

Desenvolvimento de uma checklist para avaliação de perímetros de proteção em águas subterrâneas

Mário Jorge Sousa Silva

Mestrado em Geologia

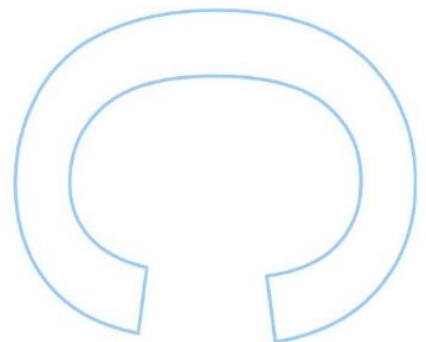
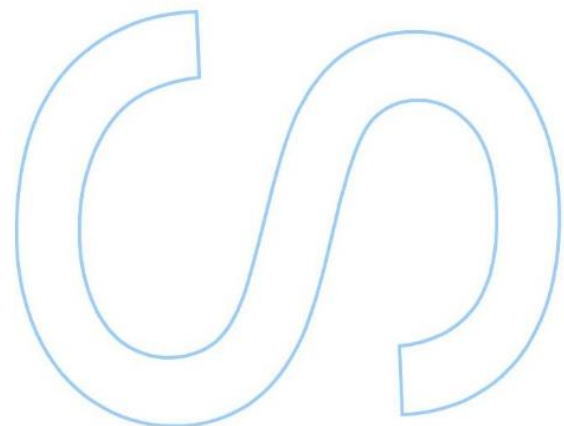
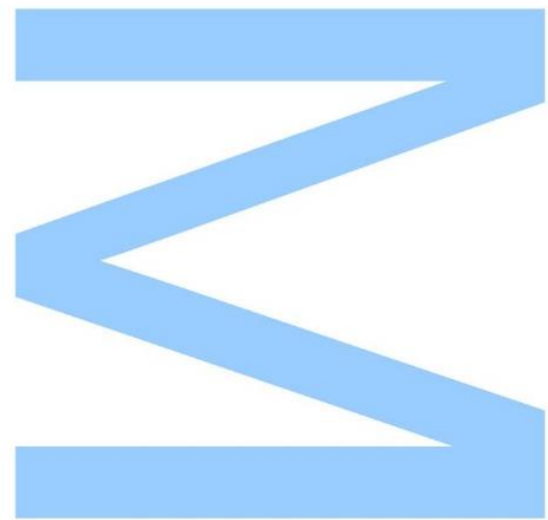
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

2016

Orientador

António José Guerner Dias

Faculdade de Ciências da Universidade

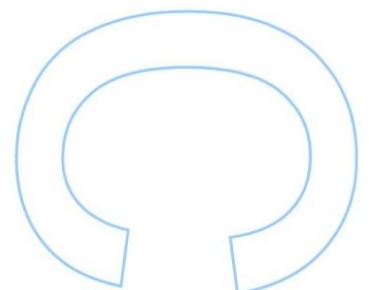
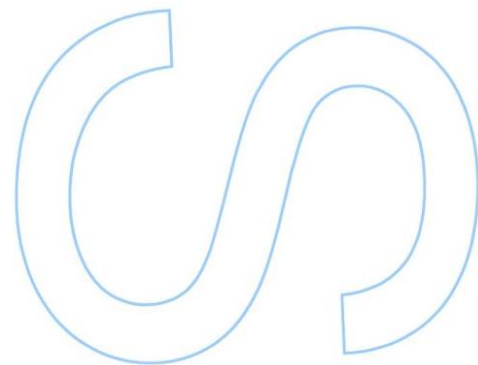
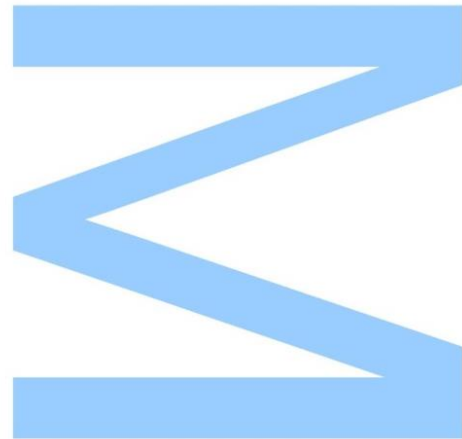




Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____ / ____ / ____



Resumo

A água é um recurso essencial à vida e, por isso, deve ser preservada. Na sociedade atual o uso desta, seja para consumo humano, industrial, agrícola ou outros, implica a captação de grandes quantidades e, por conseguinte, a construção de estruturas capazes de suportar essa extração. A manutenção da qualidade das águas captadas é essencial e no caso das águas subterrâneas a proteção é efetuada através da implementação de perímetros de proteção.

A determinação de cada perímetro é feita num estudo/proposta com base nas características geológicas e hidrogeológicas da zona envolvente, bem como tendo em conta o risco de contaminação das águas. O estudo deve ainda ter em conta as bases legais do país onde o mesmo será aplicado. Para que o perímetro possa ser posto em prática o estudo/proposta tem de ser entregue e analisado pelas entidades competentes para que o aval da sua implementação seja efetuado.

É nesta análise que se baseia esta dissertação, sendo descritas as características geológicas, hidrogeológicas, fontes poluentes, bem como as bases legais que incorporam a fundamentação das propostas, fazendo a sua transposição para uma checklist que tem como objetivo facilitar todo o processo de análise e deliberação da proposta apresentada.

Palavras-Chave: águas subterrâneas, perímetros de proteção, checklist

Abstract

The water is an essential resource to life and therefore must be preserved. Actual society this water has all kind of uses like human consumption, industry, agriculture and others. This use implies the caption of enormous quantities of water and the construction of structures capable of extracting those amounts.

The water quality must be preserved and in the case of groundwater aquifers the use of protection perimeters is the way to go. To determine the perimeter is necessary a study/proposal to be made. This is based on geological and hydrogeological characteristics of the zone and the contamination risk. It must also fulfill all the country laws. This proposal needs to be analyzed by the delegated entities before it makes the implementation phase.

It's this analysis that makes the base of this dissertation, and it includes a description of all the geological and hydrogeological characteristic, pollutants and laws that must incorporate the proposal, transposing them to a checklist made to make the analysis and deliberation of the proposal easier.

Keywords: groundwater, protection perimeter, checklist

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Estrutura do trabalho	2
2. Estado da arte	3
2.1 Reservatórios de águas subterrâneas.....	3
2.2 Caracterização de aquíferos	4
2.2.1 Geologia	4
2.2.2 Hidrogeologia.....	5
2.2.3 Recarga de uma captação	8
2.2.4 Quimismo e potabilidade	10
2.3 Vulnerabilidade e risco de poluição.....	11
2.3.1 Fontes poluentes	11
2.3.2 Tempo de percurso dos poluentes.....	12
2.3.3 Risco e poder autodepurador do terreno.....	13
2.3.4 Vulnerabilidade	17
2.4 Perímetros de proteção	21
2.4.1 Restrições.....	22
3. Proposta de checklist.....	25
3.1 Descrição de parâmetros e checklist de padrão colorido	26
3.2 Checklists individuais.....	31
3.2.1 Águas de consumo local	31

3.2.2 Águas minerais naturais/nascente	33
4. Casos de estudo.....	35
4.1 Caso de estudo A	35
4.2 Caso de estudo B	37
4.3 Caso de estudo C	39
4.4 Caso de estudo D	41
5. Considerações finais.....	44
6. Bibliografia	45
Anexo 1 - Métodos de definição de perímetros.....	48
Anexo 2 - Outros índices de vulnerabilidade	53

Índice de Figuras

Figura 1 – Superfícies equipotenciais e gradiente hidráulico.....	7
Figura 2 – Influência da anisotropia nas linhas de fluxo hídrico (A – Fluxo em Meio Isotrópico; B – Fluxo em Meio Anisotrópico)	8
Figura 3 - Perfil vertical e em planta das áreas de chamada, de influência e de alimentação de uma captação	9
Figura 4 - Exemplo de diferentes tempos de percurso em cada perímetro	12
Figura 5 - Esquema para determinar o índice GOD	54
Figura 6 – Classes de vulnerabilidade no índice AVI	55
Figura 7 – Classes de vulnerabilidade no índice AVI	55

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Pesos definidos para cada parâmetro do índice de zona vadosa.....	13
Tabela 2 – Índices e níveis de risco associados ao índice de zona vadosa	14
Tabela 3 – Índices da condutância vertical para o índice de zona vadosa	14
Tabela 4 – Índice de declives da superfície topográfica para o índice de zona vadosa	15
Tabela 5 – Índice de cobertura de solo para o índice de zona vadosa.....	15
Tabela 6 - Índice do uso do solo para o índice de zona vadosa.....	16
Tabela 7 - Pesos atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC.....	18
Tabela 8 – Índices para o parâmetro D, profundidade do topo do aquífero, para o índice DRASTIC.	18
Tabela 9 - Índices para o parâmetro R, recarga do aquífero, para o índice DRASTIC	18
Tabela 10 - Índices para o parâmetro A, material do aquífero, para o índice DRASTIC	19
Tabela 11 - Índices para o parâmetro S, tipo de solo, para o índice DRASTIC	19
Tabela 12 – Índices para o parâmetro T, topografia, para o índice DRASTIC.....	20
Tabela 13 - Índices para o parâmetro I, influência da zona vadosa, para o índice DRASTIC.....	20
Tabela 14 - Índices para o parâmetro C, Condutividade Hidráulica do Aquífero, para o índice DRASTIC	20
Tabela 15 – Checklist, cruzando os parâmetros com as duas tipologias de águas definidas.	29
Tabela 16 – Checklist de elementos obrigatórios para águas de consumo local.....	31
Tabela 17 - Checklist de elementos essenciais para águas de consumo local.....	32
Tabela 18 - Checklist de elementos acessórios para águas de consumo local	32

Tabela 19 - Checklist de elementos obrigatórios para águas minerais naturais/nascente	33
Tabela 20 - Checklist de elementos essenciais para águas minerais naturais/nascente	34
Tabela 21 - Checklist de elementos acessórios para águas minerais naturais/nascente	34
Tabela 23 – Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo A.....	36
Tabela 24 - Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo A.....	36
Tabela 25 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo A	37
Tabela 26 - Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo B.....	38
Tabela 27 - Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo B.....	39
Tabela 28 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo B	39
Tabela 29 - Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo C.....	40
Tabela 30- Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo C	41
Tabela 31 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo C	41
Tabela 33 - Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo D.....	42
Tabela 34 - Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo D	43
Tabela 35 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo D	43
Tabela 37 – Vulnerabilidade segundo o método EPPNA	53

1. Introdução

A água é um bem essencial à vida sendo uma das bases das civilizações desde o início dos tempos. A água é o composto mais abundante nos seres vivos e dependemos dela para sobreviver, seja por consumo direto ou indireto, como seja o seu uso agrícola ou o uso industrial permitindo a produção de alimentos.

A água é, no entanto, um bem vulnerável podendo transportar muitas substâncias tóxicas para o organismo. Estas substâncias poluentes podem ser provenientes de fontes naturais ou antropogénicas, sendo estas últimas as que normalmente têm impactos mais elevados. Como atividades antropogénicas pode-se mencionar, por exemplo, as atividades agropecuárias, as atividades industriais e a ocupação urbana.

Para a proteção e manutenção do bom estado das águas é necessário adotar várias medidas. As medidas não são universais, cada caso tem características específicas, sejam elas condições climáticas, hidrológicas, hidrogeológicas, tipologia das massas de água e dos sistemas de aquíferos, entre outras.

Neste trabalho vamos tratar da proteção de águas subterrâneas e, para o efeito, vão ser explanadas características que influenciam o fluxo hídrico, bem como apresentar critérios e métodos de avaliação de vulnerabilidade e risco das massas de água. Estas características influenciam diretamente a determinação dos perímetros de proteção bem como a sua forma.

Para o conhecimento dos perímetros de proteção vão ser mencionadas a sua divisão em zonas, bem como as proibições no seu interior e alguns dos métodos de determinação dos mesmos.

1.1 Objetivos

As águas subterrâneas são um bem bastante vulnerável às fontes de poluição e, também, um meio em que, devido à baixa velocidade de circulação das águas, a presença de poluentes provoca danos que duram longos períodos de tempo. Os métodos utilizados para a remoção de poluentes são muito complexos e nem sempre eficazes e, por isso, a utilização das águas requer um controlo e prevenção da poluição extremamente eficaz. Grande parte das empresas exploradoras de águas subterrâneas apresentam propostas de perímetros de proteção para serem analisadas e aprovadas, sendo este processo, muitas vezes, complexo e moroso.

Assim o objetivo principal da criação desta checklist é agilizar o processo de análise e pré-análise das mesmas, evitando assim a acumulação de processos e facilitando a proteção dos aquíferos e das captações desde os primeiros momentos.

1.2 Estrutura do trabalho

Após este capítulo de introdução, segue-se um conjunto de quatro capítulos onde se explana o trabalho que foi desenvolvido com esta dissertação.

O 2º capítulo centra-se na exposição de conceitos relacionados com a circulação subterrânea das águas e as variáveis das quais esta depende, bem como a interação dos aquíferos com poluentes e a apresentação de métodos que permitem determinar o risco e a vulnerabilidade das massas de água subterrânea.

No 3º capítulo os conceitos são divididos de acordo com a sua importância na definição de um perímetro de proteção. É ainda explanada a pertinência de cada conceito perante a categoria, seguindo-se a apresentação da proposta de checklist.

Com a checklist definida passamos então, no 4º capítulo, a uma análise de casos específicos, visando uma validação da proposta apresentada bem como a deteção de uma possível escassez de dados presentes nos casos estudados.

No 5º e último capítulo tecem-se algumas considerações sobre o trabalho desenvolvido e apresentam-se propostas para trabalhos futuros.

Termina-se este relatório com a apresentação da bibliografia utilizada e com alguns anexos considerados relevantes.

2. Estado da arte

Para uma correta avaliação e conseqüente delimitação dos perímetros de proteção das águas subterrâneas é necessário ter presente uma série de conceitos e definições.

Temos então que começar por entender o ciclo hidrológico. Neste ciclo a água assume três estados, sólido, líquido e gasoso que interagem entre si. A água presente nos oceanos, rios, mares, etc. evapora passando ao estado gasoso. Essa água, eventualmente, irá chegar ao solo sobre a forma de precipitação, líquida ou sólida. Esta água pode seguir três distintos destinos, evaporação ou evapotranspiração por intermédio do metabolismo das plantas, escorrência superficial e infiltração no solo. O último destino, através da percolação, irá alimentar as reservas subterrâneas. Assim, no interior dos solos e rochas subjacentes podemos determinar duas zonas principais, a zona saturada e a zona vadosa (zona não saturada).

2.1 Reservatórios de águas subterrâneas

A zona saturada, dependendo das suas características, em termos de porosidade e permeabilidade, pode ser designada como aquífero, aquícludo, aquícardo e aquífugo. Bear, J., 1979, define cada um destes reservatórios da seguinte forma:

Um aquífero é uma formação geológica que consegue armazenar água pelo facto de possuir uma boa porosidade e, ao mesmo tempo, como apresenta uma boa permeabilidade permite a sua extração de forma economicamente rentável.

Um aquícardo é uma formação geológica com capacidade para armazenar água, uma vez que a sua porosidade é razoável, mas a extração é muito difícil, uma vez que a sua permeabilidade é relativamente reduzida.

Um aquícludo é uma formação geológica que pode armazenar alguma água, uma vez que apresenta alguma porosidade, mas como a sua permeabilidade é muito baixa, não permite a sua circulação, a extração não é rentável.

Finalmente, um aquífugo é uma formação geológica de porosidade praticamente nula, pelo que não consegue armazenar água e, conseqüentemente, não há extração. É o caso de maciços rochosos compactos e são.

Dentro da classe dos aquíferos podem considerar-se três subclasses, aquíferos livres, aquíferos confinados e aquíferos semiconfinados. Bear, J., 1979, classifica cada subclasse da seguinte forma:

Um aquífero livre é um aquífero que se desenvolve desde a superfície até à formação geológica subjacente estando exposto à infiltração em toda a sua extensão.

Um aquífero confinado está limitado no seu topo e na sua base por camadas pouco permeáveis a impermeáveis, pelo que a infiltração pode ocorrer numa das extremidades laterais da formação geológica.

Um aquífero semiconfinado está limitado por camadas pouco permeáveis, mas que em condições específicas pode efetuar trocas, quer recebendo água das camadas superiores quer cedendo-a às camadas inferiores.

2.2 Caracterização de aquíferos

2.2.1 Geologia

A litologia como substrato no qual o fluxo hídrico ocorre, funciona como a base de todo o sistema e, as suas características e interações com o meio, condicionam o mesmo.

Alteração

Os agentes químicos e físicos presentes no meio ambiente interagem com a litologia desagregando e decompondo a rocha, alterando algumas das propriedades que lhe eram inatas, tais como a dureza, a cor, ou, em termos de propriedades hidrogeológicas, a transmissividade ou a porosidade.

Morfologia

Os processos de alteração controlam a modelação da superfície terrestre. A deposição dos materiais desagregados em zonas de menor altitude contribui para a formação dos solos, suavizando o declive. Esse declive condiciona o fluxo hídrico, sendo muitas vezes determinante na definição das bacias e zonas de contribuição.

Diaclasamento/ Fracturação

O diaclasamento e a fracturação condicionam o fluxo em zonas profundas e maciças. Uma zona com elevada fracturação representa normalmente um local de maior potencial hidrogeológico. No entanto a alteração do maciço poderá formar uma caixa de falha argilosa que irá funcionar como barreira à circulação subterrânea. Nestas últimas condições o meio apresentará características equivalentes a um meio impermeável e pouco poroso, Carvalho J.M., 2006.

As falhas, o seu agrupamento em famílias com as suas orientações à escala regional, possuem uma maior influência a nível do fluxo hídrico quando em comparação com o diaclasamento.

2.2.2 Hidrogeologia

A circulação de água subterrânea é complexa e o seu comportamento é condicionado pelo substrato litológico e pelas suas características, como a porosidade, permeabilidade, transmissividade ou anisotropia.

Porosidade

A porosidade aplica-se apenas quando a litologia do meio é porosa e define-se como a razão entre o volume de vazios (espaços intergranulares não preenchidos por matéria sólida) e o volume total. Pode ser expressa pela fórmula:

$$\left(n = \frac{V_v}{V_t} \right)$$

Onde:

n = porosidade

V_v = volume vazios (m³)

V_t = volume total (m³)

Segundo Custodio & Llamas, 2001, os fatores que influenciam a porosidade podem ser reunidos em três grupos:

- Forma dos grãos constituintes
- Disposição dos grãos
- Tamanho do grão

A porosidade total não é um valor que seja, por si só, indicativo de possível aquífero, sendo o valor que se deve tomar em conta o de porosidade eficaz, pois existe a possibilidade de haver uma porosidade de 40% mas constituída principalmente por argilas o que transforma a formação geológica num aquícludo e, noutra situação, termos uma porosidade de 15%, em arenitos, estando em presença de um aquífero. A porosidade eficaz é expressa pela fórmula:

$$n_e = \frac{V_g}{V_t}$$

Onde:

n_e = porosidade eficaz

V_g = volume de água drenada por gravidade(m³)

V_t = volume total (m³)

A extração de água em aquíferos livres provoca o esvaziamento dos poros, pelo que a água que pode ser extraída corresponde à porosidade eficaz.

No entanto, para aquíferos confinados não ocorre o esvaziamento dos poros, mas sim uma diminuição de pressão nos mesmos pelo que terá de se usar o conceito de coeficiente de armazenamento (este coeficiente é também aplicável a aquíferos livres sendo igual à porosidade eficaz).

Permeabilidade / Condutividade Hidráulica

A permeabilidade é também um fator importante na medida em que dela depende o caudal da formação geológica. Permeabilidade define-se como “o volume de água que passa por unidade de área num meio poroso quando está sujeito a um gradiente hidráulico unitário”. Assim um meio bastante permeável indica um caudal elevado. Esta característica pode ser calculada de modo rigoroso pela lei de Darcy, tendo o nome de condutividade hidráulica.

Segundo Fetter, C.W., 2001, a condutividade hidráulica é calculada a partir da expressão:

$$\frac{Q}{A} = K \times i$$

Onde:

Q = caudal (m³)

A = secção unitária (m²)

K = condutividade hidráulica (m/dia)

i = gradiente hidráulico ($i = \frac{\Delta h}{\Delta L}$, em que Δh (m) é a diferença de alturas final e inicial e ΔL (m) o comprimento percorrido)

Transmissividade

A transmissividade é uma característica inerente a todos os aquíferos, ao contrário das duas características anteriores que são muito importantes nos meios porosos, diminuindo a sua importância em meios fissurados. Custodio & Llamas, 2001, definem transmissividade como a “quantidade de água que escoar horizontalmente

num aquífero com uma determinada espessura quando sujeito a uma condutividade hidráulica com gradiente unitário”. Pode ser expressa pela fórmula:

$$T = b \times K$$

Onde:

T = transmissividade (m²/dia)

b = espessura do aquífero (m)

K = condutividade hidráulica (m/dia)

Assim, para um aquífero com a mesma altura, uma transmissividade maior significa um caudal maior.

Gradiente hidráulico

O gradiente hidráulico é calculado a partir de superfícies equipotenciais, isto é, superfícies que apresentam a mesma energia potencial. Esta energia potencial é também conhecida como carga hidráulica e influencia o fluxo hídrico que é efetuado das zonas de maior carga hidráulica para as de menor carga (ver Figura 1).

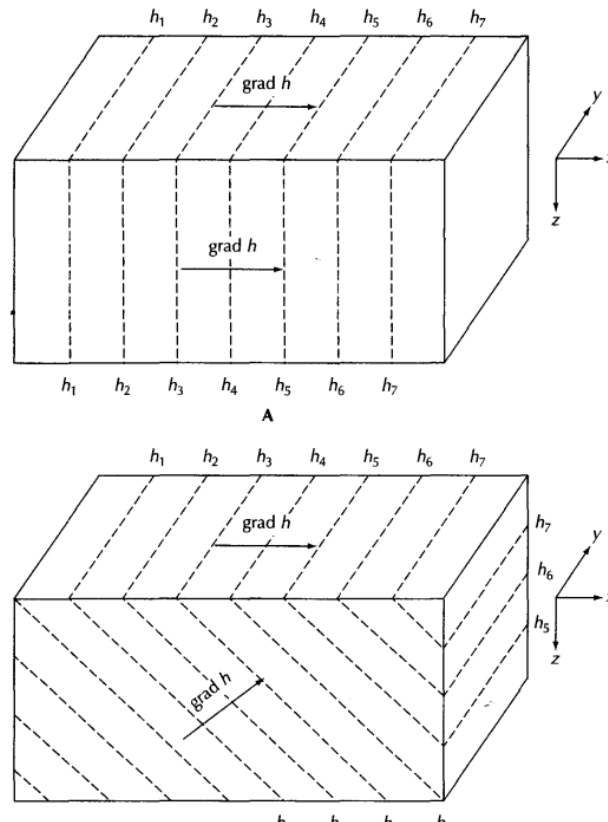


Figura 1 – Superfícies equipotenciais e gradiente hidráulico
Extraído de: Fetter, C.W., (2001)

Anisotropia

Conjuntamente com o gradiente hidráulico, a anisotropia do material que constitui o aquífero determina as direções de fluxo.

Um meio aquífero isotrópico não apresenta direções preferenciais de circulação da água, sendo esta apenas condicionada pelo gradiente hidráulico e, assim, o fluxo hídrico é paralelo ao gradiente.

Um meio aquífero anisotrópico, por outro lado, pode apresentar direções preferenciais para a circulação da água, pelo que as direções de fluxo podem fazer um pequeno ângulo com a direção do gradiente hidráulico (ver Figura 2).

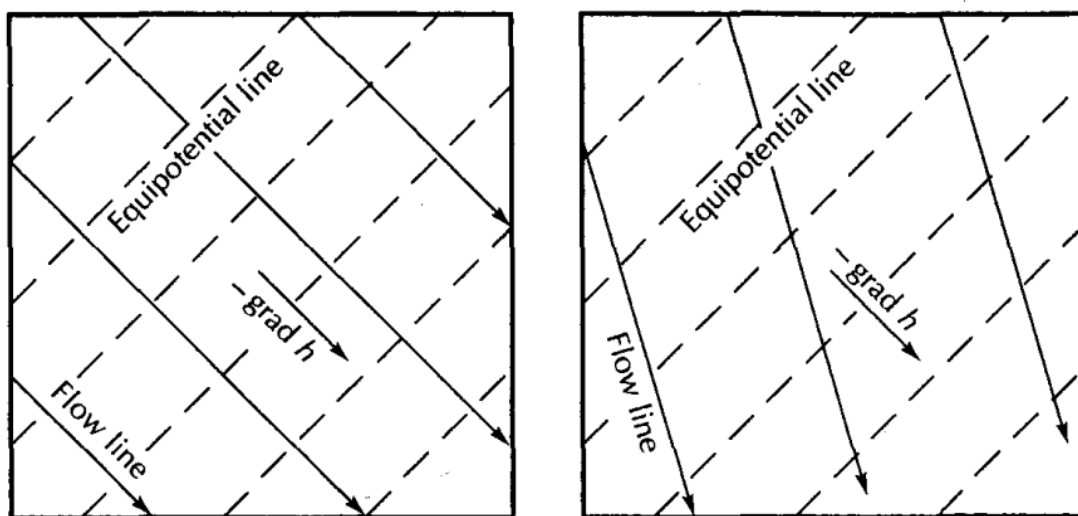


Figura 2 – Influência da anisotropia nas linhas de fluxo hídrico (A – Fluxo em Meio Isotrópico; B – Fluxo em Meio Anisotrópico)

Extraído de: Fetter, C.W., (2001)

2.2.3 Recarga de uma captação

Em condições naturais, o fluxo hídrico encontra-se em estado de equilíbrio, pelo que a recarga e a descarga são, em termos anuais, equivalentes.

No entanto, com o início da extração de água numa captação, aqueles parâmetros podem ser alterados e o fluxo subterrâneo desregulado somando-se ao valor de descarga a água extraída. Este aumento dos valores “descarga” e a manutenção de valores de recarga levam a uma diminuição das reservas armazenadas e ao conseqüentemente rebaixamento do nível piezométrico.

Esse rebaixamento, durante determinado período de tempo, apresenta-se com uma geometria cónica. A área ocupada pelo cone de rebaixamento é tão maior quanto maior for o caudal a ser extraído pela captação.

Este efeito provoca um aumento da área de influência na qual a velocidade do fluxo é superior. Devido ao aumento desta velocidade, o tempo de permanência da água no aquífero diminui consideravelmente e, existindo substâncias poluentes na área de alimentação, estas podem atingir a captação. É necessário serem conhecidos os tempos de percurso em toda a zona de contribuição de determinada captação.

Assim, em torno de cada captação são consideradas três áreas: área de chamada, área de influência e área de contribuição. Cada uma delas é definida por uma ou mais alterações físicas que influenciam a captação.

Área de chamada

Compreende toda a zona que em simultâneo se observa um cone de rebaixamento e um fluxo hídrico direcionado para a captação

Área de influência

Área onde se observa um cone de rebaixamento. É de salientar que nesta zona o fluxo pode não ser unicamente direcionado à captação.

Área de alimentação

Entre as três áreas é a que possui uma área superior e que usualmente se estende até à linha de cumeadas que separa distintas bacias hidrográficas. Corresponde a toda a área pertencente à bacia hidrográfica e que possui ligação hidráulica com a captação, contribuindo para a sua alimentação.

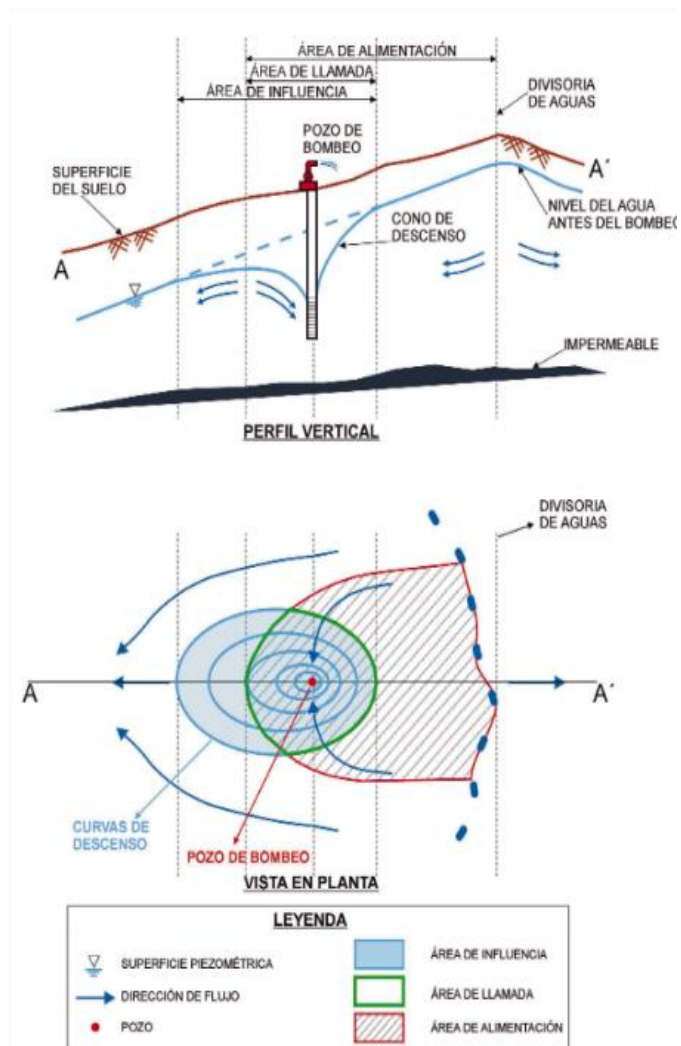


Figura 3 - Perfil vertical e em planta das áreas de chamada, de influência e de alimentação de uma captação
Extraído de: Moreno Merino et al., 1991 (modificado por USEPA)

2.2.4 Quimismo e potabilidade

Influenciadas pelas características do meio físico por onde as águas circulam, elas vão registando alterações químicas. A composição química das águas depende, assim, de determinados fatores como a sua composição inicial, o quimismo da rocha por onde circulam, a atividade biológica, a influência antrópica, etc..

Existe uma grande variedade de características que podem ser analisadas, sendo, entre as mais importantes:

- Temperatura: aquíferos a pequena profundidade possuem uma temperatura próxima da temperatura média anual do ar, enquanto aquíferos profundos apresentam temperaturas que podem acompanhar o gradiente geotérmico regional;
- Condutividade Elétrica: corresponde à facilidade de condução de corrente elétrica, sendo tão maior quanto maior for o teor de sais dissolvidos;
- pH: representa a acidez da água medida como a concentração do ião hidrogénio;
- Mineralização total: massa total dos minerais presentes na água por unidade de volume;
- Dureza: considera o teor em sais de cálcio e magnésio presentes na água e determina a capacidade de neutralização de sabão;
- Alcalinidade: considera, principalmente, o teor em carbonatos e bicarbonatos e determina a capacidade da solução para neutralizar ácidos;
- Carência química de oxigénio: avalia o teor de matéria orgânica oxidável a partir da capacidade da água para consumir oxigénio durante as reações químicas;
- Carência bioquímica de oxigénio: avalia a quantidade de oxigénio necessária para consumir a matéria orgânica presente por processos biológicos aeróbios.

Análises hidroquímicas regulares permitem avaliar variações nas características das águas ao longo do tempo, bem como detetar a ocorrência de possíveis contaminações.

2.3 Vulnerabilidade e risco de poluição

2.3.1 Fontes poluentes

As fontes poluentes podem ter origem natural ou antrópica, mas, no entanto, a origem natural é praticamente desprezável. A origem antrópica incorpora as seguintes divisões:

- Agricultura: composta por pesticidas, fertilizantes, herbicidas e dejetos animais;
- Indústria: composta por variadíssimas substâncias resultantes de processos de arrefecimento e limpeza com água, derrames por transportes, aterros ou armazenamento subterrâneo de ácidos, solventes etc., e processos mineiros;
- Residencial: maioritariamente importante por derrames acidentais provenientes de fossas sépticas, contendo, porém, muitas outras origens como armazenamento e uso impróprio de tintas, detergentes, químicos de piscinas, óleos, pesticidas, gasolina, etc..

Seja a poluição proveniente da agricultura, indústria ou a residencial, a sua posição em relação ao aquífero é extremamente importante. Tendo em conta o tempo de percurso base para a litologia em questão, quanto menor for a distância ao aquífero maior será o risco de poluição.

Assim, em termos de posição dos focos em relação ao aquífero podemos ter as seguintes origens:

- Origem superficial: substâncias como detergentes, fertilizantes, sal, químicos, etc., são derramadas na superfície. As substâncias são lixiviadas com ajuda de solventes sendo, o mais comum, normalmente água da chuva. Durante a lixiviação reações com a flora e a litologia poderão atenuar ou potenciar a sua toxicidade;
- Origem na zona vadosa: Em profundidade iremos encontrar fugas em aterros, tanques de armazenamento de combustíveis, poços mal construídos etc.. As substâncias aqui derramadas têm pouca ou nenhuma interação com a flora pelo que possuem uma maior suscetibilidade de poluir as águas subterrâneas;
- Origem na zona saturada: zona em que qualquer atividade poluente torna o sistema extremamente vulnerável. Nesta zona processos de

atenuação são praticamente inexistentes visto que a velocidade de transporte do poluente não é suficientemente lenta para reagir com o material envolvente.

2.3.2 Tempo de percurso dos poluentes

O tempo de percurso é considerado o tempo que um poluente leva a alcançar uma captação, partindo de qualquer ponto no interior da zona de contribuição.

Zonas com tempo de percurso igual são definidas com o uso de isócronas (linha que liga pontos a partir dos quais o tempo necessário até à receção da água na captação é igual).

Na determinação do tempo de percurso deve ser considerada a propagação na zona saturada e na zona vadosa. O tempo de percurso segundo o Decreto-Lei n.º 382/99, de 22 de Setembro determina valores mínimos a que deverão estar colocados os perímetros das zonas de proteção intermédia e alargada.

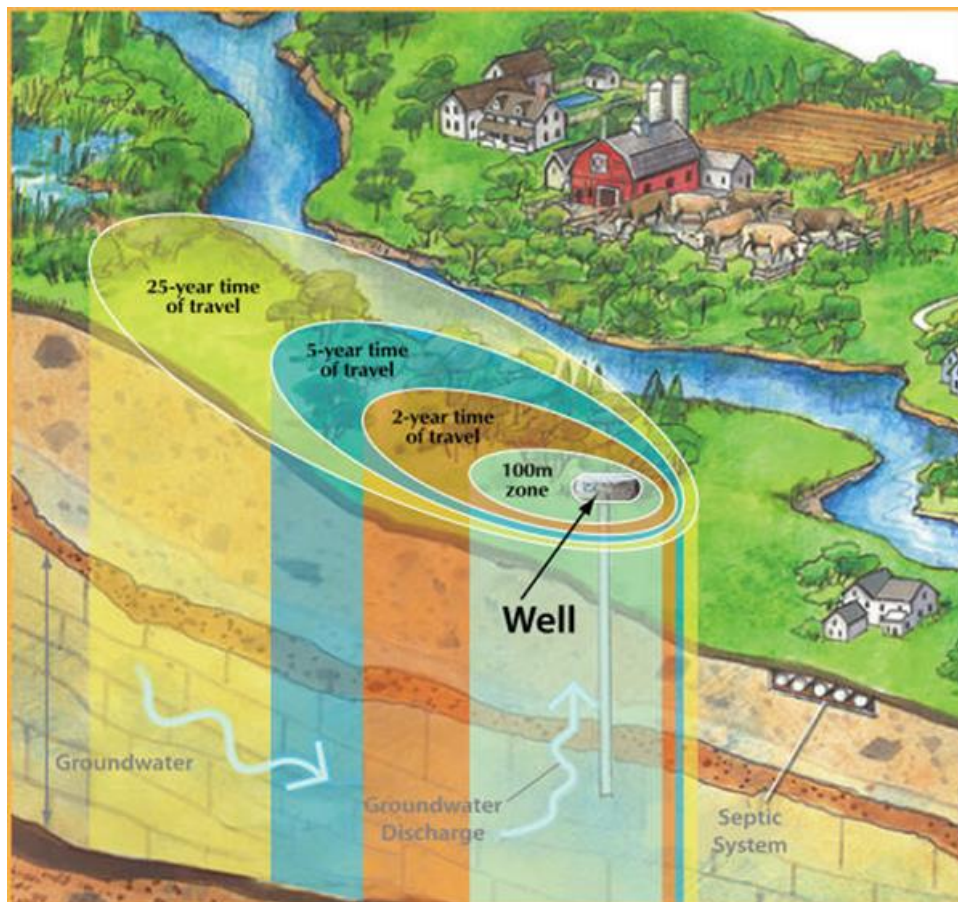


Figura 4 - Exemplo de diferentes tempos de percurso em cada perímetro
Extraído de: <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/eng/1398369474357>

2.3.3 Risco e poder autodepurador do terreno

O risco define-se como uma combinação dos efeitos da carga poluente, difusa ou pontual, com as características do meio. Durante o processo de recarga, a água, que é um solvente por excelência, efetua um percurso descendente na zona vadosa interagindo com os solos e rocha até chegar à zona saturada (aquífero). Estas interações podem ser benéficas por efeito de biodegradação, neutralização, filtração, mecânica, reações químicas, volatilização e dispersão, ou prejudiciais por solvência de substâncias já presentes no solo levando a um aumento das concentrações e, por isso, os aquíferos são considerados como potencialmente vulneráveis.

Assim, as características da zona vadosa são importantes na retenção de poluentes e, ao mesmo tempo, auxiliam na quantificação do risco a que um aquífero está sujeito, utilizando-se o índice de zona vadosa.

Índice de Zona Vadosa

Foi criado pelos Serviços Geológicos dos Estados Unidos (USGS) e publicado em Eimers et al. (2000), e utiliza os seguintes parâmetros:

- C - Condutância vertical da zona vadosa
- LS - Declive da superfície topográfica
- LC - Cobertura do solo
- LU - Uso do solo

Cada um destes parâmetros é quantificado de 1 a 10 e, posteriormente, multiplicado por um peso, isto é, a sua importância relativa no sistema.

O peso relativo pode variar entre 2 e 3 mas, os pesos standard são:

Tabela 1 – Pesos definidos para cada parâmetro do índice de zona vadosa

Parâmetro	C	LS	LC	LU
Peso	3	2	2	3

Assim o índice de zona vadosa é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$Izv = C_p \times C_i + LS_p \times LS_i + LC_p \times LC_i + LU_p \times LU_i$$

As siglas p e i são respetivamente peso e índice.

Os valores obtidos para este índice podem variar entre 10 e 100, apresentando, tal como pode ser observado na tabela 1, quatro níveis de risco.

Tabela 2 – Índices e níveis de risco associados ao índice de zona vadosa

Valor do Índice	Nível de risco
10 – 40	Baixo
40 – 70	Intermédio
70 – 90	Elevado
90 – 100	Muito elevado

Cada parâmetro possui um índice particular que se passa a descrever.

Parâmetro C - Condutância vertical da zona vadosa

A condutância vertical representa a capacidade de transmissão vertical de água e, neste caso, será aplicada à zona vadosa. Esta pode ser constituída por uma ou por diversas camadas e, para que determinar a condutividade do seu todo, é necessária a soma da condutividade individual das camadas. Assim, a condutância de determinada zona vadosa, pode ser determinada pela expressão:

$$\frac{1}{C} = \sum_1^n \left(\frac{L_i}{K_v \times A} \right)$$

Em que:

C = condutância (m²/dia)

K_v = condutividade hidráulica (m/dia)

A = área perpendicular à direção de escoamento (m²)

L_i = espessura da zona vadosa (m)

De acordo com O'Hara, 1996 in Eimers et al., 2000, a condutância vertical está dividida nas seguintes classes:

Tabela 3 – Índices da condutância vertical para o índice de zona vadosa

Condutância vertical (m ² /dia)	Índice
<0,013	1
0,014 – 0,026	2
0,027 – 0,052	3
0,053 – 0,103	4
0,104 – 0,206	5
0,207 – 0,413	6
0,414 – 0,826	7
0,827 – 1,652	8
1,653 – 3,303	9
>3,304	10

Parâmetro LS - Declive da superfície topográfica

A infiltração ou escoamento superficial estão condicionados pelo declive, com os declives suaves a favorecer a infiltração e os declives elevados o escoamento superficial. Tendo isto em conta segundo Eimers et al., 2000, podem ser definidos os declives que se apresentam na tabela 4.

Tabela 4 – Índice de declives da superfície topográfica para o índice de zona vadosa

Declive da superfície topográfica (%)	Índice
>50	1
21 – 50	3
11 – 20	5
6 – 10	7
3 – 5	9
<3	10

Parâmetro LC - Cobertura do solo

A cobertura do solo influencia o comportamento dos solos, facilitando ou prejudicando a infiltração. Eimers et al. (2000), desenvolveu diferentes classes para a cobertura de solo, estando as mesmas apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Índice de cobertura de solo para o índice de zona vadosa

Cobertura do solo	Descrição geral / exemplo	Índice
Comercial/Industrial	Solo utilizado para manufatura ou venda de bens de consumo	1
Água	Áreas cobertas de água, com pelo menos 25% de cobertura vegetal	2
Áreas húmidas com lenhosas	Áreas com floresta ou arbustos onde o solo ou substrato é periodicamente saturado	2
Áreas húmidas com vegetação emergente	Áreas com vegetação herbácea perene, onde o solo ou substrato é periodicamente saturado	2
Residencial de alta densidade	Áreas residenciais densas, em que a vegetação ocupa menos de 20% da área e a construção entre 80 a 100%	2
Residencial de baixa densidade	Principalmente áreas suburbanas, em que a construção cobre cerca de 30 a 80% da área	4
Transição	Áreas com alterações dinâmicas na sua cobertura	5
Pedreira/Minas a céu aberto/Saibreiras	Áreas de indústria mineira extrativa, com exposição significativa do solo	6
Agricultura	Áreas dominadas por vegetação plantada e/ou utilizada para produção	6
Solo esquelético	Rocha exposta, areia, gravilha ou outro material semelhante com pouca ou nenhuma vegetação	7
Outras herbáceas	Vegetação plantada para fins estéticos, lúdicos ou de controlo da erosão	8
Pastagem/Feno	Áreas dominadas por vegetação plantada e destinada à alimentação humana (legumes, etc) ou de gado	8

Cobertura do solo	Descrição geral / exemplo	Índice
Floresta de folha caduca	Áreas onde 75% ou mais das árvores perdem a folhagem simultaneamente	10
Floresta mista	Áreas cujas árvores não são em 75% ou mais caducas nem perenes	10
Floresta perene	Áreas onde 75% ou mais das árvores mantêm a folhagem todo o ano	10

Parâmetro LU - Uso do solo

O uso do solo possui as mesmas classes que o parâmetro anterior mas, no entanto, a determinação dos índices é feita tendo em conta o uso de solo e as possibilidades de estas gerarem contaminações. Assim seguindo Eimers et al., apresenta-se na tabela 6, os índices par a cobertura do solo.

Tabela 6 - Índice do uso do solo para o índice de zona vadosa

Cobertura do solo	Descrição geral / exemplo	Índice
Água	Áreas cobertas de água, com pelo menos 25% de cobertura vegetal	1
Áreas húmidas com vegetação emergente	Áreas com vegetação herbácea perene, onde o solo ou substrato é periodicamente saturado	1
Áreas húmidas com lenhosas	Áreas com floresta ou arbustos onde o solo ou substrato é periodicamente saturado	1
Solo esquelético	Rocha exposta, areia, gravilha ou outro material semelhante com pouca ou nenhuma vegetação	2
Floresta de folha caduca	Áreas onde 75% ou mais das árvores perdem a folhagem simultaneamente	3
Floresta perene	Áreas onde 75% ou mais das árvores mantêm a folhagem todo o ano	3
Floresta mista	Áreas cujas árvores não são em 75% ou mais caducas nem perenes	3
Pedreira/Minas a céu aberto/Saibreiras	Áreas de indústria mineira extrativa, com exposição significativa do solo	5
Pastagem/Feno	Áreas dominadas por vegetação plantada e destinada à alimentação humana (legumes, etc) ou de gado	5
Outras herbáceas	Vegetação plantada para fins estéticos, lúdicos ou de controlo da erosão	6
Transição	Áreas com alterações dinâmicas na sua cobertura	7
Agricultura	Áreas dominadas por vegetação plantada e/ou utilizada para produção	7
Residencial de baixa densidade	Principalmente áreas suburbanas, em que a construção cobre cerca de 30 a 80% da área	7
Residencial de alta densidade	Áreas residenciais densas, em que a vegetação ocupa menos de 20% da área e a construção entre 80 a 100%	8
Comercial/Industrial	Solo utilizado para manufatura ou venda de bens de consumo	10

2.3.4 Vulnerabilidade

A vulnerabilidade é um conceito muito importante, podendo ser definido como “a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero” (Duijvenbouden and Waegeningh (Ed.), 1987). Para a avaliação da vulnerabilidade foram desenvolvidos vários métodos, tais como o AVI, o GOD, o DRASTIC, o SINTACS, o EPIK, entre outros, utilizando parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras características particulares e bem definidas. Por ser um índice de fácil utilização e muito utilizado nos Estados Unidos e Canadá, bem como pelo facto de ter sido utilizado em Portugal num estudo detalhado de águas subterrâneas coordenado por Ferreira et al., (1995), iremos desenvolver o índice DRASTIC. Em muitas situações este método pode não ser o mais eficaz, pelo que não pode ser usado às cegas. Nos casos em que se esteja a determinar a vulnerabilidade de aquíferos em litologias cársicas, o índice EPIK poderá ser mais apropriado.

Índice DRASTIC

Este índice foi desenvolvido por Aller et al, 1987, e utiliza sete parâmetros:

- 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

Existem vários pressupostos inerentes a este índice começando pela introdução do contaminante à superfície com transporte vertical até atingir o aquífero. Ao atingir o aquífero admite-se que ele tem mobilidade na água. A área mínima para o qual este método é viável é de 0,4 km².

Aller et al, 1987, define o cálculo deste índice, que é dado pela seguinte expressão:

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

As siglas p e i representam dois atributos diferentes, sendo respetivamente o peso e o índice atribuídos aos parâmetros.

Os pesos variam entre 1 e 5 e os valores definidos para cada um dos parâmetros são os seguintes:

Tabela 7 - Pesos atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC

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

Os índices serão desenvolvidos parâmetro a parâmetro, uma vez que são dependentes das características intrínsecas de cada um.

Parâmetro D - Profundidade do topo do aquífero

A profundidade do aquífero determina a espessura da zona vadosa, camada a ser atravessada pelos poluentes e propensa a interações. Assim, quanto mais profundo se encontrar o topo do aquífero menor será o valor do índice. Segundo Aller et al. 1987, os índices para o parâmetro D, são os que se apresentam na tabela 8.

Tabela 8 – Índices para o parâmetro D, profundidade do topo do aquífero, para o índice DRASTIC.

Profundidade do Topo do Aquífero (m)	Índice
<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

A profundidade é medida de maneiras diferentes de acordo com o tipo de aquífero. Para um aquífero livre é a distância desde a superfície ao nível freático, num aquífero confinado é a distância ao topo do aquífero e, num aquífero semiconfinado a escolha entre as duas distâncias referidas para os anteriores é opcional.

Parâmetro R - Recarga do aquífero

A recarga do aquífero funciona como transportador de poluentes, pois a água facilita a mobilidade dos poluentes na zona vadosa, pelo que, quanto maior a recarga maior o potencial de poluição. Segundo Aller et al. 1987, os índices para o parâmetro R, são os que se apresentam na tabela 9.

Tabela 9 - Índices para o parâmetro R, recarga do aquífero, para o índice DRASTIC

Recarga do Aquífero (mm)	Índice
<51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Parâmetro A – Material do aquífero

O material do aquífero condiciona não só o fluxo subterrâneo, como interage com os poluentes promovendo a sua atenuação. Estas duas características têm um efeito combinado pois, quanto mais lento for o fluxo, mais tempo existe para se originarem reações. Assim, segundo Aller et al. 1987, os índices para o parâmetro A, são os que se apresentam na tabela 10.

Tabela 10 - Índices para o parâmetro A, material do aquífero, para o índice DRASTIC

Material do aquífero	Índice (Índice Típico)
Xisto argiloso, argilito	1 – 3 (2)
Rocha metamórfica/ígnea	2 – 5 (3)
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3 – 5 (4)
Arenito, calcário e argilito estratificado	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)

Parâmetro S - Tipo de Solo

O tipo de solo vai impactar o potencial de poluição na medida em que influência a quantidade de recarga e possui potencial atenuador. Segundo Aller et al. (1987) e tendo em conta as quatro características principais do solo, a saber, espessura, textura, expansibilidade e teor em matéria orgânica, os índices para o parâmetro S, são os que se apresentam na tabela 11.

Tabela 11 - Índices para o parâmetro S, tipo de solo, para o índice DRASTIC

Tipo de Solo	Índice
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
Lodo	2
Argila não agregada e não expansível	1

Parâmetro T – Topografia

Este parâmetro é definido pelo declive do terreno. Assim, de acordo com o declive existem probabilidades diferentes do poluente escorrer superficialmente ou

infiltrar-se. Assim Aller et al. (1987) definiu os índices para o parâmetro T, de acordo com os que se apresentam na tabela 12.

Tabela 12 – Índices para o parâmetro T, topografia, para o índice DRASTIC

Topografia (%)	Índice
<2	10
2– 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

Parâmetro I - Influência da zona vadosa

A zona vadosa é responsável por processos de atenuação de poluentes e, o tempo que o poluente permanece nesta camada é importante. De acordo com os parâmetros anteriores Aller et al. (1987), definiu os índices para o parâmetro I de acordo com os que se apresentam na tabela 13.

Tabela 13 - Índices para o parâmetro I, influência da zona vadosa, para o índice DRASTIC

Influência da zona vadosa	Índice (Índice Típico)
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 argilitos 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)

Parâmetro C - Condutividade Hidráulica do Aquífero

A condutividade hidráulica influencia a velocidade do fluxo subterrâneo, provocando assim alterações no tempo de percurso dos poluentes e consequentemente na atenuação poluente da zona vadosa.

Tabela 14 - Índices para o parâmetro C, Condutividade Hidráulica do Aquífero, para o índice DRASTIC

Condutividade Hidráulica do Aquífero (m/dia)	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

2.4 Perímetros de proteção

Os perímetros de proteção estão divididos por zonas com limitações de vários níveis, proibindo ou restringindo atividades que são suscetíveis de provocar alterações e/ou contaminação nos aquíferos. Segundo Ferreira et al. (1995) das zonas mais proximais para as zonas mais distais podem ser definidas as seguintes zonas:

- Zona de proteção imediata: no seu interior é proibido toda a atividade ou instalações, excetuando as necessárias para a manutenção e execução da captação;
- Zona de proteção intermédia: esta área tem como objetivo a proteção contra a poluição microbiológica. Nesta zona ocorre a diluição ou eliminação daqueles poluentes antes de alcançarem a captação;
- Zona de proteção alargada: zona que tem como objetivo proteger a captação da poluição de grande persistência (metais pesados, hidrocarbonetos, nitratos, materiais radioativos, etc.).

Existem ainda outras duas zonas específicas para determinados casos e localizações:

- Zona de proteção especial: localiza-se no exterior das zonas até agora apresentadas e possui grande importância em aquíferos cársicos ou fraturados, apresentando restrições equivalentes à zona de proteção imediata. Estando fora da zona de influência pode influenciar as águas da captação por possível conexão hidráulica através de condutas ou fissuras;
- Zona de proteção perante a intrusão salina: apenas definida em regiões costeiras e pretende proteger a captação, limitando o avanço da cunha salina, isto é, a cunha salina deverá situar-se sempre no seu exterior.

2.4.1 Restrições

Para cada uma das zonas referidas anteriormente, existem normas estabelecidas sobre as atividades ou instalações que podem operar no seu interior. Em Portugal estas estão definidas no artigo 6.º do Decreto-Lei n.º 382/99, de 22 setembro, e no Decreto-Lei nº 54/2015, de 22 Junho, apresentando as seguintes características.

- Zona de proteção imediata e zona de proteção especial:
São proibidas todas as atividades e instalações, excetuando a própria captação e todas as outras que têm como funcionalidade a manutenção e conservação da mesma.
O terreno deve apresentar-se vedado e desprovido de quaisquer resíduos, produtos ou líquidos que sejam indesejáveis e passíveis de degradar a qualidade da água captada.
- Zona de proteção intermédia:
São interditas as seguintes atividades ou instalações passíveis de contaminar as águas subterrâneas:
 - Infraestruturas aeronáuticas;
 - Oficinas e estações de serviço de automóveis;
 - Depósitos de materiais radioativos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos;
 - Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis;
 - Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioativos ou de outras substâncias perigosas;
 - Canalizações de produtos tóxicos;
 - Lixeiras e aterros sanitários.São ainda interditas ou condicionadas as seguintes atividades ou instalações passíveis de contaminar as águas subterrâneas:
 - Pastorícia;
 - Usos agrícolas e pecuários;
 - Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que formem potencialmente substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis;
 - Edificações;
 - Estradas e caminhos-de -ferro;
 - Parques de campismo;

- Espaços destinados a práticas desportivas;
 - Estações de tratamento de águas residuais;
 - Coletores de águas residuais;
 - Fossas de esgoto;
 - Unidades industriais;
 - Cemitérios;
 - Pedreiras e quaisquer escavações;
 - Explorações mineiras;
 - Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias suscetíveis de se infiltrarem;
 - Depósitos de sucata.
- Zona de proteção alargada:

São interditas as seguintes atividades ou instalações passíveis de contaminar as águas subterrâneas:

 - Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioativos e de outras substâncias perigosas;
 - Depósitos de materiais radioativos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos;
 - Canalizações de produtos tóxicos;
 - Refinarias e indústrias químicas;
 - Lixeiras e aterros sanitários.

São ainda interditas ou condicionadas as seguintes atividades ou instalações passíveis de contaminar as águas subterrâneas:

 - Utilização de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar substâncias tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis;
 - Coletores de águas residuais;
 - Fossas de esgoto;
 - Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias suscetíveis de se infiltrarem;
 - Estações de tratamento de águas residuais;
 - Cemitérios;
 - Pedreiras e explorações mineiras;
 - Infraestruturas aeronáuticas;

- Oficinas e estações de serviço de automóveis;
 - Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis;
 - Depósitos de sucata.
-
- Zona de proteção contra o avanço da cunha salina:
Caudais de exploração limitados e interdição de construção ou exploração de novas captações de água subterrânea

3. Proposta de checklist

A proposta de checklist irá ser desenvolvida em duas partes.

A primeira é composta pela descrição dos parâmetros utilizados e a sua distribuição de acordo com a sua importância por dois tipos de captações (captações de águas para consumo local e captações de águas minerais naturais/nascente). A escolha dos parâmetros utilizados foi baseada na legislação portuguesa, na teoria suprajacente e em equações presentes em métodos de determinação de perímetros de proteção (equações que podem ser encontradas nos anexos) e a sua distribuição é apresentada na forma de uma checklist de padrões coloridos.

Numa segunda fase apresentam-se checklists individuais para cada tipo de águas/captação, tendo como base a divisão previamente efetuada.

A divisão contempla quatro categorias com diferentes importâncias, sendo elas a dos elementos obrigatórios, a dos elementos essenciais, a dos elementos acessórios e a dos elementos anexos.

Os elementos obrigatórios são constituídos por dados que são indispensáveis por fornecerem os fatores que definem a base geológica, legal e poluente de uma qualquer captação. Estes encontram-se ainda divididos em gerais, isto é, que devem ser aplicados a qualquer situação, e específicos, que são elementos que apenas são utilizados em casos com características particulares. A falta de um destes elementos pode por si só levar à reprovação de uma proposta de perímetro de proteção.

Os elementos obrigatórios situacionais são constituídos por elementos apenas usados em situações geológicas muito específicas, e que na sua presença se regem pelas mesmas regras dos anteriores.

Os elementos essenciais são constituídos por características que influenciam, em grande medida, o fluxo hídrico subterrâneo e a sua contaminação. A falta de um destes elementos pode eventualmente levar a uma aprovação com restrições.

Os elementos acessórios são assim designados por serem elementos de menor impacto ou com importância em termos de documentação prévia. Estes elementos não apresentam condições para afetar a aprovação de nenhuma proposta de perímetros de proteção.

3.1 Descrição de parâmetros e checklist de padrão colorido

Nesta checklist, os parâmetros encontram-se divididos em duas categorias:

- Gerais: excetuando casos raros são aplicáveis em praticamente todas as situações;
- Específicos: parâmetros que se aplicam em situações com características especiais, como a presença de zonas extremamente fissuradas nas áreas mais externas e em zonas de intrusão salina.

Parâmetros gerais

Como parâmetros de carácter geral a considerar nesta análise, temos:

- i) Características geomorfológicas da área: características do substrato litológico como sejam a alteração, a morfologia e a fracturação, que influenciam as propriedades hidrogeológicas do mesmo;
- ii) Descrição hidrogeológica da área: o fluxo hídrico varia tanto em velocidade como em direção em consequência das propriedades hidrogeológicas do substrato litológico;
- iii) Recarga da captação: o volume de água que efetua a recarga da captação influencia a possibilidade de poluição do aquífero. Quanto maior o volume mais suscetível à poluição.
- iv) Zona de alimentação da captação: zona de grande dimensão ao nível da bacia em que toda a água irá fornecer a captação.
- v) Zona de chamada e zona influência: estas zonas que envolvem a captação são provocadas por alterações no fluxo subterrâneo, e consequentemente variações no transporte e interação dos poluentes.
- vi) Profundidade do aquífero: uma maior profundidade implica uma maior zona a atravessar pelos possíveis poluentes e uma maior possibilidade de atenuação dos mesmos;
- vii) Tempo de percurso dos poluentes: cada captação deve possuir protocolos de emergência em caso de contaminação e o tempo de percurso é extremamente útil na medida em que, a partir deste se pode acionar o protocolo de emergência, com o intuito de minimizar os efeitos de um qualquer poluente;
- viii) Poder depurador da zona vadosa: o poder depurador é a capacidade que o solo tem em atenuar os poluentes. O poder depurador associado à profundidade do aquífero pode tornar o seu efeito mais ou menos eficaz;

- ix) Potabilidade da água: a existência ou inexistência de contaminação na água a captar/captada é um ponto fulcral na perceção das condições atuais;
- x) Quimismo da água: a caracterização do quimismo da água permite-nos observar as características particulares de uma determinada água, bem como a sua estabilidade ao longo do ano hidrológico;
- xi) Limites do aquífero: limitam o aquífero e, por si só, delimitam toda a área que pode alimentar a captação e, por conseguinte, nenhum perímetro deverá ultrapassar estes limites;
- xii) Modelo conceptual hidrogeológico: o modelo conceptual funciona como a aglomerado gráfico das características intrínsecas do aquífero. Para casos extremamente complexos poderá e deverá ser utilizado um modelo computacional 3D proporcionando assim ao modelo um fluxo hídrico com características mais aproximadas ao caso real
- xiii) Focos poluentes: enquanto fonte de poluentes, a sua inexistência seria benéfica e facilitadora na determinação dos perímetros. Saber quais as substâncias passíveis de poluir e a sua localização, permitirá uma proteção mais eficaz das captações e também uma melhor planificação para situações de emergência;
- xiv) Vulnerabilidade: como o nome indica determina o quão vulnerável é o aquífero em questão. Um local com vulnerabilidade elevada deve ser estudado com uma minúcia extrema e pode até aplicar-se critérios de sobre-proteção nalguns casos. É de referir que mesmo com uma vulnerabilidade baixa, nunca se devem negligenciar os estudos;
- xv) Risco de contaminação: o risco de contaminação do aquífero em geral e/ou em zonas pontuais pode influenciar, diretamente, o formato de um perímetro de proteção;
- xvi) Cartografia estrutural: neste mapa estarão presentes, de uma maneira visualmente mais fácil de interpretar, as estruturas geológicas (falhas, fraturas, filões, etc.) que podem influenciar o fluxo subterrâneo;
- xvii) Planta topográfica: esta planta serve como método gráfico de exposição de todas as captações existentes e de toda a área de concessão, incluindo a proposta de perímetros de proteção bem como as coordenadas dos seus vértices no sistema EPSG 3763;
- xviii) Cartografia geológica: método gráfico que facilita a análise do relevo e da morfologia da zona com recurso a perfis geológicos e coluna estratigráfica;
- xix) Carta das fontes e do risco de contaminação: embora não exista cobertura para todo o território nacional, esta carta apresenta dados referentes aos focos

poluentes, mostrando uma cobertura do território por zonas que apresentam diferentes riscos de contaminação (baseada, essencialmente, nas características litológicas), a ocupação da superfície, entre outras. Este método gráfico permite uma avaliação conjunta de várias variáveis de forma mais expedita, podendo facilmente corroborar uma análise separada dos parâmetros anteriores;

- xx) Caudal a extrair: necessário saber qual o caudal a extrair para assim tomarmos a decisão sobre qual o método/critério melhor se adequa a cada caso em concreto. A definição de zonas de proteção, com base em métodos analíticos, usa o caudal a extrair como uma das variáveis indispensáveis e, valores muito altos ou muito baixos, poderão impedir a viabilidade de implementação de determinadas áreas de proteção;
- xxi) Critérios usados na definição dos perímetros de proteção: a determinação dos perímetros de proteção tem que ter critérios de base e estes devem ser explanados para uma correta análise dos mesmos;
- xxii) Área da zona de proteção imediata, área da zona de proteção intermédia e área da zona de proteção alargada: para além dos critérios, devem também ser apresentadas as áreas determinadas para cada zona com base nos mesmos;
- xxiii) Restrições na zona de proteção imediata, restrições na zona de proteção intermédia, restrições na zona de proteção alargada: as restrições devem cumprir as regras utilizadas nacionalmente respeitando, em Portugal, o Decreto-Lei n.º 382/99 artigo 6.º, de 22 setembro;
- xxiv) Zona de alimentação da captação: incorpora várias zonas sendo a mais extensa ao nível da bacia hidrográfica, pelo que o conhecimento de todas estas zonas é importante no conhecimento de todo o percurso subterrâneo e na identificação de áreas em risco de contaminação;
- xxv) Plano de exploração aprovado: a definição de perímetros de proteção é um trabalho inglório caso não exista um plano de exploração aprovado, pelo que a sua apresentação, mesmo que em anexo, serve como comprovativo da necessidade da avaliação a efetuar.

Parâmetros específicos

Como parâmetros de carácter específico a considerar nesta análise, temos:

- xxvi) Área da zona de proteção especial: em casos de litologias extremamente fissuradas/fraturadas, com ligação hidráulica ao aquífero, devem ser determinados perímetros em zonas específicas para evitar qualquer risco de contaminação;

xxvii) Área da zona de proteção perante intrusão salina: em casos localizados junto à linha de costa, é indispensável a definição de um perímetro no qual toda e qualquer água salgada não o possa ultrapassar, impedindo, desta forma, a extração de água de baixa qualidade.

O conjunto de parâmetros definidos, uns de carácter geral e outros de carácter mais específico, leva-nos à criação de uma checklist cromática, onde se cruzam todos os parâmetros enunciado com as três tipologias de água que decidimos abordar neste trabalho (ver tabela 15).

Tabela 15 – Checklist, cruzando os parâmetros com as duas tipologias de águas definidas.

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local	Águas Minerais Naturais/Nascente
Gerais	Características intrínsecas do aquífero		
	Características geomorfológicas da área		
	Descrição hidrogeológica da área		
	Recarga da captação		
	Zona de alimentação da captação		
	Zona de chamada da captação		
	Zona de influência da captação		
	Profundidade do aquífero		
	Poder depurador da zona vadosa		
	Tempo de percurso dos poluentes		
	Potabilidade da água		
	Quimismo da água		
	Limites do aquífero		
	Modelo conceptual hidrogeológico		
	Interação com o aquífero		
	Focos poluentes		
	Origem do poluente		
	Posição dos focos em relação ao aquífero		
	Vulnerabilidade à poluição		
	Risco de contaminação		
	Cartografia		
	Cartografia estrutural		
	Descrição detalhada das estruturas		
	Planta Topográfica		
	Localização das captações		
	Delimitação dos perímetros de proteção		
	Coordenadas dos vértices (se aplicável) dos perímetros de proteção (sistema EPSG 3763)		

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local	Águas Minerais Naturais/Nascente
	Cartografia geológica	Yellow	Red
	Contem perfil geológico	Blue	Yellow
	Contem coluna estratigráfica	Blue	Yellow
	Carta das fontes e riscos de contaminação	Yellow	Red
	Características da captação	Black	Black
	Caudal a extrair	Blue	Yellow
	Perímetros	Black	Black
	Crítérios usados na definição das zonas	Red	Red
	Área da zona de proteção imediata	Red	Red
	Área da zona de proteção intermédia	Red	Red
	Área da zona de proteção alargada	Red	Red
	Restrições	Black	Black
	Restrições na zona de proteção imediata	Red	Red
	Restrições na zona de proteção intermédia	Red	Red
	Restrições na zona de proteção alargada	Red	Red
Plano de exploração aprovado	White	Blue	
Específicos	Perímetros	Black	Black
	Área da zona de proteção especial	Green	Green
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	Green	Green
	Restrições	Black	Black
	Restrições na zona de proteção especial	Green	Green
Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	Green	Green	



Elementos Obrigatórios



Elementos Obrigatórios Situacionais



Elementos Essenciais



Elementos Acessórios



Elementos Não Requeridos

3.2 Checklists individuais

Estando definidas as importâncias de cada parâmetro para as tipologias de água captada, águas de consumo local e águas minerais naturais/nascente, a checklist geral com padrões coloridos toma agora um carácter individual para uso em casos de estudo. Assim serão apresentadas duas checklists, uma para águas de consumo local e outra para águas minerais naturais/nascente.

3.2.1 Águas de consumo local

As águas de consumo local parecem-nos ser aquelas que, em condições normais, não necessitarão da definição de perímetros de proteção suportados por um grande e complexo número de parâmetros. Assim, para estas águas, nas tabelas 16, 17 e 18 apresentam-se os parâmetros que entendemos serem os necessários para que o processo de pedido de perímetros de proteção esteja bem instruído. Na tabela 16 temos os elementos obrigatórios, na tabela 17 os elementos essenciais e, finalmente, na tabela 18 os elementos acessórios.

Tabela 16 – Checklist de elementos obrigatórios para águas de consumo local

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Gerais	Características intrínsecas do aquífero	
	Características geomorfológicas da área	
	Descrição hidrogeológica da área	
	Recarga da captação	
	Potabilidade da água	
	Interação com o aquífero	
	Focos poluentes	
	Vulnerabilidade à poluição	
	Cartografia	
	Cartografia estrutural	
	Planta Topográfica	
	Localização das captações	
	Delimitação de perímetros	
	Perímetros	
	Critérios usados na definição das zonas	
	Área da zona de proteção imediata	
	Área da zona de proteção intermédia	
	Área da zona de proteção alargada	
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção imediata	
Restrições na zona de proteção intermédia		

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local
	Restrições na zona de proteção alargada	
Específicos	Perímetros	
	Área da zona de proteção especial	
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção especial	
	Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	

Tabela 17 - Checklist de elementos essenciais para águas de consumo local

Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Características intrínsecas do aquífero	
Tempo de percurso dos poluentes	
Modelo conceptual hidrogeológico	
Interações com o aquífero	
Fontes Poluentes	
Origem do poluente	
Posição dos focos em relação ao aquífero	
Risco de contaminação	
Cartografia	
Cartografia estrutural	
Descrição detalhada das estruturas	
Planta Topográfica	
Coordenadas dos vértices (se aplicável) dos perímetros de proteção (sistema EPSG 3763)	
Cartografia geológica	
Carta das fontes e riscos de contaminação	

Tabela 18 - Checklist de elementos acessórios para águas de consumo local

Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Características intrínsecas do aquífero	
Zona de alimentação da captação	
Zona de chamada da captação	
Zona de influência da captação	
Profundidade do aquífero	
Poder depurador da zona vadosa	
Quimismo da água	
Limites do aquífero	
Cartografia	
Cartografia geológica	
Contem perfil geológico	
Contem coluna estratigráfica	
Características da captação	
Caudal a extrair	

3.2.2 Águas minerais naturais/nascente

As águas minerais naturais ou de nascente, em condições normais, serão mais delicadas que as anteriores na definição de perímetros de proteção, de maneira a que estes garantam a manutenção da qualidade das águas exploradas a longo prazo. Aqui, os parâmetros a mobilizar serão os mais complexos e os mais numerosos. Esta é uma situação extrema, uma vez que se trata de uma atividade comercial (águas engarrafadas) ou de um recurso raro (como é o caso das águas termais e águas carbonatadas), sendo assim essencial garantir a fiabilidade do resultado final.

Assim, para estas águas, nas tabelas Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21 e **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, apresentam-se os parâmetros que entendemos serem os necessários para que o processo de pedido de perímetros de proteção para águas minerais naturais/nascente esteja bem instruído. Na Tabela 19 temos os elementos obrigatórios, na Tabela 20 os elementos essenciais, na Tabela 21 os elementos acessórios e, finalmente, na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** os elementos anexos.

Tabela 19 - Checklist de elementos obrigatórios para águas minerais naturais/nascente

	Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
 Gerais	Características intrínsecas do aquífero	
	Características geomorfológicas da área	
	Descrição hidrogeológica da área	
	Recarga da captação	
	Potabilidade da água	
	Quimismo da água	
	Limites do aquífero	
	Modelo conceptual hidrogeológico	
	Interação com o aquífero	
	Focos poluentes	
	Origem dos Poluentes	
	Posição dos focos em relação ao aquífero	
	Vulnerabilidade à poluição	
	Risco de contaminação	
	Cartografia	
	Cartografia estrutural	
	Descrição detalhada das estruturas	
	Planta Topográfica	
	Localização das captações	
	Delimitação de perímetros	
	Coordenadas dos vértices (sistema EPSG 3763)	
Cartografia geológica		
Carta das fontes e riscos de contaminação		
Perímetros		

	Critérios usados na definição das zonas	
	Área da zona de proteção imediata	
	Área da zona de proteção intermédia	
	Área da zona de proteção alargada	
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção imediata	
	Restrições na zona de proteção intermédia	
	Restrições na zona de proteção alargada	
Específicos	Perímetros	
	Área da zona de proteção especial	
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção especial	
	Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	

Tabela 20 - Checklist de elementos essenciais para águas minerais naturais/nascente

Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Características intrínsecas do aquífero	
Zona de alimentação da captação	
Zona de chamada da captação	
Zona de influência da captação	
Profundidade do aquífero	
Zona de alimentação da captação	
Poder depurador da zona vadosa	
Tempo de percurso dos poluentes	
Cartografia	
Cartografia geológica	
Contem perfil geológico	
Contem coluna estratigráfica	
Características da captação	
Caudal a extrair	

Tabela 21 - Checklist de elementos acessórios para águas minerais naturais/nascente

Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Plano de exploração aprovado	

4. Casos de estudo

Com o intuito de validar as checklists anteriores, estas serão agora testadas aplicando-as a casos reais, com o intuito de verificar a sua interação com propostas de perímetros de proteção já existentes, bem como identificar lacunas que possam existir nas próprias propostas.

A análise destas propostas terá como resultado:

- a) Proposta de perímetros de proteção **reprovada** – o perímetro não é aprovado e, a parte interessada, deverá avançar com uma nova proposta melhor fundamentada;
- b) Proposta de perímetros de proteção **aprovada com restrições** – a aprovação final fica em standby até que as lacunas identificadas, que não são graves, sejam preenchidas;
- c) Proposta de perímetros de proteção **aprovada sem restrições** – a implementação dos perímetros pode passar à prática, uma vez que a proposta apresentada cumpriu todos os requisitos obrigatórios e essenciais.

A análise que a seguir apresentamos não se cingirá, no entanto, ao preenchimento da checklist, apresentando-se, também, uma análise mais profunda sobre alguns dos parâmetros, referindo-se alguns pontos fortes e pontos fracos de cada relatório.

4.1 Caso de estudo A

Trata-se de uma proposta para a implementação de vários perímetros de proteção em captações para água de consumo local no distrito do Porto. São listadas 58 captações em 18 sistemas de abastecimento.

É apresentado um pedido com uma base geológica bem elaborada, caracterizando a geomorfologia e a hidrogeologia em geral e na envolvente de cada uma das captações.

As fontes de poluição são apresentadas referindo a sua origem, mas, contudo, tendo défice de informação quanto à presença de poluentes em profundidade. A sua disposição em torno das captações é apresentada sob forma gráfica.

As áreas dos perímetros são apresentadas em duas divisões, de acordo com o agregado populacional a ser abastecido pela captação, utilizando critérios vagos. Não é feita qualquer referência ao método/equação utilizado na determinação dos

perímetros. Os dados hidrogeológicos apresentados, tendo em conta tratar-se de captações em funcionamento, sendo de boa qualidade, acabam por suprir algumas das falhas identificadas. Os perímetros não são apresentados graficamente.

Todas as restrições estão explícitas.

Apresenta ainda as características químicas das águas extraídas e os caudais individuais a explorar em cada captação.

Tabela 22 – Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo A

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Gerais	Características intrínsecas do aquífero	
	Características geomorfológicas da área	✓
	Descrição hidrogeológica da área	✓
	Recarga da captação	✓
	Potabilidade da água	✓
	Interação com o aquífero	
	Focos poluentes	✓
	Vulnerabilidade à poluição	✓
	Cartografia	
	Cartografia estrutural	✓
	Planta Topográfica	-
	Localização das captações	✓
	Delimitação de perímetros	-
	Perímetros	
	Crítérios usados na definição das zonas	-
	Área da zona de proteção imediata	✓
	Área da zona de proteção intermédia	✓
	Área da zona de proteção alargada	✓
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção imediata	✓
Restrições na zona de proteção intermédia	✓	
Restrições na zona de proteção alargada	✓	
Específicos	Perímetros	
	Área da zona de proteção especial	0
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	0
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção especial	0
Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	0	

Tabela 23 - Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo A

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local
	Características intrínsecas do aquífero	
	Tempo de percurso dos poluentes	-
	Modelo conceptual hidrogeológico	-
	Interações com o aquífero	
	Focos poluentes	

Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Origem do poluente	✓
Posição dos focos em relação ao aquífero	-
Risco de contaminação	-
Cartografia	
Cartografia estrutural	
Descrição detalhada das estruturas	✓
Planta Topográfica	
Coordenadas dos vértices (se aplicável) dos perímetros de proteção (sistema EPSG 3763)	o
Cartografia geológica	✓
Carta das fontes e riscos de contaminação	✓

Tabela 24 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo A

Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Características intrínsecas do aquífero	
Zona de alimentação da captação	-
Zona de chamada da captação	-
Zona de influência da captação	-
Profundidade do aquífero	-
Poder depurador da zona vadosa	-
Quimismo da água	✓
Limites do aquífero	✓
Cartografia	
Cartografia geológica	
Contem perfil geológico	-
Contem coluna estratigráfica	-
Características da captação	
Caudal a extrair	✓

- ✓ Apresentado
- Não apresentado
- o Não aplicável

4.2 Caso de estudo B

Trata-se de uma proposta para a implementação de vários perímetros de proteção em captações para água de consumo local no distrito do Aveiro. São listadas 10 captações em 8 sistemas de abastecimento.

Todas as características intrínsecas ao aquífero foram descritas pormenorizadamente. As características geomorfológicas são complementadas com o recurso a várias fotografias da região/área onde se localizam as captações.

São apresentados os volumes captados, bem como os principais usos da água, correspondentes ao ano anterior à apresentação da proposta de perímetros de

proteção. Mostram atenção e preocupação com o estado do aquífero, referindo medidas tomadas para minorar efeitos de seca.

As potenciais fontes poluentes apresentam-se descritas apenas quanto à sua origem, faltando a sua descrição quanto à profundidade a que possam ocorrer e, a sua localização perante as captações, é apresentada com recurso a cartas com informação diversa (geológica, imagem de satélite, ocupação do território, cursos de água, fluxo subterrâneo, entre outros). Estas cartas são extremamente úteis na perceção de todos os componentes existentes na área. A vulnerabilidade da área apresenta-se calculada pelo método DRASTIC.

Todos os perímetros e restrições foram especificados. A localização dos primeiros bem como a sua delimitação é apresentada sobre uma carta topográfica.

A descrição de estruturas geológicas, tais como falhas ou filões, carece de uma apresentação gráfica.

Tabela 25 - Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo B

	Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Gerais	Características intrínsecas do aquífero	
	Características geomorfológicas da área	✓
	Descrição hidrogeológica da área	✓
	Recarga da captação	✓
	Potabilidade da água	✓
	Interação com o aquífero	
	Focos poluentes	✓
	Vulnerabilidade à poluição	✓
	Cartografia	
	Cartografia estrutural	-
	Planta Topográfica	✓
	Localização das captações	✓
	Delimitação de perímetros	✓
	Perímetros	
	Critérios usados na definição das zonas	✓
	Área da zona de proteção imediata	✓
	Área da zona de proteção intermédia	✓
	Área da zona de proteção alargada	✓
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção imediata	✓
Restrições na zona de proteção intermédia	✓	
Restrições na zona de proteção alargada	✓	
Específicos	Perímetros	
	Área da zona de proteção especial	0
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	0
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção especial	0
Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	0	

Tabela 26 - Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo B

Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Características intrínsecas do aquífero	
Tempo de percurso dos poluentes	-
Modelo conceptual hidrogeológico	✓
Interações com o aquífero	
Fontes Poluentes	
Posição dos focos em relação ao aquífero	-
Origem do poluente	✓
Risco de contaminação	-
Cartografia	
Cartografia estrutural	
Descrição detalhada das estruturas	✓
Planta Topográfica	
Coordenadas dos vértices (se aplicável) dos perímetros de proteção (sistema EPSG 3763)	✓
Cartografia geológica	✓
Carta das fontes e riscos de contaminação	-

Tabela 27 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo B

Dados a apresentar	Águas Consumo Local
Características intrínsecas do aquífero	
Zona de alimentação da captação	-
Zona de chamada da captação	-
Zona de influência da captação	-
Profundidade do aquífero	✓
Poder depurador da zona vadosa	-
Quimismo da água	✓
Limites do aquífero	✓
Cartografia	
Cartografia geológica	
Contem perfil geológico	-
Contem coluna estratigráfica	-
Características da captação	
Caudal a extrair	✓

- ✓ Apresentado
- Não apresentado
- o Não aplicável

4.3 Caso de estudo C

Trata-se de uma proposta para a implementação de perímetros de proteção em duas captações, um furo e uma nascente, com objetivos termais no distrito do Porto.

Como caso termal que é, apresenta uma boa descrição geológica, geomorfológica e estrutural, sendo esta de extrema importância para compreender a circulação e ascensão da água desde zonas profundas até à superfície. A descrição é complementada pela carta geológica e estrutural da zona.

Não é apresentado qualquer dado referente ao balanço hídrico da zona, nem a nenhum dos seus parâmetros de cálculo.

Os focos poluentes estão descritos apenas em relação à sua origem, não sendo dada importância quanto à sua profundidade. A sua localização em relação às captações não está representada.

Os perímetros foram definidos exemplarmente, sendo explícito todo o método e valores utilizados no seu cálculo. Estão também representadas todas as restrições referentes às diferentes áreas dos perímetros. São apresentadas, ainda, várias condicionantes à sua implementação pelo facto de existirem na envolvente espaços urbanos, urbanizáveis e agrícolas.

Tabela 28 - Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo C

	Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Gerais	Características intrínsecas do aquífero	
	Características geomorfológicas da área	✓
	Descrição hidrogeológica da área	✓
	Recarga da captação	-
	Potabilidade da água	✓
	Quimismo da água	✓
	Limites do aquífero	✓
	Modelo conceptual hidrogeológico	-
	Interação com o aquífero	
	Focos poluentes	✓
	Origem do poluente	✓
	Posição dos focos em relação ao aquífero	-
	Vulnerabilidade à poluição	✓
	Risco de contaminação	-
	Cartografia	
	Cartografia estrutural	✓
	Descrição detalhada das estruturas	✓
	Planta Topográfica	✓
	Localização das captações	✓
	Delimitação de perímetros	✓
	Coordenadas dos vértices (se aplicável) dos perímetros de proteção (sistema EPSG 3763)	✓
	Cartografia geológica	✓
	Carta das fontes e riscos de contaminação	-
	Perímetros	
	Critérios usados na definição das zonas	✓
	Área da zona de proteção imediata	✓
	Área da zona de proteção intermédia	✓

	Área da zona de proteção alargada	✓
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção imediata	-
	Restrições na zona de proteção intermédia	-
	Restrições na zona de proteção alargada	-
Específicos	Perímetros	
	Área da zona de proteção especial	o
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	o
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção especial	o
	Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	o

Tabela 29- Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo C

Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Características intrínsecas do aquífero	
Zona de alimentação da captação	-
Zona de chamada da captação	-
Zona de influência da captação	-
Profundidade do aquífero	✓
Poder depurador da zona vadosa	-
Tempo de percurso dos poluentes	-
Cartografia	
Cartografia geológica	
Contem perfil geológico	-
Contem coluna estratigráfica	-
Características da captação	
Caudal a extrair	✓

Tabela 30 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo C

Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Plano de exploração aprovado	✓

- ✓ Apresentado
- Não apresentado
- o Não aplicável

4.4 Caso de estudo D

Trata-se de uma proposta para a implementação de perímetros de proteção em cinco captações, quatro furos e uma nascente, com objetivos termais no distrito de Braga. Cada captação é descrita quanto as características do fluido e o seu uso.

A geologia e geomorfologia são descritas extensivamente, abordando o seu contributo na drenagem e fluxo subterrâneo.

A descrição dos aspetos hidrogeológicos acompanha o parâmetro anterior na sua boa execução.

O quimismo e potabilidade são apresentados em análises químicas variadas e bastante completas.

Não são apresentados os métodos de cálculo dos perímetros sendo, no entanto, a sua forma e delimitação regida por estruturas que influenciam o fluxo hídrico subterrâneo.

As fontes poluentes são descritas corretamente discriminando-as quanto à sua origem bem como quanto à sua distância ao aquífero.

É de registar também a apresentação de condicionantes à execução do perímetro de proteção intermédio.

Tabela 31 - Aplicação dos elementos obrigatórios ao caso de estudo D

	Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Gerais	Características intrínsecas do aquífero	
	Características geomorfológicas da área	✓
	Descrição hidrogeológica da área	✓
	Recarga da captação	✓
	Potabilidade da água	✓
	Quimismo da água	✓
	Limites do aquífero	-
	Modelo conceptual hidrogeológico	-
	Interação com o aquífero	
	Focos poluentes	✓
	Origem do poluente	✓
	Posição dos focos em relação ao aquífero	✓
	Vulnerabilidade à poluição	✓
	Risco de contaminação	-
	Cartografia	
	Cartografia estrutural	✓
	Descrição detalhada das estruturas	✓
	Planta Topográfica	✓
	Localização das captações	✓
	Delimitação de perímetros	✓
	Coordenadas dos vértices (se aplicável) dos perímetros de proteção (sistema EPSG 3763)	✓
	Cartografia geológica	✓
	Carta das fontes e riscos de contaminação	✓
	Perímetros	
	Critérios usados na definição das zonas	-
	Área da zona de proteção imediata	✓
	Área da zona de proteção intermédia	✓
	Área da zona de proteção alargada	✓
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção imediata	✓
	Restrições na zona de proteção intermédia	✓
	Restrições na zona de proteção alargada	✓

Específicos	Perímetros	
	Área da zona de proteção especial	o
	Área da zona de proteção perante intrusão salina	o
	Restrições	
	Restrições na zona de proteção especial	o
	Restrições na zona de proteção perante intrusão salina	o

Tabela 32 - Aplicação dos elementos essenciais ao caso de estudo D

Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Características intrínsecas do aquífero	
Zona de alimentação da captação	-
Zona de chamada da captação	-
Zona de influência da captação	-
Profundidade do aquífero	-
Poder depurador da zona vadosa	-
Tempo de percurso dos poluentes	-
Cartografia	
Cartografia geológica	
Contem perfil geológico	-
Contem coluna estratigráfica	-
Características da captação	
Caudal a extrair	✓

Tabela 33 - Aplicação dos elementos acessórios ao caso de estudo D

Dados a apresentar	Águas Minerais Naturais/Nascente
Plano de exploração aprovado	✓

- ✓ Apresentado
- Não apresentado
- o Não aplicável

5. Considerações finais

Com o fim de agilizar a análise das propostas de perímetros de proteção, foi criada um conjunto de checklists apresentadas nos capítulos anteriores. As checklists apresentadas não são autossuficientes, sendo necessária uma análise mais pormenorizada aos dados que são fornecidos. A sua utilização permite, no entanto, que rapidamente sejam observáveis lacunas que podem inviabilizar a proposta até que estas sejam colmatadas.

As checklists foram testadas recorrendo a propostas de perímetros de proteção, gentilmente cedidas pelos concessionários/proprietários das captações em causa, tendo sido detetadas algumas lacunas e diferentes parâmetros em falta em casos com a mesma finalidade.

Dentro das propostas analisadas, a proposta C é a mais incompleta e, por isso, passível de reprovação ou, na melhor das hipóteses, aprovada com muitas restrições. As outras três propostas apresentam-se bem elaboradas e bastante completas, sendo aprovada a proposta B, e aprovada com restrições a proposta A e D

A utilização desta checklist apresenta aspetos positivos, bem como negativos.

Os aspetos positivos assentam na rapidez de análise das propostas e na introdução de um standard de qualidade necessário em futuras propostas apresentadas.

Como aspetos negativos é de referir que a checklist apresenta apenas um numero de parâmetros estáticos que podem não se adequar a 100% à proposta apresentada.

No futuro, sugere-se, o desenvolvimento de uma metodologia semelhante a esta, mas para ser aplicada à proteção de captações de águas superficiais.

6. Bibliografia

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G. (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. US Environmental Protection Agency, Washington DC, 622p.

Bear, J., (1979) Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill International Book Co., 1979, University of Michigan

Carvalho J.M. (1984). A metodologia de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofílicas portuguesas. Volume d'Homage au Géologue G. Zbyszewski, Éditions Recherche sur les Civilisations, Paris. pp. 137-153.

Carvalho, J.M. (2006) Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas, Universidade de Aveiro

Custodio, E., Llamas, M.R., (2001) Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, Barcelona

Eimers, J.L., Weaver J.C., Terziotti S., Midgette R. W. (2000) Methods of rating unsaturated zone and watershed characteristics of public water supplies in North Carolina. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations, Raleigh, North Carolina, Report 99-4283

Francés, A., Paralta, E., Fernandes, J., Ribeiro, L. (2001) Development and application in Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index. 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risc, Unesco/IAH, Lisbon, 9p

Fetter, C.W., (2001) Applied Hydrogeology (4th ed.), Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 598p.

Focazio, Michael J., Geological Survey (U.S.) (2002). Assessing ground-water vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey; Denver, CO

Foster S.S.D (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. TNO Committee Hydrological Research Proceedings & Information

Lemos Barbosa, K.L. (2007). Zoneamento de aquíferos através da delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público de água: O caso da cidade de João Pessoa – PB. Tese de Mestrado em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. 81p.

Lobo Ferreira, J.P., Teresa E. Leitão, Manuel M. Oliveira, João Soromenho Rocha, Ana Estela Barbosa. (2009). Protecção das origens superficiais e subterrâneas nos sistemas de abastecimento de água. Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

Lobo Ferreira, J. P., M. M. Oliveira, P. C. Ciabatti, M. J. Moinante, M. E. Novo e T. E. Leitão. (1995). Desenvolvimento de um inventário das águas subterrâneas de Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

Moreno-Merino, L., Martínez-Navarrete, C., López Geta, J.A. y Navarrete Martínez, P. (1991). Guía Metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterrâneas, IGME, Madrid

Navarrete, C. M., García, A.G. (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterrânea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid

Decreto-Lei n.º 382/99, de 22 de Setembro. Diário da República nº 222/99 – I Série-A, Ministério do Ambiente. Lisboa

Decreto-Lei n.º 54/2015, de 22 de Junho. Diário da República nº 119/2015 – 1ª Serie, Lisboa

Indigenous and Northern Affairs Canada - First Nations On-Reserve Source Water Protection Plan. Disponível em: <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/eng/1398369474357> - Acesso em 23 de março de 2016

Universidade de Évora. Disponível em: <http://home.dgeo.uevora.pt/~ems/files/Anexo%20B-04.pdf> - Acesso em 5 de fevereiro de 2016

Lenntech: Water Treatment and Purification. Disponível em: <http://www.lenntech.com/groundwater/pollution-sources.htm> - Acesso em 25 de abril de 2016

Anexo 1 - Métodos de definição de perímetros

Existem diversos métodos para a definição de um perímetro de segurança e serão aqui explanados.

Método do raio fixo arbitrário

Proteção básica que consiste na definição de áreas circulares em torno da captação. Os raios são escolhidos arbitrariamente, com recurso a condições hidrogeológicas locais ou nas dimensões atribuídas a outras captações proximais.

É um método que por variados motivos pode ser ineficaz e deve ser apenas utilizado como perímetro preliminar em casos de estudo mais avançado ou em situação de ameaça iminente.

Métodos analíticos

Método do raio fixo calculado em função do tempo de propagação:

Este método consiste na colocação de áreas circulares circundando a captação com um raio definido a partir do tempo que um determinado poluente presente nas águas leva a chegar à captação. Os raios são calculados de forma a que um potencial poluente seja alvo de minimização, apresentando concentrações seguras antes de alcançar a captação. A captação é tomado como o único local a drenar o aquífero em questão, admitindo assim que não existem direções preferenciais de fluxo.

A equação usada para o efeito é a seguinte

$$Q \times t = n \times \pi \times b \times r^2 \leftrightarrow r = \sqrt{\frac{Q \times t}{n \times b \times \pi}}$$

Q = caudal da exploração da captação (m³/d)

t = tempo de propagação (dias)

n = porosidade eficaz do aquífero

b = espessura saturada da captação (m)

r = raio do perímetro de proteção (m)

Este método é pouco viável para aquíferos abertos visto que, não considera recargas e o cone de rebaixamento dos mesmos não é cilíndrico. O gradiente hidráulico deve ser ainda muito baixo (entre 0,0005 e 0,001) para que a zona de influência seja circular.

Método do raio fixo calculado em função do rebaixamento:

Neste método as áreas dos perímetros são definidas pelos níveis de rebaixamento do nível piezométrico. Para que este método seja totalmente viável é necessário que varias condições estejam presentes:

- Ausência de recargas anteriores
- Aquífero homogéneo e isotrópico relativamente à sua permeabilidade
- Aquífero infinito em toda sua extensão
- Captação com diâmetro igual a zero
- Captação atravessa completamente a formação aquífera
- Água captada descarregada de forma instantânea sem retorno ao aquífero
- Fluxo de água radial em torno da captação sem componentes verticais
- Superfície piezométrica regional praticamente plana
- Caudal de extração constante

Para este método utilizasse a Equação de Theis para regime variável:

$$s = \frac{Q}{4 \times \pi \times T} \times W(u)$$

T = transmissividade do aquífero (m³/dia)

s = rebaixamento a uma distancia r da captação (m)

W(u) = função de poço

Método de Kreitler e Senger

Este método é usado na presença de um gradiente hidráulico regional significativo, em que o cone de rebaixamento se estende para montante. A distância a que se definem os perímetros é calculada a partir de tentativa e erro baseando-se num tempo de propagação definido pela seguinte equação:

$$t_x = \frac{n}{K \times i} \left[r_x - \left(\frac{Q}{2 \times \pi \times K \times b \times i} \right) \times \ln \left\{ 1 + \left(\frac{2 \times \pi \times K \times b \times i}{Q} \right) \times r_x \right\} \right]$$

t_x = tempo de propagação a partir do ponto x até á captação (dias)

n = porosidade eficaz do aquífero

K = condutividade hidráulica (m/dia)

i = gradiente hidráulico antes da extração

r_x = distância percorrida durante t_x (m)

Q = caudal da exploração da captação (m³/dia)

b = espessura do aquífero (m)

A distância obtida apenas nos determina uma linha, definida por um ponto a jusante e um a montante, paralela ao fluxo. Para se determinar um perímetro deve-se combinar com a anterior a Equação de Fluxo Uniforme, que permite calcular a distância (X_L) e largura máxima (Y_L) da zona de contribuição.

$$X_L = -\frac{Q}{2 \times \pi \times K \times b \times i} \quad \text{e} \quad Y_L = \pm \frac{Q}{2 \times K \times b \times i}$$

Método de Wyssling

O cálculo do perímetro é determinado pela largura da zona de chamada da captação e tempo de propagação pretendidos.

É apenas aplicável a aquíferos livres, porosos e homogéneos e permite calcular as distancias de proteção quer a montante quer a jusante a partir das seguintes equações:

$$S_0 = \frac{+I + \sqrt{I(I + 8 \times X_0)}}{2} \quad \text{e} \quad S_u = \frac{-I + \sqrt{I(I + 8 \times X_0)}}{2}$$

S_0 = distância a montante correspondente ao tempo t (m)

S_u = distância a jusante correspondente ao tempo t (m)

Para a sua resolução é necessário determinar I e X_0 :

$$I = v_e \times t \quad \text{em que} \quad v_e = \frac{K \times i}{n}$$

v_e = velocidade eficaz (m/dia)

t = tempo de propagação (dias)

K = condutividade hidráulica (m/dia)

i = gradiente hidráulico antes da extração

n = porosidade eficaz do aquífero

$$X_0 = \frac{Q}{2 \times \pi \times b \times i}$$

Q = caudal da exploração da captação (m³/dia)

b = espessura do aquífero (m)

i = gradiente hidráulico antes da extração

Método de Krijgsman e Lobo Ferreira

Este método é exigente em termos do conhecimento da piezometria regional, e do gradiente hidráulico existente. Por este método podemos determinar a zona de proteção intermédia (tempo de propagação de 50 dias), apresentando esta uma forma elíptica a circular dependente do gradiente hidráulico existente. Quanto maior o gradiente, mais elíptica deverá ser a zona de proteção.

Neste método as distâncias são calculadas separadamente três direções, a montante, a jusante e perpendicular ao fluxo.

Para a distância de proteção a montante da captação usa-se a seguinte formula:

$$r_{max} = \frac{(2 \times 10^{-5} \times x^5 - 9 \times 10^{-4} \times x^4 + 15 \times 10^{-3} \times x^3 + 37 \times 10^{-2} \times x^2 + x)}{F}$$

Para a distância de proteção a jusante da captação usa-se a seguinte formula:

$$r_{min} = \frac{(-42 \times 10^3 \times x^3 + 37 \times 10^2 \times x^2 - 1,04 \times x)}{F}$$

Para a distância de proteção perpendicular ao fluxo usa-se a seguinte formula:

$$r_p = 4 \times \sqrt{\frac{Q}{n \times b}}$$

A resolução das equações anteriores necessitam o calculo prévio das variáveis x e F :

$$F = \frac{2 \times \pi \times K \times b \times i}{Q} \quad \text{e} \quad X = \sqrt{\frac{2 \times F \times t}{A}} \quad \text{em que} \quad A = \frac{n}{K \times i}$$

K = condutividade hidráulica (m/dia)

b = espessura do aquífero (m)

i = gradiente hidráulico antes da extração

Q = caudal da exploração da captação (m^3/dia)

t = tempo de propagação (dias)

n = porosidade eficaz do aquífero

Para cada um destes cálculos são apresentadas diversas limitações ao método.

No que diz respeito à distância de proteção a montante, o valor de x deve ser menor que 18, indicando que zonas de condutividade elevada como os aquíferos cársicos, zonas de gradientes muito elevados (locais de rara construção de captações), furos com tubo ralos de grande comprimento ou extrações de baixos caudais, apresentam condições hidrogeológicas não representáveis a partir deste método.

A jusante da captação é necessário ter em conta que se $x < -3,5$ a distancia mínima de proteção deve ser de 25 metros, visto que valores inferiores são extremamente arriscados. A equação é ainda não aplicável para valores de $n < 0,1$.

Se nenhuma destas limitações se apresentar existe ainda a possibilidade de possuir em erro de calculo de 15%, se e só se, r_{max} for quatro vezes superior a r_{min} , sendo o resultado final um perímetro em sobreproteção

Anexo 2 - Outros índices de vulnerabilidade

Método EPPNA

Este método foi proposto pelo Plano Nacional de Água em outubro de 1992 em “Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel”, atribuindo classes de vulnerabilidades de acordo com as características litológicas das formações.

Tabela 34 – Vulnerabilidade segundo o método EPPNA

Código	Características Geológicas	Vulnerabilidade
V1	Rochas carbonatadas de elevada carsificação	Alta
V2	Rochas carbonatadas com carsificação media a alta	Media a Alta
V3	Sedimentos não consolidados com ligação hidráulica com a superfície superficial	Alto
V4	Sedimentos não consolidados sem ligação hidráulica com a superfície superficial	Médio
V5	Rochas carbonatadas	Medio a Baixo
V6	Rochas fissuradas	Baixo e Variável
V7	Sedimentos consolidados	Baixo
V8	Inexistência de aquíferos	Muito Baixo

Índice GOD

Foi desenvolvido por Foster, (1987) e utiliza 3 parâmetros:

- A ocorrência de águas subterrâneas (livre, semiconfinado, confinado)
- Classe global do aquífero (consolidação, litologia)
- Profundidade do nível freático

É calculo multiplicando os 3 valores e segue o seguinte esquema

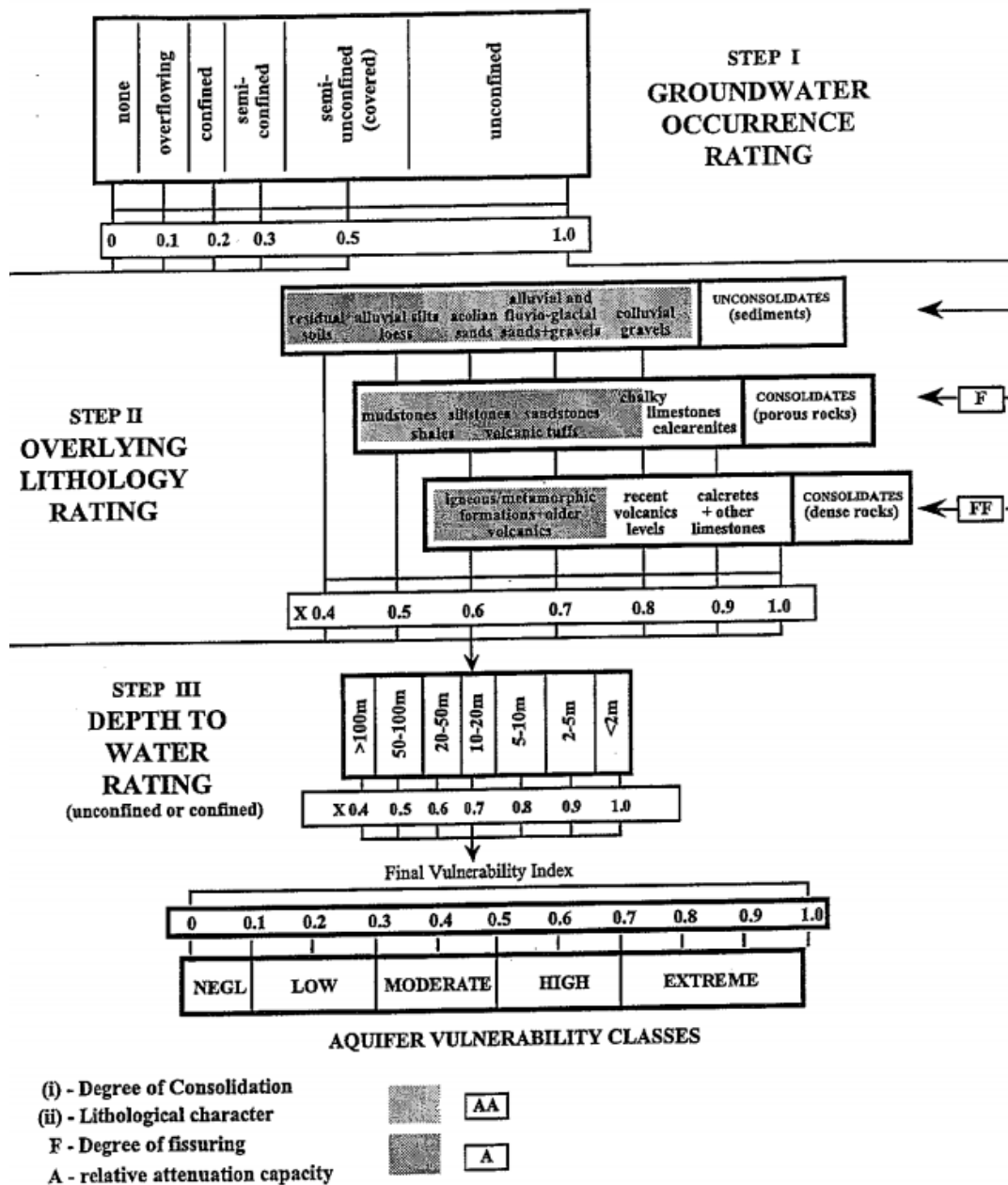


Figura 5 - Esquema para determinar o índice GOD
 Extraído de: Foster S.S.D (1987)

Índice AVI

Calculado a partir da equação $C = \sum_j \frac{E_j}{K_j}$ em que:

E_j = espessura de cada camada j acima do aquífero superior (m)

K_j = condutividade hidráulica de cada camada (m/dia)

c = fator teórico

O valor de c pode ser usado como valor ou como o seu logaritmo ($\log(c)$)

Com o valor de c obtido existem as seguintes classes:

Quadro 4 - Classes de vulnerabilidade segundo a metodologia AVI

c (anos)	Log c	Vulnerabilidade
0 a 10	< 1	Extremamente alta
10 a 100	1 a 2	Alta
100 a 1000	2 a 3	Moderada
1000 a 10000	3 a 4	Baixa
>10000	>4	Extremamente baixa

Figura 6 – Classes de vulnerabilidade no índice AVI

Extraído de: Francés, A., Paralta, E., Fernandes, J. e Ribeiro, L. (2001)