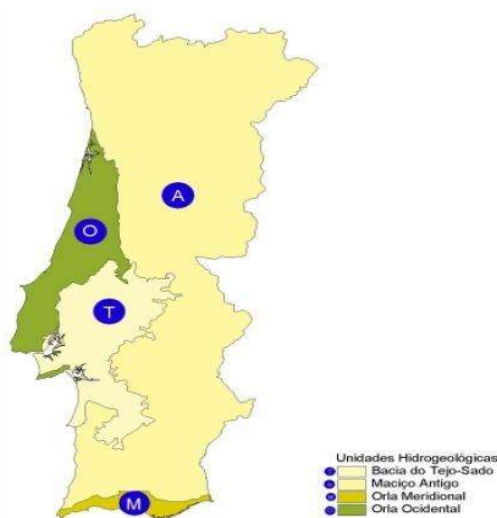


Figura 1 - Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental (INAG 2001b)

No Maciço Antigo predominam as rochas ígneas e metamórficas. Estas formações desempenham um papel fundamental na definição dos caudais ecológicos de rios e ribeiros e no abastecimento de povoações dispersas.

Na Orla Ocidental existe uma grande variedade de formações que constituem o suporte de 30 sistemas aquíferos: unidades detríticas de idade terciária e quaternária; arenitos e calcários do Cretácico e calcários do Jurássico.

Por sua vez a Orla Meridional é constituída por formações detríticas e carbonatadas de um modo geral muito produtivas na qual foram delimitados 17 sistemas aquíferos de características cársicas ou parcialmente cársicas.

Finalmente, a Bacia do Tejo e Sado é constituída por formações detríticas de idade terciária e quaternária. É aqui que se situa o mais extenso sistema aquífero da Península Ibérica: o sistema da bacia do Tejo e do Sado-Margem Esquerda. Para além deste foi identificado mais 4 sistemas aquíferos todos com características porosas, contribuindo pela sua extensão, espessura e produtividade para tornar a Bacia do Tejo e Sado, a mais importante unidade hidrogeológica do país.



Figura 2 - Sistemas Aquíferos da Orla Ocidental (Portal do SNIRH)

Esta diversidade hidrogeológica é responsável pela existência de vários tipos de funcionamento hidráulico, pela multiplicidade de conexões hidráulicas com outros subsistemas, pela variabilidade das produtividades e pela variedade dos sentidos de fluxo (INAG, 2001b).

## **2.2 Águas Subterrâneas na bacia hidrográfica do Rio Lis**

A Bacia do Rio Lis, integrada na Orla Ocidental, é caracterizada pela existência de alguns sistemas aquíferos relacionados com formações calcárias e detríticas, que estão organizados e distribuídos de acordo com a sequência dos sedimentos e da tectónica local.

Esta sequência individualiza verticalmente formações com comportamento hidrológico diverso traduzindo-se na existência de aquíferos aquíferos e aquíferos.

Neste sistema de aquíferos multicamada ocorrem drenâncias entre eles consoante o potencial hidráulico local, vulgarmente fluxos descendentes nas zonas de recarga e ascendentes nas de descarga.

No que respeita à circulação das águas subterrâneas identificam-se dois tipos de sistemas aquíferos: os cársicos e os porosos. Os primeiros, suportados por calcários e dolomitos, têm origem nas grandes variações de caudal das nascentes por onde descarregam e pela amplitude da variação dos níveis da água entre a época das chuvas e a estação seca. A infiltração e o escoamento rápido pelas estruturas cársicas tornam estes aquíferos particularmente vulneráveis à poluição, com muito baixo poder autodepurador e com propagação rápida das contaminações.

Por outro lado, os sistemas aquíferos porosos assentam em formações detríticas mesozoicas e algumas terciárias e são de tipo multicamada, sendo caracterizados por terrenos mesozoicos, os Arenitos do Carrascal (Cretácico inferior) sobressaem pela sua importância aquífera. Já os terrenos representativos de outro grande episódio de espessa sedimentação detrítica na Bacia Lusitaniana, ocorrido no Jurássico superior, têm um comportamento global de aquífero pobre a muito pobre. Com efeito trata-se de uma alternância de arenitos argilosos e de argilas. Nas unidades quaternárias, caso das dunas e, parcialmente, nas aluviões e terraços, encontram-se muitas das vezes situações freáticas, eventualmente com passagens laterais a condições de confinamento ou semiconfinamento (Figura 3).

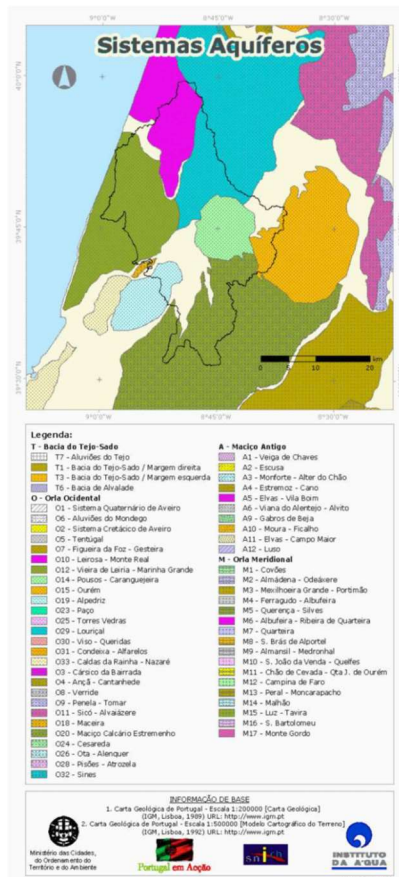


Figura 3- Sistemas Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Rio Lis (Portal SNIRH)

A bacia do Lis é constituída quase exclusivamente por terrenos sedimentares de idade mesozoica e cenozoica. Como exceção, apenas há a referir a presença de filões e pequenas massas de rochas eruptivas (como onde está situado o castelo de Leiria).

## 3. Quantificação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas

### 3.1 Vulnerabilidade e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas

Vulnerabilidade é a maior ou menor capacidade de atenuação das camadas superiores do aquífero à passagem de poluentes. Este termo “vulnerabilidade de aquíferos” surgiu pela primeira vez no início da década de 1960, introduzido pelo hidrogeólogo francês J. Margat (VRBA & ZAPOROZEC,1994). Entretanto, foi a partir da década de 1970, com a criação da legislação americana para proteção de recursos hídricos subterrâneos, que começa a ser difundido o conceito de vulnerabilidade dos aquíferos.

As primeiras avaliações sobre vulnerabilidade dos aquíferos são atribuídas a LeGRAND e à metodologia elaborada pela agência ambiental americana (USEPA) em 1983. Sendo na década de 1980 que o conceito de vulnerabilidade começa a ser utilizado por vários autores, tais como ALLER *et al.*, (1997), FOSTER *et al.*, (2006), e, nos anos 90, por autores como CIVITA *et al.*, (1990).

Segundo VRBA & ZAPOROTEC (1994) vulnerabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do aquífero, que depende da sensibilidade para a alteração da qualidade das águas subterrâneas causada pelo impacto das atividades humanas e ou naturais. Para ROBINS *et al.* (2007), a avaliação da vulnerabilidade é feita com base no tempo de percurso da superfície do solo ao nível do lençol de água, sendo que, quanto maior o tempo de percurso, maior o potencial de atenuação do poluente. Dentro deste conceito pode distinguir-se (GÓMEZ, 1998), dois conceitos de vulnerabilidade:

- Vulnerabilidade intrínseca: que considera as propriedades geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas dos aquíferos, independentemente do tipo de poluente
- Vulnerabilidade específica ou integrada: que adiciona à vulnerabilidade intrínseca o risco de contaminação ou propriedades do poluente devido à presença do poluente (Ribeiro, 2005), como alguns fatores de caráter externo (ocupação de solo e tipo de carga contaminante).

O uso de ambas as vulnerabilidades na caracterização do aquífero à suscetibilidade à contaminação tem as suas vantagens e desvantagens (MENDES *et al.*, 2008).

Para PARALTA & FRANCÉS (2000), “*as medidas de proteção das águas subterrâneas devem considerar a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos em função das suas características hidrogeológicas e dos riscos de contaminação efetivos ou potenciais associados às condições climáticas e às atividades humanas*”.

Já LOBO FERREIRA & CABRAL (1991) sugeriram que o conceito de vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas fosse definido em Portugal, de acordo com as conclusões da conferência internacional sobre "*Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*", realizada em 1987 (DUIJVENBOODEN & WAEGENINGH, 1987), como sendo a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função das características intrínsecas do aquífero.

Assim sendo, a vulnerabilidade é distinta de risco de poluição. O risco de poluição depende da vulnerabilidade e da existência de cargas poluentes consideráveis que consigam atingir as águas subterrâneas. Contudo, um aquífero pode apresentar um elevado índice de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição, caso não exista carga poluente significativa, ou apresentar um risco de poluição excepcional, apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo. Deste modo pode-se diferenciar os termos de vulnerabilidade e risco de poluição, uma vez que o risco é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, mas também pela existência de atividades poluentes.

É importante também reconhecer que a vulnerabilidade de um aquífero depende ainda do tipo de poluente potencial. Por exemplo, a qualidade da água subterrânea pode ser muito vulnerável a uma carga de nitratos, originada por práticas agrícolas incorretas e, no entanto, ser pouco vulnerável a cargas patogénicas (LOBO FERREIRA *et al.*, 2002).

Para a ENVIRONMENT AGENCY (2004), os principais fatores que determinam a vulnerabilidade de um aquífero são:

- Tipo e natureza do solo, incluindo estrutura, potencial de lixiviação e vulnerabilidade do solo, com base nas propriedades físicas que afetam o fluxo vertical de água e a capacidade de depuração do solo;
- Presença e natureza de corrente de água, incluindo tipo e espessura;
- Profundidade do nível freático dado que a zona não saturada pode atenuar a contaminação por processos físicos, biológicos e químicos;

- Mecanismo de fluxo da água subterrânea (intergranular ou fissuras), vulnerabilidade da água subterrânea e tipo de aquífero;
- Extração de água;
- Zonas de proteção de águas subterrâneas;
- Proximidade de cursos de água, nascentes ou drenagens.

A controvérsia à volta da definição do termo “vulnerabilidade”, levou ao aparecimento de várias metodologias de análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, estando a seleção do método, dependente das necessidades e da disponibilidade dos dados, para o caso em estudo. Os índices devem ser de aplicação simples, dadas as limitações de dados normalmente existentes, embora devam ser consistentes e válidos para a classificação da vulnerabilidade que se pretende fazer numa área em estudo.

### **3.2 Principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas**

Existem diferentes métodos para a elaboração da cartografia de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, assim na análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas pode optar-se por escolher mais que um método de análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, ou analisar casos já estudados anteriormente através de uma metodologia. Assim, em vez de uma análise tem-se várias, podendo optar-se por uma delas, ou então, comparar os resultados das metodologias e verificar qual a melhor avaliação, e consequentemente qual o melhor método a avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, numa determinada zona ou aquífero.

Este tipo de avaliação é fundamental para auxiliar a gestão ambiental de territórios perante as mais diversas atividades desenvolvidas pelo homem na natureza (BÓS, 2007). A confiança nos mapas temáticos, que se podem elaborar na análise dos vários métodos, estará assegurada, desde que fiquem claras, ao utilizador, as limitações associadas ao método utilizado (FOSTER *et al.*, 1998) e, como já referido, a seleção do método baseia-se nos objetivos do estudo e na disponibilidade de dados. O Anexo 1 resume alguns dos principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos e águas subterrâneas.

Em Portugal as metodologias mais utilizadas para a caracterização da vulnerabilidade e risco de aquíferos à contaminação têm sido o método DRASTIC, DRASTIC Pesticida e o IS,

mesmo em aquíferos que não têm comportamento de aquíferos porosos, devido à sua facilidade de aplicação.

### 3.3 Método Drastic

O método de mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à poluição DRASTIC foi desenvolvido pelo *National Water Well Association* (cf. Aller *et al.*, 1987) em colaboração com a *Environmental Protection Agency* (EPA), a partir dos seguintes pressupostos:

- 1) o contaminante é introduzido à superfície do terreno,
- 2) o contaminante é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração,
- 3) o contaminante tem a mobilidade da água,
- 4) a área mínima avaliada pelo DRASTIC é de 0,4 km<sup>2</sup> (100 acres).

O índice DRASTIC corresponde ao somatório ponderado de 7 valores correspondentes aos seguintes 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos (cf. Aller *et al.*, 1987):

**D** - Profundidade do Topo do Aquífero,

**R** - Recarga do Aquífero,

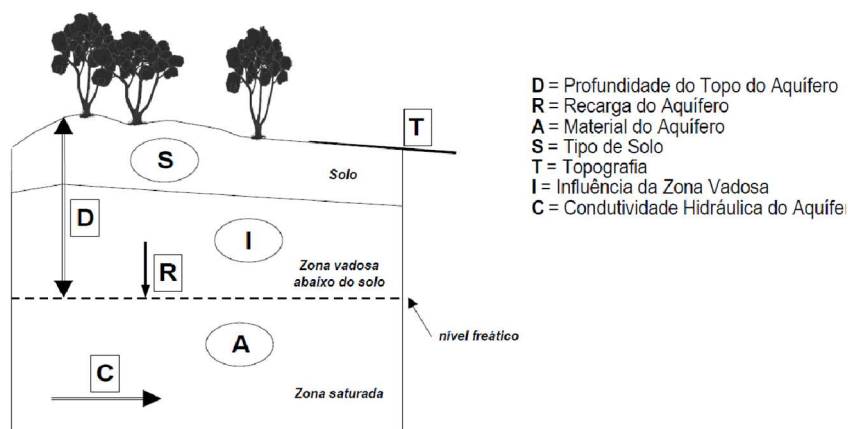
**A** - Material do Aquífero,

**S** - Tipo de Solo,

**T** - Topografia,

**I** - Influência da Zona Vadosa,

**C** - Condutividade Hidráulica do Aquífero.



Adaptado de Oliveira (2002)

Figura 4- Parâmetros incorporados no método DRASTIC

A vulnerabilidade surge assim como um conceito que permite integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e da sua especificidade (Figura 4). Cada um dos sete parâmetros DRASTIC foi dividido quer em escalas quer em tipos de meio significativos que condicionam o potencial de poluição. A cada uma das divisões atribuiu-se um índice que varia entre 1 e 10 e cujo valor se relaciona diretamente com o potencial de poluição.

O índice de vulnerabilidade DRASTIC obtém-se através da seguinte expressão:

$$\text{DRASTIC} = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i$$

onde *i* é o índice atribuído ao elemento em causa e *p* é o seu peso. O peso de cada parâmetro reflete a sua importância relativa (tabela 5). O peso varia de 1 a 5 da seguinte forma:

$$\text{DRASTIC} = 5D + 4R + 3A + 2S + 1T + 5I + 3C \quad \text{Equação 1}$$

Tabela 5 - Peso de cada parâmetro no Índice Drastic

Parâmetro	D	R	A	S	T	I	C
Normal	5	4	3	2	1	5	3

O valor mínimo possível do índice DRASTIC é 23 e o máximo é 226. Segundo ALLER et al. (1987) valores dessa ordem de grandeza são raros situando-se geralmente entre 50 e 200. A tabela 6 mostra a gama de valores calculados pelo índice DRASTIC e a correspondente classe de vulnerabilidade.

Tabela 6- Classes de vulnerabilidade do Índice DRASTIC

ÍNDICE DRASTIC	VULNERABILIDADE
>199	Muito alta
160 a 199	Alta
120 a 159	Intermédia
90 a 119	Baixa
<89	Muito Baixa

### 3.3.1 Parâmetro D - Profundidade do Topo do Aquífero

A profundidade do topo do aquífero condiciona a espessura de material que um poluente tem que atravessar para atingir o aquífero. Num aquífero livre, a profundidade é a distância ao nível freático. No caso de aquífero confinado, a profundidade é a distância ao topo do

aquífero. No caso de aquífero semi-confinado deve-se optar entre a distância ao nível freático ou ao topo do aquífero.

Aller *et al.* (1977) consideram os seguintes intervalos de profundidade do topo do aquífero e respetivos índices (Tabela 7):

Tabela 7 - Reclassificação da profundidade ao topo do aquífero (D)

<b>- Profundidade do Topo do Aquífero (m)</b> <b>(Peso - normal: 5)</b>	<b>Índice</b>
< 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

### 3.3.2 Parâmetro R - Recarga do Aquífero

A recarga do aquífero condiciona o transporte de um poluente na zona não saturada e a disponibilidade de água para processos de dispersão e diluição tanto na zona vadosa como na zona saturada. De uma maneira geral, quanto maior a recarga, maior será o potencial de poluição de águas subterrâneas. No entanto, um grande volume de recarga favorece a diminuição do potencial de poluição pois possibilita a diluição das substâncias poluentes.

Aller *et al.* (1977) consideram os seguintes intervalos de recarga e respetivos índices (Tabela 8):

Tabela 8 - Reclassificação da recarga do aquífero (R)

<b>R - Recarga do Aquífero (mm/ano)</b> <b>(Peso - normal: 4)</b>	<b>Índice</b>
< 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

### 3.3.3 Parâmetro A - Material do Aquífero

O parâmetro A, Material do Aquífero, refere-se à capacidade do aquífero para atenuar os efeitos dos poluentes. Para além deste efeito principal, o material do aquífero condiciona o

fluxo de água subterrânea que, a par da condutividade hidráulica e do gradiente hidráulico, determinam o tempo disponível para a ocorrência dos processos de atenuação. Aller *et al.* (1987) consideraram os seguintes materiais de aquífero com importância para atenuação do potencial de poluição (Tabela 9):

Tabela 9 - Reclassificação do material do aquífero (A)

<b>A - Material do Aquífero (Peso - normal: 3</b>	<b>Índice</b>
Xisto argiloso, argilito	1-3 (2)
Rocha metamórfica/ígnea	2-5 (3)
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3-5 (4)
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)

Cada material tem um intervalo de valores, apresentando-se entre parêntesis o índice típico a atribuir. A escolha do índice a atribuir deve basear-se em informação específica sobre o material do aquífero. Se esta informação não existir, deve-se utilizar o índice típico.

#### 3.3.4 Parâmetro S - Tipo de Solo

O parâmetro S - Tipo de Solo, refere-se ao material da zona alterada da superfície terrestre, com uma espessura normalmente inferior a 2 m. O tipo de solo tem um significativo impacto na quantidade de recarga, mas é sobretudo pelo seu potencial atenuador da poluição que é considerado no índice DRASTIC.

São as seguintes propriedades de um solo que condicionam o potencial de poluição:

- ✓ Espessura do solo;
- ✓ Textura do solo;
- ✓ Expansibilidade/contratibilidade do solo;
- ✓ Teor em matéria orgânica do solo.

Baseados nestas características, Aller *et al.* (1987) definiram 11 tipos diferentes de solos aos quais atribuíram índices entre 1 e 10 (Tabela 10):

Tabela 10 - Reclassificação do tipo de solo (S)

<b>S - Tipo de solo (Peso - normal: 2)</b>	<b>Índice</b>
Fino ou ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
"Muck"	2
Argila não agregada e não expansível	1

### 3.3.5 Parâmetro T - Topografia

A topografia refere-se ao declive do terreno. Este parâmetro condiciona a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante o tempo suficiente para se infiltrar. Influencia ainda o desenvolvimento de solos condicionando, desta forma, o efeito de atenuação do contaminante.

Aller *et al.* (1987) definiram as seguintes cinco classes de declives em % (Tabela 11):

Tabela 11 - Reclassificação do declive do terreno (T)

<b>T - Topografia (declive em %) (Peso - normal: 1)</b>	<b>Índice</b>
< 2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

### 3.3.6 Parâmetro I - Influência da Zona Vadosa

O tipo de material da zona vadosa condiciona o tempo de contacto com o poluente, permitindo a ocorrência de diversos processos: biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reação química, volatilização e dispersão. A fraturação nesta zona é particularmente importante pois facilita a percolação vertical do poluente até ao aquífero.

Aller *et al.* (1987) consideraram os seguintes materiais da zona vadosa com importância para a atenuação do potencial de poluição (Tabela 12):

Tabela 12 - Reclassificação da influência da zona vadosa (I)

<b>I - Influência da Zona Vadosa (Peso - normal: 5)</b>	<b>Índice</b>
Camada confinante	1
Argila/Silte	2-6 (3)
Xisto argiloso, argilito	2-5 (3)
Calcário	2-7 (6)
Arenito	4-8 (6)
Arenito, calcário e argilito estratificados	4-8 (6)
Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila	4-8 (6)
Rocha metamórfica/Ígnea	2-8 (4)
Areia e balastro	6-9 (8)
Basalto	2-10 (9)
Calcário carsificado	8-10 (10)

Cada material tem um intervalo de valores, apresentando-se entre parêntesis o índice típico a atribuir. A escolha do índice a atribuir deve basear-se em informação específica sobre o material da zona vadosa. Se esta informação não existir, deve-se utilizar o índice típico.

### 3.3.7 Parâmetro C - Condutividade Hidráulica do Aquífero

Este parâmetro refere-se à capacidade do aquífero para transmitir água, que, conjuntamente com o gradiente hidráulico, controla o fluxo de água subterrânea. A condutividade hidráulica depende da quantidade e conectividade dos espaços vazios dentro do aquífero, que podem ser poros, fraturas, cavidades ou planos de estratificação.

Aller *et al.* (1987) consideraram os seguintes seis intervalos de condutividade hidráulica com importância para a atenuação do potencial de poluição (Tabela 13):

Tabela 13 - Reclassificação da condutividade hidráulica do aquífero (C)

C - Condutividade Hidráulica do Aquífero (m/d) (Peso - normal: 3)	Índice
< 4,1	1
4,1 - 12,2	2
12,2 - 28,5	4
28,5 - 40,7	6
40,7 - 81,5	8
> 81,5	10

### 3.4 Método Drastic Pesticida

O método de mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos à poluição DRASTIC PESTICIDA foi desenvolvido, tal como o índice DRASTIC, pela National Water Well Association (Aller et al., 1987), com o objetivo de avaliação do risco de contaminação por pesticidas nas zonas agrícolas dos aquíferos e das águas subterrâneas.

O método DRASTIC PESTICIDA corresponde à soma ponderada dos mesmos 7 parâmetros do método DRASTIC anteriormente apresentados, mas cuja principal diferença entre estes dois métodos corresponde ao peso atribuído a cada parâmetro na obtenção do índice final. Neste método é dada maior importância aos parâmetros S (Tipo de Solo) e T (Declive do terreno). As classes de classificação para cada um dos parâmetros do método DRASTIC PESTICIDA, variam tal como no método DRASTIC entre 1 a 10 dependendo do seu potencial de vulnerabilidade (Tabela 14).

$$DRASTIC\ Pesticida = 5 D + 4 R + 3 A + 5 S + 3 T + 4 I + 2 C \quad \text{Equação 2}$$

Tabela 14 - Peso de cada parâmetro no Índice Drastic Pesticida

Parâmetro	D	R	A	S	T	I	C
Normal	5	4	3	5	3	4	2

O índice DRASTIC Pesticida varia entre os valores 26 e 256, correspondendo os valores mais altos a uma maior vulnerabilidade. (Tabela 15)

Tabela 15 - Classes de vulnerabilidade do Índice Drastic Pesticida

ÍNDICE DRASTIC	VULNERABILIDADE
>199	Muito alta
160 a 199	Alta
120 a 159	Intermédia
90 a 119	Baixa
<89	Muito Baixa

### 3.5 Método IS

O Índice de Suscetibilidade foi construído através de uma modificação do método DRASTIC. Neste método três parâmetros do índice DRASTIC foram deliberadamente deixados de parte, atribuindo um menor peso à influência direta das práticas agrícolas. É calculado com a soma ponderada de alguns parâmetros (D - Profundidade do nível freático, R - Taxa anual de recarga, A - Natureza litológica do aquífero e T –Topografia), acrescentando o parâmetro tipo de ocupação de solo (LU, da palavra inglesa "land use").

Ambos os métodos foram desenvolvidos para avaliar, de uma forma rápida, a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação numa determinada área, através da soma ponderada de vários parâmetros, de acordo com o seu enquadramento hidrogeológico.

O índice de suscetibilidade foi desenvolvido com a finalidade de avaliar a vulnerabilidade específica, aquela que é definida pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso.

O novo método simplifica o sistema hidrogeológico em termos do número de variáveis importantes para a determinação da vulnerabilidade, e introduz um parâmetro relacionado com a ocupação do solo, que pretende dar uma ideia do impacte ambiental desse uso do solo para a contaminação das águas subterrâneas, abandonando assim o carácter intrínseco (Stigter et al., 2002).

Os pesos atribuídos a cada parâmetro foram modificados em relação ao método DRASTIC (Tabela 6), depois da consulta de técnicos e especialistas em Hidrogeologia.

$$IS = 0,186 \times D + 0,212 \times R + 0,259 \times A + 0,121 \times T + 0,222 \times LU$$

Equação 3

Para facilitar a leitura do resultado, os valores que no DRASTIC variavam entre 1 e 10, são multiplicados por 10 (Francés et al., 2001 in Stigter et al., 2002). O quinto parâmetro que foi acrescentado, é relativo ao uso do solo e envolve as atividades exercidas no terreno, que constituem as potenciais fontes de contaminação dos aquíferos. Este é dividido em classes e os valores atribuídos variam de 0 a 100, em que o valor 100 indica as atividades mais poluentes (Stigter et al., 2002; Ribeiro, 2005).

Este índice consiste na adaptação do índice de vulnerabilidade DRASTIC, com o acréscimo de um parâmetro de ocupação do solo (LU), abandonando assim o conceito de um índice estritamente intrínseco, baseado unicamente nas condições naturais. Este índice tem o objetivo de avaliar a vulnerabilidade específica, definida pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso e é calculado pela soma ponderada de cinco parâmetros acima descritos (Stigter et al., 2002; Ribeiro, 2005).

Assim, o índice de suscetibilidade (IS) varia entre 0 e 100 (Tabela 16).

Tabela 16 - Intervalos das classes do Índice Suscetibilidade (IS)

IS	Vulnerabilidade
> 90	Muito elevada
70 – 90	Elevada
50 – 69	Intermédia
40 – 49	Baixa
0 – 39	Muito baixa

### 3.5.1 Parâmetro D - Profundidade do Topo do Aquífero

Ribeiro (2005) considera os seguintes intervalos de profundidade do topo do aquífero e respetivos índices (Tabela 17):

Tabela 17 - Reclassificação da profundidade ao topo do aquífero (D)

– Profundidade do Topo do Aquífero (m)	Índice
< 1,5	100
1,5 - 4,6	90
4,6 - 9,1	70
9,1 - 15,2	50
15,2 - 22,9	30
22,9 - 30,5	20
> 30,5	10

### 3.5.2 Parâmetro R - Recarga do Aquífero

Ribeiro (2005) consideram os seguintes intervalos de recarga e respectivos índices (Tabela 18):

Tabela 18 - Reclassificação da recarga do aquífero (R)

<b>R - Recarga do Aquífero (mm/ano)</b>	<b>Índice</b>
< 51	10
51 – 102	30
102 – 178	60
178 – 254	80
> 254	90

### 3.5.3 Parâmetro A - Material do Aquífero

Ribeiro. (2005) considerou os seguintes materiais de aquífero com importância para atenuação do potencial de poluição e os respectivos índices (Tabela 19):

Tabela 19 - Reclassificação do material do aquífero (A)

<b>A - Material do Aquífero</b>	<b>Índice</b>
Xisto argiloso, argilito	10-30 (20)
Rocha metamórfica/ígnea	20-50 (30)
Rocha metamórfica/ígnea alterada	30-50 (40)
Arenito, calcário e argilito estratificados	50-90 (60)
Arenito maciço	40-90 (60)
Calcário maciço	40-90 (60)
Areia e balastro	40-90 (80)
Basalto	20-100 (90)
Calcário carsificado	90-100 (100)

### 3.5.4 Parâmetro T - Topografia

Ribeiro (2005) definiram as seguintes cinco classes de declives do terreno (Tabela 20):

Tabela 20 - Reclassificação do declive do terreno (T)

<b>T - Topografia (declive em %)</b>	<b>Índice</b>
< 2	100
2-6	90
6-12	50
12-18	30
> 18	10

### 3.5.5 Parâmetro LU – Uso e ocupação do solo

O parâmetro uso e ocupação do solo é dividido por classes, Ribeiro (2005) propôs os valores constantes que são apresentados na tabela 21, tendo por base a classificação da carta CORINE Land Cover (CNIG, 1988).

A maioria da bacia apresenta uma classificação do parâmetro LU, ocupação solo, média alta 50-70.

Tabela 21- Classificação do parâmetro LU: Ocupação do solo com base na COS2018 com base na carta CORINE (CNIG, 1988)

<b>Classe – Ocupação do solo</b>	<b>Valor LU</b>
Descargas industriais, zonas de empalhamento de lixos	100
Perímetros regados, arrozais	90
Pedreiras, zonas de extração de areia, minas a céu aberto, estaleiros	80
Aeroportos, zonas portuárias, infraestruturas da rede de autoestradas e da rede ferroviária	75
Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	75
Espaços verdes e urbanos	75
Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempos livres	75
Tecido urbano contínuo	75
Tecido urbano descontínuo	70
Culturas permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, etc.)	70
Culturas anuais associadas às culturas permanentes	50
Pastagens	50
Florestas e meios seminaturais, superfícies com água	0
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	50
Sistemas culturais e parcelares complexos	50
Territórios agroflorestais	50
Meios aquáticos (sapais, salinas, etc.)	50

## 4 Metodologia

Apresenta-se neste capítulo a metodologia desenvolvida para a avaliação da vulnerabilidade e do risco à contaminação das águas subterrâneas através de três metodologias, DRASTIC, DRASTIC Pesticidas e IS, que foram nos capítulos anteriores explicados, em que o mapeamento dos parâmetros é realizado recorrendo ao software Arcgis em formato *raster*. As superfícies correspondentes a cada um dos parâmetros são discretizadas numa matriz com resolução espacial do pixel predefinida e reclassificadas para obter as superfícies de índices.

Foi realizada uma análise dos níveis piezométricos de algumas captações e comparados os mapas de ocupação do solo disponíveis pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

Para a realização dos mapas de profundidade do topo do aquífero (D) e recarga (R), são efetuadas as seguintes etapas:

- Criação de uma base de dados com a informação das captações subterrâneas de água na área de estudo, obtidos no Sistema Nacional dos Recursos Hídricos (SNIRH), com as respetivas coordenadas geográficas de cada captação, dos dados do nível piezométrico em cada captação e as cotas das captações subterrâneas (Anexo 2);
- Importação dos dados para a base de dados geodatabase (GDB) em ambiente SIG, para organização dos dados georreferenciados;
- Conversão dos dados das captações subterrâneas no sistema de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06;
- Cálculo da profundidade ao topo do aquífero com a subtração da cota da captação subterrânea pelo nível piezométrico da captação na tabela efetuada em ambiente SIG (Anexo 2);
- Após a obtenção destes dados para cada captação subterrânea pôde-se então iniciar a interpolação dos dados da profundidade ao topo do aquíferos utilizando uma função de interpolação Inverse Distance Weight (IDW);
- Após o processamento da interpolação (IDW) da profundidade ao topo do aquífero é gerada a imagem matricial dos dados obtidos. Estes dados são reclassificados de acordo com os limites estabelecidos por Aller *et al.* (1987) para cada uma das classes dos Índices Drastic, Drastic Pesticida e de Suscetibilidade.

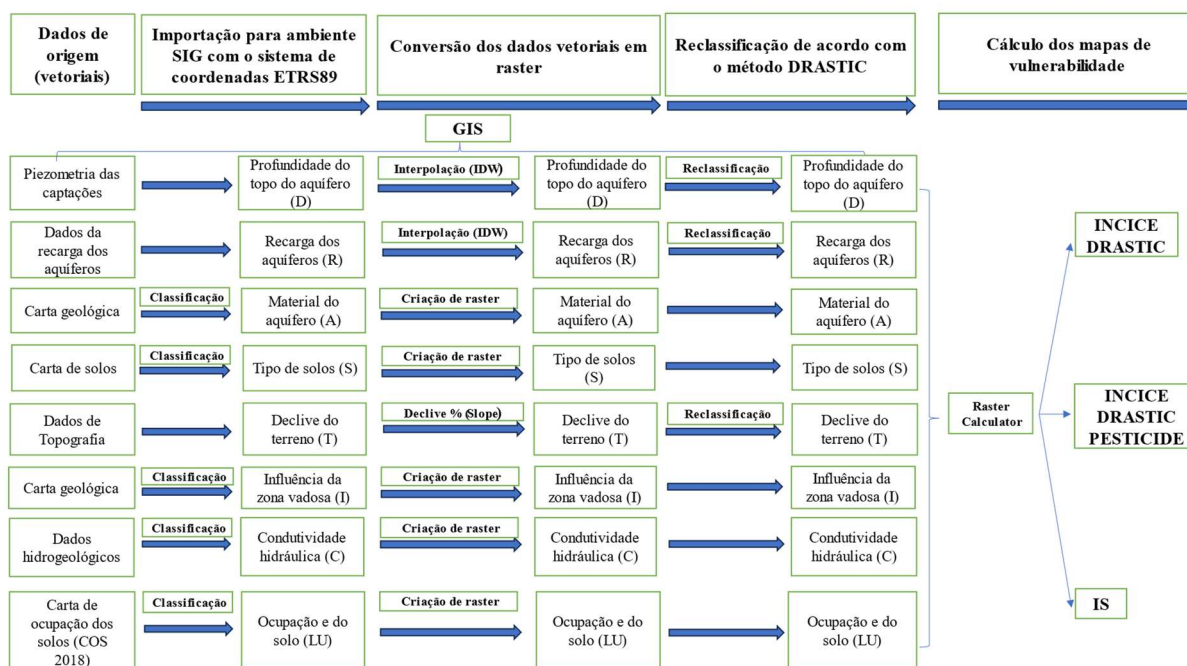
Para a execução dos mapas do material do aquífero (A), solo (S), influência da camada não saturada (I), condutividade hidráulica (C) e cobertura e uso do solo (LU), são realizadas algumas etapas, tais como:

- Transformação dos mapas de vetor para raster;
- Reclassificação dos dados de acordo com os índices do DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS.

Para a execução dos mapas do declive do terreno (T), foi importado para o Arcmap o modelo digital do terreno com um espaçamento de 30m (MDT\_30m) de Portugal Continental. Através deste mapa foi possível criar um MDT para a bacia hidrográfica do rio Lis.

Na tabela 22 apresenta-se um workflow que ilustra as várias etapas da metodologia desenvolvida.

Tabela 22 - Workflow do cálculo dos parâmetros dos índices



Depois de serem criados todos os mapas temáticos necessários à geração do índice DRASTIC, DRASTIC Pesticida e do IS, a etapa seguinte consiste em realizar a sobreposição dos vários temas (overlays) e efetuar a operação algébrica de soma dos mapas.

$$DRASTIC = 5D + 4R + 3A + 2S + 1T + 5I + 3C \quad \text{Equação 4}$$

$$DRASTIC\ Pesticida = 5D + 4R + 3A + 5S + 3T + 4I + 2C \quad \text{Equação 5}$$

$$IS = 0,186 \times D + 0,212 \times R + 0,259 \times A + 0,121 \times T + 0,222 \times LU \quad \text{Equação 6}$$

Para gerar os mapas de vulnerabilidade e risco foi utilizado o software de SIG ArcGIS que possui ferramentas de Álgebra Matemática (processador Raster Calculator) que permitem criar a expressão algébrica para cada índice.

Após a obtenção dos mapas finais de vulnerabilidade para os métodos dos índices DRASTIC, DRASTIC Pesticida e do IS, o último passo será comparar os resultados obtidos nos vários métodos. Para isso, é necessário normalizar os resultados obtidos nos mapas de vulnerabilidade do DRASTIC e DRASTIC Pesticida, pois os mesmos não estão classificados com valores de 0 a 100, e assim, pudermos comparar estes índices com o índice IS cujos valores estão classificados de 0 a 100.

Para esta normalização será calculado o peso relativo de cada parâmetro nos índices DRASTIC e DRASTIC Pesticida e multiplicado valor de cada parâmetro por 10.

$$DRASTIC = 0,217 \times D \times 10 + 0,174 \times R \times 10 + 0,130 \times A \times 10 + 0,087 \times S \times 10 + 0,043 \times T \times 10 + 0,217 \times I \times 10 + 0,130 \times C \times 10$$

*Equação 7*

$$DRASTIC \text{ Pesticide} = 0,192 \times D \times 10 + 0,154 \times R \times 10 + 0,115 \times A \times 10 + 0,192 \times S \times 10 + 0,115 \times T \times 10 + 0,154 \times I \times 10 + 0,077 \times C \times 10$$

*Equação 8*



Tábua, o Vale dos Barreiros, o rio Lena e o rio Seco. Por outro lado, os principais afluentes da margem direita são o rio de Fora, a ribeira dos Milagres, a ribeira da Caranguejeira ou do Sirol e a ribeira do Freixial.

A bacia hidrográfica na sua zona de montante apresenta um percurso no Maciço Calcário Estremenho, que devido aos declives elevados e à sua extrema permeabilidade permite a drenagem das águas através de galerias, originando abundantes exurgências, como são exemplo as nascentes dos rios Lis e Lena.

Na zona intermédia formam-se autênticas planícies aluvionares, a qual representa a maior parte da bacia, desenvolvendo-se sobre arenitos, calcários margosos e margas. A densidade de drenagem é elevada, pois devido a estas formações geológicas há uma maior tendência para o escoamento superficial.

Na zona terminal de jusante a densidade de drenagem é baixa, provocada pelo menor declive longitudinal dos cursos de água, contribuindo desta forma para um menor escoamento superficial.

O regime de escoamento do rio Lis e seus afluentes (Figura 6) é essencialmente torrencial, verificando-se grande variabilidade quantitativa dos caudais anuais

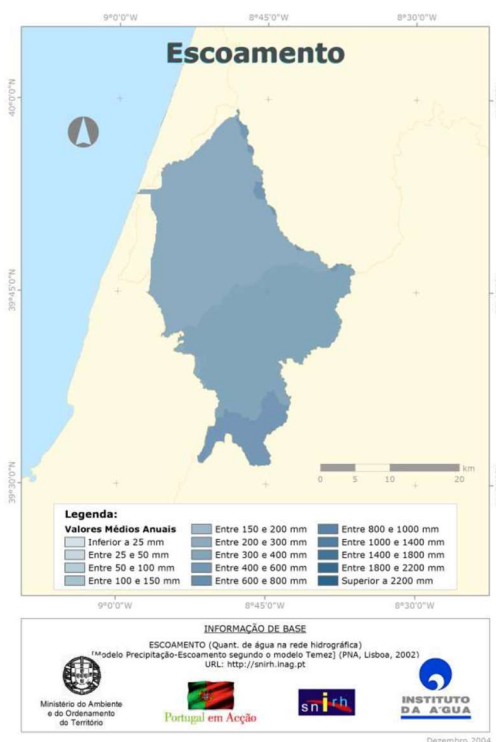


Figura 6- Escoamento da bacia hidrográfica do rio Lis (Adaptado do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Lis, 2001)

## 5.2 Caracterização hidrográfica

A rede hidrográfica da bacia do Lis pode dividir-se em três zonas distintas. A zona localizada mais a jusante, da costa até às proximidades de Monte Redondo-Amor, caracteriza-se por uma fraca densidade de drenagem e pelo fraco declive longitudinal dos cursos de água. Por este motivo o escoamento faz-se com uma certa dificuldade e a drenagem da área é bastante incompleta. Na zona central, que cobre a maior parte da bacia, desenvolve-se sobre arenitos, calcários margosos e margas, a densidade de drenagem é elevada, decorrente da maior dificuldade de infiltração, motivando um fácil escoamento de águas e de eventuais efluentes.

A zona de montante corresponde ao percurso no Maciço Calcário Estremenho que, à custa da sua extrema permeabilidade, possui uma drenagem essencialmente hipogeia através de galerias dando origem no seu rebordo a abundantes exsurgências de que as dos rios Lis e Lena são exemplos. Neste caso, quando existe contaminação das águas verifica-se uma situação análoga à da zona anterior, pois estas não sofrem qualquer filtragem por areias ou outros sedimentos ao atravessarem interiormente os calcários.

Em termos de regime de escoamento, o rio Lis e os seus afluentes comportam-se como cursos de água do tipo torrencial ou, mais precisamente, mediterrânico, em que se regista forte variabilidade dos caudais ao longo do ano hidrológico, com concentrações pluviométricas elevadas nos meses chuvosos e défice nos períodos secos.

Os principais afluentes do rio Lis são, na margem direita, as ribeiras do Sirol (117 km<sup>2</sup>) e dos Milagres (76 km<sup>2</sup>) e o rio de Fora (126 km<sup>2</sup>) e, na margem esquerda, o rio Lena (189 km<sup>2</sup>) e o colector de Amor (61 km<sup>2</sup>) que recebe o caudal afluente das ribeiras de Amor e Escoura. Na Figura 7 apresenta-se a rede hidrográfica completa da bacia, onde estão definidas as bacias hidrográficas dos principais afluentes do rio Lis.

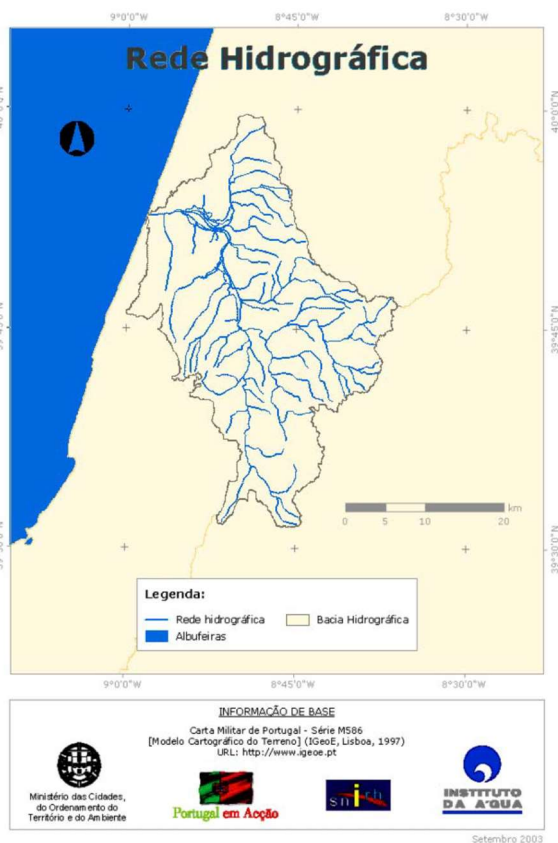


Figura 7- Rede Hidrográfica da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003)

### 5.3 Caracterização topográfica

Do ponto de vista topográfico, a bacia do Lis é pouco acidentada, predominando os terrenos baixos, já que cerca de 2/3 do território apresenta cotas inferiores a 200 m (Campar *et al.*, 1989). Os sectores sul e sudeste, localizados nos planaltos e serras do Maciço Calcário Estremenho, são a única exceção, atingindo cotas superiores a 400 m. A passagem para a área do maciço calcário faz-se através de imponentes escarpas, nalguns casos com mais de 200 m de altura.

O relevo da bacia é constituído por colinas arredondadas ou truncadas por superfícies quase planas que inclinam mais ou menos para Oeste. Neste relevo baixo e pouco vigoroso destaca-se a parte litoral, com uma topografia dunar aparentemente desordenada, onde se encontram dunas das mais altas do Litoral Português (cerca de 50 m), conservadas devido à permeabilidade das areias e ao seu revestimento florestal (sobretudo pinheiros) construído já em tempos históricos por ação humana. De salientar também os vales do Lis e do Lena, abertos no sentido sul-norte, de fundos planos e largos em praticamente todo o seu percurso e que imprimem na paisagem o cunho de verdadeiras planícies aluviais com uma largura da ordem dos 300-500 m. O vale do Lis apenas estreita ligeiramente à passagem nos calcários

associados à estrutura diapírica de Leiria e, para jusante após a confluência do Lena, apresenta um plano aluvial mais amplo, com cerca de 1 km de largura. A análise dos declives (%) representados na Figura 8 mostra que são predominantes as classes mais baixas; cerca de 47% da área da bacia tem declives médios inferiores a 5%, e 90% da área da bacia tem declives inferiores a 15%. Os valores do declive aumentam de oeste para este e de norte para sul à medida que o relevo se eleva. Os declives mais acentuados correspondem às escarpas ligadas a importantes acidentes tectónicos, que limitam o sector setentrional da bacia.

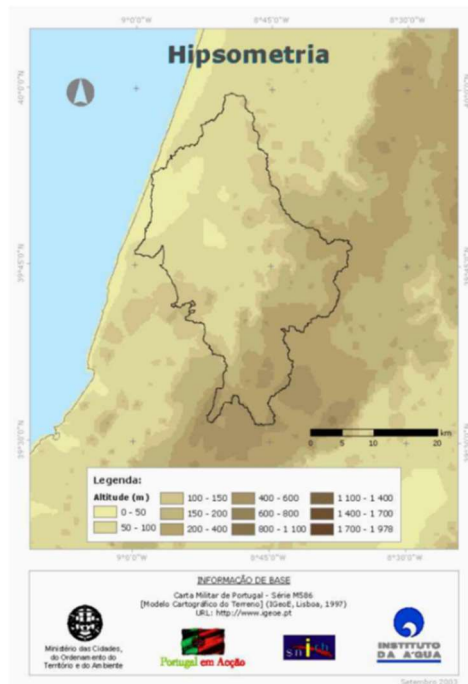


Figura 8- Hipsometria Característica da Zona de Influência da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003)

## 5.4 Caracterização geológica

A bacia hidrográfica do Lis desenvolve-se inteiramente sobre terrenos da denominada Orla Mezocenozóica Ocidental, onde podem ser encontrados materiais pertencentes a todas as idades, desde margas do Retiano-Hetangiano (Triássico superior e Jurássico inferior) até às aluviões modernas, incluindo praticamente todas as séries do Secundário (Jurássicas e Cretácicas) e do Terciário (Figura 9).

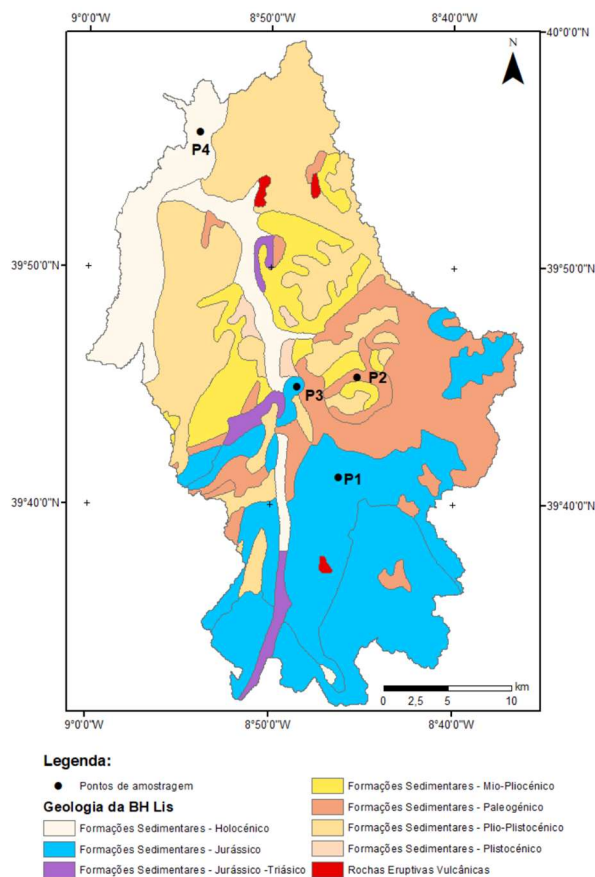


Figura 9- Carta geológica da BH do Lis (adaptado de LNEG, s.d.)

A cabeceira da bacia inicia-se numa importante unidade geomorfológica, o Maciço Calcário Estremenho, onde se dá a recarga que alimenta as principais nascentes que alimentam o rio Lis, desenvolvendo-se, em seguida, essencialmente sobre uma zona bastante aplanada, constituída fundamentalmente por terrenos cenozoicos de cobertura (PBH Lis).

Os diferentes grupos litológicos (Tabela 23) apresentam distintos graus de permeabilidade e, conseqüentemente, diferentes capacidades hidrogeológicas, suscetíveis de condicionar o regime dos cursos de água e de intervir diretamente na difusão de poluentes (domésticos e industriais)

Tabela 23 - Distribuição dos grupos litológicos na área abrangida pela bacia hidrográfica do Lis

Grupos litológicos	% Média
Areias dunares	6,3
Aluviões	5,6
Areias e arenitos terciários	44,8
Arenitos secundários	20,9
Calcários (Malm)	11,4
Calcários (Dogger)	8,1
Calcários Margosos e Margas	0,5
Argilas e Calcários	2,4

## 5.5 Geomorfologia

A bacia hidrográfica do rio Lis é uma bacia costeira que está confinada a Norte pela bacia do rio Mondego, a Este pela bacia do rio Tejo e a Sul pela bacia do rio Alcoa.

Do ponto de vista geomorfológico a bacia do Lis apresenta uma uniformidade em que cerca de 2/3 da sua área encontra-se abaixo da cota 200 m, e apenas nas zonas mais altas e declivosas da bacia localizadas na zona do Maciço Calcário Estremenho, é atingida a cota 562 em Pedra do Altar (Figura 10).

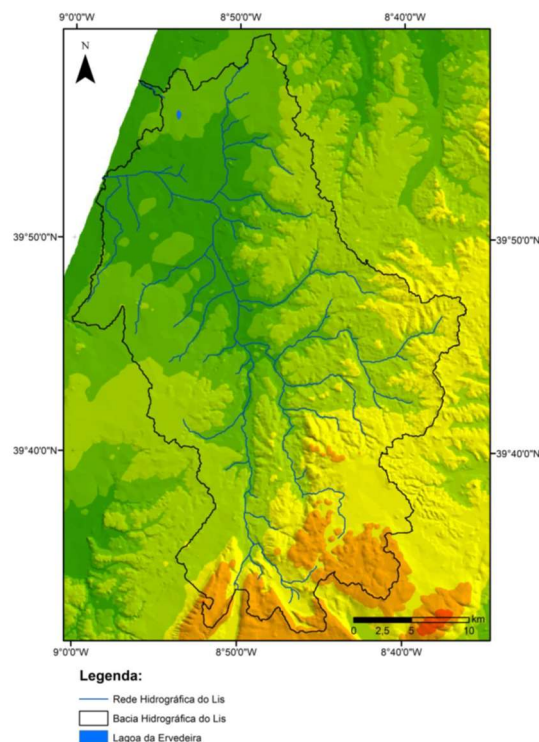


Figura 10 - Morfologia da área da bacia hidrográfica do rio Lis

A bacia hidrográfica do Lis pode subdividir-se nas seguintes principais unidades geomorfológicas (PBH Lis):

Troço superior do rio Lis – sub-bacias do Lis e do Lena. Esta zona desenvolve-se sobre o Maciço Calcário Estremenho, cuja permeabilidade é muito elevada e a drenagem ocorre através de galerias que surgem á superfície no rebordo do Maciço;

Troço inferior do rio Lis – sub-bacia do Lis situada entre a Costa e Leiria. Nesta zona, a sub-bacia pode ainda ser dividida em duas zonas: a jusante, entre a Costa e Monte-Redondo e Amor, onde os declives baixos e as areias e cascalhos com permeabilidades altas,

representam as condições para uma rede hidrográfica com uma densidade de drenagem fraca, onde a drenagem é má e o escoamento se processa com dificuldade. Na zona de montante, entre Leiria e Monte-Redondo desta sub-bacia, sobre arenitos, calcários margosos e margas que possuem uma baixa permeabilidade, existem as condições para um escoamento mais elevado e uma maior densidade de drenagem;

Ribeiras da costa atlântica do concelho de Marinha Grande e ribeiras da costa atlântica do concelho de Leiria.

Os cursos de água principais da bacia hidrográfica são, para além do Lis, os rios Lena, rio de Fora e ribeira do Rio Seco. Os vales dos rios Lis e Lena que se orientam no sentido Sul-Norte são vales planos e largos, próprios de planícies aluvionares. O vale do Lis apenas estreita ao atravessar a estrutura diapírica de Leiria, para logo se alargar a jusante da confluência do Lena, apresentando aí uma vasta planície aluvionar. O litoral é composto por dunas que incluem algumas das mais altas do nosso país, cerca de 50 m.

## **5.6 Caracterização hidrogeológica**

Sob o ponto de vista hidrogeológico a bacia do Lis é caracterizada pela existência de alguns sistemas aquíferos importantes, relacionados com formações calcárias e detríticas. A sedimentologia e a tectónica, em particular a tectónica salífera, permitiram individualizar segundo o eixo vertical formações com comportamento hidrogeológico diverso, com alternâncias, mais ou menos cíclicas, de aquíferos, aquíferos e aquíferos.

Formam-se, assim, sistemas aquíferos multicamada, com escoamentos por drenagem intercadas do sistema, de acordo com o potencial hidráulico local, genericamente descendente nas zonas de recarga e ascendente nas de descarga.

Algumas estruturas evaporíticas deram origem a vales tifónicos onde, por efeito da erosão dos sedimentos evaporíticos, se formaram importantes bacias de sedimentação de material detrítico com grande potencial aquífero. Noutros casos, as estruturas evaporíticas formam sub-domínios aflorantes ou sub-aflorantes (Leiria, Monte Real). Estes terrenos têm produtividade muito baixa e são locais onde a água de circulação adquire forte mineralização, com formas aniónicas cloradas e/ou sulfatadas, que contaminam a água das formações adjacentes. Este tipo de contaminação também é comum nas águas da base dos sedimentos que preenchem os vales tifónicos.

No que respeita à circulação da água subterrânea individualizam-se dois tipos de sistemas aquíferos: os cársicos e os porosos. Os primeiros suportados por calcários e dolomitos, estão limitados por estruturas cársicas formadas devido à dissolução dos carbonatos, durante o escoamento da água do aquífero. A infiltração quando a superfície se encontra carsificada é elevada, da ordem ou mesmo acima de 50 a 60% da precipitação. Também a capacidade de armazenamento e transmissiva dependem da carsificação. Estes aquíferos têm em regra poder de auto-regulação limitado, que bem se evidencia pelas grandes variações de caudal das importantes nascentes por onde descarregam e pela amplitude da variação dos níveis da água entre a época das chuvas e a estação seca.

A infiltração e o escoamento rápido pelas estruturas cársicas tornam estes aquíferos particularmente vulneráveis à poluição, com muito baixo poder autodepurador e com propagação rápida das contaminações.

Os sistemas aquíferos porosos, suportados pelas formações detríticas mesozoicas e algumas terciárias são multicamada. Entre os terrenos mesozoicos, os Arenitos do Carrascal sobressaem pela sua importância aquífera. Já os terrenos representativos do Jurássico Superior têm um comportamento global de aquífero pobre a muito pobre. Com efeito trata-se de uma alternância de arenitos argilosos e de argilas.

Nas unidades quaternárias, caso das dunas e, parcialmente das aluviões e terraços,

encontram-se muitas das vezes situações freáticas, eventualmente com passagens laterais a condições de confinamento ou semi-confinamento.

### **5.6.1 Sistemas Aquíferos na Bacia Hidrográfica do Rio Lis**

No âmbito do Plano de Bacia do Rio Lis individualizaram-se 8 Sistemas Aquíferos, todos eles pertencentes à unidade Orla Mezoceno-zóica, no entanto um destes sistemas é exclusivo da Bacia Hidrográfica do Rio Lis enquanto os outros são partilhados pelas Bacias Hidrográficas do Tejo, Mondego ou Ribeiras do Oeste.

Os vários sistemas aquíferos que ocorrem na bacia hidrográfica do Rio Lis, podem ser agrupados em função da sua produtividade, em:

- Formações muito produtivas
- Formações de produtividade média
- Formações pouco produtivas

No primeiro grupo podemos incluir os calcários do Liásico e Dogger que constituem os sistemas aquíferos de Maceira e Maciço Calcário Estremenho. No entanto, deve-se sublinhar que, embora neste tipo de aquíferos seja possível obter caudais muito elevados, a implantação das captações é extremamente difícil, sendo numerosos os casos de insucesso ou de captações com caudais muito fracos.

No segundo grupo podemos incluir as formações carbonatadas e detríticas do Cretácico, formações detríticas do Miocénico e Plio-Quaternário. Estas formações podem produzir caudais relativamente elevados, embora a maioria das captações forneçam caudais médios (medianas entre 2 e 5 l/s).

Nas formações pouco produtivas incluímos os arenitos do Jurássico superior, as formações do paleogénico e as formações margosas do Liásico, incluindo as margas de Dagorda.

Quando as formações com produtividade média ou alta apresentam uma continuidade e extensão razoáveis é possível considerar unidades aquíferas independentes (sistemas aquíferos).

Nos casos em que os aquíferos têm pequena extensão a sua caracterização faz-se em conjunto. Na abordagem da hidrogeologia da Bacia, tentou-se atualizar e completar, na medida do possível, os sistemas aquíferos que já tinham sido definidos anteriormente.

Nesta análise verificou-se, por um lado a existência de pequenas incorreções no traçado dos limites de alguns sistemas, que resultaram do processo de digitalização, e que foram, entretanto, corrigidas, e, por outro, a necessidade de proceder a algumas modificações de fundo, incluindo a introdução de um novo sistema que não fazia parte dos sistemas referidos no trabalho "Definição, Caracterização e cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental". Este último, O **Sistema Aquífero do Lourçal** (Peixinho de Cristo, 1988), é compartilhado pela Bacia Hidrográfica do Rio Mondego.

Apenas um sistema se desenvolve exclusivamente no âmbito da Bacia do Lis: o Sistema Aquífero de Pousos-Caranguejeira. Os restantes sistemas são compartilhados ou pela Bacia do Mondego (Sistemas Aquíferos de Leirosa-Monte Real e Lourçal) ou pela Bacia das Ribeiras do Oeste (Sistemas Aquíferos de Alpedriz, Maceira e Vieira de Leiria-Marinha Grande).

Outros, ainda, são compartilhados simultaneamente pela Bacia do Lis e duas outras: Mondego e Tejo (Sistema Aquífero de Ourém), Tejo e Ribeiras do Oeste (Sistema Aquífero do Maciço Calcário Estremenho). (Figura 11)

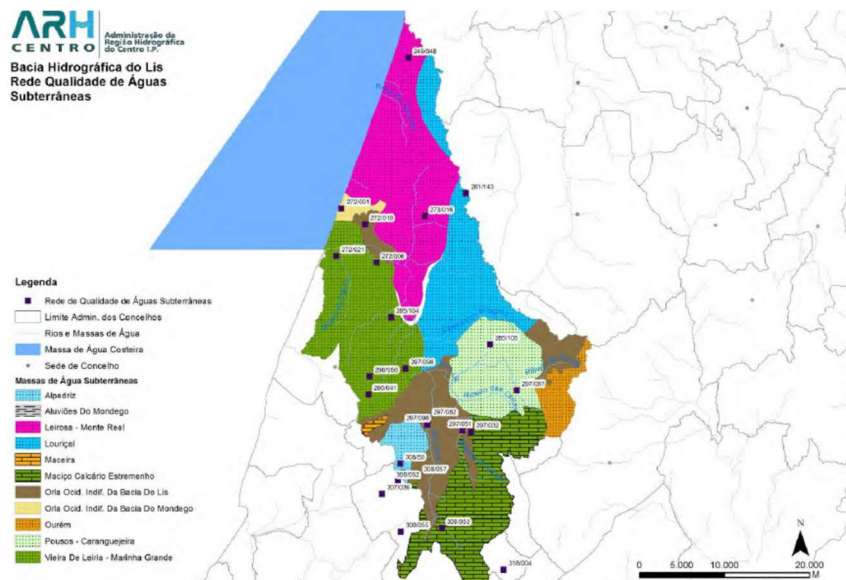


Figura 11- Bacia hidrográfica do rio Lis com as principais sub-bacias

Os dados da recarga anual destes aquíferos é apresentada na tabela 24.

Tabela 24- Recursos Hídricos Subterrâneos (RHS) Renováveis da Bacia Hidrográfica do Rio Lis, adaptado de Almeida et al 2000

Sistemas Aquíferos	Recarga (mm/ano)	RHS Renováveis (hm <sup>3</sup> /ano)
Alpedriz	100	2
Leirosa Monte-Real	350	77
Maceira	230	1,5
Louriçal–Subsistema Plio-Quaternário de Louriçal	220	25
Maciço Calcário Estremenho	450	350
Ourém	30	10
Pousos-Caranguejeira	110	3
Vieira de Leiria-Marinha Grande	300	90
<b>TOTAL</b>		<b>466,5</b>

## 5.7 Caracterização climática

A bacia hidrográfica do rio Lis caracteriza-se, tal como o restante território de Portugal Continental, dentro dos climas mediterrânicos, com duas estações bem diferenciadas do

ponto de vista térmico e pluviométrico. Assim, um Verão quente e praticamente sem precipitação, contrasta com um Inverno com temperaturas suaves, mas fortemente pluvioso.

A precipitação média anual ponderada sobre a bacia é de 956 mm, ocorrendo os maiores valores médios anuais nas zonas montanhosas das cabeceiras da bacia e os menores na zona junto à costa. O regime pluviométrico na bacia é caracterizado por um semestre chuvoso, que corresponde à estação fria, e um semestre seco que corresponde à estação quente. A distribuição sazonal da precipitação é muito acentuada, concentrando-se no semestre húmido (outubro - março) cerca de 75% da precipitação (Plano de Bacia Hidrográfica do rio Lis, 2001).

Procurando caracterizar termicamente o clima, recorrendo ao sistema descrito por Daveau (1985), a bacia do Lis, pode ser dividida em três manchas com comportamento próprio: junto à costa, onde os verões são suaves e os invernos tédidos; no fundo dos vales principais e no Maciço Calcário, onde os verões são moderados e os invernos frios, por efeito da acumulação de ar frio nas depressões e da altitude, e na restante área, onde os verões e os invernos são moderados.

A existência de apenas uma estação meteorológica e de três estações udométricas na área da bacia dificulta a análise da diversidade climática numa área que apresenta alguns contrastes orográficos importantes. É, no entanto, possível apontar alguns elementos tendentes à caracterização climática da bacia, como os ventos, importantes na dispersão de poluentes atmosféricos, e a precipitação, cujos quantitativos e ritmo de distribuição condicionam o regime de escoamento dos principais cursos de água e, conseqüentemente, a difusão de poluentes transportados por esta via. No que se refere aos ventos, os dados da estação localizada na Marinha Grande apontam no sentido do predomínio nítido dos ventos dos quadrantes norte e noroeste, particularmente durante os meses de Verão. A disposição do relevo, nomeadamente a orientação e a abertura dos vales do Lis e Lena, favorece a circulação dos ventos mareiros e a sua penetração em praticamente toda a área da bacia hidrográfica.

Pelo facto de a bacia do Lis ocupar uma posição bastante próxima do Litoral, fica na área geralmente atingida pelos ventos de advecção litoral, de grande importância para a agricultura, principalmente no verão, suprimindo a falta de precipitação, à exceção das áreas meridionais pertencentes ao maciço calcário Estremenho. Os vales do Lis e do Lena podem

inclusivamente servir como áreas de acumulação de ar frio, dando origem a nevoeiros mistos (advecção e radiação), que se relacionam com uma significativa inversão na estrutura térmica da troposfera, sobretudo frequente durante as madrugadas e manhãs em situação de tempo anticiclónico. Esta situação de inversão térmica dificulta a dispersão de eventuais poluentes atmosféricos, impedindo a sua ascensão e concentrando-os nas camadas de ar mais próximas da superfície (Jesus, 1996).

## 5.8 Caracterização dos solos

Na área da bacia hidrográfica do Lis predominam os solos podzolizados, os cambissolos e os luvisolos, nas proporções aproximadas indicadas na tabela 21 e com uma distribuição característica representada na figura 12.

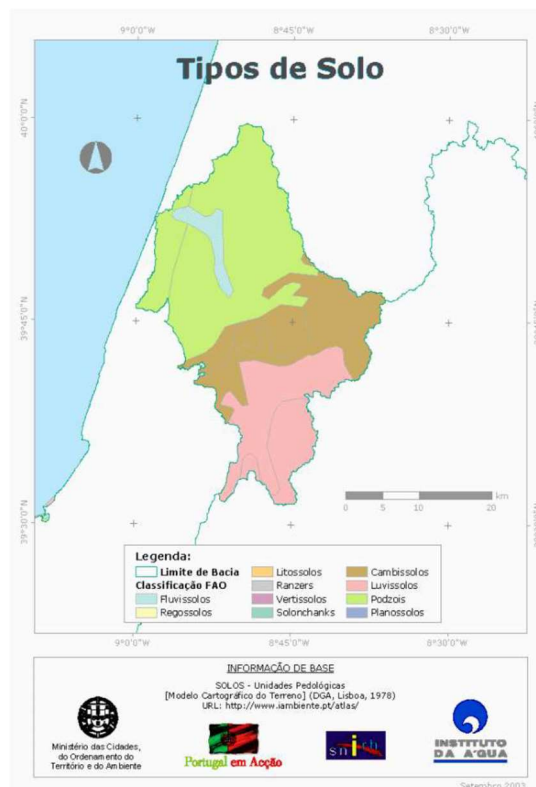


Figura 12- Representação Cartográfica dos Principais Tipos de Solos característicos da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003)

Os aluvissois, solos profundos e férteis, também presentes na área da bacia, encontram-se maioritariamente nos vales aplanados enquanto os afloramentos rochosos em conjunto com os litossolos, são muito característicos nas regiões calcárias, intervalados por luvissois cálcicos (Campar et al., 1989). (Tabela 25)

Tabela 25 - Tipo de Solos Característicos da Bacia Hidrográfica do Lis (Campar et al., 1989)

<b>Tipo de Solos</b>	<b>% Aproximada</b>
Aluissolos	7
Solos podzolizados	40
Cambissolos	28
Luvisolos	20
Afloramentos rochosos + Litossolos	5

## 5.9 Ocupação do solo

De uma forma geral os espaços florestais constituem o tipo de ocupação dominante na bacia hidrográfica do Rio Lis seguida pelas ocupações agrícolas, embora os espaços artificializados tenham vindo a aumentar progressivamente (Figura 12). Na zona Norte da bacia constata-se diferenciações significativas face à zona Sul, em que os espaços florestais apresentam-se como maioritários e os espaços artificializados assumem percentagens de ocupação superiores.

Na generalidade da área as florestas de resinosas apresentam-se como dominantes (pinheiro-bravo e manso), embora na parte Sul a distribuição das folhosas (sobreiro, azinheira, ocupação mista de sobreiro e azinheira, eucalipto) seja significativa.

Na ocupação agrícola destacam-se as áreas das culturas anuais de sequeiro e prados permanentes, que se encontram distribuídas um pouco por toda a bacia, seguidas pelas áreas de regadio que se distribuem ao longo das linhas de água.

A bacia apresenta uma ocupação diferenciada em termos de tipologia de ocupação, enquanto em cerca de 40% da zona Sul predominam os terrenos agrícolas de mosaico policultural, apenas 25% da área Norte é ocupada por este tipo de uso agrícola (PBH Lis).

No que diz respeito à distribuição dos territórios artificializados, maioritariamente constituído pelos espaços urbanos verifica-se que ocorre uma grande concentração em torno das sedes de concelho. (Figura 13)

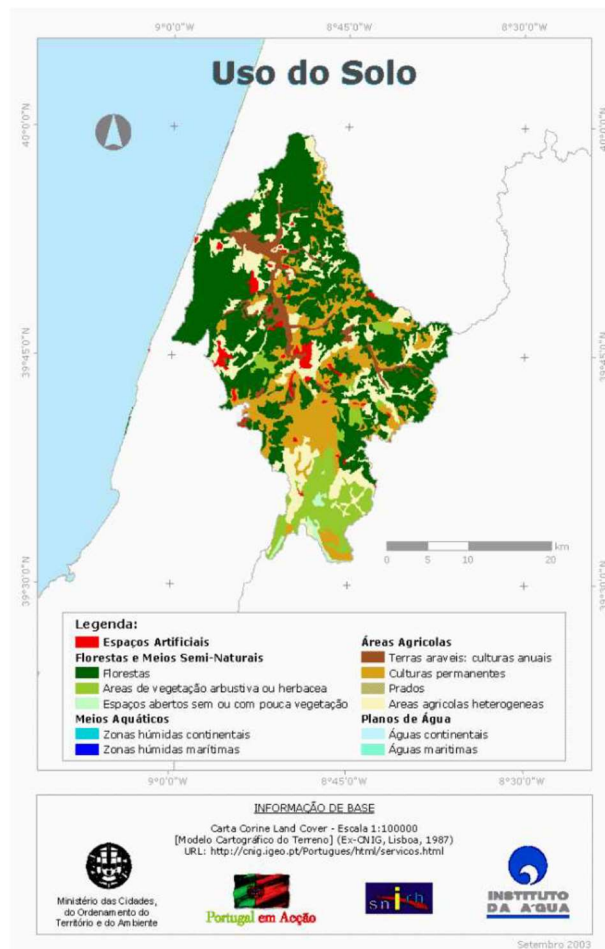


Figura 13 - Representação Cartográfica dos Principais Tipos de Solos característicos da Bacia Hidrográfica do Lis (INAG, 2003)

## 5.10 Origens dos dados utilizados

Os dados necessários para a realização deste trabalho foram retirados do portal SNIRH (Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos) e do portal SINAMB (Sistema Nacional de Informação Ambiental) da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Todos estes dados foram convertidos para o sistema de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06, através do software

Arcgis com o arctoolbox e a função *Projections and Transformations* do *Data Management Tools*. Na tabela 26 está resumida a origem dos metadados utilizados para este estudo.

Tabela 26- Origem dos metadados usados para mapeamento dos parâmetros

<b>Tipo de metadados</b>	<b>Origem</b>
Dados das captações subterrâneas com localização das mesmas, altimetria, dados de piezometria	Plataforma SNIRH
Metadados para Arcgis da delimitação das unidades hidrogeológicas a nível nacional	Portal SINAMB
Dados da recarga dos aquíferos segundo vários autores	Plano da Bacia hidrográfica do Rio Lis
Litologia de Portugal	Atlas Ambiente no Portal SINAMB
Carta de Solos de Portugal Continental	Portal SINAMB
Modelo digital do terreno 30m	ArcgisOnline
Valores da condutividade hidráulica consoante o tipo de geologia	Freeze e Cherry, 1979
Carta de ocupação do solo (2018)	Direção Geral do Território

## 5.11 Apresentação dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados do mapeamento dos parâmetros pertencentes aos índices Drastic (ID), Drastic Pesticida (IDP) e de Suscetibilidade (IS), nomeadamente, a profundidade ao topo do aquífero, a recarga dos aquíferos, o material do aquífero, o tipo de solos, o declive do terreno, a influência da zona vadosa ou não saturada, a condutividade hidráulica dos aquíferos e a ocupação e uso do solo.

### ***D-Profundidade ao topo do aquífero / D: Profundidade da zona não saturada***

O mapeamento da vulnerabilidade para o parâmetro D: Profundidade ao topo do aquífero / D: Profundidade da zona não saturada foram obtidos após o cálculo da mediana dos dados dos níveis piezométricos nas 81 estações de monitorização disponibilizada na plataforma SNIRH, entre 1980 e 2022. Após este cálculo do nível piezométrico das captações e com os dados das altitudes das captações subterrâneas, foi possível obter a profundidade da zona não saturada do aquífero que corresponde à profundidade até ao topo do aquífero. Na figura 13 apresenta-se o mapa com as profundidades ao topo do aquífero.

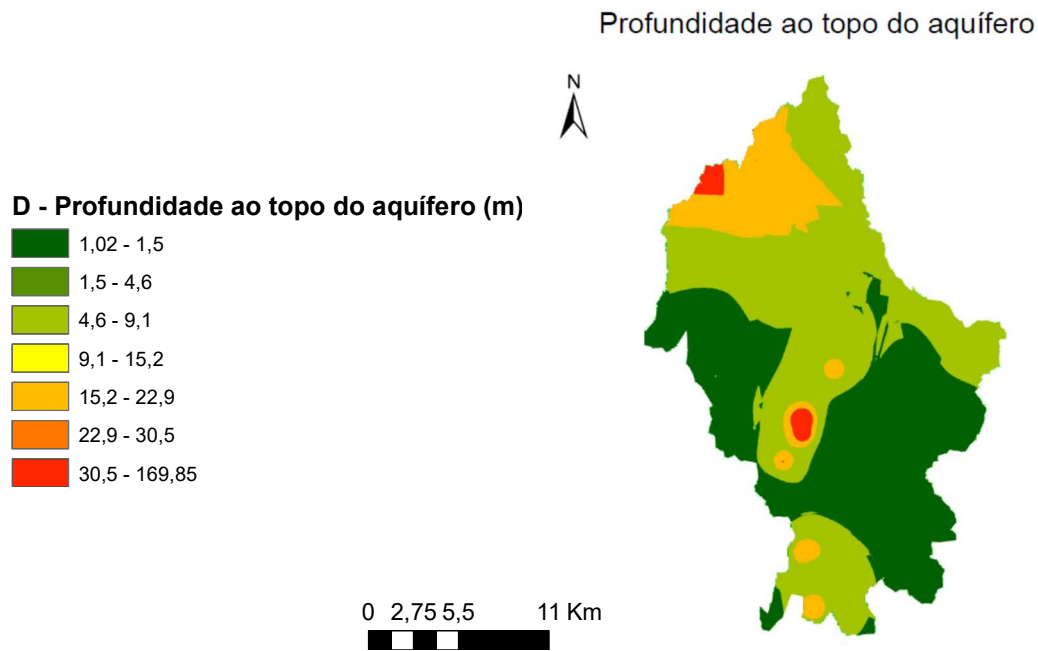


Figura 14 - Profundidade ao topo do aquífero (m) na bacia hidrográfica do Rio Lis

Com os dados da profundidade em cada ponto de água, foi utilizado o estimador IDW para interpolação dos dados com uma aproximação da profundidade da zona não saturada para toda a bacia hidrográfica.

A reclassificação dos dados para o método Drastic, Drastic Pesticida e IS definem valores de vulnerabilidade mais elevados aos locais onde a profundidade ao topo do aquífero é menor e um valor mais reduzido onde a profundidade ao topo do aquífero é maior. Na figura 15 apresenta-se o mapa com a classificação das profundidades ao topo do aquífero segundo os métodos Drastic, Drastic Pesticida e a profundidades da zona não saturada do método de Suscetibilidade.

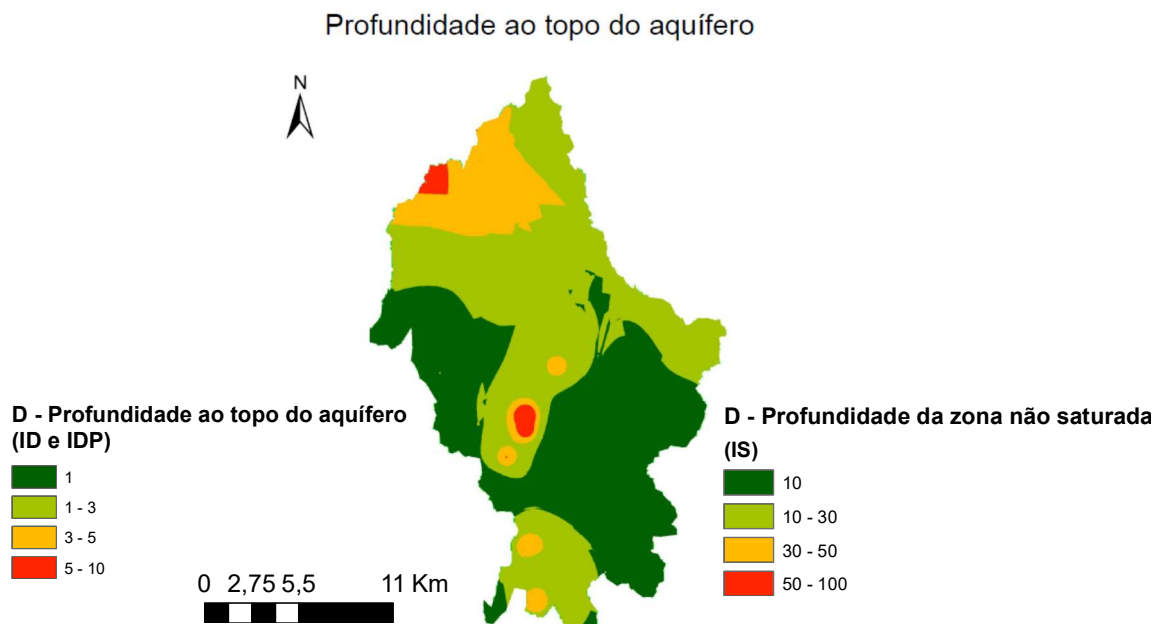


Figura 15- Mapeamento do parâmetro D: Profundidade ao topo do aquífero (D) para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e a Profundidade da zona não saturada para o método IS (À direita)

### ***R: Recarga do aquífero***

O mapa do parâmetro R: Recarga do aquífero foi construído com base nos valores de recarga de acordo com as litologias presentes na bacia hidrográfica obtidos por Martins *et al.* (2011) e presente nos Planos de Bacia Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis. A tabela 23 apresenta os valores apresentados nesta bibliografia consoante os vários aquíferos identificados na bacia hidrográfica do Lis e presentes no site SNIRH (Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos).

Tabela 27- Recarga dos aquíferos da bacia hidrográfica do rio Lis, adaptado de Almeida et al 2000)

<b>Sistemas Aquíferos</b>	<b>Recarga (mm/ano)</b>
Alpedriz	100
Leirosa Monte-Real	350
Maceira	230
Louriçal–Subsistema Plio-Quaternário de Louriçal	220
Maciço Calcário Estremenho	450
Ourém	30
Pousos-Caranguejeira	110
Vieira de Leiria-Marinha Grande	300

O mapeamento deste parâmetro (Figura 16) foi obtido pela interpolação dos dados através do método IDW, com uma aproximação da recarga dos aquíferos para toda a bacia hidrográfica.

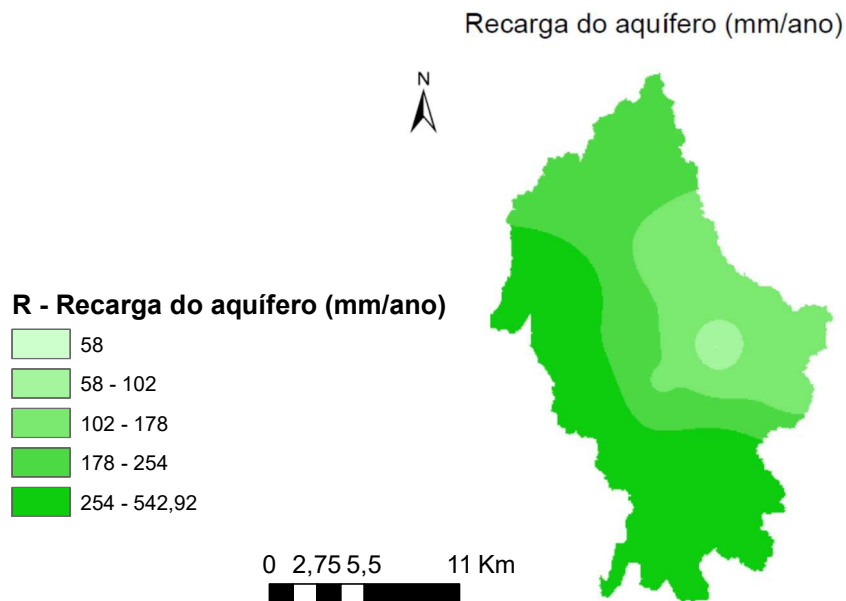


Figura 16 - Recarga dos aquíferos (mm/ano) na bacia hidrográfica do Rio Lis

A reclassificação deste parâmetro mostra que as zonas com maior recarga apresentam uma classe de R maior e os de menor recarga uma classe menor (Figura 17). A grande maioria da bacia hidrográfica do Rio Lis representa uma classificação alta 6-8 e muito alta 8-9. Na figura 16 apresenta-se o mapa com a classificação da recarga do aquífero segundo os métodos Drastic, Drastic Pesticida e de Suscetibilidade.

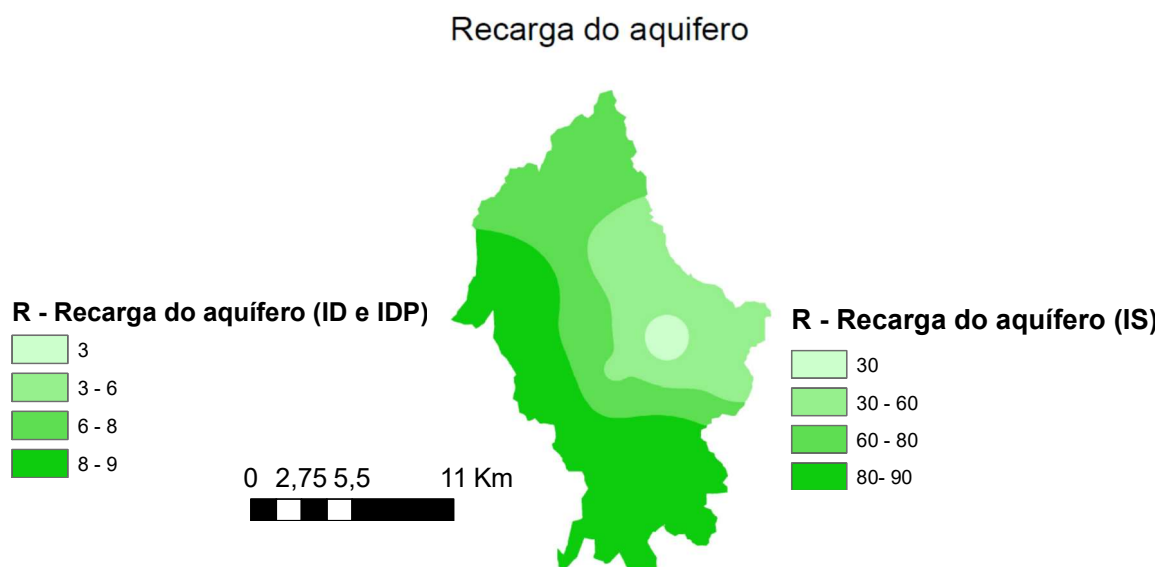


Figura 17- Mapeamento do parâmetro R: Recarga do aquífero (R) para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e para o método IS (À direita)

### ***A: Material do aquífero***

O mapa do parâmetro A: Material do aquífero foi realizado tendo por base as litologias descritas na carta geológica 1:50000. Na figura 18 são apresentadas as várias litologias presentes na área da bacia hidrográfica do rio Lis.

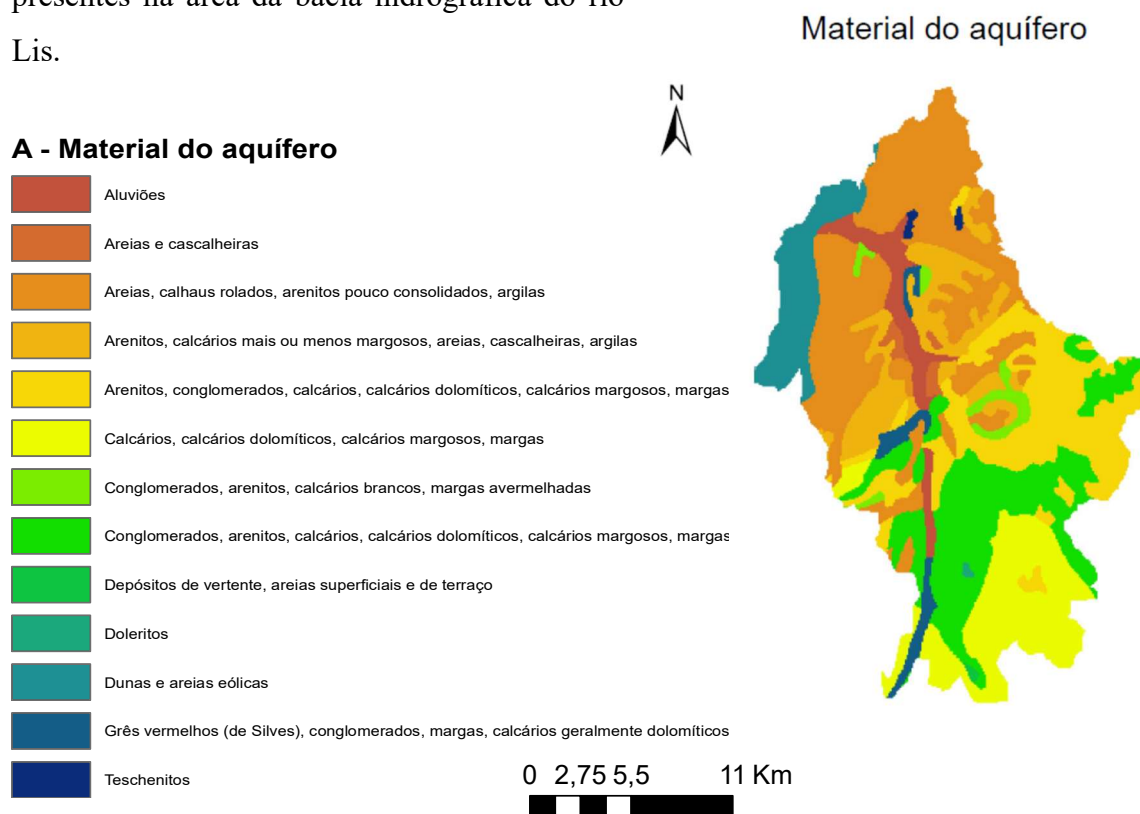


Figura 18 - Material dos aquíferos presentes na bacia hidrográfica do Rio Lis

Para os parâmetros A, I e C, de acordo com a tabela apresentada no Anexo 3, utilizou-se os dados da litologia das formações litológicas para reclassificar estes parâmetros de acordo com os métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS. Correspondendo o valor superior a cada litologia a um maior potencial de vulnerabilidade à contaminação. Na figura 19 apresenta-se o mapa com a reclassificação do material dos aquíferos.

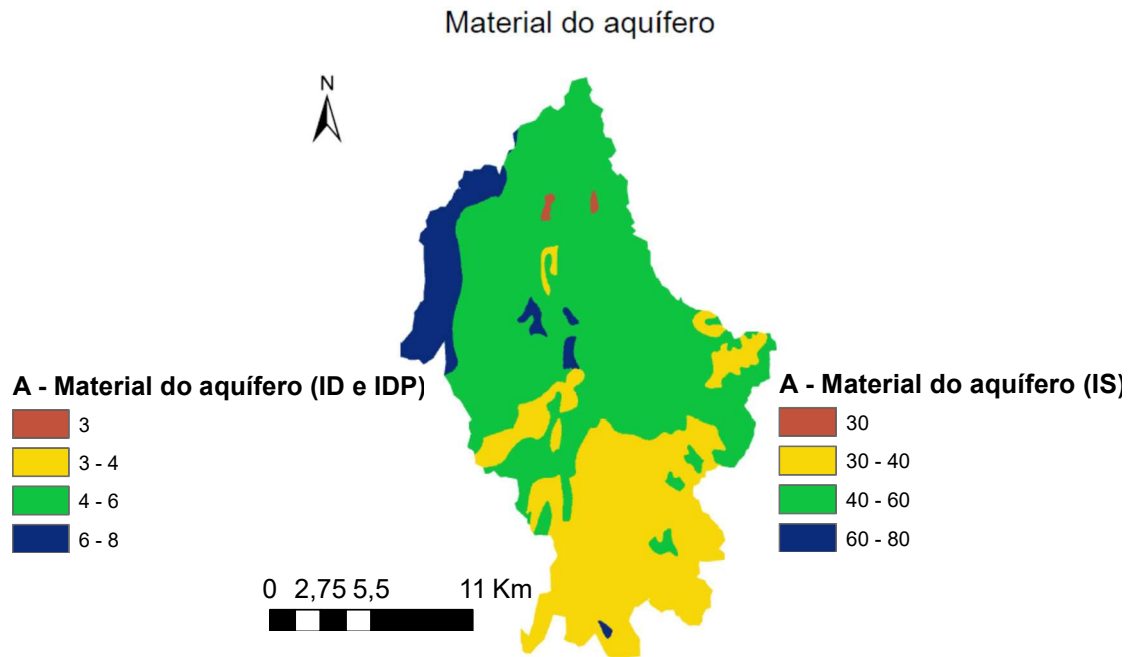


Figura 19- Mapeamento do parâmetro A: Material do aquífero para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e para o método IS (À direita)

O potencial de vulnerabilidade associado a cada classe de litologia está relacionado com a porosidade eficaz e permeabilidade. A porosidade efetiva condiciona a permeabilidade, a recarga, a condutividade hidráulica e a transmissividade do aquífero, sendo uma propriedade importante a ter em consideração. Na figura 18 apresenta-se o mapa com o material do aquífero com a classificação segundo os métodos Drastic, Drastic Pesticida e de Suscetibilidade. A maioria da bacia apresenta uma classificação do parâmetro A média 4-6 e média baixa 3-4.

### ***S: Tipo de Solo***

O mapeamento do parâmetro S: Tipo de Solo é desenvolvido com base na classificação dos tipos de solo em Portugal Continental, disponibilizada na plataforma digital do SNIAmb (Sistema Nacional de Informação Ambiental).

Na bacia hidrográfica do Rio Lis identificaram-se seis tipos de solos, solos podzóicos órticos, luvisolos rodocrómicos cálcicos, fluvisolos eutrícos, cambissolos éutrícos, cambissolos cálcicos e cambissolos crómicos. Na figura 20 apresenta-se o mapa com o tipo de solos presente na bacia hidrográfica do Rio Lis.

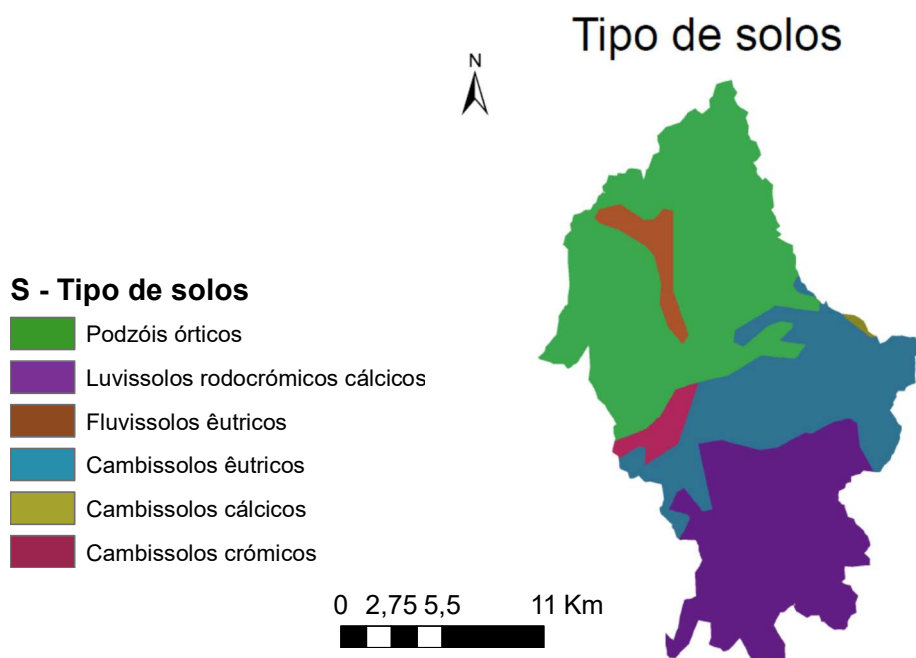


Figura 20 - Tipo de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Lis

A maior parte da bacia apresenta uma classificação do parâmetro S média 3-6. Na figura 21 apresenta-se o mapa do tipo de solos com a classificação segundo os métodos Drastic e Drastic Pesticida.

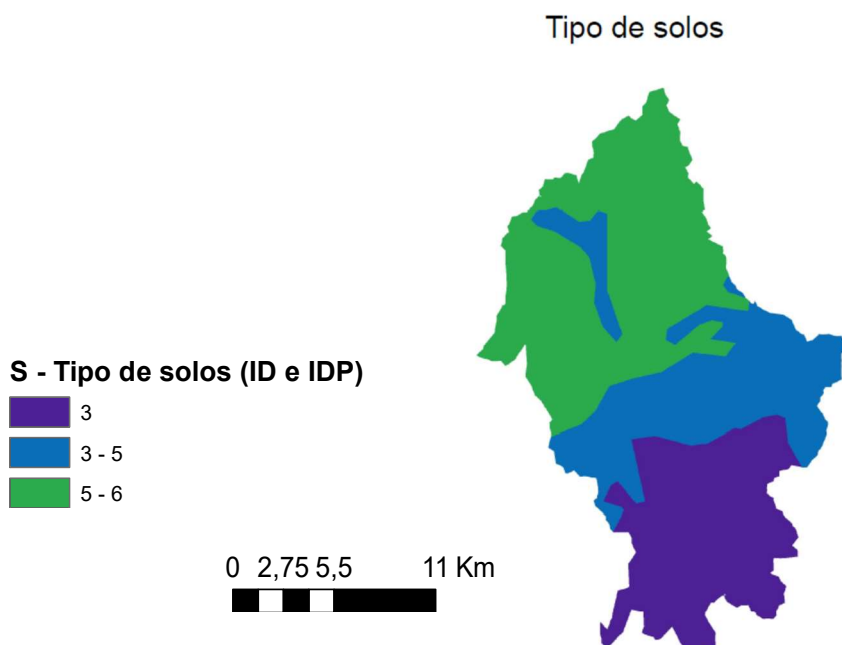


Figura 21- Mapeamento do parâmetro S: Tipo de solo do método DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP)

## ***T: Topografia***

O mapeamento do parâmetro T: Topografia foi realizado através da determinação dos declives do terreno a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) ETRS 30 m de Portugal Continental. Os valores de classificação mais alta estão relacionados com os declives menores, pois nestes casos não existe um escoamento da água à superfície, originando a retenção e a infiltração desta e dos contaminantes. Na figura 22 apresenta-se o mapa com o declive do terreno presente na bacia hidrográfica do Rio Lis.

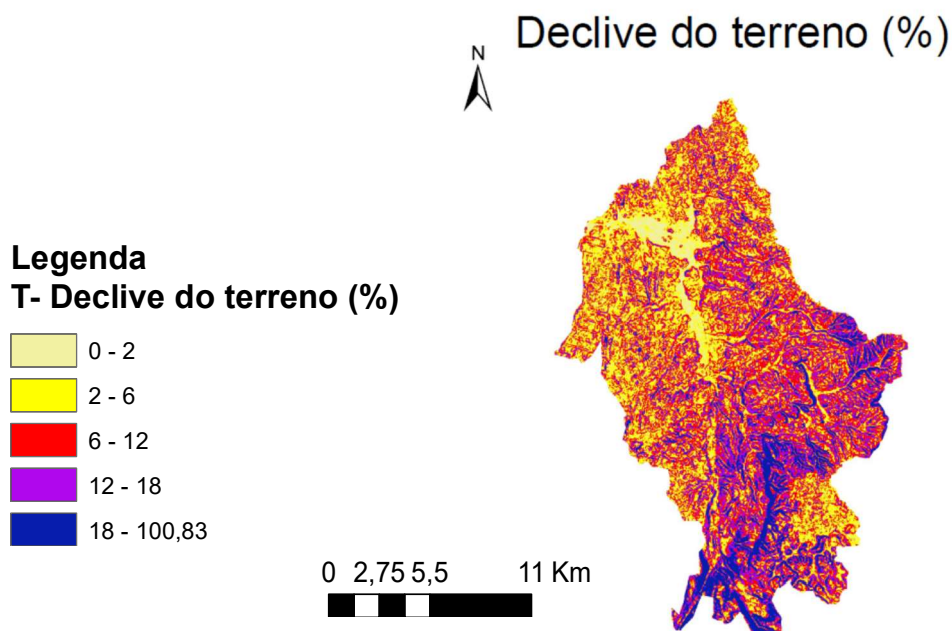


Figura 22 - Declive do terreno em % na bacia hidrográfica do Rio Lis

A maior parte da área da bacia hidrográfica apresenta uma classe alta a muito alta em termos do parâmetro T: Topografia devido ao nível de declive reduzido. Na figura 23 apresenta-se o mapa com a classificação do declive do terreno segundo os métodos Drastic, Drastic Pesticida e de Suscetibilidade.

## Declive do terreno

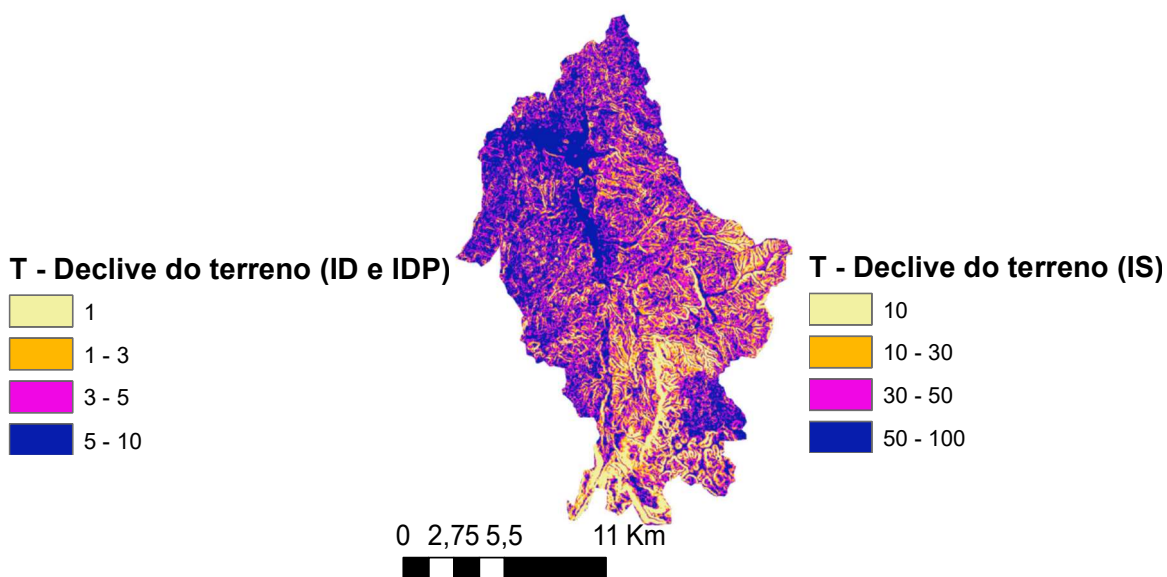


Figura 23- Mapeamento do parâmetro T: Declive do terreno para os métodos DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP) (À esquerda) e para o método IS (À direita)

### ***I: Impacto da zona vadosa***

O mapeamento do parâmetro I: Impacto da zona vadosa ou não saturada é semelhante ao da litologia e ao parâmetro A: Material do aquífero e a sua reclassificação foi realizada de acordo com o método DRASTIC e DRASTIC Pesticida e com a tabela do anexo 3.

O parâmetro I: Impacto da zona vadosa ou não saturada, avalia a suscetibilidade das litologias, e relaciona-se com a facilidade com que se deixam atravessar por um fluído.

A maioria da bacia apresenta uma classificação do parâmetro I média 4-6 e média baixa 3-4 como sucedia para o parâmetro A material do aquífero. Na figura 23 apresenta-se o mapa da influência da zona vadosa. Na figura 24 apresenta-se o mapa com a classificação da influência da zona vadosa segundo os métodos Drastic e Drastic Pesticida.

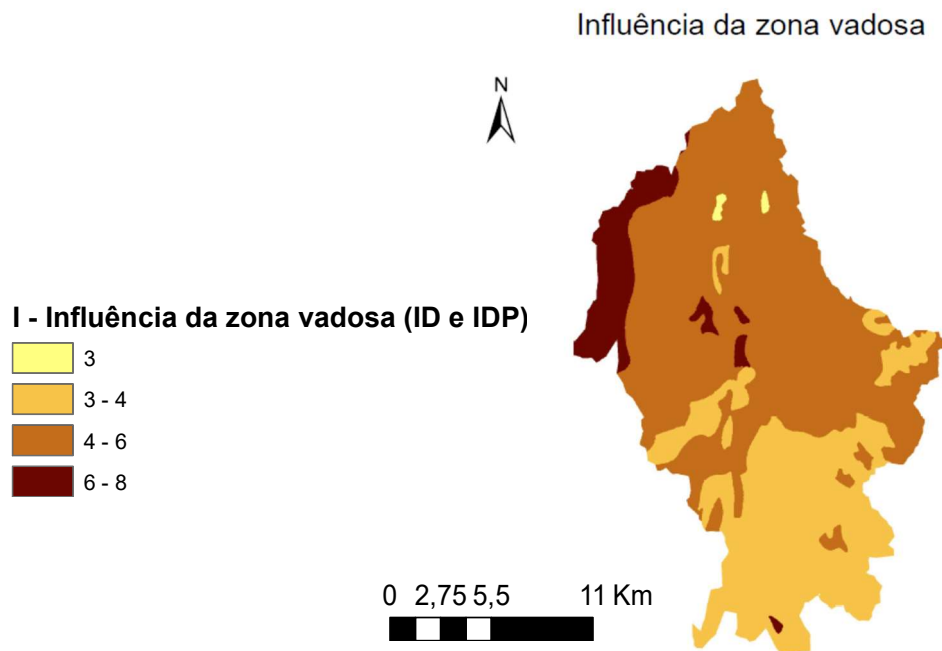


Figura 24- Mapeamento do parâmetro I: Influência da zona não saturada do método DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP)

**C: Condutividade Hidráulica**

Como não estão disponíveis dados de condutividade hidráulica para as formações geológicas em estudo, os índices referentes ao parâmetro C foram obtidos com o ábaco proposto por Freeze e Cherry (1979), que relaciona a litologia com a condutividade hidráulica (Figura 25).

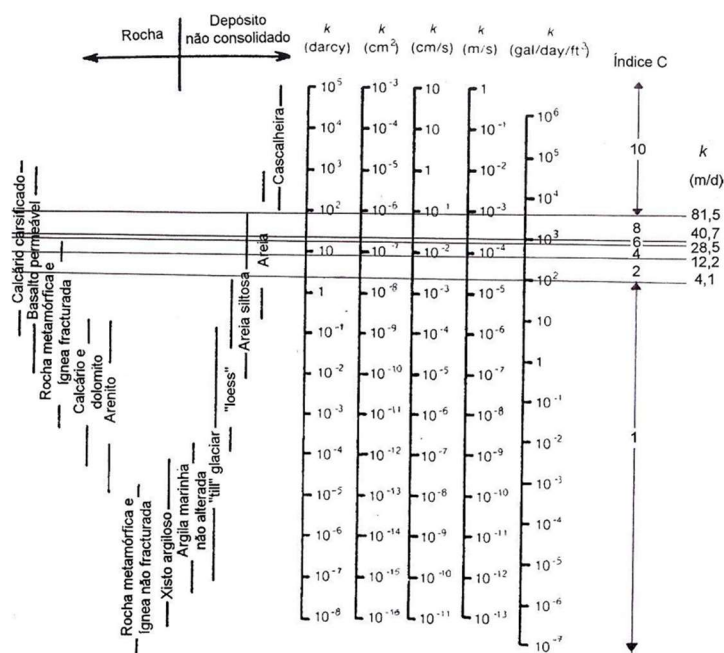


Figura 25 - Ábaco que relaciona a litologia com a condutividade hidráulica (adaptado de Freeze e Cherry, 1979)

O mapeamento do parâmetro C: Condutividade Hidráulica foi realizado com base em valores de condutividade hidráulica dos aquíferos, os quais foram reclassificados de acordo com o método DRASTIC e DRASTIC Pesticida de acordo com tabela no anexo 3.

A maioria da bacia apresenta uma classificação do parâmetro C média 4-6 e média baixa 3-4 como sucedia com os parâmetros A e parâmetro I. Na figura 26 apresenta-se o mapa com a classificação da condutividade hidráulica do aquífero segundo os métodos Drastic e Drastic Pesticida.

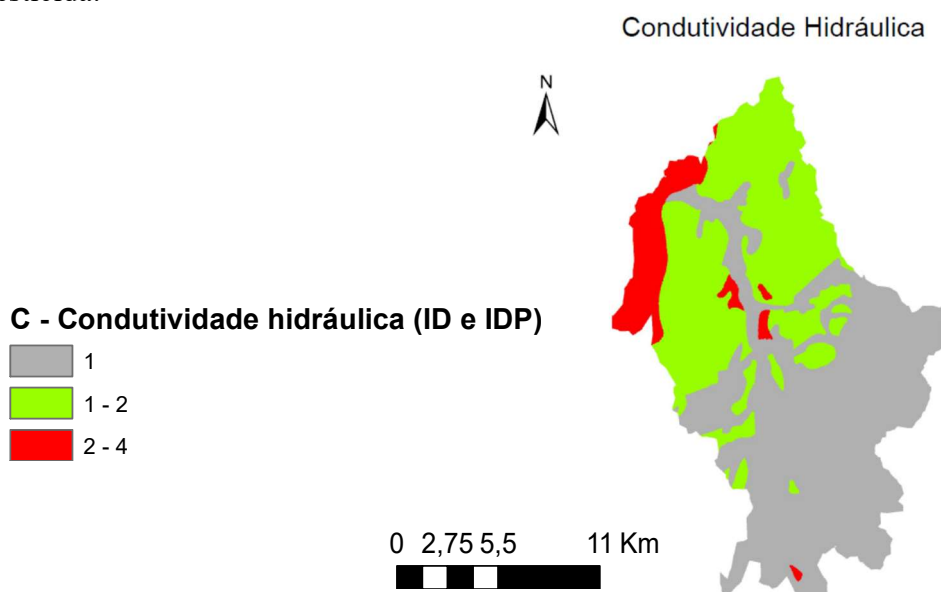


Figura 26- Mapeamento do parâmetro C: Condutividade hidráulica do método DRASTIC (ID) e DRASTIC Pesticida (IDP)

### ***LU: Ocupação do solo***

O mapeamento do parâmetro LU: Ocupação do solo foi realizada a partir da Carta de Ocupação do Solo, COS 2018 (Figura 27). Esta classifica a ocupação do solo e atividades exercidas sobre o terreno em função do seu potencial de contaminação, e afetando a vulnerabilidade específica dos aquíferos.

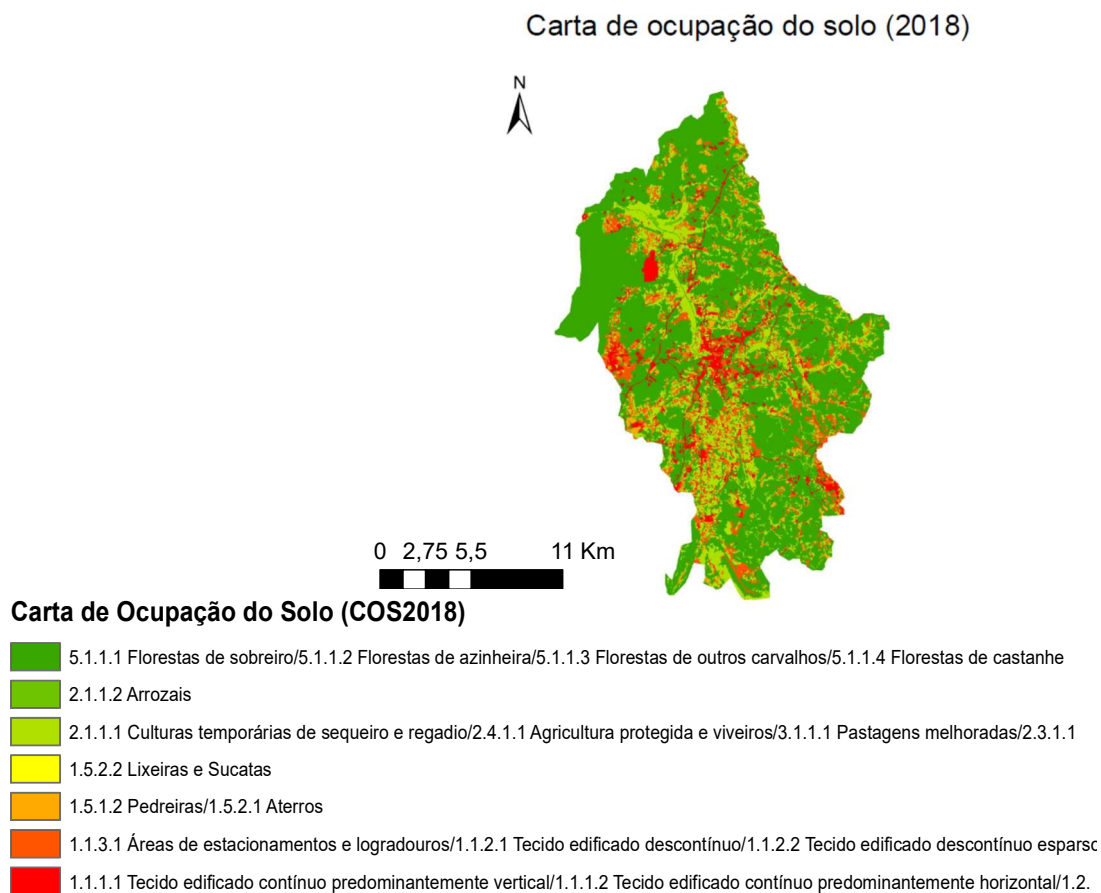


Figura 27-Carta de Mapeamento do parâmetro LU: Ocupação e Uso do Solo (COS2018)

Na figura 28 apresenta-se o mapa com a classificação da ocupação do solo segundo o método de Suscetibilidade

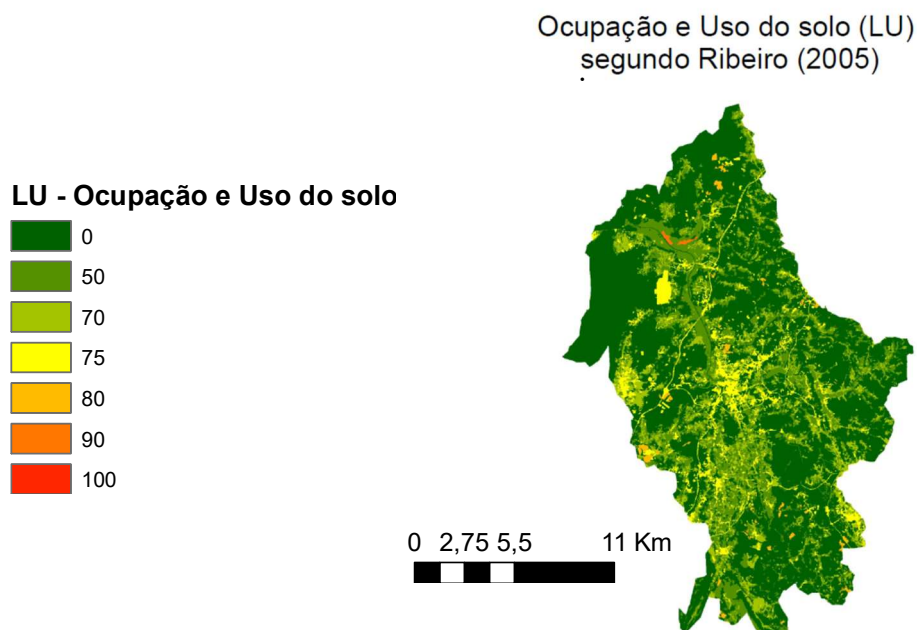


Figura 28- Mapeamento do parâmetro LU: Ocupação do solo do método IS

## 5.12. Mapeamento dos índices de vulnerabilidade

Após a determinação de cada um dos índices no formato raster, conforme referido no capítulo 4, procedeu-se à soma ponderada de cada um dos parâmetros para se obter o mapa final DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS, utilizando a ferramenta raster calculator do Spatial Analyst disponível no software ArcGis.

### 5.12.1 Índice de Vulnerabilidade DRASTIC

Pela análise da fórmula de cálculo do índice DRASTIC, segundo Aller *et al.*, (1987), considera que os parâmetros D, I e R, nomeadamente a profundidade ao topo do aquífero, influência da zona não saturada e a recarga, são os parâmetros que mais contribuem para a vulnerabilidade do sistema, dividindo esta em 5 classes: muito baixa (< 89), baixa (90-119), intermédia (120-159), alta (160-199) e muito alta (>190):

D- 22%; R- 17%; A- 13%; S- 9%; T -4%; I -22%; C -13%.7.1 Índice de Vulnerabilidade DRASTIC

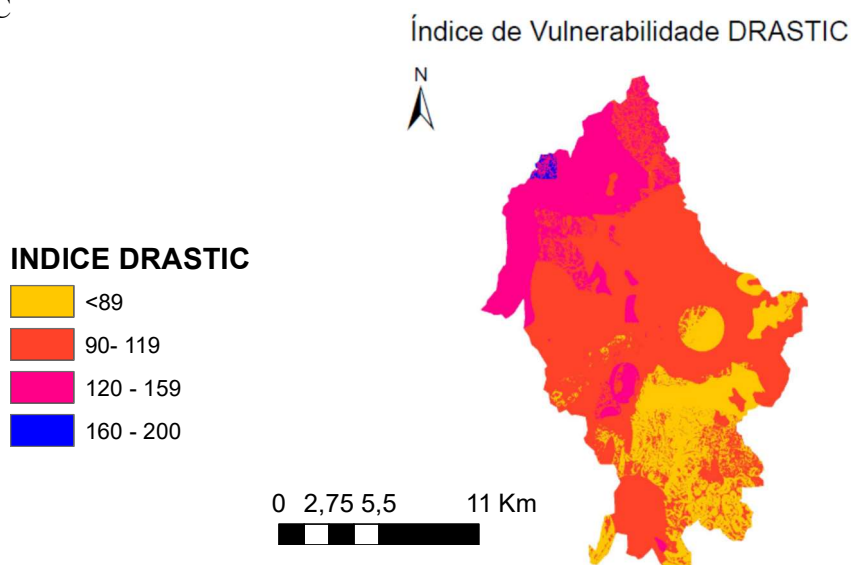


Figura 29- Mapeamento do Índice DRASTIC na bacia do rio Lis

Verifica-se pela análise do mapeamento do índice Drastic na bacia hidrográfica do Rio Lis que a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas classifica-se como intermédia baixa, pois a maior parte da área da bacia tem valores até 159, apresentando como valor mínimo 71 e máximo 162.

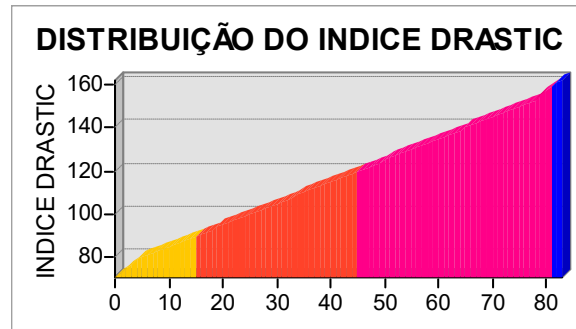


Figura 30- Histograma do Índice DRASTIC

Pela análise deste índice as classes de 90 a 119 e 120 a 159 apresentam uma frequência maior nas classes intermédias do índice DRASTIC.

### 5.12.2 Índice de Vulnerabilidade DRASTIC Pesticida

Para o índice DRASTIC Pesticida, os parâmetros D, S, I e R, nomeadamente a profundidade ao topo do aquífero, o tipo de solo, a influência da zona não saturada e a recarga, são os parâmetros que mais contribuem para a vulnerabilidade do sistema,

D- 19%; R- 15%; A- 12%; S- 19%; T -12%; I -15%; C -8%.

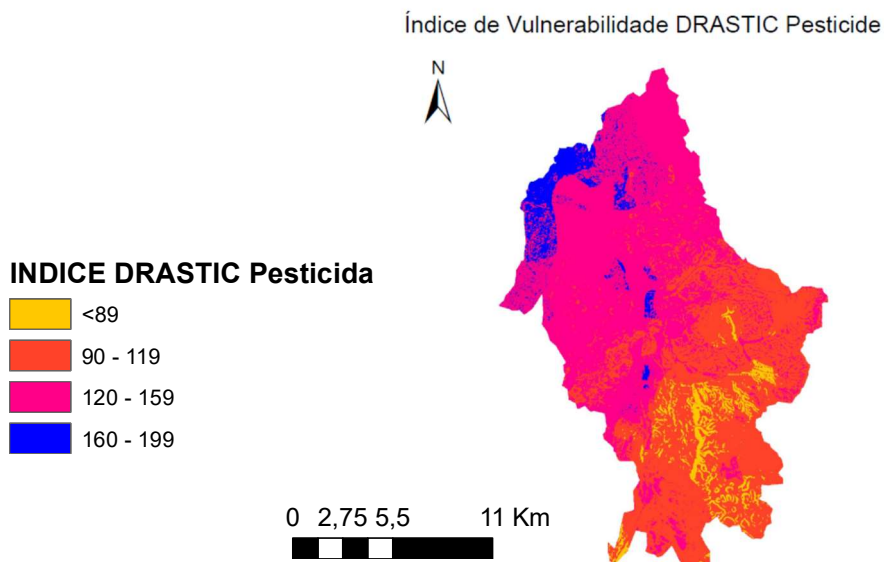


Figura 31- Mapeamento do Índice DRASTIC Pesticida na bacia do rio Lis

Verifica-se pela análise do mapeamento do índice Drastic Pesticida na bacia hidrográfica do Rio Lis que a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas classifica-se como intermédia, pois a maior parte da área da bacia tem valores superiores aos do índice Drastic até 160, apresentando um valor mínimo de 77 e máximo de 188.

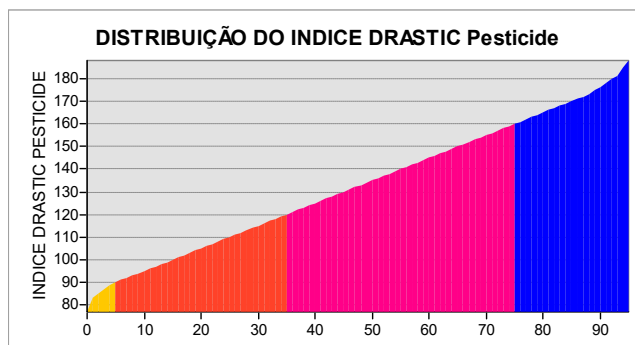


Figura 32- Histograma do Índice DRASTIC Pesticida

Pela análise do histograma desta distribuição do Índice Drastic Pesticida as classes de 120 a 159 e 160 a 199 apresentam uma frequência maior do que nas classes intermédias do Índice Drastic.

### 5.12.3 Índice de Suscetibilidade (IS)

O índice de suscetibilidade IS é uma adaptação do índice DRASTIC e surge na necessidade de incluir o parâmetro LU (ocupação do solo) que define as atividades exercidas no terreno, que constituem as potenciais fontes de contaminação dos aquíferos. Os parâmetros D, R, A, T são extraídos diretamente do DRASTIC. Os pesos de cada parâmetro também são alterados, sendo que os parâmetros A e LU são os que mais peso têm.

Em que: D -19%; R -21%; A -26%; T -12%; LU -22%

Antes de se discutir a distribuição espacial das classes do IS, julga-se oportuno clarificar as principais diferenças entre o IS e o DRASTIC. Os parâmetros com maior valor de ponderação no DRASTIC são o D, R com 22% e 17% respetivamente, enquanto no IS estes dois parâmetros têm um peso de 19% e 21%. Comparativamente, o tipo de aquífero (A) tem o dobro do peso no IS (26%), contudo a condutividade hidráulica não sendo considerada no IS, segundo a fórmula final do DRASTIC tem um peso igual ao parâmetro A de 13%. O declive embora seja um parâmetro comum nos dois índices, apresenta maior importância no IS (12%) do que no DRASTIC (4%). Finalmente, o tipo de solo (S) e a influência da zona

vadosa foram excluídos do IS (9% e 22%) que incluiu o parâmetro Uso do Solo com 22%. Concluindo, a importância dos parâmetros hidrogeológicos é inferior no IS.

Este índice contém 5 classes, de acordo com a “Classificação da Vulnerabilidade para o Método Índice de Suscetibilidade (Ribeiro, 2005)”, segundo a Resolução de Conselho de Ministros 81/2012 conforme consta na tabela 17 apresentada no capítulo 3.5.

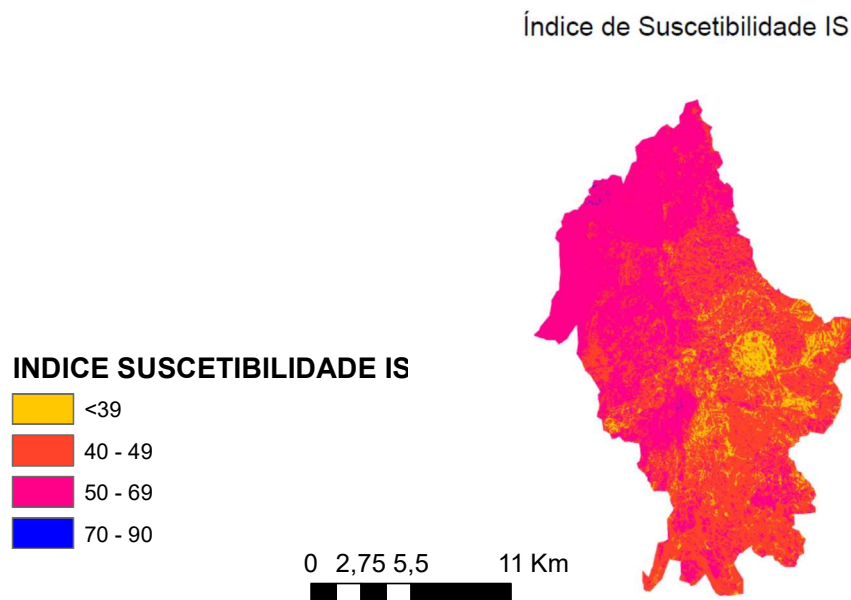


Figura 33- Mapeamento do IS na bacia do rio Lis

Verifica-se pela análise do mapeamento do índice IS na bacia hidrográfica do Rio Lis que a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas classifica-se como moderada baixa, pois a maior parte da área da bacia tem valores superiores do índice IS com uma classificação até 70 %. Na zona costeira apresenta poucos valores moderados altos. Como valor mínimo tem um valor 25,41 e máximo de 75,85.

### 5.13 Discussão comparativa dos resultados

Em primeiro lugar mostramos as principais diferenças entre os métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticida e o IS:

- Os parâmetros D, R no método DRASTIC têm a ponderação de 22% e 17% e no método DRASTIC Pesticida têm o peso de 19% 15% respetivamente, enquanto no método IS estes dois parâmetros têm um peso de 19% e 21%;
- Comparativamente, o material do aquífero (A) tem o dobro do peso no método IS (26%), enquanto a condutividade hidráulica (C) que não é considerada no método IS,

tem no método DRASTIC um peso igual ao parâmetro material do aquífero (A) de 13%;

- O declive (T) que é um parâmetro comum aos três índices, apresenta uma importância superior nos métodos DRASTIC Pesticida (13%) e no método IS (12%) do que no método DRASTIC (4%);
- Finalmente, o tipo de solo (S) e a influência da zona vadosa (I) foram excluídos do método IS e apresentam um peso de (9% e 22%) no método DRASTIC e de (19% e 15%) no método DRASTIC Pesticida;
- O parâmetro Uso do Solo (LU) no método IS tem um peso de 22%;

Concluindo, a importância dos parâmetros hidrogeológicos é inferior no IS, e no método DRASTIC Pesticida dá uma maior importância ao tipo de solo (S) e ao declive (T).

Na figura 34 é apresentada a comparação dos mapas obtidos dos Índices DRASTIC, DRASTIC Pesticida e o IS, após cálculo dos índices DRASTIC e DRASTIC Pesticida com valores entre 0 e 100, multiplicando o peso relativo de cada parâmetro por 10, de modo a poder comparar os vários métodos, pois o índice IS já apresenta os valores entre 0 e 100.

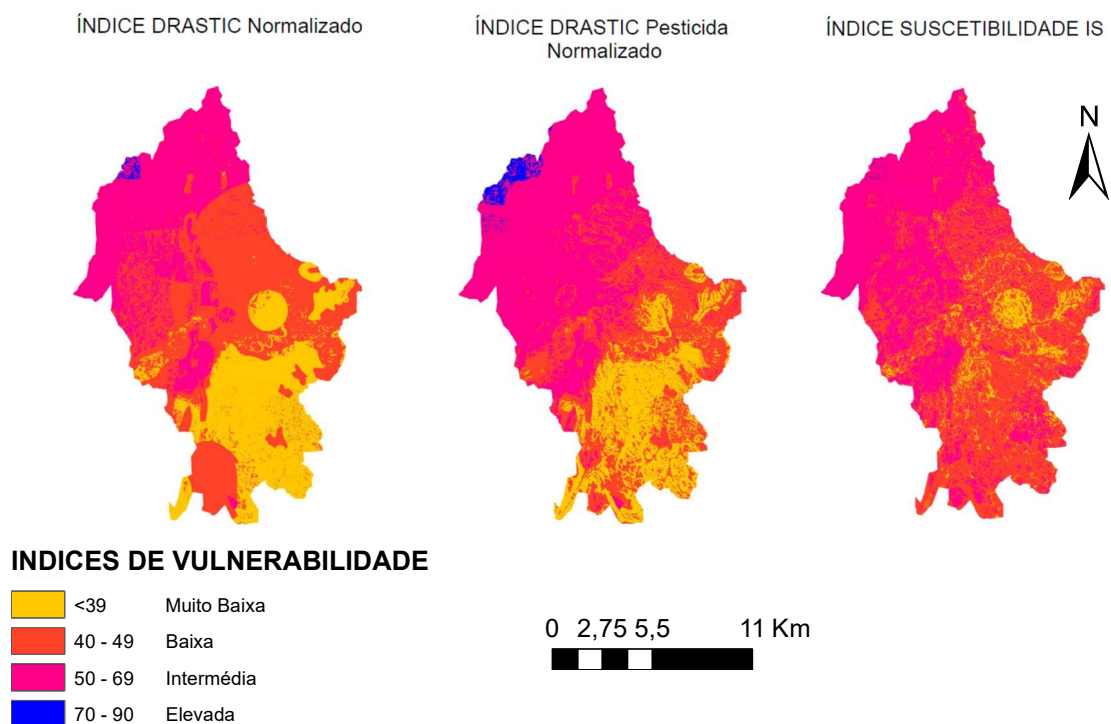


Figura 34 - Comparação dos mapeamentos dos Índices DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS

Da análise efetuada verifica-se que os índices de vulnerabilidade não variam muito de método para método. As diferenças são relativamente pontuais e relacionadas com a amplitude das classes de vulnerabilidade. Na zona nordeste junto à foz do rio Lis a vulnerabilidade é elevada, diminuindo a sudeste com vulnerabilidade baixa e muito baixa, na zona central a vulnerabilidade é predominantemente intermédia.

No entanto o método DRASTIC Pesticida apresenta valores mais elevados em toda a zona nordeste de costa atlântica onde predominam as areias e dunas e valores intermédios na zona central.

No mapa referente à aplicação do método IS ocorre uma diminuição significativa da classe de vulnerabilidade elevada (cor azul) e a diminuição grande da classe de vulnerabilidade muito baixa (cor laranja).

O índice de suscetibilidade IS considera que as atividades que se praticam no solo influenciam a vulnerabilidade, isto é, a diminuição e a extinção das classes elevada devem-se aos três fatores, D, R e LU. Estes parâmetros têm pesos consideráveis: D -19%, R -21% e LU -22%. Os parâmetros D e R têm sofrido alterações devido às alterações climáticas com diminuição das precipitações, tendo a profundidade ao topo do aquífero D aumentado para níveis piezométricos mais baixos e a recarga dos aquíferos R tem diminuído no período mais recente.

A relação entre estes dois parâmetros é clara, uma vez que ao diminuir recarga, também a infiltração diminui e como consequência os níveis piezométricos não recuperam, ocorrendo uma diminuição dos mesmos.

Em relação ao parâmetro uso e ocupação do solo LU, muito importante na vulnerabilidade das águas subterrâneas, obtido através da COS 2018, identificam-se áreas com maior potencial de contaminação à atividade de agricultura ao longo do vale do Rio Lis entre a zona central e a foz deste rio.

## 6. Conclusões

De acordo com os objetivos delineados para esta tese foi possível avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos e das águas subterrâneas na área da bacia hidrográfica do rio Lis

As principais ameaças na região de Leiria são as atividades agrícolas e agropecuárias intensivas. A água subterrânea tem um papel primordial nos vários sectores socioeconómicos, nomeadamente no sector agrícola. A rega é a atividade de maior consumo de água em Portugal e que maior extensão de território ocupa.

Os mapas de vulnerabilidade surgem na necessidade de proteger e avaliar as águas subterrâneas à contaminação, são geralmente elaborados a partir do cruzamento de dados geológicos e hidrogeológicos, ocupação do solo, entre outros parâmetros, aos quais atribuem-se pesos distintos em função da sua importância para a vulnerabilidade do aquífero.

Na presente dissertação foram aplicados os métodos DRASTIC, DRASTIC Pesticida e IS, com o aumento da vulnerabilidade nas zonas próximas do Litoral. Também quanto menor for a profundidade do topo do aquífero e mais elevada for a permeabilidade da zona não saturada, mais rápida será a chegada do contaminante ao aquífero. A recarga promove a lixiviação das águas, assim como os declives baixos facilitam a infiltração. Por fim, solos ricos em argila diminuem a mobilidade dos contaminantes, uma vez que a argila possui grande capacidade de adsorção.

O DRASTIC é um método intrínseco, que pesa apenas os parâmetros hidrogeológicos, o que faz com que os resultados produzidos possam não ser os mais representativos. As atividades que decorrem no solo influenciam o estado do sistema. Em contrapartida, o IS é um índice que inclui o parâmetro ocupação do solo, fazendo com que os resultados reflitam a interação entre a ocupação do solo e a infiltração das águas, provenientes da atmosfera e resultantes das atividades humanas.

Assim, métodos como o DRASTIC e DRASTIC Pesticida permitem uma avaliação da vulnerabilidade do sistema, uma vez que atribuem grande importância à capacidade de atenuação dos parâmetros hidrogeológicos. Por outro lado, o índice de suscetibilidade IS, ao incluir o parâmetro ocupação do solo, pondera a influência das atividades humanas e poluidoras na vulnerabilidade do sistema, como é o caso da atividade agrícola da bacia hidrográfica do rio Lis.

## 7. Bibliografia

**Aller L., Bennet T., Lehr J.H. & Petty R. J.** (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA Report 600/2-85/018.

**Almeida, C.** (1985). Hidrogeologia do Algarve Central. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 333 p.

**Almeida, C., Mendonça, J., Jesus, M., Gomes, A.** (2000). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Centro de Geologia, Instituto da Água, Portugal

**Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Silva, M. A. M. eA. Serra** (1999). Síntese da Hidrogeologia das Bacias do Mondego, Vouga e Lis. IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa (IV SILUSBA), CD ROM, Coimbra.

**APA (2015).** Plano Nacional da Água - Relatório N.º 2 - Análise dos principais problemas, diagnóstico, objetivos e medidas.

**ARH** (2012). Plano de gestão das bacias hidrográficas que integram a região hidrográfica das ribeiras do Algarve (RH8). Volume I – Relatório. Parte 2 – Caracterização e diagnóstico. Tomo 2 – Caracterização das massas de água superficiais e subterrâneas. Administração da Região Hidrográfica do Algarve LP, Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território.

**Barão, J.** (2022). Avaliação da vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos porosos por nitratos, utilizando ferramentas SIG e métodos estatísticos. Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências - Departamento de Geologia.

**Cruz, Fernando F.** (2012). Texto de apoio à candidatura ao título de especialista.

**Farinha, T.** (2014). Análise do impacto da gestão dos recursos hídricos no estado quantitativo e qualitativo das águas subterrâneas na bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira. Universidade do Algarve.

**Freeze, R. Allan; Cherry, John A.** (1979). Groundwater, Prentice Hall, Inc.

**INAG** (2001) Plano nacional da água – introdução, caracterização e diagnóstico da situação actual dos recursos hídricos. Instituto da Água I. P. Vol.1 E2. Lisboa.

**INAG** (2006). Implementação da Diretiva Quadro da Água. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Instituto da Água, I. P. Lisboa.

**INAG** (2001). Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água, Versão Preliminar. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território Estudo elaborado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo Instituto Superior de Agronomia (ISA). Lisboa

**INE** - Instituto Nacional de Estatística. RA09 -(2009)

**Leiria Polis S.A.** (2001). Estudo Hidrológico/Hidráulico do Rio Lis, na zona de intervenção do Programa Polis na Cidade de Leiria

**LNEC**- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2011). Caracterização da Vulnerabilidade a poluição dos sistemas aquíferos da região hidrográfica do Centro.

**Lobo- Ferreira J. P. C., Oliveira, M. M., Moinante, M.J.** (1997). Cartografia Automática da vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC. Relatório final, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, relatório 60/97-GIAS.

**Lobo-Ferreira, J.** (1998). - Vulnerabilidade à poluição de Águas Subterrâneas: Fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. 4º Congresso da Água, Lisboa.

**Município de Leiria** (2012). Plano Diretor Municipal

**Ribeiro L.** (2005). Desenvolvimento e aplicação de um novo índice de suscetibilidade dos aquíferos à contaminação de origem agrícola. 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, APRH, Portugal, Évora.

**Romeiro, Carla.** (2012). A Tecnologia SIG aplicada ao estudo da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na bacia hidrográfica nas Ribeiras do Oeste. (137p)

**SNIRH.** Base de dados online. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH)- Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. Acedido em: <http://snirh.pt>

## **8. Anexos**

**Anexo 1 - Principais métodos para determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos e águas subterrâneas**

MÉTODO	AVALIAÇÃO	PARÂMETROS DA ANÁLISE	REFERÊNCIAS
DRASTIC	Vulnerabilidade Geral	. <b>D</b> - Profundidade do topo do aquífero . <b>R</b> - Recarga . <b>A</b> - Material do aquífero . <b>S</b> - Tipo de solo . <b>T</b> - Topografia . <b>I</b> - Impacto no aquífero da zona não saturada . <b>C</b> - Condutividade hidráulica	ALLER et al. (1985)
DRASTIC PESTICIDA	Vulnerabilidade Geral	. <b>D</b> - Profundidade do topo do aquífero . <b>R</b> - Recarga . <b>A</b> - Material do aquífero . <b>S</b> - Tipo de solo . <b>T</b> - Topografia . <b>I</b> - Impacto no aquífero da zona não saturada . <b>C</b> - Condutividade hidráulica	ALLER et al. (1985)
IS	Vulnerabilidade Geral	. <b>D</b> - Profundidade do topo do aquífero . <b>R</b> - Recarga . <b>A</b> - Tipo de aquífero . <b>T</b> - Topografia . <b>LU</b> – Ocupação do solo	FRANCÉS et al. (2001); PARALTA et al. (2001); RIBEIRO (2005)
GOD	Vulnerabilidade Geral	. <b>G</b> – Ocorrência de água subterrânea . <b>O</b> – Litologia da zona não saturada . <b>D</b> – Profundidade da água subterrânea	FOSTER; HIRATA (1988)
SINTACS	Vulnerabilidade Geral	. <b>S</b> - Profundidade do topo do aquífero . <b>I</b> - Recarga . <b>N</b> - Impacto no aquífero da zona não saturada . <b>T</b> - Tipo de solo . <b>A</b> – Material do Aquífero . <b>C</b> - Condutividade hidráulica . <b>S</b> – Topografia	CIVITA et al. (1990)
EPPNA	Vulnerabilidade Geral	Características litológicas e hidrogeológicas do sistema aquífero	PLANO NACIONAL DA ÁGUA (1998) ARTUSO et al., 2004)
AVI	Vulnerabilidade Geral	. <b>Ej</b> – espessura de cada camada <i>j</i> acima do aquífero superior . <b>Kj</b> – Condutividade hidráulica estimada em cada camada	VAN STEMPTVOORT (1993)
EKv	Vulnerabilidade Geral	. <b>E</b> – Profundidade da superfície freática . <b>Kv</b> – Condutividade vertical da zona não- saturada	AUGE (2004)

EPIK	Vulnerabilidade Geral	<ul style="list-style-type: none"> <li>. E – Epicarso (zona carsificada próxima a superfície);</li> <li>. P - Cobertura de proteção</li> <li>. I - Condições de infiltração</li> <li>. K - Grau de desenvolvimento da rede cárstica</li> </ul>	DOERFLIGER; ZWAHLEN (1997)
VULFRAC	Vulnerabilidade Geral	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Espessura da zona não saturada</li> <li>. Tipo de composição do material</li> <li>. Densidade da zona não saturada</li> <li>. Conectividade</li> <li>. Abertura das fraturas.</li> </ul>	(FERNANDES, 2003)
GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE	Potencial de lixiviação de nitrato	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Tipo de solo</li> <li>. Características hidráulicas</li> <li>. Litologia do aquífero</li> </ul>	CARTER et al. (1987)
LANDFILL SITE RANKING	Aterros sanitários	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Distância aterro/poço</li> <li>. Gradiente, de permeabilidade</li> <li>. Capacidade de atenuação</li> </ul>	LE GRAND (1983)
POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS AQUÍFEROS	Vulnerabilidade Geral	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Geologia (litologia e estrutura)</li> </ul>	TALTASSE et al. (1972)
SITE RANKING METHODOLOGY	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de perigo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Recetor-população</li> <li>. Uso da água</li> <li>. Uso local</li> <li>. Degradação ambiental</li> <li>. Caminhos</li> <li>. Nível e tipo de contaminação</li> <li>. Profundidade do nível de água</li> <li>. Pluviometria</li> <li>. Permeabilidade do solo</li> <li>. Característica do resíduo – toxicidade e persistência</li> <li>. Prática de manuseamento - aspectos operacionais e construtivos.</li> </ul>	KULFS et al. (1980)
WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX	Disposição de resíduos sólidos e líquidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Efeitos na saúde</li> <li>. Característica do produto químico</li> <li>. Comportamento do produto</li> <li>. Capacidade de atenuação do solo</li> <li>. Hidrogeologia característica do local.</li> </ul>	PHILIPS et al. (1977)
SITE RANKING SYSTEM	Disposição de produtos químicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Solo</li> <li>. Característica hidráulica</li> <li>. Sorção e tamponamento químico</li> <li>. Hidrodinâmica do aquífero</li> <li>. Ar</li> <li>. População próxima</li> </ul>	HARGERTY et al. (1973)
SURFACE IMPOUNDMENT ASSESSMENT	Disposição de águas servidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Zona não-saturada</li> <li>. Importância do recurso</li> <li>. Qualidade de águas subterrâneas</li> <li>. Periculosidade do material.</li> </ul>	LE GRAND (1964)

## Anexo 2- Informação dos níveis piezométricos relativos ao período 1981-2023.

cod	Captações	M_m	P_m	Altitude m	Máximo	Mínimo	Mediana	Média	Desvio Padrão	Aquífero	Prof D
1	260/1	133000	331280	41	40,25	36,96	38,19	38,21	0,55	O10-Leirosa-Monte Real	3
2	260/12	135880	339150	32,45	32,79	28,33	30,64	30,62	0,03	O10-Leirosa-Monte Real	2
3	260/16	135900	333900	48	46,06	43,06	44,70	44,69	0,85	O10-Leirosa-Monte Real	3
4	260/3	132570	333070	18	11,71	8,9	10,14	10,15	0,07	O10-Leirosa-Monte Real	8
5	260/4	134700	339040	25	15,74	11,02	13,23	13,02	0,36	O10-Leirosa-Monte Real	12
6	260/5	134050	337470	28	25,14	18,52	22,70	22,15	0,08	O10-Leirosa-Monte Real	5
7	260/6	133640	335960	19,03	18,18	9,28	15,28	14,76	1,23	O10-Leirosa-Monte Real	4
8	260/8	135020	339560	25	17,78	15,82	16,54	16,58	0,08	O10-Leirosa-Monte Real	8
9	261/1	136300	338400	35	34,93	29,73	33,01	32,83	0,58	O10-Leirosa-Monte Real	2
10	261/11	137300	340000	31,35	29,9	27,03	29,09	28,96	0,48	O10-Leirosa-Monte Real	2
11	261/117	142130	334310	83	58,99	47,2	50,80	50,98	2,73	O10-Leirosa-Monte Real	32
12	261/119	142130	334311	83	82,44	75,85	78,00	78,07	0,33	O10-Leirosa-Monte Real	5
13	261/12	136400	339700	31,32	31,19	26,25	29,27	29,20	0,31	O10-Leirosa-Monte Real	2
14	261/120	141300	334420	66,01	61,69	50,03	50,03	51,53	3,76	O10-Leirosa-Monte Real	16
15	261/121	141300	334421	66,01	49,72	36,62	41,15	41,65	1,12	O10-Leirosa-Monte Real	25
16	261/144	139169	334885	54	41,06	39,13	40,36	40,28	0,31	O10-Leirosa-Monte Real	14
17	261/146	139162	334900	54	41	40,7	40,70	40,82	0,15	O10-Leirosa-Monte Real	13
18	261/147	138963	335747	55	45,11	43,25	43,25	43,71	0,93	O10-Leirosa-Monte Real	12
19	261/148	138241	336230	50	45,66	41,13	43,33	43,34	1,18	O10-Leirosa-Monte Real	7
20	261/149	138231	336231	50	44,52	43,34	44,10	44,00	0,17	O10-Leirosa-Monte Real	6
21	261/145	140400	333800	60	49,98	40,32	44,65	44,65	3,18	O10-Leirosa-Monte Real	15
22	261/150	139216	333854	61	48,12	40,54	45,40	45,27	1,52	O10-Leirosa-Monte Real	16
23	261/151	139235	333857	61	46,72	45,81	46,43	46,33	0,05	O10-Leirosa-Monte Real	15
24	261/152	140306	334844	56,58	37,93	35,88	37,07	37,00	0,85	O10-Leirosa-Monte Real	20
25	261/153	143863	339850	100	61,51	55,36	56,56	56,82	2,78	O29-Louriçal	43
26	261/154	144076	336120	100	73,78	71,17	73,13	72,91	0,06	O29-Louriçal	27
27	261/17	139500	335400	62	48,3	39,81	44,03	44,18	1,49	O10-Leirosa-Monte Real	18
28	261/19	138000	335400	43,09	40,69	31,54	37,22	37,14	1,04	O10-Leirosa-Monte Real	6
29	261/22	138100	334900	50	40,47	34,52	38,34	38,33	1,33	O10-Leirosa-Monte Real	12
30	261/23	136660	334200	47,56	45,72	28,76	42,36	42,37	6,48	O10-Leirosa-Monte Real	5
31	261/24	139040	334890	51,67	43,92	34,62	40,06	39,95	1,27	O10-Leirosa-Monte Real	12
32	261/26	138190	333680	52,35	45,35	35,31	39,15	39,36	0,87	O10-Leirosa-Monte Real	13
33	261/27	142800	334200	110	99,88	83,99	92,24	91,90	6,47	O10-Leirosa-Monte Real	18
34	261/28	140200	334900	56,58	43,36	33,11	37,40	37,58	2,45	O10-Leirosa-Monte Real	19
35	261/3	137400	337700	39,6	39,03	33,86	38,06	37,58	0,79	O10-Leirosa-Monte Real	2
36	261/4	136300	337200	40	38,78	34,47	36,80	36,77	0,85	O10-Leirosa-Monte Real	3
37	261/63	138050	334870	50	40,21	32,35	36,36	36,43	0,15	O10-Leirosa-Monte Real	14
38	261/64	137240	337030	42,07	39,55	33,05	37,61	37,37	0,10	O10-Leirosa-Monte Real	4
39	261/65	136900	337200	40	38,5	34,88	37,18	37,16	1,10	O10-Leirosa-Monte Real	3
40	262/2	161690	337940	48	44,81	41,48	42,17	42,26	0,72	O29-Louriçal	6
41	272/20	134300	329160	60	51,87	48,36	49,95	50,02	0,07	O10-Leirosa-Monte Real	10
42	273/36	136660	328430	64	54,36	48,96	52,67	52,62	2,34	O10-Leirosa-Monte Real	11
43	273/8	136480	328400	64	56,52	41,39	55,37	52,60	7,20	O10-Leirosa-Monte Real	9
44	284/6	132850	312310	100	72	56,56	60,68	62,32	4,17	O12-Vieira de Leiria-Marinha Grande	39
45	285/106	137386	315303	29	5,75	-1,71	1,31	1,58	1,26	O12-Vieira de Leiria-Marinha Grande	28
46	296/3	132637	302224	167	134,6	112,69	114,58	116,15	0,44	O18-Maceira	52
47	296/57	134500	303100	160	145,44	122,42	125,95	127,39	0,67	O18-Maceira	34
48	296/58	132836	308414	100	29,64	23,41	26,78	26,66	1,81	O12-Vieira de Leiria-Marinha Grande	73
49	296/59	132788	308414	100	99,07	94,82	95,50	96,43	1,36	O12-Vieira de Leiria-Marinha Grande	5
50	297/18	143760	309000	80	71,51	65,84	67,85	67,99	0,70	O14-Pousos-Carangejeira	12
51	297/25	138980	300460	117	109,93	102,13	107,62	106,85	2,63	O19-Alpedriz	9
52	297/32	145506	302022	170	0	0	0,00	0,00	0,00	O20-Maçiço calcário estremenho	170
53	297/4	140800	304350	41	40,91	39,23	39,66	39,72	0,10	O0- Orla Ocidental indiferenciado	1
54	297/94	140840	303070	54	51,69	46,39	49,57	49,48	0,31	O0- Orla Ocidental indiferenciado	4
55	298/12	160120	306540	190	188,95	181,78	184,43	184,86	2,35	O15-Ourém	6
56	298/18	161390	307800	183	174,03	170,35	171,90	172,02	0,96	O15-Ourém	11
57	298/19	158100	300900	220	187,81	187,51	187,66	187,66	0,15	O15-Ourém	32
58	298/28	161900	306300	182	162,3	157,67	160,69	160,78	0,92	O15-Ourém	21
59	298/48	164948	305707	190	156,49	153,62	154,57	154,49	1,29	O15-Ourém	35
60	298/49	162048	304222	150	150,85	150	150,00	150,11	0,43	O15-Ourém	0
61	298/50	157115	305248	232	185,92	181,72	182,78	182,67	0,80	O15-Ourém	49
62	298/51	0	0	187	185,82	181,19	182,83	183,00	0,96	O15-Ourém	4
63	299/112	0	0	108	110,17	106,32	107,82	107,92	1,05	O15-Ourém	0
64	299/80	168280	300900	101	101,45	100,01	101,00	100,97	0,31	O15-Ourém	0
65	307/1	124500	298760	94	85,68	80,85	82,88	83,08	1,71	O0- Orla Ocidental indiferenciado	11
66	307/123	124650	298600	100	93,18	86,4	88,44	88,79	0,26	O0- Orla Ocidental indiferenciado	12
67	307/131	130700	299200	98	65,05	13,13	38,64	38,26	0,00	O19-Alpedriz	59
68	307/134	130325	292300	58	58	58	58,00	58,00	0,00	O19-Alpedriz	0
69	307/135	130875	296300	72	72	72	72,00	72,00	0,00	O19-Alpedriz	0
70	307/136	130100	292700	50	50,5	50	50,00	50,01	0,25	O19-Alpedriz	0
71	308/2	141180	292130	13	11,36	-9,06	3,28	2,90	5,95	O0- Orla Ocidental indiferenciado	10
72	308/21	142030	290730	215	209,57	181,09	198,97	199,19	1,58	O0- Orla Ocidental indiferenciado	16
73	308/51	137483	297179	149	107,16	80,87	89,41	91,51	6,17	O19-Alpedriz	60
74	308/54	136722	296179	120	109,91	77,26	92,74	92,92	10,99	O19-Alpedriz	27
75	309/43	0	298046	143	143,45	140,38	141,86	141,86	0,14	O15-Ourém	1
76	317/1	130250	285060	50	50,4	47,25	49,08	49,08	0,12	O20-Maçiço calcário estremenho	1
77	317/225	129730	280920	169	136,15	53,2	91,89	94,37	27,69	O20-Maçiço calcário estremenho	77
78	317/235	132130	284200	152	70,31	30	43,93	45,35	8,95	O20-Maçiço calcário estremenho	108
79	317/248	134420	287100	160	68,7	68,7	68,70	68,70	0,00	O20-Maçiço calcário estremenho	91
80	318/2	141660	287000	414	403,12	370,59	402,24	399,69	0,15	O20-Maçiço calcário estremenho	12
81	327/72	128730	274200	180	172,56	80,69	140,69	135,48	10,84	O20-Maçiço calcário estremenho	39

### Anexo 3- Informação sobre a classificação dos parâmetros A, I e C

período geológico	designação	A	I	C
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
PLISTOCÉNICO	Areias e cascalheiras	8	8	4
PLISTOCÉNICO	Areias e cascalheiras	8	8	4
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
PALEOGÉNICO	Conglomerados, arenitos, calcários brancos, margas avermelhadas	6	6	1
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
PLISTOCÉNICO	Areias e cascalheiras	8	8	4
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
JURÁSSICO-TRIÁSICO	Grês vermelhos (de Silves), conglomerados, margas, calcários geralmente dolomíticos	4	4	1
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
HOLOCÉNICO	Aluviões	6	6	1
JURÁSSICO	Calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
PALEOGÉNICO	Conglomerados, arenitos, calcários brancos, margas avermelhadas	6	6	1
HOLOCÉNICO	Dunas e areias eólicas	7	8	4
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
	Teschenitos	3	3	1
	Teschenitos	3	3	1
PALEOGÉNICO	Conglomerados, arenitos, calcários brancos, margas avermelhadas	6	6	1
JURÁSSICO-TRIÁSICO	Grês vermelhos (de Silves), conglomerados, margas, calcários geralmente dolomíticos	4	4	1
HOLOCÉNICO	Aluviões	6	6	1
MIO-PLISTOCÉNICO	Arenitos, calcários mais ou menos margosos, areias, cascalheiras, argilas	6	6	2
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
PALEOGÉNICO	Conglomerados, arenitos, calcários brancos, margas avermelhadas	6	6	1
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
JURÁSSICO	Conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
JURÁSSICO	Calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
PLIO-PLISTOCÉNICO	Areias, calhaus rolados, arenitos pouco consolidados, argilas	6	6	2
	Doleritos	4	4	2
JURÁSSICO-TRIÁSICO	Grês vermelhos (de Silves), conglomerados, margas, calcários geralmente dolomíticos	4	4	1
PALEOGÉNICO	Arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	6	6	1
JURÁSSICO	Calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos, margas	4	4	1
HOLOCÉNICO	Depósitos de vertente, areias superficiais e de terraço	8	8	4