



**TEXTO DE APOIO À CANDIDATURA
AO TÍTULO DE ESPECIALISTA**

CONSTRUÇÃO CIVIL E ENGENHARIA CIVIL

-HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS -

Fernando Ferreira da Cruz

*Este texto foi preparado para o único
objectivo de servir de apoio aos
trabalhos apresentados para a defesa
da candidatura ao Título de
Especialista.*

Índice

Capítulo 1	1
HIDROGEOLOGIA – ALGUNS CONCEITOS	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Massas de Água Subterrânea em Portugal	3
1.3 O Ciclo Hidrológico	5
1.4 Propriedades Hidrogeológicas	7
1.4.1 Porosidade e Permeabilidade	7
1.4.2 Lei de Darcy e Condutividade Hidráulica	9
1.4.3 Transmissividade	11
1.5 Classificação Hidrogeológica das Formações Rochosas	11
1.6 Características Geológicas dos Aquíferos	14
1.7 Recarga e Descarga Aquíferas	16
Capítulo 2	18
QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	18
2.1 Generalidades	18
2.2 Qualidade da Água Subterrânea em Portugal	19
2.3 Sustentabilidade Quantitativa	21
2.4 Poluição de Águas Subterrâneas	22
2.4.1 Fontes de Poluição	23
2.4.2 Causas da Poluição Originada pela Actividade Humana	23
2.5 . Vulnerabilidade à Poluição	27
2.5.1 O Método DRASTIC	28
2.5.2 O Método IS (Índice de Susceptibilidade)	32
2.5.3 O Método EPIK	35
2.5.4 O Método VULFRAC	36
2.5.5 O Método GOD	38

Capítulo 3	40
CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	40
3.1 Aspectos Gerais	40
3.2 Localização da Captação de Água Subterrânea.....	40
3.3 Tipos de Captações Superficiais	42
3.3.1 Poços Escavados	43
3.3.2 Galerias	43
3.3.3 Sanjas Drenantes e Drenos	44
3.3.4 Poços escavados com Drenos Radiais	44
3.4 Captações Profundas – Furos.....	45
3.4.1 Percussão a Cabo	45
3.4.2 Rotopercussão a Ar Comprimido.....	47
3.4.3 Rotação com Lamas Bentoníticas.....	48
3.4.4 Diâmetros de Perfuração.....	52
3.4.5 Aplicação da Coluna de Revestimento – Entubamento.....	53
3.4.6 Pré-Filtro	55
3.4.7 Limpeza e Desenvolvimento	55
3.4.8 Cimentação.....	56
3.4.9 Testes de Produção – Ensaios de Bombagem	57
3.4.10 Bombagem	58
Capítulo 4	60
PERÍMETROS DE PROTECÇÃO ÀS CAPTAÇÕES	60
4.1 Generalidades.....	60
4.2 Critérios para Delimitação de Perímetrosde Protecção.....	62
4.3 Algumas Metodologias para Determinar Perímetros de Protecção	66
4.3.1 Raio Fixo Arbitrário.....	67
4.3.2 Métodos Analíticos.....	67
4.3.2.1 Raio Fixo Calculado.....	68
4.3.2.2 Método de Wyssling.....	72
4.3.3 Métodos Hidrogeológicos	74
4.3.4 Métodos Numéricos	75
4.3.5 Método de Rehse / Bolsenkotter (Poder Auto-Depurador do Terreno)	76
4.3.6 Traçadores	80
4.4 Aplicação do Perímetro de Protecção.....	82

Bibliografía

83

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Distribuição da água na Terra (adaptado de Auge, 2004).	1
Figura 1.2 – Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (INAG, 2005).	4
Figura 1.3 – Massas de água da bacia hidrográfica do Mondego (INAG, 2005).	4
Figura 1.4 – O ciclo hidrológico (adaptado IGM, 2001).	5
Figura 1.5 - Zona saturada e não saturada no subsolo.	6
Figura 1.6 – Porosidade e Permeabilidade.	7
Figura 1.7 – Esquema representativo da experiência de Darcy.	10
Figura 1.8 – Aquífero livre e confinado (IGM, 2001).	12
Figura 1.9 – Comportamento dos furos realizados nos aquíferos livres e confinados (IGM).	13
Figura 1.10 - Circulação de água nos meios porosos, fracturados e cárnicos (IGM, 2001).	14
Figura 1.11 – Esquema de recarga aquífera.	16
Figura 2.1 – Poluição da água subterrânea com diferentes origens (INAG, 2005).	24
Figura 2.2 –Lixiviados de lixeira	25
Figura 2.3 –Poluição agrícola	25
Figura 2.4 –Poluição industrial	26
Figura 2.5 - Intrusão salina (INAG, 2005)	27
Figura 2.6 – Aplicação do método DRASTIC	32

Figura 2.7 – Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos (Foster et al, 2003)	38
Figura 3.1 – Fotografia aérea	41
Figura 3.2 – Mapa de uma prospecção geofísica	41
Figura 3.3 –Radiestesista	42
Figura 3.4 – Esboço de um poço escavado	43
Figura 3.5 – Esboço de uma galeria	43
Figura 3.6 – Esboço de drenos	44
Figura 3.7 – Esquema de sanjas drenantes.....	44
Figura 3.8 – Poço escavado com drenos radiais	45
Figura 3.9 – Equipamento de percussão a cabo	46
Figura 3.10 – Martelos pneumáticos e brocas	47
Figura 3.11 - Perfuração a ar comprimido.....	47
Figura 3.13 – “Tricones”	48
Figura 3.13 – Esboço dum equipamento de rotação e perfil do furo	49
Figura 3.14 – Perfuração a “rotary”	49
Figura 3.15 - Exemplo de diagrfias eléctricas	50
Figura 3.16 – Amostras da perfuração.....	51
Figura 3.17 – Tubos “ralos” em aço e PVC.....	53
Figura 3.18 – Coluna de revestimento definitiva.....	54
Figura 3.19 – Pré filtro em redor de um tubo ralo	55
Figura 3.20 – Desenvolvimento a ar comprimido.....	56

Figura 3.21 – Equipamento de extracção de água.....	58
Figura 4.1 - Exemplo da distribuição dos 3 perímetros de protecção contíguos de uma captação (adaptado de INAG)	61
Figura 4.2 – O método do raio fixo calculado (adaptado de Moinante, 2003)	70
Figura 4.3 – Determinação de isóconas (adaptado ITGE in Moinante ,2003)	73
Figura 4.4 - Zona considerada no método Rehse/Bolsenkotter (adaptada de ITGE, 1991).....	77
Figura 4.5 – Curva de concentração do traçador versus tempo de residência (adaptada de Kâss, 1998 in Cruz F.F., 2000).....	81

Índice de Quadros

Quadro 1.1 – Consumos de água subterrânea.....	2
Quadro 1.2 – Valores médios de porosidade.....	8
Quadro 1.3 – Valores da permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica de materiais não consolidados.....	9
Quadro 1.4 – Relação entre a porosidade/condutividade hidráulica e o tipo de formação rochosa.....	13
Quadro 2.1 – Massas de água em risco de não cumprir objectivos ambientais por bacia hidrográfica (INAG, 2005).....	20
Quadro 2.2 – Caracterização complementar das massas de água em risco por.....	20
Quadro 2.3 – Parâmetro D – Profundidade da zona não saturada.....	29
Quadro 2.4 – Parâmetro R – Recarga profunda do aquífero.....	29
Quadro 2.5 – Parâmetro A – Material do aquífero.....	29
Quadro 2.6 – Parâmetro S – Tipo de solo.....	30
Quadro 2.7 – Parâmetro T – Topografia.....	30
Quadro 2.8 – Parâmetro I – Impacto da zona não saturada.....	30
Quadro 2.9 - Parâmetro C – Condutividade hidráulica.....	30
Quadro 2.10 - Pesos a atribuir a cada parâmetro do DRASTIC (geral e pesticidas).....	31
Quadro 2.11 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC.....	31
Quadro 2.12 – Classes definidas para os parâmetros D e R.....	33

Quadro 2.13 - Classes definidas para o parâmetro A	33
Quadro 2.14- Classes definidas para o parâmetro T.....	34
Quadro 2.15- Classificação das classes do IS	34
Quadro 2.16- Aspectos de geomorfologia cársica	35
Quadro 2.17- Espessura da cobertura de protecção	35
Quadro 2.18- Tipo de infiltração	35
Quadro 2.19- Desenvolvimento da rede cársica	36
Quadro 2.20- Índice EPIK e classes de vulnerabilidade	36
Quadro 2.21- Classes de vulnerabilidade VULFRAC.....	37
Quadro 3.1- Métodos de perfuração aconselhados em função do diâmetro e litologia	51
Quadro 3.2- Caudais de extracção recomendados em função do diâmetro de entubamento	52
Quadro 4.1- Metodologias para determinação do perímetro de protecção (Navarrete, 2003)	66
Quadro 4.2- Poder depurador da zona não saturada (adaptado de ITGE, 1991)	78
Quadro 4.3- Poder depurador da zona saturada (ITGE, 1991).....	79
Quadro 4.4 - Poder depurador das rochas carbonatadas e fracturadas (ITGE, 1991)	79

Capítulo 1

HIDROGEOLOGIA – ALGUNS CONCEITOS

1.1 Generalidades

A água é um elemento fundamental para a manutenção de todas as formas de vida no nosso planeta. Apesar de dois terços da superfície da Terra ser coberta por água, apenas uma pequena porção dessa água é doce. De toda a água doce disponível para consumo, 96% é proveniente de água subterrânea (Figura 1.1).

O volume de água subterrânea corresponde a 22% do volume de águas continentais, contra 0,3% correspondentes a rios e lagos de água doce. Descontando-se as calotas polares e o gelo, 96% das águas continentais aproveitáveis ocorrem como água subterrânea e apenas 1,3% como água doce de superfície (Auge, 2004).

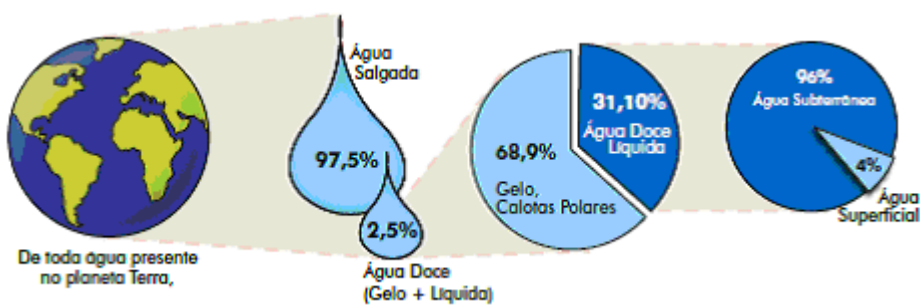


Figura 1.1 – Distribuição da água na Terra (adaptado de Auge, 2004).

Esta simples comparação já seria suficiente para justificar a exploração preferencial da água subterrânea. A ela somam-se a qualidade quase sempre superior e, conseqüentemente, a menor necessidade de tratamento (muitas vezes, pode-se dispensar qualquer tratamento da água subterrânea), além do menor risco de contaminação acidental e da maior facilidade e

menor custo da captação em comparação com a utilização de água dos rios, a captação de água muitas vezes pode ser localizada a menores distâncias do local de utilização e não há necessidade de construção de barragens; com isto faz-se economia na implantação das obras e na operação e manutenção, pela eliminação das instalações de tratamento e de longas adutoras.

Estima-se que a totalidade dos recursos subterrâneos de água doce seja de cerca de 10 000 000 km³ (Planet Earth, 2007), mais de duzentas vezes o total dos recursos de água doce renovados anualmente pela chuva. Isto acontece porque a maior parte dos recursos de água subterrânea se acumularam ao longo de séculos, ou mesmo milénios. Em Portugal Continental estima-se que as reservas de águas subterrâneas superem largamente as reservas superficiais de albufeiras, com valores de cerca de 100 km³ e de 12 km³, respectivamente (INAG, 2007)

As águas subterrâneas permitem abastecer cerca de 44% da população portuguesa do Continente (INAG, 2007)) e apresentam, ainda, crucial importância para o abastecimento à agricultura e à indústria. Na Europa e na Rússia, 80% da água potável é subterrânea (Planet Earth, 2007), e em alguns países, como por exemplo a Dinamarca, Malta e Arábia Saudita, os recursos hídricos subterrâneos chegam a constituir quase 100% dos recursos utilizados. O Quadro 1.1 mostra a distribuição dos consumos de águas subterrâneas de alguns países europeus (Auge, 2004).

Quadro 1.1 – Consumos de água subterrânea.

EXTRACÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA CONSUMO HUMANO DE ALGUNS PAÍSES EUROPEUS		
	Km³/ano	%
Portugal	??	44
Alemanha	6,24	67
Bélgica	0,57	76
Dinamarca	0,70	98
França	5,0	50
Holanda	1,15	63
Inglaterra	2,5	32
Itália	9,95	36

As águas subterrâneas apresentam potencialidades ímpares, que importa preservar, não apenas do ponto de vista da quantidade mas também da qualidade. Essas potencialidades resultam da sua resiliência a efeitos de flutuações climáticas sazonais e a processos de contaminação, apresentando uma forte estabilidade das reservas de água e da qualidade oferecida pelos processos naturais de purificação. Não obstante, a natureza do processo de recarga de águas subterrâneas implica que haja uma passagem da água da superfície através do solo, pelo que o controlo da sua quantidade e qualidade está intimamente ligado ao uso e à ocupação do solo e a todas as actividades e pressões existentes à superfície, para além das características naturais do meio.

1.2 Massas de Água Subterrânea em Portugal

A Directiva Quadro da Água (DQA, 2000), introduziu o conceito de “massa de água subterrânea” como um meio de águas subterrâneas delimitado que faz parte de um ou mais aquíferos. Definindo também “aquífero”, como uma ou mais camadas subterrâneas de rocha ou outros estratos geológicos suficientemente porosos e permeáveis para permitirem um fluxo significativo de águas subterrâneas ou a captação de quantidades significativas de águas subterrâneas.

A repartição das massas de águas não é uniforme e encontra-se intimamente relacionada com os processos e fenómenos geológicos. Desta feita, o INAG estabeleceu para o território de Portugal Continental a existência de quatro unidades hidrogeológicas (Figura 1.2), que correspondem às quatro grandes unidades morfo-estruturais em que o país se encontra dividido.

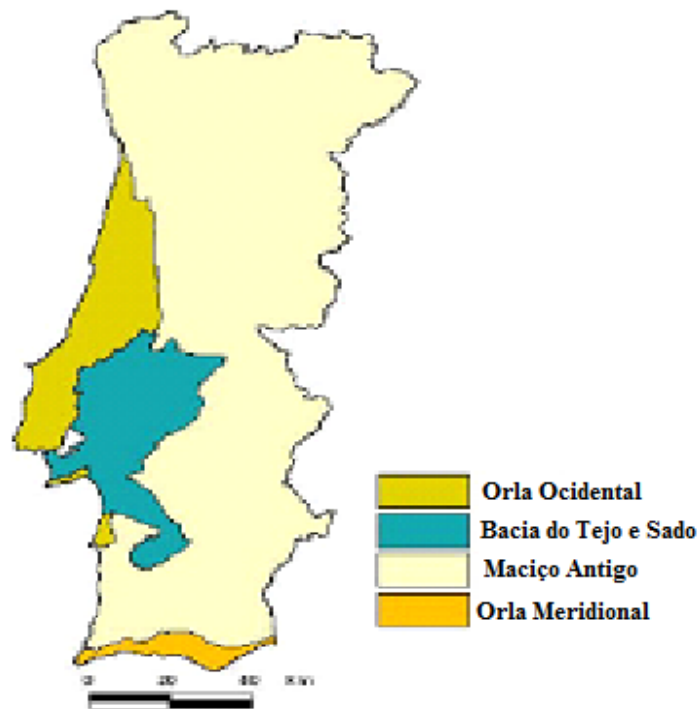


Figura 1.2 – Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (INAG, 2005).

Nos termos do Decreto-Lei n.º 77/2006, de 30 de Março, o Instituto da Água, I.P procedeu à identificação e à delimitação das massas de água em Portugal Continental. A título de exemplo, como mostra a Figura 1.3, na bacia hidrográfica do Mondego, encontram-se delimitadas 11 massas de água subterrâneas.

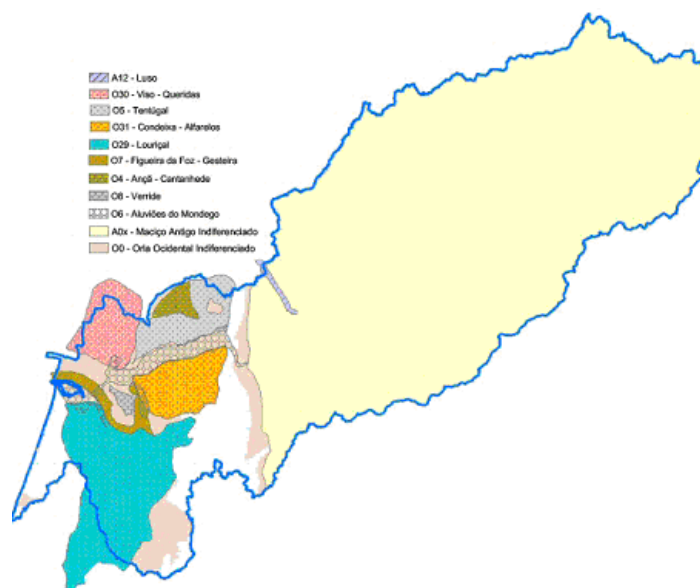


Figura 1.3 – Massas de água da bacia hidrográfica do Mondego (INAG, 2005).

1.3 O Ciclo Hidrológico

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 1.4) está ligado ao movimento e à troca de água nos seus diferentes estados físicos, que ocorre na Hidrosfera, entre os oceanos, as calotes de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Este movimento permanente deve-se ao Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e à gravidade, que faz com que a água condensada caia (precipitação) e que, uma vez na superfície, circule através de linhas de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos (escoamento superficial) ou se infiltre nos solos e nas rochas, através dos seus poros e fracturas (escoamento subterrâneo).

Nem toda a água precipitada alcança a superfície terrestre, já que uma parte, na sua queda, volta a evaporar-se. A água que se infiltra no solo é sujeita a evaporação directa para a atmosfera e é retida pela vegetação, que através da transpiração, a devolve à atmosfera. Este processo chamado de evapotranspiração ocorre no topo da zona não saturada, ou seja, na zona onde os espaços entre as partículas de solo contêm tanto ar como água.

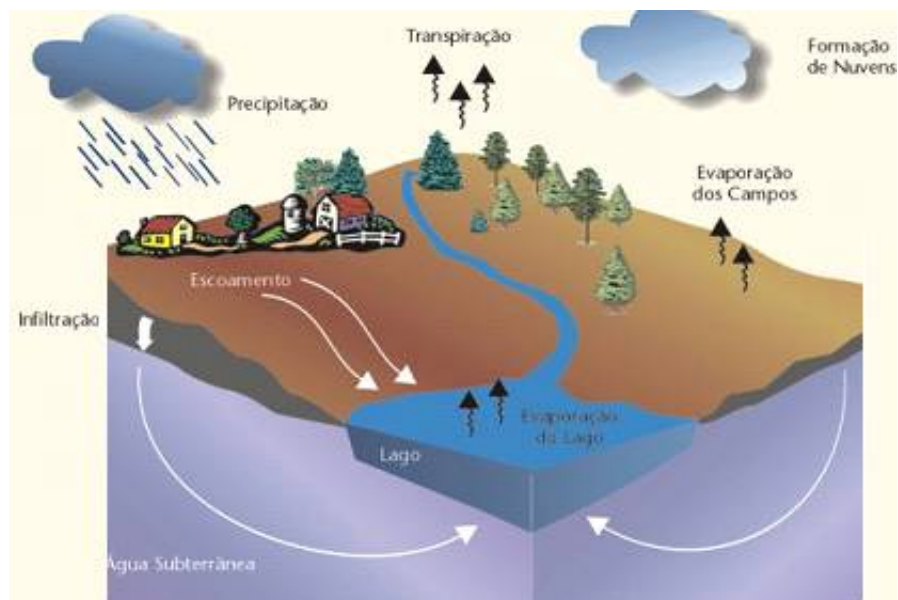


Figura 1.4 – O ciclo hidrológico (adaptado IGM, 2001).

A água que continua a infiltrar-se e atinge a zona saturada das rochas, entra na circulação subterrânea e contribui para um aumento da água armazenada (recarga dos aquíferos). Como

1.4 Propriedades Hidrogeológicas

Na hidrogeologia clássica a denominação “água subterrânea” é atribuída apenas a água que circula na zona saturada, isto é, apenas nos domínios situados abaixo da superfície freática, embora toda a água que evolui nos domínios subsuperficiais seja evidentemente subterrânea.

As águas subterrâneas encontram-se a preencher os espaços que ocorrem no meio sólido, isto é, as formações rochosas. A quantidade de água que pode existir no interior de uma dada rocha depende, portanto, do volume global desses espaços. Na hidrogeologia é muito importante caracterizar e naturalmente quantificar esses volumes, para tal é necessário avaliar diversos parâmetros, que a seguir de especificam.

1.4.1 Porosidade e Permeabilidade

Para existir água subterrânea ela terá de conseguir atravessar e circular através das formações geológicas que têm de ser porosas e permeáveis.

Diz-se que uma formação é porosa quando é formada por um agregado de grãos entre os quais existem espaços vazios que podem ser ocupados pela água.

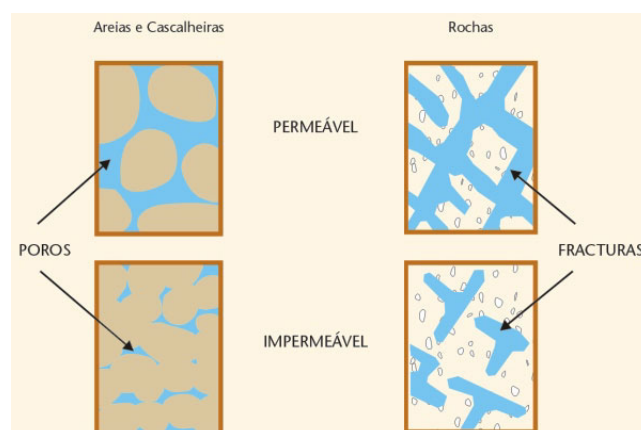


Figura 1.6 – Porosidade e Permeabilidade.

Aos espaços vazios chamamos poros. Existem outras formações formadas por material rochoso onde os espaços vazios correspondem a diaclases e fracturas e não propriamente a

poros (Figura 1.6). A porosidade das formações será então a razão entre o volume de vazios e o volume da formação.

O Quadro 1.2 mostra os valores médios de porosidade determinados para diversos tipos de rochas (AZEVEDO, 2001).

Quadro 1.2 – Valores médios de porosidade.

TIPOS LITOLÓGICOS		POROSIDADE (%)
Depósitos não consolidados	Areia grossa / Cascalho	25-40
	Areia média	25-50
	Areia fina	35-50
	Argila	40-70
Rochas	Basalto fracturado	5-50
	Calcário cársico	5-50
	Arenito	5-30
	Calcário, dolomia	0-20
	Argila xistosa/xisto argilítico	0-10
	Rochas cristalinas fracturadas	0-10
	Rochas cristalinas compactas	0-5

Os espaços vazios podem estar ligados ou podem estar semi-fechados condicionando a passagem de água através da formação (figura 1.6), esta característica designa-se por permeabilidade. A “permeabilidade intrínseca” é uma propriedade “geométrica” uma vez que depende exclusivamente da granulometria do meio e em particular da uniformidade. Habitualmente expressa-se em cm^2 ou Darcy. É uma propriedade hidrogeológica usualmente utilizada para caracterizar meios porosos granulares não consolidados.

Outro termo associado a estas propriedades é a “condutividade hidráulica” que consiste na maior ou menor facilidade com que a água atravessa (circula) num meio poroso e é expressa em m/s. No quadro 1.3 apresentam-se alguns valores de permeabilidade intrínseca e

condutividade hidráulica de alguns materiais porosos (FREEZE *et al.*, 1979).

Quadro 1.3 – Valores da permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica de materiais não consolidados

MATERIAL	PERMEABILIDADE INTRÍNSECA (cm ²)	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (cm/s)
Argila	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁶
Silte, silte argiloso	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻⁹	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴
Areia argilosa	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻⁹	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴
Areia siltosa, areia fina	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻⁸	10 ⁻⁵ - 10 ⁻³
Areia bem distribuída	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁶	10 ⁻³ - 10 ⁻¹
Cascalho bem distribuído	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁵	10 ⁻² - 10 ⁰

Um terreno muito poroso pode ser muito permeável se os seus poros forem grandes e bem ligados, tal como sucede nas areias limpas, ou pode ser quase impermeável se apesar de terem muitos poros, eles forem pequenos e se encontrarem semi-fechados, como sucede nos materiais argilosos.

Em geral os terrenos de baixa porosidade tendem a ser pouco permeáveis uma vez que as ligações entre os poros são difíceis de estabelecer, como sucede nas rochas metamórficas e nas ígneas.

1.4.2 Lei de Darcy e Condutividade Hidráulica

Foi o francês Henry Darcy quem em 1856 estabeleceu uma lei relativamente ao fluxo subterrâneo em meio poroso. Darcy fez passar água a um caudal constante (Q) através de um corpo de areia com uma determinada secção (A) e comprimento (L).

Dessas experiências resultou a(s) seguinte(s) expressão(ões) conhecida como lei de Darcy:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta H}{L} \quad \text{ou} \quad V = -Ki$$

onde:

Q = Caudal (m³/s);

S = Secção atravessada (m²);

L = Distância percorrida ao longo da direcção médio do fluxo (m);

ΔH = Diferença de alturas entre o ponto de entrada e saída (m);

K = constante = condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (m/s);

$\frac{\Delta H}{L} = i$ = Gradiente hidráulico (adm);

$K \frac{\Delta H}{L} = V$ = velocidade de darcy (velocidade real vezes porosidade eficaz) (m/s).

A lei de Darcy é claramente válida apenas para escoamentos laminares, meios isotrópicos e homogéneos. No escoamento laminar as velocidades de circulação do fluido são relativamente pequenas, o escoamento é dominado pela viscosidade do fluido e as perdas de carga (ΔH) variam linearmente com a velocidade.

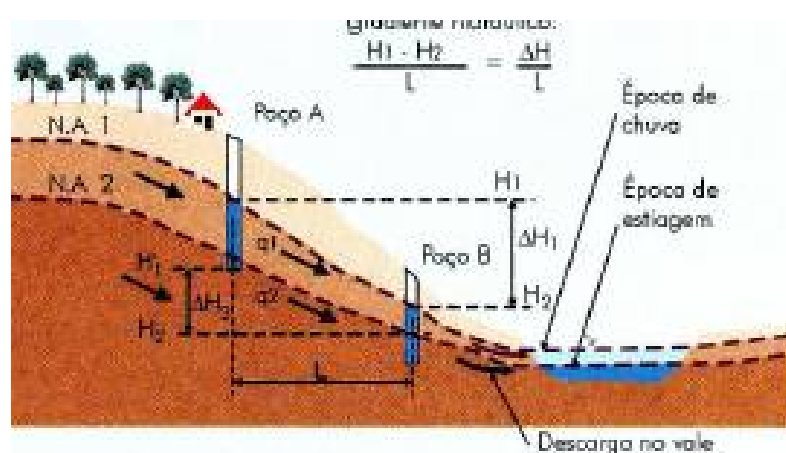


Figura 1.7 – Esquema representativo da experiência de Darcy.

O coeficiente de proporcionalidade (K) que aparece na lei de Darcy, corresponde à condutividade hidráulica e reflecte as características do meio poroso. A condutividade hidráulica também se aplica às rochas não porosas e representa a facilidade com que as rochas se deixam atravessar pela água. Assim, as rochas ígneas e metamórficas tem condutividade hidráulica muito baixa, a areia grossa e os calcários cársicos tem condutividade hidráulica elevada.

1.4.3 Transmissividade

A transmissividade é um parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio para transmitir água. Pode ser definido como a quantidade de água que se escoar através da secção vertical do aquífero quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade:

$$T = Kb$$

onde:

K = Condutividade Hidráulica (m/s);

b = espessura do aquífero (m);

T = Transmissividade (m²/s).

As rochas ígneas cristalinas (granito, sienito, etc) e as rochas metamórficas (xistos, mármore, etc) são caracterizadas por constituírem aquíferos com produtividades baixas. As rochas carbonatadas cársicas (calcário carsificado) e as rochas sedimentares não consolidadas (areias e cascalhos) constituem aquíferos de grande produtividade

As grandes falhas existentes nas formações geológicas podem afectar grandemente a distribuição e o posicionamento dos aquíferos e actuarem ou como barragens subterrâneas ou como condutas através das quais podem escoar grandes quantidades de água.

1.5 Classificação Hidrogeológica das Formações Rochosas

Designam-se como aquíferos as formações geológicas que armazenam e transmitem água em condições de exploração economicamente viáveis. Existem, de acordo com IGM (2001) basicamente dois tipos de aquíferos (Figura 1.8):

Aquífero Livre (ou frático) – formação geológica permeável limitada, na base por uma camada impermeável e, na parte sobrejacente pelo nível de água. Encontra-se parcialmente saturada e o nível da água no aquífero está ao nível da pressão atmosférica. Neste conjunto de

aquíferos podem incluir-se os aquíferos suspensos, que são formados sobre uma camada impermeável ou semipermeável de reduzida extensão e situada acima de superfície freática regional.

Aquífero Confinado – formação geológica permeável limitada na base e no topo por camadas impermeáveis. Encontra-se completamente saturada e a pressão da água no aquífero é superior à pressão atmosférica.

Na Figura 1.8, o aquífero confinado da camada B está limitado no topo e na base pelas camadas C e A respectivamente. O aquífero livre é formado pela camada D.

Se as formações geológicas não são aquíferas então podem ser definidas desta forma:

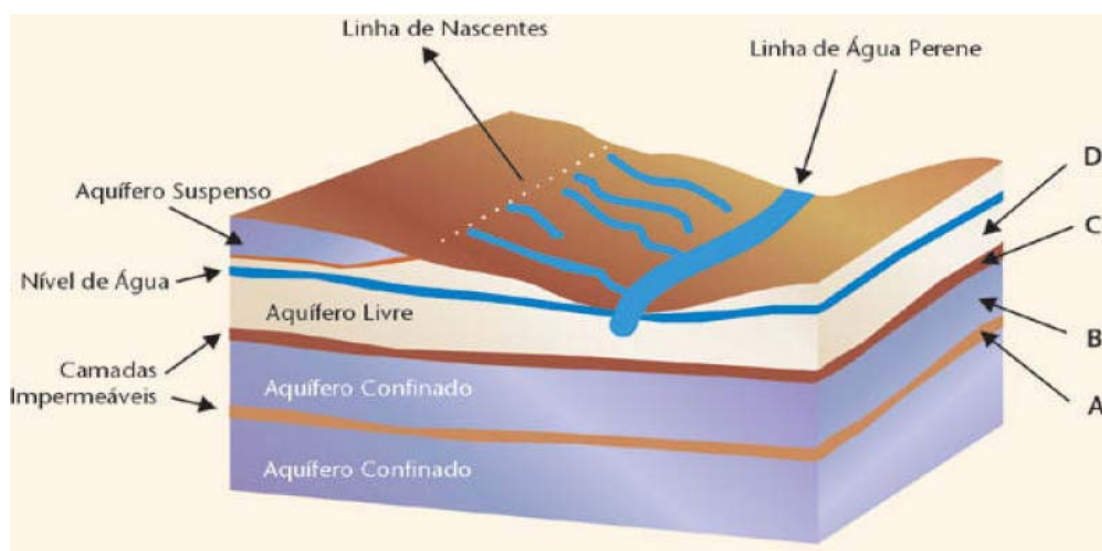


Figura 1.8 – Aquífero livre e confinado (IGM, 2001).

Aquitardo - Formação geológica que pode armazenar água mas que a transmite lentamente não sendo rentável o seu aproveitamento a partir de furos.

Aquicludo - Formação geológica que pode armazenar água mas não a transmite.

Aquífugo - Formação geológica que não armazena nem transmite água.

O Quadro 1.3 mostra a relação entre os vários tipos de rocha e as suas características e a sua capacidade de armazenar e permitir circulação (adaptado de AZEVEDO, 2001).

Quadro 1.4 – Relação entre a porosidade/condutividade hidráulica e o tipo de formação rochosa.

ROCHA	POROSIDADE (%)	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (m/dia)	TIPO DE FORMAÇÃO ROCHOSA
Argila	45	0.0045	Aquícludo
Areia	35	36	Aquífero
Cascalheira	25	225	Aquífero
Cascalho	20	90	Aquífero
Arenito	15	32	Aquífero
Arenito siltoso	12	0.14	Aquitardo
Calcário denso	5	0.45	Aquífugo
Calcário	2	8.3×10^{-5}	Aquífugo
Quartzito,	1	4	Aquífugo
Basalto	2	-	Aquífugo

Se efectuarmos furos nos dois tipos de aquíferos (Figura 1.9) verificamos que no furo do aquífero confinado a água subirá acima do tecto do aquífero devido à pressão exercida pelo peso das camadas confinantes subjacentes. A altura a que a água sobe chama-se “nível piezométrico” e o furo é artesiano.

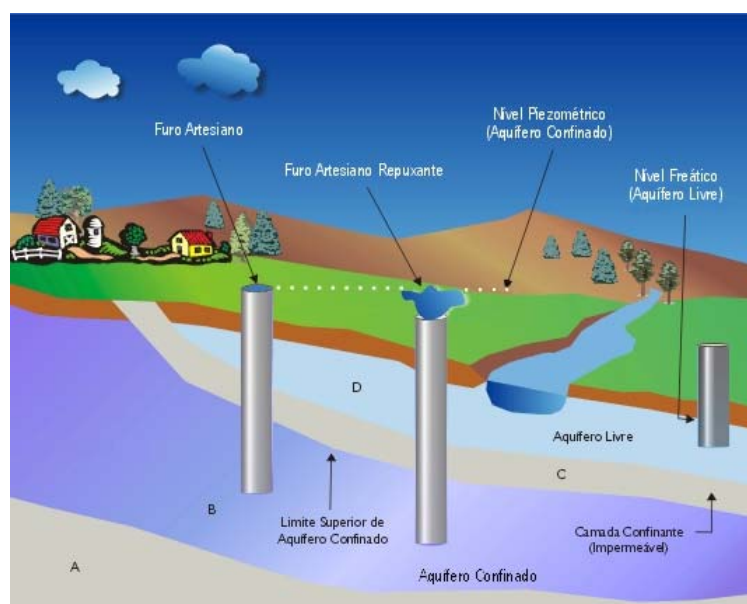


Figura 1.9 – Comportamento dos furos realizados nos aquíferos livres e confinados (IGM).

No furo do aquífero livre o nível da água não sobe e corresponde ao nível da água no aquífero pois a água está à mesma pressão que a pressão atmosférica. O nível da água designa-se por

“nível freático”. O nível da água nos aquíferos não é estático, varia essencialmente com a precipitação ocorrida, a extracção de água subterrânea e com os efeitos de maré nos aquíferos costeiros.

1.6 Características Geológicas dos Aquíferos

Podemos dizer que em termos geológicos existem essencialmente três tipos de aquíferos (Figura 1.10):

Porosos - onde a água circula através de poros. As formações geológicas são areias limpas, areias consolidadas por um cimento também chamadas arenitos, conglomerados, etc;

Fracturados e/ou fissurados - onde a água circula através de fracturas ou pequenas fissuras. As formações são granitos, gabros, filões de quartzo, etc;

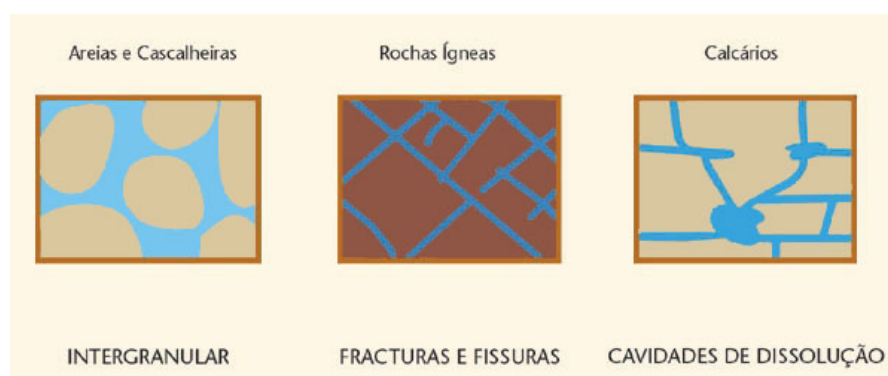


Figura 1.10 - Circulação de água nos meios porosos, fracturados e cársicos (IGM, 2001).

Cársicos - onde a água circula em condutas que resultaram do alargamento de diáclases/fracturas por dissolução. Essas formações são os calcários e dolomias (rochas carbonatadas).

Muitas vezes os aquíferos são simultaneamente de mais de um tipo. Por exemplo um granito pode ter uma zona superior muito alterada onde a circulação é feita através dos poros e uma zona inferior de rocha sã onde a circulação é feita por fracturas. Os calcários e dolomias podem ser cársicos e fracturados circulando a água através de fracturas da própria rocha e de condutas cársicas.

Os aquíferos podem ocorrer em camadas sedimentares ou em rochas ígneas ou metamórficas. A seguir são descritos os tipos mais comuns existentes em Portugal:

Rochas sedimentares não consolidadas - no caso de sedimentos não-consolidados destacam-se os aluviões e as dunas. Os depósitos de aluvião formados pelos sedimentos erodidos e transportados nas chuvas torrenciais localizam-se em locais favoráveis a recarga nos talwegues e nos leitos de rios, riachos e lagoas.

As dunas são formadas por sedimentos como areia fina e silte que são transportados e depositados pelos ventos. É o caso das formações arenosas nas regiões costeiras. Os aquíferos formados por sedimentos não-consolidados, geralmente de alta produtividade, são fáceis de serem perfurados ou escavados, são pouco profundos, possuem alta capacidade de infiltração potencial e conseqüentemente são altamente vulneráveis à poluição.

Rochas sedimentares consolidadas - as rochas sedimentares formadas pela compactação e cimentação de areias, os chamados arenitos, formam aquíferos regionais que armazenam grandes quantidades de água. A condutividade hidráulica dos arenitos em geral é grande, garantindo condições de um bom aquífero. Se o arenito se apresentar fracturado, a contribuição das fracturas para o armazenamento e o transporte da água, aumentam suas propriedades aquíferas.

Rochas carbonatadas - as rochas carbonatadas ocorrem geralmente nas formas de calcário e dolomias. As rochas carbonatadas apresentam significativa condutividade hidráulica produzida por fracturas resultantes de movimentos tectónicos, ao longo das quais a circulação de água subterrânea actua dissolvendo os minerais constituintes das rochas (a calcite e dolomite), formando os aquíferos cársicos, com grandes vazios que acumulam bastante água. Os aquíferos cársicos em geral são bastante heterogéneos e anisotrópicos.

Rochas ígneas e metamórficas - As rochas ígneas e metamórficas apresentam porosidade primária extremamente baixa. No entanto, em regiões de rocha fracturada, a acumulação de água é significativa formando o aquífero fracturado. O sucesso de uma captação em regiões de rochas ígneas e metamórficas, depende de se conseguir localizar domínios fracturados.

1.7 Recarga e Descarga Aquíferas

A área de alimentação aquífera designa-se por zona de recarga (Figura 1.11). Nos aquíferos livres a recarga decorre da infiltração e nos aquíferos confinados a recarga provém da circulação hídrica entre as camadas confinadas e livres.

A recarga dos aquíferos pode também ser por fluxo subterrâneo e resulta da descarga lateral de um aquífero adjacente, fazendo-se à custa das suas reservas por drenância de um aquífero subjacente, que no entanto, numa outra região, foi originada quer pela infiltração directa profunda de águas das chuvas quer por infiltração a partir da superfície.

O processo de recarga mais importante é a recarga de aquíferos por infiltração directa profunda da água pluviométrica. Existem diversos factores que influenciam a recarga com água da chuva. Assim, esta depende do valor e da intensidade da pluviosidade, do tipo de solo, do teor de humidade do solo do uso do solo que o pode tornar mais ou menos impermeável, da cobertura vegetal e das próprias características do aquífero.

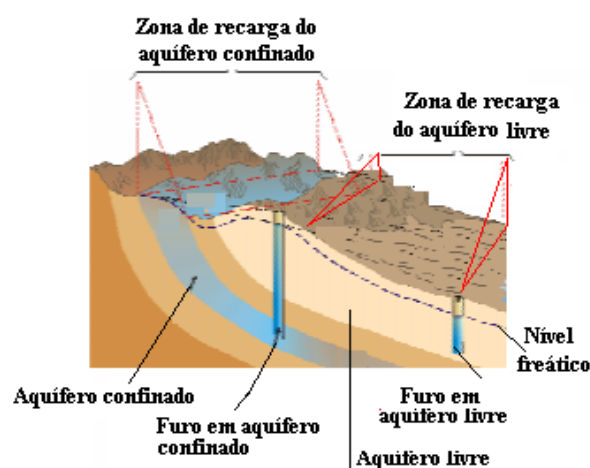


Figura 1.11 – Esquema de recarga aquífera

No balanço hídrico do solo, a recarga é estimada a partir da seguinte equação:

$$R = P - E_s - ETR \pm \Delta S$$

onde:

R = recarga (m^3 ou mm);

P = precipitação (m^3 ou mm);

E_s = escoamento superficial (m^3 ou mm);

ETR = evapotranspiração real (m^3 ou mm);

ΔS = variação do conteúdo de humidade no solo (m^3 ou mm).

Existem vários métodos para determinar o valor da recarga dos aquíferos (FERREIRA *et al*, 1995), entre outros: (i) Balanços hídricos sequenciais; (ii) Métodos empíricos; (iii) Análise da variação dos níveis freáticos; (iv) Análise de hidrogramas.

A recarga potencial traduz a água subterrânea que existiria numa formação geológica, se esta tivesse capacidade de armazenamento suficiente para armazenar toda a água existente abaixo do limite inferior do solo sujeito à evapotranspiração. A recarga potencial traduz o volume médio anual de água disponível para recarregar os aquíferos, se estes fossem explorados continuamente. Segundo FERREIRA *et al* (1995) em Portugal Continental com uma área aflorante de 25428 Km², temos valores de recarga potencial de 256 mm, e no sistema hidrogeológico da bacia do Mondego, para uma área aflorante de 603 Km² uma recarga de 221,3 mm.

A descarga aquífera é a descarga de água que emerge do sistema, pode ser efectuada por processos naturais, como por exemplo na passagem directa para o exterior de águas provenientes de nascentes, etc, que depois escorrem à superfície e alimentam linhas de água, ou de forma indirecta, como por exemplo, através de captações de águas subterrâneas.

Capítulo 2

QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

2.1 Generalidades

Os recursos hídricos subterrâneos em Portugal continental têm constituído, ao longo dos últimos anos, grande parte da origem de água para os diversos fins: doméstico, industrial e agrícola. A água subterrânea é um recurso natural vital para o abastecimento económico e seguro de água potável nos meios urbano e rural, e desempenha papel fundamental para o bem-estar tanto dos seres humanos como de muitos ecossistemas aquáticos.

Desta forma importa acompanhar a tendência evolutiva deste recurso, não só do ponto de vista quantitativo como qualitativo, uma vez que não é possível descurar o binómio quantidade/qualidade. São necessárias campanhas proactivas e acções práticas para proteger a qualidade natural (em geral excelente) da água subterrânea, o que se justifica tanto sob os critérios amplos da sustentabilidade ambiental como sob os critérios mais restritos do benefício económico.

Os aquíferos estão sob perigo cada vez maior de contaminação em decorrência da urbanização, do desenvolvimento industrial, das actividades agrícolas e das empresas mineiras. Diversos sectores de actividade, industriais ou agrícolas, para além de contribuírem para o desenvolvimento económico, conduzem, por outro lado, quando não equipados com infra-estruturas ou medidas adequadas, para a degradação ambiental. Certas regiões são já conhecidas como preocupantes em termos de degradação ambiental, outras indiciam-se como potenciais zonas de risco em virtude das actividades aí existentes.

Esta situação torna-se mais gravosa quando estas actividades se localizam em formações

rochosas que apresentam maior vulnerabilidade à poluição. Torna-se assim importante que se tomem medidas tendentes à preservação e conservação dos recursos hídricos subterrâneos como parte integrante do ciclo da água, pois para além do valor económico e ambiental deste recurso, a sua recuperação, uma vez contaminado, é morosa e dispendiosa.

Medidas de protecção especial são realmente necessárias para todos os furos, poços e nascentes (públicos e privados) cuja função seja fornecer água de qualidade potável ou equivalente. Para o abastecimento público de água potável, é um pré-requisito que a qualidade da água bruta seja de boa qualidade e constante, e as reservas de águas subterrâneas protegidas são as que melhor cumprem esse requisito. A utilização de processos de tratamento (além da desinfecção preventiva) para atingir esse objectivo só deve ser considerada em último caso, em virtude de sua complexidade técnica, custo financeiro e pesado encargo operacional.

2.2 Qualidade da Água Subterrânea em Portugal

De um modo geral a qualidade da água subterrânea em Portugal ainda não está muito adulterada. No entanto, certas regiões são já conhecidas como preocupantes em termos de degradação ambiental (zona do Algarve) e outras indiciam-se como potenciais zonas de risco em virtude das actividades aí existentes.

Os Quadros 2.1 e 2.2 mostram as massas de água de Portugal Continental em risco de não cumprir objectivos ambientais. Do estudo realizado (INAG, 2005) do qual resultou os quadros referidos considerou-se para a pressão potencial significativa os seguintes critérios atendendo às diferentes pressões: i) fontes de poluição difusa – mais de 40% da área da massa de água sujeita a adubação; ii) fontes de poluição tóxica – descargas de efluentes industriais no solo e deposição de resíduos (incluindo depósitos de resíduos e lixeiras); iii) extracção de água – volume extraído superior a 90% da recarga.

Foram identificadas 6 massas de água em risco, sendo as principais pressões em 5 destas resultantes de fontes de poluição difusa. Apenas uma massa de água se encontra em risco

resultante de pressão por captação de água. Classificaram-se massas de água em dúvida resultante de qualquer pressão (tópica, difusa e captação) quando a informação disponível não permite afirmar se a massa de água está em risco ou não, necessitando de estudos mais aprofundados.

Quadro 2.1 – Massas de água em risco de não cumprir objectivos ambientais por bacia hidrográfica (INAG, 2005).

REGIÕES HIDROGRÁFICAS	CLASSIFICAÇÃO					
	não risco	em	em	não risco	em	em
	Nº de massas de água			(%)		
Minho / Lima	2	0	0	100	0	0
Cavado / Ave / Leça	3	0	1	75	0	25
Douro	3	0	0	100	0	0
Vouga / Mondego / Lis	12	7	1	60	35	5
Tejo / Ribeiras do Oeste	16	5	1	72.7	22.7	4.6
Sado / Mira	6	2	0	75	25	0
Guadiana	5	3	1	55.6	33.3	11.1
Ribeiras do Algarve	16	5	2	69.6	21.7	8.7
Açores						
Madeira						

Nesta situação de em dúvida encontram-se 22 massas de água que apresentam indícios de alteração de qualidade e/ou quantidade da água mas face à escassa informação existente não é possível identificar tendências o que impossibilita classificar a massa de água em risco ou não resultante de pressões tópicas, difusas e/ou captação.

Quadro 2.2 – Caracterização complementar das massas de água em risco por bacia hidrográfica (INAG, 2005)

	TIPO DE PRESSÃO			
	Difusa		Captações	
	Nº	%	Nº	%
Minho / Lima	0	0	0	0
Cavado / Ave / Leça	1	25	0	0
Douro	0	0	0	0
Vouga / Mondego / Lis	1	5	0	0
Tejo / Ribeiras do Oeste	1	4.55	0	0
Sado / Mira	0	0	0	0
Guadiana	1	11.5	0	0
Ribeiras do Algarve	1	4.35	1	4.35
Açores/Madeira				

2.3 Sustentabilidade Quantitativa

A sustentabilidade quantitativa de um aquífero depende da exploração e da entrada natural de água do aquífero. Como fonte de disponibilidade hídrica é importante entender a sua capacidade de armazenar água e a sua produção através da exploração de furos. Existe um balanço entre a entrada e saída de água no aquífero onde existe uma sustentabilidade quantitativa de longo prazo. A retirada de água dentro de certos limites de exploração pode levar ao rebaixamento do mesmo, mas dentro de limites de sustentabilidade.

A bombagem em demasia dos furos pode induzir recargas provenientes de outros aquíferos ou de cursos de água superficiais. Se a bombagem for intensificada acima dos limites da recarga induzida pode levar o aquífero a um insustentável cenário de longo prazo que eliminará esta fonte de disponibilidade hídrica.

A água subterrânea geralmente é uma fonte de água mais segura e confiável que a água superficial. Possui um reservatório natural de regularização e permite a sua utilização e retirada de forma distribuída no espaço. No entanto, existem limites à sua exploração, relacionados directamente com sua capacidade de recarga.

No ciclo hidrológico, a água subterrânea é o principal manancial de águas doce em volume no ambiente terrestre. Com raras excepções a água subterrânea é o reservatório natural de água de boa qualidade, fundamental para regularizar a disponibilidade de água ao longo do tempo e distribuída espacialmente. Enquanto a água superficial ocorre principalmente durante o período chuvoso, os aquíferos, além de armazenarem a água em diferentes níveis sustentam também os caudais dos rios ao longo do tempo tornando o fluxo perene em grande parte dos rios. Portanto, o tempo do ciclo da água subterrânea não é de dias ou meses, mas de dezenas ou milhares de anos.

2.4 Poluição de Águas Subterrâneas

Inúmeras actividades do homem introduzem no meio ambiente substâncias com características físicas nocivas que ali não existiam antes, ou que existiam em quantidades diferente, a este processo chamamos de poluição. Assim como as actividades desenvolvidas pela humanidade são muito variáveis, também o são as formas e níveis de poluição.

Em geral, os aquíferos são bem mais resistentes aos processos poluidores do que as águas superficiais, pois a camada de solo sobrejacente actua como filtro físico e químico. A facilidade de um poluente atingir a água subterrânea dependerá dos seguintes factores:

Tipo de aquífero - os aquíferos livres são mais vulneráveis do que os confinados. Aquíferos porosos são mais resistentes dos que os fracturados, os mais vulneráveis são os cárscicos.

Profundidade do nível freático - espessuras maiores até atingir o nível freático permitirão maior tempo de filtragem, além do que aumentarão o tempo de exposição do poluente aos agentes adsorventes presentes nessa zona.

Permeabilidade da zona não saturada e do aquífero - a permeabilidade da zona não saturada é fundamental quando se pensa em poluição. Se essa zona for impermeável ou pouco permeável é uma barreira à penetração de poluentes no aquífero. Por outro lado, alta permeabilidade / transmissividade permitem uma rápida difusão da poluição. O avanço da mancha poluidora poderá ser acelerado pela exploração do aquífero na medida que aumenta a velocidade do fluxo subterrâneo na direcção das áreas de extracção. No caso de aquíferos costeiros, a super-exploração poderá levar à ruptura do frágil equilíbrio existente entre água doce e água salgada, produzindo o que se convencionou chamar de intrusão salina.

2.4.1 Fontes de Poluição

Os agentes poluidores capazes de atingir as águas subterrâneas podem ter origem variada. Considerando que os aquíferos são corpos tridimensionais, em geral extensos e profundos, a forma da fonte poluidora tem importância fundamental nos estudos de impacto ambiental.

Fontes pontuais de poluição - são as que atingem o aquífero através de um ponto. São exemplo os aterros sanitários, fossas sépticas, etc. Estas fontes são responsáveis por poluições altamente concentradas na forma de plumas.

Fontes lineares de poluição - são as provocadas pela infiltração das águas superficiais dos rios e linhas de água contaminados. A possibilidade desta poluição ocorrer dependerá do sentido de fluxo hidráulico existente entre os cursos de água e o aquífero subjacente. A existência de furos profundos em funcionamento nas proximidades dos cursos água poderá forçar a infiltração de água contaminada no aquífero invertendo o seu fluxo ou aumentando sua velocidade.

Fontes difusas de poluição - são as que contaminam áreas extensas. Normalmente são devidas a poluentes transportados por correntes de ar, chuva e pela actividade agrícola. A poluição proveniente das fontes difusas caracterizam-se por ser de baixa concentração e atingir grandes áreas.

2.4.2 Causas da Poluição Originada pela Actividade Humana

A água é um excelente solvente e pode conter inúmeras substâncias dissolvidas. Ao longo do seu percurso a água vai interagindo com o solo e formações geológicas, dissolvendo e incorporando substâncias. Por esta razão a água subterrânea é mais mineralizada que a água de superfície.

Apesar do solo e da zona não saturada apresentarem excelentes mecanismos de filtragem podendo reter inúmeras partículas e bactérias patogénicas, existem substâncias e gases dissolvidos que dificilmente deixarão a água subterrânea podendo ser responsáveis pela sua poluição.

Uma água está poluída quando a sua composição foi alterada de tal maneira que a torna imprópria para um determinado fim.

A deterioração da qualidade da água subterrânea pode ser provocada de maneira directa ou indirecta, por actividades humanas ou por processos naturais, sendo mais frequente a acção combinada de ambos os factores (Figura 2.1).

As causas fundamentais da poluição das águas subterrâneas ocasionada pela actividade humana podem agrupar-se em quatro grupos dependendo da actividade humana que as originou e que seguidamente se descrevem.

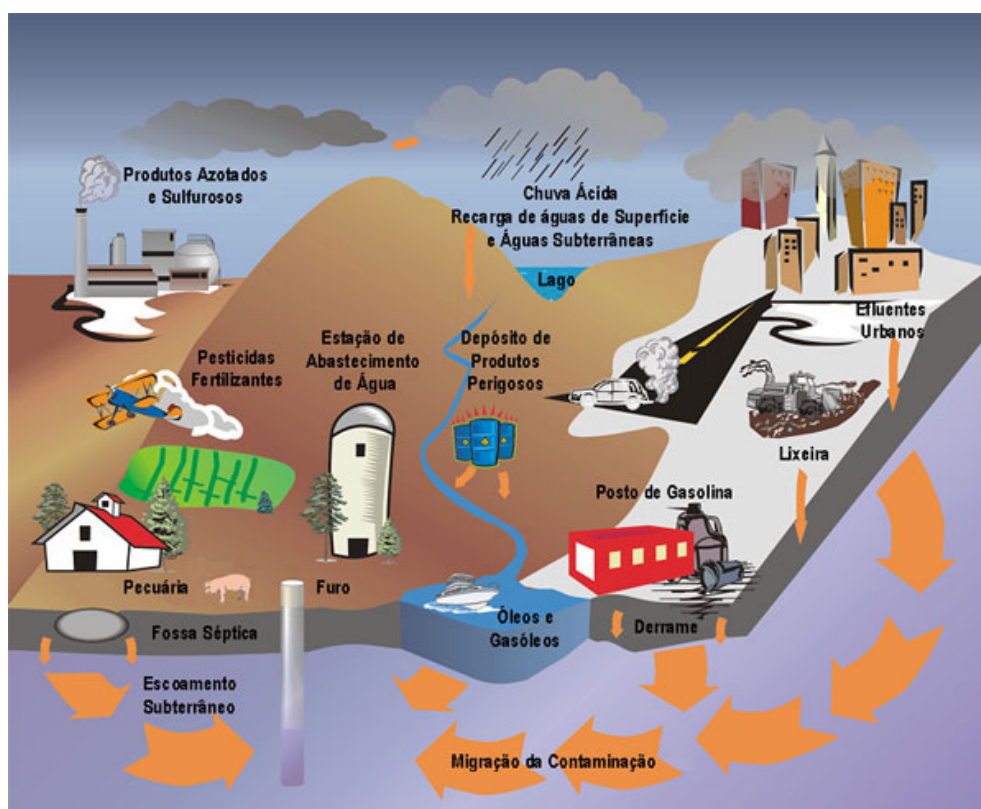


Figura 2.1 – Poluição da água subterrânea com diferentes origens (INAG, 2005).

Poluição urbana e doméstica - é provocada pela descarga de efluentes domésticos não tratados na rede hidrográfica, fossas sépticas e lixeiras. Os efluentes domésticos contêm sais minerais, matéria orgânica, restos de compostos não biodegradáveis, vírus e microorganismos fecais.

Os lixiviados resultantes da circulação de água através das lixeiras (Figura 2.2), são altamente redutores e enriquecidos em amónio, ferro, manganês e zinco, para além de apresentarem

valores elevados da dureza, do total de sólidos dissolvidos e da concentração de cloreto, sulfato, bicarbonato, sódio, potássio, cálcio e magnésio. A decomposição da matéria orgânica nas lixeiras origina a produção de gases como o dióxido de carbono e o metano. Este tipo de poluição ao atingir o aquífero origina um aumento da mineralização, elevação da temperatura, aparecimento de cor, sabor e odor desagradáveis.



Figura 2.2 –Lixiviados de lixeira

Poluição agrícola: este tipo de poluição é , como o próprio nome indica, consequência das práticas agrícolas, será a mais generalizada e importante na deterioração da água subterrânea. A diferença entre este tipo de poluição e os outros, é o facto de apresentar um carácter difuso, sendo responsável pela poluição a partir da superfície de extensas áreas, ao passo que os outros tipos correspondem a focos pontuais de poluição.

Os contaminantes potencialmente mais significativos neste campo são os fertilizantes (Figura 2.3), pesticidas e indirectamente as práticas de regadio. A reciclagem e reutilização da água subterrânea para regadio, provoca um aumento progressivo da concentração de sais que, a longo prazo, a inutiliza para este fim.

Outros contaminantes de menor significado mas por vezes muito importantes são os associados às actividades pecuárias, sendo a sua poluição semelhante à doméstica.



Figura 2.3 –Poluição agrícola

Os fertilizantes inorgânicos como o amoníaco, sulfato de amónio, nitrato de amónio e carbonato de amónio e os orgânicos, como a ureia, são os responsáveis pelo incremento de nitrato, nitrito e amónio nas águas subterrâneas. Isto, deve-se ao facto da quantidade de fertilizantes aplicada ser superior à quantidade necessária para o desenvolvimento das plantas. Os nitratos são, em Portugal, um problema crescente tanto em extensão como em intensidade e persistência.

Resumindo, os principais problemas de poluição por actividades agrícolas são: (i) a utilização inadequada de fertilizantes nitrogenados e fosforados em zonas de regadio com solos permeáveis e aquíferos livres, traduzido em aumentos consideráveis de nitratos no aquífero; (ii) elevada taxa de reciclagem de águas subterrâneas em áreas de regadio intensivo; (iii) lançamento indiscriminado de resíduos animais sobre o solo em zonas vulneráveis; (iv) utilização incorrecta ou exagerada de pesticidas em solos muito permeáveis com escassa capacidade de adsorção.

Poluição industrial - a poluição industrial apresenta um carácter tipicamente pontual e está relacionada com a eliminação de resíduos de produção através da atmosfera, do solo, das águas superficiais e subterrâneas e de derrames durante o seu armazenamento e transporte (Figura 2.4).

As principais indústrias poluentes são as industriais, alimentares, metalúrgicas, petroquímicas, nucleares, mineiras, farmacêuticas, electroquímicas, de fabricação de pesticidas e insecticidas etc.



Figura 2.4 – Poluição industrial

Contaminação induzida por bombagem: a intrusão salina é um fenómeno que ocorre em regiões costeiras onde os aquíferos estão em contacto com a água do mar. Na verdade enquanto a água doce se escoia para o mar, a água salgada, mais densa, tende a penetrar no aquífero, formando uma cunha sob a água doce (Figura 2.5).

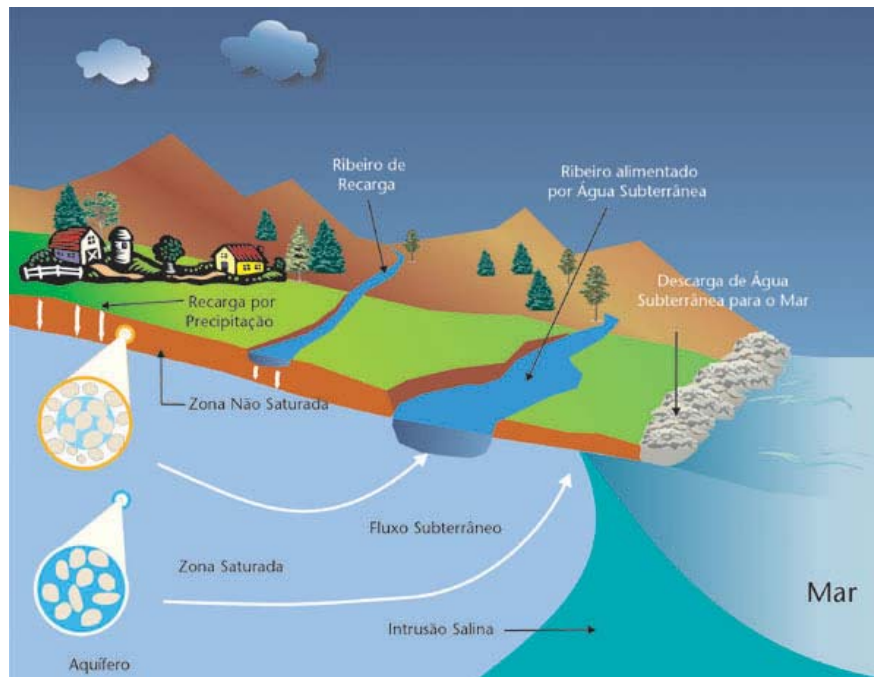


Figura 2.5 - Intrusão salina (INAG, 2005)

Este fenómeno pode acentuar-se e ser acelerado, com consequências graves, quando, nas proximidades da linha de costa, a extracção de grandes volumes de água doce subterrânea provoca o avanço da água salgada no interior do aquífero e a consequente salinização da água dos poços ou dos furos que nele captem.

2.5. Vulnerabilidade à Poluição

A vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas pode definir-se como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero (Duijvenbooden e Waegeningh, 1987)

Definida deste modo a vulnerabilidade é distinta de risco de poluição. O risco de poluição depende não só da vulnerabilidade mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo. É possível existir um aquífero com um alto índice de vulnerabilidade mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente, ou de haver um risco de poluição excepcional apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo. O risco é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, muito estáveis, mas

também pela existência de actividades poluentes, factor dinâmico que, em princípio, pode ser controlado.

Definido o conceito de vulnerabilidade é importante reconhecer que a vulnerabilidade de um aquífero depende também do tipo de poluente potencial. Por exemplo, a qualidade da água subterrânea pode ser muito vulnerável a uma carga de nitratos, originada por práticas agrícolas incorrectas, e no entanto ser pouco vulnerável a cargas patogénicas (devido à mortalidade natural dos agentes patogénicos). Tendo em consideração esta realidade é cientificamente defensável avaliar a vulnerabilidade à poluição em relação a casos específicos de poluição, como nutrientes, poluição de origem orgânica, metais pesados, etc., i.e. criar o conceito de “vulnerabilidade específica”.

Apresentam-se de seguida alguns métodos para determinar a vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas.

2.5.1 O Método DRASTIC

O índice DRASTIC foi desenvolvido por ALLER *et al.* (1987) para a Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos, a U.S. EPA. Diversos estudos desenvolvidos em vários países, incluído Portugal, utilizaram com sucesso o índice DRASTIC. De facto, o índice DRASTIC tem as características de simplicidade e utilidade necessárias para poder vir a ser considerado uma referência.

O índice DRASTIC corresponde à média ponderada de 7 valores correspondentes aos seguintes 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos:

- 1 - Profundidade da zona não-saturada do solo (**D**epth to the water table);
 - 2 - Recarga profunda de aquíferos (Net **R**echarge);
 - 3 - Material do aquífero (**A**quifer material);
 - 4 - Tipo de solo (**S**oil type);
-

5 - Topografia (**T**opography);

6 - Impacto da zona não-saturada (**I**mpact of the unsaturated zone);

7 - Condutividade hidráulica (Hydraulic **C**onductivity).

O método DRASTIC fundamenta-se num conjunto de procedimentos que permitem integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e da sua especificidade. Cada um dos sete parâmetros DRASTIC foi dividido quer em escalas quer em tipos de meio significativos que condicionam o potencial de poluição. Sintetiza-se em seguida a aplicação do método DRASTIC:

(i) - atribuem-se valores de 1 a 10 a cada parâmetro, em função das condições locais; valores elevados correspondem a uma maior vulnerabilidade; os valores a atribuir obtêm-se de tabelas (ver Quadros 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9) que consideram a correspondência entre as características locais e o respectivo parâmetro;

Quadro 2.3 – Parâmetro D – Profundidade da zona não saturada

Profundidade (m)	<1,	1,5-4,6	4,6-9,1	9,1-15,2	15,2-22,9	22,9-30,5	>30,5
índice	10	9	7	5	3	2	1

Quadro 2.4 – Parâmetro R – Recarga profunda do aquífero

Recarga (mm/ano)	<51	51-102	102-178	178-254	>254
índice	1	3	6	8	9

Quadro 2.5 – Parâmetro A – Material do aquífero

NATUREZA DO AQUÍFERO	ÍNDICE	ÍNDICE TÍPICO
Xisto argiloso, argilito	1-3	2
Rocha metamórfica/ígnea	2-5	3
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3-5	4
“till” glacial	4-6	5
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

Quadro 2.6 – Parâmetro S – Tipo de solo.

SOLO	ÍNDICE
Fino ou ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
franco	5
Franco siltooso	4
Franco argiloso	3
lodo	2
Argila não agregada e não expansível	1

Quadro 2.7 – Parâmetro T – Topografia

Declive (%)	<2	2-6	6-12	12-18	>18
índice	10	9	5	3	1

Quadro 2.8 – Parâmetro I – Impacto da zona não saturada

ZONA NÃO SATURADA	ÍNDICE	ÍNDICE TÍPICO
Camada confinante	1	1
Argila e silte	2-6	3
Xisto argiloso, argilito	2-5	3
Calcário	2-7	6
Arenito	4-8	6
Arenito, calcário e argilito estratificado	4-8	6
Areia e balastro com grande quantidade de silte e argila	4-8	6
Rocha metamórfica/ígnea Calcário maciço	2-8	4
Areia e balastro	6-9	8
basalto	2-10	9
Calcário carsificado	8-10	10

Quadro 2.9 - Parâmetro C – Condutividade hidráulica

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA(m/d)	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

(ii) - De seguida o índice local é calculado multiplicando o valor atribuído ao parâmetro pelo seu peso relativo, isto é:

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

Cada parâmetro tem um peso pré determinado que reflecte a sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade; os parâmetros mais importantes têm um peso 5 e os menos importantes tem peso 1. Existem duas gamas de pesos relativos ou factores de ponderação; uma gama para aplicação geral e outra específica para pesticidas (quadro 2.10).

Quadro 2.10 - Pesos a atribuir a cada parâmetro do DRASTIC (geral e pesticidas)

	D	R	A	S	T	I	C
Geral	5	4	3	2	1	5	3
Pesticidas	5	4	3	5	3	4	2

O valor mínimo possível do índice DRASTIC é 23 e o máximo é 226. Segundo ALLER *et al.* (1987) valores dessa ordem de grandeza são raros situando-se geralmente entre 50 e 200. O Quadro 2.11 mostra a gama de valores calculados pelo índice DRASTIC e a correspondente classe de vulnerabilidade.

Quadro 2.11 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC

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

A Figura 2.6 mostra o mapeamento da vulnerabilidade à poluição desenvolvido para Portugal Continental pelo método DRASTIC à escala 1:500 000, elaborado por Lobo, Ferreira e Oliveira (1993).

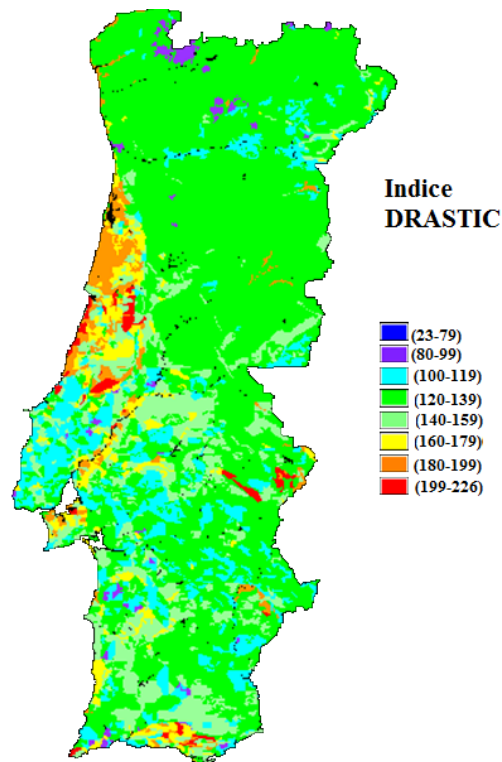


Figura 2.6 – Aplicação do método DRASTIC

2.5.2 O Método IS (Índice de Susceptibilidade)

O método IS consiste numa adaptação do índice DRASTIC e tenta corrigir duas das principais deficiências correntemente atribuídas a este último: a redundância entre parâmetros e o sistema de ponderação arbitrário. Neste documento apresenta-se um IS de natureza puramente intrínseco, isto é, o parâmetro ocupação do solo (*LU* - do Inglês “land use”) é retirado e os ponderadores dos outros quatro parâmetros re-estimados.

O método do Índice de Susceptibilidade (IS) (Ribeiro, 2005) avalia a vulnerabilidade específica nos sistemas aquíferos porosos ou com dupla porosidade. O IS é calculado a partir da soma ponderada de cinco parâmetros: profundidade da zona não saturada (*D*), recarga do aquífero (*R*), geologia do aquífero (*A*), declives do terreno (*T*) e ocupação do solo (*LU* - do Inglês “land use”). Os quatro primeiros parâmetros são comuns aos dois métodos, (IS e DRASTIC) e calculados segundo o procedimento descrito por Aller *et al* (1987), sendo o último parâmetro *LU* introduzido com o objectivo de se apreciar o impacte ambiental do uso

do solo na contaminação das águas subterrâneas. Seguidamente explicam-se sucintamente os parâmetros que compõem o IS.

Profundidade da zona não saturada (D)- a profundidade do topo do aquífero é definida como a distância vertical que um determinado poluente tem de percorrer até chegar ao aquífero. Quanto maior for a distância a percorrer pelo poluente, maiores são as hipóteses de haver uma depuração por parte do solo atravessado. No Quadro 2.12 apresenta-se as classes definidas para o parâmetro *D* e as pontuações atribuídas a cada classe para o cálculo do IS.

Recarga do aquífero (R) - Este parâmetro mede a quantidade de água que chega anualmente ao aquífero através da precipitação (Quadro 2.12).

Geologia do aquífero (A) - Quanto mais permeável for o material dos aquíferos, maiores são as hipóteses de contaminação das águas subterrâneas. No Quadro 2.13 apresenta-se as classes definidas para o parâmetro *A* e as pontuações atribuídas a cada classe para o cálculo do IS.

Quadro 2.12 – Classes definidas para os parâmetros D e R

PARÂMETRO	CLASSE	VALOR	PARÂMETRO	CLASSE	VALOR
<i>D</i> (m)	<1.5	100	<i>R</i> (mm)	<51	10
	1.5-4.6	90		51-102	30
	4.6-9.1	70		102-178	60
	9.1-15.2	50		178-254	80
	15.2-22.9	30		>254	90
	22.9-30.5	20			
	>30.5	10			

Quadro 2.13 - Classes definidas para o parâmetro A

PARÂMETRO	CLASSE	VALOR	VALOR TÍPICO
<i>A</i>	Xisto argiloso, argilito	10-30	20
	Rocha metamórfica/ígnea	20-50	30
	Rocha metamórfica/ígnea	30-50	40
	“till” glacial	40-60	50
	Arenito, calcário e argilito	50-90	60
	Arenito maciço	40-90	60
	Calcário maciço	40-90	80
	Areia e balastro	40-90	80
	balastro	20-100	90

Topografia (T) - A topografia define os declives do terreno, que quanto mais elevados forem, maior é a escorrência superficial e a erosão, e menor é a infiltração. Deste modo, declives mais atenuados promovem uma maior infiltração e, também, o transporte dos contaminantes para as águas subterrâneas. No Quadro 2.14 apresenta-se as classes definidas para o parâmetro *T* e as pontuações atribuídas a cada classe para o cálculo do IS.

Quadro 2.14– Classes definidas para o parâmetro T

PARÂMETRO	CLASSE	VALOR
<i>T</i> (%)	<2	100
	2-6	90
	6-12	50
	12-18	30
	>18	10

Após a classificação dos vários parâmetros (*D*, *R*, *A*, *T*), o cálculo do *IS* intrínseco será dado pela seguinte expressão:

$$IS = 0.24D + 0.27R + 0.33A + 0.16T$$

Quanto maiores são os valores finais de *IS* obtidos, tanto maior é a probabilidade de determinada área ser mais vulnerável à contaminação das águas subterrâneas. No Quadro 2.15 pode-se observar a classificação dos valores de *IS* em função da sua vulnerabilidade. Para efeitos de delimitação das áreas mais vulneráveis a poluição dos aquíferos porosos ou de dupla porosidade devem-se considerar os valores de *IS* correspondentes as classes de extremamente vulnerável a elevada.

Quadro 2.15– Classificação das classes do IS

VULNERABILIDADE	
>90	Extremamente vulnerável
80-90	Muito elevada
70-80	elevada
60-70	Moderada a alta
50-60	Moderada a baixa
40-50	baixa
30-40	Muito baixa
<30	Extremamente baixa

2.5.3 O Método EPIK

O método EPIK foi desenvolvido especificamente para a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos cársicos (Doerflinger & Zwahlen 1997). O índice é construído com base nos seguintes 4 parâmetros:

E – Epicarso;

P - Cobertura de protecção;

I - Condições de infiltração;

K - Grau de desenvolvimento da rede cársica.

A cada parâmetro é atribuído um valor segundo uma classificação em que se toma em conta o impacto potencial da poluição (ver Quadros 2.16, 2.17, 2.18, e 2.19).

Quadro 2.16- Aspectos de geomorfologia cársica

EPICARSO	ASPECTOS DA GEOMORFOLOGIA	CLASSIFICAÇÃO
E1	Sumidouros, dolinas, afloramentos muito fracturados	1
E2	Zonas intermediárias no alinhamento de dolinas, vales	3
E3	Ausência	4

Quadro 2.17- Espessura da cobertura de protecção

COBERTURA DE PROTECÇÃO	ESPESSURA DO SOLO	CLASSIFICAÇÃO
P1	0-20 cm	1
P2	20-100 cm	2
P3	1-8 m	3
P4	>8 m	4

Quadro 2.18- Tipo de infiltração

INFILTRAÇÃO	TIPO	CLASSIFICAÇÃO
i1	Cursos de água de carácter perene ou temporário que	1
i2	Áreas em bacias hidrográficas com inclinação >10%	2
i3	Áreas em bacias hidrográficas com inclinação <10%	3
i4	A restante área da bacia hidrográfica	4

Quadro 2.19- Desenvolvimento da rede cárstica

REDE CÁRSICA	GRAU DE DESENVOLVIMENTO	CLASSIFICAÇÃO
K1	Moderado a muito desenvolvido	1
K2	Fraco	2
K3	Aquíferos sem carsificação	3

O factor de protecção F é calculado a partir da seguinte expressão:

$$F = 3 \times E_i + P_j + 3 \times i_k + 2 \times K_l$$

O factor de protecção pode tomar os valores de 9 a 34. Os graus de vulnerabilidade são atribuídos de acordo com a seguinte divisão de classes (Quadro 2.20). Após a classificação dos vários parâmetros (E, P, I, K) é efectuada a soma ponderada de acordo com a equação acima indicada, para o cálculo do índice. No Quadro 2.20 pode-se observar a classificação dos valores do EPIK em função da sua vulnerabilidade. Para efeitos de delimitação das áreas mais vulneráveis a poluição dos aquíferos cársticos devem-se considerar os valores de EPIK correspondentes as classes de vulnerabilidade muito alta a alta.

Quadro 2.20- Índice EPIK e classes de vulnerabilidade

ÍNDICE EPIK	GRAU DE VULNERABILIDADE
≤ 19	Muito alta
$19 < F < 25$	Alta
> 25	Moderada a baixa

2.5.4 O Método VULFRAC

O método designado por VULFRAC foi especificamente desenvolvido para avaliar a vulnerabilidade em meios hidrogeológicos fracturados tendo sido proposto por Fernandes (Fernandes, 2003).

O método VULFRAC assume que o fluxo de contaminante na zona não saturada pode ser controlado pelas fracturas principalmente nos períodos de recarga, ou induzido por sobrecarga hidráulica associada a actividade poluente.

A vulnerabilidade será condicionada pela interacção de 3 atributos da zona não saturada: a

espessura, o tipo de composição do material e a densidade, a conectividade e a abertura das fracturas. Enquanto os 2 primeiros factores regem a capacidade de atenuação da zona não saturada, o último controla a acessibilidade hidráulica dos contaminantes a zona saturada.

Da combinação de 3 mapas: o que representa o comprimento total, o mapa do número de intersecções dos alinhamentos e o mapa representando as áreas tectónico-estruturais, nascem 3 classes de fracturação:

Classe 1 – áreas caracterizadas por terem densidade baixa de alinhamentos, reduzido número de intersecções e baixo numero de fracturas abertas;

Classe 2 – áreas caracterizadas por terem densidade mediana de alinhamentos e do numero de intersecções, mas com maior quantidade de fracturas abertas;

Classe 3 – áreas caracterizadas por terem densidade elevada de alinhamentos que coincidem com áreas onde ocorrem grande quantidade de intersecções, e grande quantidade de fracturas abertas.

No que respeito ao atributo “fracturação” a vulnerabilidade aumentara da Classe 1 para a Classe 3. Analisando conjuntamente os 3 factores: natureza da zona não saturada; classes de fracturação e profundidade ao nível freático podem então determinar-se classes de vulnerabilidade VULFRAC, segundo a matriz representada no Quadro 2.21.

Quadro 2.21- Classes de vulnerabilidade VULFRAC

Vulnerabilidade: B – baixa ; MB - moderada/baixa ; A – alta ; MA - moderada /alta

	NATUREZA DA ZONA NÃO SATURADA			
Fracturação	Gnaiss		Granito	
Classe 1	B	MA	MB	MA
Classe 2	MB	A	MA	A
Classe 3	MA	A	A	A
	>10 m	<10 m	>10 m	<10
	Profundidade do nível freático			

Para efeitos de delimitação das áreas mais vulneráveis a poluição dos aquíferos fracturados devem-se considerar os valores de VULFRAC correspondentes as classes de vulnerabilidade

alta a moderada/alta.

2.5.5 O Método GOD

De acordo com FOSTER (1987) o índice de vulnerabilidade à poluição GOD considera os três seguintes parâmetros:

- i) Ocorrência de águas subterrâneas (**G**roundwater occurrence), i.e., se o aquífero é livre, semi-confinado, confinado, etc. (se houver aquífero);
- ii) Classe global do aquífero (**O**verall aquifer class) em termos do grau de consolidação e das características litológicas;
- iii) Profundidade ao nível freático ou espessura ao teto do aquífero (**D**ePTH to groundwater table or strike).

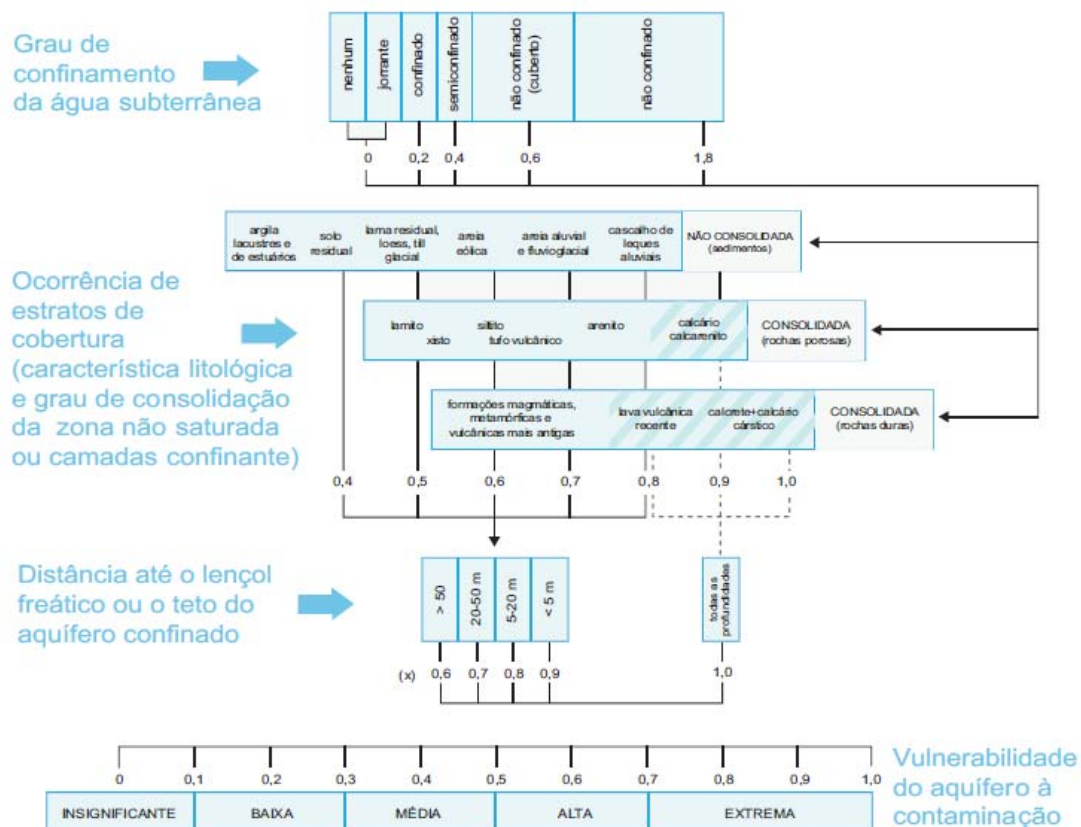


Figura 2.7 – Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos (Foster et al, 2003)

O aquífero é classificado em relação a cada um dos três parâmetros, numa escala cujo valor

máximo é a unidade. O índice é calculado pela multiplicação dos três parâmetros.

O valor máximo do índice é 1.0, representando uma vulnerabilidade máxima. O menor valor é 0.016 se houver aquífero, ou zero se não houver aquífero. O valor de cada parâmetro é fácil de obter, seguindo o procedimento mostrado na Figura 2.7 (Foster *et al*, 2003).

Capítulo 3

CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

3.1 Aspectos Gerais

Embora, teoricamente, a água subterrânea esteja presente em qualquer lugar, isso não significa que um poço ou furo possa ser localizado em qualquer lugar. A captação de água subterrânea tem um custo por vezes elevado e, portanto, não deve ser feita sem critérios. Existem factores naturais que condicionam a distribuição e concentração da água subterrânea em certos locais, de maneira a melhorar o rendimento e o caudal da captação, tornando o empreendimento mais proveitoso e evitando ou diminuindo a taxa de insucessos.

O mesmo se aplica em relação à construção dum furo. Um furo é uma obra de engenharia que tem em consideração as condições hidrogeológicas, hidrodinâmicas e físico-químicas da formação geológica a ser explorada. Não é um simples furo com paredes parcial ou totalmente revestidas. Portanto, se correctamente localizado, projectado, fiscalizado e executado, o furo propiciará um rendimento e uma vida útil bem maiores.

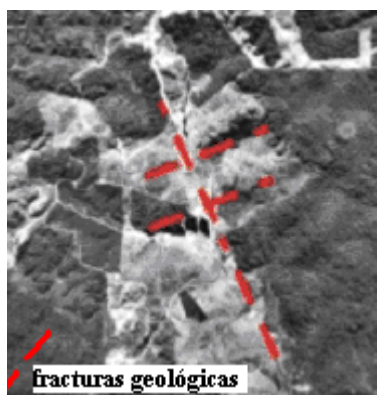
3.2 Localização da Captação de Água Subterrânea

No caso dos furos, o primeiro passo para qualquer estudo planeado de um aproveitamento económico de águas subterrâneas é o estudo da selecção do local da perfuração, devendo ser iniciado através da utilização de dados geológicos publicados e de possíveis furos cadastrados nas zonas próximas, complementado por um reconhecimento geológico de campo.

O conhecimento da geologia da área ou da região pode indicar as formações portadoras de

água, assim como dar uma ideia do caudal a ser obtido. Por outro lado, o estudo da geologia estrutural tornará possível fazer uma adequada escolha do local da perfuração, bem como fornecerá os elementos básicos do projecto construtivo do poço, como método de perfuração, profundidades e diâmetros de perfuração a alcançar, profundidades a serem revestidas, necessidade ou não de aplicação de secções filtrantes, métodos de serviços de limpeza, ensaios de caudal, etc.

Para a localização de um furo, o estudo de geologia superficial é, em geral menos dispendiosa, mas nem sempre os seus resultados dão garantia de êxito.



Uma ferramenta de grande valor, principalmente no caso de rochas cristalinas, é a fotogeologia (Figura 3.1) da área ou da região, permitindo obter informações como: (a) direcção e características das estruturas geológicas; (b) contactos litológicos; e (c) rede e padrão de drenagem, permitindo conhecer estruturas subterrâneas.

Figura 3.1 – Fotografia aérea

A interpretação dos estudos nesta fase muitas vezes é suficiente para seleccionar correctamente o local exacto da perfuração, levando também em linha de conta as condições de acesso e das infra-estruturas existentes.

No caso de persistirem dúvidas, pode recorrer-se a métodos geofísicos (geralmente eléctricos e electromagnéticos), que consistem em detectar as anomalias nas propriedades físicas das rochas, e por conseguinte indicam descontinuidades nas formações rochosas eventualmente portadores de água subterrânea. A Figura 3.2 mostra parte de um mapa resultante de uma campanha de prospecção geofísica eléctrica, onde as diferentes cores correspondem a diferentes tipos de rochas.

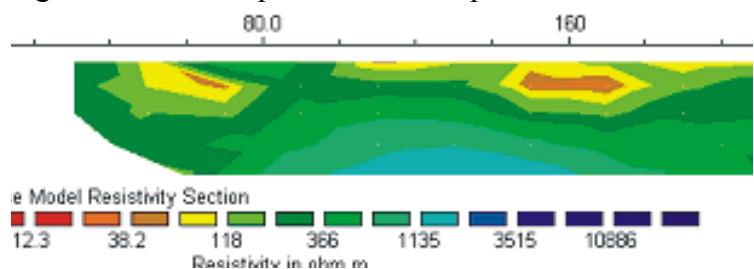


Figura 3.2 – Mapa de uma prospecção geofísica

A interpretação dos estudos nesta fase muitas vezes é suficiente para seleccionar correctamente o local exacto da perfuração, levando também em linha de conta as condições

O reconhecimento de formações subterrâneas através de sondagens é outra ferramenta eficaz e muitas vezes necessária, quando se pretende um estudo de maior precisão. Através dessa metodologia é possível avaliar a existência de água subterrânea, podendo estimar-se a quantidade e qualidade dos recursos

Existe outra forma para localização de água subterrânea, principalmente utilizada em captações privadas, que é a radiestesia (palavra latim/grega que traduzida à letra significa sensibilidade às radiações), que por definição é o emprego de técnicas adivinhatórias na procura de água subterrânea. As pessoas dotadas desta sensibilidade utilizam varinhas, pêndulos e outros instrumentos para detectar essas radiações.

A Figura 3.3 mostra um radiestesista (vedor) na procura de água subterrânea utilizando uma varinha metálica. A comunidade científica internacional é muito crítica da utilização desta técnica de localização de captações de água subterrânea, embora ela esteja muito difundida actualmente, e já era utilizada por quase todos os povos da Antiguidade.



Figura 3.3 –Radiestesista

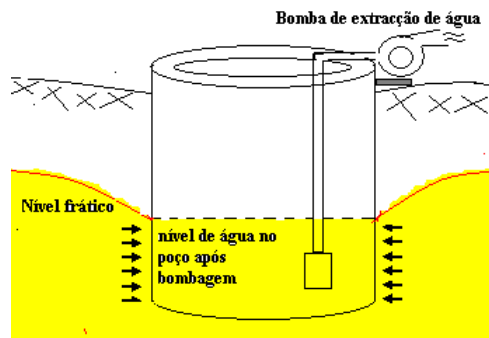
Apesar de todas as técnicas existentes, o conhecimento final só é possível de ser obtido após a realização dos furos para captação de água, com realização de testes de bombagem e amostragem para análises da água dos diversos aquíferos encontrados.

3.3 Tipos de Captações Superficiais

Para extrair água dos terrenos utilizam-se vários tipos de captações. Neste subcapítulo apresentam-se o tipo de captações superficiais mais utilizadas.

3.3.1 Poços Escavados

É um dos tipos de captação mais antigo e mais elementar. Na actualidade escava-se com a utilização de máquinas ou com explosivos em rochas mais duras, no entanto, nalguns países continuam-se a construir manualmente. Geralmente, a água entra no poço pelo fundo e pelas



paredes por orifícios deixados no revestimento para esse efeito (Figura 3.4). É o tipo de captação mais adequada para explorar aquíferos superficiais, pois o seu rendimento é superior a um furo com a mesma profundidade. Outra vantagem, em aquíferos pobres é o volume armazenado no próprio poço.

Figura 3.4 – Esboço de um poço escavado

Geralmente este tipo de captações tem diâmetro de 1 a 6 metros e profundidades de 5 a 20 metros. Tem como principal desvantagem em relação a outros tipos de captação o facto de ser vulnerável à contaminação, para além de ser mais perigosa a sua construção.

3.3.2 Galerias

É talvez o tipo de captação mais antigo, já existiam galerias para água na Mesopotâmia no século V A.C. É construída com uma ligeira inclinação de forma a água ser transportada por gravidade (Figura 3.5), portanto é uma estrutura que tem dupla função, para além de captar a água também a transporta. Este tipo de captação é muito utilizado nas ilhas vulcânicas, por exemplo, na ilha Madeira existem várias galerias com centenas de metros de comprimento

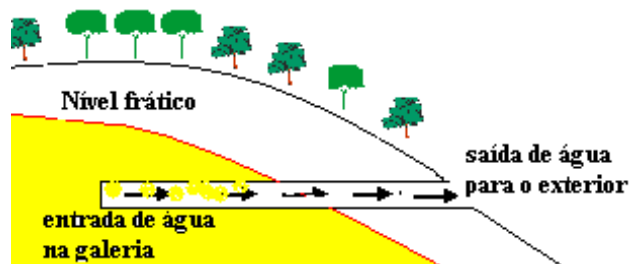


Figura 3.5 – Esboço de uma galeria

3.3.3 Sanjas Drenantes e Drenos

Os drenos são similares às galerias, no entanto, são tubos de pequeno diâmetro colocados em furos abertos recorrendo a perfuradoras semi-horizontais. Geralmente atingem dezenas de metros até atingirem a zona saturada. (Figura 3.6)

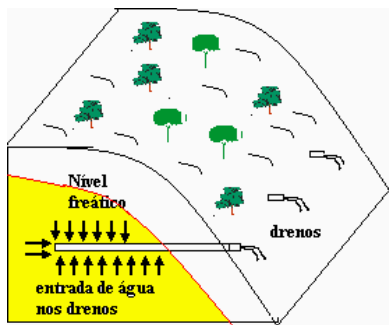


Figura 3.6 – Esboço de drenos

Este tipo de estruturas utiliza-se tanto para captação de água em aquíferos pouco profundos, como para drenagem com vista à estabilização de terrenos em obras geotécnicas. A Figura 3.7 mostra em esquema uma captação deste tipo.

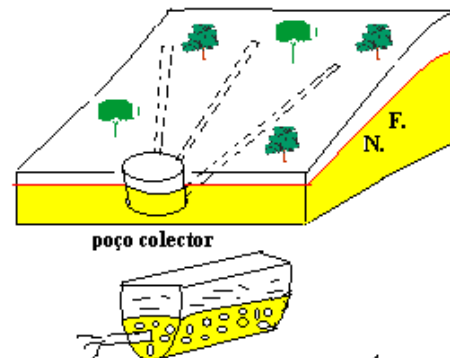


Figura 3.7 – Esquema de sanjas drenantes

3.3.4 Poços Escavados com Drenos Radiais

Utilizam-se nos mesmos casos dos poços normais, mas com muito maior rendimento (Figura 3.8). Geralmente em aquíferos superficiais de grande produtividade, ou nas margens dos rios de forma a que os drenos atinjam o seu leito a uma profundidade de 2 a 5 com o objectivo de captar a água do rio, com a vantagem de esta ter já sido filtrada pelo material detrítico existente no local. O raio equivalente destes poços pode avaliar-se segundo a seguinte fórmula (Custódio e Lamas, 1983):

$$R_e = 0,8 L_m (0,25)^{1/n}$$

onde:

R_e -Raio equivalente (m);

L_m – Comprimento médio dos drenos (m);

n – número de drenos

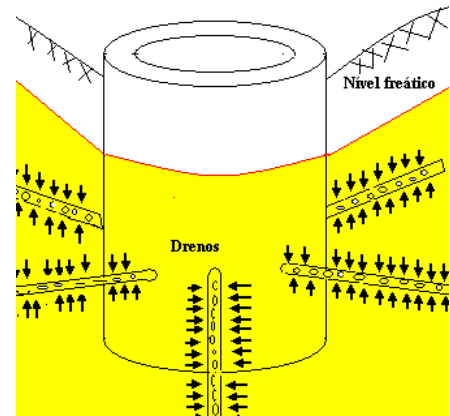


Figura 3.8 – Poço escavado com drenos radiais

3.4 Captações Profundas – Furos

A construção de um furo pode ser desdobrada nas seguintes operações: (a) Perfuração; (b) Aplicação do revestimento; geralmente tubagem em aço ou PVC com os respectivos filtros (ralos); (c) Pré-filtragem; colocação de material detrítico quartzoso (seixo de granulometria apropriada); (d) Limpeza e desenvolvimento; destinado a assegurar a produção de água limpa sem detritos; (e) Cimentação; necessária para a protecção superficial sanitária ou isolamento de águas de má qualidade; e (f) Teste de bombagem; ensaios de caudal.

Serão apresentados a seguir os principais métodos utilizados em Portugal para captação de água subterrânea em furos com recurso a equipamento de perfuração e os princípios básicos da sua construção aplicados às principais formações geológicas, com o objectivo de dar uma noção da forma construtiva e do emprego dos equipamentos.

3.4.1 Percussão a Cabo

O sistema à percussão é bastante eficaz em materiais rochosos compactos não duros e rochas inconsolidadas. Consiste na elevação e queda de uma série de pesadas ferramentas sustentadas por um cabo de aço dentro do furo, accionadas por meio de um motor diesel que move um excêntrico ligado a um balancim. (Figura 3.9).

A ferramenta cortante, denominada trépano, rompe e esmaga a rocha em pequenos fragmentos ou, quando em a rocha é não consolidada, amolece-a.

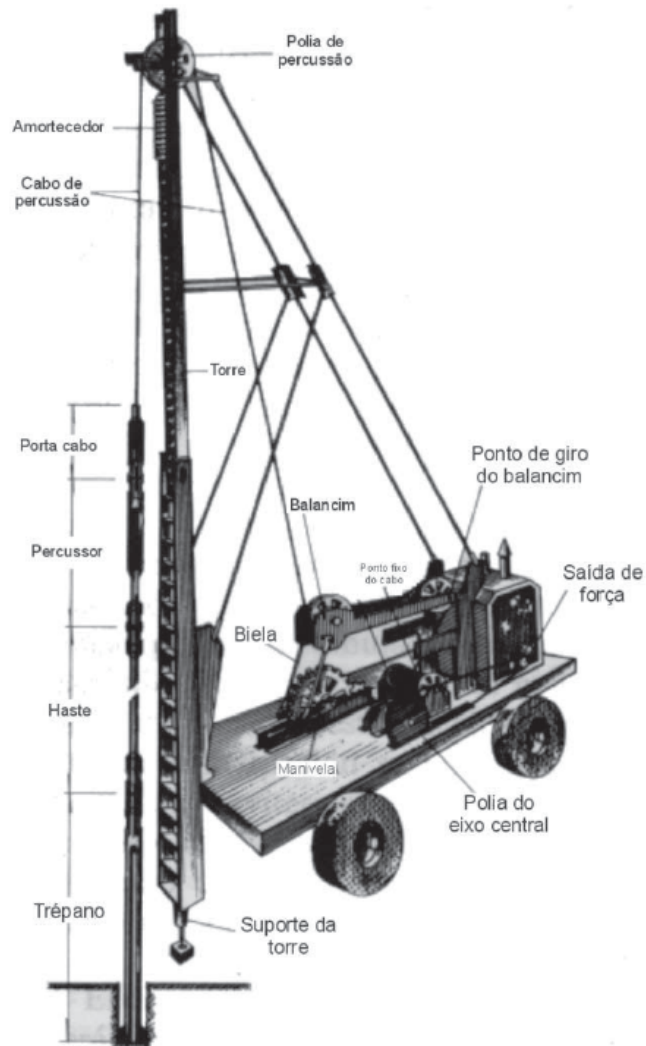


Figura 3.9 – Equipamento de percussão a cabo

Em ambos casos, a acção de vai e vem das ferramentas, mistura essas porções trituradas com água para formar uma lama. A lama é retirada a intervalos, do fundo da perfuração, por meio de uma ferramenta própria de limpeza (caçamba).

Apesar deste equipamento ser bastante versátil, e ter sido muito utilizado nos meados do século XX em Portugal, actualmente o seu emprego, em muitos casos, foi substituído pelo equipamento para perfuração a roto-percussão ou rotação que permitem avanços mais rápidos e são apropriado para os mesmos ambientes geológicos. No entanto, ainda é adequado para

terrenos cársicos ou para grandes diâmetros em rochas consolidadas não duras.

3.4.2 Rotopercussão a Ar Comprimido

Este sistema combina os princípios da rotação e da percussão e utilizado para as rochas compactas e/ou duras. O princípio do método roto - pneumático é baseado numa percussão a alta frequência e de pequeno curso dado por um martelo pneumático (também chamado martelo de fundo de furo) numa broca (bit) que, concomitantemente, roda triturando e desgastando a rocha. Estas brocas tem no seu seio incrustados dentes de carboneto de tungsténio apropriados para perfurar rochas duras (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Martelos pneumáticos e brocas

O fluido é o próprio ar comprimido transmitido pelo compressor por dentro da coluna de perfuração (varas), passando por dentro do martelo e da broca e saindo depois no espaço anular do poço (entre as varas e a parede) transportando até à superfície os detritos da rocha desgastada, a Figura 3.11 mostra o início duma perfuração por este método.

Muitas vezes, principalmente em poços profundos, quando o ar comprimido injectado tem dificuldades em remover as partículas, junta-se uma “espuma” que tem como finalidade ajudar a transportar as partículas até à superfície, e serve também como meio para lubrificar o equipamento cortante.



Figura 3.11 - Perfuração a ar comprimido

O processo descrito é o mais utilizado em Portugal, havendo também o processo inverso, onde o ar comprimido sai juntamente com os detritos pelo interior das varas (rotação inversa a

ar comprimido), utilizado para grandes diâmetros de perfuração.

Neste método de perfuração, e uma vez que o fluido utilizado é o ar comprimido, à medida que a perfuração avança, conhece-se a profundidade dos níveis aquíferos, pelo aumento da quantidade de água que sai para o exterior. Isto é importante, para a posterior colocação dos filtros (ralos) na coluna de revestimento definitiva.

O método roto pneumático directo é aconselhado para diâmetros de perfuração até 10” com colunas de revestimento até 200mm. Muitas vezes, principalmente quando existem dúvidas das capacidades aquíferas dos terrenos, perfura-se a diâmetros menores, geralmente a 4”, para fazer uma sondagem de reconhecimento, que em caso de êxito é posteriormente alargada para o diâmetro normal de captação.

3.4.3 Rotação com Lamas Bentoníticas

O sistema rotativo é o mais rápido e indicado para perfuração em rochas sedimentares não consolidadas e sedimentos. O sistema opera por circulação directa (rotary) ou inversa das lamas através das colunas de perfuração, injectada por uma bomba. Na extremidade da coluna de perfuração roda uma broca tricónica oca. Existem vários tipos destas brocas que se utilizam conforme o material a perfurar, a Figura 3.12 mostra alguns desses tipos.



Figura 3.12 – “Tricones”

A lama bentonítica, no método por rotação directa, ascende pelo espaço anular do furo arrastando as partículas até chegar à superfície, pode passar por uma peneira vibratória para lhe serem retirados os detritos maiores, sendo depois canalizada para um tanque de sedimentação. A partir daí passa para um segundo tanque de armazenamento, onde é captada por uma bomba retornando à perfuração. A perfuratriz é girada por uma mesa rotativa permitindo que a haste de perfuração deslize para baixo, à medida que o furo evolui (Figura 3.13).

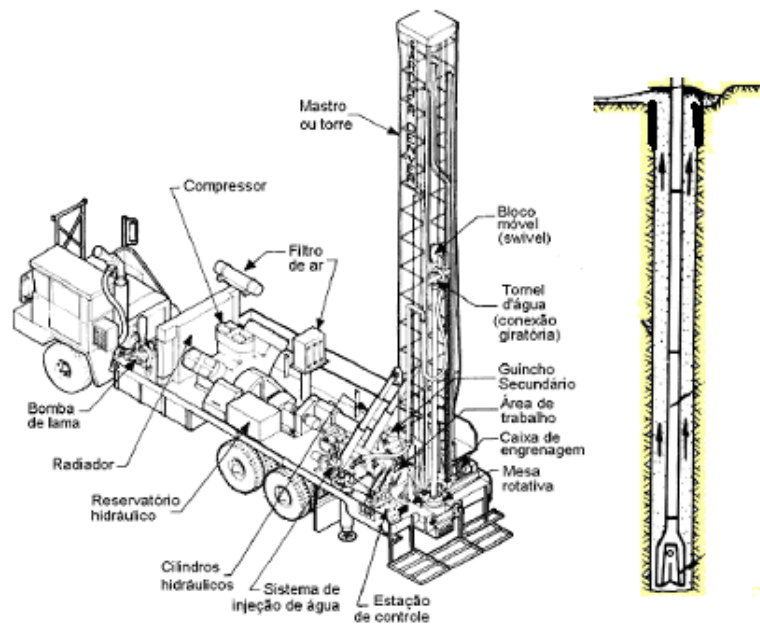


Figura 3.13 – Esboço dum equipamento de rotação e perfil do furo

Normalmente, em terrenos não consolidados é necessário efectuar uma “cabeça de furo” que consiste na aplicação de um tubo de aço como revestimento preliminar, que tem por finalidade evitar o desmoronamento superficial. Concluído o revestimento preliminar, à medida que o furo vai aumentando de profundidade, não é necessário aplicar nenhum outro revestimento durante a perfuração, porque a lama forma um reboco na parede do furo que evita seu desmoronamento. Na Figura 3.14 exemplifica-se a circulação da lama à saída do furo.



Figura 3.14 – Perfuração a “rotary”

Para a grande maioria dos furos efectuados em Portugal em terrenos incoerentes, recorre-se ao método de rotação directa (rotary), quando é exigido diâmetros maiores (acima das 20”), para grandes caudais, então é aconselhado o método de rotação inversa. Este método exige bombas de lamas mais potentes e colunas de perfuração (varas) especiais, de maior diâmetro interior, uma vez que a lama e os detritos da perfuração ascendem pelo seu interior até à superfície.

Contrariamente aos processos de perfuração a ar comprimido, quando os fluídos de perfuração são lamas bentoníticas, a localização dos níveis aquíferos não é óbvio, visto que as lamas estão constantemente a circular a caudal mais ou menos constante. Assim deve-se recorrer a métodos geofísicos para conhecer a profundidade dos níveis aquíferos, locais onde posteriormente serão colocados os filtros na coluna de revestimento definitivo.

Este método consiste de técnicas direccionadas à determinação de zonas com potencial de aquífero. Geralmente são utilizadas diagrfias eléctricas (SPR-Single-Point Resistance; SP-Spontaneous Potential; Radiação Gama Natural-RGN e Neutrões). O resultado é um perfil gráfico (Figura 3.15) que servirá de base para estabelecer as posições mais indicadas de instalação dos filtros nos furos.

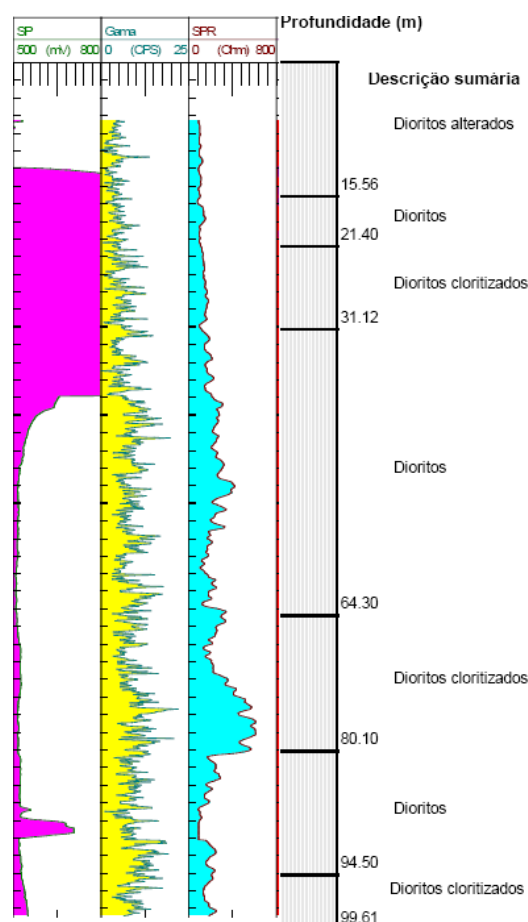


Figura 3.15 - Exemplo de diagrfias eléctricas

Muitas vezes, principalmente em captações particulares e para não onerar muito a captação, dispensa-se a utilização das diagrfias e fica a cargo da perícia e da experiência do sondador a verificação dos níveis aquíferos.

Existem algumas técnicas para o seu reconhecimento, nomeadamente: i) pelas amostras dos detritos que saem da perfuração, que quando são detritos arredondados (areias lavadas)



podem indicar níveis de circulação de água (Figura 3.16); ii) pela sensibilidade do operador ao verificar mudanças de velocidades de perfuração e iii) pela perda do volume de lamas verificada no tanque de sedimentação, indiciador de algum ambiente aquífero.

Figura 3.16 – Amostras da perfuração.

Em suma, existem vários métodos de perfuração para captações de água subterrânea, dependendo do tipo de rocha a perfurar e do diâmetro de captação. O Quadro 5.1 mostra de forma resumida os métodos aconselhados para cada tipo de terreno e em função do diâmetro de perfuração.

Quadro 3.1– Métodos de perfuração aconselhados em função do diâmetro e litologia

SELECÇÃO DO MÉTODO DE PERFURAÇÃO PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA				
Dureza	Litologia	Diâmetro	Captação (< 100 m)	Captação Profunda
Muito dura	Exemplos: Ardósia Granitos Quartzitos	Inferior a 300 mm	Rotopercussão directa	Rotopercussão directa Rotopercussão
		Superior a 300 mm	Rotopercussão directa Roto - percussão	
Dura	Exemplos: Calcários duros Arenitos duros	Inferior a 300 mm	Rotopercussão directa Percussão	Rotopercussão directa
		Superior a 300 mm	Roto percussão directa	Rotopercussão inversa
Média	Exemplos: Calcários Arenitos	Inferior a 300 mm	Rotopercussão directa Percussão	Rotopercussão directa
		Superior a 300 mm	Roto - percussão directa Percussão Rotação directa	Rotopercussão directa Rotopercussão inversa
Branda	Exemplos Areias Argilas Margas	Inferior a 300 mm	Rotação directa Percussão	Rotação directa Rotação inversa
		Superior a 300 mm	Rotação directa Rotação Inversa	Rotação inversa

3.4.4 Diâmetros de Perfuração

O diâmetro de perfuração depende de vários factores que estão relacionados entre si, entre os quais se destacam: (i) caudal a extrair; (ii) produtividade do aquífero; (iii) diâmetro do entubamento e (iv) características do equipamento de bombagem.

O caudal requerido é um dos principais condicionantes do diâmetro do furo e do seu revestimento, visto que para extrair caudais elevados é necessário equipamento de bombagem, cuja instalação requer grandes diâmetros de entubamento.

A produtividade do aquífero é o condicionalismo essencial no que respeita ao caudal a extrair de um furo. Logo, se o aquífero é de baixa produtividade não se consegue extrair grandes caudais, o que implica perfurações a pequenos diâmetros.

O diâmetro de entubamento condiciona a quantidade de água a extrair da captação, pois o equipamento de bombagem é colocado no seu interior. Quanto maior for o caudal a extrair, maior é também o diâmetro do equipamento de bombagem. Para grandes captações é necessário elevados diâmetros de perfuração de forma a que se entube também a grandes diâmetros.

Regra geral, quando a perfuração é efectuada a ar comprimido (terrenos duros) o espaço anular, isto é, o espaço compreendido entre as paredes do furo e o tubo de revestimento é inferior do que quando a perfuração é efectuada com circulação de lamas bentoníticas. Isto, deve-se ao facto da necessidade dos furos em terrenos sedimentares necessitarem de um espaço anular maior para colocação de maior quantidade do maciço filtrante. O Quadro 3.2 indica os diâmetros de revestimento definitivo recomendados para os vários caudais de extracção.

Quadro 3.2– Caudais de extracção recomendados em função do diâmetro de entubamento

CAUDAL DE BOMBAGEM	DIÂM. DE ENTUBAMENTO	DIÂM. DE PERFURAÇÃO
0 - 15	160	200 - 300
10 - 37	200	250 - 400
25 - 70	250	300 - 450
40 - 100	300	350 - 500
70 - 160	350	400 - 550

3.4.5 Aplicação da Coluna de Revestimento – Entubamento

O revestimento é a fase que corresponde ao acabamento do furo, e deverá ser aplicado quando as características quantitativas e qualitativas obtidas na fase de perfuração justificarem a continuidade dos serviços. A tubagem definitiva, que vai constituir as paredes do furo propriamente dito, chama-se revestimento. É a que se coloca para revestir definitivamente o furo e desempenha duas funções principais: sustentar as paredes da perfuração e constituir a condução hidráulica que coloca os aquíferos em comunicação com a superfície. O revestimento serve também para impedir que as águas superficiais, eventualmente contaminadas, entrem para o interior do furo.

Nas rochas cristalinas, onde a água surge através de fracturas e devido ao facto de estas serem bastante duras, não havendo o perigo de desmoronamento das paredes do furo, essa tubagem de revestimento pode ser dispensada, embora não seja recomendado, usando-se apenas o revestimento de protecção superficial.

Os tipos de tubo mais utilizados para a coluna de revestimento são o aço e o PVC com resistência à compressão suficientes para sustentar as paredes do furo.

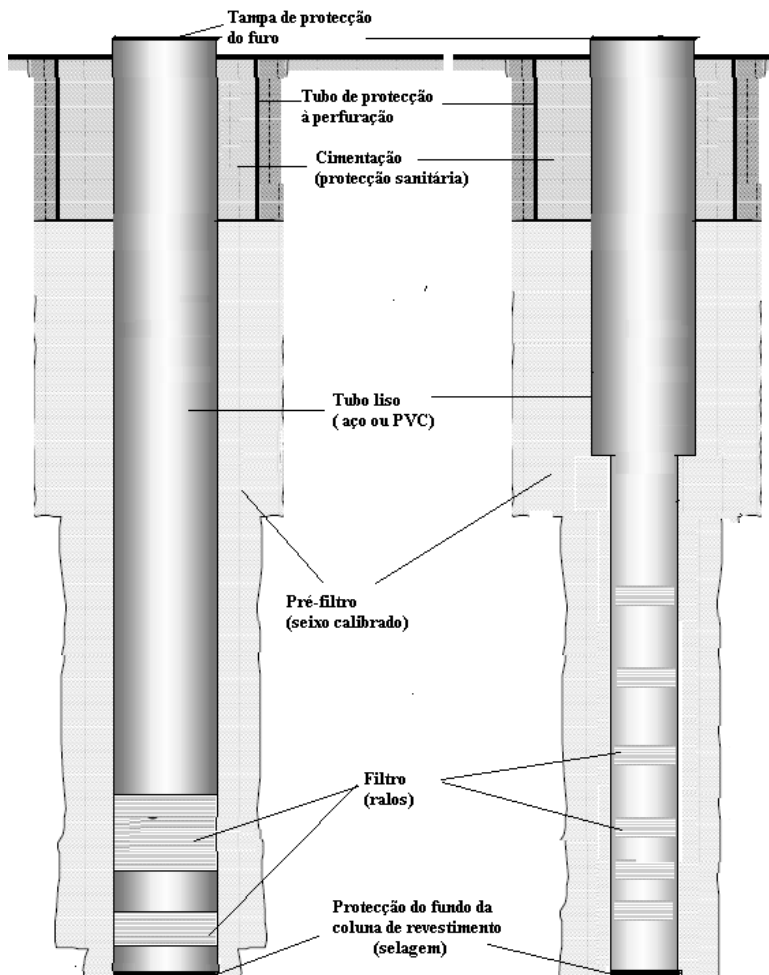


Figura 3.17 – Tubos “ralos” em aço e PVC

Geralmente, no entubamento utiliza-se tubagem com 6 metros de comprimento que serão roscadas ou soldadas no caso da tubagem em aço, ou então, roscadas ou rebitadas no caso da tubagem em PVC. Os filtros (ralos) são incorporados na coluna de revestimento da mesma forma. A coluna de revestimento é constituída por secções de tubos lisos e tubos ralos (filtros).

Os tubos ralos colocam-se nas zonas produtivas. Estes constituem a parte mais frágil da coluna de revestimento, ou seja, aquela que virá a requerer os futuros serviços de limpeza e manutenção. A Figura 3.17 exemplifica tubos ralos em aço e PVC.

O filtro tem a função de permitir que a água entre na tubagem de revestimento sem perda excessiva de carga, impedir a passagem de material fino durante a bombagem, e servir como suporte estrutural. O dimensionamento correcto de um filtro consiste em determinar o



tamanho das aberturas, o seu comprimento e resistência mecânica ideais. O comprimento e o diâmetro do filtro afectam o caudal do furo. A facilidade com que permite a passagem da água para o interior do tubo vem determinada pelo número e tamanho das aberturas (ranhuras). A vida útil do filtro depende do tipo de material utilizado na sua construção, pois a sua duração e funcionamento são afectados pelas características físico - químicas da água do aquífero.

Figura 3.18 – Coluna de revestimento definitiva

A Figura 3.18 mostra em esquema, colunas de revestimento definitivo com partes em tubo liso e partes com tubos ralos. Muitas vezes a coluna de revestimento tem 2 ou mais diâmetros diferentes de entubamento. Quando os aquíferos são profundos e, geralmente, para grandes caudais de extracção, opta-se por perfurar a vários diâmetros e conseqüentemente também entubar a diâmetros diferentes. A zona de maior diâmetro é aquela onde vai ser colocado o equipamento de bombagem, servindo as zonas de menor diâmetro para colocação dos ralos, que são as zonas produtivas da captação. Este processo torna a obra mais barata e o tempo de execução menor.

3.4.6 Pré-Filtro

Após a instalação da coluna de revestimento do furo, é aplicado seixo calibrado com granulometria apropriada no espaço anular do furo. O seixo calibrado aumenta o diâmetro efectivo do furo, actuando como um pré-filtro. Permite a passagem do material fino para o poço durante a fase de limpeza e desenvolvimento, protegendo o revestimento do desmoronamento das formações produtoras circundantes.

A granulometria do seixo a empregar varia com o tipo da formação, sendo importantíssimo a



correcta escolha de sua dimensão. Por um lado o material detrítico proveniente dos aquíferos deve ser retido no seu seio, por outro lado, deve haver uma zona bastante permeável em torno dos ralos tornar eficiente a entrada de água na tubagem.

Figura 3.19 – Pré filtro em redor de um tubo ralo

Um material adequado para constituir o pré-filtro de um furo, deve ser limpo, de grãos arredondados e relativamente uniformes, características essas, que concorrem para uma maior porosidade e permeabilidade.

Na Figura 3.19 vê-se o pré-filtro aplicado em redor do tubo ralo, já depois da captação ter sofrido processos de limpeza e desenvolvimento.

A colocação do pré-filtro é sempre recomendada, embora, nas captações em rochas cristalinas nem sempre é utilizado.

3.4.7 Limpeza e Desenvolvimento

Após a colocação da coluna de revestimento e do pré-filtro, a etapa seguinte é a limpeza e

desenvolvimento da captação. Esta etapa constitui-se como decisiva para a sua completa eficiência. O desenvolvimento dum captação é o conjunto de operações técnicas que devolvem as características hidráulicas ao aquífero, entretanto adulteradas, pelos processos de perfuração. Tem por objectivo eliminar os materiais finos da formação aquífera e extrair eventuais fluidos ou detritos da perfuração de modo a diminuir, tanto quanto possível, as perdas de carga resultantes da circulação de água até ao furo. Deve também estabilizar a formação aquífera na periferia da zona de captação, distribuindo os grãos de seixo calibrado de forma decrescente, desde os mais grossos aos mais finos à medida que se afastam dos drenos (Figura 3.19).

Os principais métodos de desenvolvimento de um furo são: pistonagem (“plunger”), injeção de ar comprimido (“air lift”), bombagem com injeção de água sob pressão ou com bomba submersível (sobre-bombagem). Normalmente, são utilizados métodos combinados, concluindo-se os trabalhos com aparecimento de água isenta de turbidez



Figura 3.20 – Desenvolvimento a ar comprimido

Em Portugal utiliza-se com frequência o desenvolvimento com ar comprimido (“air lift”), que consiste na introdução de ar comprimido através de tubagem de pequeno diâmetro e recolha da água através de tubagem de maior diâmetro (Figura 3.20). A saída do ar comprimido deve ser efectuada junto aos tubos drenos colocados na coluna de revestimento, com paragens e arranques sucessivos do compressor.

3.4.8 Cimentação

A cimentação do furo consiste no preenchimento do espaço que se forma entre o tubo de revestimento e a parede da formação (espaço anular), com uma pasta de água, cimento, bentonite e areia, ou outro material de baixa permeabilidade. A cimentação visa essencialmente o seguinte: (i) evitar a entrada de água superficial eventualmente contaminada ao longo da face externa do revestimento; (ii) isolar a água de qualidade indesejável contida

na camada situada acima da formação aquífera desejada; (iii)fixar o revestimento e (iv) formar um envólucro protector ao redor do tubo, para prolongar sua vida útil mediante protecção contra corrosão externa.

3.4.9 Testes de Produção – Ensaios de Bombagem

Os ensaios de bombagem realizam-se para estabelecer as características hidráulicas dos aquíferos e dos furos, geralmente agrupam-se em ensaios a caudal constante ou variável com ou sem furo de observação. Um ensaio de bombagem consiste na extracção a caudal constante ou variável e na medição periódica do nível de água, tanto no furo de bombagem, como no furo de observação, caso existam os dois.

Um ensaio com caudal constante, com furo de observação, tem por objectivo estabelecer as características hidráulicas do aquífero e das unidades hidrogeológicas associadas, embora os resultados sejam também usados para determinar a eficiência do furo de bombagem.

Nos ensaios a caudal variável (ensaios escalonados) não requer furo de observação e a sua utilidade serve para estabelecer o rendimento do furo a diferentes caudais, determinar o caudal crítico e eleger o caudal mais apropriado para o funcionamento definitivo do furo. É este ensaio que se utiliza quando se pretende sómente estabelecer as condições óptimas de exploração de um furo de captação de águas subterrâneas.

Os dados mais importantes a conhecer neste tipo de ensaios, e de modo a dimensionar o sistema definitivo de bombagem, são:

- Nível Estático (NE) – Nível de água dentro do furo quando não está submetido a bombagem;
 - Nível Hidrodinâmico (NH) – Nível de água estabilizado quando sujeito a um determinado caudal de bombagem;
 - Rebaixamento (s) – Diferença entre os dois níveis anteriores;
 - Caudal (Q) – Caudal de extracção definitivo;
-

- Profundidade de colocação da aspiração do sistema de bombagem.

3.4.10 Bombagem

O equipamento de elevação da água é dimensionado após estar estabelecido o caudal de extracção e a profundidade de colocação da aspiração da electrobomba, dados extraídos do ensaio de caudal

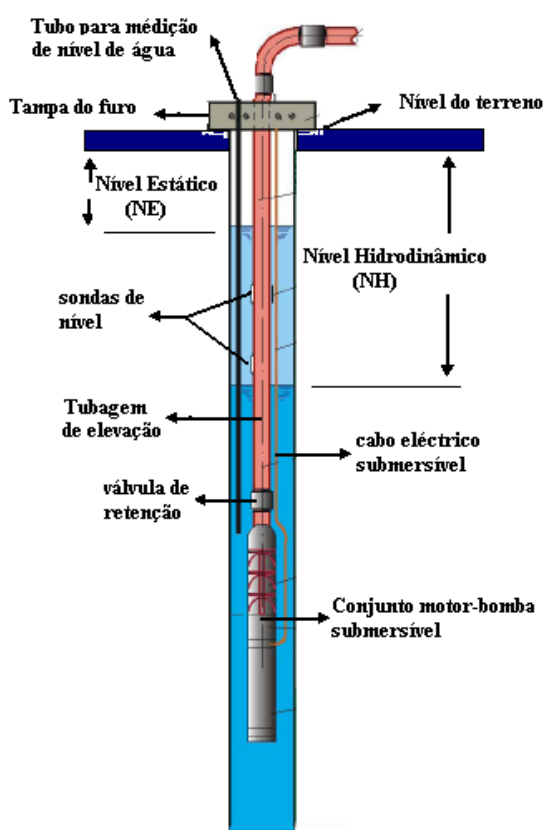


Figura 3.21 – Equipamento de extracção de água

A valoração da captação passa também pelo equipamento de extracção, cujo deficiente dimensionamento, contribui por vezes de forma significativa, para o envelhecimento prematuro da captação.

A selecção da electrobomba submersível (que se pressupõe que exista corrente eléctrica no local, ou gerador) deve considerar a profundidade de colocação, a altura de elevação, bem

como os níveis estáticos e dinâmicos da captação para o caudal a extrair.

A Figura 3.21 mostra um esquema muito resumido de um conjunto de equipamento necessário para a extracção de água de um furo tipo.

Capítulo 4

PERÍMETROS DE PROTECÇÃO ÀS CAPTAÇÕES

4.1 Generalidades

Um perímetro de protecção não é mais que a área de superfície e subsuperfície envolvente de uma ou mais captações destinadas ao abastecimento público, onde as actividades susceptíveis de alterar a qualidade da água subterrânea, são limitadas, proibidas, ou regulamentadas de modo progressivo (restrições diminuem à medida que aumenta a distância à captação). Os limites da zona de protecção são definidos de modo a que os potenciais poluentes que alcançam a água subterrânea, na fronteira da zona de protecção ou fora dela, se degradem ou se tornem inofensivos antes de alcançarem a captação.

Os perímetros de protecção são um instrumento preventivo para assegurar a protecção das águas subterrâneas ou superficiais destinadas ao abastecimento público. Nas zonas de protecção, vizinhas das captações, estabelecem-se restrições de utilidade pública ao uso do solo, em função das características das massas de água subterrânea ou superficial e dos caudais extraídos, de forma a salvaguardar a protecção da qualidade das águas.

De acordo com o Decreto-Lei nº 382/99 de 22 de Setembro que define os Perímetros de Protecção para Captações de Águas Subterrâneas Destinadas ao Abastecimento Público, consideram-se 3 áreas de protecção contíguas às captações:

Zona 1 - Zona de protecção imediata ou de restrições absolutas – área da superfície do terreno contígua à captação que se destina à protecção directa da origem de água, normalmente vedada. É a zona de prevenção de acidentes onde é proibido qualquer tipo de actividade e/ou instalação, excepto as que se prendem com o funcionamento da captação.

Zona 2 - Zona de protecção intermédia ou de restrições máximas – área da superfície do terreno contígua à zona de protecção imediata, de extensão variável, tendo em conta as condições geológicas e estruturais do sistema aquífero. A sua função é proteger o aquífero contra a poluição microbiológica (bactérias, vírus, etc) favorecendo a sua diluição ou eliminação, antes de alcançar a captação.

O seu dimensionamento utiliza normalmente um critério temporal (geralmente 50 dias);

Zona 3 - Zona de protecção alargada ou de restrições moderadas – área da superfície do terreno contígua à zona de protecção intermédia, destinada a proteger a água subterrânea de poluentes persistentes ou seja de difícil atenuação. Deve permitir, após detectada a poluição, um tempo de resposta suficiente para que seja encontrada uma fonte de água alternativa ao consumo humano.

O critério utilizado na sua delimitação poder ser temporal (geralmente 3500 dias), ou hidrogeológico, englobando neste caso a área de recarga da captação.

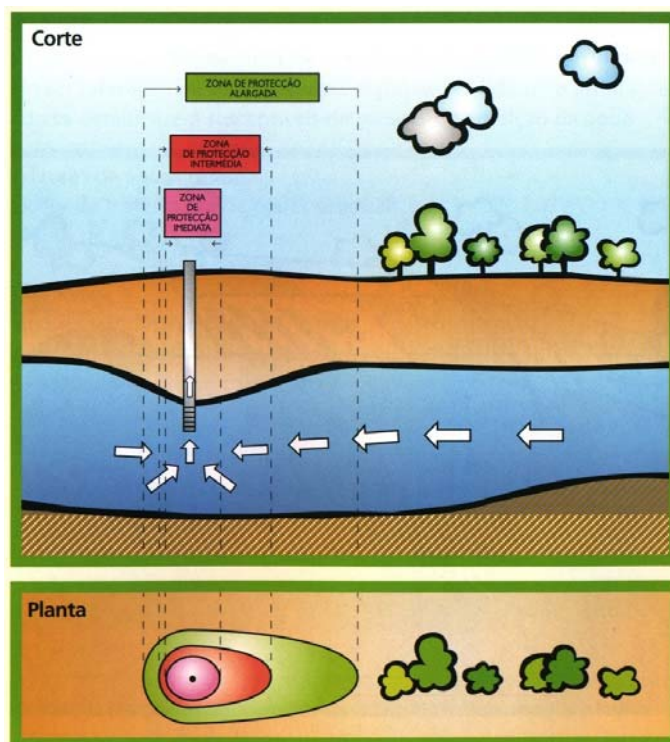


Figura 4.1 - Exemplo da distribuição dos 3 perímetros de protecção contíguos de uma captação (adaptado de INAG)

São abrangidas por este diploma as captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público, de água para consumo humano de aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100 m³/dia. A Figura 4.1 indica o esquema conceptual das 3 zonas de protecção usualmente consideradas.

Existem outras zonas mais específicas de protecção às captações, que são:

Zona de protecção especial - zona que assume maior importância no caso de aquíferos cársicos ou fracturados. Delimita áreas mais afastadas, localizadas fora do perímetro de protecção, mas que apresentam conexão hidráulica com a captação devido à existência de condutas ou fracturas. As restrições nesta zona são equivalentes às da zona de protecção imediata.

Zona de protecção perante a intrusão salina – zona definida em regiões costeiras, sendo restringidos os caudais extraídos que conduzem a uma eventual degradação da qualidade da água subterrânea, devido ao avanço da cunha salina em direcção ao aquífero.

Zona de protecção da quantidade – zona onde devem ser controlados os volumes de água subterrânea extraídos, de modo a garantir a sua quantidade. A implantação de captações no interior do perímetro de protecção, as mudanças de recarga e a excessiva solicitação de um aquífero livre podem alterar o tamanho e a forma do perímetro de protecção, ponde em causa a garantia da continuidade da quantidade de água a extrair.

4.2 Critérios para Delimitação de Perímetros de Protecção

Os diversos critérios que se podem usar para definir perímetros tratam todos de garantir a qualidade da água:

- Evitar que o débito da bombagem na captação produza variações no fluxo da água subterrânea que provoque a chamada de substâncias indesejáveis na mesma;
 - Assegurar que a contaminação seja extinta no trajecto entre o ponto da contaminação e o local de extracção (poder auto-depurador do terreno, tempo de propagação, distância)
-

- Garantir a protecção da qualidade das águas subterrâneas na totalidade da área de alimentação de uma captação (critérios hidrogeológicos)

De seguida faz-se uma breve abordagem aos critérios que geralmente se usam para a delimitação dos perímetros de protecção de captações de água subterrânea

Distância - Consiste em delimitar uma área definida por um círculo com centro na captação. As suas dimensões definem-se frequentemente com uma média das obtidas ao aplicar em diferentes casos outros métodos mais complexos. É o mais elementar dos critérios sendo pouco eficaz, uma vez que não incorpora nenhuma consideração sobre as condições do fluxo da água subterrânea, nem a respeito de fenómenos implicados no transporte de contaminantes em cada caso particular.

Rebaixamento - Baseia-se em considerar que na área desce o nível da água subterrânea, devido ao efeito da bombagem, produzem-se trocas na direcção do fluxo subterrâneo e um aumento da velocidade com que a água chega á captação, devido ao incremento do gradiente hidráulico produzindo a aceleração da migração do contaminante.

Tempo de propagação - Neste critério avalia-se o tempo que um contaminante demora a chegar á captação que se pretende proteger. Os cálculos para a determinação do tempo de transporte realizam-se considerando principalmente os processos de convecção, que é o mais conhecido e o que tem maior importância nos aquíferos com grande velocidade de fluxo, se bem que também se deva ter em consideração a dispersão hidrodinâmica e a interacção sólido-soluto que adquirem maior importância em aquíferos com velocidades de fluxo menor. É um dos critérios mais exactos que existem e o objectivo que se pretende com a sua aplicação é definir zonas em redor da captação que garanta que um determinado contaminante se degrade antes de chegar á captação.

Critérios hidrogeológicos - A sua eleição fundamenta-se em assumir que uma contaminação que se produz na área de alimentação de uma captação pode alcançá-la decorrido um certo período de tempo, pelo que se deve delimitar esta área e proteger toda sua totalidade. Trata-se então de identificar os limites hidrogeológicos que delimitam a área na qual a água procedente da precipitação e depois de infiltrar-se pode chegar á captação. A aplicação deste

critério vai implicar uma área maior que a necessária, pelo que se utilizará principalmente ao realizar uma primeira determinação do perímetro, especialmente nos aquíferos cársicos e fracturados que tem elevados velocidades de fluxo. De qualquer forma é recomendável a sua utilização em conjunto com outros critérios, tanto para valorizar os limites hidrogeológicos existentes como para modificar quando for preciso os resultados que estes podem proporcionar.

Poder auto-depurador do terreno - Consiste em utilizar a capacidade dos diferentes terrenos para atenuar a concentração dos contaminantes que os atravessam como critério para definir a extensão destes, de forma a que a água contaminada possa alcançar uma pureza microbiológica e umas características químicas que sejam idênticas às naturais do aquífero captado.

Para eleger entre os critérios anteriormente expostos e que interessa utilizar em cada caso, deve-se ter em conta, tanto considerações técnicas como o impacto socioeconómico que resulta da sua aplicação.

As considerações técnicas englobam diversos factores, cuja importância depende das características hidrogeológicas e também dos objectivos que se pretende atingir com o programa de protecção (ITGE, 1991; EPA, 1987) e são entre outros:

- Facilidade de aplicação: facilidade com que um utilizador pode aplicá-lo, quanto maior a sua complexidade mais especializado tem que ser o operador.
 - Facilidade de quantificação: conservar a possibilidade de utilizar métodos matemáticos na sua aplicação.
 - Adaptabilidade a alterações: capacidade de adaptar-se a modificações que se produzam no futuro, nomeadamente caudais de extracção, taxas de recarga e efeitos de fronteira de fluxo.
 - Facilidade de verificação: facilidade com que os resultados podem ser comprovados no terreno mediante estudos de detalhe.
 - Capacidade de considerar o poder auto-depurador do terreno: avaliar com que fiabilidade reflecte as características intrínsecas do terreno.
-

- Concordância com o modelo hidrogeológico geral: a capacidade de aplicação de um critério a um determinado conjunto de características hidrogeológicas é um factor de avaliação essencial; os controladores físicos que podem influenciar a facilidade de aplicação do critério são a localização das fronteiras, a extensão do confinamento, o grau de consolidação, o grau de fracturação do aquífero e a extensão do desenvolvimento dos canais em aquíferos cárnicos.
- Capacidade de incorporar processos físicos. Se incorpora os processos físicos controladores do transporte do contaminante.

Para além das considerações técnicas, as considerações de carácter político também devem ser tidas em conta na selecção do critério, salientando-se que a consideração principal consiste na aplicabilidade do critério ao objectivo de protecção da captação. Estas considerações são as seguintes (EPA, 1987):

- Facilidade de compreensão: a facilidade de compreensão por parte do público em geral, é uma medida importante na sua utilidade e poderá afectar a decisão quanto á sua aplicação.
 - Economia do desenvolvimento do critério: os custos de aplicação de um critério e do desenvolvimento dos recursos técnicos que suportam essa aplicação, são importantes para impedir ou encorajar a sua utilização; de um modo geral, os critérios mais complexos, que se baseiam em informação detalhada ou que implicam um trabalho mais intensivo na sua aplicação, tornam-se mais dispendiosos, o que poderá conduzir á sua não aceitação, apesar da sua validade técnica poder ser inquestionável
 - Defensibilidade: as fronteiras de uma zona de protecção devem ser claramente definidas e defensáveis contra potenciais protestos por parte das entidades afectadas
 - Utilidade na implementação de faseamento: algumas entidades preferem iniciar os programas de protecção com o critério mais simples e menos dispendioso, avançando posteriormente para critérios mais sofisticados (o critério da distância é, de um modo geral, o escolhido na fase inicial)
 - Relevância do objectivo de protecção: reflecte o grau com que o critério incorpora ou suporta o objectivo de protecção seleccionado.
-

4.3 Algumas Metodologias para Determinar Perímetros de Protecção

Os métodos clássicos para a delimitação de perímetros, baseados em equações do fluxo de água subterrânea e em parâmetros hidrodinâmicos (*e.g.* lei de Darcy) dão bons resultados em aquíferos porosos homogêneos de grande extensão. No caso dos aquíferos cársicos ou fracturados, geralmente caracterizados por alta heterogeneidade e anisotropia, não são aplicáveis (salvo a excepção de serem considerados como meios homogêneos à escala do trabalho) os métodos clássicos, sendo necessário desenvolver uma metodologia específica. No Quadro 4.1 está sintetizado a aplicabilidade de algumas metodologias consoante o tipo de aquífero.

Quadro 4.1– Metodologias para determinação do perímetro de protecção (Navarrete, 2003)

MÉTODO/CRITÉRIO		POROSOS E SILILARES	FRACTURADOS E CÁRSICOS
	Raio fixo arbitrário	✓	✓
Métodos Analíticos	Raio fixo (função do tempo)	✓	
	Raio fixo (função do	✓	✓
	Kreitler e Senger	✓	
	Hoffman e Lillich	✓	
	Wyssling	✓	
	Equação do fluxo uniforme	✓	
	Krigsman e Lobo Ferreira	✓	
Métodos Gráficos	Jacobs e Bear	✓	
	Albinet	✓	
Métodos Hidrogeológicos	Horsley	✓	
	hidrogeológicos	✓	✓
Modelos Numéricos	Modelos de fluxo e transporte	✓	✓
Outros Métodos e Técnicas	Rehse	✓	
	Bolsenkoter		✓
	Traçadores	✓	✓

Os métodos disponíveis para a definição de perímetros de protecção variam em termos de custos de implementação e da sua complexidade. A utilidade do perímetro aumenta com a complexidade do método utilizado para a sua definição, mas aumenta também o custo e o nível de experiência e informação exigidas. No entanto, os custos associados a um programa

de protecção de água subterrânea são largamente ultrapassados pelos custos e dificuldades envolvidos na reabilitação ou mesmo com a perda de um aquífero por poluição (DEQ – Department of Environmental Quality, 1996).

São apresentados em seguida alguns dos métodos para a delimitação de perímetros de protecção. O método a utilizar reflecte o critério seleccionado numa fase anterior; no processo de delimitação do perímetro de protecção de uma captação pode ser utilizado mais do que um método.

4.3.1 Raio Fixo Arbitrário

De um modo geral, este método é utilizado na definição da zona de protecção imediata (Zona 1), sendo utilizado também para definir uma área de protecção provisória numa fase preliminar, até que seja necessário recorrer a métodos mais complexos, devido a um eventual aumento da necessidade de protecção ou devido a disponibilidade de dados mais sofisticados. Pode ser uma metodologia particularmente útil em casos de ameaça eminente de poluição, o que exige atenção imediata (Moinante, 2003).

Uma vez que não considera as condições hidrogeológicas do local podem ser gerados erros. De facto, pode ocorrer uma sobreposição das áreas de recarga, aumentando os custos de aquisição ou de controlo do uso do solo em áreas onde, afinal, tal não seria necessário. Pelo contrário, pode também suceder que áreas de recarga distanciadas da captação não sejam integradas na zona de protecção.

Como vantagem tem o facto de ser bastante simples, rápido e pouco dispendioso, uma vez que não é necessária uma grande quantidade de informação nem grande experiência.

4.3.2 Métodos Analíticos

Os métodos analíticos permitem o cálculo das dimensões das zonas de protecção recorrendo a equações de simples resolução. Requerem o conhecimento de alguns parâmetros hidrogeológicos ou a sua estimação, nomeadamente, a transmissividade, a porosidade, o

gradiente hidráulico, a condutividade hidráulica, o caudal de extracção e a espessura saturada do aquífero. De um modo geral, dividem-se em dois grupos, muitas vezes utilizados em conjunto: o de cálculos utilizando o tempo de propagação e o de cálculos utilizando o rebaixamento (EPA, 1994).

São de longe os métodos mais utilizados, permitindo a comparação com outros programas de definição de perímetros de protecção. Tratam-se de métodos pouco dispendiosos, embora os custos da sua implantação possam ser ligeiramente elevados se os dados hidrogeológicos forem desenvolvidos para cada perímetro de protecção. Os dados podem ser obtidos a partir de dados hidrogeológicos locais ou regionais, se não existirem ou se for necessária maior precisão, será necessário recorrer aos estudos no local, que podem incluir a construção de furos ou ensaios de caudal.

4.3.2.1 Raio Fixo Calculado

Com este método, o raio do perímetro de protecção é definido com base numa equação analítica que tanto pode utilizar: (i) o tempo de propagação do poluente até a captação, como (ii) o rebaixamento do nível piezométrico.

(i) Função do tempo de propagação

A equação utilizada (equação volumétrica) calcula o raio de uma secção cilíndrica do aquífero, centrada na captação, e com capacidade para conter o volume de água captada durante um determinado tempo de propagação, tempo esse necessário para que um potencial poluente seja minimizado até apresentar concentrações seguras, antes de alcançar a captação. É definida uma área através da qual a água subterrânea e os poluentes se propagam durante um determinado período de tempo; esse tempo de propagação define o raio da área de protecção (ou raio da secção cilíndrica).

Admite-se que a captação é a única a drenar o aquífero e que não existem direcções preferenciais de fluxo, com todas as linhas de corrente a convergir para a captação (Figura 4.2).

O único parâmetro hidrogeológico necessário é a porosidade e a equação a utilizar é a

seguinte:

$$r = \sqrt{\frac{Q.t}{n.H.\pi}}$$

onde:

Q – caudal de exploração da captação (m³/dia);

t – tempo de propagação (dia);

n – porosidade eficaz do aquífero (adm);

H – espessura saturada da captação (m);

r – raio do perímetro de protecção (m).

A equação volumétrica é mais adequada para aquíferos verdadeiramente confinados, sem drenância vertical a partir do estrato confinante superior. Não é uma equação muito apropriada para aquíferos de carácter livre, visto que o cone de rebaixamento gerado não é cilíndrico e além disso a recarga não é considerada. É também necessário que o gradiente hidráulico seja mínimo (< 0,0005 ou 0,001), uma vez que gradientes muito abruptos geram zonas de influência não circulares (EPA, 1994).

Ao ignorar a eventual drenância vertical através do estrato confinante, a equação volumétrica assume que toda a água tem origem no aquífero, resultando numa sobreprotecção, no caso dos aquíferos semi-confinados. Caso seja possível quantificar a drenância, ela poderá ser incorporada na equação volumétrica do seguinte modo (EPA, 1994):

$$Q = Q_a + Q_i$$

onde Q_a representa o volume de água extraída do aquífero e Q_i o volume de água que entra no aquífero através da drenância. Uma vez que os dois valores dependem do raio (incógnita) pode obter-se a solução por tentativa e erro, até ser encontrado o raio para o qual $Q_a + Q_i$ iguala o caudal de extracção.

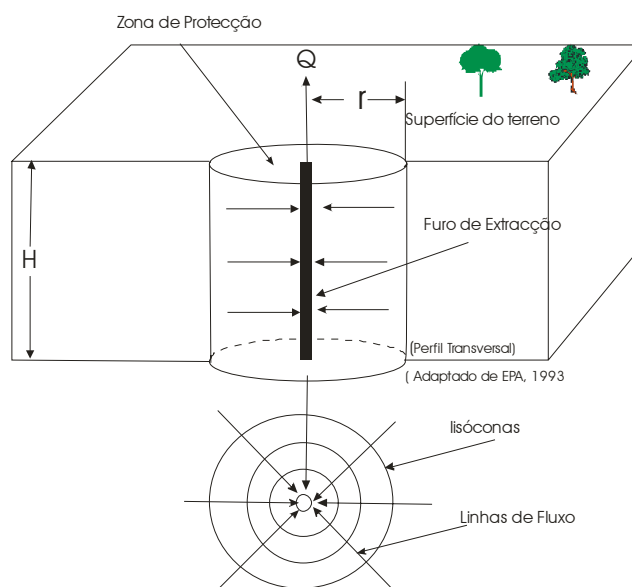


Figura 4.2 – O método do raio fixo calculado (adaptado de Moinante, 2003)

Segundo DEQ e OHD (1996) este método é aceitável para populações inferiores a 500 habitantes, abastecidas por uma ou mais captações de água subterrânea. Para compensar as suas limitações (uma vez que não considera a permeabilidade, o gradiente hidráulico, etc.) é sugerido que se utilize um tempo de propagação de 15 anos. Caso exista um conhecimento anterior de potenciais fontes de poluição existentes nas proximidades da(s) captação(ões), dever-se-á utilizar um método mais seguro.

A aplicação do método do raio fixo calculado em função do tempo de propagação, é sugerida e descrita na legislação portuguesa para os casos em que não existem estudos hidrogeológicos ou não seja possível a sua realização.

(ii) Função do rebaixamento

Neste caso, a área definida é aquela na qual é produzido um determinado rebaixamento do nível piezométrico de um aquífero.

O ajuste dos resultados obtidos a realidade é melhor, quanto melhor for o ajuste da realidade física do caso estudado as condições limitativas assumidas no seu planeamento. Essas condições são as seguintes (ITGE, 1991):

- ausência de recargas anteriores;

- o aquífero é homogéneo e isotrópico relativamente a sua permeabilidade;
- o aquífero é infinito na sua extensão;
- a captação tem diâmetro igual a zero;
- a captação atravessa completamente a formação aquífera;
- a água captada é descarregada instantaneamente e não volta a entrar no aquífero;
- o fluxo de água é radial em torno da captação e não existem componentes verticais;
- a superfície piezométrica regional é praticamente plana;
- o caudal de extracção é constante.

A equação utilizada na aplicação deste método é a Equação de Theis para regime variável:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

em que u é uma função auxiliar com o seguinte valor:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \Leftrightarrow r = \sqrt{\frac{u \cdot 4 T t}{S}}$$

onde:

r – raio da zona de protecção (m);

Q – caudal de extracção constante (m³/d);

T – transmissividade do aquífero (m²/d);

S – coeficiente de armazenamento ou cedência específica do aquífero;

t – tempo decorrido desde o início da extracção (d).

Definiu-se então uma Função de Poço $W(u)$ que, por não ter solução analítica, foi resolvida por métodos aproximados, resultando a tabela da Função de Poço $W(u)$ e u ,

$W(u) = \frac{4\pi.T.s}{Q}$, sendo s o rebaixamento num ponto localizado a uma distância r da captação (m)

A determinação do raio da zona de protecção inicia-se com o cálculo da função de poço $W(u)$, procurando-se posteriormente o valor de u na tabela da função de poço. Torna-se possível, assim, substituir o valor de u na expressão “ $r = \sqrt{\frac{u.4.T.t}{S}}$ ” de modo a obter-se o valor de r (distância à captação onde se produz um rebaixamento d , utilizado como critério de delimitação da zona de protecção).

De modo a que o perímetro de protecção seja mais correcto, o raio calculado é "estendido" na direcção do fluxo da água subterrânea.

A utilização do raio fixo calculado, tanto em função do tempo de propagação como do rebaixamento, é simples, pouco dispendiosa, exige pouca experiência especializada e os dados necessários estão quase sempre disponíveis. Apresenta maior precisão que o método anterior mas continua a tratar-se de um método pouco exacto, uma vez que não considera todos os factores hidrogeológicos que influenciam o transporte de poluentes (Wallin, 1997).

É um método pouco preciso quando se trata de aquíferos heterogéneos e anisótropos. Deverá ser utilizado nas primeiras fases de um estudo ou em casos em que factores não considerados no método não assumam grande importância.

4.3.2.2 Método de Wyssling

Metodologia de aplicação simples, aplicável a aquíferos porosos homogéneos. Baseia-se no cálculo da largura da zona de chamada de uma captação e na procura posterior do tempo de propagação desejado. A zona de chamada corresponde à porção da zona de influência onde se verifica rebaixamento do nível freático e onde as linhas de fluxo se dirigem para a captação (Figura 4.3).

A zona da frente de chamada (B) é calculada da seguinte forma:

$$B = \frac{Q}{Kbi}$$

onde:

Q = caudal de extracção (m³/d);

K = condutividade hidráulica (m/d);

B = espessura saturada do aquífero (m);

i = gradiente hidráulico (adm).

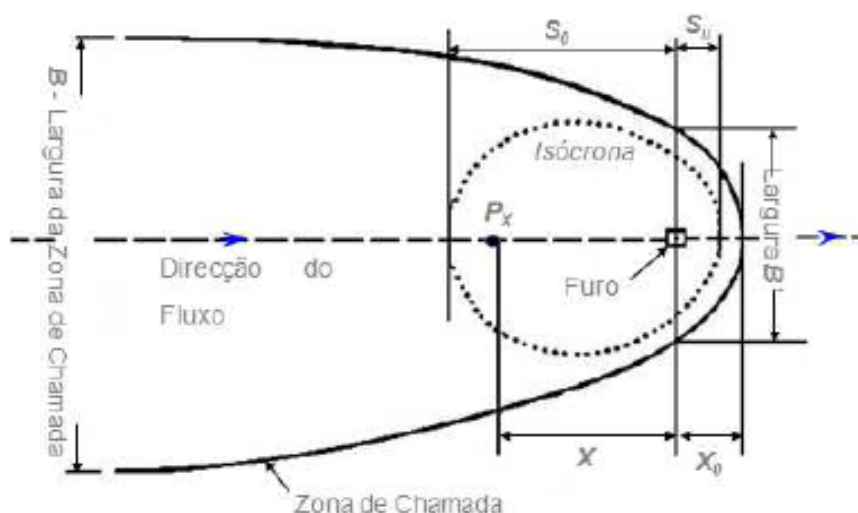


Figura 4.3 – Determinação de isócronas (adaptado ITGE in Moinante ,2003)

O raio de chamada X_0 (distância da captação ao ponto neutro a jusante) e a largura B' da zona de chamada (largura na perpendicular à direcção do fluxo que passa pela captação) podem obter-se da seguinte forma:

$$X_0 = \frac{Q}{2\pi Kbi} \qquad B' = \frac{B}{2} = \frac{Q}{2Kbi}$$

Depois de definida a zona de chamada é necessário determinar, na direcção do fluxo, o tempo de propagação pretendido, empregando-se as seguintes equações:

$$V_e = \frac{Ki}{n_e} \qquad l = \frac{V_e}{t}$$

$$S_0 = \frac{+l + \sqrt{l(l+8*X_0)}}{2} \qquad S_u = \frac{-l + \sqrt{l(l+8*X_0)}}{2}$$

onde:

V_e = velocidade eficaz (m/d)

n = porosidade eficaz (adm)

t = tempo de propagação (d)

S_0 = Distância correspondente ao tempo t no sentido do fluxo a montante da captação(m)

S_u = Distância correspondente ao tempo t no sentido contrário do fluxo a jusante da captação(m)

4.3.3 Métodos Hidrogeológicos

A aplicação de métodos hidrogeológicos na área em estudo pode permitir, mediante a realização de uma cartografia hidrogeológica detalhada: a análise da piezometria, a determinação do balanço hidrogeológico, identificar variações litológicas, trocas de permeabilidade, divisórias de águas subterrâneas, influência dos rios e outros factores que tornam possível localizar com precisão os diferentes limites do fluxo, definindo com base neste, o perímetro de protecção.

O principal inconveniente que apresenta é a necessidade de contar com técnicos especializados, o que pode daí resultar custos elevados. Se não existir uma cartografia hidrogeológica prévia é necessário recorrer ao apoio de técnicas geofísicas, efectuar campanhas piezométricas, etc.

A delimitação de perímetros de protecção empregando exclusivamente métodos hidrogeológicos baseia-se na análise dos limites do aquífero captado, cartografia

hidrogeológica em redor das captações, análise das isopiezas e direcções de fluxo, relação entre o aquífero e rios ou lagos que o circundam, zonas de emergência da água subterrânea, entre outros factores.

A aplicação de métodos hidrogeológicos, exclusivamente, delimita a área de alimentação de cada captação, não permitindo a sua subdivisão em diferentes zonas, como é possível com o emprego de métodos que consideram o tempo de transporte. (Navarrete, 2002).

No entanto, a análise hidrogeológica detalhada do aquífero captado é imprescindível para a obtenção de diversos parâmetros necessários no uso de outros métodos para definir os seus perímetros de protecção.

4.3.4 Métodos Numéricos

Os modelos numéricos são matematicamente mais complexos que os anteriores permitindo solucionar problemas também mais complexos. Neste caso, é estabelecida uma malha sobre o sistema de água subterrânea a estudar, a cujos nós é atribuído um conjunto de valores de parâmetros (e.g. nível freático ou piezométrico, condutividade hidráulica, espessura do aquífero). A malha constitui a base de uma matriz de equações a resolver. O programa permite a previsão das alterações que surgem ao longo do tempo, com base nas soluções desse sistema de equações. A utilização destes modelos justifica-se apenas nos casos em que existe informação suficiente para suportar as necessidades de dados do programa. Quando é necessário estimar grandes quantidades de parâmetros, os modelos analíticos fornecem o mesmo nível de precisão.

Os modelos numéricos fornecem um elevado grau de exactidão, podendo ser aplicados a uma grande variedade de situações hidrogeológicas. Permitem considerar condições de fronteira complexas e variações nas propriedades hidráulicas, que eventualmente ocorrem no seio do aquífero. Os modelos de fluxo são utilizados, por exemplo, para calcular mudanças na distribuição do nível freático ou piezométrico, nos rebaixamentos, na direcção de fluxo, etc.

É necessário formular hipóteses caracterizadoras do aquífero modelado e, de acordo com essas hipóteses e com os objectivos que se pretendem atingir, seleccionar o modelo

matemático a utilizar. Nesta etapa do estudo é importante conhecer a qualidade e o tipo de dados disponíveis, uma vez que não faz qualquer sentido utilizar modelos muito complexos, quando se dispõe apenas de dados fiáveis para um número reduzido de células. Em função dos dados disponíveis, deve ser seleccionado o período que será utilizado como referência (ITGE, 1991).

4.3.5 Método de Rehse / Bolsenkotter (Poder Auto-Depurador do Terreno)

Este método empírico proposto por Rehse para meios porosos e posteriormente modificado por Bolsenkotter para meios cárscicos e fracturados, calcula o poder depurador do solo sobre os efluentes contaminantes pelos quais são atravessados. Para isso, considera a circulação do contaminante em duas componentes diferenciadas: uma vertical, ao atravessar a zona saturada, e outra horizontal, até ao ponto de extracção da água, circulando na zona saturada do aquífero. Assim, em função da velocidade, tipo de materiais e espessura atravessada, quantifica o nível de depuração sofrida pelo contaminante.

Atendendo à Figura 4.4, podem definir-se as seguintes variáveis:

$$I_r = \frac{1}{H} \quad \text{e} \quad I_a = \frac{1}{L}$$

onde:

I_r = Índice de depuração na zona não saturada (Quadro 4.2);

H = Espessura vertical na zona não saturada (m);

I_a = Índice de depuração na zona não saturada (Quadro 4.3);

L = Distância atravessada pelo contaminante ao longo da zona saturada (m)

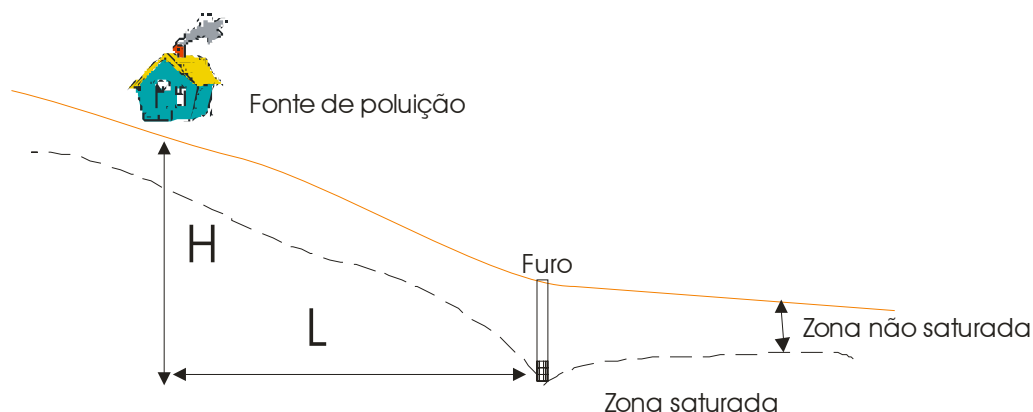


Figura 4.4 - Zona considerada no método Rehse/Bolsenkotter (adaptada de ITGE, 1991)

O poder auto-depurador do terreno é dado por:

$$M_x = M_a + M_r$$

onde:

M_x = poder auto-depurador sobre a totalidade do transporte;

M_a = poder auto-depurador no trajecto vertical;

M_r = poder auto-depurador no trajecto horizontal;

Quando $M_x \geq 1$ a depuração é completa

Depuração na zona saturada

Para o trajecto vertical, se a zona não saturada for constituída por n materiais deferentes:

$$M_r = \sum_{i=1}^n H_i I_{r_i}$$

Onde: H_i representa as espessuras das diversas camadas e I_{r_i} o índice de depuração desses materiais.

Quando $M_r \geq 1$ a depuração na zona saturada é completa, não sendo necessário determinar a

zona de protecção imediata, se $M_r < 1$, então a depuração na zona não saturada não está completa, e a água contaminada alcança a zona saturada (Rehse, V, 1977, *in* ITGE, 1991).

Quadro 4.2– Poder depurador da zona não saturada (adaptado de ITGE, 1991)

M	MATERIAL	H(m)	$I_r = 1/H$
1	Húmus, 5-10% húmus, 5-10% argila	1,2	0,8
2	Argila sem fissuras de dissecação, silte argiloso, areia muito argilosa	2	0,5
3	Silte argiloso, silte	2,5	0,4
4	Silte, areia pouco siltosa, areia silosa	3 – 4,5	0,33-0,22
5	Areia fina a média	6	0,17
6	Areia média a grosseira	10	0,1
7	Areia grosseira	15	0,07
8	Cascalheira com abundante matriz arenosa e silto-arenosa	8	0,13
9	Cascalheira com abundante matriz argilosa e escassamente siltosa	12	0,08
10	Cascalheira fina a média rica em areia	25	0,04
11	Cascalheira média a grosseira com pouca areia	35	0,03
12	Seixos	50	0,02

Zona saturada

Vimos anteriormente, que se $M_x = 1$, ocorre uma depuração completa antes da água atingir a captação, então o poder depurador da zona saturada é:

$$M_a = 1 - M_r$$

A distância L necessária para que ocorra uma depuração total é dada por $L = \frac{M_a}{I_a}$, sendo L o limite da zona de protecção imediata (ITGE, 1991).

No caso de não existir zona não saturada, a depuração total deverá ocorrer na zona saturada com, $M_a = 1$ e $L = \frac{1}{I_a}$.

Quadro 4.3- Poder depurador da zona saturada (ITGE, 1991)

M	MATERIAL	L (m)	$I_a = 1/L$
9	Cascalheira com abundante matriz argilosa e escassamente siltosa	a) 100	0,01
		b) 150	0,007
		c) 170	0,006
		d) 200	0,005
10	Cascalheira fina a média rica em areia	a) 150	0,07
		b) 200	0,005
		c) 220	0,0045
		d) 250	0,004
11	Cascalheira média a grosseira com pouca areia	a) 200	0,05
		b) 250	0,004
		c) 270	0,0037
		d) 300	0,0033
12	Cascalheira e seixos	a) 300	0,0033
		b) 340	0,0029
		c) 360	0,0058
		d) 400	0,0025

L = distância horizontal necessária para a depuração

I_a = índice de depuração da zona saturada

c) velocidade eficaz entre 20 e 350m/d

d) velocidade eficaz > 50 m/d

Para os meios cárnicos e/ou fracturados o poder depurador é inferior aos meios porosos, sendo necessário uma maior distância para que ocorra a depuração total. Para estes casos Bolsenkotter (ITGE, 1991) calculou novos índices que estão representados no Quadro 4.4,

verificando-se que $I_r = \frac{0,5}{H}$.

Quadro 4.4 - Poder depurador das rochas carbonatadas e fracturadas (ITGE, 1991)

M	MATERIAL	H(m)	$I_r = 1/H$
1	Marga	10	0,05
2	Arenito com intercalações argilosas, argila, micaxisto, filito	20	0,025
3	Basalto e rochas vulcânicas	30	0,017
4	Grauvaque, arcose, arenito argiloso, arenito siltoso	50	0,01
5	Granito, granodiorito, diorito, sienito	70	0,007
6	Quartzitos, arenitos com sílex	100	0,005
7	calcário	200	0,0025

4.3.6 Traçadores

Os traçadores são ferramentas fundamentais para determinar a velocidade e trajectória de dispersão dos contaminantes na água. Estes dados são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de protecção de captações e podem ser importantes para a calibração de modelos de fluxo e movimento dos contaminantes. Em termos económicos, trata-se de um método rentável e muitas vezes o único apto para a obtenção dos dados necessários para planificar as zonas dos perímetros de protecção de água subterrânea (Navarrete *et al*, 2003).

Este método é de grande importância quando se trata de zonas de protecção especial a definir em aquíferos cársicos e fracturados. Muitas vezes a utilização de traçadores permite concluir que algumas das zonas definidas com base noutros métodos não afectam a captação a proteger, ou que determinadas fontes contaminantes não chegam à captação.

Este método consiste na introdução de uma substância (traçador) no sistema hídrico de forma a poder ser identificada e reconhecida noutro lugar. Estas substâncias para serem eficazes deveriam:

- Estar ausente nas águas naturais ou em baixas concentrações;
- Ter alta sensibilidade analítica, principalmente quantitativa;
- Ser inócuas para o homem, animais e plantas;
- Ser facilmente solúveis em água e com boas propriedades de dispersão;
- Ser resistentes a ataques químicos, biológicos ou físicos, estáveis durante as reacções de oxidação, redução, ácidas e básicas no meio, assim como não degradáveis e resistentes à luz e temperatura;
- Não interagir com o meio, isto é, não apresentar propriedades de absorção e troca iónica;
- Ser económica no que se refere à compra, manejo e análise.

Não existe traçador ideal, na maior parte são algo reactivos com o solo, a rocha e a água e podem sofrer reacções de absorção e troca iónica igual à dos contaminantes. Todas as

substâncias têm vantagens e desvantagens como traçadores.

Como exemplos de traçadores artificiais podem ter-se entre outros (Kâss 1988 *in* Cruz.F.F, 2000):

Tintas: são visíveis ou mensuráveis quando diluídos, incluem os traçadores colorantes fluorescentes (e.g. uranina, rodamina B), que constituem o grupo mais importante de traçadores;

Sais: como por exemplo, cloreto de sódio, cloreto de potássio, etc, é importante ter em conta a concentração inicial destes traçadores na água, assim como, determinar as eventuais interacções com o aquífero ou com matéria orgânica;

Isótopos radioactivos: substâncias radioactivas intencionalmente injectáveis no meio hídrico e detectáveis através da medição da radioactividade (e.g. ^3H , ^{51}Cr , ^{82}Br , ^{58}Co , ^{60}Co , etc);

Bactérias e vírus: constituem uma grande ajuda na definição dos limites da segunda zona de protecção em torno das captações de água subterrânea para consumo humano. No espaço de 50 dias verifica-se uma elevada taxa de mortalidade dos microrganismos, sobrevivendo apenas germes isolados. Por outro lado, também se verifica que durante 50 dias de fluxo no aquífero, é retida uma grande quantidade de microrganismos (Kâss 1988 *in* Cruz F.F., 2000).

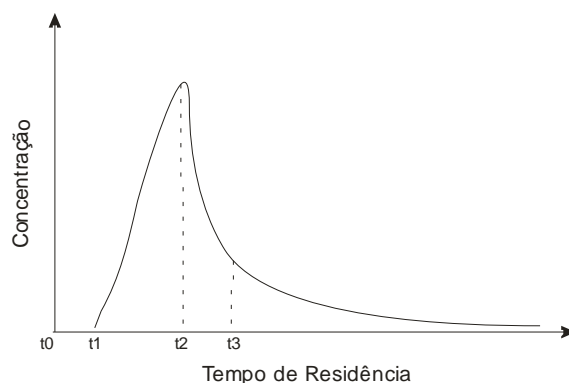


Figura 4.5 – Curva de concentração do traçador versus tempo de residência (adaptada de Kâss, 1998 *in* Cruz F.F., 2000).

Na interpretação dos ensaios com traçadores, deve recorrer-se a curvas de concentração versus tempo de chegada dos traçadores em cada ponto de amostragem (Figura 4.5).

4.4 Aplicação dos Perímetros de Protecção

Depois de dimensionado o perímetro de protecção, torna-se necessário proceder à sua implementação no terreno, o que implica um custo que está não só relacionado com certos aspectos técnicos, nomeadamente obras, instalações da captação, vedação da zona imediata e instalação do sistema automático de controlo, mas também com as possíveis restrições impostas a determinadas actividades antropogénicas em cada uma das zonas de protecção definidas (Moinante, 2003).

Se por um lado, as zonas de protecção tenham como finalidade assegurar a protecção óptima da captação, por outro lado, não devem ter extensões excessivas, difíceis de aplicar face aos custos associados. Para que seja alcançada uma melhor relação custo-eficácia, as interdições e regulamentações devem ser credíveis, justificadas tecnicamente e limitadas às actividades directamente relacionadas com o risco de poluição.

No caso de Portugal as restrições e condicionamentos impostos pela legislação poderão dar lugar a indemnizações, uma vez que os proprietários dos terrenos incluídos nas zonas de protecção imediata ou especial, tem o direito de requerer a sua expropriação.

Os encargos relacionados com as indemnizações terão que ser suportados pelas entidades responsáveis pelas captações de água subterrânea, isto no caso das captações posteriores à entrada em vigor do Decreto-Lei 382/99. Nos outros casos as indemnizações ficam a cargo do ministério do Ambiente no caso das captações autorizadas, e das entidades responsáveis no caso das captações não autorizadas.

B i b l i o g r a f i a

Aller, L., Bennet, J.H., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G. (1987) – DRASTIC, A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potencial Using Hidrogeologic Settings. United States Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, EPA 600/2-85/018.

Auge, M. (2004) - Hidrogeología Ambiental: 1-131. Serie Contribuciones Técnicas. Ordenamiento Territorial , 5. ISSN 0328-9052. SEGEMAR. Buenos Aires.

Azevedo, J.M. (2001) – Textos de Apoio, Departamento de Ciências da Terra, FCTUC,Coimbra, 1º e 2º Vol.

Costa Filho, W.D. (1995) – Noções Sobre Projecto Construtivo de Poços Tubulares Apostila do Curso – SRH/UFC. Fortaleza, Ceará.

Cruz, F.F. (2000) - Dispersão de Contaminantes em Meios Fracturados – Ensaio Experimentais com Traçadores, Tese de Mestrado, Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil – FCTUC.

Custódio, E. & Llamas, M.R. (1983) - Hidrologia Subterrânea. 2ªEdição. Tomo II. Seção 17.

DEQ e OHD (1996) – Oregon Welhead Protection Program, Guidance Manual. Department of Environmental Quality and Oregon Health Division.

Doerfliger & Zwahlen (1997) – "EPIK- A new method for outlining of protection areas in karstic environment" in Gunnay G, Jonshon AI (eds) – international Symposium and Field seminar on karst waters and environmental impacts, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam.

EPA (1987) – Guidelines for Delineation of Welhead Protection Areas. United States Environmental Protection Agency, Office of Grounwater Protection, Washington D.C. 20460, PB88-111430.

EPA (1991) – Delineation of Welhead Protection Areas in Fractured Rocks. United States

Environmental Protection Agency, Office of Water Protection (WH-550G) EPA570/9-91.

EPA (1994) – Ground Water and Wellhead Protection: Handbook. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Water, EPA 813-K-95-001.

Fernandes A.J (2003) - "The Influence of cenozoic tectonics on the groundwater production capacity and vulnerability of fractured rocks: a case study in Sao Paulo, Brazil" in Krazny, Hrkal & Bruthans (eds) Groundwater in Fractured Rocks 61-62 Prague, Czech Republic.

Foster, S.S.D. (1987) – Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy, in W. van Duijvanbooden and H.G Waegeningh (eds), Vulnerability of Soil and Grandwater to Pollution, Proceedings and information No 38 of the International Conference held in the Neterland.

Foster, S., Garduño,H., Kemper,K., Tuinhof,A., Nanni, M., Dumars, C., (2003) - Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial.

Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1987) – Groundwater, Prentice Hall, Inc.

IGM (2001) – Água Subterrânea – Conhecer para Proteger e Preserva, Publicação sobre o Projecto P- IV-1052 do Programa Ciência Viva, Lisboa.

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

INAG (2005) - Relatório síntese sobre a caracterização das regiões hidrográficas prevista na Directiva Quadro da Água. Ministério do Ambiente, Lisboa, Instituto da Água.

INAG (2007) – "Relatório do Estado do Abastecimento de Água e da Drenagem e Tratamento de Águas Residuais. Sistemas Públicos Urbanos. Campanha INSAAR 2005". Instituto da Água.

ITGE (1991) – Guia Metodológico para la Elaboration de Perímetros de Proteccion de

Captaciones de Águas Subterráneas. Madrid, Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Käss, W. (1998) – Tracing Thecnique in Geohydrology. A.A.Balkema / Rotterdam / Brookfield, ISBN 90 5410 444 0.

Moinante, M. J. (2003) – Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Águas Subterráneas. Estudo Comparativo Utilizando Métodos Analíticos e Numéricos. Teses de Mestrado do LNEC. Lisboa.

Navarrete, C.M., García, A.G. (2003) – Instituto Geológico y Minero de España, IGME. “ Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio”, ISBN 84-7840-496-1.

Oliveira, M.M., Moinante, M.J., Lobo-Ferreira, J.P. (1997) – "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC". Relatório Final. Lisboa, LNEC, Relatório 60/97-GIAS.

Planeta Terra (2007) – “Água Subterrânea – Reservatório para um Planeta com Sede” Edição Portuguesa, Lisboa

Quitério Costa, J. (1998) - Moralização na Execução de Furos de Pesquisa e Eventual Captação de Água Subterrânea e Métodos de Perfuração Utilizados na sua Realização. Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 4º Congresso da Água.

Ribeiro, L. (2005) – "Um Novo Índice de Vulnerabilidade Especifico de Aquíferos a Contaminação: Formulação e Aplicações", *in* Actas do 7º SILUSBA, APRH, Évora.

UOP Johnson Division,USA (1989) – Groundwater and Wells, 1989 – 2ª Ed. – Saint Paulo, Minnesota, USA.

Wallin, R. (1997) – Welhead Protection: a Guide for Arizona Communities. Arizona Department of Environmental Quality, Water Quality Division.



