



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

ENGENHARIA

**MODELAÇÃO DO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO DO  
SECTOR DO RIBEIRO FRIO DO SISTEMA AQUÍFERO  
DA ÁGUA FONTE DA FRAGA**

**Francisco Costa Brito**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil - Geotecnia e Ambiente**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luis Manuel Ferreira Gomes

**Covilhã, Junho de 2011**



*à memória de meu Irmão*



# Agradecimentos

Quero expressar aqui o meu mais sincero agradecimento a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Ferreira Gomes, que de entre todas as formas possíveis de partilhar o seu vasto conhecimento, escolheu aquela em que também se partilha a Amizade e o Companheirismo.

Ao Professor Eric Mendes pela introdução ao *FEFLOW* e aos Senhores Pedro Matias e José Manuel Mendes pela maneira simpática e disponível com que me guiaram na visita à unidade de engarrafamento da Beira Vicente e à zona das captações do Sector do Ribeiro Frio do sistema aquífero da *Água Fonte da Fraga*.

À Ana, além do exemplo académico que é, conseguiu sempre ser um estímulo constante.

À Família e aos Amigos, a quem devo tudo o que algum dia poderei vir a ser, pela forma paciente e alegre como esperaram por este momento, mas sobretudo por me mostrarem, com o seu exemplo, que as curvas da vida se enfrentam de pé.



# Resumo

Os recursos hídricos subterrâneos assumem-se como um dos bens mais preciosos que a Sociedade tem. No sentido de os identificar, caracterizar e programar uma adequada exploração, é necessário conhecer com o maior rigor possível os sistemas aquíferos em que ocorrem. De maior exigência, que as águas subterrâneas comuns, são as águas de engarrafamento, sendo a *Água Fonte da Fraga* e em particular a explorada no Sector do Ribeiro Frio, um recurso que é captado, engarrafado e distribuído todos os dias para a mesa dos consumidores. Assim, é de todo o interesse, não só em termos de necessidades humanas, como inclusive em termos de saúde pública, conhecer com o máximo rigor o Sistema aquífero do Sector do Ribeiro Frio, em estudo na presente dissertação, de modo a garantir a exploração e a qualidade da água. Neste sentido desenvolve-se a presente dissertação, com o objectivo principal de modelar o escoamento subterrâneo da zona em estudo, com base no software *FEFLOW*, de modo a tirar partido do conhecimento a adquirir, para optimização da exploração do recurso, como também para certificar os sistemas de protecção e criar ainda mecanismos de defesa contra potenciais contaminações do recurso.

Assim, este trabalho organiza-se em cinco capítulos. O primeiro apresenta o enquadramento do tema, os objectivos, a metodologia seguida e ainda algumas referências a estudos anteriores. O segundo capítulo, apresenta alguns aspectos e conceitos básicos sobre a Hidrogeologia, em particular vários métodos de definição de perímetros de protecção, dada a importância que se lhes atribui como mecanismos de defesa preventiva da qualidade da água. No terceiro capítulo, faz-se a caracterização da zona de trabalho nas várias vertentes necessárias à modelação, ocorrendo ainda a particularidade de no desenvolvimento do estudo se definir a localização de uma nova captação e respectivo perímetro de protecção. No quarto capítulo, explanam-se com detalhe as várias fases seguidas na modelação, desenvolvem-se as simulações finais com destaque para a distribuição das linhas de fluxo, evolução de plumas de contaminantes e a optimização de furos de protecção. Por fim, no quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões e propõem-se alguns caminhos a seguir, no sentido de melhorar o conhecimento do sistema aquífero do Sector do Ribeiro Frio.

## Palavras-chave

água subterrânea, modelação, Serra da Gardunha, Fonte da Fraga.



# Abstract

The groundwater resources assume themselves has being one of the most precious gifts society processes. Therefore, to identify, categorize and explore them, in the best possible way, it is essential to acknowledge rigorously the aquifer system where they appear. With larger demand than common groundwater, bottled water, such as *Fonte da Fraga*, in particular the fraction explored in the Ribeiro Frio Sector, is a resource captured, bottled and distributed, on a daily basis, to all consumers. It is, therefore, of their best interest to promote the water exploration in its best possible quality and improve the knowledge of this hydrogeologic system. This research intended to evaluate this subject, with its main objective being the modulation of the groundwater flow of the field in study, using the *FEFLOW* numerical model. It was also intended to instigate the protection system and to develop possible defence mechanisms to prevent against potential contaminating agents.

This work is organized in 5 chapters. The first chapter presents the introduction to the theme, the objectives, the methodology used and revision of the state-of-art. The second chapter explains the hydrogeological aspects, in particular the different methods used for the definition of the wells protection zones, due to their influence in the water quality protection. The third chapter characterizes the area of study in all different ways, required for modelling processes. It has also been defined the location of a new well and its protection perimeter. The fourth chapter consists in a methodical explanation of the modulation system, the simulations involved, with especial connotation for the flux lines, evolution of the plumes of contaminants and optimization of the protection wells. The last chapter resumes all the conclusions and final considerations that, in the author's point of view, could lead to the improvement of all the aspects related to the groundwater system of the Ribeiro Frio Sector.

## Keywords

groundwater, modulation, Gardunha Mountains, Fonte da Fraga.



# Índice de texto

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento do Tema	1
1.2	Instrumentos Legais/Legislativos	2
1.3	Objectivos	4
1.4	Metodologia e Estrutura da Dissertação	4
1.5	Estudos Anteriores	5
<b>2</b>	<b>ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</b>	<b>10</b>
2.1	Aspectos Hidrogeológicos	12
2.1.1	Zona não saturada	13
2.1.2	Zona saturada	14
2.2	Classificação dos Aquíferos Quanto à Porosidade	15
2.2.1	Aquífero intersticial ou poroso	15
2.2.2	Aquífero fissural ou fracturado	17
2.2.3	Aquífero cárstico	19
2.3	Classificação dos Aquíferos Quanto à Pressão do seu Recurso.	20
2.3.1	Aquífero livre ou freático	20
2.3.2	Aquífero confinado ou artesiano	20
2.3.3	Aquífero semi-confinado	22
2.4	Áreas de Reabastecimento e Descarga do Aquífero	22
2.5	Função dos Aquíferos	23
2.6	Parâmetros Hidrogeológicos Fundamentais	24
2.6.1	Porosidade	24
2.6.2	Condutividade hidráulica	25
2.6.3	Transmissividade	28
2.6.4	Coefficiente de armazenamento	28
2.7	Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas	29
2.7.1	Índice de vulnerabilidade <i>AVI</i>	29
2.7.2	Índice de vulnerabilidade <i>GOD</i>	30
2.7.3	Metodologia <i>EPPNA</i>	30
2.7.4	Índice de vulnerabilidade <i>DRASTIC</i>	31
2.8	Capacidade Depurativa	32
2.9	Modelação Geohidráulica	34
2.10	Causas Mais Comuns para a Deterioração da Qualidade da Águas Subterrâneas	39
2.11	Perdurabilidade da Contaminação em Águas Subterrâneas	42
2.11.1	Perdurabilidade da contaminação microbiológica	42
2.11.2	Perdurabilidade da contaminação química	47
2.12	Perímetros de Protecção	49
2.13	Métodos para a Definição de Perímetros de Protecção de Captações de Água Subterrânea	50
2.13.1	Método do Raio Fixo	52

2.13.2	Método de Wyssling	53
2.13.3	Método de Jacobs e Bear	54
2.13.4	Método de solução analítica simples para aproximação de isócronas que definem zonas de transporte	56
2.13.5	Método de Krijgsman e Lobo Ferreira	57
2.13.6	Método de Hoffman y Lillich	60
2.13.7	Método de Mendes	61
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO - SECTOR DO RIBEIRO FRIO</b>	<b>65</b>
3.1	Enquadramento Geográfico e Geomorfológico	65
3.2	Aspectos Geológicos	69
3.3	Aspectos Hidrogeoambientais	73
3.3.1	Precipitação	75
3.3.2	Temperatura	77
3.3.3	Evapotranspiração	77
3.4	Balanço Hidrológico e Reservas	79
3.5	Unidades Hidrogeológicas	85
3.6	Pontos de Água	86
3.6.1	Captação RF <sub>1</sub>	86
3.6.2	Captação RF <sub>4</sub>	88
3.6.3	Proposta de nova captação - RF <sub>FB</sub>	90
3.7	Vulnerabilidade	90
3.8	Perímetros de Protecção	91
3.8.1	Perímetros de Protecção das captações existentes.	91
3.8.2	Perímetro de Protecção da captação em proposta (RF <sub>FB</sub> )	93
3.9	Características do Recurso	98
3.10	Outros Aspectos Característicos	100
<b>4</b>	<b>MODELAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO</b>	<b>102</b>
4.1	Introdução	102
4.2	Modelação da Área em estudo com Recurso ao <i>FEFLOW</i>	102
4.2.1	Introdução	102
4.2.2	Modelação da área em estudo	103
4.2.2.1	Dados gerais e geometria	104
4.2.2.2	Descrição das condições iniciais	105
4.2.2.3	Descrição das condições de fronteira para o modelo de escoamento	106
4.2.2.4	Parâmetros hidráulicos dos materiais	107
4.2.2.5	Definição das condições de fronteira para o transporte de massa	107
4.2.2.6	Parâmetros físicos dos materiais para o transporte de massa	108
4.2.2.7	Calibração do modelo	109
4.2.2.8	Simulações finais	109
4.3	Resultados e Interpretações	111
4.3.1	Distribuição das linhas de fluxo	111
4.3.2	Desenvolvimento da pluma de contaminante	113
4.3.3	Furos de protecção	115

<b>5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>116</b>
5.1 Conclusões	116
5.2 Perspectivas Futuras	119
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>128</b>



# Índice de Figuras

Figura 2.1	Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico (a partir de USGS, 2011)	10
Figura 2.2	Esquema hidrogeológico que mostra que as fronteiras políticas podem atravessar os sistemas de água subterrânea (adaptado de UNESCO, 2005)	12
Figura 2.3	Esquema de princípio sobre a Zona saturada e Zona não saturada do subsolo	14
Figura 2.4	Aquífero Intersticial ou Poroso	16
Figura 2.5	Esquema de representação da área de alimentação e de zona de chamada de uma captação em meio poroso (adaptado de IGME, 2003)	16
Figura 2.6	Esboço representativo de um sistema aquífero fracturado	17
Figura 2.7	Exemplo da aplicação do método de Jacobs e Bear (adaptado de IGME, 2003)	18
Figura 2.8	Esquema representativo da circulação da água subterrânea em meio cársico	19
Figura 2.9	Esquema sobre diferentes tipos de aquíferos (adaptado de Lopéz Geta et al., 2009)	21
Figura 2.10	Diferentes posições dos níveis de água consoante o tipo de aquífero (Moinante, 2003)	21
Figura 2.11	Corte evidenciando a recarga da água subterrânea em profundidade para depois ressurgir junto às Termas de Longroiva (Mêda), no contacto Granito-Xistos (Ferreira Gomes, 2011)	23
Figura 2.12	Esquema do dispositivo utilizado por Henry Darcy para avaliação de k (EGEO, 2010b)	27
Figura 2.13	Distâncias consideradas na aplicação do método de Rehse (adaptado de Moinante, 2003)	32
Figura 2.14	Modelo geohidráulico conceptual sobre uma região em que a água subterrânea alimenta o Rio Douro (Adaptado de IGME, 2003)	35
Figura 2.15	Principais aspectos a considerar na aplicação de um modelo matemático a sistemas de águas subterrâneas (IGME, 2003)	36
Figura 2.16	Malha de elementos finitos com elementos triangulares (adaptado de Wendland, 2003).	39
Figura 2.17	Processos mais comuns envolvidos na contaminação de água subterrânea (adaptado de Foster et al., 2002)	40
Figura 2.18	Exemplos de desenvolvimento do fluxo de contaminação. Diversos tipos de agentes contaminantes (adaptado de Foster et al., 2002)	42
Figura 2.19	Representação da contaminação de um aquífero por parte de fossas sépticas ou redes de esgotos (adaptado de López-Geta et al., 2002)	43
Figura 2.20	Imagem figurativa do avanço da pluma de contaminante na zona saturada, a partir de lixiviados procedentes de um depósito de resíduos sólidos urbanos. Linhas de igual valor de contaminação (adaptado de López-Geta et al., 2002)	43
Figura 2.21	Distâncias percorridas por bactérias em meio saturado (adaptado de IGME, 2003)	47
Figura 2.22	Esquema representativo da contaminação de uma captação de água subterrânea devido à fuga de carburante de um depósito de hidrocarbonetos. Processos envolvidos na sua degradação (adaptado de Lopéz-Geta et al., 2009)	48
Figura 2.23	Aplicação de pesticidas em extensas áreas agrícolas (GF, 2011)	49
Figura 2.24	Método do raio fixo calculado com o Decreto-Lei nº 382/99 (DL,1999) (adaptado de IGME, 2003)	52
Figura 2.25	Esquema representativo do Método de Wyssling para a definição do perímetro de protecção de uma captação de água subterrânea (adaptado de IGME, 2003)	54
Figura 2.26	Elementos para aplicação do método de Jacobs e Bear na optimização de perímetros de protecção (adaptado de IGME,2003)	54
Figura 2.27	Exemplo da aplicação do método de Jacobs e Bear (adaptado de IGME, 2003)	56

Figura 2.28	Forma da zona de protecção intermédia em situações extremas de gradiente hidráulico segundo o método de Krijgsman e Lobo Ferreira (2001, in Moinante, 2003)	58
Figura 2.29	Arredondamento do limite montante da elipse (Krijgsman e Lobo Ferreira, 2001 in Moinante, 2003)	59
Figura 2.30	Elementos de apoio para aplicação do método de Hoffman e Lillich (IGME, 2003)	61
Figura 2.31	Esboço exemplificativo da aplicação da metodologia proposta para a delimitação da zona de protecção imediata onde é evidenciada uma estrutura geológica (falha F1) num terreno de baixa vulnerabilidade à poluição (Mendes, 2006)	62
Figura 2.32	Esboço exemplificativo da aplicação da metodologia proposta para a delimitação da zona de protecção intermédia onde são evidenciadas duas estruturas geológicas (falhas F1 e F2) (Mendes 2006)	63
Figura 2.33	Esboço exemplificativo da aplicação da metodologia proposta para a delimitação da zona de protecção alargada onde são evidenciadas duas estruturas geológicas (falhas F1 e F2) (Mendes, 2006)	64
Figura 3.1	Enquadramento do sector estudado nas unidades morfoestruturais da Península Ibérica (adaptado de Ribeiro et al., 1979)	65
Figura 3.2	Enquadramento geográfico da zona em estudo - Sector Ribeiro Frio - do sistema aquífero da Água Fonte da Fraga (a partir de IGEO, 2011)	66
Figura 3.3	Representação da área a estudar na folha n. 256 da Carta de Portugal do Instituto Geográfico e Cadastral	67
Figura 3.4	Vista parcial sobre o Sector do Ribeiro Frio	68
Figura 3.5	Diferentes perspectivas da área de estudo	68
Figura 3.6	Sub-Bacia Hidrográfica em estudo com classificação dos cursos de água segundo Strahler, e localização das captações principais (RF <sub>1</sub> e RF <sub>4</sub> ) do Sector do Ribeiro Frio	69
Figura 3.7	Panorama a jusante da área de estudo com a Serra da Estrela em plano de fundo	69
Figura 3.8	Enquadramento da zona em estudo no excerto da Carta Geológica de Portugal (SGP,1992)	71
Figura 3.9	Mapa geológico da região da Serra da Gardunha onde se insere a área estudada (adaptado de Mendes, 2010)	72
Figura 3.10	Aspectos litológicos da área em estudo - Sector do Ribeiro Frio (a partir de UBI, 2010)	73
Figura 3.11	Sector do Ribeiro Frio enquadrado na classificação climática de Portugal Continental (adaptado de IM, 2010)	74
Figura 3.12	Enquadramento climático da zona de estudo no panorama Nacional (adaptado de IM, 2010)	75
Figura 3.13	Valores precipitação total mensal para o ano civil de 2010 (adaptado de IM, 2010)	76
Figura 3.14	Valores médios da temperatura média do ar para o ano civil de 2010 (adaptado de IM, 2010)	78
Figura 3.15	Valores da evapotranspiração real para o território continental (APA, 2007)	79
Figura 3.16	Resultados do balanço hidrológico sequencial mensal, para a zona em estudo (UBI, 2008)	84
Figura 3.17	Unidades Hidrogeológicas do sector do Ribeiro Frio, do sistema aquífero da Água Fonte da Fraga	86
Figura 3.18	Corte esquemático do furo RF <sub>1</sub> (UBI,2008)	87
Figura 3.19	Resultados dos ensaios de caudal da captação RF <sub>1</sub> . Com um resultado de 1,4 l/s como caudal admissível máximo (UBI, 2008)	88
Figura 3.20	Esquema em planta do sistema de captação RF <sub>4</sub> a partir de uma nascente (UBI,2008)	89
Figura 3.21	Resultados da monitorização dos caudais da captação RF <sub>4</sub> . Medições semanais ao longo de 2007 a 2009. (UBI, 2010)	89
Figura 3.22	Perímetro de protecção comum às captações RF <sub>1</sub> e RF <sub>4</sub> do Sector do Ribeiro	92

Frio do Sistema Aquífero da Água Fonte da Fraga (adaptado de UBI, 2010)

Figura 3.23	Esquema sobre os elementos principais da aplicação do método de Mendes (2006) na definição do perímetro de protecção da captação RF <sub>FB</sub>	93
Figura 3.24	Esquema da definição da zona de protecção imediata da captação RF <sub>FB</sub> em proposta	94
Figura 3.25	Perímetro de protecção da captação de água subterrânea RF <sub>FB</sub> em proposta, admitindo a direcção do fluxo S-N	95
Figura 3.26	Posições de áreas de escoamento de água subterrânea complementares (a2 e a3) à área considerada principal (a1) que abastecem a captação RF <sub>FB</sub>	96
Figura 3.27	Perímetro de protecção da captação RF <sub>FB</sub> em proposta resultante da consideração das principais áreas de recarga das várias sub-bacias a montante, no Sector do Ribeiro Frio das Águas Fonte da Fraga	97
Figura 3.28	Proposta de perímetro de protecção comum às captações RF <sub>1</sub> , RF <sub>4</sub> legalizadas e RF <sub>FB</sub> (em proposta) para o Sector do Ribeiro Frio das Águas Fonte da Fraga	98
Figura 3.29	Resultados das principais de análises físico-químicas de RF <sub>1</sub> e RF <sub>4</sub> em diagrama de Piper e comparação com os resultados das captações do Sector do Couto (vertente sul da Serra da Gardunha) do Sistema Aquífero da Água Fonte da Fraga (UBI, 2010)	99
Figura 3.30	Imagens sobre a vegetação presente no sector do Ribeiro Frio	100
Figura 3.31	Enquadramento da zona de estudo em relação aos principais parâmetros de águas subterrâneas e características associadas (adaptado de APA, 2007)	101
Figura 4.1	Malha de elementos finitos para o modelo 2D de escoamento subterrâneo do Sector do Ribeiro Frio do sistema aquífero das águas Fonte da Fraga	105
Figura 4.2	Distribuição da profundidade dos níveis hidroestáticos na sub-bacia em estudo obtida com a interpolação “Akima <i>inter/extrapolation</i> ” dos valores conhecidos, usando o software <i>FEFLOW</i>	106
Figura 4.3	Condições de fronteira de fluxo, definidas para o modelo de escoamento subterrâneo em estudo	107
Figura 4.4	Condições de fronteira de transporte de massa, definidas para o modelo de escoamento subterrâneo e localizadas no contorno da zona de protecção intermédia	108
Figura 4.5	Localização das fontes contaminantes (1000 mg/l) no contorno da zona de protecção imediata e nas proximidades da zona de protecção alargada	110
Figura 4.6	Localização dos nós da malha a receber os furos de segurança	111
Figura 4.7	Distribuição das linhas de fluxo na área de estudo, com as captações RF <sub>1</sub> , RF <sub>4</sub> e RF <sub>FB</sub> a extraírem, em simultâneo, um caudal de 121, 71 e 86,4 m <sup>3</sup> /d, respectivamente	112
Figura 4.8	Distribuição das linhas de fluxo, sobre a carta geológica da região, afectas a cada uma das captações RF <sub>1</sub> , RF <sub>4</sub> e RF <sub>FB</sub> a extraírem, em simultâneo, um caudal de 121, 71 e 129 m <sup>3</sup> /d, respectivamente	112
Figura 4.9	Alcance da pluma de contaminação numa simulação com o tempo de trânsito de 1 dia, com uma fonte contaminante de 1000 mg/l na proximidade da zona de protecção imediata	113
Figura 4.10	Alcance da pluma de contaminação numa simulação com o tempo de trânsito de 50 dias, com uma fonte contaminante de 1000 mg/l na proximidade da zona de protecção intermédia	114
Figura 4.11	Alcance da pluma de contaminação numa simulação com o tempo de trânsito de 3500 dias, com uma fonte contaminante de 1000 mg/l na proximidade da zona de protecção alargada	114
Figura 4.12	Distribuição das linhas de fluxo das captações RF <sub>1</sub> , RF <sub>4</sub> e RF <sub>FB</sub> , sem extracção, e de três furos de segurança a extrair um caudal de 70 m <sup>3</sup> /d, cada um	115



# índice de Tabelas

Tabela 2.1	Volume aproximado e percentagem total de água existente no planeta, distribuída pelas diversas formas de armazenamento (UNESCO,1978 in LNEG, 2011).	10
Tabela 2.2	Produção anual dos principais recursos naturais e respectivos valores económicos (UNESCO,2005).	11
Tabela 2.3	Abastecimento populacional com águas subterrâneas (IGME,2003).	11
Tabela 2.4	Principais características dos tipos básicos de aquíferos carbonatados (Moinante,2003).	19
Tabela 2.5	Porosidade e Porosidade efectiva para alguns tipos de Rochas (Lencastre e Franco, 1992).	26
Tabela 2.6	Classificação do maciço de acordo com o valor de k (Lambe e Whitman,1979).	28
Tabela 2.7	Classes de vulnerabilidade de acordo com a metodologia AVI (Moinante, 2003).	30
Tabela 2.8	Classes de vulnerabilidade de acordo com a metodologia EPPNA (Moinante, 2003).	30
Tabela 2.9	Pesos a atribuir a cada parâmetro do DRASTIC (geral e pesticidas) (Moinante, 2003).	31
Tabela 2.10	Poder depurador da zona saturada (Moinante, 2003).	33
Tabela 2.11	Poder depurador da zona não saturada (Moinante, 2003).	33
Tabela 2.12	Poder depurador das rochas carbonatadas e fissuradas (Moinante, 2003).	34
Tabela 2.13	Classificação de alguns problemas afectos às águas subterrâneas (Foster <i>et al.</i> , 2002).	40
Tabela 2.14	Principais contaminantes das águas subterrâneas e respectivas fontes de poluição (adaptado de Foster <i>et al.</i> ,2002).	41
Tabela 2.15	Tempo de regeneração de organismos bacteriológicos para diferentes temperaturas da água subterrânea (IGME, 2003).	45
Tabela 2.16	Instalações e Actividades condicionadas ou interditas em cada uma das zonas de protecção definidas pelo Decreto-Lei 382/99 (DL, 1999a).	51
Tabela 2.17	Descrição do tipo de sistema de aquífero (DL, 1999a).	52
Tabela 2.18	Valores do raio (r), de cada zona de protecção, de uma captação de água subterrânea. Dependentes do tipo de sistema de aquífero (DL, 1999a).	53
Tabela 3.1	Dados das Estações meteorológicas da região em estudo a usar no balanço hidrológico (a partir de Ferreira,1970).	80
Tabela 3.2	Características das estações meteorológicas próximas da região em estudo (a partir de Ferreira, 1970 in UBI, 2008).	80
Tabela 3.3	Evapotranspiração potencial (ETP) a partir do método de Thornthwaite, para a zona em estudo (UBI, 2008).	82
Tabela 3.4	Balanço hidrológico sequencial mensal ( $l/m^2$ ) para a zona em estudo, admitindo-se que $n_u$ se encontra integralmente satisfeito no início do período seco, ou seja, $S_{so} = 100$ mm, em Maio.	83
Tabela 3.5	Elementos estatísticos da evolução do caudal da captação RF4 no Sector do Ribeiro Frio (UBI, 2010).	89
Tabela 3.6	Valores do Índice <i>DRASTIC</i> e respectiva vulnerabilidade das unidades hidrogeológicas das áreas associadas às águas do sistema aquífero da Água Fonte da Fraga no Sector do Ribeiro Frio (UBI, 2010).	91
Tabela 3.7	Coordenadas rectangulares planas, de acordo com o sistema Hayford-Gauss, dos vértices que definem o perímetro de protecção comum às captações RF <sub>1</sub> e RF <sub>4</sub> do Sector do Ribeiro Frio do Sistema Aquífero da Água Fonte da Fraga (UBI,2010).	92
Tabela 4.1	Principais características do modelo numérico de escoamento subterrâneo e transporte de massa do Sector do Ribeiro Frio do sistema aquífero das águas <i>Fonte da Fraga</i> .	104
Tabela 4.2	Parâmetros hidráulicos dos materiais usados na modelação do Sector do Ribeiro Frio.	107



# Simbologia e Acrónimos

## Alfabeto Latino

A - área

b - espessura saturada do aquífero

B - largura da frente de chamada

B' - largura da frente de chamada à altura da captação

C - concentração do componente químico

c - resistência hidráulica

C<sub>0</sub> - concentração de referência

C<sub>BA</sub> - xistos e grauvaques do complexo xisto- grauváquico

c<sup>f</sup>, c<sup>s</sup> - capacidade de calor específica do fluido e do sólido respectivamente

C<sub>0</sub> - concentração inicial de bactérias

C<sub>s</sub> - concentração máxima

Csa - clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente

Csb - clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente

C<sub>t</sub> - concentração de bactérias a um determinado tempo t

C<sub>xm</sub> - corneanas e xistos mosqueados

°C - grau *celsius*

d - dia

D<sub>d</sub> - coeficiente de difusão molecular do fluido

DH - déficit hídrico

D<sub>ij</sub> - tensor da dispersão hidrodinâmica

E - distância correspondente a um tempo de trânsito

e<sub>j</sub> - vector unitário gravitacional

f<sub>0</sub> - viscosidade dinâmica de referência

f<sub>μ</sub> - função da relação de viscosidade constitutiva

g - aceleração gravitacional

G - escoamento subterrâneo

h - nível piezométrico em relação a um nível de referência

H - espessura saturada

h<sub>0</sub> - nível piezométrico em repouso, em relação ao nível de referência

ha - hectare

h<sub>w</sub> - nível dinâmico no furo, em relação ao nível de referência

i - gradiente hidráulico

I - índice de calor anual

I<sub>A</sub> - índice de depuração na zona saturada

$I_R$  - índice de depuração na zona não saturada  
 $k$  - condutividade hidráulica  
 $k_{ij}$  - condutividade hidráulica na zona saturada  
 $K_{ij}$  - tensor da condutividade hidráulica  
 $K_{ij}$  - tensor da permeabilidade  
 $L$  - perda potencial de água  
 $M_A$  - poder depurador na componente horizontal  
 $M_R$  - poder depurador na componente vertical  
 $M_x$  - poder depurador total  
 $n_e$  - porosidade efectiva  
 $n_u$  - capacidade de água utilizável pelas plantas  
 $P$  - precipitação  
 $p^f$  - pressão do fluido  
 $Q$  - caudal extraído  
 $Q_{adm}$  - caudal admissível  
 $Q_{EB}$  - termo da aproximação de boussinesq  
 $q_i^f$  - velocidade de darcy  
 $q_s$  - entradas/saídas de água do sistema  
 $Q_x$  - função de recarga/sumidouro  
 $R$  - escoamento superficiais  
 $R$  - factor de retardamento  
 $r$  - raio  
 $R_d$  - termo derivado do retardamento  
 $r_{max}$  - distância de protecção a montante da captação  
 $r_{min}$  - distância de protecção a jusante  
 $r_p$  - distância de protecção perpendicular à direcção do fluxo  
 $S$  - coeficiente de armazenamento  
 $S_0$  - coeficiente de armazenamento específico  
 $S_0$  - distância a montante da captação  
 $SH$  - superavit hídrico  
 $S_{so}$  - armazenamento de água que fica no solo de capacidade utilizável pelas plantas  
 $S_u$  - distância a jusante da captação  
 $T$  - transmissividade  
 $T_0$  - temperatura de referência  
 $t_R$  - tempo reduzido  
 $T_x$  - tempo de deslocação desde o ponto genérico  $x$  até à captação em extracção  
 $V$  - volume de água drenado  
 $V_D$  - volume de água drenada por gravidade  
 $V_q^f$  - velocidade de darcy absoluta do fluido

VSs - variação do armazenamento de água à superfície  
VSso - variação do armazenamento de água no solo  
VSsso - variação do armazenamento de água no solo  
 $V_T$  - volume total  
 $V_T$  - volume total  
 $V_V$  - volume de vazios  
 $X_0$  - raio de chamada  
 $X_L$  - distância desde a captação em extracção até ao ponto x

## Alfabeto Grego

$\gamma_{3b}^{\text{II}}$  - granitos porfíroides  
 $\Delta h$  - variação da carga hidráulica  
 $\eta$  - porosidade  
 $\eta_e$  - porosidade efectiva  
 $\eta$  - capacidade de retenção específica  
 $\lambda_t$  - constante de eliminação de bactérias ou de inactivação do vírus  
 $v_e$  - velocidade eficaz  
 $\alpha_{Lr}$  - termo-dispersividade longitudinal do fluido  
 $\alpha_T$  - termo-dispersividade transversal do fluido  
 $\alpha$  - razão entre a diferença de densidades do fluido  
 $\beta_{Lr}$  - dispersividade longitudinal das espécies químicas  
 $\beta_T$  - dispersividade transversal das espécies químicas  
 $\beta$  - coeficiente de expansão do fluido  
 $\chi^{(C)}$  - função da concentração dependente da adsorção  
 $\varepsilon$  - porosidade  
 $\lambda^f$  - condutividade termal para fluido  
 $\lambda_{ij}$  - tensor de termo-dispersão hidrodinâmica  
 $\lambda_{ij}^{disp}$  - parte dispersiva do tensor de termo-dispersão  
 $\lambda_{ij}^{cond}$  - parte condutiva do tensor de termo-dispersão  
 $\lambda^s$  - condutividade termal para sólido  
 $\mu$  - viscosidade dinâmica do fluido  
 $\rho^f$  - densidade do fluido  
 $\rho^f_0$  - densidade do fluido de referência  
 $\rho^s$  - densidade do solo  
 $\upsilon$  - taxa de decaimento

## Abreviaturas

ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas  
APA - Agencia Portuguesa de Ambiente

CEAS - Comissão Especializada de Águas Subterrâneas  
DL - Decreto-Lei  
EGEO - Sistema Nacional de Informação Geocientífica  
ET - Evapotranspiração  
ETP - Evapotranspiração Potencial  
ETPo - Evapotranspiração Potencial Média para Meses Teóricos  
ETR - Evapotranspiração Real  
GF - United Kindown Groundwater Forum  
IGEO - Instituto Geográfico Português  
IGM - Instituto Geológico e Mineiro  
IGME - Instituto Geológico y Minero de España  
IM - Instituto de Meteorologia  
INAG - Instituto da Água  
Ma - Milhões de anos  
MEF - Método dos Elementos Finitos  
SGP - Serviços Geológicos de Portugal  
SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos  
UBI - Universidade da Beira Interior  
UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura  
USGS - United States Geological Survey





# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Enquadramento do Tema

*“O que os olhos não vêem, o coração não sente ”* (Silva, 2002 in Foster et al., 2002). Durante muitos anos esta expressão do saber popular traduziu a forma como a protecção das águas subterrâneas foi encarada. Entregues, quase por completo, à sua sorte, tomava-se por certa a sua protecção pelo simples facto de estarem encobertas pelos solos e rochas mais superficiais. A inversão desta condição foi acontecendo à medida que se davam os primeiros passos rumo ao entendimento dos processos dinâmicos envolvidos neste fenómeno. No entanto há ainda um longo caminho a percorrer e a consciencialização das populações só acontecerá quando toda a informação se traduzir em conhecimento, sendo que por vezes, um pequeno aumento da informação leva a um acréscimo imenso das hipóteses de sucesso na protecção e gestão destes recursos. Esta ideia é mais real quando o conhecimento teórico vai de encontro a ensaios reais.

Sendo uma importante fonte de abastecimento de água às actividades urbanas, agrícolas e industriais, os recursos hídricos subterrâneos assumem nos dias de hoje uma importância impar no quotidiano das populações. Além deste valor económico, social ou mesmo cultural as águas subterrâneas possuem ainda um valor inestimável no que respeita à manutenção dos ecossistemas, uma vez que o lugar de destaque que ocupam no ciclo hidrológico, contribui na contínua ocorrência dos ciclos geológicos, químicos e biológicos.

Não obstante, estes recursos são passíveis de ser afectados pela actividade humana, sobretudo no que respeita à qualidade ou na sua sobre-exploração. Volumes de extracção superiores aos valores de recarga potenciam um rebaixamento acentuado dos níveis dos aquíferos. No que diz respeito à qualidade, a sua degradação deve-se essencialmente às más práticas agrícolas e ao sector industrial. Na agricultura a utilização de fertilizantes, herbicidas, insecticidas e fosfatos, entre outros, reflectir-se-á nas características químicas das águas subterrâneas que tenham nessas superfícies agrícolas as suas zonas de recargas. Por outro lado, os resíduos industriais líquidos ou sólidos tratados de forma deficiente são uma importante fonte de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. De entres estes são de salientar os resíduos produzidos pelas indústrias siderúrgica, metalúrgica, mineira, do papel/celuloses e ainda actividades relacionadas com as ciências farmacêuticas.

Há ainda a necessidade de referir que fontes de poluição não tão difusas, mas de carácter mais pontual, constituem também um importante agente a ter em consideração. De entre estas salientam-se as que têm origens tão diversas como a lixiviação de aterros, lixeiras,

escombrelras, escorrência de águas pluviais provenientes de vias de comunicação, derrames de combustíveis, perdas em redes de esgotos ou actividades agropastoris e pecuárias. Assim como aquelas que têm como origem a própria Natureza, servem de exemplo os lixiviados de áreas florestais ardidas ou o contágio por águas subterrânea de qualidade inferior, ou ainda, e sendo esta mais grave, a intrusão marinha que pode levar à ruína a utilização de um determinado aquífero.

A instituição de perímetros de protecção em torno das captações de águas subterrâneas é um instrumento preventivo que visa maximizar a protecção destes recursos, todavia o facto de se proibir ou restringir o uso do território poderá afectar a actividade económica das populações. É necessário conseguir-se um equilíbrio balanceando, por um lado, os proveitos ou benefícios das captações em relação aos ganhos ou eventuais riscos da utilização dos terrenos. Servirá de fiel desta balança o conhecimento sobre a dinâmica e funcionamento do escoamento hidráulico subterrâneo.

Hoje em dia procura-se recriar em computador a maneira como um determinado fenómeno real acontece em relação ao espaço e ao tempo. Houve para esse efeito um grande desenvolvimento de softwares computacionais que alicerçados na Matemática, nas leis da Física e Hidráulica, entre outras, conseguem modelar e prever problemas complexos da Física e Engenharia. No que às águas subterrâneas diz respeito e atendendo ao facto deste fenómeno acontecer afastado da capacidade visual humana, o recurso a este tipo de software é uma ferramenta preciosa na percepção do funcionamento hidráulico dos escoamentos subterrâneos, conseguindo-se deste modo prever a resposta dada por um aquífero perante um determinado acontecimento.

O *FEFLOW* (*Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System*), software desenvolvido pela WASY, Berlim, Alemanha, que utiliza o modelo de elementos finitos traduz os avanços que têm sido conseguidos para a modelação de águas subterrâneas. É uma área de enorme interesse, que se entende aplicar no estudo de uma situação localizada como é o Sector do Ribeiro Frio da Água Fonte da Fraga.

## **1.2 - Instrumentos Legais/Legislativos**

Os actuais instrumentos legais e legislativos de águas subterrâneas correntes derivam, de acordo com CEAS (2011), da Lei da Água (Lei 58,2005) que transpôs para a ordem jurídica nacional a Directiva Quadro da Água (DQA, Directiva n.º2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro), estabelecendo as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas no global.

A transposição da DQA foi complementada com o Decreto-Lei n.º 77/2006 (DL,2006), de 30 de Março, apresentando um conjunto de normas comunitárias de natureza essencialmente técnica e de carácter transitório. As águas subterrâneas são alvo de caracterização; no n.º 2

do Anexo III no que diz respeito à avaliação das pressões do respectivo impacte; na Parte II do Anexo V no que diz respeito à definição do estado das massas de águas subterrâneas; e no Anexo VII no que diz respeito à sua monitorização.

Relativamente à avaliação do estado das águas subterrâneas, o Decreto-Lei 208/2008 (DL,2008) transpôs para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/118/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de Dezembro (Directiva das Águas Subterrâneas), regulamentando o artigo 47.º da Lei da Água (Lei 58,2005), no respeitante à avaliação do estado químico da água subterrânea, definindo os critérios e procedimentos para avaliação do estado químico das águas subterrâneas e para a identificação de tendências e definição do ponto de partida para a inversão dessas tendências.

O estado quantitativo das águas subterrâneas é regulado pela Portaria n.º 1115/2009, de 29 de Setembro.

São definidas zonas protegidas directamente relacionadas com as águas subterrâneas, para as quais existem os seguintes instrumentos de protecção principais: perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas para abastecimento público (Decreto-Lei n.º 382/99, de 22 de Setembro (DL,1999a)), zonas vulneráveis à poluição por nitratos de origem agrícola (Decreto-Lei n.º 235/97, de 3 de Setembro (DL,1997) e Decreto-Lei n.º 68/99, de 11 de Março (DL,1999b)), e áreas de protecção e recarga de aquíferos (anteriormente designadas de zonas de infiltração máxima; Decreto-Lei 166/2008, de 22 de Agosto (DL,2008), Anexo I, Secção II, d) Áreas estratégicas de protecção e recarga de aquíferos).

Relativo à exploração de águas subterrâneas correntes há que destacar a Lei n.º 54/2005, de 15 de Novembro (Lei,2005), que estabelece a titularidade dos recursos hídricos e o Decreto-Lei n.º 226 -A/2007, de 31 de Maio (DL,2007a), que estabelece o regime de utilização dos recursos hídricos, actualizado pelo Decreto-Lei n.º 245/2009, de 22 de Setembro (DL,2009), no que diz respeito aos títulos de utilização de recursos hídricos (CEAS, 2011).

Por fim, considerando as águas subterrâneas especiais, como as águas de nascente (onde as águas da Fonte da Fraga se integram) e as águas minerais, existem os Decreto-Lei 84/90 (DL,1990a) e Decreto-Lei 86/90 (DL,1990b), respectivamente, ambos de 16 de Março, que estabelecem os princípios necessários para o seu aproveitamento, sendo ainda de referir o Decreto-Lei 90/90 (DL,1990c) também de 16 de Março, que, de entre outros, impõe a optimização do perímetro de protecção de captações de água subterrânea do tipo mineral, além de regar os condicionamentos de actividades nas zonas de protecção.

## 1.3 - Objectivos

O objectivo principal da presente dissertação é efectuar a modelação do escoamento subterrâneo, com base no software *FEFLOW* (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation), do Sector do Ribeiro Frio do sistema aquífero da Água Fonte da Fraga, localizado na Serra da Gardunha, Região Centro-Interior de Portugal.

Neste sentido, verifica-se a necessidade de caracterização da zona de estudo, nas várias vertentes necessárias à adequada modelação, nomeadamente nos aspectos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos.

Sendo uma dissertação sobre investigação de carácter aplicado, pretende-se avaliar a capacidade de produção de água subterrânea, bem como analisar as potenciais reservas, de modo a averiguar sobre a possibilidade de novas captações.

Assim, perante a zona de estudo devidamente caracterizada, e a modelação efectuada, definem-se os seguintes objectivos concretos, a efectuar com o auxílio da criação de cenários com o software *FEFLOW*:

- i) contribuir para a localização de novas captações a partir do modelo de linhas de fluxo subterrâneo a desenvolver;
- ii) averiguar a eficácia dos Perímetros de Protecção das captações, com base em análise de movimento de plumas de contaminantes virtuais, colocados em diferentes posições do sistema aquífero;
- iii) contribuir para a criação de mecanismos de defesa, como por exemplo otimizar a localização de poços de protecção, a montante das captações, de modo a interceptarem fluidos potencialmente contaminados, evitando assim que cheguem às captações.

## 1.4 - Metodologia e Estrutura da Dissertação

O presente trabalho decorreu no período de 2010 a 2011, adoptando-se uma metodologia organizada em cinco grandes fases, de acordo com o seguinte:

- 1) pesquisa bibliográfica, com a sintetização de elementos sobre o tema e em particular sobre aspectos geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos da região;
- 2) trabalhos de gabinete iniciais, com a organização de elementos e dos vários subdomínios científicos, e elaboração dos primeiros esboços de mapas, nomeadamente o mapa geológico;

- 3) trabalho de campo, de modo a tomar contacto com as diferentes litologias existentes, aferição de contactos geológicos, e visitas técnicas às captações de água subterrânea;
- 4) trabalho de gabinete com recurso ao software *FEFLOW*, para modelação e criação de um conjunto variado de cenários, de modo a conhecer melhor a dinâmica do escoamento subterrâneo, e cumprir os objectivos inicialmente previstos;
- 5) organização de todos os elementos, interpretação e escrita da presente dissertação.

A estrutura da dissertação está organizada em 5 capítulos.

O primeiro capítulo, **Introdução**, apresenta o enquadramento do tema, os objectivos, a metodologia seguida e ainda algumas referências a estudos anteriores, relacionados com o tema em estudo e que serviram de base mais directa à construção da presente dissertação.

O segundo capítulo, **Águas Subterrâneas**, apresenta alguns aspectos e conceitos básicos sobre a Hidrogeologia, que genericamente se entende a utilidade destes estarem associados a um trabalho com esta índole.

No terceiro capítulo, **Caracterização da área em estudo - Sector do Ribeiro Frio**, faz-se a caracterização da zona de trabalho, nas várias vertentes necessárias à modelação, com a particularidade de, depois de se provar que há condições em termos de recurso disponível, para uma nova captação, define-se a sua localização e o seu perímetro de protecção, optimizando-o com os perímetros de protecção já existentes das captações em laboração.

No quarto capítulo, **Modelação da área em estudo**, explanam-se com detalhe as várias fases seguidas na efectiva modelação, que culmina com a criação de simulações finais, desenvolvendo essencialmente a distribuição das linhas de fluxo, a evolução de plumas de contaminantes e a optimização de furos de protecção.

Por fim, no quinto e último capítulo, **Conclusões e Perspectivas Futuras**, apresentam-se as principais conclusões e propõem-se alguns caminhos a seguir, no sentido de conhecer melhor o sistema aquífero do Sector do Ribeiro Frio, e consequentemente optimizar o melhor possível a exploração do recurso dentro de um cenário adequado de protecção.

## 1.5 - Estudos Anteriores

No que respeita às águas subterrâneas o estudo levado a cabo pelo INAG (1997) em parceria com a Faculdade de Ciências de Lisboa no período entre 1994 e 1997 intitulado “*Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*”, teve como objectivo a sistematização e actualização da informação relativa aos principais sistemas aquíferos de Portugal continental que veio a servir de base à uniformização da terminologia respeitante aos sistemas aquíferos como primeiro passo para a definição de redes de

monitorização e para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos (INAG,1997). Os resultados do projecto de mapeamento serviram de base ao lançamento dos princípios metodológicos de estruturação das redes de monitorização de quantidade e qualidade a nível nacional para os diferentes meios hidrogeológicos, exemplificados inicialmente para os sistemas aquíferos do Alentejo e numa fase seguinte generalizados à Bacia do Tejo-Sado e Região Oeste (INAG,1997).

A obra “*Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*”, de Almeida *et al* (2000) aborda a carência de estudos hidrogeológicos referentes ao Maciço Ibérico. Contrariando este facto esta obra faz o enquadramento geológico e a caracterização hidrogeológica do Maciço Ibérico individualmente para cada uma das três unidades que o constituem: Zona Centro-Ibérica, Zona de Ossa-Morena e Zona Sul-Portuguesa. É um trabalho de particular importância uma vez que consegue alcançar uma boa caracterização hidrogeológica de uma grande parcela do território Nacional.

Merece referencia o trabalho desenvolvido por Prada (2000) sobre a Geologia e os Recursos hídricos da Ilha da Madeira. Neste estudo é referida a importância que este tipo de abastecimento de água subterrânea tem para os 240 500 habitantes daquela ilha; são descritas as galerias, túneis, furos e aproveitamento de nascentes que servem de captações, assim como se quantifica o volume anual de recursos subterrâneos consumido no abastecimento público, indústria, rega e produção de energia. São descritas as áreas de recarga dos aquíferos e a forma com esta acontece. Por fim, é proposto um modelo hidrogeológico conceptual para os recursos hídricos subterrâneos daquela ilha.

A publicação “*Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Águas Subterrâneas - Estudo comparativo utilizando métodos analíticos e numéricos*” de Moinante (2003), aborda a vulnerabilidade a diversos tipos de poluição a que estão sujeitas as águas subterrâneas. Neste trabalho é feita a apresentação do perímetro de protecção, as restrições que lhe estão inerentes e os aspectos hidrogeológicos gerais que devem ser considerados aquando da sua definição. Relativamente à componente prática deste trabalho, esta descreve a área de estudo e as captações de água subterrânea utilizadas, para numa fase posterior, serem aplicados três métodos analíticos para definição de perímetros de protecção. Na fase final são também realizadas simulações estocásticas, gerando-se distribuições heterogéneas da condutividade hidráulica, utilizadas a seguir no modelo de fluxo para a definição de novas zonas de protecção.

Na publicação do Instituto Geológico y Minero de España, “*Perímetros de protección para captaciones de agua subterrânea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio.*” (IGME,2003) é feita uma análise sintética dos principais quadros legais e estratégias de protecção de recursos hídricos subterrâneos utilizadas nos principais países Europeus, assim como nos Estados Unidos, Canadá e Austrália. É ainda estabelecida uma

ordem de prioridade para definição de perímetros de protecção entre diferentes regiões. São descritas as aproximações matemáticas para definir o fluxo da água subterrânea e de transporte de soluto empregues na definição dos perímetros de protecção. Este trabalho faz ainda uma análise exaustiva relativa à protecção de captações de águas subterrâneas em meios com porosidade granular, meios cárscicos e meios fracturados; para o efeito descreve os principais métodos a serem utilizados e tece as considerações mais relevantes inerentes a cada meio. Ao longo deste trabalho houve o cuidado de se exemplificar os conceitos teóricos com aplicações práticas reais.

No trabalho efectuado por Custódio da Paz (2009) “*Modelação Matemática do Escoamento e da Poluição do Sistema Aquífero Caldas da Rainha - Nazaré*” é feita a análise do aquífero Caldas da Rainha - Nazaré que se enquadra numa região cujas apostas de desenvolvimento passam invariavelmente pelo uso das suas águas. Atendendo a este factor foi importante conhecer a dinâmica de escoamento deste aquífero, pelo que foi construído com base na sua caracterização física, um modelo conceptual e matemático que permite prever o comportamento deste recurso face a diferentes cenários. A modelação matemática permitiu verificar as respostas do aquífero a simulações que traduziam as diversas situações ponderadas, sendo uma delas a injeção de um contaminante num certo ponto do aquífero. Com este trabalho conclui-se a importância que a dinâmica aquífero/rios assume como papel preponderante na tomada de decisões sobre o desenvolvimento futuro da região, tendo como ponto de partida a modelação do escoamento do aquífero estudado.

O trabalho “*Delimitação de perímetros de protecção em captações de água subterrânea em zonas de montanha por métodos gráficos*”, por Ferreira Gomes *et al.* (2008b) apresenta um caso de estudo da definição do perímetro de protecção de 17 captações de água subterrânea localizadas na Serra da Estrela. Aquelas captações além de relativa proximidade entre elas são ainda muito singulares em relação ao contexto clássico da optimização de perímetros de protecção. São do tipo minas, drenos, furos semi-horizontais e nascentes, sendo de salientar que estas captações são muito comuns em regiões montanhosas. Assim, aquele trabalho apresenta uma metodologia própria que resulta de uma conjugação de quatro métodos ou aspectos: 1) método de Wyssling; 2) aplicação da fórmula expressa no Decreto-Lei nº 382/99 de 22 de Setembro (DL,1999a); 3) aspectos geológicos/estruturais e geomorfológicos da envolvente às captações; 4) vulnerabilidade das formações geológicas envolventes às captações. Segundo os autores aquela metodologia poderá ser alargada a outras zonas de montanha sendo de salientar que foi ainda aplicada num conjunto global de 74 captações. A metodologia seguida por aqueles autores, foi apresentada nos trabalhos de Mendes (2006) e Mendes *et al.* (2009).

Sobre a região de estudo, Serra da Gardunha, de um modo geral o conhecimento hidrogeológico ainda não é muito avançado. No entanto, por se situarem sobre ela duas empresas de exploração deste recurso (a água do Alardo e a água da Fonte da Fraga), tem

havido alguns estudos específicos nas suas áreas de influência. Merecem referencia alguns trabalhos que de seguida se discriminam.

No trabalho “*Estudo Hidrogeológico para localização de captações em Casal da Fraga - São Vicente da Beira*” datado de Agosto de 2000 (Ferreira Gomes,2000) faz o enquadramento geomorfológico da região da Serra da Gardunha, assim como é feita a caracterização das principais unidades geológicas e hidrogeológicas ali presentes. São também descritos com especial pormenor os pontos de água uma vez que é feita a caracterização dos caudais, pH e temperatura da água extraída em cada um deles, assim como a litologia onde estão assentes, contribuindo para a caracterização global do recurso existente. É também apresentada uma reprodução do modelo de circulação das águas subterrâneas presentes naquelas estruturas geológicas e das zonas onde ocorre a sua recarga hidráulica. Por fim e numa perspectiva económica são avançadas as reservas, a capacidade de produção e são apresentadas propostas de novas captações que resultam de toda a informação adquirida.

Nos trabalhos de Ferreira Gomes *et al.* (2008a) e Mendes *et al.* (2010a) são apresentadas contribuições importantes para o conhecimento hidrogeológico do sector do Couto da água Fonte da Fraga, na vertente sul da Serra da Gardunha. O trabalho de Mendes *et al.* (2010b) apresenta contributos também importantes no domínio hidrogeológico, para a zona da água do Alardo, na vertente nordeste da Serra da Gardunha.

Os estudos desenvolvidos por UBI (2008) e UBI (2010) aquando da legalização das captações Ribeiro Frio 1 e Ribeiro Frio 4, situadas na vertente noroeste da Serra da Gardunha, são meritórios de especial destaque uma vez que estes se revelaram nucleares para o desenvolvimento do trabalho levado a cabo na presente dissertação.

Nestes trabalhos além da abordagem que é feita, de cariz geomorfológico e geológico, são também feitas as necessárias considerações sobre os aspectos hidrogeológicos dominantes naquele sector da Serra da Gardunha. São retratadas as captações de água subterrâneas assim como a vulnerabilidade e riscos de poluição a que estão sujeitas. São também realizados importantes estudos que tiveram como resultado a definição das diferentes zonas de protecção de cada captação, sendo ainda apresentada a caracterização da qualidade do recurso.

Por fim, merece ainda referência o estudo de Mendes (2010), “*Modelos Geohidráulicos em Meios Fracturados de Rochas Graníticas - Caso de Estudo do Aquífero da Fonte da Fraga - Serra da Gardunha*”. Este fornece um contributo importante para o conhecimento da modelação dos recursos hídricos subterrâneos em meios fracturados do tipo granítico. É feita a análise dos pontos de água, assim como são abordados os aspectos hidrogeológicos mais relevantes, nomeadamente os relativos à recarga aquífera, hidrodinâmica e hidroquímica. Na parte final procede-se à construção de um modelo numérico onde é desenvolvida a utilização

do software *FEFLOW* que permite efectuar balanços entre descargas e entradas no sistema aquífero principal da água *Fonte da Fraga*, culminando com a definição da localização de um novo furo de pesquisa com potencial de vir a ser uma nova captação de água subterrânea.

## Capítulo 2

### ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas como uma das componentes do ciclo hidrológico (Figura 2.1) representam mais de 95% das reservas de água doce exploráveis do planeta, com um valor de 24 milhões de km<sup>3</sup> reclamam a si cerca de 1,72% de toda a água existente no globo (Tabela 2.1). Com um volume de exploração avaliado em aproximadamente 300 Milhões de Euros (Tabela 2.2) este recurso natural é de importância vital na estratégia de abastecimento humano de água potável, chegando a atingir valores de 99% da população abastecida por águas subterrâneas em Países como a Áustria ou Dinamarca, como se indica na Tabela 2.3.



Figura 2.1 - Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico (a partir de USGS, 2011).

Tabela 2.1 - Volume aproximado e percentagem total de água existente no planeta, distribuída pelas diversas formas de armazenamento (UNESCO, 1978 in LNEG, 2011).

Reservatórios	Volume aproximado de água (Km <sup>3</sup> )	Percentagem da água total
Oceanos	1340 000 000	96,4
Glaciares	24 000 000	1,77
Água Subterrânea (Aquíferos)	24 000 000	1,72
Humidade do Solo	16 500	0,001
Lagos e Pântanos	176 400	0,013
Rios	2 120	0,00015
Atmosfera	13 000	0,001
Água Biológica	1 120	0,0001
Volume de Água Total	1 390 000 000	100%

Tabela 2.2 - Produção anual dos principais recursos naturais e respectivos valores económicos (UNESCO,2005).

Recurso	Produção Anual (milhões de toneladas)	Valor Total (milhões de €)
Água Subterrânea (geral)	> 600 000	*300 000
Areia e Gravelha	18 000	90 000
Hulha e Antracite	3 640	101 900
Petróleo	3 560	812 300
Linhite	882	12 300
Ferro	662	16 400
Sal-gema	213	4 500
Gesso	105	1 500
Águas Minerais e de Mesa	89	22 000
Fosfatos	44	3 000

\* a um preço médio de 0.5€/m<sup>3</sup>. Os preços na Europa oscilam entre 0.8 a 1.4€ por m<sup>3</sup>

Tabela 2.3 - Abastecimento populacional com águas subterrâneas (IGME,2003).

País		População Abastecida (%)
Europa	Alemanha	73,3
	Austria	99,3
	Dinamarca	99
	Espanha	30
	Finlândia	61,2
	França	56,4
	Grécia	63
	Holanda	65
	Irlanda	20-25
	Itália	80,3
	Luxemburgo	69
	Portugal	79,9
	Reino Unido	33
	Suécia	49
	Islândia	84,1
Noruega	13	
República Checa	44	
Suiça	80	
Média Europeia		70
Outros Países	E.U.A	37

No que diz respeito a Portugal, nos finais da década de 90, quase 80% da população era abastecida com este tipo de recurso hídrico (IGME, 2003), que se assume como uma peça valiosa capaz de incrementar não só o crescimento económico, como também o desenvolvimento social, sendo de destacar o valor histórico que esta tem para os sectores agrícola e industrial, ou mais recentes como o das águas de nascente, das águas minerais naturais, do termalismo, ou mesmo naquele que se considera com enorme potencial no sector das energias renováveis, ou seja, a geotermia (geoenergia). É portanto pertinente que se

impulsione, desde já, o necessário debate destes temas, de modo a aumentar os conhecimentos nesta área que por consequente irá conduzir a uma melhor protecção da quantidade mas também da qualidade deste recurso natural (IGME,2003 ; CEAS,2011).

A água subterrânea não pára à porta das fronteiras políticas. Explorá-la num determinado país pode afectar, de forma dramática, a água de um outro (Figura 2.2). Nestas circunstâncias, a gestão da água subterrânea requer cooperação internacional. Uma vez que a água subterrânea se desloca obedecendo a leis físicas, as estruturas hidrogeológicas devem ser investigadas, exploradas e geridas na sua totalidade. Isto significa que a investigação deve atravessar, igualmente, fronteiras nacionais (UNESCO, 2005).

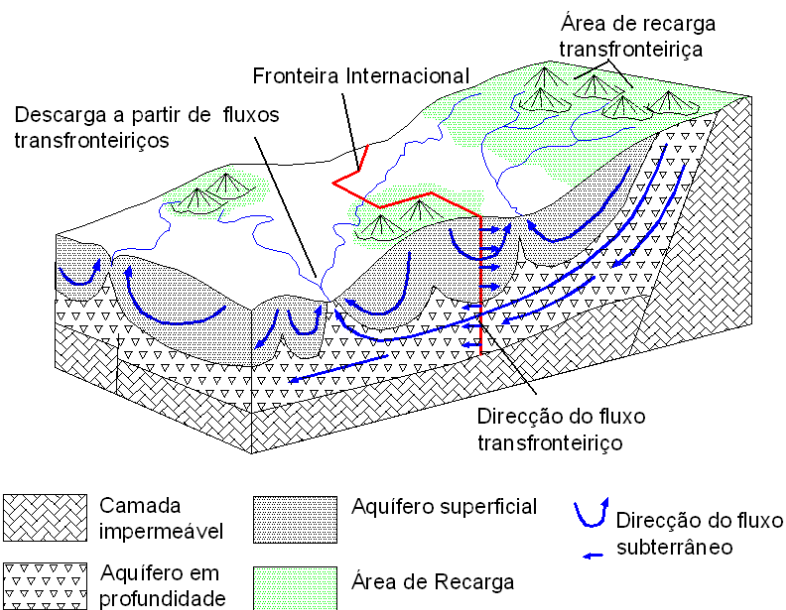


Figura 2.2 - Esquema hidrogeológico que mostra que as fronteiras políticas podem atravessar os sistemas de água subterrânea (adaptado de UNESCO, 2005).

## 2.1 - Aspectos Hidrogeológicos

Parte da água que atinge o solo sob a forma de chuva, neve, geadas ou neblinas infiltra-se, por força da gravidade, e percola lentamente no subsolo acabando por preencher os poros e espaços entre grãos de rochas de origem sedimentar ou as fracturas, falhas e fissuras, no caso de rochas compactas. Esta infiltração está dependente de alguns factores; de entre estes destacam-se, a título de exemplo, a topografia e tipo de coberto vegetal do terreno. Um solo com inclinação acentuada e despido de vegetação, que o torne mais permeável, favorece, em chuvas intensas que saturam rapidamente o solo, o escoamento superficial, reduzindo assim a possibilidade de infiltração. A presença de argila diminui também a permeabilidade de um solo, condicionando a infiltração de água (ABAS, 2010). Nem toda a água que se infiltra é armazenada, dependendo o seu trajecto das forças de gravidade, coesão ou capilaridade que afectem as partículas de água e ainda da profundidade à superfície do solo onde se encontra.

### 2.1.1 - Zona não saturada

A Zona não Saturada situa-se imediatamente abaixo da superfície topográfica e acima do nível freático, onde os espaços vazios entre as partículas estão parcialmente preenchidos por gases (essencialmente ar e vapor de água) e por água. A água contida nesta zona encontra-se à pressão atmosférica, podendo ser utilizada pelas raízes das plantas ou infiltrar-se em profundidade contribuindo para o aumento das reservas de água subterrânea. A zona não saturada pode constituir uma camada protectora relativamente a um aquífero abaixo desta, dependendo da condutividade hidráulica, da capacidade de adsorção do material que constitui o solo e das características químicas dos poluentes em causa. Os solos que apresentam baixa condutividade hidráulica, como o caso de solos argilosos ou ainda solos com componente orgânica elevada, fornecem a melhor protecção dos aquíferos. Alguns poluentes (ex: nitratos) não são adsorvidos facilmente aos materiais constituintes do solo, podendo ser transportados até grandes distâncias, em solos com elevada condutividade hidráulica. A zona não saturada, embora com algumas limitações, serve como a primeira barreira à poluição das águas subterrâneas, visto que apresenta uma aptidão natural para a degradação e a transformação de poluentes, conduzindo à sua atenuação, ou mesmo eliminação (Wallin, 1997; Leitão, 1997).

Na Zona não Saturada podem-se diferenciar ainda três sub-zonas distintas (IGM, 2001) (Figura 2.3):

Zona de Humidade do Solo, a mais superficial da zona não saturada, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. A resistência à infiltração desta sub-zona regula a velocidade com que um poluente se propaga. É uma área de extrema actividade química e biológica, as reacções químicas e físico-químicas que aí ocorrem podem modificar os tempos de residência ou de propagação, as concentrações e também a natureza dos poluentes. Esta zona estende-se até ao nível da profundidade que atinjam as raízes das plantas.

Zona Intermédia está compreendida entre a zona de humidade do solo e o limite de ascensão capilar; caracteriza-se por uma saturação parcial com água capilar, ar e eventuais poluentes líquidos não miscíveis (ex: hidrocarbonetos líquidos);

Zona de Capilaridade é a que se situa mais próxima do nível freático, onde a humidade é maior devido a fenómenos de capilaridade. A água existente nesta franja não faz parte do fluxo da água subterrânea, pese embora o facto de estar em contacto directo e permanente com esta. Esta zona constitui a primeira barreira ao fluxo descendente dos poluentes líquidos, desde que mais leves que a água, espalham-se horizontalmente sobre a franja capilar.

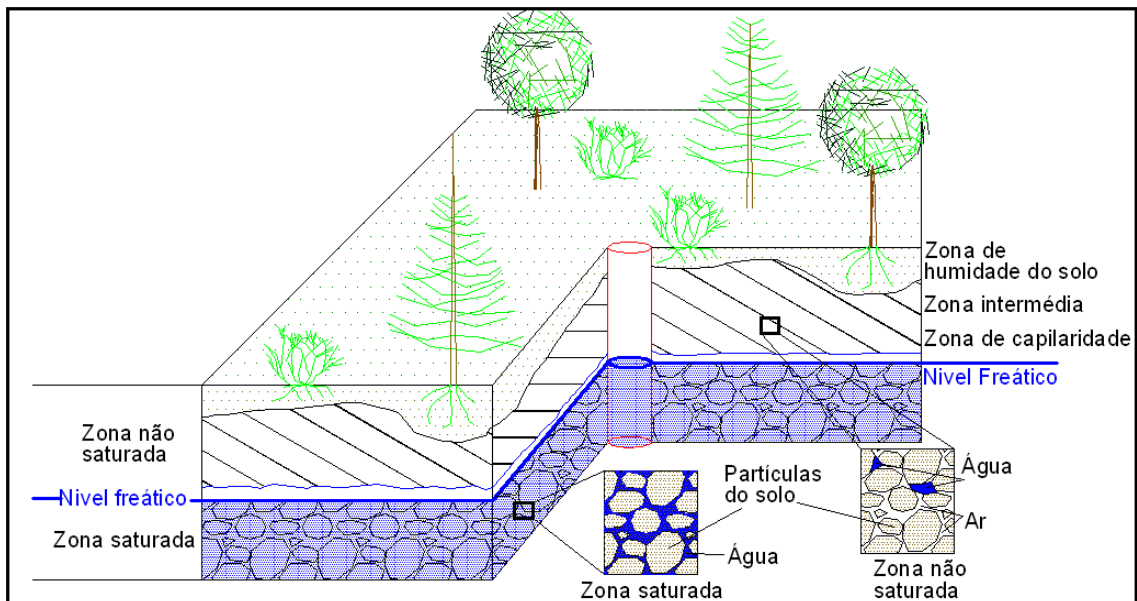


Figura 2.3 - Esquema de princípio sobre a Zona saturada e Zona não saturada do subsolo.

O Nível freático, também chamado comumente de *lençol de água* é a superfície que separa a Zona não saturada da saturada (IGM, 2001). Este nível de água não é estático, podendo permanecer a grandes profundidades em épocas de estiagem ou aproximar-se da superfície do terreno quando o volume de precipitação e consequente infiltração aumenta. As nascentes de água subterrânea podem surgir quando o nível freático atinge a superfície do terreno. Por exemplo, quando há uma escavação em corte numa vertente natural, ou se efectua uma depressão na topografia do terreno muitas vezes aparece água, porque se intersecta o nível freático.

### 2.1.2 - Zona saturada

A Zona Saturada pode ser constituída por diferentes níveis ou camadas de solo ou formações rochosas, e caracteriza-se por todos os espaços porosos ou fracturas existentes estarem completamente preenchidos por água (LNEG, 2010). À zona saturada do solo poder-se-á chamar Aquífero desde que a água armazenada disponível seja em quantidade tal que justifique, economicamente, a sua extracção. A zona saturada pode ser dividida em duas componentes (Moinante,2003): a zona de flutuação do nível freático e a zona de fluxo de água subterrânea.

A zona de flutuação do nível freático constitui a parte superior da zona saturada e a principal direcção do fluxo é horizontal. O seu limite superior define a superfície freática e também o gradiente de fluxo. A componente vertical do fluxo corresponde à subida e descida da superfície freática como resposta às situações de recarga e descarga sazonais, e constitui um factor importante na mobilização dos poluentes.

A zona de fluxo da água subterrânea constitui o domínio do fluxo saturado com uma componente essencialmente horizontal. Uma vez introduzidos no aquífero, os poluentes são

transportados por fenômenos de advecção e dispersão hidrodinâmica, e o seu destino é determinado tanto pela sua natureza como pelas características físico-químicas dos materiais dos aquíferos, nomeadamente a sua condutividade hidráulica ( $k$ ) e a sua porosidade efectiva ( $n_e$ ).

## 2.2 - Classificação dos Aquíferos quanto à Porosidade

Para existir água subterrânea explorável ela terá de conseguir atravessar e circular através das formações geológicas que têm que ser porosas e permeáveis (ABAS, 2010).

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. Os espaços vazios designam-se por poros. Existem ainda outras formações formadas por material rochoso onde os espaços vazios correspondem diaclases e outras fracturas e até a cavernas, que não são propriamente poros (IGM, 2001).

Do ponto de vista da porosidade podem ser distinguidos três tipos de aquíferos: i) Aquífero Intersticial ou Poroso; ii) Aquífero Fissural ou Fracturado; e iii) Aquífero Cársico.

### 2.2.1 - Aquífero intersticial ou poroso

É formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos não consolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada (Figura 2.4). Constituem importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e pela ocorrência em grandes áreas. Uma particularidade desse tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre distribuída de uma forma homogénea, permitindo assim que a água flua para qualquer direcção, em função apenas dos valores diferentes de pressão hidrostática ali existente (Figura 2.5). Essa propriedade é conhecida como isotropia e nestes casos a velocidade da água pode ser calculada através da *Lei de Darcy*. No entanto, podem surgir estruturas secundárias devido a pressões aplicadas sobre o aquífero, como é o caso das fracturas. As fracturas apresentam uma direcção preferencial de orientação, relacionada com as tensões aplicadas e deste modo, a porosidade secundária do aquífero é anisotrópica (não uniforme em todas as direcções). Ao contrário do caso anterior, a água subterrânea poderá ser forçada a circular ao longo de fracturas cuja direcção faz um determinado ângulo com a direcção do gradiente (Moinante, 2003).

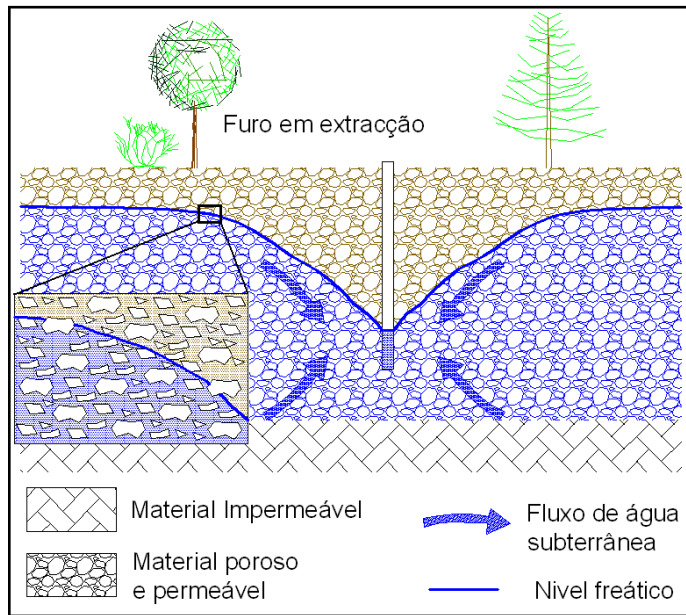


Figura 2.4 - Aquífero Intersticial ou Poroso.

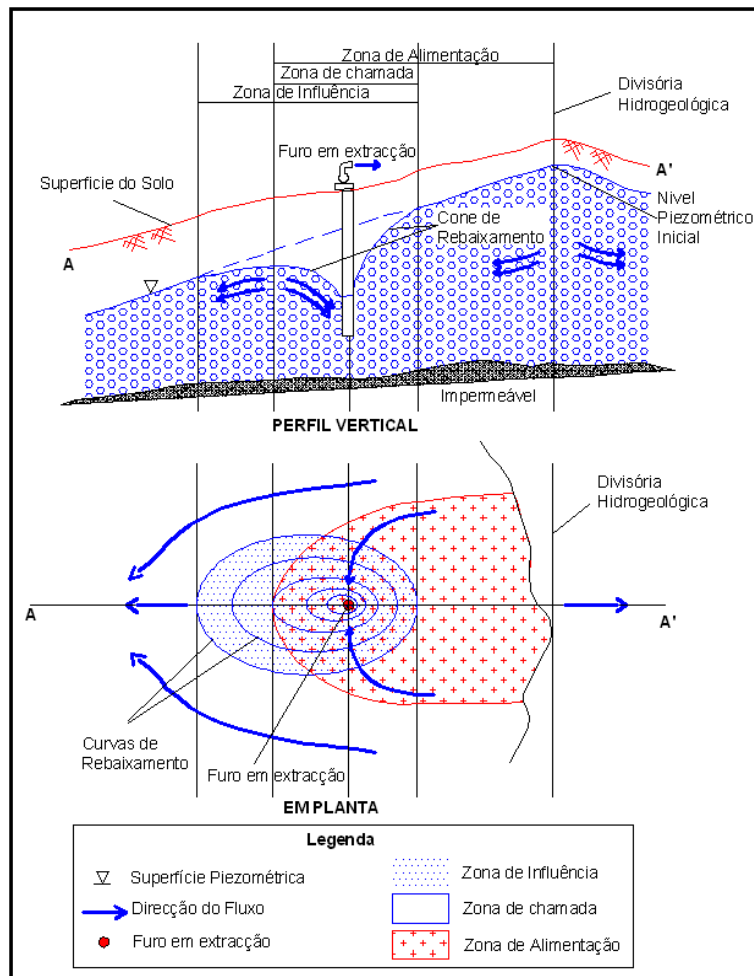


Figura 2.5 - Esquema de representação da área de alimentação e de zona de chamada de uma captação em meio poroso (adaptado de IGME, 2003).

### 2.2.2 - Aquífero fissural ou fracturado

É típico em rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação da água se faz nas fracturas, fendas e falhas abertas (Figura 2.6). Servem de exemplo os basaltos, granitos, gabros ou mesmo os filões de quartzo. A capacidade de acumulação de água destas rochas está relacionada com a frequência de fracturas, a sua abertura e intercomunicação, permitindo a infiltração e o fluxo da água. Nestes aquíferos a água circula onde houver fracturas e de uma forma geral, as linhas de fluxo tendem a ter orientações preferenciais (Figura 2.7), prevalecendo neste tipo de aquíferos uma certa anisotropia (ABAS, 2010).

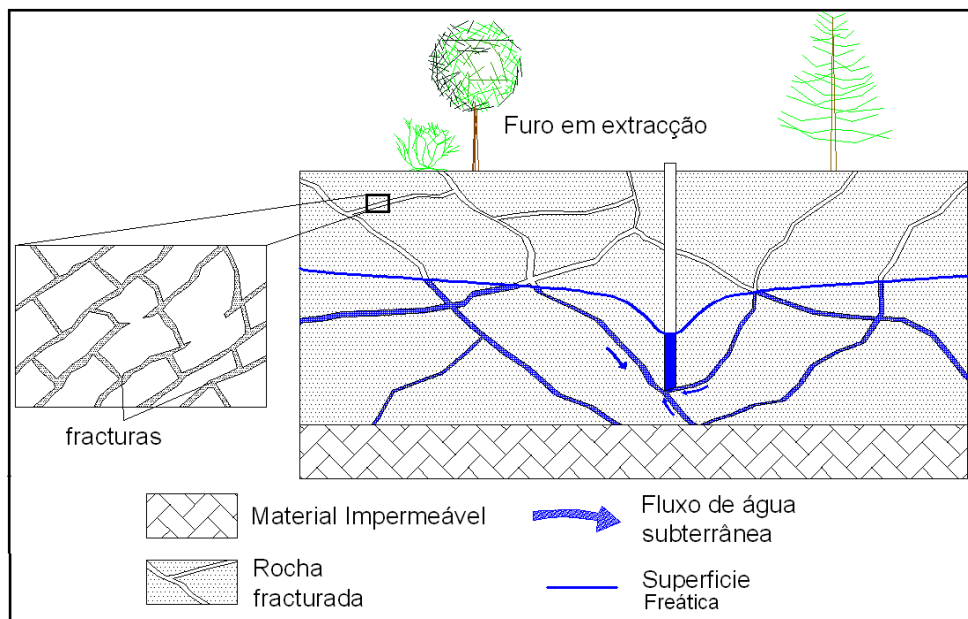


Figura 2.6 - Esboço representativo de um sistema aquífero fracturado.

De um modo geral, a capacidade de armazenamento deste tipo de aquíferos, nos espaços vazios, é mais baixa que a apresentada pelos aquíferos porosos granulares. No entanto, as rochas fracturadas podem ser consideradas meios porosos se (Moinante,2003):

- a densidade de fracturação é elevada;
- a orientação das fracturas não é uniforme, havendo intersecção das mesmas;
- a abertura das fracturas é uniforme e fina;
- o volume do aquífero é considerado grande.

Há no entanto alguns critérios, embora subjectivos, que permitem determinar se um aquífero fracturado pode, ou não ser considerado como tendo um comportamento poroso (Moinante, 2003):

- Com a execução de ensaios de caudal, um aquífero com um comportamento do tipo poroso deverá apresentar o seguinte comportamento: i) o rebaixamento verificado nos furos de observação deve aumentar linearmente com o aumento da

Descarga; ii) as curvas de *rebaixamento vs tempo*, em furos de observação localizados em diferentes direcções relativamente à captação principal, deverão ter formas idênticas; e iii) o cone de rebaixamento definido a partir dos vários furos de observação deverá ser circular ou ligeiramente elíptico.

- Num aquífero de comportamento poroso, a distribuição da condutividade hidráulica ( $k$ ) deverá ser uniforme ou apresentar uma distribuição *log-normal*.
- A composição química da água poderá indicar a existência de fluxo ao longo de fracturas se, por exemplo, ocorrem variações significativas no espaço e no tempo, ou se os valores de sólidos dissolvidos totais e de índices de saturação forem baixos. É, nestes casos, importante que a composição química da água seja comparada em furos similares e em simultâneo.

As heterogeneidades presentes no aquífero (indiciadas por contrastes na condutividade hidráulica) provocam mudanças na direcção do fluxo de água subterrânea à medida que atravessa os diferentes materiais. De um modo geral a água subterrânea flui preferencialmente no meio de maior condutividade hidráulica, mesmo que essa direcção não seja a do gradiente hidráulico regional.

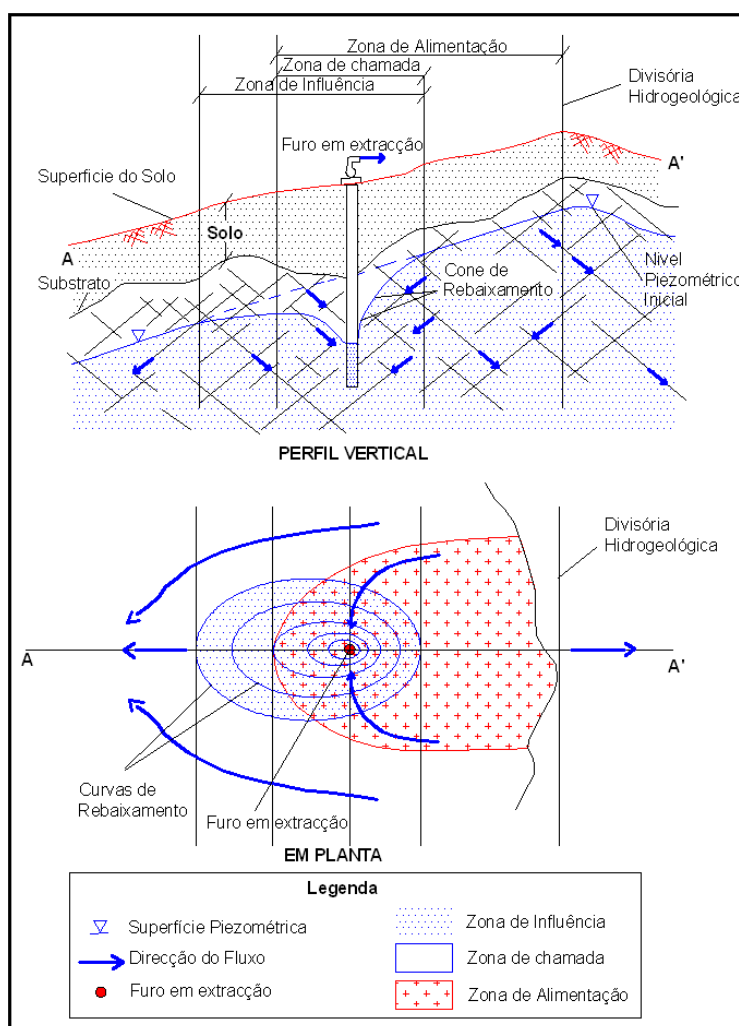


Figura 2.7 - Representação da área de alimentação e de influência de uma captação de água subterrânea em meio fraturado (adaptado de IGME, 2003).

### 2.2.3 - Aquífero cársico

Este tipo de aquífero é composto essencialmente por rochas carbonatadas onde a circulação da água pode ser difusa ou faz-se nas fracturas e outras discontinuidades (cavernas) que resultaram da dissolução pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando, nesse caso, verdadeiros rios subterrâneos (Figura 2.8). São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais. As rochas são os calcários, dolomias e mármore. Apesar de nem todas as rochas carbonatadas constituírem aquíferos cársicos, deve ser assumido o fluxo por condutas sempre que se estiver na presença daqueles maciços rochosos.

Quando o fluxo apresenta um carácter difuso, utilizam-se métodos de modelação e avaliação idênticos aos utilizados no caso dos aquíferos porosos granulares. Quando o fluxo se processa por condutas, os poluentes são transportados muito rapidamente desde o ponto de entrada até ao ponto de saída, mas por outro lado poderão ser eliminados do sistema de uma forma mais rápida (ABAS,2010; Moinante,2003). As principais características que distinguem estes dois tipos de aquíferos carbonatados são apresentadas na Tabela 2.4.

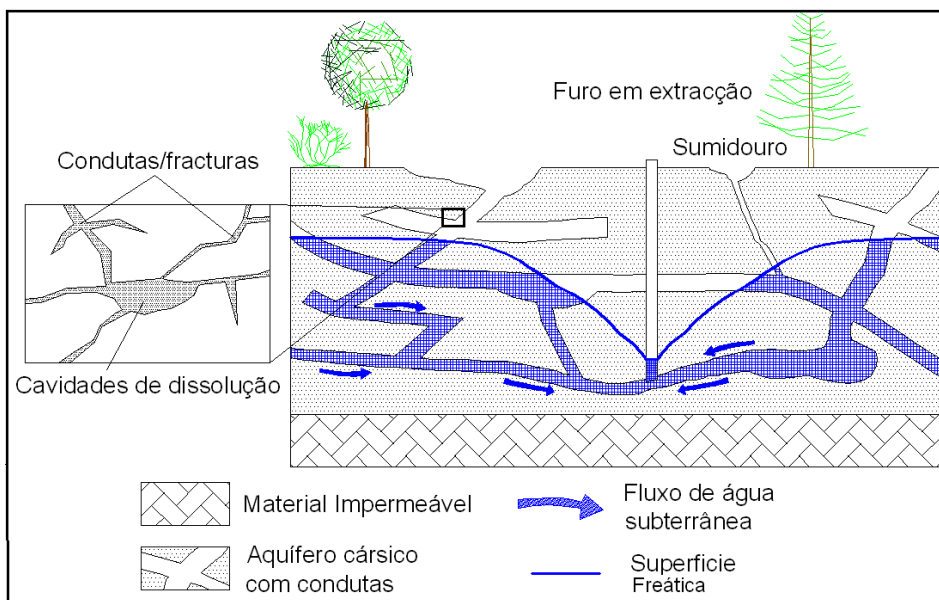


Figura 2.8 - Esquema representativo da circulação da água subterrânea em meio cársico.

Tabela 2.4 - Principais características dos tipos básicos de aquíferos carbonatados (Moinante,2003).

Aquíferos Cársicos (sentido estrito)	Aquíferos de Fluxo Difuso
Meio muito heterogéneo	Meio relativamente homogéneo
Massas impermeáveis coexistindo com grandes condutas	Armazenamento grande
Armazenamento pequeno ou nulo	Piezometria contínua
Piezometria virtual, descontínua	Fluxo difuso
Circulação por condutas e rios subterrâneos; pequenos aquíferos suspensos	Infiltração uniforme
Infiltração em pontos localizados	Oscilações e gradientes regulares; água inicialmente a pouca profundidade
Oscilações piezométricas importantes, nível de água profundo	Formas cársicas escassas, interior do maciço inacessível.
Formas cársicas abundantes, fácil acesso ao interior do maciço.	

Muitas vezes os aquíferos são simultaneamente de mais de um tipo. Por exemplo um maciço granítico 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. As rochas carbonatadas podem ser cársicas e fissuradas, circulando a água através de fissuras da própria rocha e de condutas cársicas (Ferreira Gomes, 2010).

## **2.3 - Classificação dos Aquíferos quanto à Pressão do seu Recurso**

No que respeita ao confinamento e conseqüente pressão a que o seu recurso está sujeito (Figuras 2.9 e 2.10), uma perfuração feita até encontrar um aquífero confinado, obterá um nível de água acima do tecto do aquífero, ou seja, no decorrer da perfuração, o nível sobe para cota superior, em relação à cota em que foi detectado. A altura a que a água sobe chama-se Nível Piezométrico e o furo é artesiano. No caso de uma perfuração num aquífero livre, o nível da água não varia porque corresponde ao nível da água no aquífero, isto é, a água está à mesma pressão que a pressão atmosférica. O nível da água é designado então de Nível Freático (ABAS, 2010).

Assim, função dos níveis ou pressões, e ainda do tipo de confinamento, podem então ser assinalados os aquíferos livres, confinados e semi-confinados (Figuras 2.9 e 2.10).

### **2.3.1 - Aquífero livre ou freático**

É constituído por uma formação geológica permeável na superfície e limitado na base por uma camada menos permeável ou impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica. Os aquíferos livres são recarregados directamente, uma vez que não existe nenhuma barreira que impeça o fluxo descendente a partir da superfície. Em aquíferos livres o nível da água varia de forma proporcional à quantidade de precipitação. São ainda os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população; são também os que apresentam maiores problemas de contaminação, estando a forma desta se propagar dependente das características da zona não saturada e da profundidade do nível freático.

### **2.3.2 - Aquífero confinado ou artesiano**

Constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda, no caso de um poço, para além do topo do aquífero. Nestes casos o reabastecimento ou recarga dá-se em profundidade ou de uma forma indirecta ou quando ocorre através da precipitação efectua-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. O nível da água destes aquíferos encontra-se sob pressão, podendo causar artesianismo. Os aquíferos confinados, estão por norma associados a locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas (bacias

sedimentares). Se o nível piezométrico de um aquífero confinado se encontra acima do nível freático do aquífero subjacente, os poluentes permanecem no aquífero livre, devido à tendência do fluxo se processar de baixo para cima através da unidade confinante e vice-versa. Quanto menor for a permeabilidade da unidade confinante, menor é a probabilidade do aquífero ser alcançado por poluentes. No entanto, poderá ocorrer recarga para além da extensão da camada confinante, em locais onde o aquífero não é confinado, o que geralmente sucede em zonas muito afastadas da captação (Moinante, 2003).

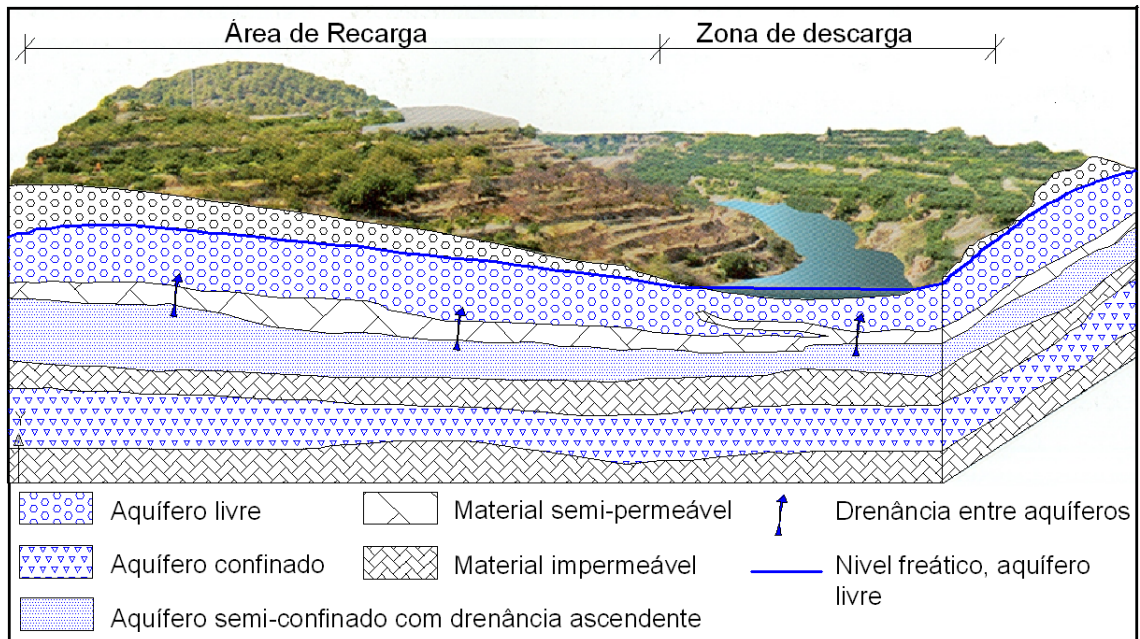


Figura 2.9 - Esquema sobre diferentes tipos de aquíferos (adaptado de López Geta *et al.*, 2009).

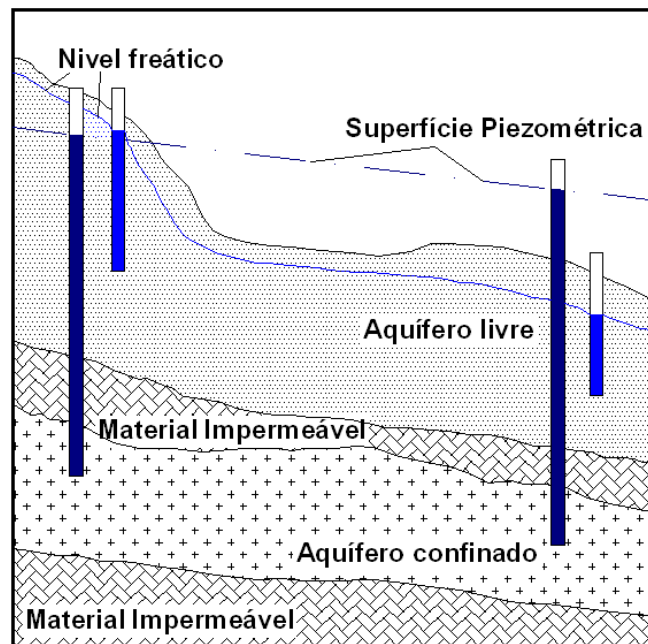


Figura 2.10 - Diferentes posições dos níveis de água consoante o tipo de aquífero (Moinante, 2003).

### 2.3.3 - Aquífero semi-confinado

Encontra-se limitado na base e/ou no topo, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água dá-se ao longo do aquífero. Secundariamente, esse fluxo dá-se através das camadas semi-confinantes, à medida que haja uma diferença de pressão hidrostática entre o aquífero e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um aquífero livre poderá ser abastecido por água oriunda de camadas semi-confinadas subjacentes, ou vice-versa. Zonas de fracturas ou falhas geológicas poderão, também, constituir-se em pontos de saída ou recarga da água da camada confinada.

Os aquíferos carsificados e fracturados podem ocorrer sob diversas condições de confinamento. Em condições livres ou de franco confinamento, podem apresentar elevadas velocidades de fluxo perante situações de recarga rápida, como acontece em episódios de fortes precipitações. O tempo de transporte de poluentes neste tipo de aquíferos (na ordem de horas a semanas) é muito inferior ao dos aquíferos porosos granulares, constituindo portanto aquíferos muito vulneráveis à poluição, exigindo assim uma atenção especial (Moinante, 2003).

## 2.4 - Áreas de Reabastecimento e Descarga do Aquífero

As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação do solo que favorecem o escoamento superficial, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada, sendo que a recarga de um sistema aquífero pode acontecer sob diferentes cenários (ABAS, 2010):

Zona de recarga é a área por onde ocorre o abastecimento hidráulico do aquífero, podendo esta ser directa ou indirecta. Na Zona de descarga dá-se parte do escoamento da água do aquífero (Figura 2.9).

A Zona de recarga directa é a área onde a água da precipitação, ou de outra proveniência, se infiltra directamente no aquífero, através das áreas onde a sua camada superior, permeável, aflora à superfície (Figura 2.11). Este tipo de recarga pode ainda acontecer através das fissuras das rochas sobrejacentes. A recarga é directa nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do nível freático. Nos aquíferos confinados, o reabastecimento ocorre essencialmente nos locais onde a camada portadora de água aflora à superfície.

Na Zona de recarga indirecta o reabastecimento do aquífero dá-se a partir da drenagem superficial das águas e do fluxo subterrâneo indirecto.

Há também a chamada recarga artificial ou induzida onde a realimentação aquífera é produzida pela acção do Homem, que consiste na transferência de água de outras fontes, por condução directa através de poços ou furos, por infiltração favorecida artificialmente, por inundação ou alteração das condições naturais. O objectivo é aproveitar a capacidade natural que os aquíferos possuem para armazenar água, aumentando, assim, a disponibilidade da água subterrânea.

A recarga de um aquífero condiciona não só o transporte de um poluente na zona não saturada, mas também a disponibilidade de água para os processos de dispersão e diluição, tanto na zona não saturada como na zona saturada. Deste modo, um grande volume de recarga corresponde, por um lado, a um maior potencial de poluição de águas subterrâneas mas, por outro lado, favorece a diminuição do potencial de poluição, ao possibilitar a diluição das substâncias poluentes (Oliveira, 2002).

A Zona de descarga é aquela por onde as águas emergem do sistema aquífero e servem de manancial de rios, poços, nascente. Por vezes a descarga é feita no Mar.

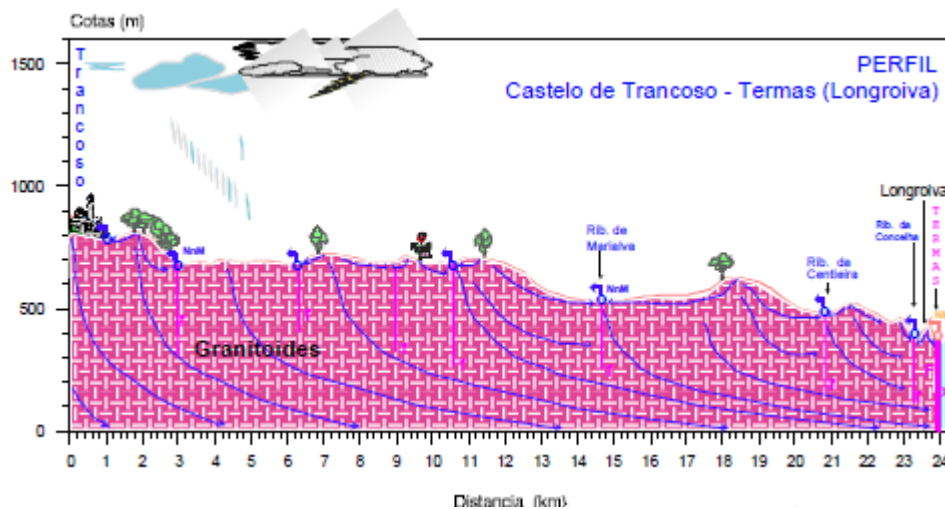


Figura 2.11 - Corte evidenciando a recarga da água subterrânea em profundidade para depois ressurgir junto às Termas de Longroiva (Mêda), no contacto Granito-Xistos (Ferreira Gomes, 2011).

## 2.5 - Função dos Aquíferos

Além de abastecer a água suficiente para manter os cursos de águas superficiais estáveis, os aquíferos também ajudam a evitar que estes transbordem dos leitos, uma vez que absorvem parte da água nos casos de fortes chuvadas. Os aquíferos também proporcionam uma forma de armazenar água doce protegendo-a da evaporação, outro serviço particularmente valioso em regiões quentes, propensas à seca, onde essas perdas podem ser extremamente altas.

Assim, de um modo detalhado, apresentam-se algumas das funções consagradas aos aquíferos (LNEG, 2010; ABAS, 2010):

Função de produção que corresponde à sua função tradicionalmente mais visível, de produção de água para o consumo humano, industrial ou agrícola.

Função de regularização em que se recorre à capacidade de armazenamento dos aquíferos para absorver excedentes de água que ocorrem durante as enchentes dos rios.

Função de filtro onde, valendo-se da capacidade filtrante e de depuração bio-geoquímica do maciço natural permeável, para extrair água naturalmente clarificada e purificada, reduzindo substancialmente os custos dos processos convencionais de tratamento.

Função transporte uma vez que o aquífero pode ser utilizado como um sistema de transporte de água entre zonas de recarga artificial ou natural e áreas de extração.

Função estratégica na medida em que a água contida num aquífero foi acumulada durante muitos anos ou até séculos e é uma reserva estratégica para épocas de pouca ou nenhuma chuva. Facilita a optimização da gestão das águas superficiais e subterrâneas de áreas metropolitanas.

Função energética, nos casos em que a utilização da água subterrânea, aquecida pelo gradiente geotérmico, como fonte de energia eléctrica ou térmica (aquecimento de água sanitária, espaços urbanos, estufas, de entre outros, com base na transferência directa de calor).

## 2.6 - Parâmetros Hidrogeológicos Fundamentais

Alguns da dinâmica dos aquíferos pode ser expressa e/ou prevista recorrendo à quantificação de certos parâmetros, conhecidos como *parâmetros hidrogeológicos fundamentais*; estes representam as características hidráulicas ou hidrodinâmicas de uma formação aquífera; a porosidade ( $\eta$ ), a condutividade hidráulica, ( $k$ ), a transmissividade (T), e o coeficiente de armazenamento (S), são alguns desses parâmetros.

### 2.6.1 - Porosidade

A porosidade ( $\eta$ ) é a relação entre o volume de vazios e o volume total e é expressa por:

$$\eta = \frac{V_v}{V_T} \quad (2.1)$$

onde:

$V_v$  - volume de vazios;

$V_T$  - volume total.

O valor da porosidade pode ser expresso em percentagem; para o efeito multiplica-se o valor de  $\eta$  por 100.

A porosidade depende do tamanho, forma, arranjo e homogeneidade dos grãos. Se os grãos são de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que no caso de grãos uniformes, uma vez que os grãos menores ocupam os espaços vazios entre os maiores.

A porosidade corresponde à soma da porosidade efectiva e da retenção específica, ou seja:

$$\eta = \eta_e + \eta \quad (2.2)$$

onde:

$\eta_e$  - porosidade efectiva;

$\eta$  - capacidade de retenção específica.

Porosidade efectiva ( $\eta_e$ ) é o parâmetro que mede a percentagem do volume de um solo ou formação aquífera disponível para armazenamento temporário de água. Corresponde à relação entre o volume de vazios ocupáveis pela água que circula por acção da gravidade e o volume total do solo ou formação aquífera.

$$\eta_e = \frac{V_D}{V_T} \quad (2.3)$$

onde:

$V_D$  - volume de água drenada por gravidade;

$V_T$  - volume total.

Retenção específica ( $\eta$ ) é a razão entre o volume de água não gravítica que um solo contém ou pode conter, e o volume total do mesmo.

Na Tabela 2.5 apresentam-se valores típicos de porosidade e porosidade efectiva para alguns tipos de rochas.

### 2.6.2 - Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica ( $k$ ) corresponde à propriedade de um meio, permitir a passagem de água ou outro fluido, em maior ou menor vazão por unidade de área. Esta propriedade depende das características do meio (porosidade e tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas) e das propriedades do fluido (viscosidade e peso específico) (EGEO, 2010a).

A condutividade hidráulica corresponde ao coeficiente de proporcionalidade  $k$  da *Lei de Darcy* (Figura 2.12), de acordo com o seguinte:

$$Q = k * A * \frac{(h_1 - h_2)}{L} = k * A * i \quad (2.4)$$

em que:

$Q$  - caudal;

$k$  - permeabilidade;

$A$  - secção atravessada;

$h_1$  - carga hidráulica no piezómetro 1;

$h_2$  - carga hidráulica no piezómetro 2;

$L$  - distância entre os piezómetros 1 e 2; e

$i$  - gradiente hidráulico.

Tabela 2.5 - Porosidade e Porosidade efectiva para alguns tipos de Rochas (Lencastre e Franco, 1992)

Valores de Porosidade ( $\eta$ ) e Porosidade Efectiva ( $\eta_e$ ) para algumas Rochas.										
Material		Porosidade, $\eta$ (%)					Porosidade Efectiva, $\eta_e$ (%)			
Tipo	Descrição	Média	Normal		Extraordi-nária		Média	Máxima	Mínima	Observa-ções
			Max.	Min.	Max.	Min.				
Rochas Eruptivas Vulcânicas	Piroclastos e tufos	30	50	10	60	5	5	20	0.0	C, E
	Escórias	25	80	10			20	50	1	C, E
	Pormitos	85	90	50			5	20	0.0	D
	Basaltos compactos	2	5	0.1			1	2	0.1	A
	Basaltos Vacualares	12	30	5			5	10	1	C
Rochas Eruptivas Plutónicas	Granito	0.3	4	0.2	9	0.05	0.2	0.5	0.0	A
Rochas Sedimentares Consolidadas	Argilito	5	15	2	30	0.5	2	5	0.0	E
	Arenito	15	25	3	30	0.5	10	20	0.0	F
	Cré brando	20	50	10			1	5	0.2	B
	Calcário detrítico	10	30	1.5			3	10	0.5	
	Calcário compacto	8	15	0.5	20		0.5	1	0.0	B
	Dolomito	5	10	2			0.5	1	0.0	B
Rochas Sedimentares Soltas	Aluviões	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Cascalheira	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			5	10	0.1	E
	Areias	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5	
	Siltos	40	50	35			10	20	2	E
	Arg. pouco consolidadas	45	60	40	85	30	2	10	0.0	E
	Solos superficiais	50	60	30			10	20	1	E
Rochas Metamórficas		0.5	5	0.2			0.5	2	0.0	A
A - $\eta$ e $\eta_e$ aumentam com a meteorização					D - $\eta$ pode diminuir e $\eta_e$ aumentar com o tempo					
B - $\eta$ e $\eta_e$ aumentam devido a fenómenos de dissolução					E - $\eta$ é muito variável, dependendo das circunstâncias					
C - $\eta$ e $\eta_e$ diminuem com o tempo					F - variável segundo o grau de cimentação e solubilidade					

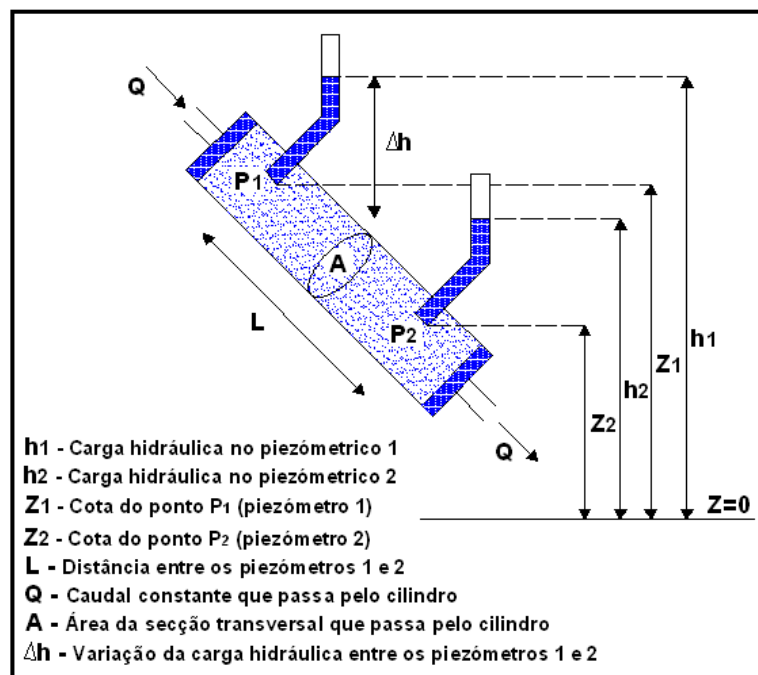


Figura 2.12 - Esquema do dispositivo utilizado por Henry Darcy para avaliação de  $k$  (EGEO, 2010b).

Segundo a lei de Darcy (eq. 2.4), o caudal de escoamento ou volume por unidade de tempo é (LNEG, 2010):

- i) Proporcional à secção transversal ( $A$ );
- ii) Proporcional à diferença de cargas hidráulicas ( $h_1$  e  $h_2$ ) entre os piezômetros 1 e 2;
- iii) Inversamente proporcional à distância entre os piezômetros de água que atravessa caudal de escoamento.

A condutividade hidráulica pode ser determinada através de fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo. Os seus valores são geralmente expressos em (m/s) ou (cm/s).

É muito comum relacionar a condutividade hidráulica com a porosidade, o que nem sempre é correcto. Um terreno muito poroso pode ter uma elevada condutividade hidráulica se os seus poros forem grandes e bem interconectados, como é o caso das areias, ou ter uma condutividade hidráulica quase nula se os seus poros, mesmo sendo muito grandes, mas semi-fechados, tal como se verifica em determinados materiais vulcânicos porosos originados pela libertação de gases.

Os materiais consolidados apresentam geralmente, uma condutividade hidráulica mais baixa do que a correspondente em materiais soltos, devido à presença do cimento que diminui a dimensão dos poros, chegando mesmo a impedir a comunicação entre estes (LNEG, 2010).

É possível classificar um maciço quanto à permeabilidade segundo o valor da condutividade hidráulica ( $k$ ) (Tabela 2.6) (Lambe e Whitman, 1979).

Tabela 2.6 - Classificação do maciço de acordo com o valor de k (Lambe e Whitman, 1979).

Classificação	k (cm/s)
Praticamente Impermeável	$< 10^{-7}$
Muito Baixa Permeabilidade	$10^{-7} - 10^{-5}$
Baixa Permeabilidade	$10^{-5} - 10^{-3}$
Média Permeabilidade	$10^{-3} - 10^{-1}$
Alta Permeabilidade	$> 10^{-1}$

### 2.6.3 - Transmissividade

A transmissividade (T) é o parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio em transmitir água. Pode ser definido como a quantidade de água que se escoou através da secção vertical do aquífero quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade e expressa-se em (m<sup>2</sup>/dia) ou (cm<sup>2</sup>/s).

Pode ser calculada através do produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero, ou seja:

$$T = K * b \quad (2.5)$$

onde:

k - condutividade hidráulica;

b - espessura saturada do aquífero.

### 2.6.4 - Coeficiente de Armazenamento

O coeficiente de armazenamento (S) é um parâmetro hidrogeológico adimensional que corresponde ao volume de água libertado por uma coluna de aquífero de altura igual à sua espessura e secção unitária, ao diminuir a carga hidráulica (nível piezométrico) de uma unidade. É avaliado por:

$$S = \frac{V}{A * \Delta h} \quad (2.6)$$

onde:

V - volume de água drenado;

A - área;

$\Delta h$  - variação da carga hidráulica.

Nos aquíferos livres o valor do coeficiente de armazenamento coincide praticamente com o valor da porosidade efectiva e o seu valor costuma oscilar entre 0,01 e 0,04. Nos aquíferos

confinados o valor deste coeficiente é muito inferior ao da porosidade efectiva, apresentando, geralmente, valores compreendidos entre  $10^{-3}$  e  $10^{-6}$  (LNEG, 2010).

## 2.7 - Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas

### Subterrâneas

Aquando da necessidade de protecção de uma captação de água subterrânea um dos factores a ter em consideração é a vulnerabilidade que um aquífero apresenta a ficar poluído. É portanto necessário conhecer as características intrínsecas de cada aquífero ou sistema de aquíferos de modo a conseguir estimar a sensibilidade que cada um apresenta à poluição, com a finalidade de se conseguir prever a sua resposta ao cenário de eventual poluição.

Embora uma primeira ideia leve a crer que os conceitos de vulnerabilidade à poluição e risco de poluição sejam idênticos, estes são na realidade conceitos diferentes, uma vez que a vulnerabilidade à poluição só leva a que haja risco de poluição se a esta se associar também a ocorrência de possíveis contaminantes capazes de penetrar no aquífero. Pode existir um aquífero com um índice de vulnerabilidade muito elevado, mas sem correr risco de poluição, se não existir carga poluente.

São vários os métodos para o mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas, merecendo referência os seguintes índices ou métodos: i) *AVI*, ii) *GOD*, iii) *EPPNA*, e iv) *DRASTIC*, que de uma forma resumida se apresentam em seguida.

#### 2.7.1- Índice de vulnerabilidade *AVI*

O Índice de vulnerabilidade *AVI* (Aquifer Vulnerability Index), de acordo com Moinante (2003), baseia-se essencialmente em dois parâmetros físicos: espessura e condutividade hidráulica de cada estrato sedimentar existente acima do aquífero superior.

Divide-se inicialmente a espessura de cada estrato pela sua condutividade hidráulica, o que permite obter a resistência hidráulica (a unidade é o tempo). Posteriormente somam-se as resistências hidráulicas dos diferentes estrados, obtendo-se um factor teórico *c* (a unidade é o tempo, em anos) que representa a resistência de um aquífero ao fluxo vertical. Quanto menor for a resistência hidráulica calculada maior será a vulnerabilidade do aquífero. Este método permite avaliar o tempo de propagação do poluente através da zona não saturada, podendo ser aplicado rapidamente devido ao pequeno número de parâmetros necessários, dependentes apenas da qualidade das colunas litológicas das captações. É necessário admitir que o fluxo tem apenas componente vertical.

Utilizando o valor de *c* ou do seu logaritmo, podem ser produzidas cartas de iso-resistência, definindo-se classes de magnitude de vulnerabilidade (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Classes de vulnerabilidade de acordo com a metodologia AVI (Moinante, 2003).

Classes de Vulnerabilidade de acordo com a metodologia AVI		
c (ano)	log c	Vulnerabilidade
0 a 10	< 1	Extremamente Alta
10 a 100	1 a 3	Alta
100 a 1000	2 a 3	Moderada
1000 a 10 000	3 a 4	Baixa
> 10 000	> 4	Extremamente Baixa

### 2.7.2- Índice de vulnerabilidade *GOD*

Para a definição deste índice contribuem três parâmetros (Foster, 1987):

- A ocorrência de águas subterrâneas (**Groundwater occurrence**) - tipo de aquífero, i.e. confinado, livre, semiconfinado;
- A classe global do aquífero (**Overall aquifer class**), no que respeita ao grau de consolidação e características geológicas;
- A profundidade do nível freático ou a espessura do tecto do aquífero (**Depth to groundwater table or strike**).

A classificação do aquífero é feita 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 entre si. O valor máximo do índice é 1, representando uma vulnerabilidade máxima. O menor valor é 0,016 se houver aquífero, ou zero se não houver aquífero.

### 2.7.3- Metodologia *EPPNA*

Este método baseia-se apenas no carácter litológico do meio; as classes de vulnerabilidade que considera são apresentadas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Classes de vulnerabilidade de acordo com a metodologia EPPNA (Moinante, 2003).

Tipo de Aquífero	Vulnerabilidade à Poluição	Indicador
Aquíferos em rochas carbonatadas de elevada carsificação	Alta	V1
Aquíferos em rochas carbonatadas de carsificação média/alta	Média a Alta	V2
Aquíferos em sedimentos não consolidados com ligação hidráulica com a água superficial	Alta	V3
Aquíferos em sedimentos não consolidados sem ligação hidráulica com a água superficial	Média	V4
Aquíferos em rochas carbonatadas	Média a Alta	V5
Aquíferos em rochas fissuradas	Baixa e Vulnerável	V6
Aquíferos em sedimentos consolidados	Baixa	V7
Inexistência de aquíferos	Muito Baixa	V8

#### 2.7.4- Índice de vulnerabilidade *DRASTIC*

A classificação segundo este método corresponde ao somatório ponderado dos valores atribuídos aos sete parâmetros seguintes:

- Profundidade do topo do aquífero (*Depth to Water*),
- Recarga do Aquífero (*Net Recharge*),
- Material do Aquífero (*Aquifer Media*),
- Tipo de Solo (*Soil Media*),
- Topografia (*Topography*),
- Influência da Zona Não Saturada (*Impacto of the Vadose Zone Media*),
- Condutividade Hidráulica do Aquífero (*Hydraulic Conductivity of the Aquifer*).

No cálculo do índice de vulnerabilidade *DRASTIC* recorre-se à expressão:

$$DRASTIC = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i \quad (2.7)$$

Na primeira fase da aplicação do método *DRASTIC* atribuem-se valores de 1 a 10 a cada parâmetro, em função das condições locais (valores elevados correspondem a uma maior vulnerabilidade) obtendo-se esses valores em tabelas que consideram a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o respectivo parâmetro. Na fase seguinte calcula-se o índice local multiplicando o valor atribuído ao parâmetro pelo seu peso relativo, em que cada parâmetro tem um peso pré-determinado que reflecte a sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade (os parâmetros mais importantes têm um peso de 5 e os menos importantes um peso de 1). Além dos factores do Índice *DRASTIC* normal estão disponíveis factores específicos para pesticidas, de acordo com os apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Pesos a atribuir a cada parâmetro do *DRASTIC* (geral e pesticidas) (Moinante, 2003).

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

A utilização do índice *DRASTIC* assume que o poluente é introduzido à superfície, o poluente é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração, o poluente tem mobilidade idêntica à da água e por fim que a área avaliada é superior a 0,4 km<sup>2</sup>.

## 2.8 - Capacidade Depurativa

Entende-se por capacidade depurativa como sendo a aptidão natural de atenuação dos contaminantes e/ou seus efeitos que o solo e subsolo apresentam. É possível quantificar esta capacidade de autodepuração de uma região se se conseguir medir o poder depurador dos materiais que a constituem, não só na zona não saturada como na saturada.

Um dos métodos capaz de avaliar, de uma forma quantitativa, o poder depurador de um espaço é o método de *Rehse* que tabela a relação entre o tipo de material e o seu poder depurador. Sendo que o resultado final é atingido depois de avaliado o trajecto do poluente vertical (zona não saturada) e horizontalmente (zona saturada). É um método particularmente direccionado para meios porosos e isotrópicos.

Assim, o poder depurador, de acordo com o método de *Rehse* (*in* Moinante, 2003) será dado por:

$$M_X = M_A + M_R \quad (2.8)$$

onde:

$M_X$  é o poder depurador total;

$M_R$  é o poder depurador na componente vertical da trajectória (zona não saturada);

$M_A$  é o poder depurador na componente horizontal da trajectória (zona saturada).

Quando  $M_X \geq 1$  a depuração está completa.

São ainda definidas as seguintes variáveis (Figura 2.13):

$$I_R = \frac{1}{H} \quad (2.9) \quad \text{e} \quad I_A = \frac{1}{L} \quad (2.10)$$

onde:

$I_A$  é o Índice de depuração na zona saturada (Tabela 2.10);

$I_R$  é o Índice de depuração na zona não saturada (Tabela 2.11);

$H$  é a espessura vertical da zona não saturada;

$L$  é a distância horizontal atravessada pelo poluente ao longo da zona saturada, sendo  $L$  o valor em incógnita.

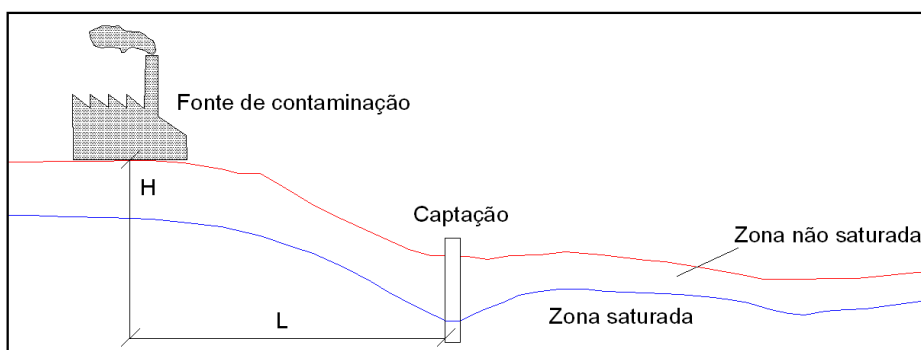


Figura 2.13 - Distâncias consideradas na aplicação do método de Rehse (adaptado de Moinante, 2003).

### Zona não saturada

Se ao longo do trajecto vertical a zona não saturada for constituída por diferentes tipos de materiais, então o valor do poder depurador na componente vertical ( $M_R$ ) é dado por:

$$M_R = \sum_{i=1}^n h_i I_{r_i} \quad (2.11)$$

Quando  $M_R \geq 1$  a depuração da zona não saturada está completa.

Quando  $M_R \leq 1$  a depuração da zona não saturada não está completa, sendo deste modo, possível a poluição da zona saturada.

Tabela 2.10 - Poder depurador da zona saturada (Moinante, 2003).

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 siltosa	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-argilosa	8	0,13
9	Cascalheira com abundante matriz arenosa 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

M = nº de classificação granulométrica ;  $I_r$  = Índice de depuração da zona não saturada.  
H = Espessura da zona não saturada necessária para a depuração (m)

Tabela 2.11 - Poder depurador da zona não saturada (Moinante, 2003).

M	Material	L (m)	$I_a = 1/L$
9	Cascalheira com abundante matriz arenosa 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	Cascalheiras 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 (m) ;  $I_a$  = Índice de depuração da zona saturada; a) Velocidade eficaz < 3m/d ; b) Velocidade eficaz entre 3 e 20 m/d ; c) Velocidade eficaz entre 20 e 50 m/d ; d) Velocidade eficaz > 50 m/d.

### Zona saturada

No caso de  $M_x = 1$  ocorre uma depuração completa antes de a água atingir a captação e então;

$$M_A = 1 - M_R \quad (2.12)$$

A distância  $L$ , necessária para que ocorra uma depuração total, é dada por:

$$L = \frac{M_A}{I_A} \quad (2.13)$$

Se não existir zona não saturada, a depuração total deverá acontecer na zona saturada com:

$$M_A = 1 \quad \text{e} \quad L = \frac{1}{I_A} \quad (2.14)$$

### Modificação de Bolsenkötter para meios cársicos e/ou fissurados

De acordo com Moinante (2003) este método é semelhante ao anterior mas incide particularmente sobre meios cársicos e fissurados, cujo poder depurador é inferior ao dos meios porosos, sendo necessária uma maior distância para que ocorra a depuração total. Deste modo, são calculados novos índices de depuração para zonas saturadas constituídas por rochas carbonatadas e/ou fissuradas (Tabela 2.12) verificando-se que:

$$I_R = \frac{0.5}{H} \quad (2.15)$$

Tabela 2.12 - Poder depurador das rochas carbonatadas e fissuradas (Moinante, 2003).

M	Material	H (m)	$I_r = 0.5/H$
1	Marga	10	0,05
2	Arenito com intercalações argilosas, Argila, Micaxisto e 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

## **2.9 - Modelação Geohidráulica**

De uma forma geral um modelo pode ser definido como um sistema que consegue reproduzir, pelo menos em parte, o comportamento de um processo natural (Wendland e Ruber, 1998).

Um modelo pode ainda ser explicado como sendo a representação simplificada de uma realidade difícil ou impossível de observar directamente, expressa em termos físicos ou matemáticos, desenvolvida para facilitar a descrição, análise e compreensão de comportamentos de um sistema ou fenómeno.

Esta realidade assume um interesse mais marcante no que às águas subterrâneas diz respeito, uma vez que grande parte deste fenómeno acontece afastado da capacidade visual Humana. É portanto, necessário conseguir definir-se o movimento da água no aquífero através da simplificação de uma situação real que apenas se conhece pontualmente através de um número limitado de dados. Esta simplificação é obtida através de procedimentos analíticos, matemáticos ou analógicos que permitem simular o comportamento de um determinado aquífero.

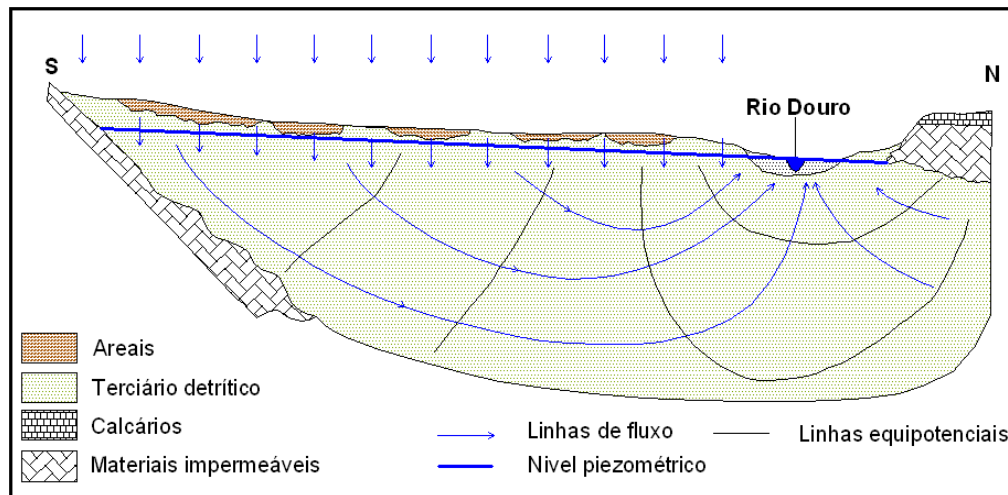


Figura 2.14 - Modelo geohidráulico conceptual sobre uma região em que a água subterrânea alimenta o Rio Douro (Adaptado de IGME, 2003).

Para se conhecer a hidrodinâmica de um aquífero é necessário conhecer a sua geometria, as propriedades físicas do meio em cada ponto do domínio (permeabilidade, transmissividade, coeficiente de armazenamento, etc.), as leis que regem o movimento da água, as condições do sistema num determinado tempo e a descrição das acções exteriores ao sistema. Com toda esta informação espera-se conseguir obter uma equação diferencial que descreva, com a maior aproximação à realidade, o movimento da água no interior do aquífero, desde que se dá a infiltração na zona de recarga, até ao momento em que esta ressurge (LNEG, 2010).

Os modelos geohidráulicos são instrumentos valiosos de apoio às eventuais tomadas de decisão referentes à gestão e/ou protecção de um aquífero. Serão tanto mais eficientes quanto maior o conhecimento que se tenha sobre estes. Exemplos de modelos geohidráulicos conceptuais são apresentados nas Figuras 2.11 e 2.14.

Na Engenharia, assim como em muitos campos da Ciência procura-se a compreensão dos fenómenos físicos. A análise destes fenómenos tem por base a sua descrição matemática como ponto de partida para o seu entendimento. O escoamento das águas subterrâneas não foge a esta regra, na medida em que se recorre a equações matemáticas para descrever os fenómenos envolvidos neste processo.

Os modelos matemáticos de sistemas de águas subterrâneas são portanto representações matemáticas dos mesmos, que incluem pressupostos e simplificações, pelo que a validação dos seus resultados está directamente relacionada com a efectividade com que esse modelo consegue representar o sistema geohidráulico. A Figura 2.15 esquematiza os aspectos a considerar na aplicação de um modelo, tanto no processo de desenho do software, como na sua aplicação com um propósito específico.

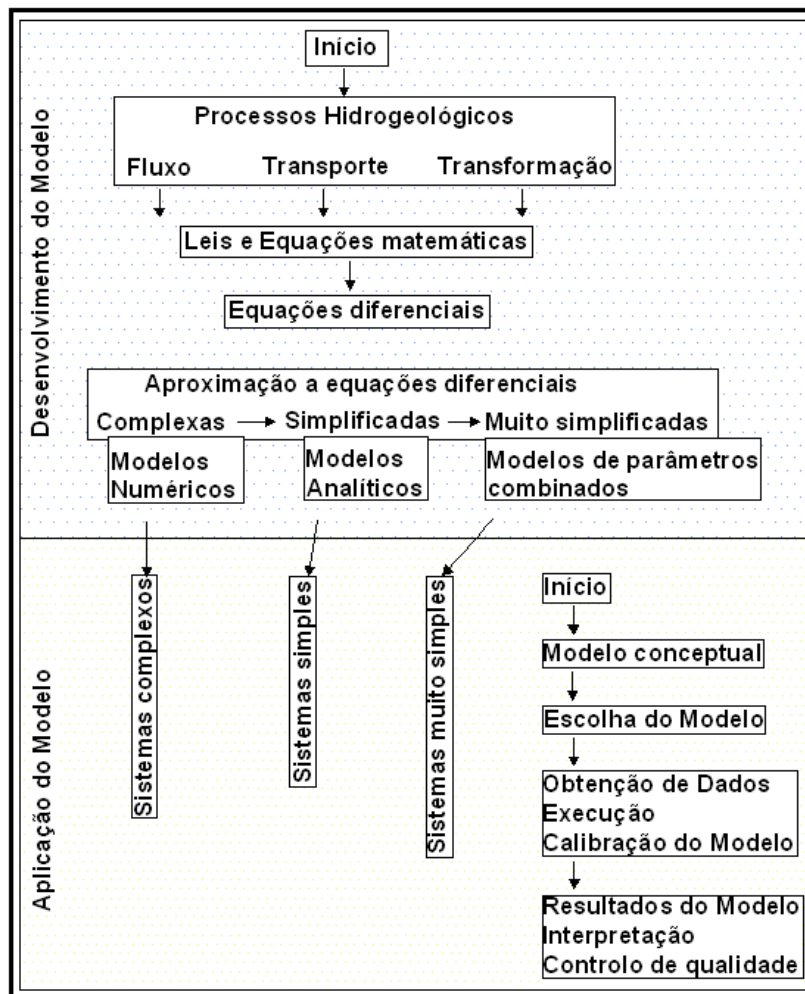


Figura 2.15 - Principais aspectos a considerar na aplicação de um modelo matemático a sistemas de águas subterrâneas (IGME, 2003).

O desenvolvimento de um modelo requer, à partida uma análise dos processos hidrogeológicos que afectam o fluxo de água subterrânea e o transporte de contaminantes. Passando depois para a fase em que é necessário determinar que leis e equações podem representar matematicamente um fenómeno hidrológico. Deste modo expressões gerais como a *Lei de Darcy* para fluxo laminar de água subterrânea ou as *leis de Fick* para transporte de contaminantes por biodegradação, assumem um papel de destaque neste processo (IGME, 2003).

A aplicação dessas leis à escala real requer a sua conversão em equações diferenciais, de modo a considerar as variações espaciais e temporais, que devem ser resolvidas ou aproximadas matematicamente para convertê-las em fórmulas que possam ser empregues nos cálculos hidrogeológicos. Na maioria dos casos a solução exacta de uma equação diferencial representando um fenómeno hidrogeológico não é viável, sendo nestes casos mais correcto a obtenção de uma solução aproximada, tendo por base novos pressupostos e simplificações.

O grau de simplificação depende da complexidade com que se queira que o modelo represente o sistema, o que dá lugar a três tipos de modelos; numéricos, analíticos e de parâmetros agregados, cujas principais características são a seguir descritas (IGME, 2003):

Modelos numéricos permitem aproximações complexas para equações diferenciais que tornam possível, por exemplo, modelar variações espaciais do sistema tais como heterogeneidade e anisotropia.

Os modelos numéricos dividem o sistema de água subterrânea em unidades mais pequenas, embora hidrogeologicamente representativas, para depois efectuarem uma discretização espacial em unidades geométricas, atribuindo um nó a cada uma destas. Cada um destes nós é considerado como um subsistema separado, o que permite incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros contemplados no modelo.

Estes modelos requerem a atribuição dos valores de cada parâmetro específico para cada unidade geométrica (célula), requerendo desta maneira uma elevada quantidade de dados.

Modelos analíticos são adequados para aproximações simplificadas às equações diferenciais para efectuar simulações de sistemas simples, sem complexidade espacial nem temporal.

Estes modelos resolvem analiticamente as equações diferenciais, para obter equações simples para o fluxo e para o transporte de contaminantes, requerendo que se assumam diversas simplificações. Os modelos analíticos simples consideram todo o sistema como uma única unidade e todo o período de tempo simulado, com uma única etapa. Ainda que estes modelos requeiram uma quantidade de dados variável, dependendo do modelo eleito, são muito mais simplistas que os modelos numéricos.

Modelos de parâmetros combinados consideram que o sistema a simular é composto por diversos elementos. Cada um, incluindo a água subterrânea existente no mesmo, é considerado homogéneo e isotrópico e pode ser simulado mediante uma equação simples. Uma vez aprovada a aproximação seleccionada convertem-se as fórmulas resultantes nos códigos informáticos que constituem o software.

A aplicação do modelo a um sistema de águas subterrâneas específico (Figura 2.15) requer, à partida, o desenvolvimento de um modelo conceptual. A formulação de um modelo conceptual aceitável e realista é a etapa mais importante para a aplicação de um modelo. Deve ainda incluir, além das simplificações do meio físico e das condições de contorno, o objectivo do modelo e a forma de o alcançar.

A etapa seguinte consiste em seleccionar de entre os diferentes modelos existentes, numéricos, analíticos ou de parâmetros combinados, sejam eles de acesso público ou de licença comercial, o que se ajuste melhor ao modelo conceptual e nível de complexidade do sistema. Depois de seleccionado o modelo deve proceder-se à obtenção dos dados que este requer, para depois se passar à fase de execução e calibração, para no final se passar à discussão dos resultados obtidos.

O Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo um dos métodos que mais amplamente é utilizado na Engenharia actual, utiliza uma série de elementos dispostos sobre o domínio físico do problema. Esses elementos são compostos por pontos nodais ou nós e sobre cada nó é equacionado o sistema de equações algébricas resultante.

Os elementos finitos são pequenas porções do domínio físico do problema, onde a variação de incógnitas do problema, no interior desses elementos, é aproximada através da aplicação de funções de interpolação.

O Método de Elementos Finitos foi inicialmente utilizado em aplicações relacionadas com a Aeronáutica, Engenharia Estrutural e Mecânica dos Sólidos, mas actualmente apresenta-se muito difundido nos diversos ramos da Engenharia, com particular interesse na Geohidráulica. Este método foi gerado com a intenção de representar melhor, problemas cujos domínios físicos fossem de geometria irregular, assim como forma a simplificar as aplicações das condições de contorno associadas, superando assim algumas das dificuldades sentidas, por exemplo, pelo Método das Diferenças Finitas.

Em termos computacionais, a sua implementação consiste na realização de sub-matrizes que computam as propriedades de cada elemento, através de coeficientes de influência, para então formar o sistema de equações algébricas associado à região do domínio físico do problema, isto é, ao conjunto de elementos utilizados para a caracterização. A aplicação das condições de contorno processa-se de uma maneira simples, ganhando-se assim a possibilidade de representar problemas com domínios de geometria emaranhada. Estas características fazem deste método uma ferramenta numérica muito mais versátil quando comparado a outros métodos.

As desvantagens deste processo prendem-se com a dificuldade de modelar meios infinitos e na grande entrada de dados necessária para a descrição de todo o domínio físico do problema. Este facto ganha relevância em problemas tridimensionais. Além disso, em algumas situações o método apresenta resultados imprecisos, muito embora apresente convergência com o aumento do grau de refinamento utilizado na caracterização. O facto de o método apresentar resultados imprecisos acontece sobretudo, para os casos onde as incógnitas apresentam descontinuidades, singularidades ou uma elevada taxa de variação. Há ainda a registar dificuldades na modelação de problemas com fronteira móvel.

A modelação tendo por base elementos finitos pode ser feita através de vários tipos de elementos onde a computação dos valores de base em funções de interpolação é feita nos nós (Figura 2.16). A subdivisão do interior do domínio em elementos é apontada, geralmente, como uma flexibilização para problemas de contornos irregulares e domínios heterogéneos ou anisotrópicos (Wang e Anderson, 1982; Wendland, 2003).

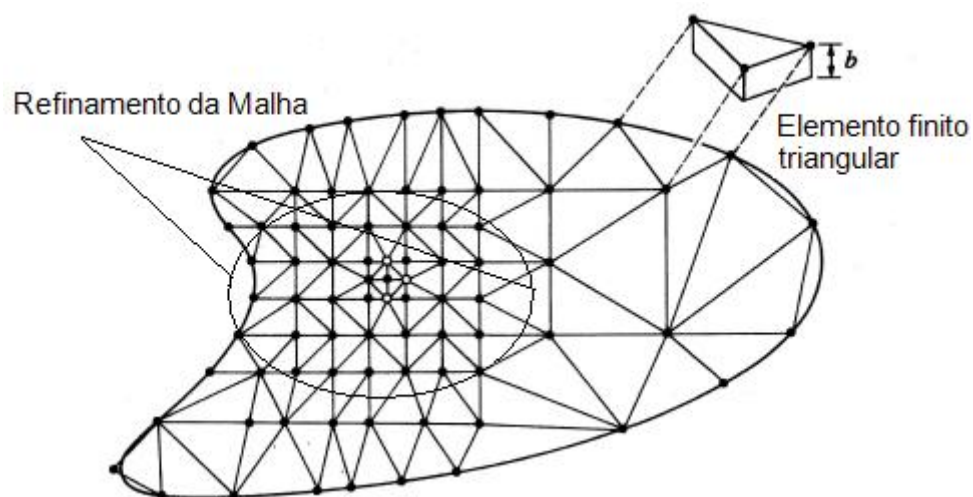


Figura 2.16 - Malha de elementos finitos com elementos triangulares (adaptado de Wendland, 2003).

## 2.10 - Causas mais comuns para a deterioração da qualidade da Águas Subterrâneas

Há várias causas passíveis de deteriorar a qualidade da água armazenada em ambiente subterrâneo. É possível classificar estas causas segundo a sua origem e os principais tipos de contaminantes que lhes estão associados, de acordo com o apresentado na Tabela 2.13.

Segundo Foster *et al.* (2002) a maior parte da água subterrânea tem a sua origem a partir do excesso de precipitação que se infiltra, de uma forma directa ou indirectamente, através da superfície do solo. Como consequência as actividades que se desenvolvem na superfície podem ameaçar a qualidade da água subterrânea. A poluição dos aquíferos ocorre nos pontos onde a carga contaminante no subsolo, gerada por emissões e lixiviados produzidos pela

actividade humana, é inadequadamente controlada e, em certos componentes, excede a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura (Figura 2.17).

Tabela 2.13 - Classificação de alguns problemas afectos às águas subterrâneas (Foster *et al.*, 2002).

Tipo de Problema	Causa Subjacente	Principais Contaminantes
Contaminação do Aquífero	Protecção inadequada de aquíferos vulneráveis contra emissões e lixiviados provenientes de actividades urbanas / industriais e intensificação de práticas de cultivo agrícola	Microorganismos patogénicos, nitrato ou amónio, cloreto, sulfato, boro, arsénio, metais pesados, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, certos pesticidas
Contaminação no próprio furo ou captação	Poço ou captação cuja construção ou projecto inadequado permite o ingresso directo de água superficial ou subterrânea poluída.	Principalmente microorganismos patogénicos
Contaminação Natural	Relacionada com a evolução química da água subterrânea e a dissolução de minerais, podendo ainda ser agravada pela poluição gerada pela actividade humana e/ou extracção excessiva.	Principalmente fluoreto e ferro solúvel, por vezes sulfato de magnésio, arsénio, manganês, selénio, cromo, assim como outras espécies inorgânicas
Intrusão Salina	Água subterrânea salina (por vezes também poluída) que por excesso de extracção, é induzida a fluir para o aquífero de água doce	Principalmente cloreto de sódio, mas pode incluir também contaminantes persistentes produzidos pela actividade humana

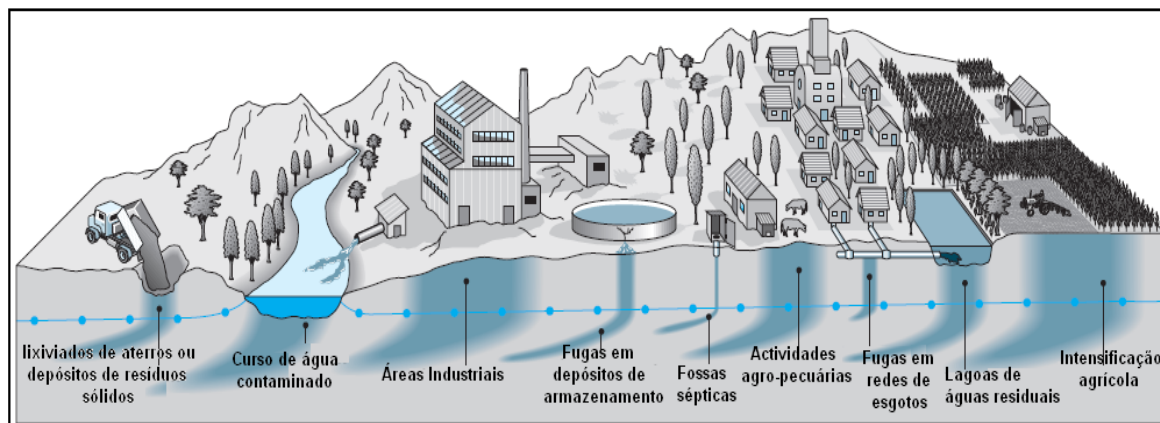


Figura 2.17 - Processos mais comuns envolvidos na contaminação de água subterrânea (adaptado de Foster *et al.*, 2002).

As camadas naturais do subsolo por vezes têm capacidade de atenuar alguns dos poluentes da água, no entanto esta eficácia difere com as diferentes características dos perfis do subsolo e os aquíferos são particularmente vulneráveis à poluição em lugares onde há, por exemplo, rochas consolidadas muito fissuradas. O grau de atenuação varia muito de acordo com os tipos de contaminantes e processos associados a um dado ambiente hidrogeoquímico.

A preocupação com a contaminação da água subterrânea concentra-se principalmente nos aquíferos livres ou sem confinamento, especialmente nas áreas em que a zona não saturada seja pouco espessa. Há no entanto riscos significativos de poluição associados a locais em que

os aquíferos, embora semi-confinados, tenham aquíferos confinantes relativamente pouco espessos e permeáveis.

Com a Tabela 2.14 pretende dar-se uma percepção dos tipos mais comuns de actividades capazes de causar uma contaminação significativa à água subterrânea, assim como dos compostos que geralmente poluem os cursos de água superficiais que, com grande frequência estão relacionados aos recursos hidrogeológicos.

Tabela 2.14 - Principais contaminantes das águas subterrâneas e respectivas fontes de poluição (adaptado de Foster *et al.*, 2002).

Origem da Poluição	Tipo de Contaminante
Actividade Agrícola	Nitrato, amónio, pesticidas, organismos fecais
Saneamento local	Nitrato, hidrocarbonetos halogenados, microorganismos
Oficinas e Estações de Serviço	Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, benzeno, fenóis
Depósitos de resíduos sólidos	Amónio, salinidade, hidrocarbonetos halogenados, metais pesados
Indústria Metalúrgica	Tricloroetileno, tetracloroetileno, hidrocarbonetos halogenados, fenóis, metais pesados, cianureto
Pintura e Esmaltação	Alquilbenzeno, hidrocarbonetos halogenados, metais, hidrocarbonetos aromáticos, tetracloroetileno
Indústria de Madeiras	Pentaclorofenol, hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos halogenados
Limpezas a seco	Tricloroetileno, tetracloroetileno
Indústria de Pesticidas	Hidrocarbonetos halogenados, fenóis, arsénio
Depósitos de lamas de ETAR's	Nitrato amónio, hidrocarbonetos halogenados
Curtumes de peles	Cromo, hidrocarbonetos halogenados, fenóis
Extracção/Exploração de gás e petróleo	Salinidade (cloreto de sódio), hidrocarbonetos aromáticos
Mineração de Carvão e outros Metais	Acidez, metais pesados, ferro, sulfatos.

É ainda importante realçar que certas actividades representam, com alguma frequência, uma ameaça desproporcionalmente grande à qualidade da água subterrânea. Por exemplo, em EPA (1993) é relatada a situação em que aproximadamente 4,5 litros de gasolina podem significar 4,5 Milhões de litros de água não potável. Assim, medidas de controlo da poluição directas, precisas e bem ajustadas podem produzir maiores benefícios por um custo relativamente baixo.

A actividade humana na superfície do terreno modifica os mecanismos de recarga dos sistemas aquíferos e introduz outros, podendo alterar a taxa, a frequência e a qualidade da recarga do aquífero. É o que acontece, de uma forma particular, nos climas áridos, podendo este fenómeno ter também lugar em regiões mais húmidas. Entender estes mecanismos e conseguir prever essas alterações é fundamental para um diagnóstico real do perigo de contaminação da água subterrânea.

O movimento da água e o transporte de contaminantes da superfície até aos aquíferos pode, em muitos casos, ser um processo lento, estando este dependente das características intrínsecas do subsolo assim com das propriedades dos próprios contaminantes (Figura 2.18), podendo levar anos ou décadas para que o impacto de um episódio de poluição por um contaminante se torne evidente nas captações de água.

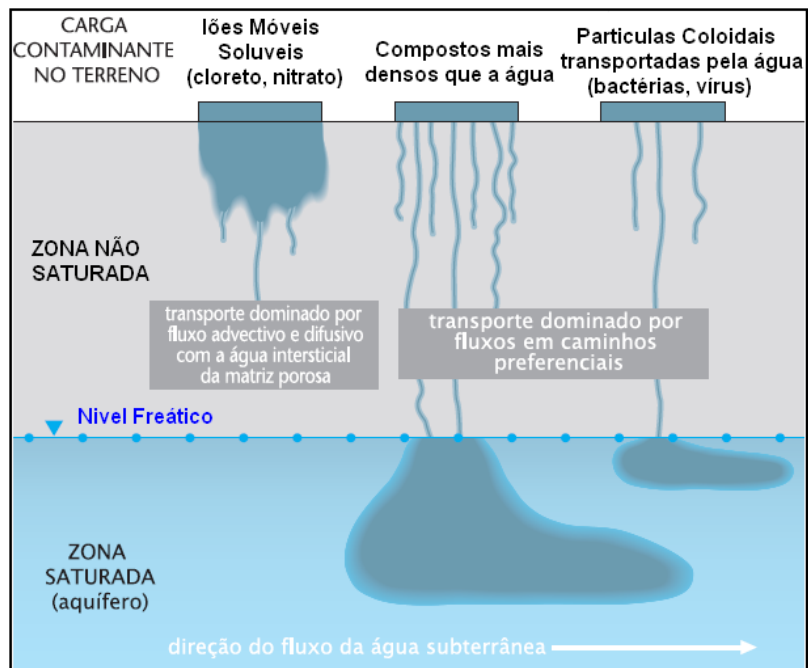


Figura 2.18 - Exemplos de desenvolvimento do fluxo de contaminação. Diversos tipos de agentes contaminantes (adaptado de *Foster et al.*, 2002).

## 2.11 - Perdurabilidade da Contaminação em Águas Subterrâneas

Um dos princípios mais empregues como base aos critérios de escolha das medidas de protecção de uma captação de água subterrânea, é a do tempo de trânsito de um poluente em meio hidráulico subterrâneo. Os mecanismos de acção destes meios de protecção procuram assegurar que haja tempo de transporte suficiente para que o agente contaminante se degrade, parcial ou totalmente, antes de atingir a captação. É portanto necessário conhecer-se um pouco mais sobre a dinâmica de degradação, no interior do aquífero, de alguns contaminantes passíveis de afectar este tipo de recursos.

### 2.11.1 - Perdurabilidade da contaminação microbiológica

A perdurabilidade da contaminação de origem bacteriológica em meio aquático subterrâneo, pode ter origens tão diversas como, por exemplo (IGME, 2003):

- indústrias alimentares (matadouros, fábricas de conservas, de enchidos, etc.);
- explorações animais;

- indústrias gerais (descargas vitivinícolas, processamento de gorduras, rações animais, etc.); e
- descargas urbanas, líquidos (rede de esgotos) e sólidos (aterros), não controlados (Figuras 2.19 e 2.20).

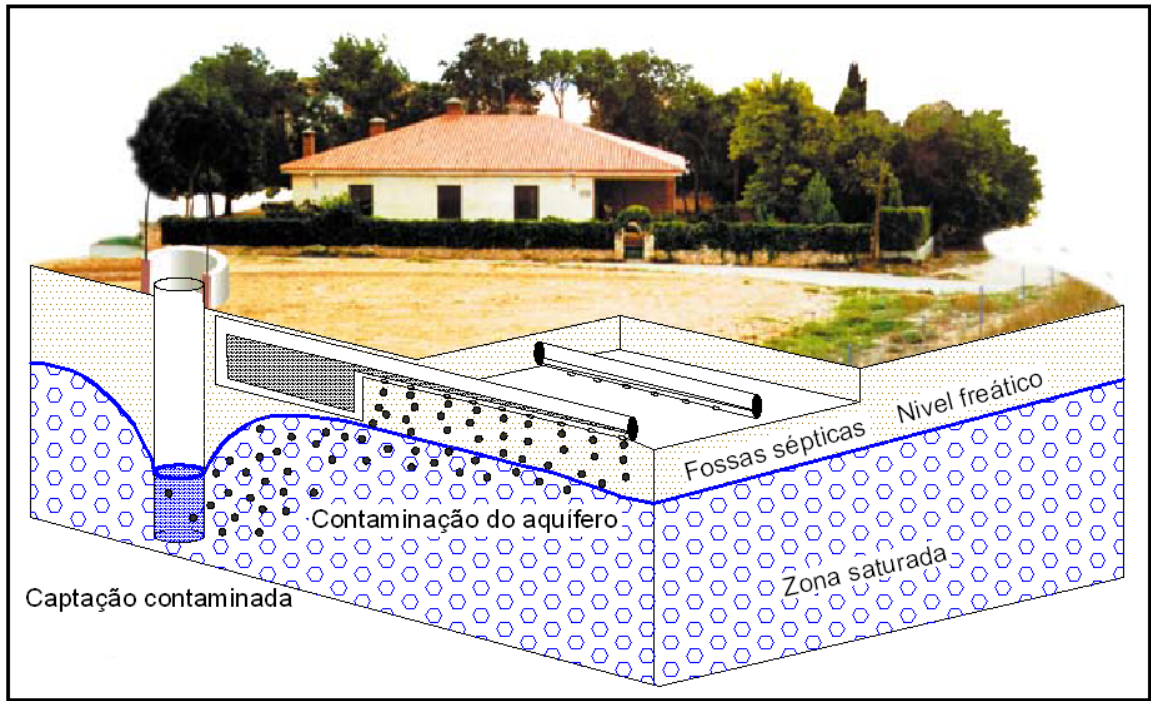


Figura 2.19 - Representação da contaminação de um aquífero por parte de fossas sépticas ou redes de esgotos (adaptado de López-Geta *et al.*, 2002).

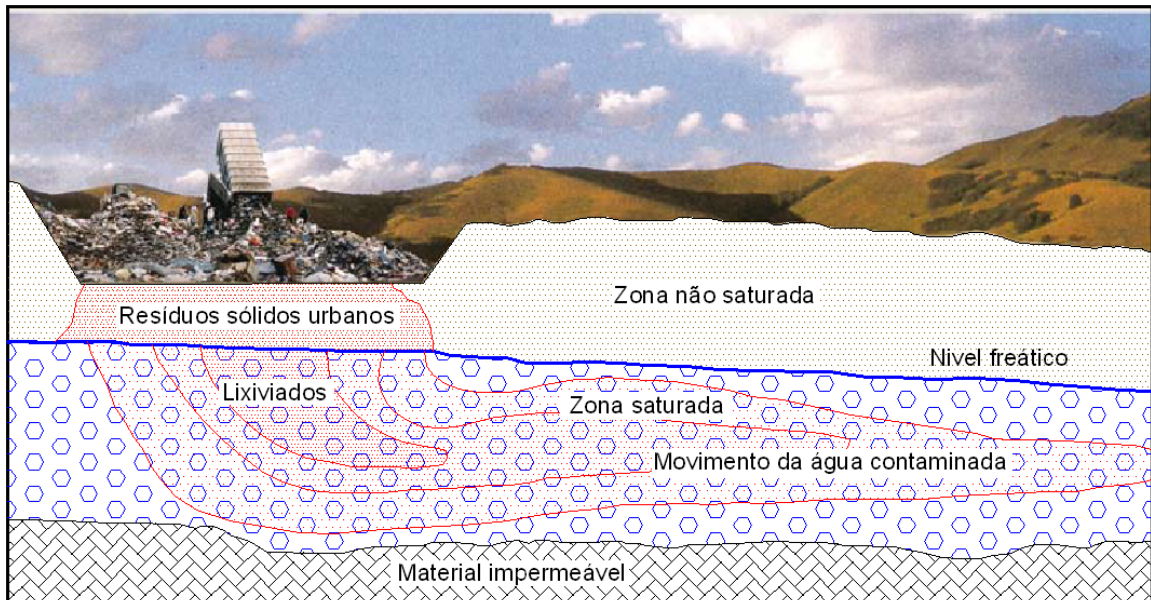


Figura 2.20 - Imagem figurativa do avanço da pluma de contaminante na zona saturada, a partir de lixiviados procedentes de um depósito de resíduos sólidos urbanos. Linhas de igual valor de contaminação (adaptado de López-Geta *et al.*, 2002).

As descargas de origem industrial produzem, de um modo geral, um grande volume de bactérias, mas apenas parte destas são agentes patogénicos para o Homem, enquanto que as descargas de origem urbana, além do seu grande volume, é-lhes inerente a capacidade de apresentar uma enorme variedade de espécies parasitárias, sendo que alguns destes organismos encontram em meio aquático uma parte natural do seu ciclo biológico, pelo que a sua permanência no aquífero será maior.

Esta cinética de degradação segue geralmente uma lei exponencial do tipo (IGME, 2003):

$$C_t = C_0 \exp [- \lambda_t (t - t_0 )] \quad (2.16)$$

onde:

$C_0$  é a concentração inicial;

$C_t$  é a concentração a um determinado tempo  $t$ ;

$\lambda_t$  é a constante de eliminação de bactérias ou de inactivação do vírus.

$$\lambda_t = \frac{0.693}{T} \quad (2.17)$$

Onde  $T$  é o tempo no qual desapareceram metade das bactérias ou vírus.  $T$  varia de 1 a 20 dias para as bactérias e de 10 a 100 dias no caso dos vírus.

A análise desde dados obriga à consideração de que os microrganismos não se encontram unicamente em suspensão na água mas também que estes estão sujeitos à interacção com o material que constitui o aquífero.

Não menos importante é a influência que alguns factores do meio ambiental têm na sobrevivência destes microrganismos. De entre os principais, destacam-se (IGME, 2003):

Nutrientes - uma vez que a ausência destes actua como um factor que limita o desenvolvimento bacteriano, pois há uma correlação, a titulo de exemplo, entre a quantidade de bactérias no aquífero e os níveis de fósforo na água.

Temperatura - dado que esta influi de forma directa sobre a taxa metabólica bacteriana, fazendo-a aumentar com o aumento da temperatura (Tabela 2.15).

Tabela 2.15 - Tempo de regeneração de organismos bacteriológicos para diferentes temperaturas da água subterrânea (IGME, 2003).

Temperatura [ $^{\circ}$ C]	Tempo de Regeneração [horas]
0	18,4
6	7
12	2,7
25	0,77
30	0,69

Cada organismo tem uma margem de temperatura na qual é capaz de sobreviver. Temperaturas que ultrapassem esta margem provocam-lhes danos irreparáveis, temperaturas abaixo desta margem raramente matam a bactéria, induzindo-lhes por sua vez um estado “latente” no qual estas não se multiplicam.

Humidade - as bactérias, de um modo geral, são favorecidas por terrenos que tenham alguma capacidade em reter a humidade, encontrando um ambiente hostil em terrenos secos.

pH - a maioria das bactérias crescem entre um pH de 4 a 9 ainda que o pH óptimo esteja entre os 6.5 e 8.5, que corresponde ao intervalo de valores de pH das águas naturais.

Luz - uma vez que a luz solar tem efeitos inibidores sobre bactérias não pigmentadas, são afectadas por factores como a intensidade da radiação e a turvação da água da mesma forma que os efeitos causados pela temperatura. O facto de se tratar de águas subterrâneas este factor, na maioria da vezes, é de pouca expressão.

Pressão hidrostática - o gradiente de pressão hidrostática é aproximadamente uma atmosfera a cada 10 metros de profundidade. A maior parte das bactérias presentes nos solos e em águas doces não crescem a partir de pressões superiores a duzentas atmosferas.

Turvação da água - esta pode dever-se a várias causas, entre as quais se destacam as partículas finas de origem mineral, os detritos constituídos por material orgânico ou inorgânico, ou ainda por microrganismos. Um aumento de turvação pode ter por consequência um aumento do número de bactérias, devido ao aumento dos níveis de matéria orgânica em suspensão. Este aumento não será tão significativo se a turvação da água tiver por base matéria inorgânica.

Matéria inorgânica - dado que a salinidade ou pressão osmótica influi de forma considerável no tipo de organismos que poluem as águas. Em termos gerais as bactérias de água doce apresentam um intervalo de valores óptimos entre os 10 a 50 gramas de sais. Este problema é mais visível em aquíferos próximos da linha de costa, com possibilidade de intrusão marinha. No caso de descargas urbanas e aquíferos contaminados encontram-se com frequência bactérias tolerantes a percentagens de 15 a 25 % de sais. O amónio e o nitrito desempenham um papel importante no

fornecimento de energia a algumas espécies de bactérias, porém alguns metais pesados (Cu, Hg, Ag, etc) aparentam ter um efeito bactericida.

Gases - a maioria dos microrganismos em meio aquático subterrâneo tem capacidade anaeróbia facultativa, visto que se adaptam a condições de ausência ou presença de oxigênio, de maneira em que as oscilações dos níveis de oxigênio não parecem afectar as bactérias anaeróbias, que verão o seu desenvolvimento travado por pressões parciais de oxigênio muito baixas.

Convém ainda referir que as bactérias patogénicas têm no solo um ambiente estranho, onde existe uma forte disputa com os organismos autóctones do meio, de modo a que a sua permanência é maior, por exemplo em solos previamente esterilizados.

Os factores que afectam a infiltração e o movimento das bactérias no solo podem ainda resumir-se a (IGME, 2003):

- a) Características físicas do solo, tais como: textura; distribuição do tamanho das partículas; tipo e percentagem de argilas; tipo e percentagem de matéria orgânica; capacidade de intercâmbio catiónica ou distribuição do tamanho dos poros; e
- b) Factores químicos e ambientais do solo: temperatura; percentagem de humidade; fluxo de água do solo; tipo e concentração de iões na solução do solo; *pH*; densidade e dimensões das bactérias; natureza da matéria orgânica ou disputa com a microflora autóctone do solo.

Através da Figura 2.21 é possível verificar que a distância que as bactérias podem percorrer é muito variável e está directamente relacionada com o tipo de materiais que constituem o meio subterrâneo. No caso de aquíferos cársicos ou fissurados, onde há lugar à ocorrência de uma rápida circulação da água, a maior parte dos fenómenos depuradores anteriormente vistos, não existem ou acontecem de uma forma limitada, o que faz com que o tempo de trânsito seja muito menor, dificultando assim a actuação dos factores inibidores. Neste tipo de aquíferos observa-se que a percentagem de bactérias tem uma relação estreita com a turvação da água, devido ao facto das características do fluxo de água influenciarem significativamente os processos de sedimentação ou mobilização. Exemplo disso mesmo é, no caso de fortes chuvadas, aumentarem consideravelmente os níveis de bactérias na água, por arraste na superfície, mais remoção das bactérias sedimentadas nas fissuras e fracturas. Fortes bombagens têm o mesmo efeito.

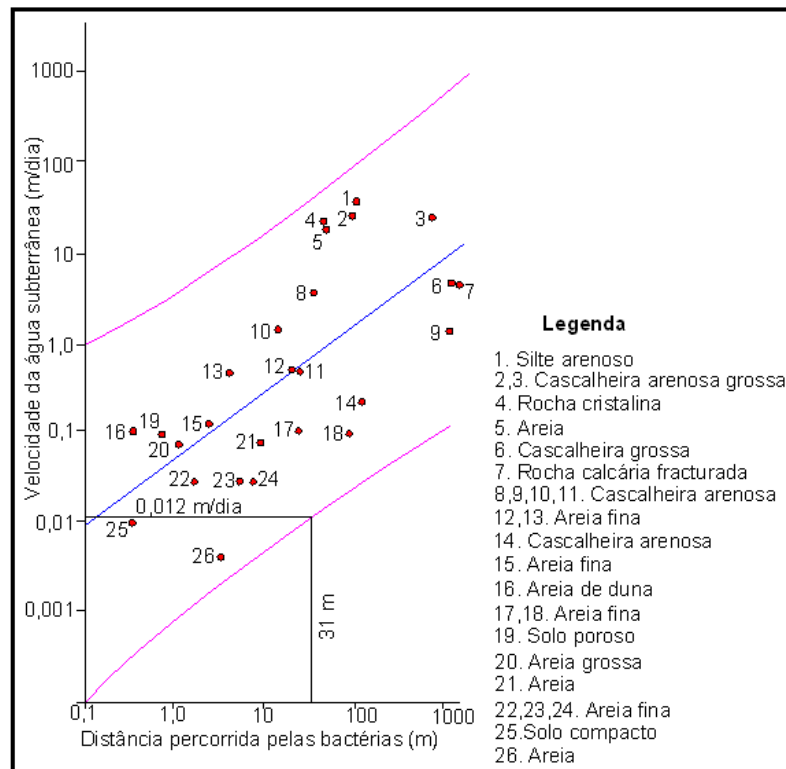


Figura 2.21 - Distâncias percorridas por bactérias em meio saturado (adaptado de IGME, 2003).

### 2.11.2 - Perdurabilidade da contaminação química

A contaminação química, da mesma forma que a bacteriológica, é afectada quando do atravessamento do aquífero, por processos capazes de modificar, tanto a sua concentração inicial como a sua natureza. A mobilidade dos diferentes contaminantes químicos depende basicamente da sua natureza e dos condicionantes do meio que os rodeia. Devido à sua importância analisam-se de seguida três casos (IGME,2003):

i) Metais Pesados; a sua maior ou menor mobilidade vai depender dos aniões presentes no meio com que se combinam, formando compostos mais ou menos solúveis (carbonatos, sulfatos, hidróxidos, cloretos, etc.).

As argilas e hidróxidos podem reter metais mediante processos de adsorção e de intercâmbio iónico, processos que apresentam uma certa selectividade, onde as variações de temperatura ou *pH* podem influenciar a sua dinâmica.

ii) Hidrocarbonetos; a sua origem é amplamente variada, mas quase sempre associada a actividades urbanas ou industriais. Numa primeira fase e ainda antes de se dar a infiltração no terreno, estes perdem grande parte dos seus compostos voláteis, para em fases posteriores o seu desaparecimento ser deixado a cargo dos fenómenos de diluição (em pequena medida) mas principalmente da degradação bacteriana (Figura 2.22).

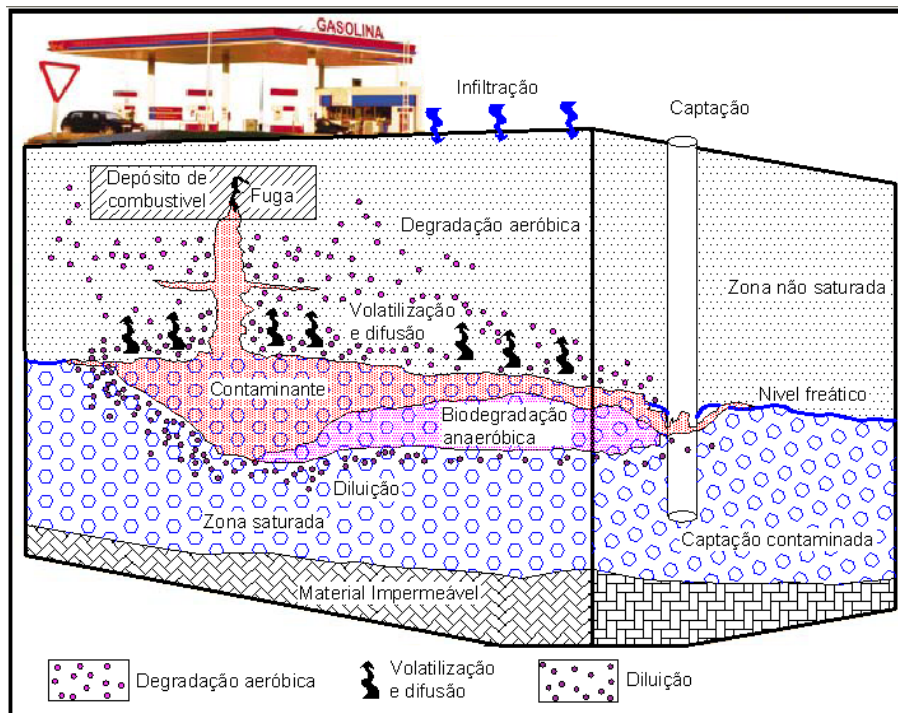


Figura 2.22 - Esquema representativo da contaminação de uma captação de água subterrânea devido à fuga de carburante de um depósito de hidrocarbonetos. Processos envolvidos na sua degradação (adaptado de Lopéz-Geta *et al.*, 2009).

O movimento destas substâncias no subsolo está fortemente ligado à sua viscosidade (frequentemente elevada), à sua miscibilidade com a água (geralmente muito baixa) e a forma como ocorreu o episódio do seu derrame, uma vez que o seu transporte em meio aquático será mais fácil se, por exemplo estes foram derramados como emulsões em água.

Como geralmente estas substâncias são menos densas que a água, localizam-se sobre a sua superfície onde acabam por se espalhar. Variações do nível freático têm como efeito o facto destas poderem atingir pontos bastante profundos da zona saturada.

iii) Pesticidas; estes são nos dias de hoje aplicados em grandes áreas, nos meios rurais (Figura 2.23). No transporte subterrâneo deste tipo de substância, um dos factores que tem grande importância é a sua solubilidade na água, sendo mais rapidamente transportados aqueles cuja solubilidade seja mais elevada. Os fenómenos de adsorção podem chegar a reter alguns pesticidas de forma completa, mas será a degradação bacteriana o factor predominante na sua eliminação. A degradação do pesticida nem sempre conduz a um composto menos tóxico, ao contrário, é frequente que se dê a activação de alguns compostos que dão origem a produtos mais perigosos que os originais.



Figura 2.23 - Aplicação de pesticidas em extensas áreas agrícolas (GF, 2011).

## 2.12 - Perímetros de Protecção.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 382/99 (DL, 1999a), dedicado à optimização de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas, a qualidade das águas subterrâneas é susceptível de ser afectada pelas actividades sócio-económicas, designadamente pelos usos e ocupações do solo, em particular pelas áreas urbanas, infra-estruturas e equipamentos, agricultura e zonas verdes. A contaminação das águas subterrâneas é, na generalidade das situações, persistente, pelo que a recuperação da qualidade destas águas é, em regra, muito lenta e difícil.

Um instrumento preventivo para assegurar a protecção das águas subterrâneas é a instituição de perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas. Trata-se de áreas definidas na vizinhança dessas captações em que se estabelecem restrições de utilidade pública ao uso e transformação do solo, em função das características relativas às formações geológicas, que armazenam as águas subterrâneas exploradas pelas captações e dos caudais extraídos, como forma de salvaguardar a protecção da qualidade dessas águas subterrâneas.

O Artigo n.º 3 do mesmo Decreto-Lei (DL, 1999a) define as três zonas de protecção que constituem o perímetro de protecção:

Zona de protecção imediata é área da superfície do terreno contígua à captação em que, para a protecção directa das instalações da captação e das águas captadas, todas as actividades são, por princípio, interditas;

Zona de protecção intermédia é área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção imediata, de extensão variável, tendo em conta as condições geológicas e estruturais do sistema aquífero, definida por forma a eliminar ou reduzir a poluição das águas subterrâneas onde são interditas ou condicionadas as actividades e as instalações susceptíveis de poluírem aquelas águas, quer por infiltração de poluentes, quer por poderem modificar o fluxo na captação ou favorecer a infiltração na zona próxima da captação;

Zona de protecção alargada é área da superfície do terreno contígua exterior à zona de protecção intermédia, destinada a proteger as águas subterrâneas de poluentes persistentes, tais como compostos orgânicos, substâncias radioactivas, metais pesados, hidrocarbonetos e nitratos, onde as actividades e instalações são interditas ou condicionadas em função do risco de poluição das águas, tendo em atenção a natureza dos terrenos atravessados, a natureza e a quantidade de poluentes, bem como o modo de emissão desses poluentes.

Os perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público visam, assim (DL, 1999a):

- prevenir, reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltração de águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes de rega e de lavagens;
- potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas;
- prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de poluentes;
- proporcionar a criação de sistemas de aviso e alerta para a protecção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de águas subterrâneas, em situações de poluição acidental dessas águas.

Na Tabela 2.16 são apresentadas as restrições que cada uma das zonas de protecção impõe ao uso do solo.

A delimitação dos perímetros de protecção é realizada recorrendo a métodos hidrogeológicos apropriados que têm em conta os caudais de exploração, as condições da captação, as características do sistema aquífero explorado mas também têm que atender, necessariamente, aos aspectos económicos, já que a delimitação dos perímetros de protecção das captações impõe restrições ao uso do solo em áreas significativas que se traduzem em custos económicos às populações.

## **2.13 - Métodos para a definição de perímetros de protecção de captações de água subterrânea**

Existem actualmente diversos métodos para a definição de perímetros de protecção, que variam tanto nos custos dos estudos que lhes estão inerentes, como no grau de exigência que se espera dos resultados. Não sendo de descurar que um perímetro de protecção será tão útil e fiável quanto completo for o estudo que lhe serviu de base.

Nos métodos que utilizam o tempo de trânsito de contaminantes na determinação do perímetro de protecção, usualmente é considerado um tempo de trânsito de 1, 50 e 3500 dias para as zonas de protecção imediata, intermédia e alargada, respectivamente.

Tabela 2.16 - Instalações e Actividades condicionadas ou interditas em cada uma das zonas de protecção definidas pelo Decreto-Lei 382/99 (DL, 1999a).

Actividades e Instalações susceptíveis de interdição ou condicionamento	Actividades e tipo de instalações a interditar
<b>Zona de protecção imediata</b>	
-	Qualquer instalação ou actividade, com excepção das que têm por finalidade a conservação, manutenção e melhor exploração da captação
<b>Zona de protecção intermédia</b>	
Pastorícia	Infra-estruturas aeronáuticas
Usos agrícolas e pecuários	Oficinas e estações de serviço de automóveis
Aplicação de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar subs. tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis	Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos;
Edificações	Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis
Estradas e caminhos de ferro	Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos ou de outras substâncias perigosas
Parques de campismo	
Espaços destinados a práticas desportivas	Canalizações de produtos tóxicos
Estações de tratamento de águas residuais	
Colectores de águas residuais	Lixeiras e aterros sanitários
Fossas de esgoto	
Unidades industriais	
Cemitérios	
Pedreiras e quaisquer escavações	
Explorações mineiras	
Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem	
Depósitos de sucata	
<b>Zona de protecção alargada</b>	
Utilização de pesticidas móveis e persistentes na água ou que possam formar subs. tóxicas, persistentes ou bioacumuláveis	Transporte de hidrocarbonetos, de materiais radioactivos e de outras substâncias perigosas
Colectores de águas residuais	Depósitos de materiais radioactivos, de hidrocarbonetos e de resíduos perigosos
Fossas de esgoto	
Lagos e quaisquer obras ou escavações destinadas à recolha e armazenamento de água ou quaisquer substâncias susceptíveis de se infiltrarem	Canalizações de produtos tóxicos
Estações de tratamento de águas residuais	
Cemitérios	Refinarias e indústrias químicas
Pedreiras e explorações mineiras	
Infra-estruturas aeronáuticas	Lixeiras e aterros sanitários
Oficinas e estações de serviço de automóveis	
Postos de abastecimento e áreas de serviço de combustíveis	
Depósitos de sucata	

### 2.13.1 - Método do Raio Fixo

Este método, utilizado pelo Decreto-Lei nº 382/99 (DL, 1999a) na definição do perímetro de protecção, é um método em que, segundo Moinante (2003), utiliza a *equação volumétrica* para calcular o raio (r) de uma secção cilíndrica do aquífero, centrada na captação (Figura 2.24), e com capacidade para conter o volume de água captada durante um determinado tempo de propagação. O valor do raio (r) é avaliado por:

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot n_e \cdot H}} \quad (2.18)$$

onde:

- r corresponde ao raio do perímetro de protecção (incógnita);
- Q o caudal de exploração;
- t o tempo necessário para o poluente atingir a captação;
- $n_e$  é porosidade efectiva do aquífero;
- H a espessura saturada na captação.

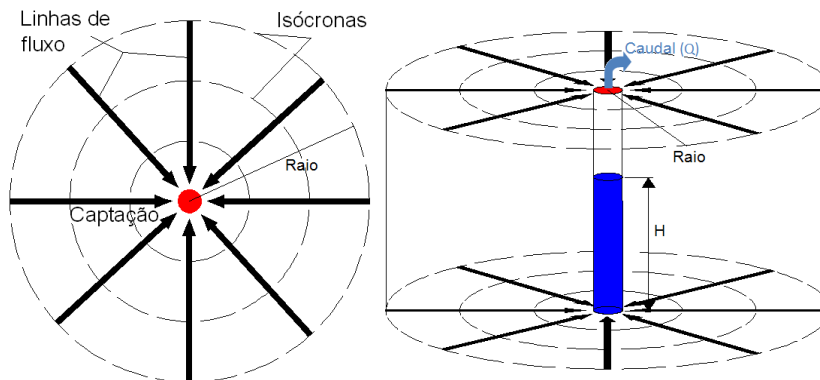


Figura N. 2.24 - Método do raio fixo calculado com o Decreto-Lei nº 382/99 (DL,1999a) (adaptado de IGME, 2003).

No sentido de adequar as várias situações possíveis, o Decreto-Lei (DL,1999a) sistematiza ainda as formações aquíferas em 6 tipos (Tabela 2.17) e situa o valor do raio (r) dentro do intervalo de valores que considera aceitáveis para a zona de protecção intermédia e alargada (Tabela 2.18).

Tabela 2.17 - Descrição do tipo de sistema de aquífero (DL, 1999a).

Formação	Descrição
Tipo 1	Sistema aquífero confinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas
Tipo 2	Sistema aquífero livre cujo suporte litológico é constituído por formações porosas
Tipo 3	Sistema aquífero semiconfinado cujo suporte litológico é constituído por formações porosas
Tipo 4	Sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações carbonatadas
Tipo 5	Sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas fissuradas
Tipo 6	Sistema aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações ígneas e metamórficas pouco fissuradas e ou alteradas

Tabela 2.18 - Valores do raio (r), de cada zona de protecção, de uma captação de água subterrânea. Dependentes do tipo de sistema de aquífero (DL, 1999a).

Tipo de sistema de aquífero	Zona de Protecção		
	Imediata	Intermédia	Alargada
Tipo 1	r = 20 m	r é o maior valor entre 40 m e $r_1(50d)$	r é o maior valor entre 350 m e $r_1(3500d)$
Tipo 2	r = 40 m	r é o maior valor entre 60 m e $r_2(50d)$	r é o maior valor entre 500 m e $r_2(3500d)$
Tipo 3	r = 30 m	r é o maior valor entre 50 m e $r_3(50d)$	r é o maior valor entre 400 m e $r_3(3500d)$
Tipo 4	r = 60 m	r é o maior valor entre 280 m e $r_4(50d)$	r é o maior valor entre 2400 m e $r_4(3500d)$
Tipo 5	r = 60 m	r é o maior valor entre 140 m e $r_5(50d)$	r é o maior valor entre 1200 m e $r_5(3500d)$
Tipo 6	r = 40 m	r é o maior valor entre 60 m e $r_6(50d)$	r é o maior valor entre 500 m e $r_6(3500d)$

### 2.13.2 - Método de Wyssling

Wyssling propôs um método para a optimização do perímetro de protecção que consiste no cálculo da zona de chamada de uma captação, admitindo aquíferos com porosidade intergranular e homogéneos. Este é um método que considera o gradiente hidráulico do maciço (i) e tem como principal vantagem o facto de ter uma perspectiva mais proteccionista a montante do que a jusante da captação.

A zona de chamada corresponde à porção da zona de influência onde se verifica o rebaixamento do nível freático e onde as linhas de fluxo se dirigem para a captação (Figura 2.25).

Para a aplicação deste método é necessário o conhecimento dos valores dos seguintes parâmetros (*in* Ferreira Gomes *et al.*, 2008b):

Largura da frente de chamada (B): 
$$B = \frac{Q}{K \cdot b \cdot i} \quad (2.19)$$

Raio de chamada ( $X_0$ ): 
$$X_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i} \quad (2.20)$$

Largura da frente de chamada à altura da captação ( $B'$ ): 
$$B' = \frac{B}{2} \quad (2.21)$$

Velocidade eficaz ( $v_e$ ): 
$$v_e = \frac{K \cdot i}{n} \quad (2.22)$$

Distância a montante da captação ( $S_0$ ) (na direcção do fluxo):

$$S_0 = \frac{+ l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_0)}}{2} \quad (2.23)$$

Distância a jusante da captação ( $S_u$ ) (na direcção do fluxo):

$$S_u = \frac{- l + \sqrt{l \cdot (l + 8 \cdot X_0)}}{2} \quad (2.24)$$

onde:

- (Q) é o caudal de exploração;
- (k) a condutividade hidráulica;

- (b) a espessura saturada do aquífero;
- (t) o tempo necessário para o poluente atingir a captação;
- (i) o gradiente hidráulico = declive da superfície freática;
- ( $n_e$ ) a porosidade efectiva;
- ( $L$ ) =  $ve * t$ .

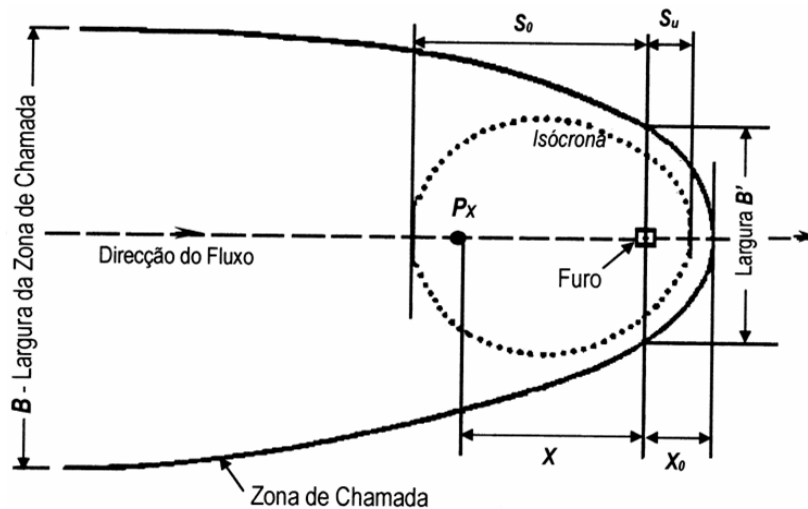


Figura 2.25 - Esquema representativo do Método de Wyssling para a definição do perímetro de protecção de uma captação de água subterrânea (adaptado de IGME, 2003).

### 2.13.3 - Método de Jacobs e Bear

Segundo IGME (2003) o método de *Jacobs e Bear* requer aquíferos homogêneos, isotrópicos e de extensão infinita, submetidos a um gradiente regional uniforme e um único furo. As linhas de corrente e equipotenciais características são de acordo com o apresentado na Figura 2.26.

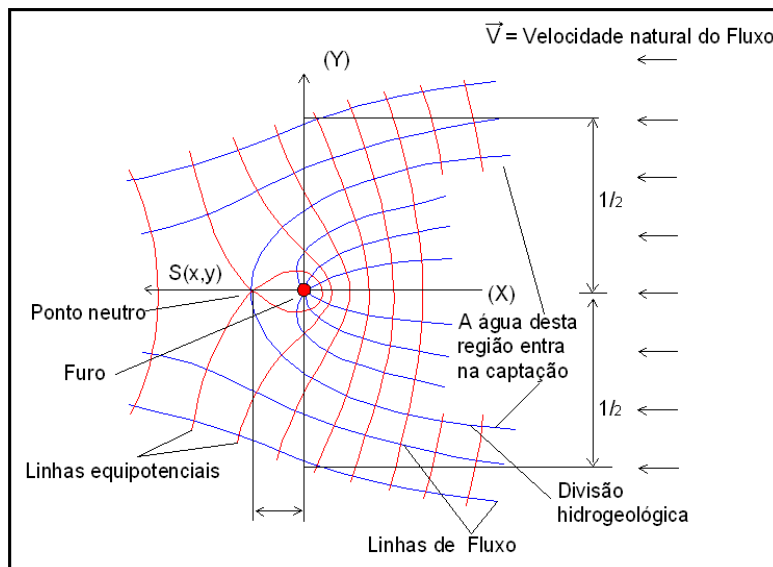


Figura 2.26 - Elementos para aplicação do método de Jacobs e Bear na optimização de perímetros de protecção (adaptado de IGME,2003).

As isócronas são definidas com recurso à seguinte expressão, função de variáveis adimensionais:

$$t_R = \frac{X_R}{10} - \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left( \cos \pi \cdot \frac{Y_R}{10} + \frac{X_R}{Y_R} \cdot \sin \pi \cdot \frac{Y_R}{10} \right) \quad (2.25)$$

com:

$$X_R = \frac{20 \cdot V \cdot b}{Q} \cdot x \quad (2.26)$$

$$Y_R = \frac{20 \cdot V \cdot b}{Q} \cdot y \quad (2.27)$$

$$e \quad t_R = \frac{2 \cdot T^2 \cdot i^2 \cdot t}{\eta_e \cdot Q \cdot b} \quad (2.28)$$

onde :

$t$ , é o tempo correspondente à isócrona que se quer calcular;

$V$ , é a velocidade de Darcy;

$Q$ , o caudal de extracção contínuo;

$\eta_e$ , é a porosidade efectiva;

$b$ , é a espessura do aquífero;

$T$ , a transmissividade;

$i$ , é gradiente hidráulico;

$X_R, Y_R, t_R$ , são as variáveis reduzidas.

Jacobs e Bear construíram um ábaco que consiste num conjunto de curvas, correspondendo cada uma ao tempo de trânsito para o qual se resolveram as equações, cujo eixo de simetria coincide com a direcção do fluxo de água subterrânea.

Para a resolução deste método é necessário conhecer o valor dos seguintes parâmetros hidráulicos:

$i$ , gradiente hidráulico, obtido a partir das isolinhas conhecidas;

$Q$ , caudal de extracção contínuo nas 24 horas do dia;

$n_e$ , porosidade efectiva;

$T$ , transmissividade;

$b$ , espessura do aquífero;

$t$ , tempo correspondente à isócrona que se quer calcular.

O procedimento do cálculo passa por se traçar, em primeiro, uma recta paralela à direcção do fluxo e que passa pela captação e uma segunda recta perpendicular a esta.

No passo seguinte calcula-se o tempo reduzido ( $t_R$ ) através da equação:

$$t_R = \frac{2 \cdot T^2 \cdot i^2 \cdot t}{\eta_e \cdot Q \cdot b} \quad (2.29)$$

No seguimento, sobre o ábaco encontra-se a curva correspondente ao tempo reduzido ( $t_R$ ); no caso de não coincidir com nenhuma das desenhadas é necessário recorrer-se à interpolação entre os dois mais próximos, obtendo-se os pontos onde são interceptados os eixos das coordenadas (Figura 2.27).

No passo seguinte calculam-se as coordenadas reais dos pontos através das fórmulas de transformação:

$$X(m) = \frac{Q}{20.T.i} \cdot X_R \quad (2.30)$$

$$Y(m) = \frac{Q}{20.T.i} \cdot Y_R \quad (2.31)$$

onde:

X, Y são as distâncias reais em metros;

X<sub>R</sub>, Y<sub>R</sub> são as distâncias das variáveis reduzidas em unidades gráficas do ábaco.

Na fase final, com recurso ao ábaco, onde previamente foi traçada a linha paralela ao fluxo de água subterrânea e uma perpendicular a esta, para depois se completar com as coordenadas das distâncias obtidas e o desenho manual da curva que deles resulta.

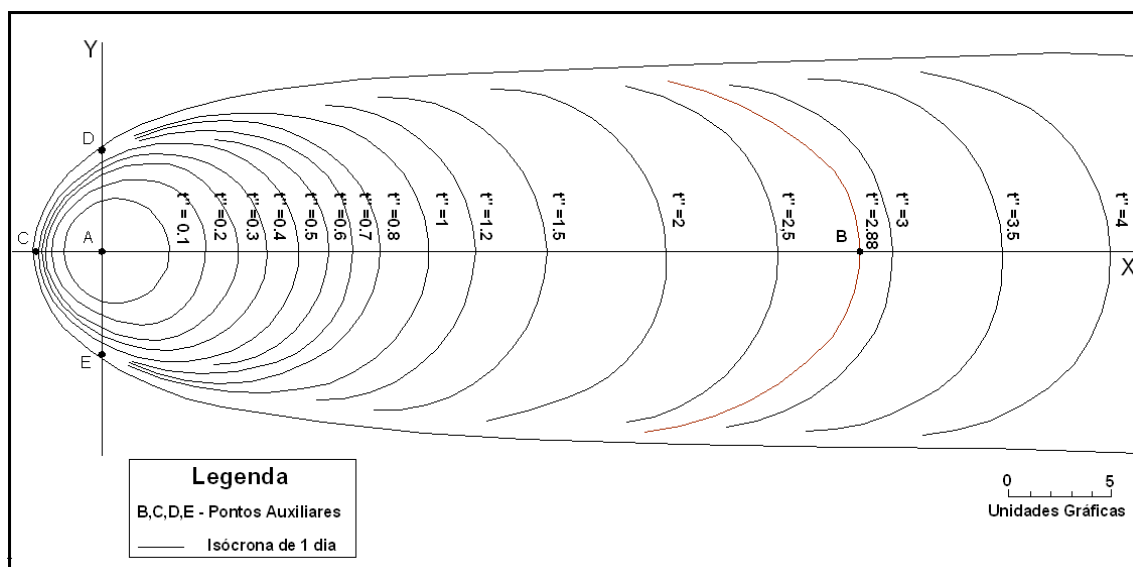


Figura 2.27 Exemplo da aplicação do método de Jacobs e Bear (adaptado de IGME, 2003).

### 2.13.4 - Método de Solução Analítica Simples para Aproximação de Isócronas que Definem Zonas de Transporte

De acordo com IGME (2003) neste método o tempo de trânsito, ou tempo de transporte, para que uma partícula se desloque, na direcção do fluxo, desde um ponto até à captação em extracção, pode ser calculado mediante a seguinte equação:

$$T_X = \frac{\eta_e}{K.i} \cdot \left[ X_L - \frac{Q}{2\pi.K.b.i} - \ln \left( 1 + \frac{2\pi.K.b.i}{Q} \cdot X_L \right) \right] \quad (2.32)$$

onde:

T<sub>X</sub>, tempo de deslocação desde o ponto genérico X até à captação em extracção;

η<sub>e</sub>, porosidade efectiva;

X<sub>L</sub>, distância desde a captação em extracção até ao ponto X, percorrida no tempo T<sub>X</sub>; esta distância tem sinal positivo ou negativo dependendo se o ponto X está a montante (valor positivo) ou a jusante (valor negativo) da captação;

Q, caudal de extracção;  
k, condutividade hidráulica;  
b, espessura do aquífero;  
i, gradiente hidráulico.

Este método pode ser aplicado em aquíferos livres ou confinados mas não se considera a recarga vertical procedente de um aquífero superior se o aquífero é confinado, pelo que no caso de existir essa recarga, o perímetro de protecção definido por este método estaria sobredimensionado.

A proporção da distância para o tempo de trânsito a jusante, em relação à obtida para montante, para o mesmo tempo de trânsito, indica o grau de alongamento a que corresponderá o perímetro de protecção. No caso deste se aproximar a um círculo é sinal de que a influência do gradiente hidráulico regional, no tempo de trânsito, é insignificante.

### **2.13.5 - Método de Krijgsman e Lobo Ferreira**

Segundo Moinante (2003), Krijgsman e Lobo Ferreira (2001) estudaram a relação entre as propriedades hidrogeológicas de um aquífero livre e a distância correspondente a um determinado tempo de propagação. Esta metodologia incide particularmente na zona de protecção intermédia, que corresponde segundo a legislação portuguesa (DL,1999a) a um tempo de propagação de 50 dias, com um valor mínimo entre 40 e 280 metros, de acordo com o tipo de aquífero.

Esta metodologia constitui uma alternativa aos estudos hidrogeológicos detalhados, que se tornam dispendiosos no caso de campos de captações individuais, fornecendo ordens de grandeza das zonas de protecção.

O método do raio fixo calculado (DL, 1999a) não considera a existência de um gradiente hidráulico que pode ser apenas consequência da topografia, causando um fluxo natural das zonas de cota mais elevada para as de cota mais baixa (Moinante, 2003).

De acordo com Krijgsman e Lobo Ferreira (2001, *in* Moinante, 2003), numa situação de gradiente inclinado, a zona de protecção intermédia para um tempo de deslocação de 50 dias, terá a forma de uma elipse cuja forma depende do gradiente hidráulico, isto é, quanto menor for o gradiente mais a sua forma se aproxima de um círculo (Figura 2.28). Como se pode verificar, o valor de  $r_p$  situa-se entre os valores de  $r_{max}$  e  $r_{min}$ ; quanto maior for a proporção entre  $r_{max}$  e  $r_{min}$  menor será o valor de  $r_p$ .

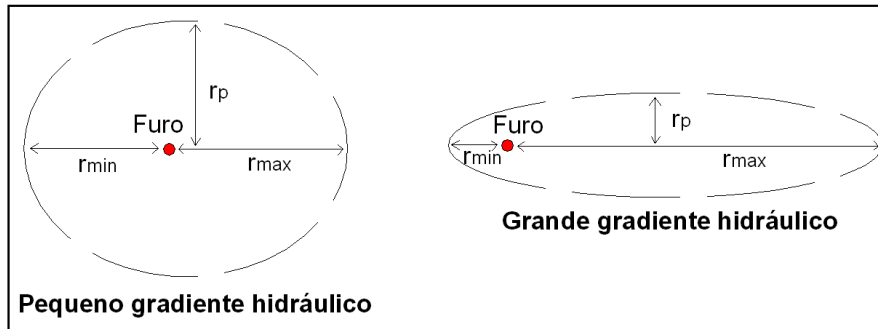


Figura 2.28 - Forma da zona de protecção intermédia em situações extremas de gradiente hidráulico segundo o método de Krijgsman e Lobo Ferreira (2001, *in* Moinante, 2003).

Segundo Moinante (2003) os autores sugerem assim a utilização de três equações no cálculo das três distâncias fundamentais ( $r_{max}$ ,  $r_{min}$ ,  $r_p$ ) da zona de protecção intermédia de uma captação; naquele sentido há necessidade de se determinar os seguintes parâmetros:

$$x = 2 \cdot k \cdot i \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot \eta_e}} \quad (2.33)$$

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot b \cdot i}{Q} \quad (2.34)$$

onde:

$k$ , condutividade hidráulica;

$\eta_e$ , porosidade efectiva;

$i$ , gradiente hidráulico, obtido a partir dos níveis freáticos;

$b$ , espessura do aquífero;

$Q$ , caudal de extracção ou produtividade média das formações;

$t$ , tempo de propagação.

A distância de protecção a montante da captação é dada por:

$$r_{max} = \frac{(0.00002 \cdot x^5 - 0.00009 \cdot x^4 + 0.015 \cdot x^3 + 0.37 \cdot x^2 + x)}{F} \quad (2.35)$$

Salienta-se que neste método há algumas limitações que se prendem com o facto de não ser aconselhável a utilização de combinações de parâmetros que conduzam a um valor de  $x > 18$ , o que pode suceder perante:

- $k$  muito elevada, como acontece por exemplo em aquíferos carsificados. Este método não se ajusta a estas situações;
- zonas com gradientes muito elevados;
- furos cuja zona de ralos tem um grande comprimento;
- caudal de extracção muito pequeno, onde este método não se ajusta.

A distância de protecção a jusante da captação é dada por:

$$r_{min} = \frac{(0.042 \cdot x^3 - 0.37 \cdot x^2 + 1.04x)}{F} \quad (2.36)$$

As limitações que apresenta são:

- se  $x < -3.5$  deve ser aplicado  $r_{\min}$  igual a 25 m como medida de segurança, uma vez que se torna muito arriscado aplicar distâncias de protecção muito pequenas (menores que 25m);
- a equação 2.36 não deve ser aplicada no caso de valores de  $\eta_e < 0,1$  (10%).

A distância de protecção perpendicular à direcção do fluxo é dada por:

$$r_p = 4 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\eta_e \cdot b}} \quad (2.37)$$

Devem ser consideradas as seguintes limitações:

- se  $r_{\max}$  for superior a quatro vezes o  $r_{\min}$  o erro de cálculo pode ser superior a 15%, mas uma vez que isso conduz apenas a um sobredimensionamento, não deve ser considerada uma verdadeira limitação, comparada com a incerteza associada aos dados iniciais.

De acordo com Moinante (2003), numa fase seguinte os autores utilizaram o modelo matemático *Visual Modflow* para validar este método, comparando a forma de elipse estimada com a isócrona calculada pelo modelo matemático.

Atendendo ao caso de sobredimensionamento a montante da captação se dever ao facto da isócrona de 50 dias não ser uma verdadeira elipse, Krijgsman e Lobo Ferreira (*in* Moinante, 2003) sugerem um arredondamento do limite montante da elipse, desenhando um círculo de raio igual a  $r_p$ , como demonstrado na Figura 2.29. Projectando essa nova forma no *Modflow* detectou-se um ajuste perfeito à isócrona calculada pelo modelo.

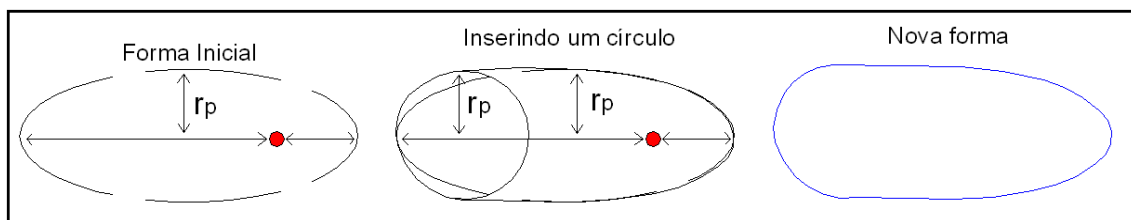


Figura 2.29 - Arredondamento do limite montante da elipse (Krijgsman e Lobo Ferreira, 2001 *in* Moinante, 2003).

Segundo Moinante (2003) as complicações associadas à utilização deste método são as seguintes:

- lacunas de informação;
- o valor de  $b$  não deve ser equivalente à zona de ralos mas sim a toda a espessura do aquífero, uma vez que todo o aquífero contribui com água para a captação através dos ralos, como resultado da componente não horizontal do fluxo; também os valores de  $k$ , obtidos com a realização de ensaios de caudal, são uma média de toda a espessura do aquífero, incluindo os estratos menos permeáveis;

- a não estacionaridade dos níveis de água subterrânea, devido a extracções e a variações sazonais ou climatológicas, conduz a um gradiente hidráulico não estacionário;
- incerteza nos dados de entrada, principalmente nos que refere a  $\eta_e$  e a  $k$ ; para estes parâmetros existem sempre grandes intervalos de possíveis valores, gerando-se assim uma incerteza nos resultados obtidos.

As simplificações necessárias para a aplicação deste método são:

- aquífero livre uniforme com base impermeável;
- ausência de anisotropias e heterogeneidades;
- ausência de fracturas e de trajectos preferenciais (apenas porosidade primária);
- valores constantes de  $k$  horizontal, espessura, porosidade, caudal de extracção;
- $k_{\text{vertical}} = 0.1 \times k_{\text{horizontal}}$ ;
- fluxo e gradiente uniformes;
- ralos em toda a espessura do aquífero;
- ausência de interferências de outras captações;
- ausência de recarga;
- forma simétrica da zona de protecção.

### 2.13.6 - Método de Hoffman y Lillich

De acordo com IGME (2003) este é um método iterativo aplicável a meios homogéneos, quando o rebaixamento do nível, provocado pela extracção é pequeno em relação à espessura do aquífero. Este rebaixamento nas proximidades de uma captação pode ser descrito como:

- Aquífero confinado:

$$h - h_w = (h_0 - h_w) \cdot \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad (2.38)$$

- Aquífero livre:

- se o rebaixamento for menor que 10% da potência do aquífero pode ser empregue a equação anterior, do aquífero confinado.

- ou então, aplica-se:

$$(h - h_w)^2 = (h_0 - h_w)^2 \cdot \frac{\ln(l/r)}{\ln(R/r)} \quad (2.39)$$

onde:

$h$ , nível piezométrico em relação a um nível de referência;

$l$ , distância desse ponto à captação;

$h_w$ , nível dinâmico no furo, em relação ao nível de referência;

$h_0$ , nível piezométrico em repouso, em relação ao nível de referência;

$R$ , raio de influência;

$r$ , raio do furo.

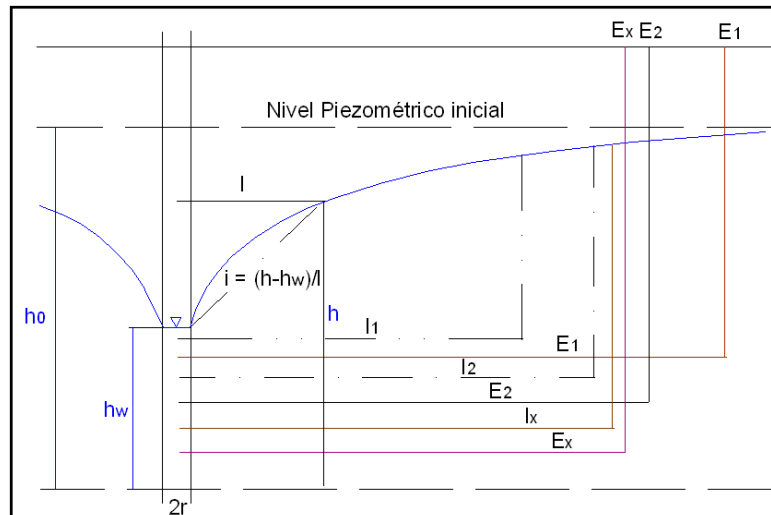


Figura 2.30 - Elementos de apoio para aplicação do método de Hoffman e Lillich (IGME, 2003).

Com base a Figura 2.30 é possível aplicar este método adoptando-se o seguinte procedimento:

1º) determina-se o gradiente:

$$i = \frac{(h - h_w)}{l} \quad (2.40)$$

2º) avalia-se velocidade eficaz:

$$V_e = \frac{K \cdot i}{\eta_e} \quad (2.41)$$

onde:

$k$ , é a condutividade hidráulica;

$i$ , é o gradiente hidráulico;

$\eta_e$ , é a porosidade efectiva.

3º) calcula-se a distância correspondente a um tempo de trânsito  $t$

$$E = V_e \cdot t \quad (2.42)$$

Trata-se então de encontrar a distância  $l$  (segundo o procedimento descrito nos passos de 1 a 3) para a qual esta tenha o mesmo valor que a distância  $E$ .

### 2.13.7 - Método de Mendes

Segundo Ferreira Gomes *et al.* (2008b), este método apresentado inicialmente em Mendes (2006) tem uma metodologia própria que resulta de uma conjugação de quatro métodos: 1) método de Wyssling; 2) aplicação da fórmula expressa no Decreto-Lei nº 382/99 (DL, 1999a); 3) aspectos geológicos/estruturais e geomorfológicos da envolvente às captações; 4) vulnerabilidade das formações geológicas envolvente às captações.

Este método considera que no estabelecimento das zonas de protecção; imediata, intermédia e alargada, que constituem o perímetro de protecção, aplicam-se os métodos de Wyssling e da fórmula expressa no Decreto-Lei nº 382/99 (DL, 1999a), com algumas adaptações, e numa segunda fase ajusta-se a área resultante, em função dos aspectos geológicos, geomorfológicos e ainda da vulnerabilidade das formações geológicas envolventes às captações.

Os principais parâmetros necessários à aplicação deste método são (Ferreira Gomes *et al.*, 2008b):

- o caudal de extracção ( $Q$ ) da captação;
- a porosidade efectiva admitido a cada tipo de material que constitui o aquífero, corresponde ao valor de referência que o próprio Decreto-Lei nº 382/99 (DL,1999a) faculta em anexo;
- a espessura saturada ( $H$ );
- a condutividade hidráulica ( $k$ );
- o gradiente hidráulico ( $i$ ), podendo ser considerado como o valor equivalente ao valor do declive média da bacia hidrográfica onde se insere a captação.

De acordo com Ferreira Gomes *et al.* (2008b) a zona de protecção imediata é definida com a aplicação do método de Wyssling, ajustando depois a distância a jusante da captação. Consideram-se os valores de 5m para a distância mínima e 25m para a máxima, a partir da boca da captação. O valor mínimo impõe-se por questões de operacionalidade e o máximo impõe-se para evitar que a aplicação do método conduza a valores muito grandes, considerados não adequados. Numa 2ª fase analisam-se os aspectos singulares da geologia local capazes de encurtar ou alargar esta zona de protecção, como demonstra a Figura 2.31.

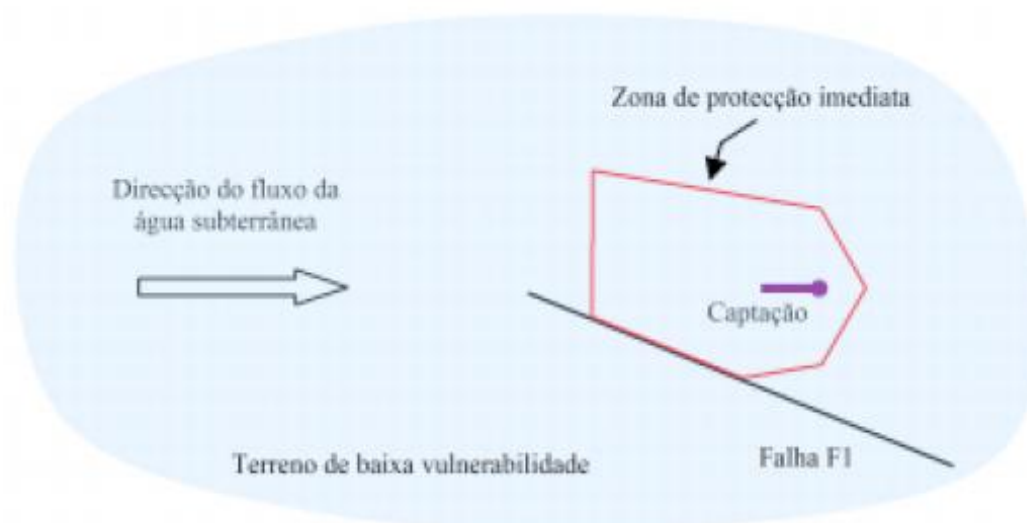


Figura 2.31. - Esboço exemplificativo da aplicação da metodologia proposta para a delimitação da zona de protecção imediata onde é evidenciada uma estrutura geológica (falha F1) num terreno de baixa vulnerabilidade à poluição (Mendes, 2006).

A definição da zona de protecção intermédia (Figura 2.32) é também resultado da aplicação do método de Wyssling com valores de ajuste a jusante, de 10 e 35 m, para as distâncias mínimas e máximas, respectivamente. Após esta rectificação traçam-se linhas paralelas em relação à zona de protecção imediata, anteriormente definida, até se intersectar a montante da captação, a tangente ao círculo resultante da aplicação do Decreto-Lei 382/99 (DL,1999a). Também nesta zona de protecção devem ser consideradas as restrições da 2ª fase (Ferreira Gomes *et al.*, 2008b).

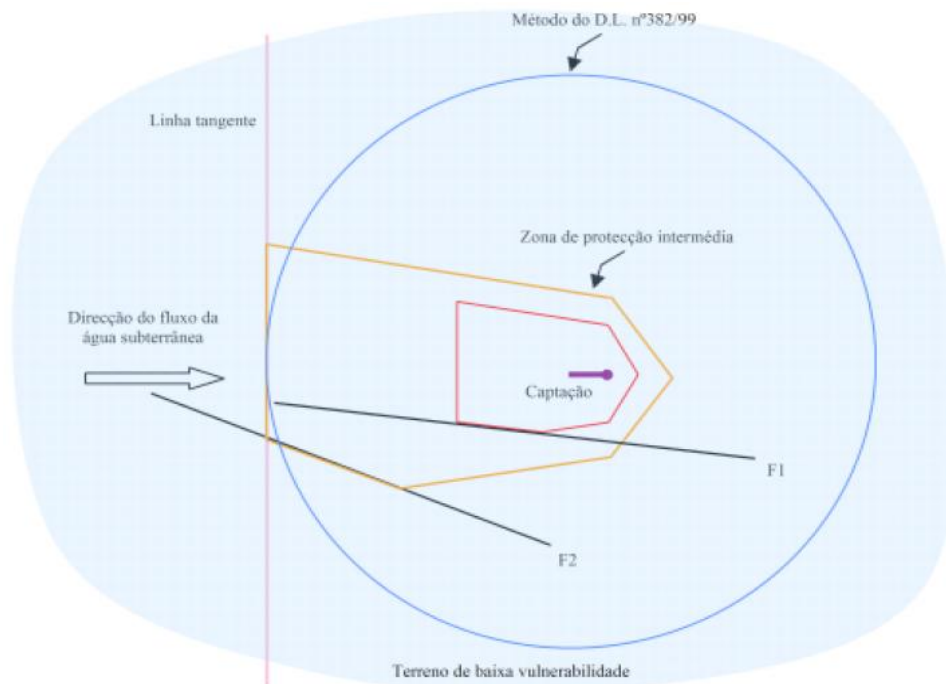


Figura 2.32 - Esboço exemplificativo da aplicação da metodologia proposta para a delimitação da zona de protecção intermédia onde são evidenciadas duas estruturas geológicas (falhas F1 e F2) (Mendes 2006).

A zona de protecção alargada também, em 1ª fase, é resultado da aplicação do método de Wyssling com valores limites a jusante de 15 e 40m, traçando-se depois linhas paralelas em relação à zona de protecção intermédia, até se intersectar a montante, a tangente ao círculo, resultante da aplicação do Decreto-Lei 382/99 (DL,1999a). Como a Figura 2.33 mostra, à semelhança das zonas de protecção imediata e intermédia, também nesta deverá ser prevista a 2ª fase, podendo ocorrer eventual alteração da delimitação da área, função das singularidades geológicas (Ferreira Gomes *et al.*, 2008b).

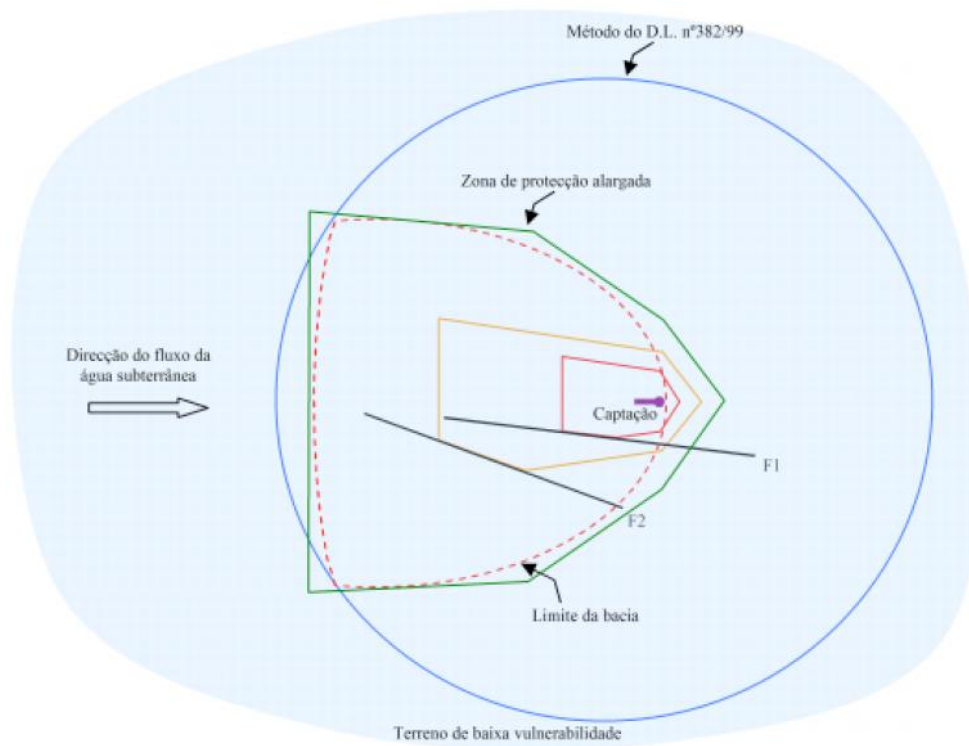


Figura 2.33 - Esboço exemplificativo da aplicação da metodologia proposta para a delimitação da zona de protecção alargada onde são evidenciadas duas estruturas geológicas (falhas F1 e F2) (Mendes, 2006).

## Capítulo 3

# CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO - SECTOR DO RIBEIRO FRIO

### 3.1 - Enquadramento Geográfico e Geomorfológico

A área onde foi desenvolvido o presente estudo situa-se em plena Serra da Gardunha. Esta faz parte de um vasto sistema montanhoso, denominado de Cordilheira Central, (Figura 3.1) que chega a atingir, já em território espanhol, os 2592m de altitude; este conjunto montanhoso inclui ainda a Serra da Estrela, com cota máxima de 1993 m.

A Serra da Gardunha localiza-se a sul da Serra da Estrela e ambas são separadas por uma vasta depressão, que chega a atingir cotas da ordem de 400m, designada morfológicamente por Cova da Beira. Já a sul da Serra da Gardunha situa-se a extensa Plataforma de Castelo Branco, que se prolonga a Sul até ao Vale do Rio Tejo, para o qual drena a região em análise (UBI, 2008).

Com maior exactidão, a região alvo deste estudo, figura na carta militar n.º 256 e tem a sua localização na vertente NW da Serra da Gardunha, aproximadamente a cerca de 2,3 km a SW do seu ponto mais elevado que está à cota de 1227m. Esta área insere-se na zona designada de Ribeiro Frio do sistema aquífero da *Água Fonte da Fraga*, situada na freguesia de Souto da Casa, concelho do Fundão, distrito de Castelo Branco (Figuras 3.2 e 3.3).

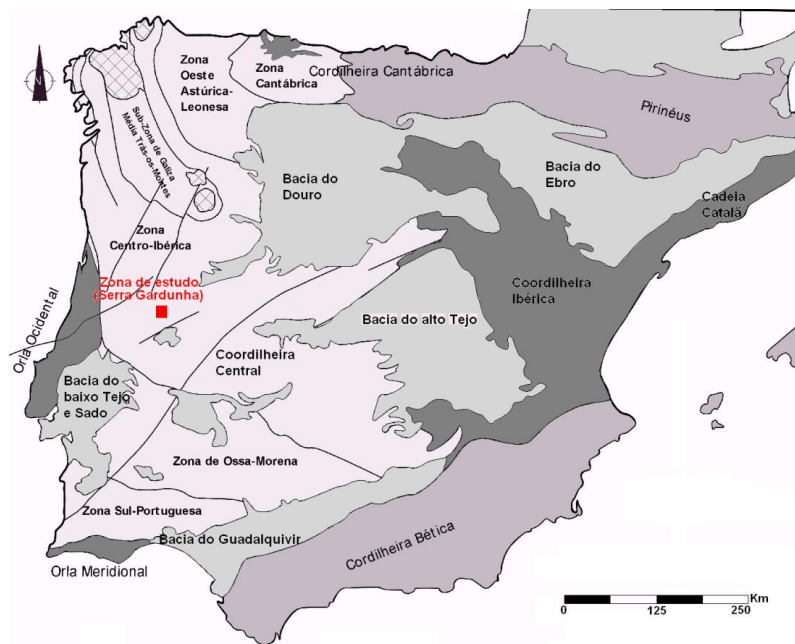


Figura 3.1- Enquadramento do sector estudado nas unidades morfoestruturais da Península Ibérica (adaptado de Ribeiro *et al.*, 1979).

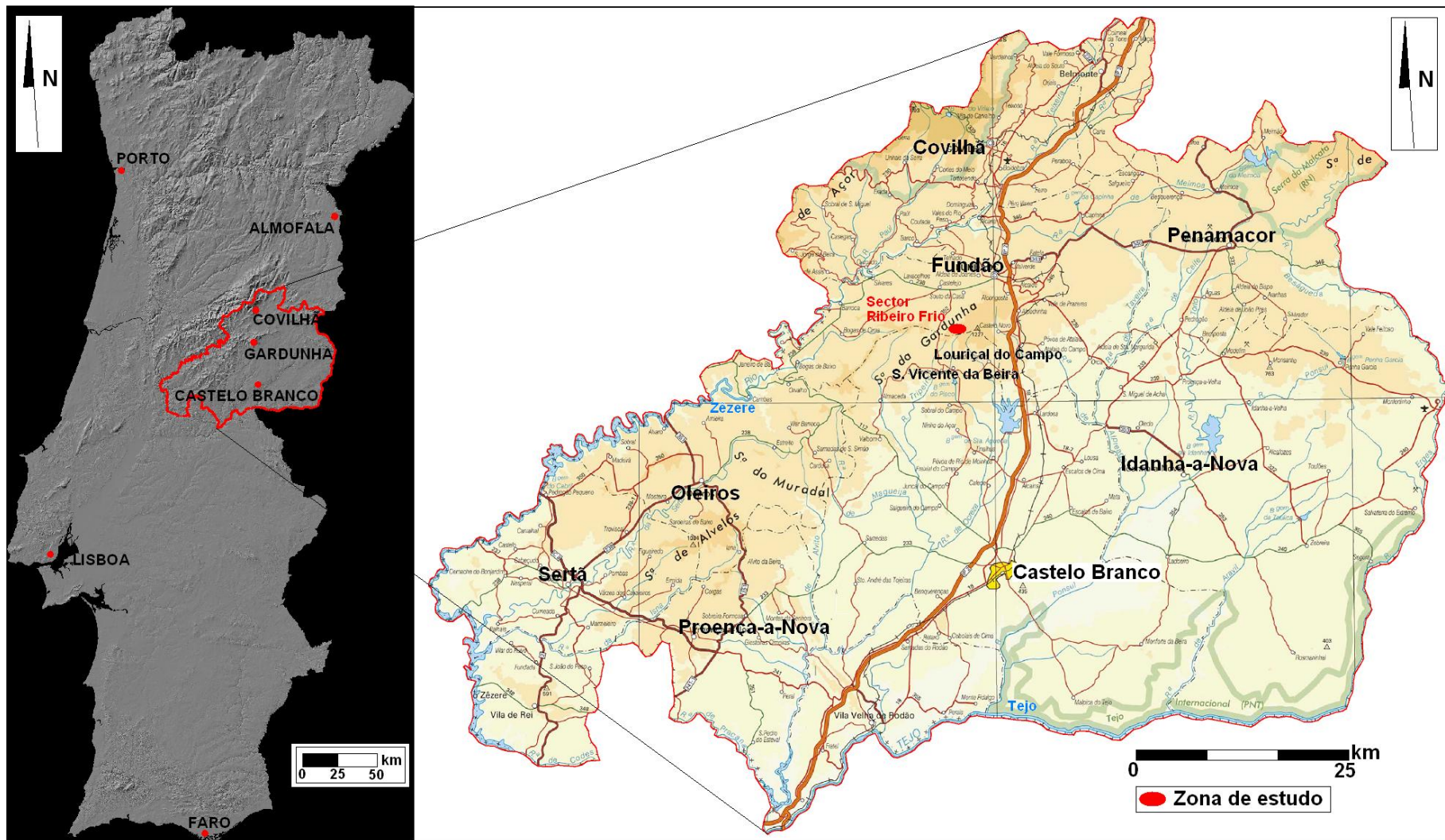


Figura 3.2 - Enquadramento geográfico da zona em estudo - Sector Ribeiro Frio - do sistema aquífero da *Água Fonte da Fraga* (a partir de IGEO, 2011).

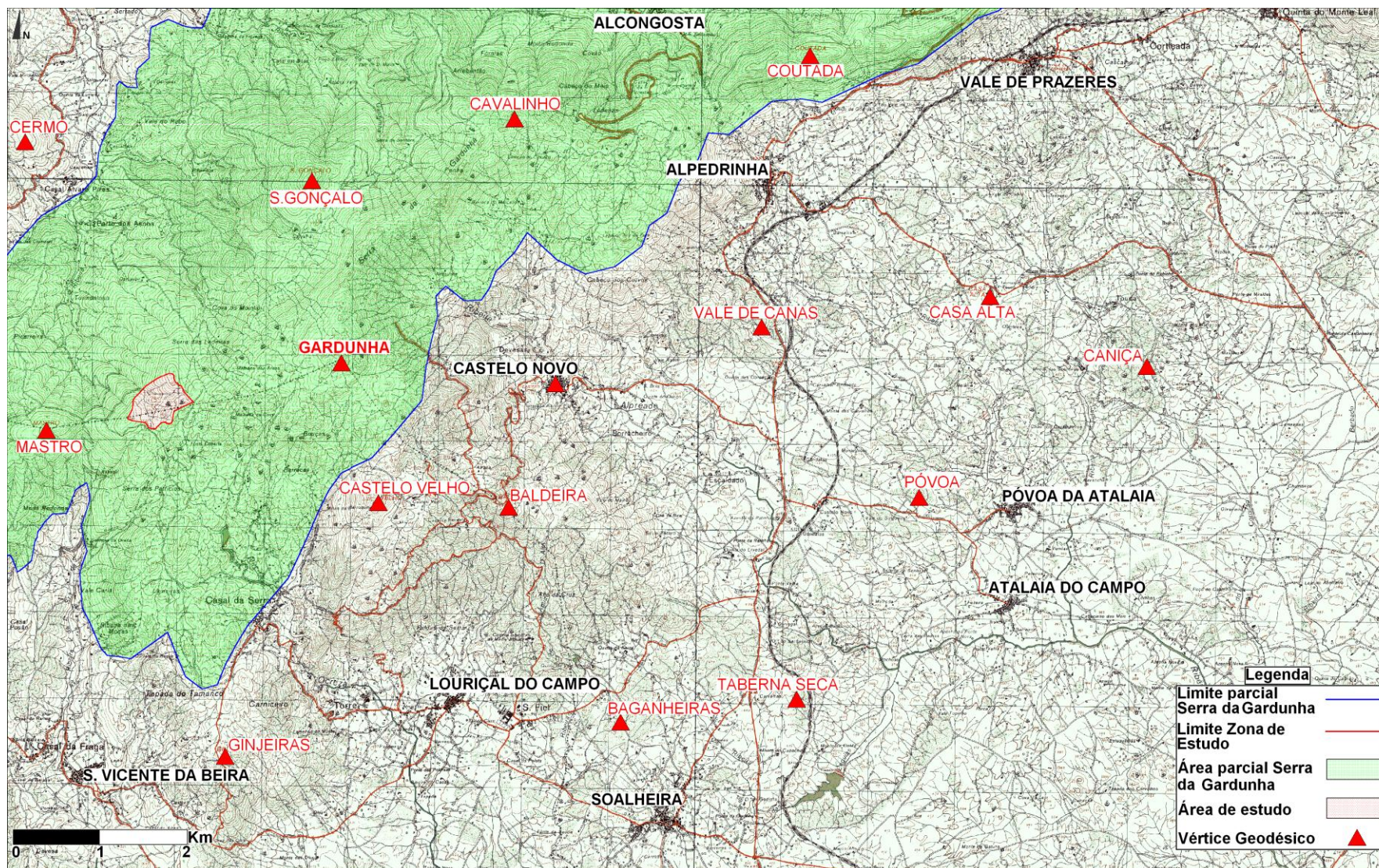


Figura 3.3 - Representação da área a estudar na folha n.º 256 da Carta de Portugal do Instituto Geográfico e Cadastral.

A situação geomorfológica da semi-bacia hidrográfica que se definiu como área de análise para este trabalho apresenta um relevo acidentado (Figura 3.4, Figura 3.5), em que as áreas de declives suaves, isto é com declives inferiores a 10 % são quase inexistentes; cerca de 20 % da área apresenta declives entre 10 e 25% e a restante área (a maioria) apresenta declives superiores a 25% que corresponde àquela zona onde as captações se instalam.

As cotas variam aproximadamente de 1019 metros, nas linhas de cumeeira mais elevadas, na zona SE (Figura 3.6), até cerca de 900m, na proximidade das captações, a NW, para onde esta semi-bacia drena (Figura 3.7). Aquela linha de água evolui genericamente para NW, de modo a alguns quilómetros, confluir com o Rio Zêzere pela sua margem esquerda.

A zona do Ribeiro Frio apresenta uma área de aproximadamente 27 ha percorridos por onze pequenos cursos de água, classificados, segundo Strahler, de ordem 1 até ordem 3 (Figura 3.6).

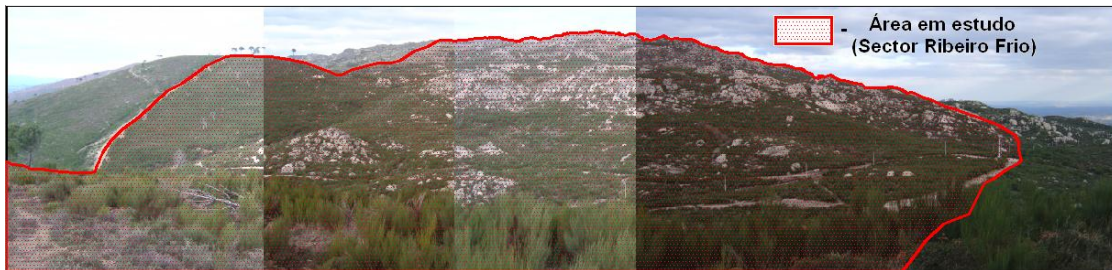


Figura 3.4 - Vista parcial sobre o Sector do Ribeiro Frio.



Figura 3.5 - Diferentes perspectivas da área de estudo.

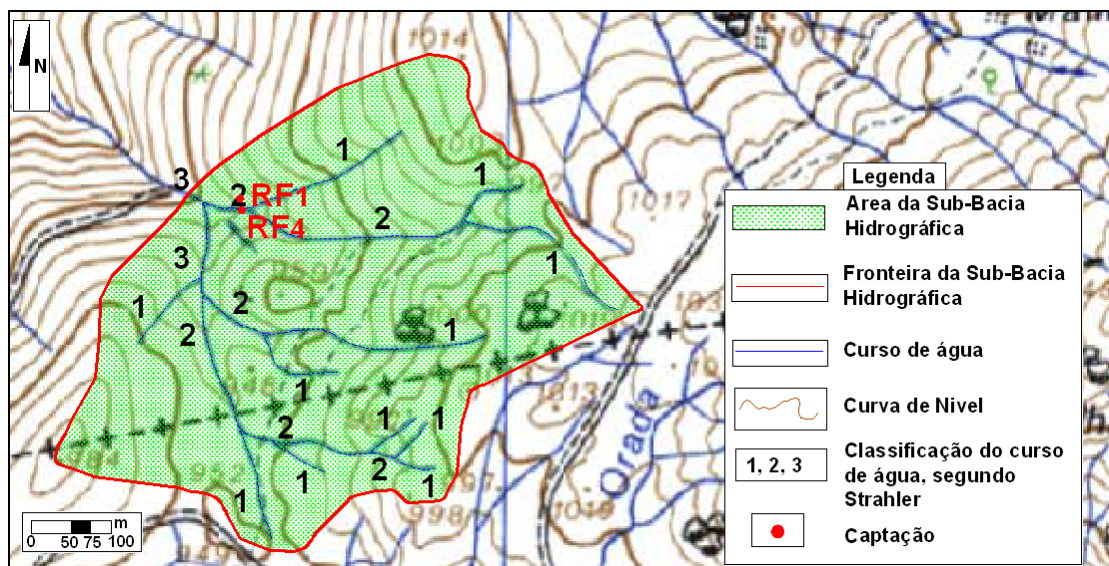


Figura 3.6 - Sub-bacia hidrográfica em estudo com classificação dos cursos de água segundo Strahler, e localização das captações (RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub>) do Sector do Ribeiro Frio.

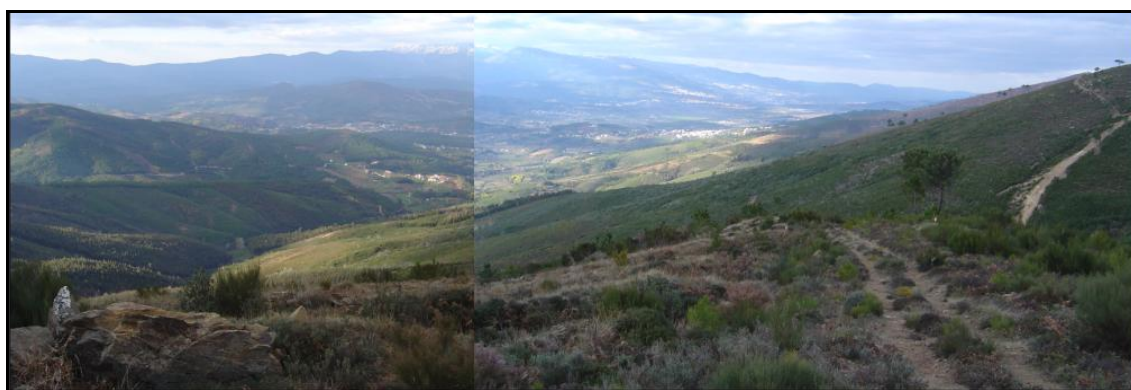


Figura 3.7 - Panorama a jusante da área de estudo, Serra da Estrela em plano de fundo.

### 3.2 - Aspectos Geológicos

De uma forma genérica a Serra da Gardunha, integrada nas unidades geotectónicas da zona Centro Ibérica, é, em termos geológicos, caracterizada pela ocorrência de granitóides hercínicos, de idades compreendidas entre os 290 a 380 milhões de anos (Ma), apresentando metassedimentos de idade precâmbria a câmbria, com cerca de 500 a 650 Ma (Vieira, 2004 *in* Mendes, 2010).

A nível regional a informação geológica em mapas publicados é praticamente inexistente, não existindo sequer o mapa à escala 1/50000, como é comum para quase a generalidade do território nacional. Além da Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000 (SGP, 1992) a informação disponível e mais actualizada para a zona em estudo é condensada nos trabalhos realizados por Ferreira Fomes (2000), Ferreira Gomes *et al.* (2008a), Mendes *et al.* (2010a), Mendes (2010) e UBI (2008, 2010).

Atendendo ao exposto, a informação que o presente trabalho apresenta, relativa à caracterização dos aspectos geológicos da região em estudo é baseada nos trabalhos

referenciados no parágrafo anterior e que segundo estes, são predominantes os maciços graníticos *tardi a pós-tectónicos em relação à F3 da fase hercínica* e ainda os maciços do Complexo Xisto-Grauváquico do Grupo das Beiras (Figuras 3.8 e 3.9).

Tendo por base os elementos referidos anteriormente desenvolveu-se um esboço geológico da região em estudo (Figura 3.10), na qual ocorrem as unidades geológicas seguintes:

$C_{BA}$  - Xistos e grauvaques do Complexo Xisto- Grauváquico, Grupo das Beiras, do Câmbrio médio;

$C_{Xm}$  - Corneanas e xistos mosqueados da Série tardia em relação à fase orogénica Hercínica;

$\gamma_{3b}^{II}$  - Granitos porfiróides da Série tardia em relação à fase orogénica Hercínica.

Os granitos porfiróides de grão grosseiro ocupam a maior parte dos terrenos cartografados. É nesta unidade que se localizam as captações do Sector Ribeiro Frio. Nesta unidade de granitos, os graus de alteração mais frequentes, de acordo com classificação de ISRM, são W3-W4, ou seja, apresentam alteração moderada; em menor frequência ocorrem granitos com a classificação W2 (ligeiramente alterado) e W5 (totalmente alterado).

Em relação às corneanas, extremamente duras e de elevada resistência, e aos xistos mosqueados corneanizados, ocorrem numa faixa muito estreita de 20 a 30 m, muito irregular, numa auréola de metamorfismo de contacto, entre o Complexo Xisto-Grauváquico e os granitos.

As rochas xistentas do Complexo Xisto-Grauváquico, são em geral xistos e grauvaques, que se apresentam mosqueados nas proximidades da faixa de metamorfismo de contacto. A xistosidade apresenta atitudes com uma direcção frequentemente próxima a N0-10°E e um pendor de 80°W; por vezes verificam-se outras atitudes como NS, 50-58°W.

Por fim, salienta-se que por vezes, já na zona franca do Complexo Xisto-Grauváquico, ocorrem pequenas áreas com granito geralmente muito alterado (W5), mas sem significado em relação à escala de cartografia utilizada, com também, já sobre a zona dos granitos, ocorrem muito pontualmente enclaves de rochas xistentas, como acontece junto a RF<sub>4</sub>.

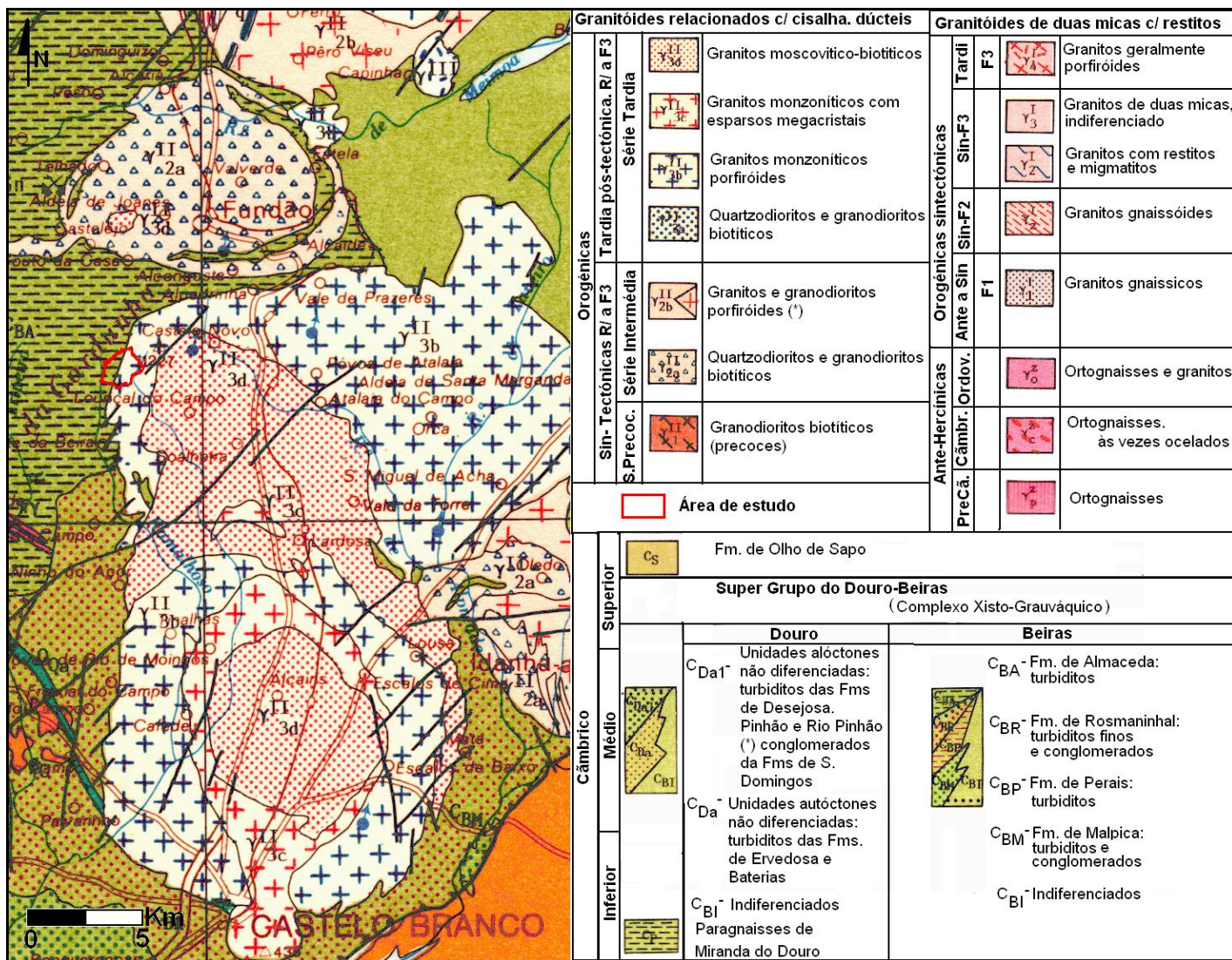


Figura 3.8 - Enquadramento da zona em estudo no excerto da Carta Geológica de Portugal (SGP, 1992).

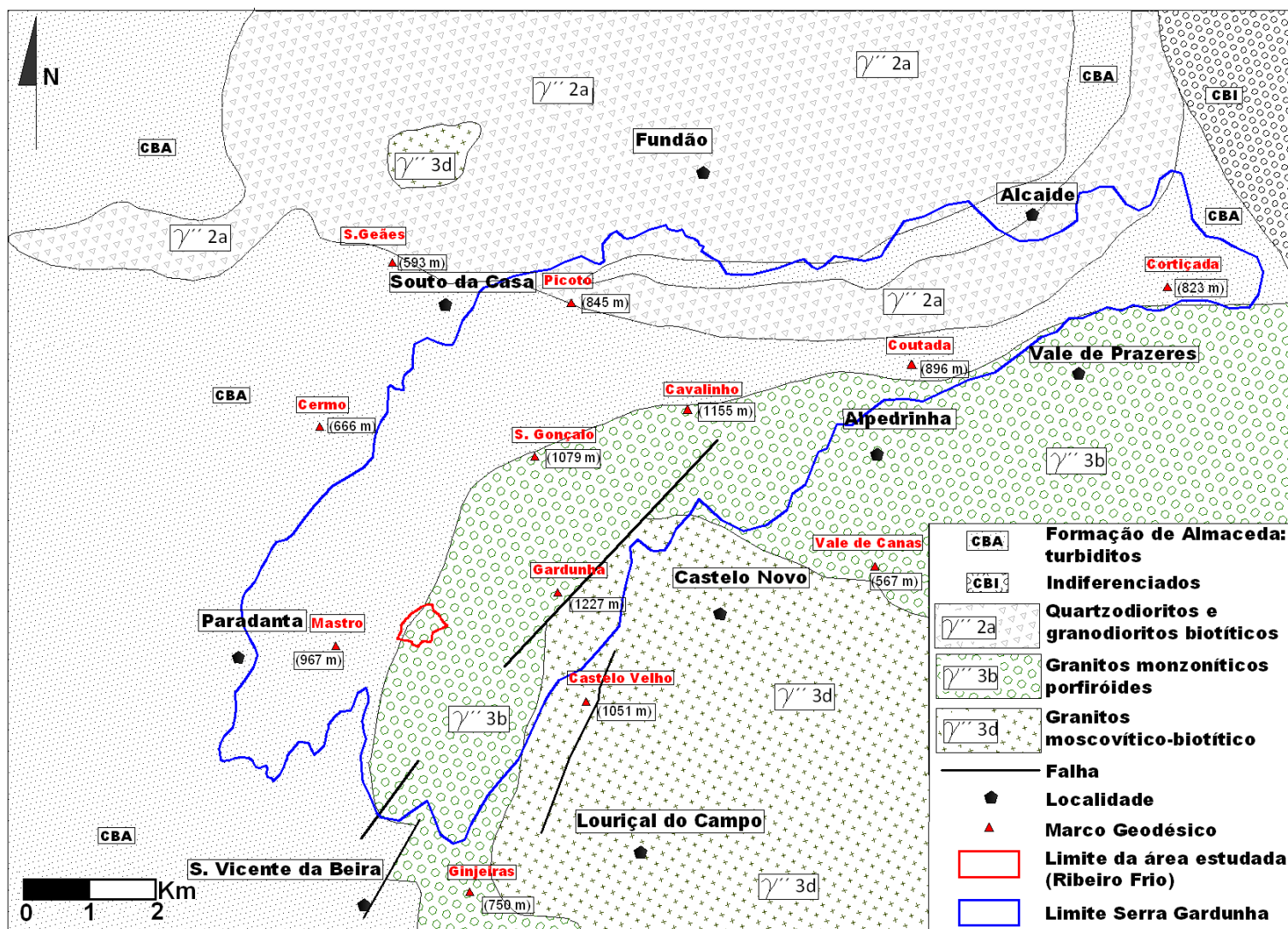


Figura 3.9 - Mapa geológico da região da Serra da Gardunha onde se insere a área estudada (adaptado de Mendes, 2010).

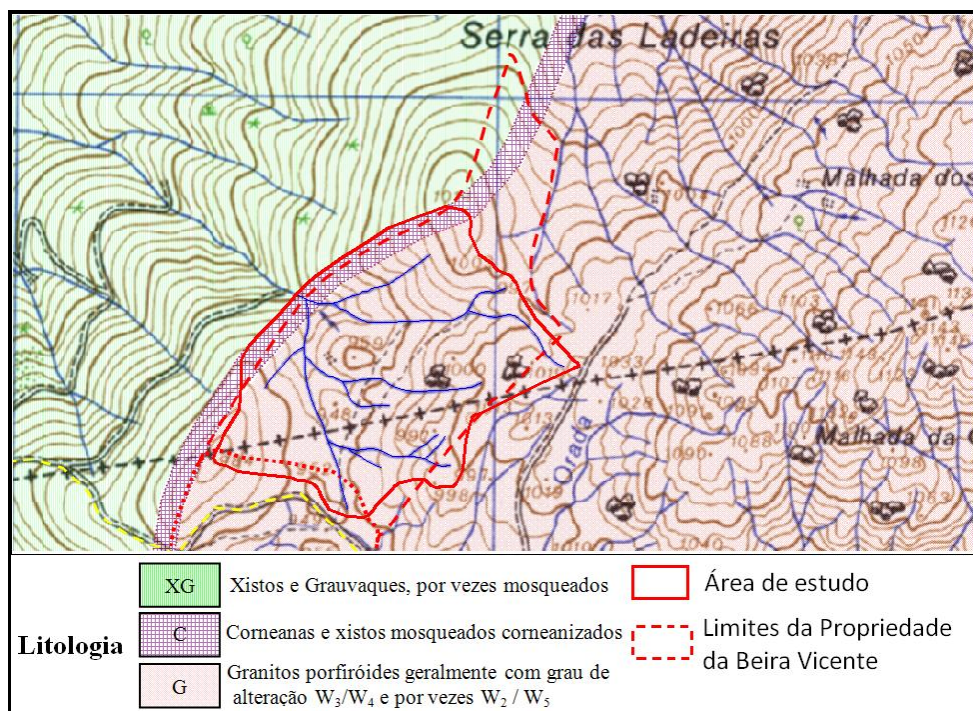


Figura 3.10 - Aspectos litológicos da área em estudo - Sector do Ribeiro Frio (a partir de UBI, 2010).

### 3.3 - Aspectos Hidrogeoambientais

A circulação e a quantidade de água em meio subterrâneo são condicionadas pelas principais fases pelas quais a água passa ao longo do seu ciclo. Esta dinâmica é regulada por factores tais como; a geologia, a densidade e distribuição da rede hidrográfica, o valor da precipitação, a densidade e tipo do coberto vegetal, topografia do terreno e a temperatura, entre outros.

A classificação principal de *Koppen* (in IM, 2010), é baseada, com excepção do Clima Seco, nas temperaturas médias de cada região. O Clima Seco é definido com base na precipitação e evapotranspiração da região. Cada um destes tipos de clima divide-se ainda em sub-climas. Tendo em conta a precipitação, *Koppen* divide o clima da Terra em 5 regiões:

- Clima Tropical Húmido;
- Clima Seco;
- Clima Temperado com Inverno suave;
- Clima Temperado com Inverno rigoroso;
- Clima Polar.

Relativo à área em estudo, segundo a classificação em sub-climas feita por *Koppen* (in IM, 2010), esta situa-se na transição da região de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa) com a de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb), como é apresentado na Figura 3.11.

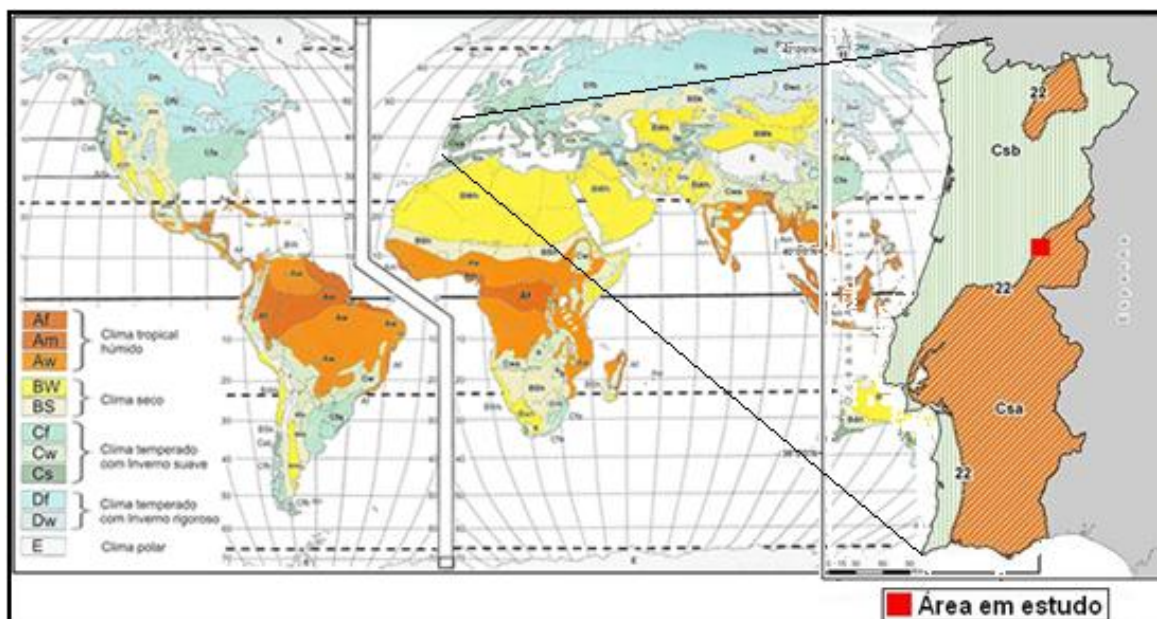


Figura 3.11 - Sector do Ribeiro Frio enquadrado na classificação climática de Portugal Continental (adaptado de IM, 2010).

Segundo IM (2010), para o território continental, a análise espacial baseada nos registos de 1961 a 1990 mostra a temperatura média anual a variar entre cerca de 7°C nas terras altas do interior norte e centro e cerca de 18°C no litoral sul (Figura 3.12). Com base nos mesmos dados mostra-se que a precipitação média anual tem os valores mais altos no Minho e Douro Litoral e os valores mais baixos no interior do Baixo Alentejo.

Dos aspectos orográficos mais influentes, destaca-se o facto da Serra da Gardunha se situar na margem sul da zona temperada do hemisfério norte, onde a circulação atmosférica apresenta um fluxo dominante de oeste para este. Nestas latitudes verifica-se uma convergência de massas de ar quente das altas pressões subtropicais e de massas de ar frio (polar) oriundas de altas latitudes. Deste modo o clima é fundamentalmente influenciado por dois factores: as latitudes subtropicais em que o território Continental se enquadra e a posição marginal do território face ao Oceano Atlântico.

Do Mondego até às cadeias montanhosas situadas a norte do Algarve, a temperatura aumenta gradualmente, enquanto que a precipitação diminui. A faixa do território que apresenta um clima moderado pela proximidade do Atlântico vai-se tornando cada vez mais estreita e reduzida para sul. Os contrastes climáticos são maiores à medida que se avança de oeste para este, sendo que estes contrastes são mais evidentes no Verão do que no Inverno. (Ribeiro *et al.*, 1997; Nicolau, 2002).

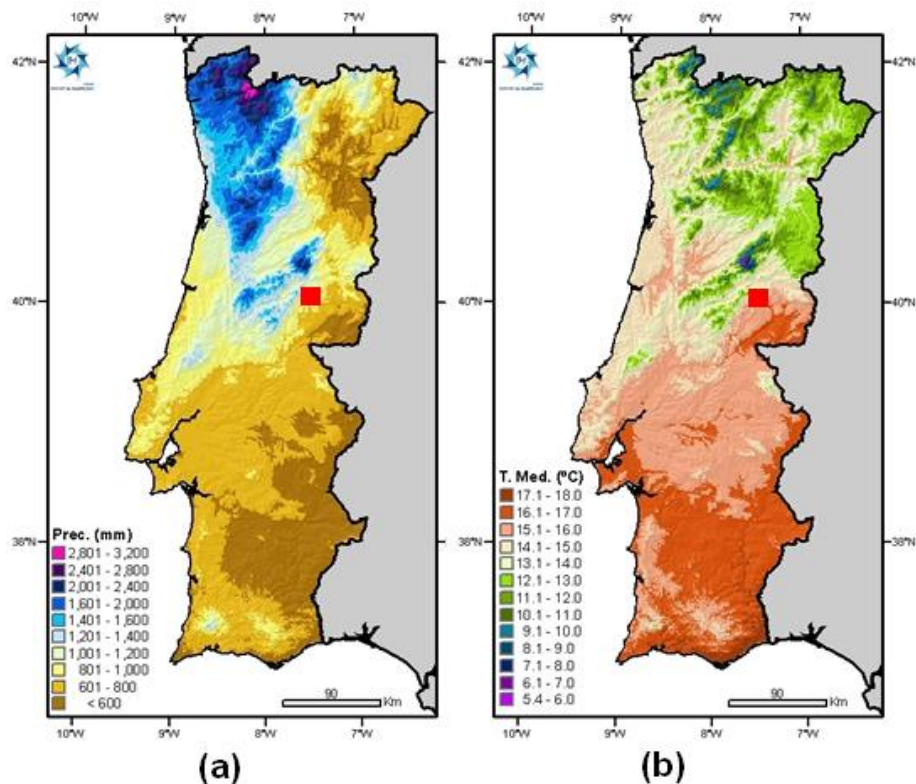


Figura 3.12 - Enquadramento climático da zona de estudo no panorama Nacional (adaptado de IM, 2010): (a) - Valores de precipitação acumulada anual. (b) - Valores de temperatura média anual. Análise espacial baseada em registos 1961/90.

### 3.3.1 - Precipitação

Elemento fundamental na dinâmica do ciclo hidrológico a precipitação destaca-se como a principal procedência de água que recarga os aquíferos subterrâneos. Sendo este um fenómeno que apresenta um carácter descontínuo no tempo e no espaço e que varia quer em termos quantitativos, quer em intensidade e forma, recorreu-se aos dados sintetizados pelas agências com competências legais para a sua monitorização periódica, para se fazer a sua caracterização. Para o efeito o SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos - e o Instituto de Meteorologia facultam, via Internet, os resultados de monitorização da precipitação em: <http://snirh.pt/> e <http://www.meteo.pt/>.

Através dos mapas de precipitação apresentados na Figura 3.12 verifica-se que, para a região em estudo, a precipitação acumulada anual, para o período compreendido entre 1961 a 1990, enquadra-se no intervalo dos 800 aos 1400 mm. No que respeita à distribuição dos valores da precipitação total mensal ao longo do ano civil de 2010, é apresentada na Figura 3.13 (IM, 2010).

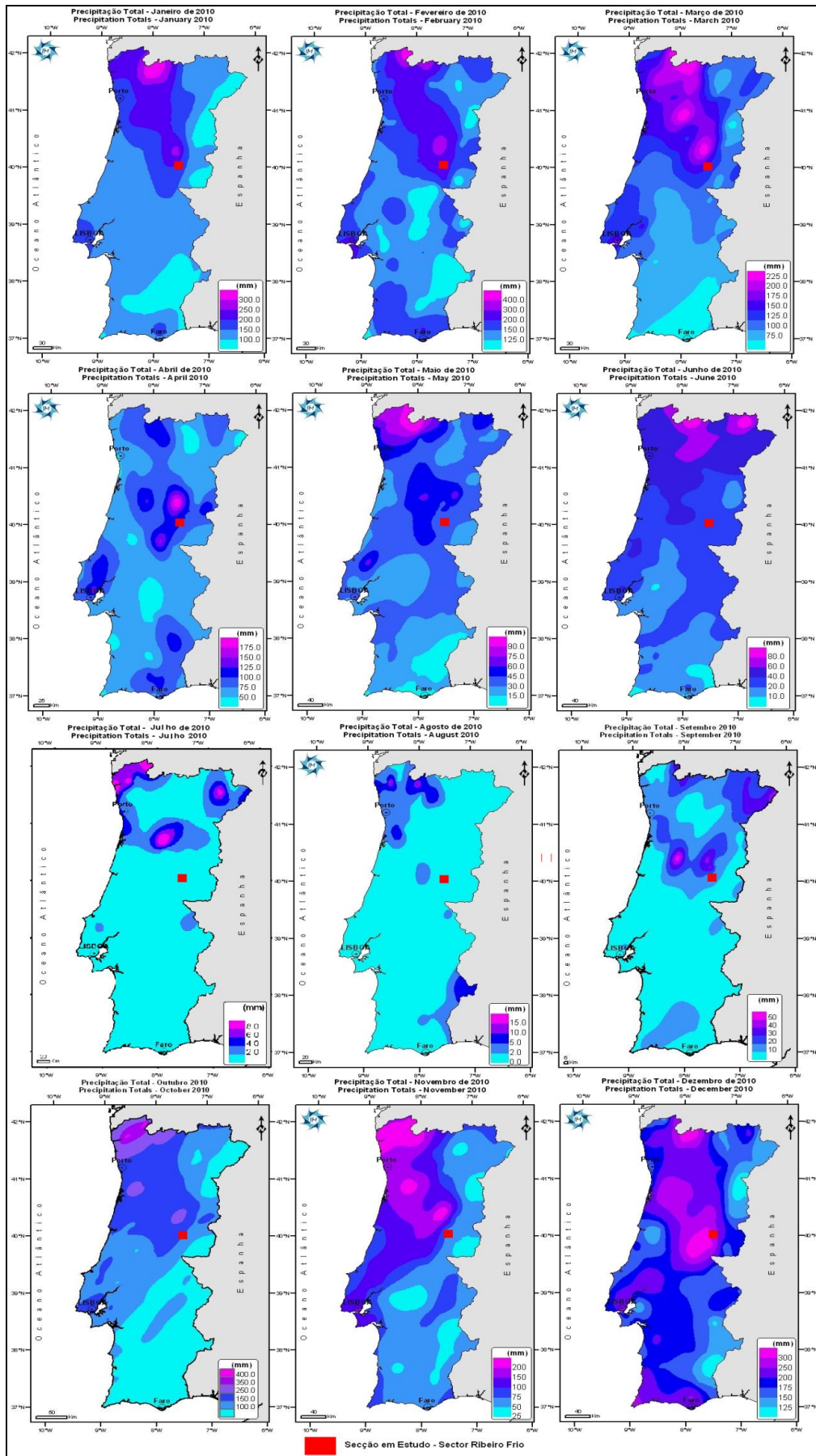


Figura 3.13 - Valores precipitação total mensal para o ano civil de 2010 (adaptado de IM, 2010).

### 3.3.2 - Temperatura

Um dos principais parâmetros que caracterizam a informação climática, a temperatura do ar, oscila diariamente, acompanhando o ritmo das estações climáticas ao longo do ano. Existe ainda uma significativa variação dos valores médios da temperatura desde as latitudes polares às mais próximas da linha do equador, assim como desde as superfícies continentais às oceânicas.

Segundo Ribeiro *et al.* (1988) o ciclo anual da temperatura é efeito do movimento de translação da terra em torno do sol, em que a inclinação do eixo terrestre gera variações anuais das temperaturas, dando origem às estações climáticas. Além deste ritmo astronómico, a variabilidade climática, sob o ponto de vista térmico, é função da latitude e da altitude.

Na Figura 3.12 são apresentados os valores da temperatura média anual, a partir da análise espacial baseada nos registos de 1961/90, de onde se retira que para a área alvo deste estudo as temperaturas médias anuais oscilam entre os 12,1 e os 16 °C. Na Figura 3.14 são apresentados os valores médios mensais da temperatura média do ar ao longo do ano civil de 2010.

### 3.3.3 - Evapotranspiração

É o termo que engloba os processos de evaporação e transpiração. Estes dois processos são geralmente considerados conjuntamente, uma vez que, em termos práticos, não é fácil quantificá-los de forma separada, pois em condições de campo não é praticável conseguir separar totalmente a evaporação da transpiração, pelo que as perdas de água para a atmosfera são normalmente englobadas num único fenómeno designado de evapotranspiração (ET).

Este processo implica a passagem da água do estado líquido para o estado gasoso, regressando à atmosfera, directamente através da evaporação ou indirectamente através da transpiração. A aplicação correcta deste conceito a uma determinada área pressupõe a existência de vegetação (EGEO, 2010a).

A quantidade e qualidade da água que percola os solos têm, nos valores da evapotranspiração, um importante parâmetro de estimação. Num ambiente propício ao fenómeno de lixiviação, a relação entre a precipitação e a evapotranspiração determina a quantidade de sais solúveis, presentes no solo, a ser lixiviados. Em caso da evapotranspiração ser superior à precipitação estes vão ser precipitados à superfície; por sua vez, se o valor da evapotranspiração for inferior ao da precipitação há uma maior possibilidade de lixiviação destes sais e consequente aproximação da pluma de contaminantes à zona saturada do solo.

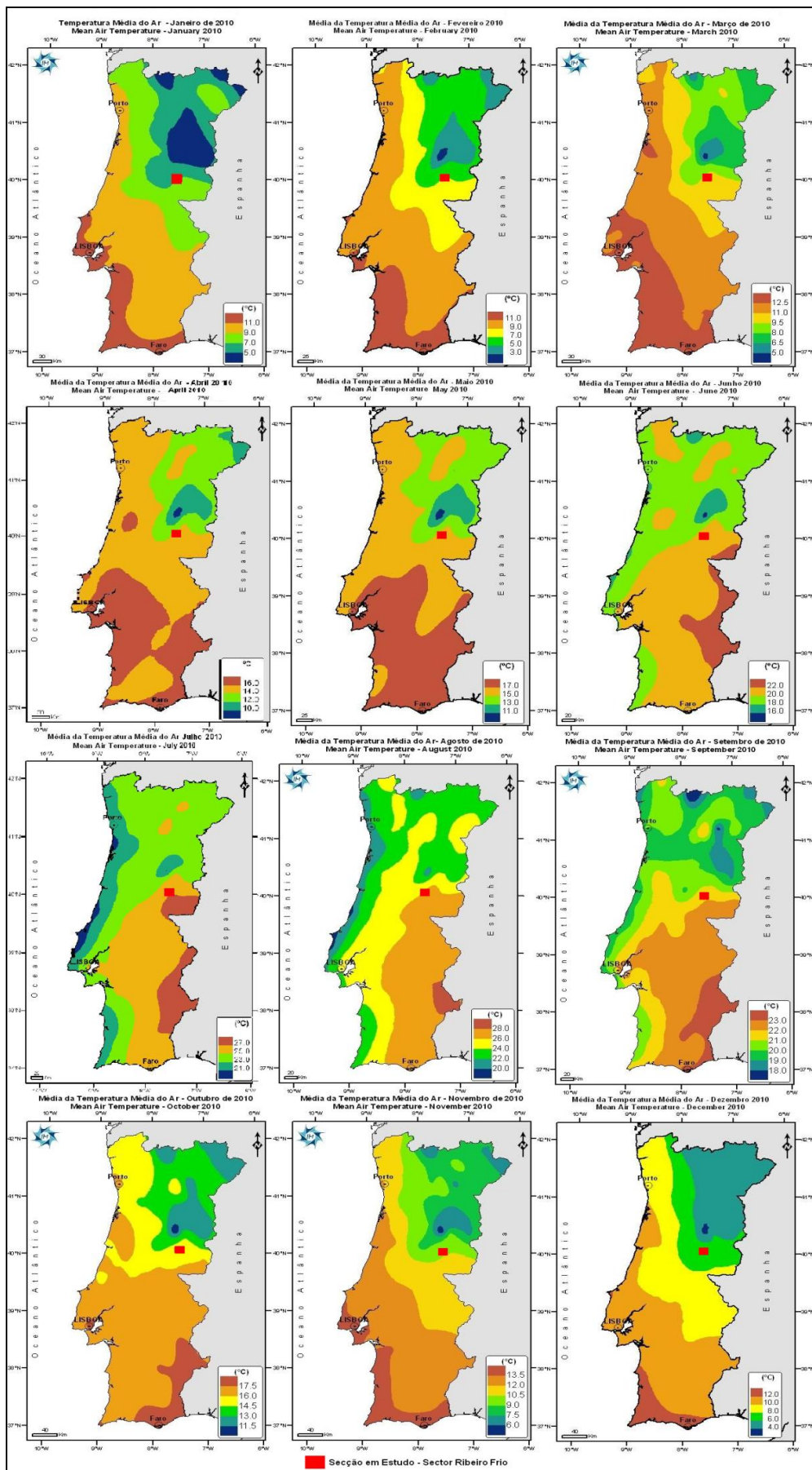


Figura 3.14 - Valores médios da temperatura média do ar para o ano civil de 2010 (adaptado de IM, 2010).

A evapotranspiração assume um carácter potencial ou efectiva/real. A quantidade total de água que regressa à atmosfera por processos de evaporação e transpiração é designada por evapotranspiração real (ETR). A evapotranspiração potencial (ETP) determina a quantidade máxima de água susceptível de se evaporar da superfície do solo e das plantas. Na Figura 3.15 apresenta-se a situação da ETR para Portugal continental, verificando-se que para a região em estudo os valores anuais estarão no intervalo de 500 a 800mm.

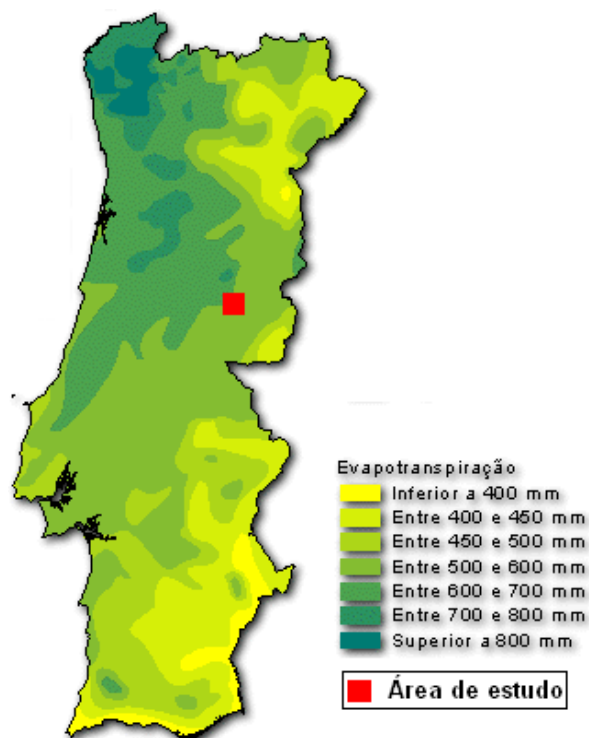


Figura 3.15 - Valores da evapotranspiração real anual para o território continental (APA, 2007).

### 3.4 - Balanço Hidrológico e Reservas

Na determinação do balanço hidrológico equacionam-se os valores registados da temperatura e da precipitação. Da análise dos valores de precipitação total mensal, e dos valores médios da temperatura média do ar, do ano de 2010, para a área alvo deste estudo - apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14, respectivamente, concluiu-se que de uma forma genérica, estes são consistentes com os valores da temperatura média diária do mês e da precipitação total mensal considerados em UBI (2008) a partir dos dados meteorológicos, colectados em Ferreira (1970), para as estações próximas da área de estudo, Louriçal do Campo, em termos de registos de precipitação, e Castelo Branco, em termos de registos de precipitação e temperatura. Os registos, resultantes de valores médios obtidos num período de 30 anos para as estações referidas apresentam-se na Tabela 3.1. As coordenadas geográficas, altitude e ainda o período de registo dos parâmetros climatológicos apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Dados das Estações meteorológicas da região em estudo a usar no balanço hidrológico (a partir de Ferreira 1970).

Mês	Estação		
	Castelo Branco		Louriçal do Campo
	Precipitação (mm)	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)
Jan	123.1	7.9	214.9
Fev	80.7	9.2	139.1
Mar	128.6	11.6	222.6
Abr	69.9	14.0	105.8
Mai	56.4	16.9	91.1
Jun	22.3	21.4	40.0
Jul	4.6	24.6	9.1
Ago	7.8	24.4	10.6
Set	38.9	21.5	66.9
Out	77.0	16.5	122.1
Nov	101.9	11.6	186.6
Dez	116.1	8.4	188.4
Ano	827.3 (total)	15.6 (média)	1397.2 (total)

Tabela 3.2 - Características das estações meteorológicas próximas da região em estudo (a partir de Ferreira, 1970).

Estação					
Nome	Latitude	Longitude	Altitude	Tipo	Período de Registos
Castelo Branco	39° 49`N	7° 29`W	390 m	Completa	1931-1960
Louriçal do Campo	40° 03`N	7° 30`W	850 m	Udométrica	1931-1960
São Vicente da Beira	40° 02`N	7° 35`W	554 m	Udométrica	1932-1960

Considerando a similaridade genérica destes valores opta-se pela utilização do balanço hidrológico apresentado em UBI (2008) que relaciona as entradas e saídas de água, ocorridas num determinado espaço e durante um certo período de tempo, com a variação de volume do mesmo líquido, no interior desse espaço e durante esse intervalo de tempo.

Segundo Lencastre e Franco (1992) a equação geral do balanço hidrológico é da seguinte forma:

$$\text{Afluências} - \text{Efluências} = \text{Variação no Armazenamento de água} \quad (3.1)$$

Para o cálculo do balanço hidrológico sequencial mensal, utiliza-se metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1957, *in* Lencastre e Franco, 1992), utilizando a seguinte equação:

$$P - (\text{ETR} + \text{VSso}) = R + \text{VSs} + G + \text{VSsso} \quad (3.2)$$

em que:

- P, é a precipitação,
- ETR, é a evapotranspiração real,
- R e G, são os escoamentos superficiais e subterrâneos, respectivamente, e
- VSs, VSso e VSsso, são as variações do armazenamento de água, à superfície, no solo arável e no subsolo, respectivamente.

O cálculo da evapotranspiração potencial (ETP), efectua-se pelo método de *Thornthwaite*, a partir da seguinte equação:

$$ETP = K.ETPo \text{ [mm/mês]} \quad (3.3)$$

em que:

- ETPo, é a evapotranspiração potencial média para meses teóricos de 30 dias e 12 horas de luz por dia, num local do equador de latitude zero, sendo:

$$ETPo = 16(10.t/I)^a \text{ [mm/mês]} \quad (3.4)$$

em que:

- t, é a temperatura média diária do mês (°C),
- a, é um parâmetro dado pela seguinte equação:

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1790 \times 10^{-5} I + 0.49 \quad (3.5)$$

- I, é o índice de calor anual, expresso pela seguinte forma:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (3.6)$$

sendo,  $i$ , o índice de calor mensal, dado pela seguinte equação:

$$i = (t/5)^{1.5} \text{ [t em } ^\circ\text{C]} \quad (3.7)$$

- K, factor correctivo, é um parâmetro que depende do nº de horas de luz do dia, função da latitude do lugar, sendo determinado de acordo com valores tabelados em Lencastre e Franco (1992).

Os resultados dos cálculos para a determinação de ETP apresentam-se na Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Evapotranspiração potencial (ETP) a partir do método de Thornthwaite, para a zona em estudo (UBI, 2008).

Parâmetro	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
t (°C)	7.9	9.2	11.6	14.0	16.9	21.4	24.6	24.4	21.5	16.5	11.6	8.4
i (°C) <sup>1.5</sup>	1.99	2.50	3.53	4.69	6.21	8.85	10.91	10.78	8.92	5.99	3.53	2.18
ETPo (mm/mês)	19.38	24.72	35.80	48.35	65.32	95.26	119.02	117.48	95.97	62.87	35.80	21.37
K	0.801	0.891	0.990	1.099	1.199	1.249	1.229	1.149	1.040	0.933	0.831	0.781
ETP (mm/mês)	15.5	22.0	35.4	53.1	78.3	119.0	146.3	135.0	99.8	58.7	29.7	16.7
I = 70.08			a = 1.5981			ETP <sub>anual</sub> = 809.5 mm						

Para ao cálculo do balanço hidrológico sequencial mensal foram considerados os valores de precipitação do Posto Udométrico de Louriçal do Campo; esta escolha justifica-se pela proximidade geográfica deste posto com a área de estudo além de se verificarem características quer de vegetação quer altitude similares às da área de estudo.

A determinação de todos os termos do balanço hidrológico, seguindo a metodologia apresentada em Lencastre e Franco (1992), é exposta na Tabela 3.4; os diversos termos apresentados neste quadro, definem-se do seguinte modo:

- P, é a precipitação média mensal;
- ETP, é a evapotranspiração potencial (Tabela 3.3);
- L, é a perda potencial de água, em cada intervalo de tempo do período seco (em que  $P < ETP$ ), sendo:

$$L(i) = \sum_{j=1}^i (P - ETP)_j ; (L < 0) \quad (3.8)$$

sendo i, o nº da sequência do intervalo (coluna), em causa, desde o início do período seco, e j o nº de qualquer intervalo do mesmo período seco;

- Sso, é o armazenamento de água que fica no solo de capacidade utilizável pelas plantas ( $n_u$ ), e calcula-se:

- no período seco ( $P - ETP < 0$ ), pela seguinte equação:

$$(Sso)_i = (n_u \cdot e^{L/n_u})_i \quad (3.9)$$

- no período húmido:

$$(Sso)_i = (P - ETP)_i + (Sso)_{i-1}, \text{ se } Sso < n_u \quad (3.10)$$

até completar a capacidade utilizável pelas plantas, que se considera  $n_u=100\text{mm}$ .

-  $VSso_i$ , é a variação do armazenamento de água em cada intervalo de tempo, ou seja:

$$VSso_i = Sso_i - Sso_{i-1} \quad (3.11)$$

-  $ETR_i$ , é a evapotranspiração real que ocorre em cada intervalo de tempo  $i$ , ou seja:

$$ETR_i = (P - VSso)_i ; (VSso < 0) \quad (3.12)$$

$$ETR_i = ETP_i ; (VSso \geq 0) \quad (3.13)$$

-  $DH_i$ , são os défices hídricos nos sucessivos intervalos de tempo  $i$ , em que  $P < ETP$ , sendo:

$$[DH]_i = [ETP - ETR]_i = [ETP + VSso - P]_i ; (VSso < 0) \quad (3.14)$$

-  $SH_i$ , são os resultados do superavit hídrico, dos sucessivos intervalos de tempo  $i$ , em que,  $P \geq ETP$ , sendo:

$$[SH]_i = [P - (ETP + VSso)]_i ; (VSso \geq 0) \quad (3.15)$$

Os resultados do balanço hidrológico sequencial mensal são descritos na Tabela 3.4 e em termos gráficos apresentam-se na Figura 3.14.

Tabela 3.4 - Balanço hidrológico sequencial mensal ( $l/m^2$ ) para a zona em estudo, admitindo-se que  $n_u$  se encontra integralmente satisfeito no início do período seco, ou seja,  $Sso = 100$  mm, em Maio.

Termo	Mês												Ano
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
<b>P</b>	214.9	139.1	222.6	105.8	91.1	40.0	9.1	10.6	66.9	122.1	186.6	188.4	1397.2
<b>ETP</b>	15.5	22.0	35.4	53.1	78.3	119.0	146.3	135.0	99.8	58.7	29.7	16.7	809.5
<b>P-ETP</b>	119.4	117.1	187.2	52.7	12.8	-79.0	-137.2	-124.4	-32.9	63.4	156.9	171.7	587.7
<b>L</b>	-	-	-	-	-	-79.0	-216.2	-340.6	-373.5	-	-	-	-373.5
<b>Sso</b>	100	100	100	100	100	45.4	11.5	3.3	2.4	65.8	100	100	-
<b>Vsso</b>	0	0	0	0	0	-54.6	-33.9	-8.2	-0.9	63.4	34.2	0	0
<b>ETR</b>	15.5	22.0	35.4	53.1	78.3	94.6	43.0	18.8	67.8	58.7	29.7	16.7	533.6
<b>DH</b>	-	-	-	-	-	24.4	103.3	116.2	32.0	-	-	-	275.9
<b>SH</b>	119.4	117.1	187.2	52.7	12.8	-	-	-	-	0	122.7	171.7	863.6

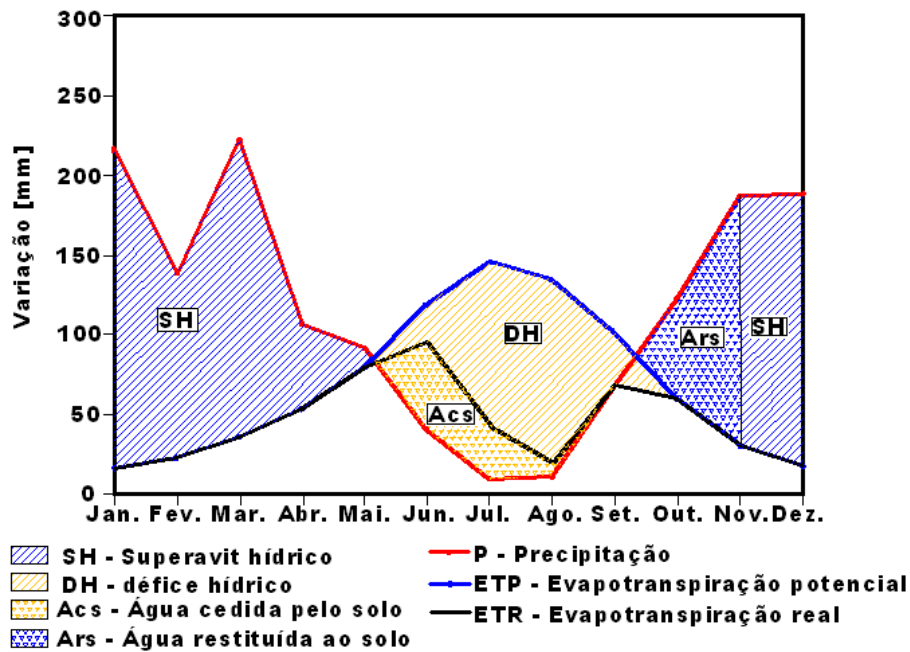


Figura 3.16 - Resultados do balanço hidrológico sequencial mensal, para a zona em estudo (UBI, 2008).

Ainda segundo UBI (2008) dos resultados do balanço hidrológico, expostos na Figura 3.16 verifica-se a ocorrência de um período seco que é traduzido pelos défices hídricos (DH) e que se estende de Maio a Outubro, atingindo o máximo em Agosto. Já o período húmido, que vai do mês de Novembro a Maio do ano seguinte é traduzido pelo *superavit* hídrico (SH), verificando-se o excesso máximo de água, no mês de Janeiro.

No período húmido, o *superavit*, divide-se em duas parcelas: o escoamento superficial (R) e escoamento subterrâneo (G), ou seja considerando os elementos da Tabela 3.4:

$$SH = R + G = 863.6 \text{ [l/m}^2\text{]} \quad (3.16)$$

Os excedentes anuais de aproximadamente  $863.6 \text{ l/m}^2$  sugerem à partida uma boa recarga aquífera. No entanto o facto das áreas de recarga serem reduzidas, aliado ao dos declives serem muito inclinados ( $> 25\%$ ), facilita o escoamento superficial. Por outro lado, a cobertura vegetal tem potencial de existir quase na totalidade das áreas de recarga, além dos maciços rochosos, nessas áreas, serem graníticos muito fracturados e se apresentarem com graus de alteração significativos, são características que favorecem a infiltração e consequentemente a recarga.

Para um cenário similar Mendes (2010) obteve uma taxa de infiltração em relação à precipitação, de  $26,7\%$ , para recarregar as reservas aquíferas; aquele valor foi obtido para a zona da Serra da Gardunha, na vertente sul, ao considerar o valor médio resultante de estudos por três métodos: i) análise do balanço hidrológico, ii) análise de traçadores naturais de cloretos e iii) análise dos hidrogramas de nascentes).

Assim, considerando aquela taxa de infiltração ( $0,267 \cdot P_{\text{anual}}$ ) obtêm-se  $373.1 \text{ l/m}^2$  por ano, para recarregar as reservas aquíferas, que corresponde a uma relação de “G/SH” de 43,2%. Aplicando este valor a toda a extensão da área de recarga do sector em estudo (27ha) obtém-se um valor de recarga total de  $100737 \text{ m}^3/\text{ano}$ , que em termos meramente representativos equivale a uma descarga contínua de  $3.2 \text{ l/s}$  durante um período de 1 ano, que, depois de comparado com os caudais monitorizados das captações existentes (ponto 3.6), indica que haja, naquele sector, um volume de reserva capaz de sustentar novas captações.

### 3.5 - Unidades Hidrogeológicas

Tendo em consideração os elementos apresentados em itens anteriores, e com base estudos apresentados em UBI (2008), para a zona em estudo consideram-se, em termos hidrogeológicos, duas grandes unidades (Figura 3.17):

- Unidade A - *Granitóides e Corneanas*, de permeabilidade geralmente do tipo *fissural* e pontualmente *intersticial*; apresentam em termos médios uma *permeabilidade muito baixa*; em locais de granito decomposto (W5) e em zonas muito fracturadas a permeabilidade pode ser pontualmente alta e elevada, respectivamente. Esta unidade constitui um aquífero livre com permeabilidade (k) no global da ordem de 0,3 metros/dia e um coeficiente de armazenamento (S) da ordem de  $10^{-3}$ .

- Unidade B - *Rochas xistentas*, do CXG, de permeabilidade do tipo *fissural*, geralmente muito reduzida. Funciona como barreira impermeável, facilitando a emergência da água subterrânea.

Os fluxos são infiltrados nas áreas de terrenos graníticos a cotas acima de 900 metros; estes escoam-se em profundidade, de modo a contribuir localmente para os caudais da linha de água mais próxima, em especial no período húmido, e recarregam as reservas do maciço granítico, ou seja da Unidade A. Entretanto, o fluxo descendente na Unidade A, encontra a Unidade B, rochas xistentas, e ressurgue nas proximidades do seu contacto, pois estas rochas apresentam-se com uma permeabilidade muito inferior às dos granitos e das corneanas, funcionando como uma barragem aos fluxos que descem a serra nas áreas dos granitóides.

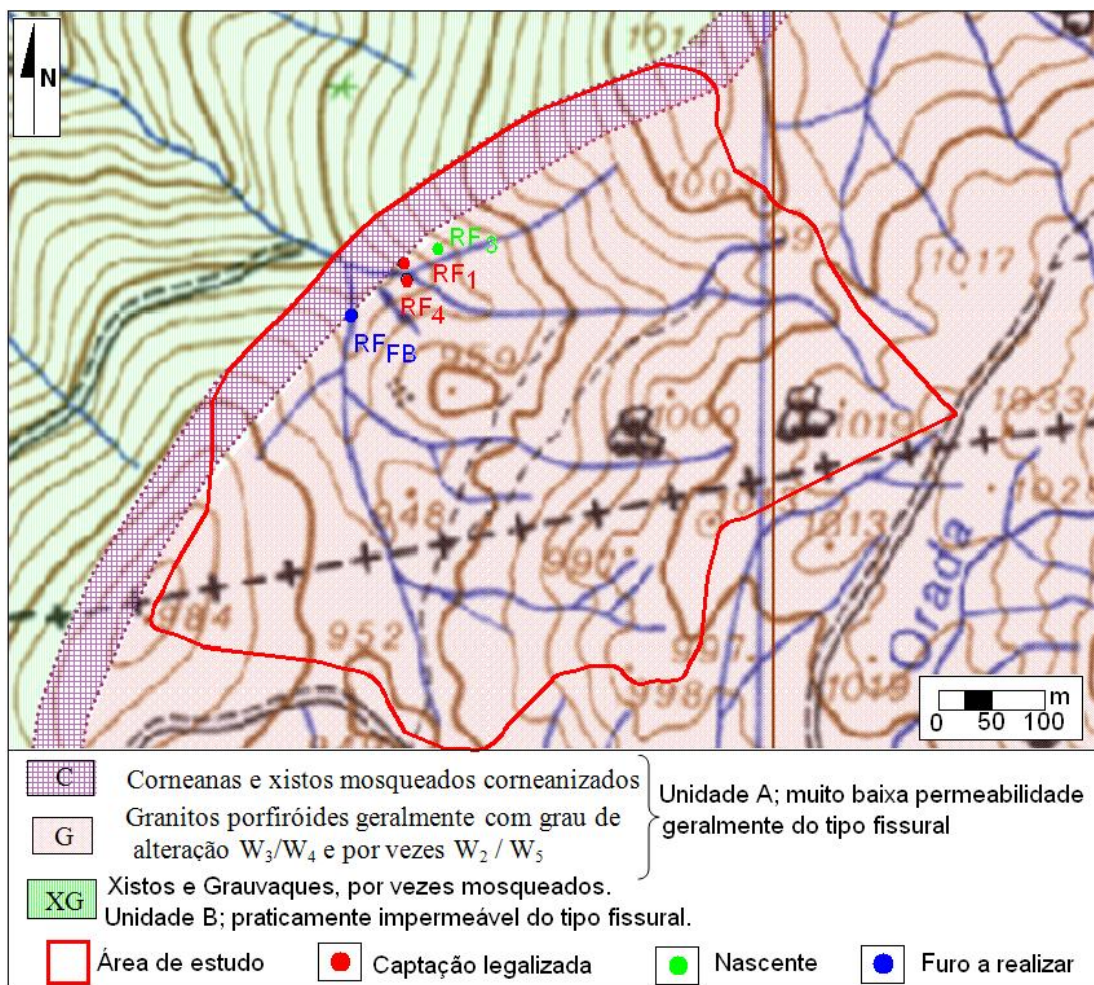


Figura 3.17 - Unidades Hidrogeológicas do Sector do Ribeiro Frio, do sistema aquífero da Água Fonte da Fraga.

### 3.6 - Pontos de Água

Os pontos de água principais do Sector Ribeiro Frio do sistema aquífero da *Água da Fonte da Fraga* apresentam-se na Figura 3.17, salientando-se que os pontos RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> são captações com o processo de legalização já concluído, perante a Direcção-Geral de Energia e Geologia. A nascente referida na Figura 3.17, não tem qualquer significado, devido ao muito baixo caudal disponível. Entretanto salienta-se que na mesma figura se apresenta um ponto de água designado por RF<sub>FB</sub>, que seguidamente será discutido.

#### 3.6.1 - Captação RF<sub>1</sub>

Esta captação, corresponde a um furo vertical de 52 m de comprimento, com desenvolvimento essencialmente sobre rochas graníticas (Figura 3.18).

A partir de um ensaio de ensaio de caudal, cujos resultados detalhados se apresentam na Figura 3.19 e após tratamento dos resultados, em termos de rebaixamento ao logo do tempo para os vários caudais, e em particular a partir da curva característica, “*rebaixamento vs caudais bombeados*”, considera-se como caudal admissível máximo o valor de 1,4 l/s (5040 l/h), com a bomba submersível aos 12m de profundidade.

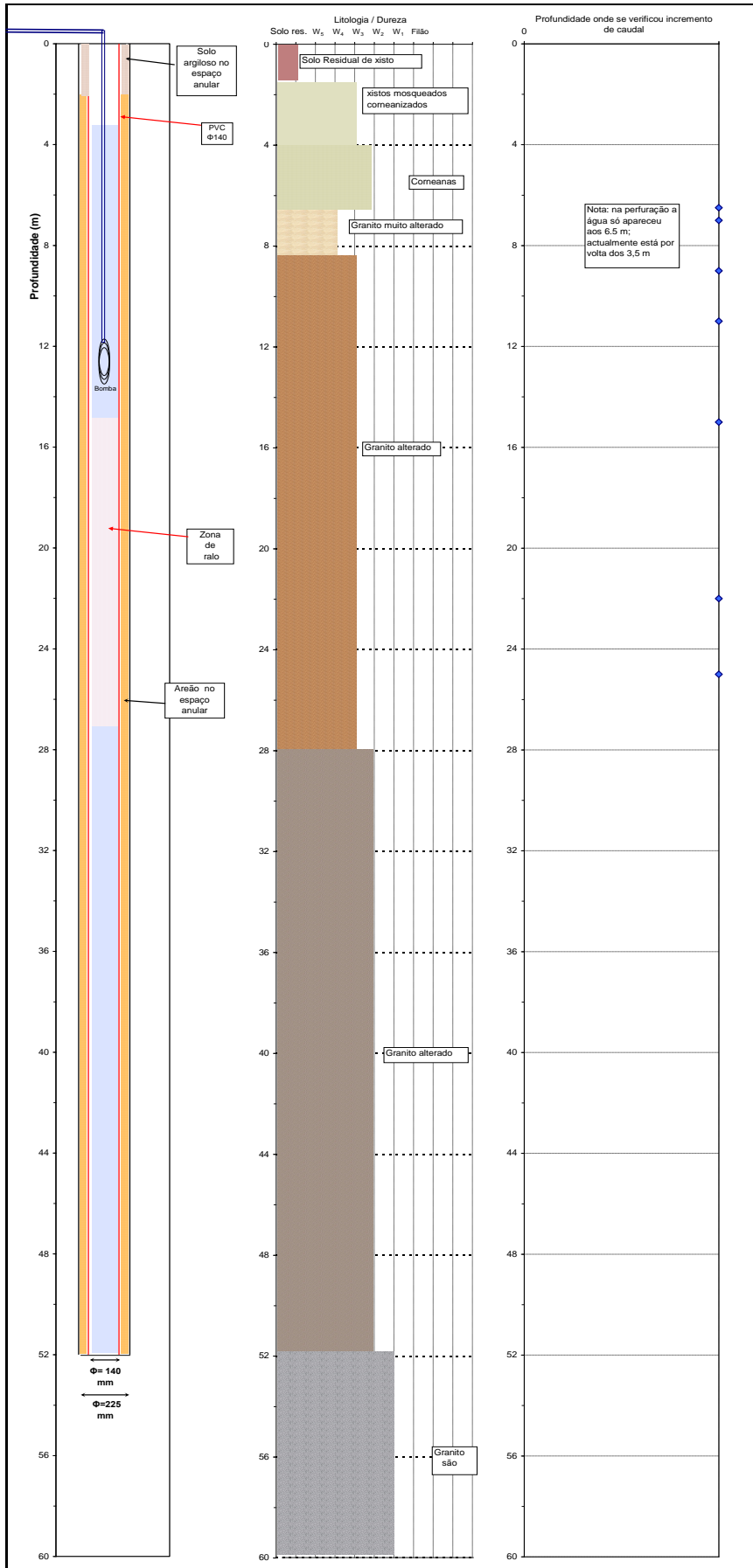


Figura 3.18 - Corte esquemático do furo RF<sub>1</sub> (UBI,2008).

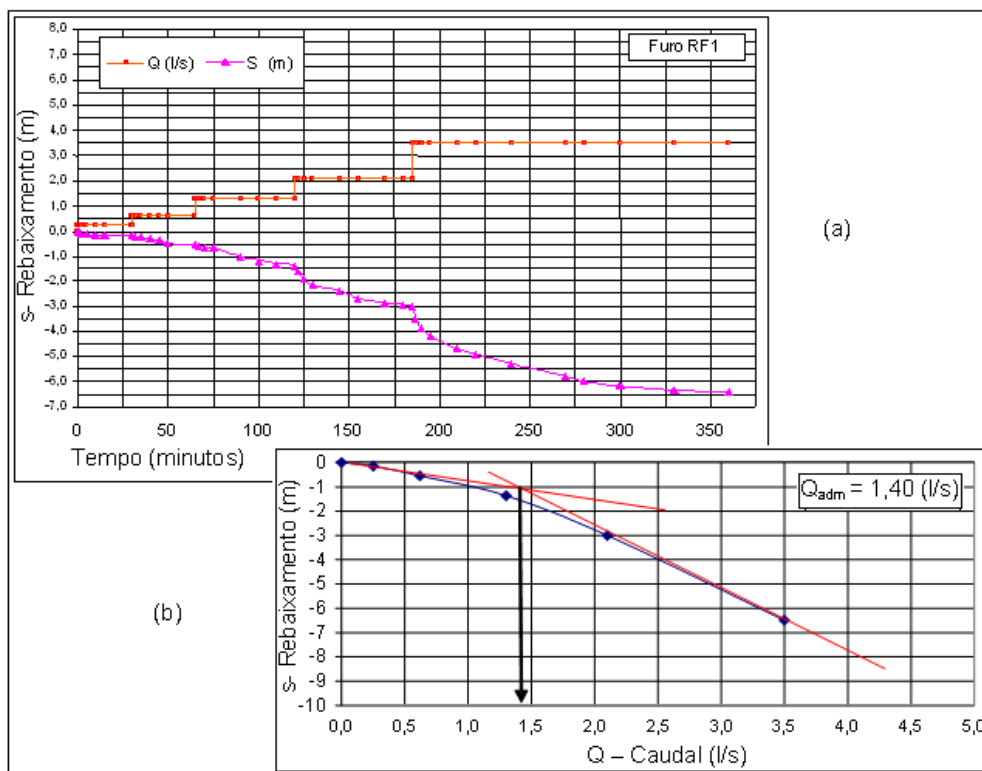


Figura 3.19 - Resultados dos ensaios de caudal da captação RF<sub>1</sub>. (a) - Caudal bombeado Vs Rebaixamento ao longo do tempo. (b) - Curva característica, “rebaixamento Vs caudal bombeado” com um resultado de 1,4 l/s como caudal admissível máximo (UBI, 2008).

### 3.6.2 - Captação RF<sub>4</sub>

De acordo com o relatório de legalização (UBI, 2010), a captação RF<sub>4</sub> é baseada numa nascente natural que tem uma estrutura muito singular adequada à situação local (Figura 3.20). A captação constitui no aproveitamento de uma nascente captada para uma mini-represa, constituída por um murete de betão de 0,3m de espessura e cerca de 1,5m por 1,5m, de modo a concentrar a água que ressurge na intersecção entre um conjunto de fracturas com uma falha. A zona de captação, situa-se como que numa ante-câmara no interior de uma casota de betão, estando a zona de válvulas e torneira de amostragem, já na zona visitável da casota.

Os caudais foram registados, semanalmente, ao longo dos anos 2007, 2008 e 2009, de onde resultaram os gráficos apresentados na Figura 3.21. Destes, salienta-se a não existência de um paralelismo perfeito na evolução dos caudais ao longo do ano, com a particularidade, de em Dezembro de 2007 e 2008 se terem verificado caudais modestos, ocorrendo por outro lado um período mais produtivo entre Janeiro a Abril de todos os anos.

Os resultados estatísticos sobre evolução do caudal ao longo dos três anos, de registos consecutivos na captação RF<sub>4</sub>, são apresentados na Tabela 3.5.

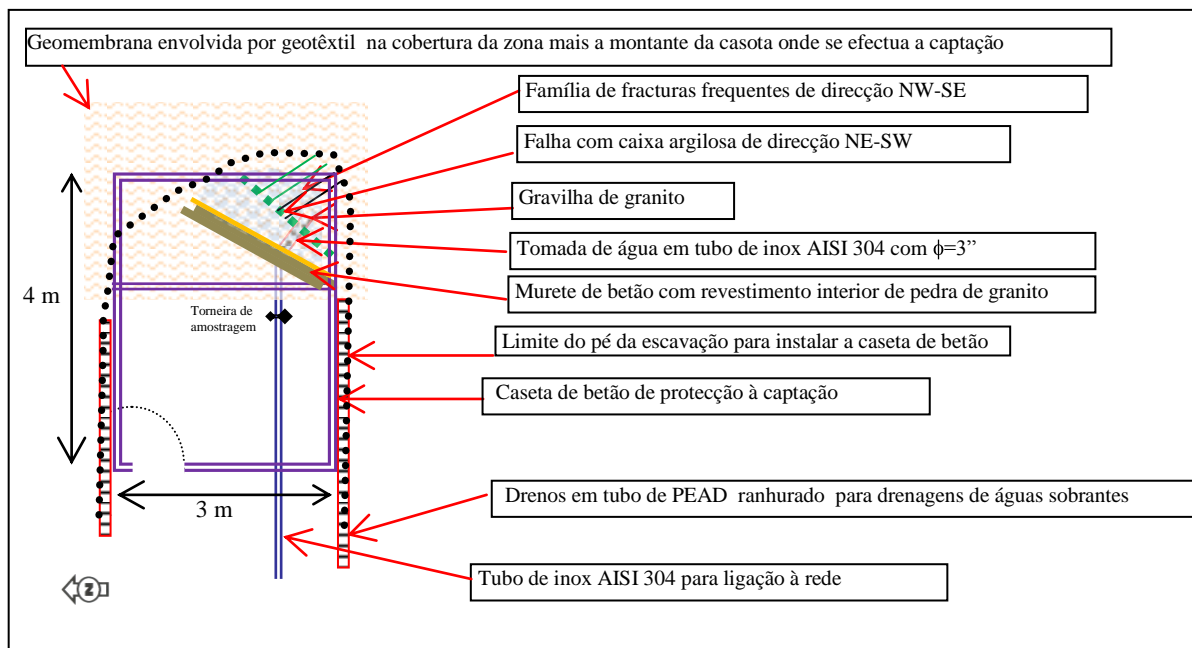


Figura 3.20 - Esquema em planta do sistema de captação RF<sub>4</sub> a partir de uma nascente (UBI,2008).

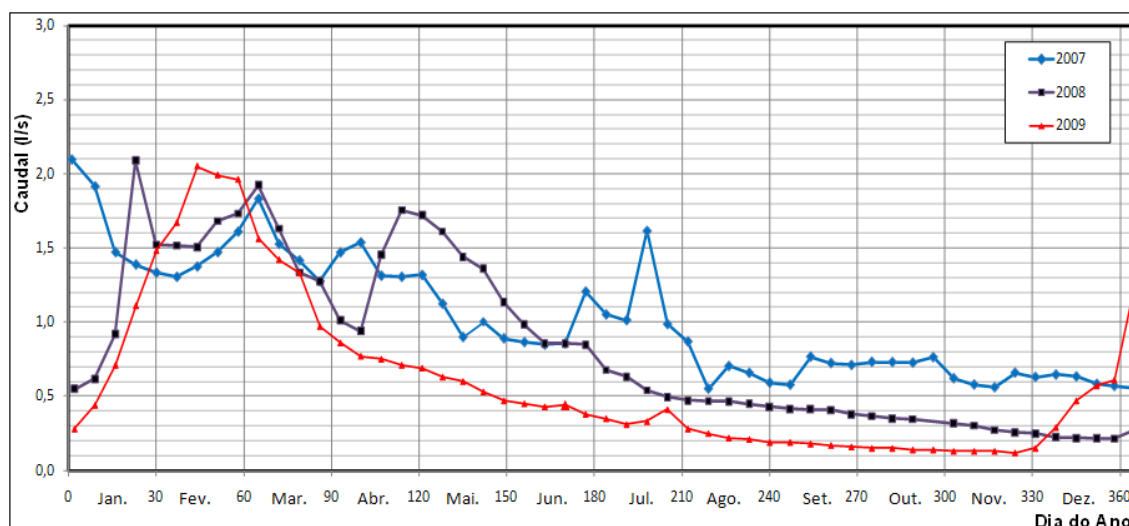


Figura 3.21 - Resultados da monitorização dos caudais da captação RF<sub>4</sub>. Medições semanais ao longo de 2007 a 2009. (UBI, 2010).

Tabela 3.5 - Elementos estatísticos da evolução do caudal da captação RF<sub>4</sub> no Sector do Ribeiro Frio (UBI, 2010).

Caudal RF4	Ano			
	2007	2008	2009	Total
Valor Mínimo (l/s)	0,55	0,21	0,12	0,12
Valor Médio (l/s)	1,03	0,85	0,61	0,83
Valor Máximo (l/s)	2,1	2,09	2,05	2,1
Desvio Padrão (l/s)	0,41	0,56	0,53	-
Desvio Padrão Relativo (%)	40	66	87	-

### 3.6.3 - Proposta de nova captação - RF<sub>FB</sub>

Como apresentado no item 3.4 há ainda condições de se efectuar uma nova captação no sector do Ribeiro Frio, pois considerando os caudais da captação RF<sub>1</sub> de 1,4 l/s e da captação RF<sub>4</sub> de 0,83 l/s, obtém-se um caudal total de extracção de 2,23 l/s, inferior ao caudal obtido a partir do balanço hidrológico (3,2 l/s), o que indica a existência de condições para instalação de uma nova captação com um caudal admissível de pelo menos 1,0 l/s.

O local ideal para a nova captação, furo vertical (RF<sub>FB</sub>), entende-se ser de acordo com o apresentado na Figura 3.17, sendo de salientar que terá desenvolvimento numa área de granitos porfiróides, que constituem o aquífero do tipo fissural. Este é recarregado em especial pelas infiltrações que se verificam na bacia da linha de água onde está incluído, que tem desenvolvimento para sul, e numa área de dimensões superiores à área de recarga das captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub>. Por outro lado, a proximidade do contacto com os xistos e grauvaques praticamente impermeáveis, potencia a acumulação de água subterrânea na zona de implantação do furo.

Assim, RF<sub>FB</sub> irá situar-se aproximadamente a 70 metros a SW das captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub>. A sua boca situar-se-á a uma cota de 912m, junto à margem esquerda de uma pequena linha de água de ordem 3, segundo a classificação de Strahler (*in* Lencastre e Franco, 1992). A referida linha de água tem o seu início a cotas de cerca de 990m, evoluindo aproximadamente 258m para Oeste, para depois progredir para NW ao longo de um troço de 257m até à zona da captação.

## 3.7 - Vulnerabilidade

A Vulnerabilidade para a zona em estudo foi avaliada pelo *Índice DRASTIC geral*, apresentando-se os resultados obtidos na Tabela 3.6

No caso da Unidade A, granitóides e corneanas, genericamente não apresenta grandes preocupações por se classificar em geral com vulnerabilidade baixa, devido ao contributo de considerável declive, no entanto nas proximidades das captações, porque o sistema geológico é fissurado e por vezes muito alterado há que ter especial cuidados de protecção.

As áreas da Unidade B, não apresentam qualquer preocupação em relação ao potencial risco de poluição, assim como em termos de focos de poluição não há registo de nenhuma situação que mereça referência.

Tabela 3.6 - Valores do Índice *DRASTIC* e respectiva vulnerabilidade das unidades hidrogeológicas das áreas associadas às águas do sistema aquífero da *Água Fonte da Fraga* no Sector do Ribeiro Frio (UBI, 2010).

Unidade	Parâmetro (*1)	Classe considerada	Grau	Peso	Índice Parcial (*2)	DRASTIC Total	Vulnerabilidade
B Granitóides e Corneanas	1	1.5 – 4.6 m	9	5	45	131	Em geral baixa. Por vezes em algumas fracturas e locais de muita alteração e de declive suave, pode apresentar-se média a alta
	2	102– 178 mm/ano	6	4	24		
	3	r. ígnea/metamórfica	3	3	9		
	4	fino	10	2	20		
	5	> 18 %	1	1	1		
	6	r. ígnea/metamórfica	4	5	20		
	7	0.28 – 20 m/dia	4	3	12		
C Rochas Xistentas	1	4.6 – 9.1m	7	5	35	92	Em geral extremamente baixa
	2	< 51 mm	1	4	4		
	3	rocha metamórfica	3	3	9		
	4	fino ou ausente	10	2	20		
	5	> 18%	1	1	1		
	6	rocha metamórfica	4	5	20		
	7	< 4.1 m/dia	1	3	3		
(*1) - Parâmetros: 1 – Profundidade do nível freático ou espessura da zona não saturada; 2 – Recarga; 3 – material do aquífero; 4 – tipo de solo; 5 – declive; 6 – zona não saturada e 7 – condutividade hidráulica.							
(*2) - O Índice é o correspondente ao DRASTIC geral, ou seja independente do tipo da poluição.							

### 3.8 - Perímetros de Protecção

#### 3.8.1 - Perímetros de protecção das captações existentes.

O perímetro de protecção de RF<sub>1</sub> foi definido em 2008, aquando do licenciamento desta captação junto à Direcção-Geral de Energia e Geologia (UBI,2008). Entretanto, ao haver o licenciamento de RF<sub>4</sub>, em 2010, levou a que o perímetro de protecção de RF<sub>1</sub>, sofresse ligeiros ajustes, devido à proximidade de RF<sub>4</sub> (UBI,2010). Assim, devido à proximidade de ambas as captações, ambas ficaram com as mesmas zonas de protecção, pois uma grande percentagem da área das zonas imediata, intermédia e alargada, quando analisadas isoladamente para cada captação, estavam sobrepostas. A configuração final apresenta-se na Figura 3.22, e as coordenadas rectangulares planas, dos seus vértices, de acordo com o sistema Hayford-Gauss, apresentam-se na Tabela 3.7. O critério seguido na definição do perímetro de protecção foi o de Mendes (2008).

Tabela 3.7- Coordenadas rectangulares planas, de acordo com o sistema Hayford-Gauss, dos vértices que definem o perímetro de protecção comum às captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> do Sector do Ribeiro Frio do Sistema Aquífero da Água Fonte da Fraga (UBI,2010).

Vértice	Coordenadas		Zona de Protecção
	M (m)	P (m)	
26	49 625	45 606	Imediata
27	49 695	45 631	
28	49 788	45 649	
29	49 719	45 471	
30	49 619	45 585	
26	49 625	45 606	Intermédia
31	49 760	45 676	
32	49 842	45 695	
33	49 743	45 426	
34	49 605	45 585	
35	49 595	45 590	Alargada
36	49 662	45 658	
37	49 928	45 785	
38	50 060	45 581	
39	50 065	45 462	
40	49 939	45 350	
41	49 650	45 378	

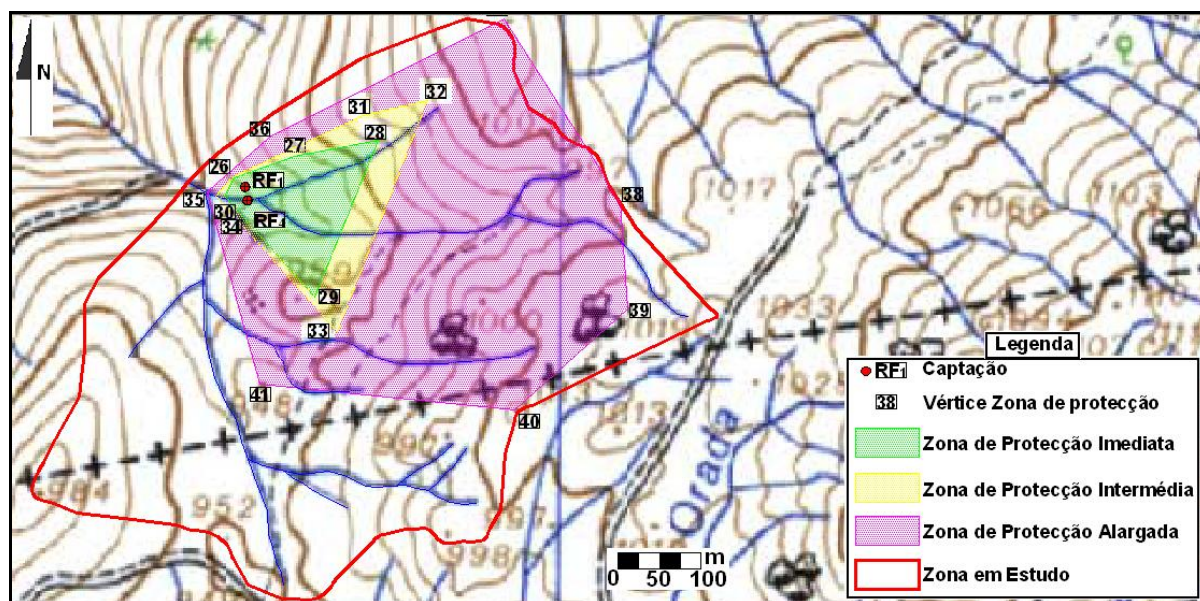


Figura 3.22 - Perímetro de protecção comum às captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> do Sector do Ribeiro Frio do Sistema Aquífero da Água Fonte da Fraga (adaptado de UBI, 2010).

### 3.8.2 - Perímetro de protecção da captação em proposta (RF<sub>FB</sub>)

O perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub> é definido de acordo com o método proposto por Mendes (2006) que, em termos sucintos, combina a aplicação das normas impostas pelo Decreto-Lei nº382/99 (DL,1999a) com as orientações seguidas no método de Wyssling, fazendo-se depois o ajuste das áreas obtidas com base nos aspectos geológicos, geomorfológicos e de vulnerabilidade da área envolvente à captação.

Obtém-se assim com este método um resultado final satisfatório, uma vez que gera zonas de protecção extremamente fiáveis e prudentes aliados à experiência empírica e bom senso. Salienta-se que os elementos principais deste método foram apresentados no Capítulo 2.

Naquele sentido consideraram-se, para a captação RF<sub>FB</sub>, os seguintes valores:

- o caudal de exploração (Q) admite-se como um valor máximo de 1,0 l/s;
- o valor da porosidade efectiva admitido é de 0.2 % que corresponde a um valor adequado para granitos previsto no anexo do Decreto-Lei nº 382/99 (DL,1999a).
- o valor da espessura saturada (H) a utilizar é de 100m, como sendo o valor provável a esperar para as características daquele furo.
- o valor da condutividade hidráulica (k) considerado, para as formações graníticas presentes na região é de  $k= 3.2 \times 10^{-6} \text{m/s}$ , valor típico neste tipo de formações (Davis, 1969).
- o valor do gradiente hidráulico (i) é considerado como o equivalente ao valor do declive médio da bacia hidrográfica onde se insere a captação, neste caso com um valor de 0,21.

Assim, consideram-se as seguintes etapas para definir o Perímetro de Protecção de RF<sub>FB</sub> (Figura 3.23):

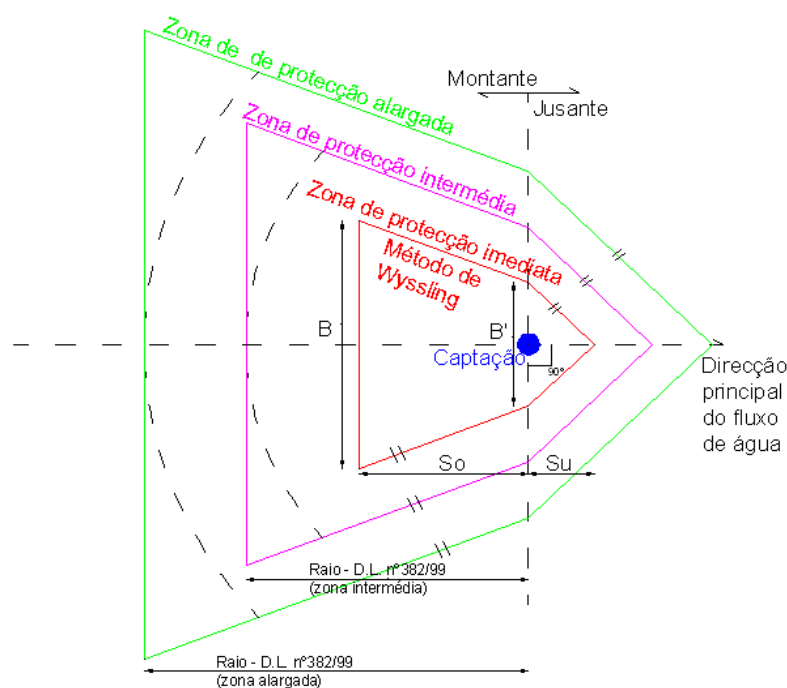


Figura 3.23 - Esquema sobre os elementos principais da aplicação do método de Mendes (2006) na definição do perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub>.

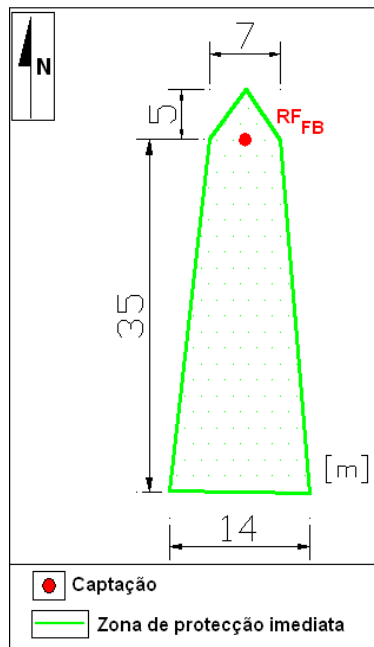
- i) Numa primeira fase aplicam-se as equações de acordo com a proposta do método de Wyssling, e os devidos ajustes, de acordo com proposta de Mendes (2006), apresentado no Capítulo 2, obtendo-se as seguintes distâncias:

Zona imediata ( $t = 1$  dia);  $S_o = 35$  m,  $S_u = 5$  m,  $B = 14$  m,  $B' = 7$  m;

Zona intermédia ( $t = 50$  dias);  $S_u = 10$  m;

Zona alargada ( $t = 3500$  dias);  $S_u = 15$  m.

- ii) Define-se a direcção global e sentido do fluxo, S-N, como sendo o sentido preferencial do fluxo de água subterrânea que abastece a captação  $RF_{FB}$ .
- iii) Desenha-se a zona de protecção imediata de acordo como o esquisso da Figura 3.24.



- iv) De seguida com base no valor de  $S_u$ , correspondente à zona de protecção intermédia ( $S_u=10$ m), desenha-se o vértice desta, e desenvolve-se com paralelas ao limite da zona imediata, com a particularidade de a montante se desenvolver até à distância correspondente ao  $r$  ( $t=50$  dias) do método do raio fixo (DL, 1999a), ou seja  $r = 140$  m, no presente caso.
- v) Por fim, para a zona de protecção alargada seguiu-se o mesmo raciocínio do ponto anterior, depois de se usar o  $S_u$  correspondente a  $t= 3500$  dias, ou seja,  $S_u = 15$  m. Esta zona de protecção, foi limitada pela bacia hidrográfica que recarga a captação  $RF_{FB}$  (Figura 3.25), pois o valor de  $r$  ( $t=3500$  dias) obtido

pelo método do raio fixo (DL,1999a) é muito superior ao da fronteira geomorfológica.

Alguns elementos gráficos de apoio à definição do perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub> apresentam-se no Anexo A1.

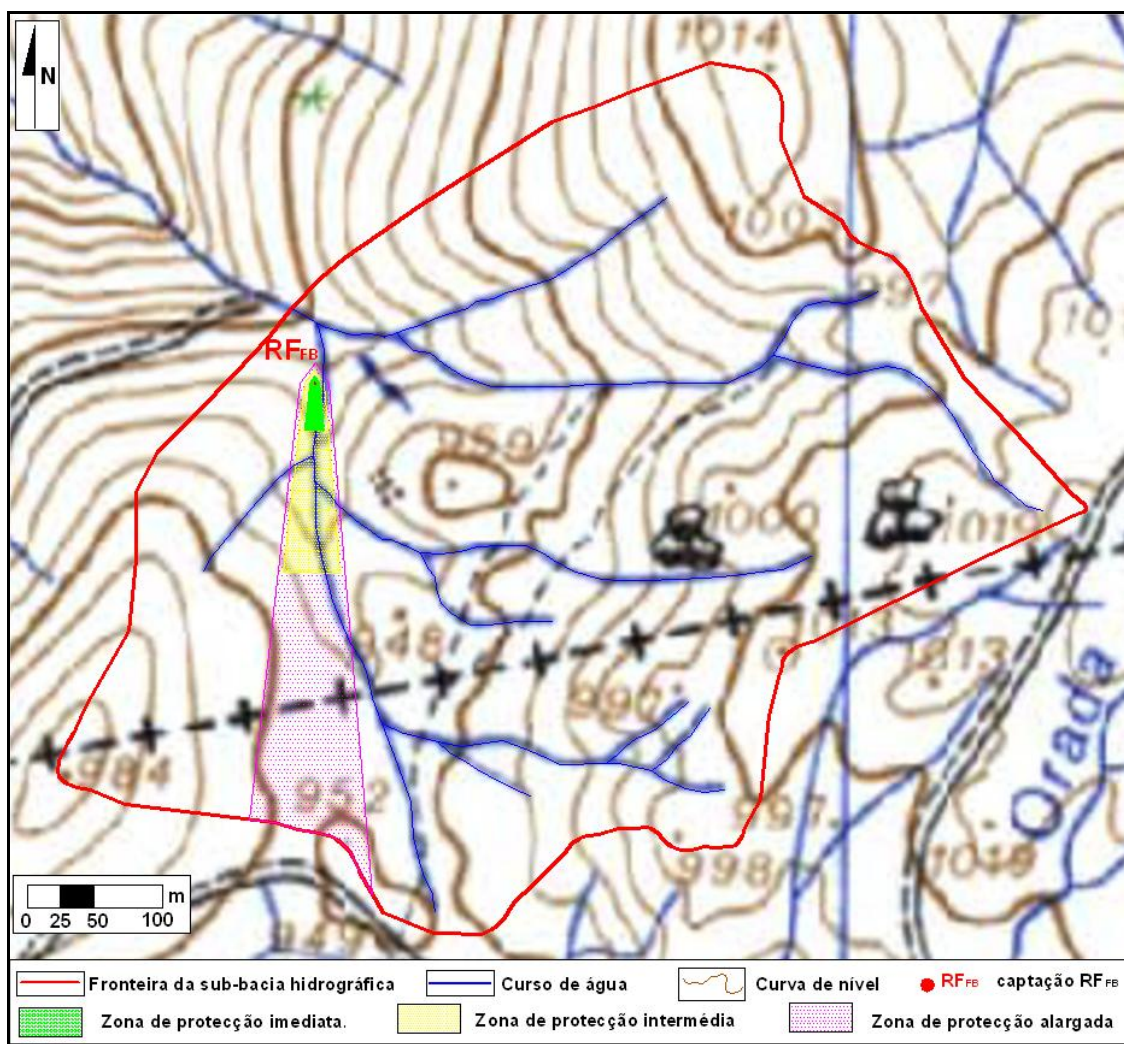


Figura 3.25 - Perímetro de protecção da captação de água subterrânea RF<sub>FB</sub> em proposta, admitindo a direcção do fluxo S-N.

Aquando da observação dos resultados finais obtidos para o perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub> concluiu-se haver necessidade da sua optimização, uma vez que este é obtido a partir da definição do sentido preferencial do escoamento como sendo S-N. Porém uma análise mais detalhada da área de recarga da captação RF<sub>FB</sub> indica que a consideração de apenas uma direcção preferencial do escoamento peca por defeito, uma vez que há manifestamente mais duas direcções a serem consideradas como sendo direcções preferenciais do escoamento (Figura 3.26).

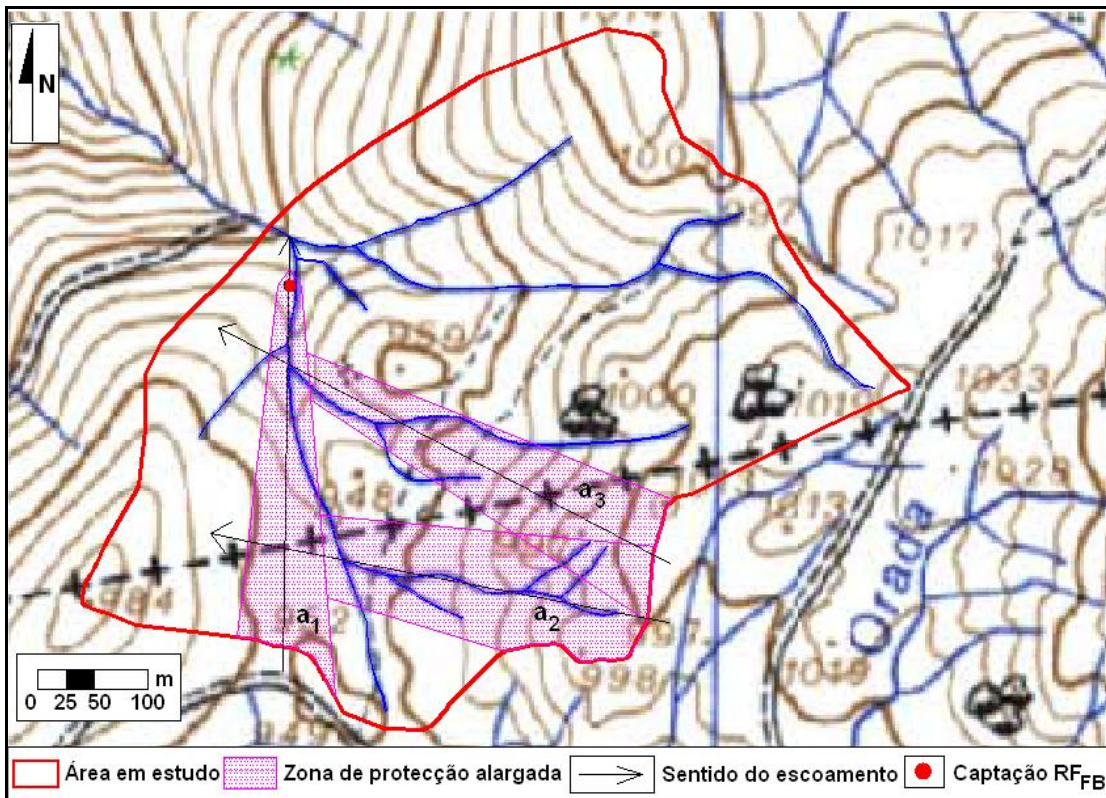


Figura 3.26 - Posições de áreas de escoamento de água subterrânea complementares ( $a_2$  e  $a_3$ ) à área considerada principal ( $a_1$ ) que abastecem a captação  $RF_{FB}$ .

Atendendo o exposto optou-se por se considerar, individualmente, cada uma destas novas áreas com direcções SE-NW e E-W do escoamento, e a partir das mesmas calcular novas zonas de protecção, a serem acrescentadas às obtidas inicialmente. Esta optimização apenas foi considerada para a zona de protecção alargada, uma vez que para as zonas de protecção inferiores, ou seja a imediata e intermédia, o resultado para a configuração inicial ( $a_1$ ) entende-se genericamente adequado.

O facto das novas áreas a considerar se localizarem sobre zonas geologicamente idênticas à primeira leva a que os resultados obtidos, para a zona de protecção alargada, sejam idênticos aos primeiros, uma vez que as expressões e os parâmetros utilizados são os mesmos que os desenvolvidos anteriormente.

No final, considerando os aspectos geomorfológicos e em particular a relação entre as várias áreas obtidas ( $a_1, a_2$  e  $a_3$ ) e as zonas de cumeada, leva a que se efectue o ajuste de modo a conseguir-se uma área de protecção alargada com uma configuração simples, como é apresentado na Figura 3.27.

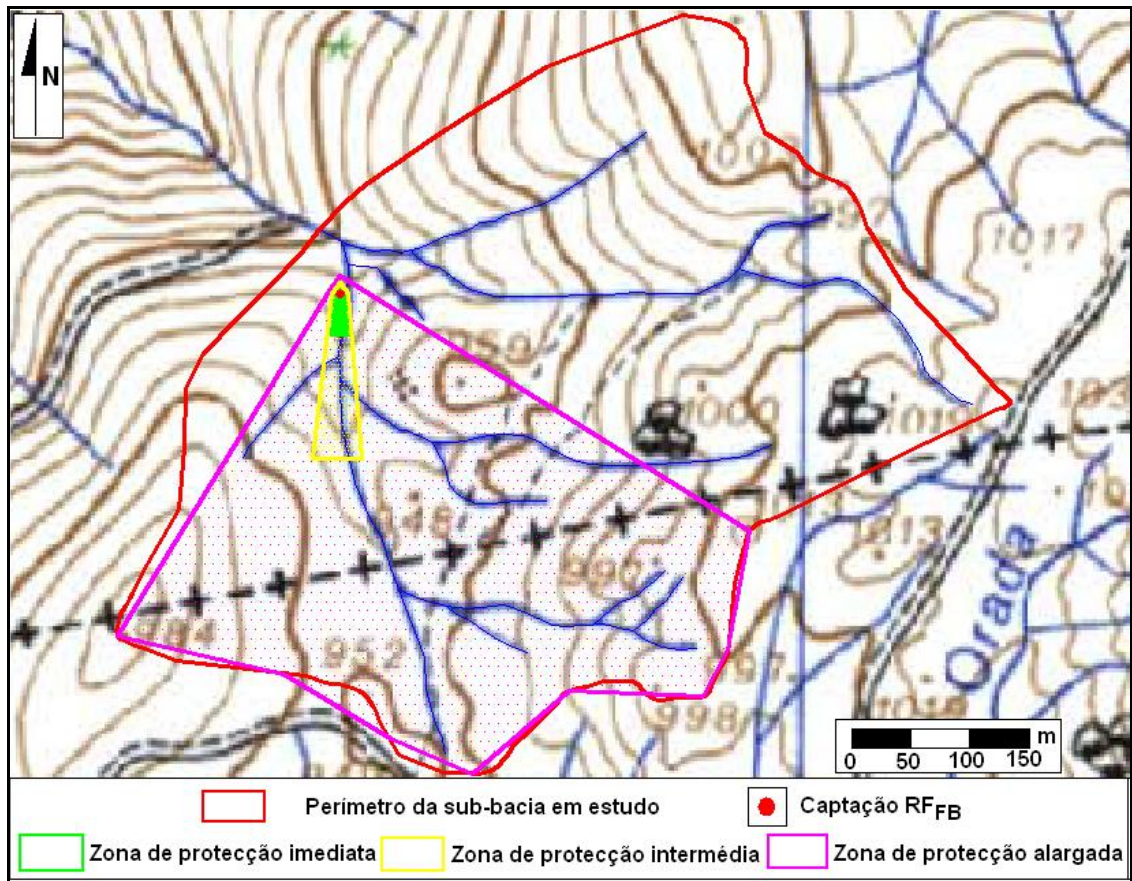


Figura 3.27 - Perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub> em proposta resultante da consideração das principais áreas de recarga das várias sub-bacias a montante, no Sector do Ribeiro Frio das *Águas Fonte da Fraga*.

A captação RF<sub>FB</sub> em proposta insere-se no conjunto de captações do Sector Ribeiro Frio. Como tal, a existência das captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> na proximidade de RF<sub>FB</sub>, faz com que as zonas de protecção, de cada uma destas captações, sejam, praticamente, contíguas ou mesmo que se intersectem mutuamente. Assim, entende-se agrupar os perímetros de protecção, de cada umas das captações, num único (Figura 3.28), organizado nas suas três zonas de protecção (imediata, intermédia e alargada), alcançando-se desta forma, uma geometria das áreas a proteger, preventiva, mas fluida o suficiente que possibilite a sua aplicabilidade no terreno.

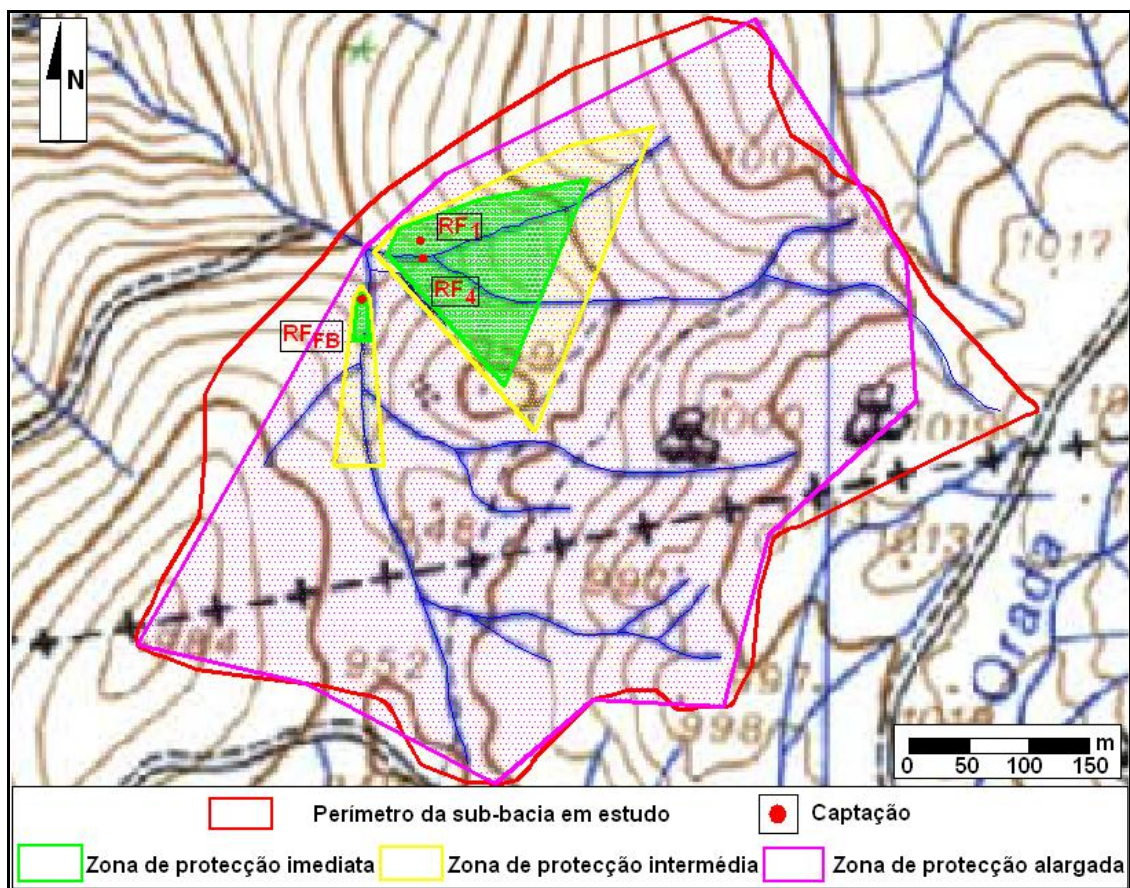


Figura 3.28 - Proposta de perímetro de protecção comum às captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> legalizadas e RF<sub>FB</sub> (em proposta) para o Sector do Ribeiro Frio das Águas Fonte da Fraga.

### 3.9 - Características do recurso

Aquando do processo de legalização das captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> foram efectuados vários estudos analíticos, nomeadamente análises físico-químicas resumidas e análises microbiológicas, mensalmente, além de uma análise físico-química completa e uma análise radiológica. O período em que decorreram, mensalmente, as análises, foi de Novembro de 2007 a Outubro de 2008, no caso de RF<sub>1</sub> e de Janeiro de 2009 a Julho de 2010, no caso de RF<sub>4</sub>.

Dos resultados das análises físico-químicas conclui-se que, de uma forma genérica, a água captada em ambas as captações se enquadra na classificação de “Águas Fonte da Fraga”, visto que apresentam uma consistência entre os seus resultados e os das captações mais antigas, situadas na vertente sul da Gardunha, no Sector denominado de *Couto*. Esta constatação tem ainda mais consistência quando se efectua o *Diagrama de Piper* (Figura 3.29) com os resultados em termos dos valores médios do período de legalização das captações legalizadas em simultâneo com resultados de RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub>.

Dos resultados das análises físico-químicas destaca-se o facto da sílica ser a componente predominante nas águas das captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> com cerca de 42% e 43%, respectivamente, da mineralização total. A restante mineralização é distribuída pelos vários iões, sendo r HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

>>  $r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}$  em relação aos aniões, e,  $r \text{Na}^+ >> r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$  em relação aos catiões. O bicarbonato e o sódio, contribuem respectivamente, com cerca de 30 % e 12 % da mineralização total no caso da água de RF<sub>1</sub> e 22% e 12% para a água da captação RF<sub>4</sub>, sendo estes os iões de maiores concentrações.

Assim e de acordo com estes resultados conclui-se que, para o sector em estudo, se está perante um recurso que se classifica como *água hipossalina, bicarbonatada sódica, silicatada, com reacção ácida*, sendo de salientar que são também as designações atribuídas às águas das captações do Sector do Couto.

Em relação às espécies químicas vestigiárias pesquisadas, encontram-se na generalidade abaixo dos limites de detecção instrumental, sendo de realçar que os valores de todos os parâmetros físico-químicos se encontram, à data, dentro dos parâmetros próprios de água potável para consumo humano, regidos por o DL 306/2007 (DL,2007b).

Portanto, pode referir-se que a água presente no Sector do Ribeiro Frio, região alvo deste estudo, é uma água de  *muito baixa mineralização*, apenas com cerca de 49,4 mg/l, na captada em RF<sub>1</sub> e 31,9 mg/l em RF<sub>4</sub>, sendo designada por *doce (fresh water)* em relação ao resíduo seco, e por *branda (soft)* em relação à dureza (UBI, 2008; UBI, 2010).

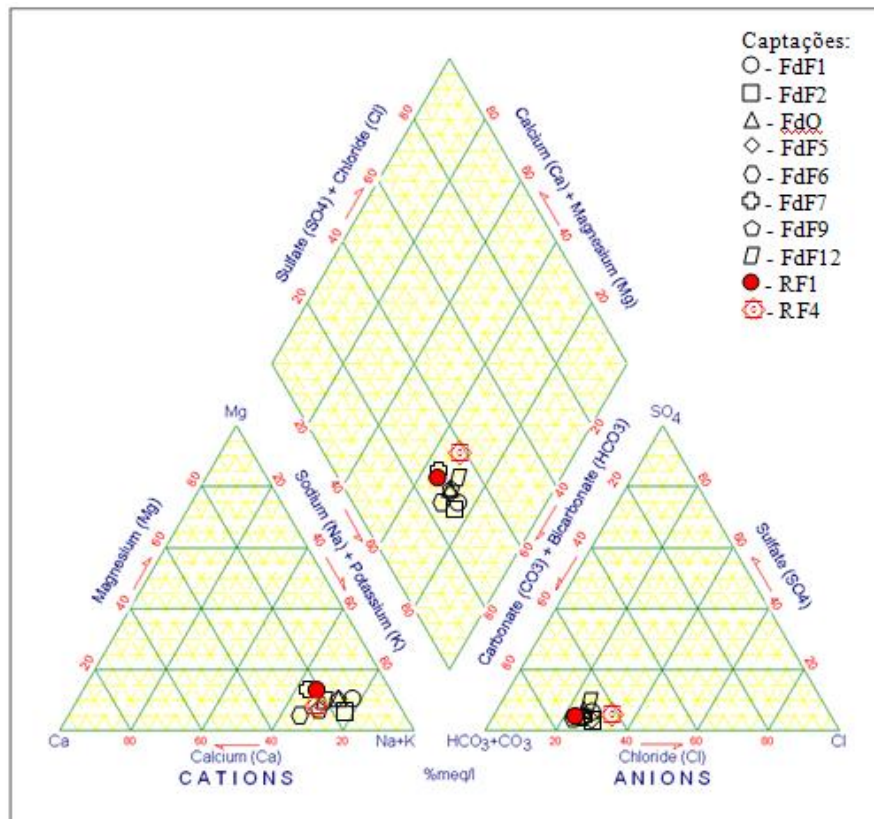


Figura 3.29 - Resultados das principais de análises físico-químicas de RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> em diagrama de Piper e comparação com os resultados das captações do Sector do Couto (vertente sul da Serra da Gardunha) do Sistema Aquífero da Água Fonte da Fraga (UBI, 2010).

### 3.10 - Outros Aspectos Característicos

Na análise da dinâmica inerente às águas subterrâneas factores como os climáticos e as próprias características intrínsecas de cada sistema aquífero são determinantes, porém há ainda um outro conjunto de factores e propriedades regionais que influenciam os processos envolvidos nestas acções, assim como a qualidade do recurso.

Factores como o tipo de vegetação presente na região, o escoamento e quantidade de água na rede hidrográfica, o *pH* dos solos, a humidade do ar, a insolação e a radiação global, são alguns desses exemplos.

No que diz respeito à vegetação existente na zona em estudo, esta é genericamente dominada pela presença de plantas arbustivas (giestas - *Cytisus striatus*) com 1 a 3 metros de altura, alternadas com a presença de fetos (*Plantae/Pteridophyta*), ou, casos mais pontuais, de arbustos espinhosos como a caldoneira (*Echinopartum ibericum*) ou espécies arbóreas como o pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*) ou o salgueiro-branco (*Salix Alba*). Procura-se dar uma imagem da vegetação presente no sector do Ribeiro Frio através da Figura 3.30.



Figura 3.30 - Imagens sobre a vegetação presente no sector do Ribeiro Frio.

Em relação aos outros factores mencionados anteriormente, e a título complementar no presente trabalho, apresenta-se o enquadramento da zona em estudo, nos vários mapas publicados sobre os vários parâmetros, pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2007) na Figura 3.31.

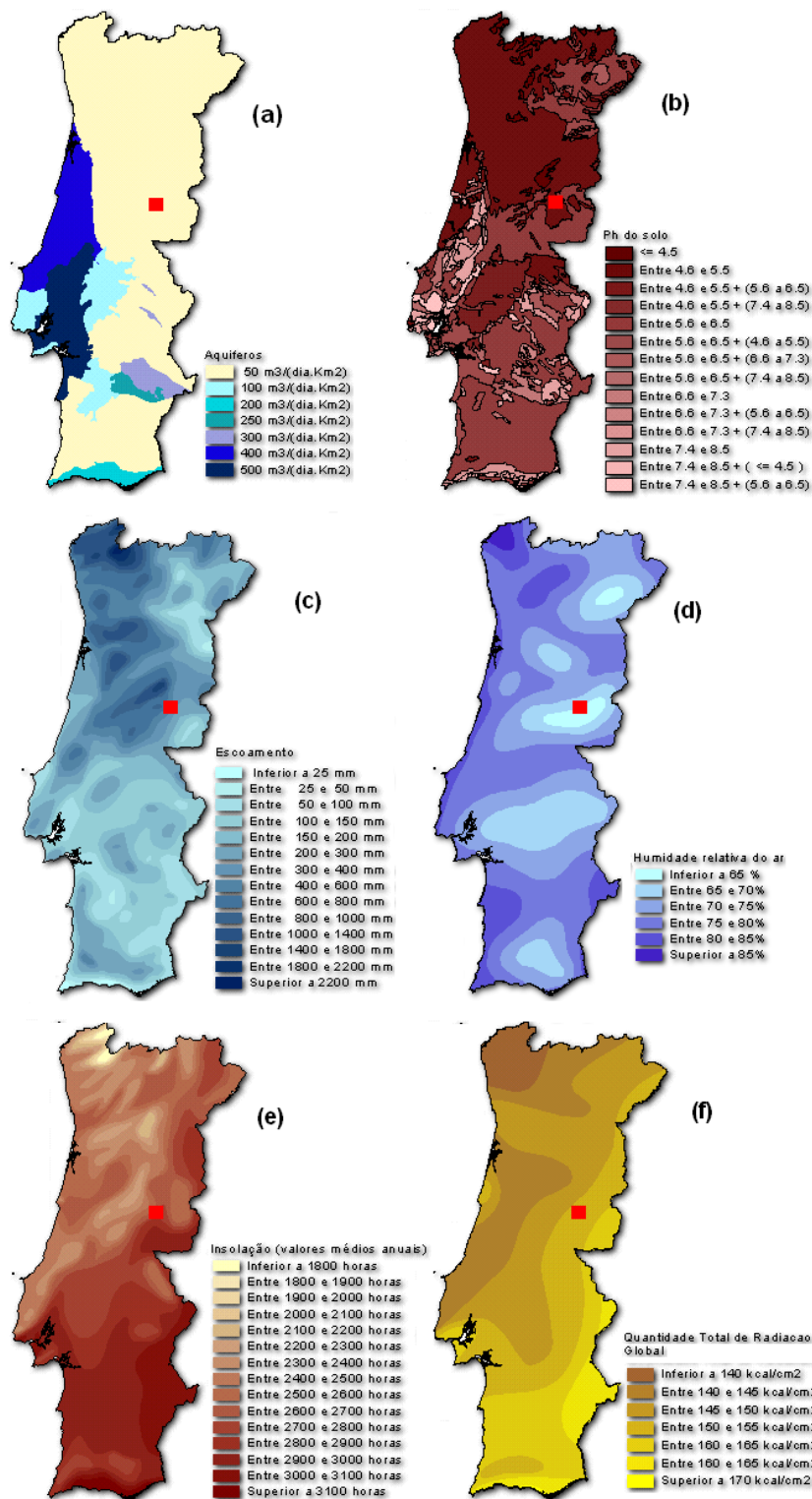


Figura 3.31 - Enquadramento da zona de estudo em relação aos principais parâmetros de águas subterrâneas e características associadas: (a) - Produtividade média aquíferos subterrâneos; (b) - pH dos solos ; (c) - Escoamento superficial na rede hidrográfica (valores médios anuais); (d) - Humidade do ar (valores médios anuais, período 1931-1960); (e) - Insolação (valores médios anuais, período 1931-1960); (f) - Radiação solar (adaptado de APA, 2007).

# Capítulo 4

## MODELAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

### 4.1 - Introdução

Numa fase inicial deste capítulo efectua-se a modelação do escoamento subterrâneo da área em estudo com o recurso ao software *FEFLOW*, incluindo a análise da distribuição das linhas de fluxo de água subterrânea ao longo de toda a zona em estudo.

No seguimento são analisadas as possíveis trajectórias envolvidas na migração de um contaminante, verificando se este poderá atingir alguma das captações na área em estudo, permitindo assim uma contribuição para a optimização do perímetro de protecção estabelecido pelos métodos analíticos.

O contributo sobre o aperfeiçoamento do modelo de escoamento subterrâneo e de transporte de um hipotético poluente na região em estudo, permite prever respostas do aquífero de modo a implementar diferentes soluções para os distintos cenários admitidos. Tendo em consideração que as respostas serão tão diversas como diferentes forem os cenários possíveis, a escolha da decisão mais ajustada será optimizada com a informação adquirida. Neste sentido, numa fase final, efectua-se a simulação de um cenário com novos poços extractores a serem utilizados como “barreira” de segurança a uma eventual frente de contaminação, de modo a extrair a água subterrânea contaminada, e assim, não permitir que ela avance até às captações.

### 4.2- Modelação da Área em Estudo com Recurso ao FEFLOW

#### 4.2.1 - Introdução

O modelo numérico *FEFLOW* foi desenvolvido pela *WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research*, Berlim, Alemanha. É um software avançado e interactivo de simulação bidimensional (2D) e tridimensional (3D) do fluxo subterrâneo, variável em função da densidade e dos processos de transporte de massa e de calor nas águas subterrâneas. Utiliza o método numérico de resolução das equações diferenciais parciais por elementos finitos, sendo que as características mais importantes neste modelo matemático, que o aproximam da realidade do sistema aquífero que quer modelar, diz respeito aos elementos finitos, uma vez que deste modo é possível traduzir de forma espacialmente mais precisa a geometria do aquífero e os seus limites. Outro dos aspectos importantes prende-se com o facto deste software ter em consideração a heterogeneidade e a anisotropia do meio.

A primeira versão deste software, *FEFLOW4.8*, foi criada em 1996, sendo que a utilizada neste trabalho é a versão 5.4, comercializada em 2009.

Segundo Diamantino (2009) este software apresenta-se como uma ferramenta eficaz para a modelação de sistemas de águas subterrâneas que, entre outros aspectos permite:

- (i) a modelação de sistemas subterrâneos que se caracterizem pela existência (ou não) de superfícies livres, como e o caso de aquíferos freáticos, e aquíferos suspensos, implementando uma aproximação que permite a movimentação dos elementos da malha;
- (ii) a solução de problemas nas zonas saturada e não saturada do solo;
- (iii) a modelação de fenómenos de transporte variável em função simultânea das densidades e da temperatura; e
- (iv) o transporte de contaminantes por convecção e por dispersão, no qual as espécies químicas podem estar sujeitas a adsorção, dispersão hidrodinâmica e reacções químicas de 1ª ordem.

De acordo com Diersch (2009), o sistema de simulação inerente a este software e que permite a simulação de modelos de fluxo, migração de contaminantes e transporte de calor, que pode processar estes fenómenos em separado ou em conjunto, tem como base os princípios físicos de:

- i) conservação de massa de fluidos e sólidos;
- ii) conservação de massa de contaminantes e constituintes químicos; e
- iii) conservação de energia.

As principais equações básicas do escoamento subterrâneo afectas ao *FEFLOW* são descritas em Anexo 2. Os aspectos metodológicos principais para efectuar a modelação e ainda para efectuar as principais aplicações apresentam-se em Anexo 3.

#### **4.2.2 - Modelação da área em estudo**

Neste ponto faz-se referência, de uma forma suscita às principais etapas envolvidas no desenvolvimento do modelo numérico do escoamento subterrâneo da área em estudo - Sector do Ribeiro Frio - assim como da modelação do transporte de massa local.

### 4.2.2.1 - Dados gerais e geometria

O modelo numérico, delineado na Figura 4.1, cobre uma área de, aproximadamente, 0.27 km<sup>2</sup> e foi obtido com 3036 elementos triangulares que originaram 1577 nós para todo o domínio modelado, com a particularidade da malha ter sido alvo de um refinamento nas zonas consideradas como singulares. É um modelo bidimensional (2D), do tipo saturado com uma escala 1:1. O aquífero apresenta uma projecção horizontal sem confinamento com uma acção combinada de fluxo de água subterrânea e transporte de massa. Na Tabela 4.1 apresenta-se um sumário das características que definem o problema.

Tabela 4.1 - Principais características do modelo numérico de escoamento subterrâneo e transporte de massa do Sector do Ribeiro Frio do sistema aquífero das águas Fonte da Fraga.

<b>Tipo de problema</b>	<b>Modelo de escoamento subterrâneo e transporte de massa</b> <b>Zona saturada</b>
Intervalos de tempo	Controlo automático dos intervalos de tempo ( <i>Predictor-corrector schemes – Forward Euler/backward Euler time intergration shemes</i> )
Nº de intervalos de tempo	Não especificado
Extensão de cada intervalo de tempo	Não especificado
Erro de tolerância	0,001 aplicado a " <i>Euclidian L2 integral (RMS) norm</i> "
Nº máximo de iterações por intervalo de tempo	12
Upwinding	" <i>shock capturing</i> "
Estimador de erro <i>à posteriori</i>	Algoritmo " <i>Oñate-Bugeda</i> "
Dimensão	2D (bidimensional)
Escala	1 : 1
Tipo de gerador da malha	"Tmesh (Delaunay)"
Tipo de elementos	Triangulares
Nº de elementos	3036
Nº de nós	1577
Refinamento da malha	Sim (local)
Optimização da malha	Não
Projecção (Aquífero)	Horizontal
Confinamento	Sem confinamento. Nível freático.
Escoamento aplicado aos problemas de transporte	Fluxo e transporte de massa
Perímetro	2191,73 [m]
Área	272249,41 [m <sup>2</sup> ]

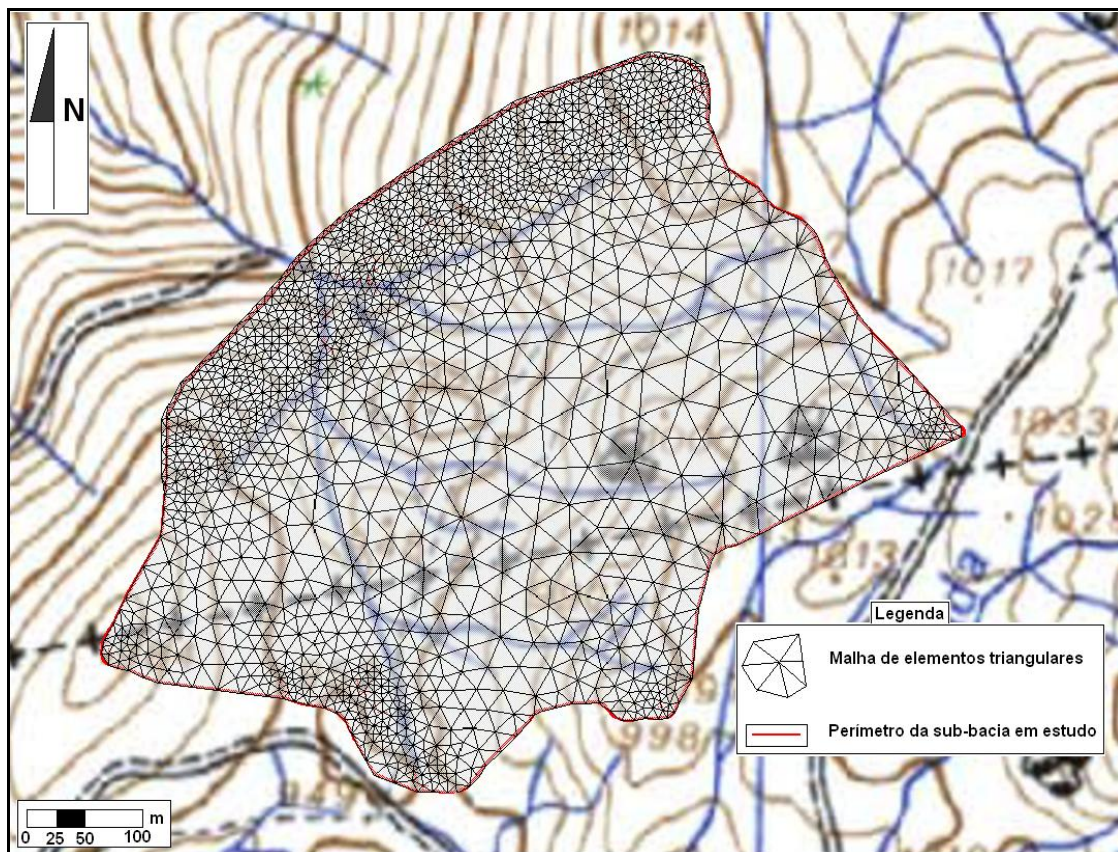


Figura 4.1 - Malha de elementos finitos para o modelo 2D de escoamento subterrâneo do Sector do Ribeiro Frio do sistema aquífero das águas Fonte da Fraga.

#### 4.2.2.2 - Descrição das condições iniciais

A definição das condições iniciais corresponde à regionalização, a toda a extensão da zona em estudo, dos níveis piezométricos. Esta distribuição piezométrica, apresentada na Figura 4.2, é obtida através da interpolação dos valores dos níveis piezométricos nos pontos onde estes são conhecidos. A introdução destes valores é feita através da referência das coordenadas dos pontos, aos quais está associado um valor piezométrico. O método utilizado para a regionalização é o de “*Akima inter/extrapolation*” cúbica a 5 pontos na vizinhança.

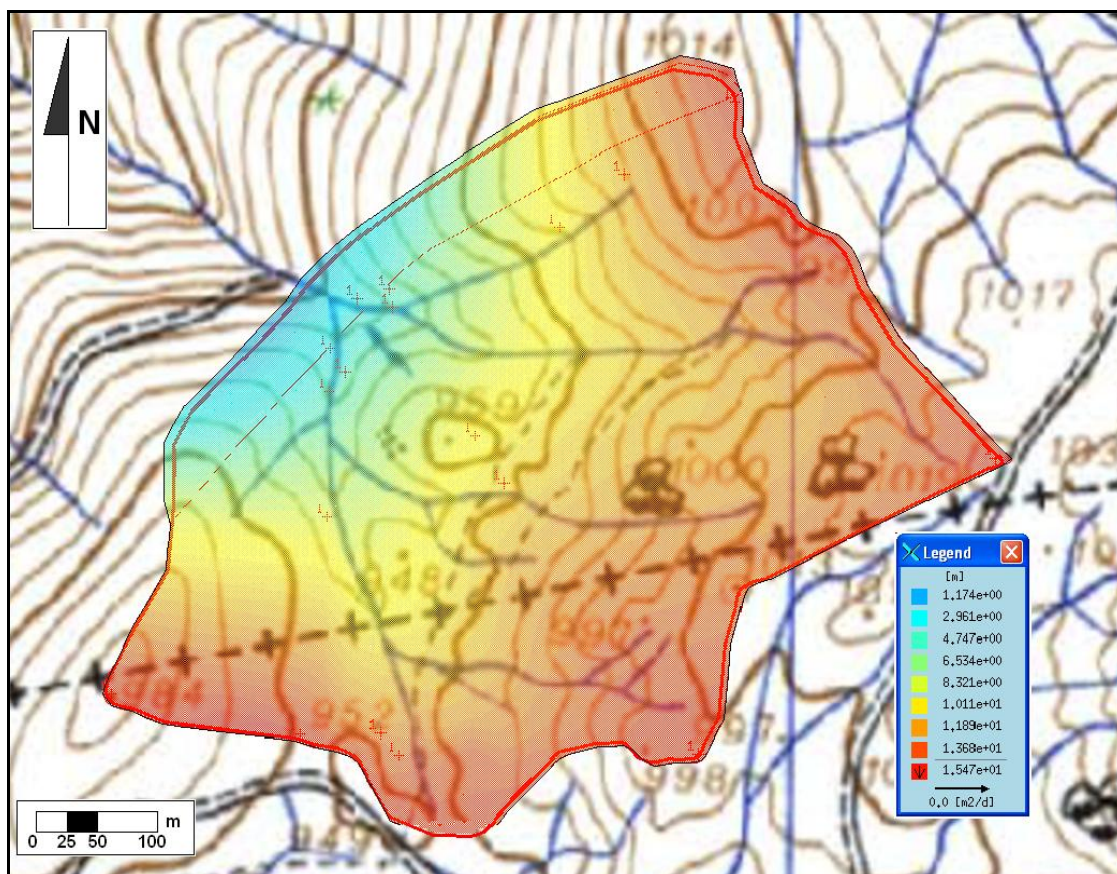


Figura 4.2 - Distribuição da profundidade dos níveis hidroestáticos na sub-bacia em estudo obtida com a interpolação “Akima inter/extrapolation” dos valores conhecidos, usando o software FEFLOW.

#### 4.2.2.3 - Descrição das condições de fronteira para o modelo de escoamento

O conhecimento hidrogeológico e o saber acumulado sobre o funcionamento hidráulico do sistema aquífero das águas da *Fonte da Fraga*, exposto nos vários trabalhos de UBI (2004, 2008, 2010), serviram de base à imposição das condições de fronteira ao modelo. Deste modo definiu-se um nível freático (“*Head 1º Tipo*”) não alterável ao longo dos pontos nodais que estabelecem o perímetro da fronteira hidrogeológica da zona em estudo, com excepção da fronteira que é definida pela zona de xistos. No que diz respeito à representação da extracção de água do modelo, esta foi conseguida com a quantificação dos caudais de extracção das captações  $RF_1$ ,  $RF_4$  e  $RF_{FB}$  com valores de 121, 71 e 86,4 [m<sup>3</sup>/d], respectivamente, sendo que o caudal de  $RF_{FB}$  é um valor conjectural. A introdução destes valores é conseguida através da opção “*Well 4º Tipo*” com a inserção de valores de sinal positivo que representam a extracção, ao invés os de sinal negativo significam injeção de caudal. As condições de fronteira de fluxo aplicadas ao modelo são apresentadas na Figura 4.3.

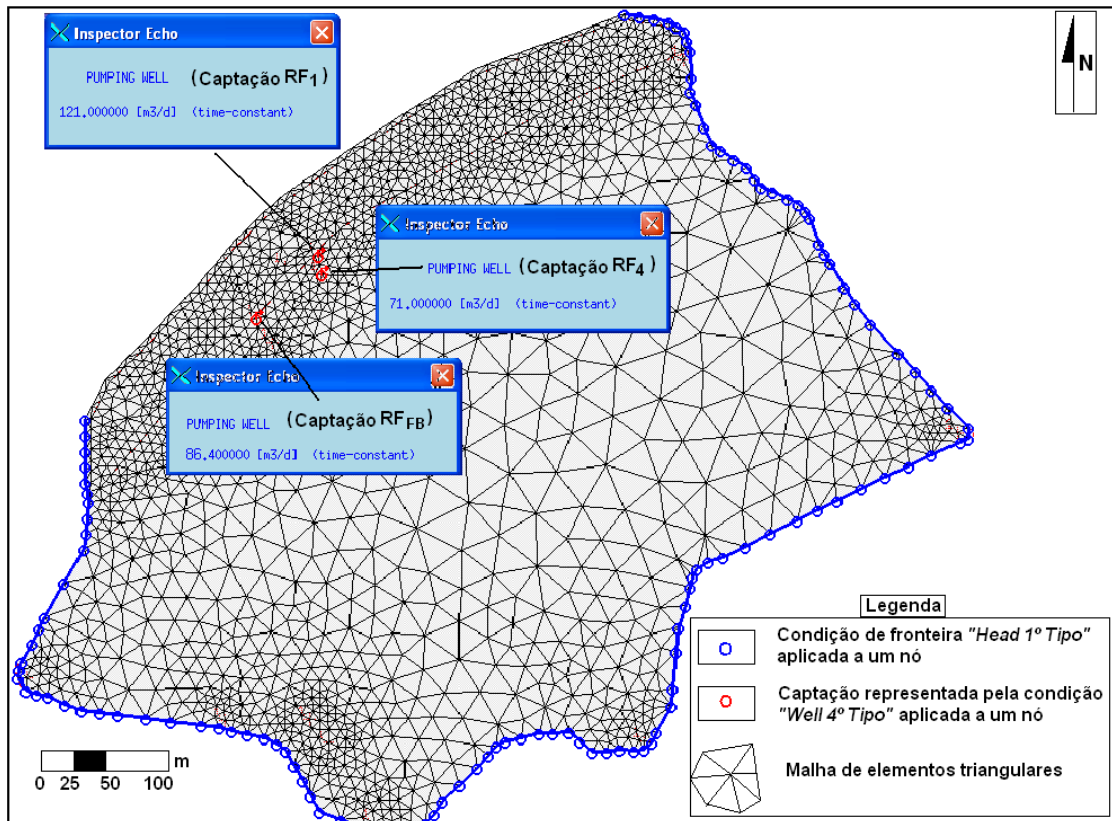


Figura 4.3 - Condições de fronteira de fluxo, definidas para o modelo de escoamento subterrâneo em estudo.

#### 4.2.2.4 - Parâmetros hidráulicos dos materiais

Neste ponto foram definidas as características físicas dos materiais presentes na área em estudo e que condicionam o escoamento hidráulico subterrâneo. Para o efeito utilizaram-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.2, sendo os mesmos que os utilizados em Mendes (2006, 2010) aquando da modelação do sector do Couto na vertente sul da Serra da Gardunha, com situação hidrogeológica similar à verificada no sector em estudo.

Tabela 4.2 - Parâmetros hidráulicos dos materiais usados na modelação do Sector do Ribeiro Frio.

Material	Parâmetros			
	Condutividade [m/s]	Anisotropia	Coefficiente de armazenamento	Compressibilidade de armazenamento
Granitos e Corneanas	$3,2 \times 10^{-6}$	1	0,001	$1,0 \times 10^{-4}$
Xistos e grauvaques	$1,0 \times 10^{-13}$	1	0,0001	$1,0 \times 10^{-4}$

#### 4.2.2.5 - Definição das condições de fronteira para o transporte de massa

As condições de fronteira para o transporte de massa definem, nesta utilização do software, a simulação da entrada da contaminação no modelo. Para este efeito recorreu-se à acção combinada da condição de fronteira de fluxo “Well 4ºTipo” (poço injector) com a da condição

de fronteira de transporte de massa “*Mass 1ºTipo*” (contaminação constante no tempo) de modo a ter no mesmo nó a fonte de contaminação associada à injeção de caudal.

A escolha da localização dos pontos nodais a receber a fonte de contaminação teve por base a geometria das três zonas de protecção do perímetro de protecção. Atendendo ao referido, definiram-se as condições de fronteira de transporte de massa “*Mass 1º Tipo*” com o valor de 1000 mg/l, afecta a uma condição de fronteira de fluxo “*Well 4ºTipo*” de 10 m<sup>3</sup>/d localizadas, sensivelmente, sobre o limite da zona de protecção que se pretende simular. A Figura 4.4 exemplifica a localização das condições de fronteira de fluxo e de massa sobre o limite da zona intermédia do perímetro de protecção global.

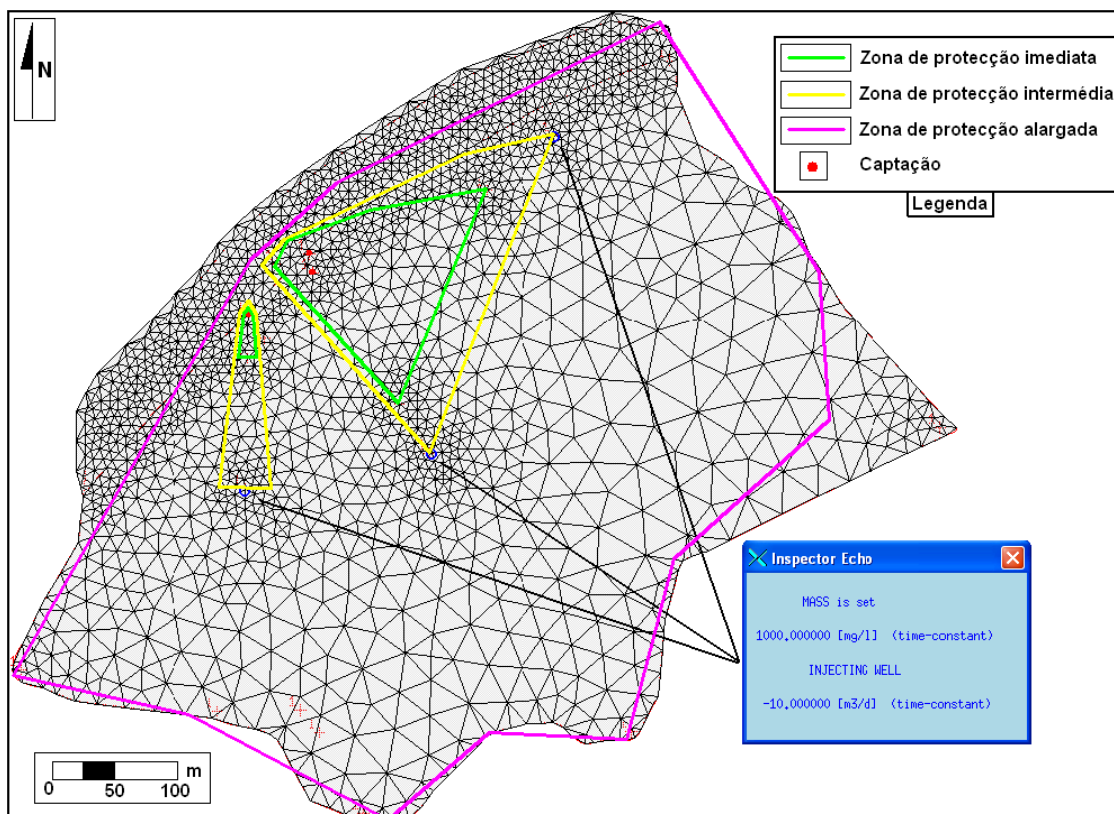


Figura 4.4 - Condições de fronteira de transporte de massa, definidas para o modelo de escoamento subterrâneo e localizadas no contorno da zona de protecção intermédia.

#### 4.2.2.6 - Parâmetros físicos dos materiais para o transporte de massa

Nesta etapa definiram-se as características dos materiais que intervêm na evolução da pluma de contaminante ao longo do modelo. Um dos parâmetros determinante neste processo é o da porosidade efectiva, sendo que esta foi definida com um valor de 0,01% na zona de xistos e de 0,2% para a área dos granitos e corneanas. Atribuiu-se um valor de  $1 \times 10^{-9}$  [m/s] para a difusão molecular e optou-se pela *Lei de Henry* para o coeficiente de adsorção. Os valores da dispersividade longitudinal e transversal foram definidos para todo o modelo com valores de 75 e 25 m, respectivamente, de acordo com a orientação de Diersch (2009).

#### 4.2.2.7 - Calibração do modelo

A calibração de um modelo de escoamento subterrâneo pode ser explicada como sendo o processo através do qual se ajusta, de um modo o mais realista possível, algumas variáveis independentes do modelo, de modo a conseguir harmonizar os resultados da simulação com a informação conhecida. Neste estudo procurou-se a calibração do modelo com a resolução do problema de forma inversa, tentando ajustar os valores das variáveis de menor grau de conhecimento até a simulação atingir resultados mais assertivos e de maior grau de confiança, mas também coerentes com o conhecimento empírico que se tem acerca da região. A introdução dos dados relativos à piezometria foi uma das etapas mais significativas neste processo de calibração manual por sistema de “*tentativa e erro*”. O conjunto de operações de calibração envolveu ainda um refinamento da malha e várias reformulações das condições de fronteira de fluxo (“*Well 4ºTipo*”) e de transporte de massa (“*Mass 1ºTipo*”). Foram ainda testados diversos conjuntos de variações relativos às características de controlo temporal.

Todo este processo foi um trabalho moroso e de grande subjectividade, mas depois de concluído apresentou resultados congruentes, mas também coerentes com a informação disponível. Esta situação garantiu um grau de confiança suficiente e uma base sólida à utilização final do software, conduzindo aos resultados finais, apresentados no capítulo seguinte.

#### 4.2.2.8 - Simulações finais

O conjunto de simulações finais, levadas a cabo nesta etapa, teve como principal finalidade a produção de resultados que auxiliassem a compreensão do funcionamento do modelo geohidráulico e da migração da pluma de contaminante ao longo da área de estudo. Foram ainda testados vários cenários relativos aos tempos de trânsito dos poluentes, utilizados na definição das distintas zonas de protecção do perímetro de protecção das captações.

Na simulação relativa à zona de protecção imediata, localizaram-se as fontes de contaminação no limite desta, com uma concentração de 1000 mg/l e um tempo de simulação de 1 dia (Figura 4.5).

A simulação respeitante à zona de protecção intermédia é representada na Figura 4.4 com o mesmo valor de concentração de contaminação e com um tempo de simulação de 50 dias.

No caso da simulação referente à zona de protecção alargada, a localização das fontes contaminantes não teve por base o traçado desta zona de protecção, mas sim os limites da área de estudo, uma vez que a geometria destes é sensivelmente a mesma (Figura 4.5).

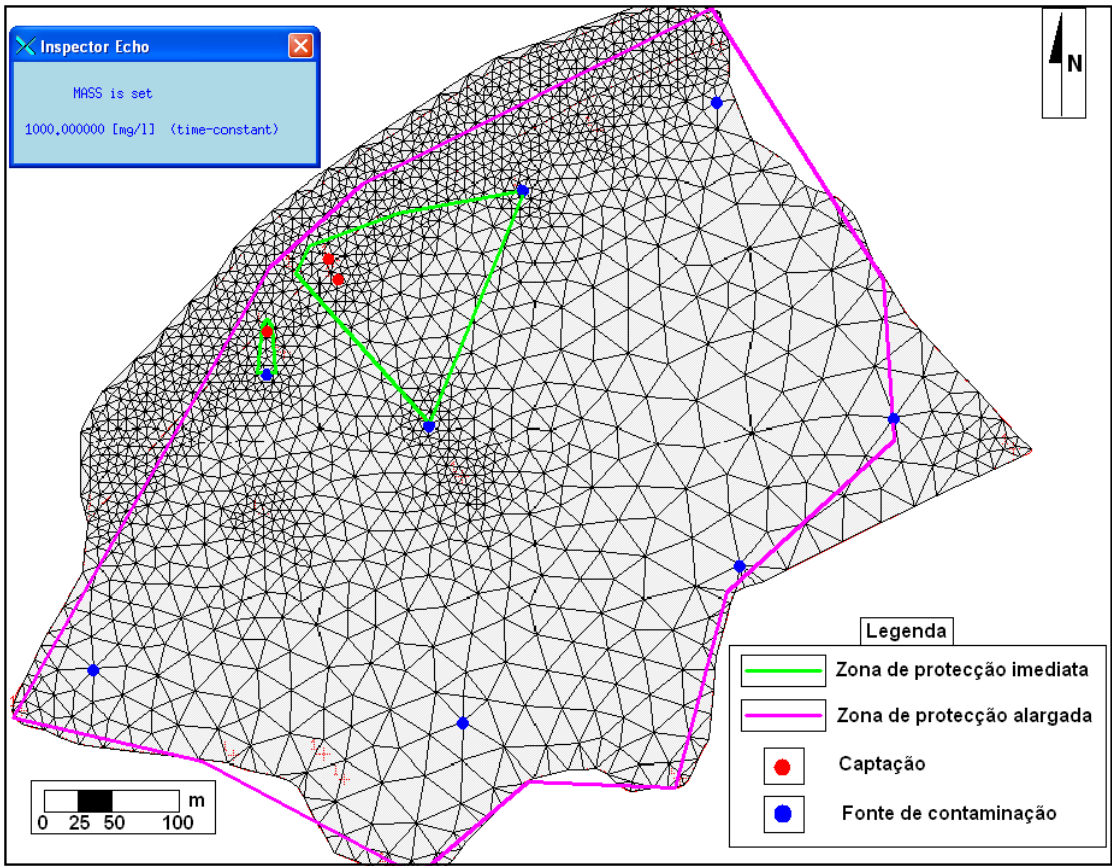


Figura 4.5 - Localização das fontes contaminantes (1000 mg/l) no contorno da zona de protecção imediata e nas proximidades da zona de protecção alargada.

Um outro conjunto de simulações levadas a cabo neste trabalho pretendeu estudar a possibilidade da utilização de novos poços extractores a serem utilizados, numa fase posterior à contaminação, de modo a extrair a água subterrânea contaminada. A escolha da localização destes furos de segurança (Figura 4.6) teve por base a análise das zonas de maior concentração de linhas de fluxo afectas às captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub>.

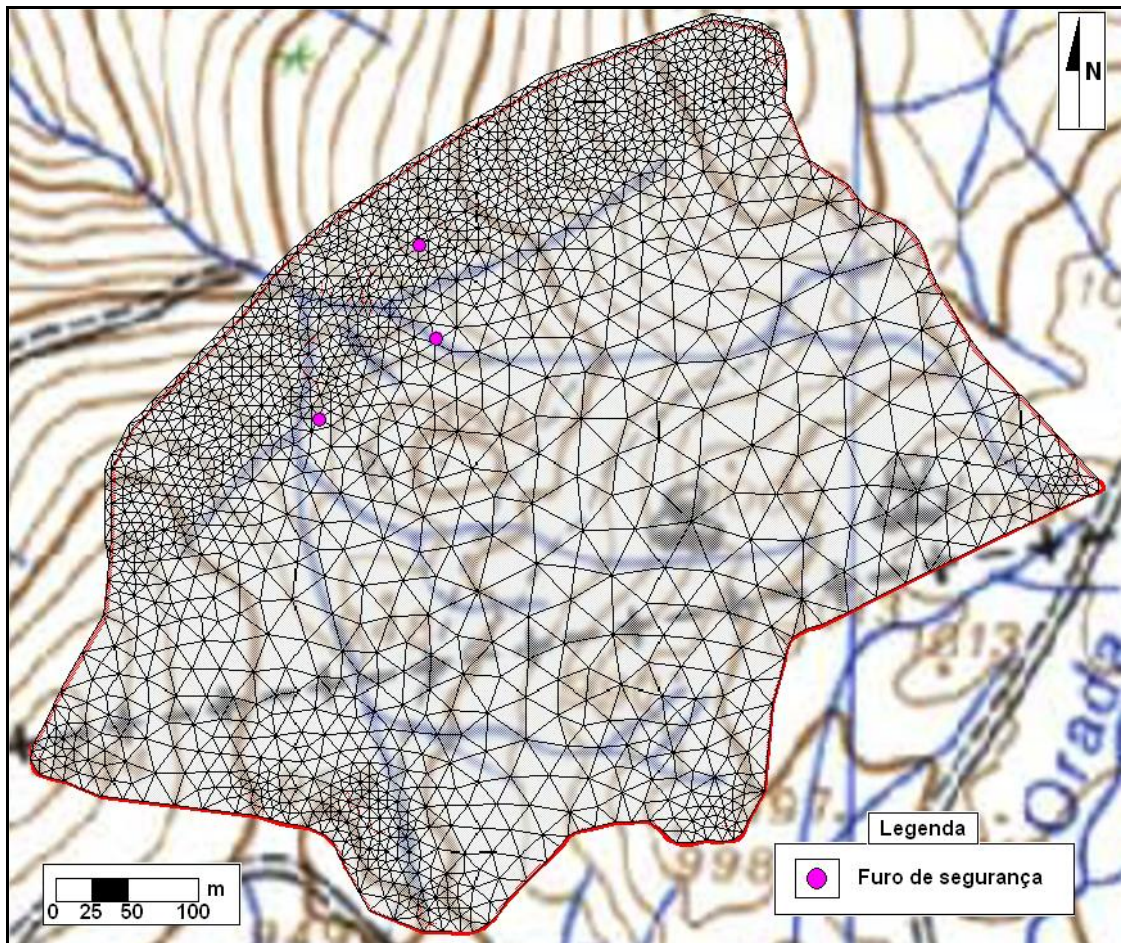


Figura 4.6 - Localização dos nós da malha a receber os furos de segurança.

### 4.3 - Resultados e Interpretações

No seguimento do conjunto de processos discriminados no item anterior apresentam-se neste ponto os resultados produzidos pela execução do software.

#### 4.3.1 - Distribuição das linhas de fluxo

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são expostas sobre as cartas topográfica e geológica da região, as distribuições, ao longo de toda a área em estudo, das linhas de fluxo de água subterrânea, das captações  $RF_1$ ,  $RF_4$  e  $RF_{FB}$  a extrair, em simultâneo, um volume de água de 121, 71 e 86.4  $m^3/d$ , respectivamente.

As linhas de fluxo apresentam um arranjo uniforme ao longo de toda a área estudada. Este traçado, produzido com recurso ao software, é coerente com os parâmetros introduzidos e com as opções seleccionadas aquando da modelação da zona de estudo, porém esta uniformidade na distribuição das linhas de fluxo representa eventualmente a falta de informação relativa à distribuição da piezometria e, principalmente, das discontinuidades e elementos singulares que, de uma forma previsível, podem assinalar a sua influência neste tipo de maciços rochosos.

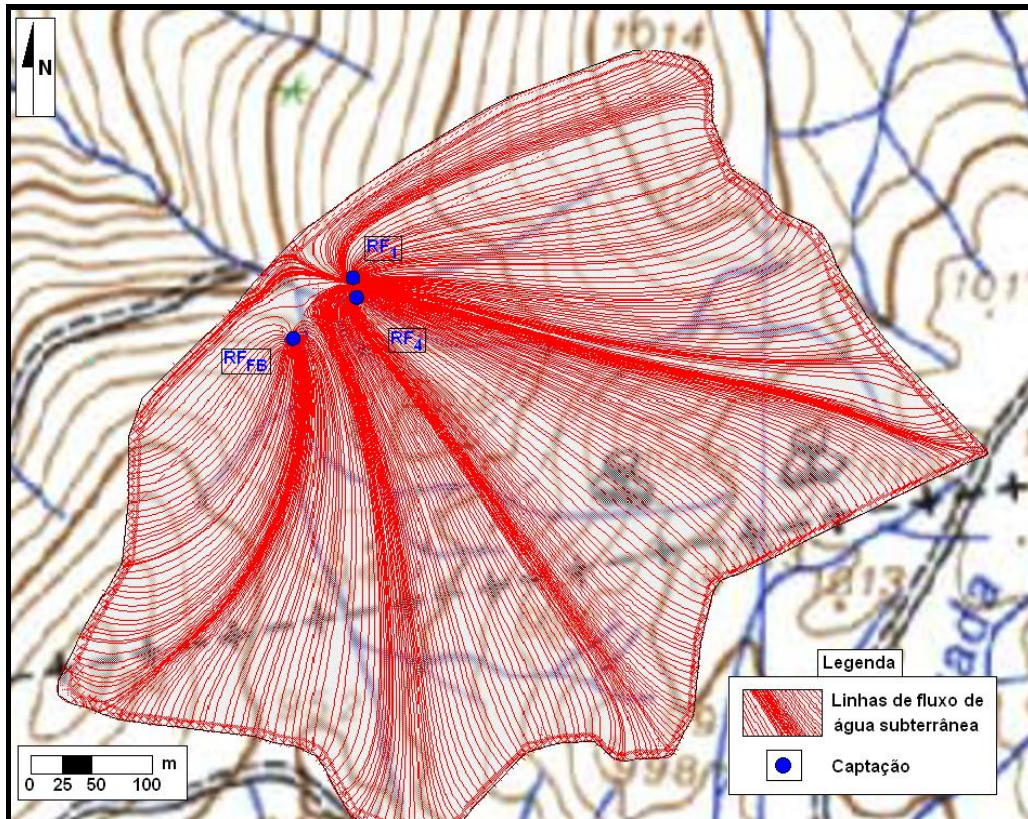


Figura 4.7 - Distribuição das linhas de fluxo na área de estudo, com as captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub> a extraírem, em simultâneo, um caudal de 121, 71 e 86,4 m<sup>3</sup>/d, respectivamente.

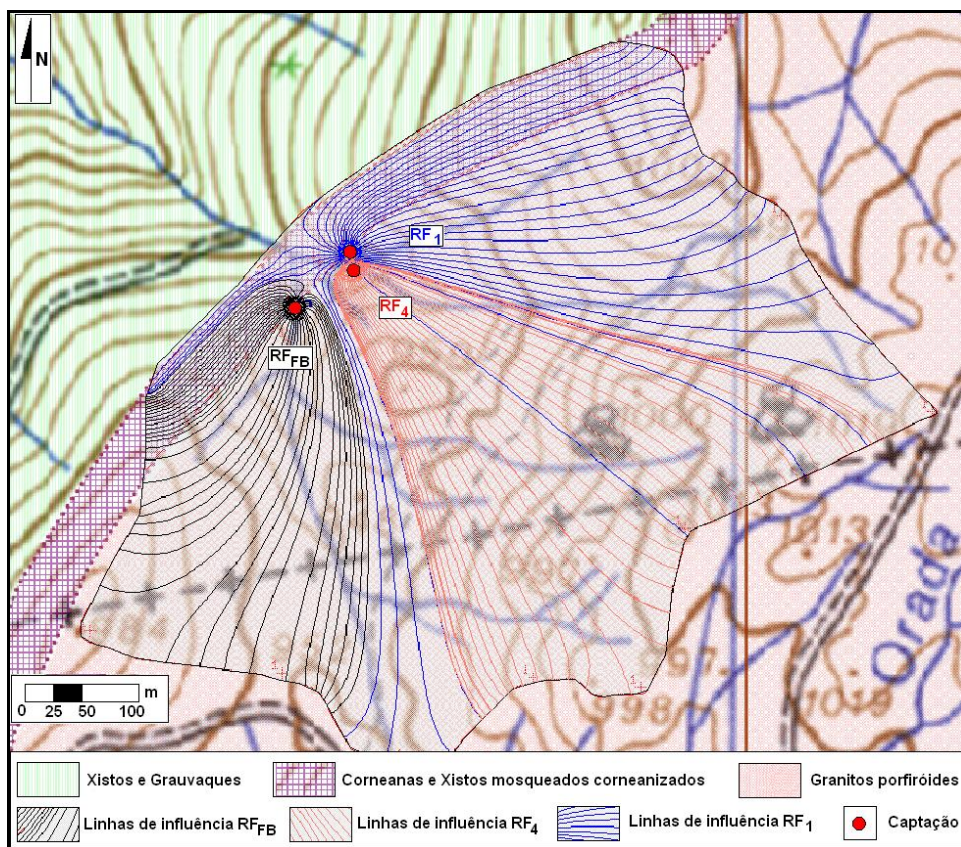


Figura 4.8 - Distribuição das linhas de fluxo, sobre a carta geológica da região, afectas a cada uma das captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub> a extraírem, em simultâneo, um caudal de 121, 71 e 129 m<sup>3</sup>/d, respectivamente.

### 4.3.2 - Desenvolvimento da pluma de contaminante

O conjunto de simulações que envolveram a localização de várias fontes de contaminação ao longo do contorno das zonas de protecção imediata, intermédia e alargada, do perímetro de protecção comum às três captações, conduziu aos resultados gráficos que se apresentam nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

Da análise da migração de um possível contaminante ao longo da área em estudo, é possível concluir que, de entre as três simulações, nenhuma apresenta um resultado que induza numa situação do actual perímetro de protecção ser inadequado à protecção da qualidade de água nas captações.

Os resultados das simulações às três zonas de protecção (imediata, intermédia e alargada) tiveram em conta os tempos de trânsito de um contaminante até este atingir a captação de 1, 50 e 3500 dias. Todas as simulações, relativas à geometria do perímetro de protecção, comum às captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub>, os resultados gráficos apontam para uma capacidade depurativa, de acordo com as propriedades físicas e hidráulicas introduzidas ao modelo, capaz de atenuar a pluma de contaminação. Estes resultados, são um indício claro de que o dimensionamento do perímetro de protecção do Sector do Ribeiro Frio, se encontra do lado da segurança.

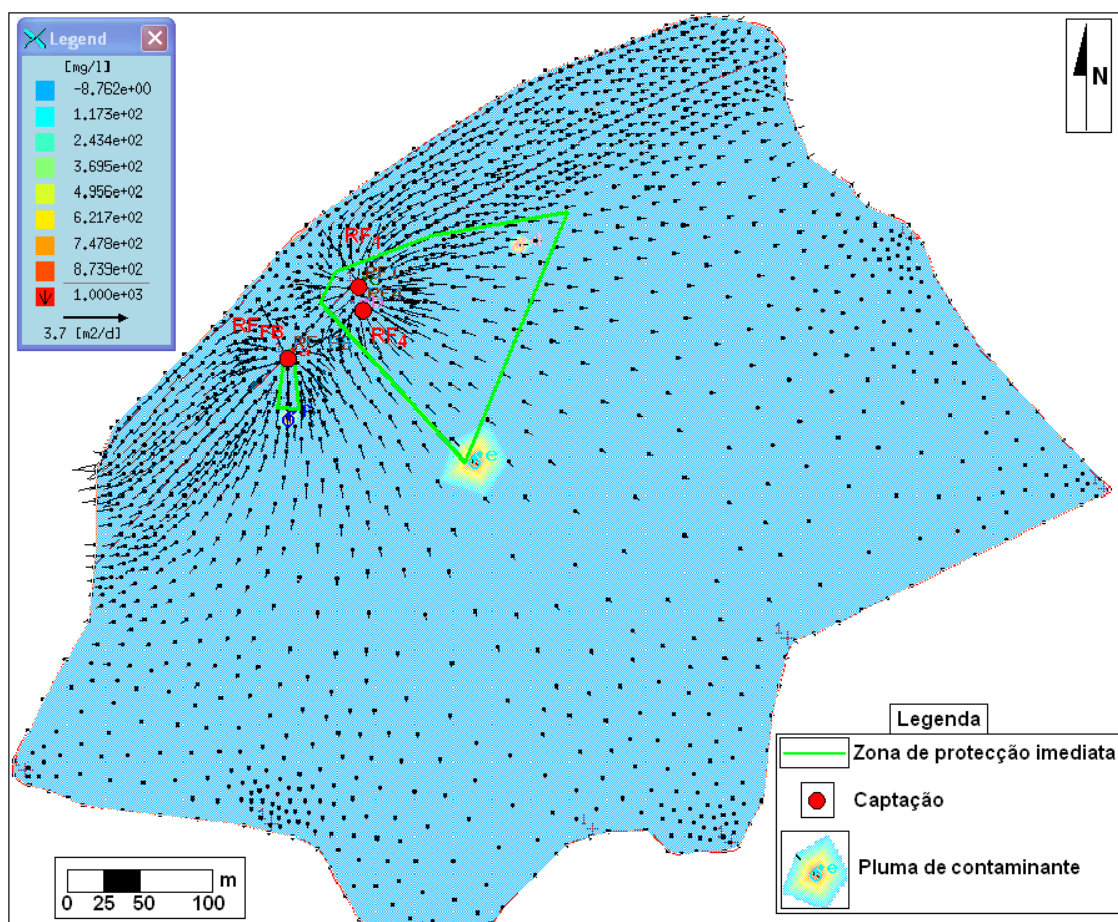


Figura 4.9 - Alcance da pluma de contaminação numa simulação com o tempo de trânsito de 1 dia, com uma fonte contaminante de 1000 mg/l na proximidade da zona de protecção imediata.

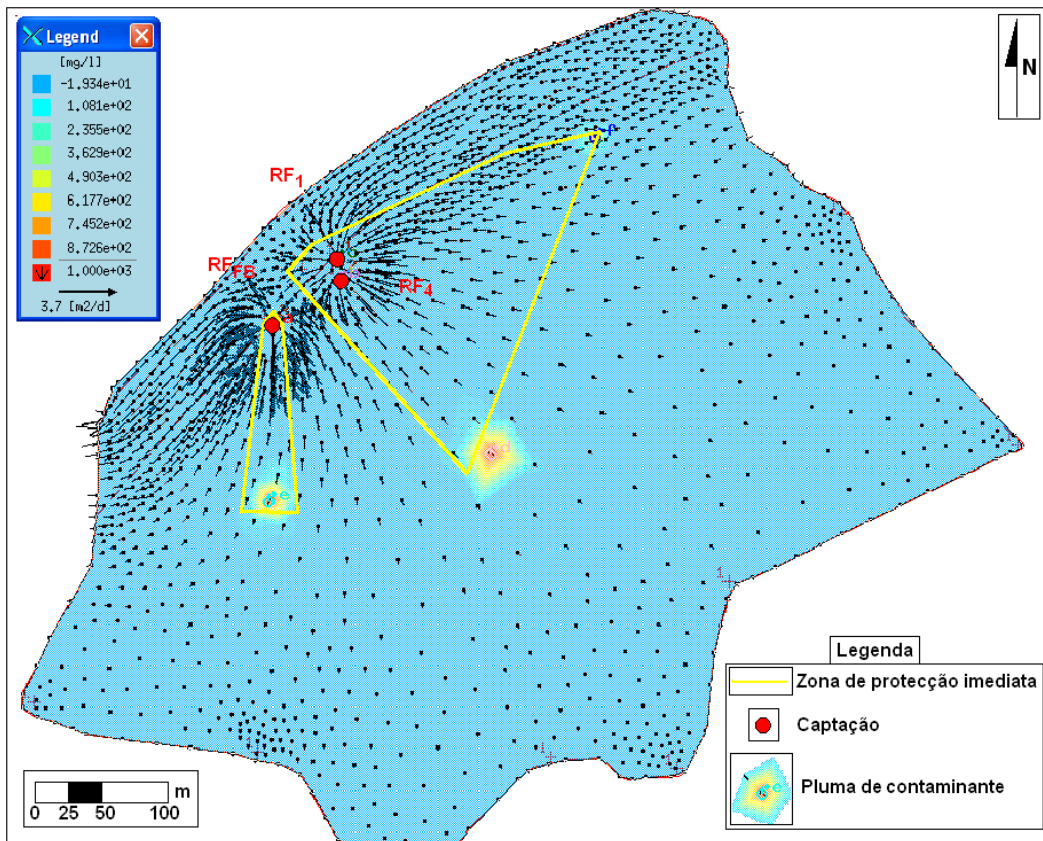


Figura 4.10 - Alcance da pluma de contaminação numa simulação com o tempo de trânsito de 50 dias, com uma fonte contaminante de 1000 mg/l na proximidade da zona de protecção intermédia.

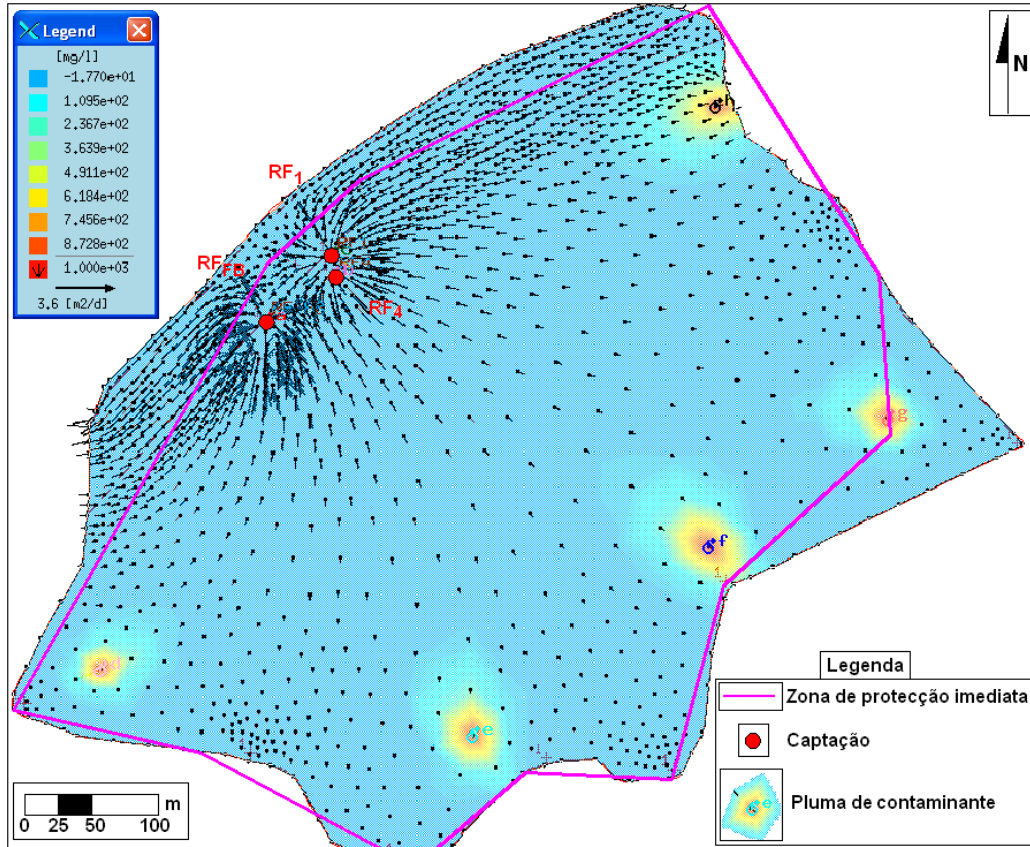


Figura 4.11 - Alcance da pluma de contaminação numa simulação com o tempo de trânsito de 3500 dias, com uma fonte contaminante de 1000 mg/l na proximidade da zona de protecção alargada

### 4.3.3 - Furos de protecção

Nesta fase do estudo, muitos cenários se colocaram como exercícios baseados na modelação efectuada, sendo que a maior preocupação foi no sentido de deixar pistas sobre soluções capazes de evitar a contaminação do recurso nas captações, em caso de poluição acidental nas zonas de recarga.

Assim, surgiu a situação de implementar um conjunto de furos extractores, com principal função, de extrair a água contaminada, antes que esta atinja as captações principais.

Deste modo, tendo por base os resultados da distribuição das linhas de fluxo das Figuras 4.7 e 4.8, definiu-se a localização de três furos de segurança, de modo a maximizar a área protegida.

A Figura 4.12 apresenta a distribuição das linhas de fluxo, ao longo de toda a área de estudo, produzidas pela acção combinada dos três furos de protecção, a extrair cada um, um volume de  $70 \text{ m}^3/\text{d}$ . Nesta simulação o volume de extracção das captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub> é nulo.

Uma análise gráfica da situação, permite concluir que a acção combinada destes três furos, é uma ferramenta de protecção, de carácter reactivo, eficaz e abrangente a toda a área estudada.

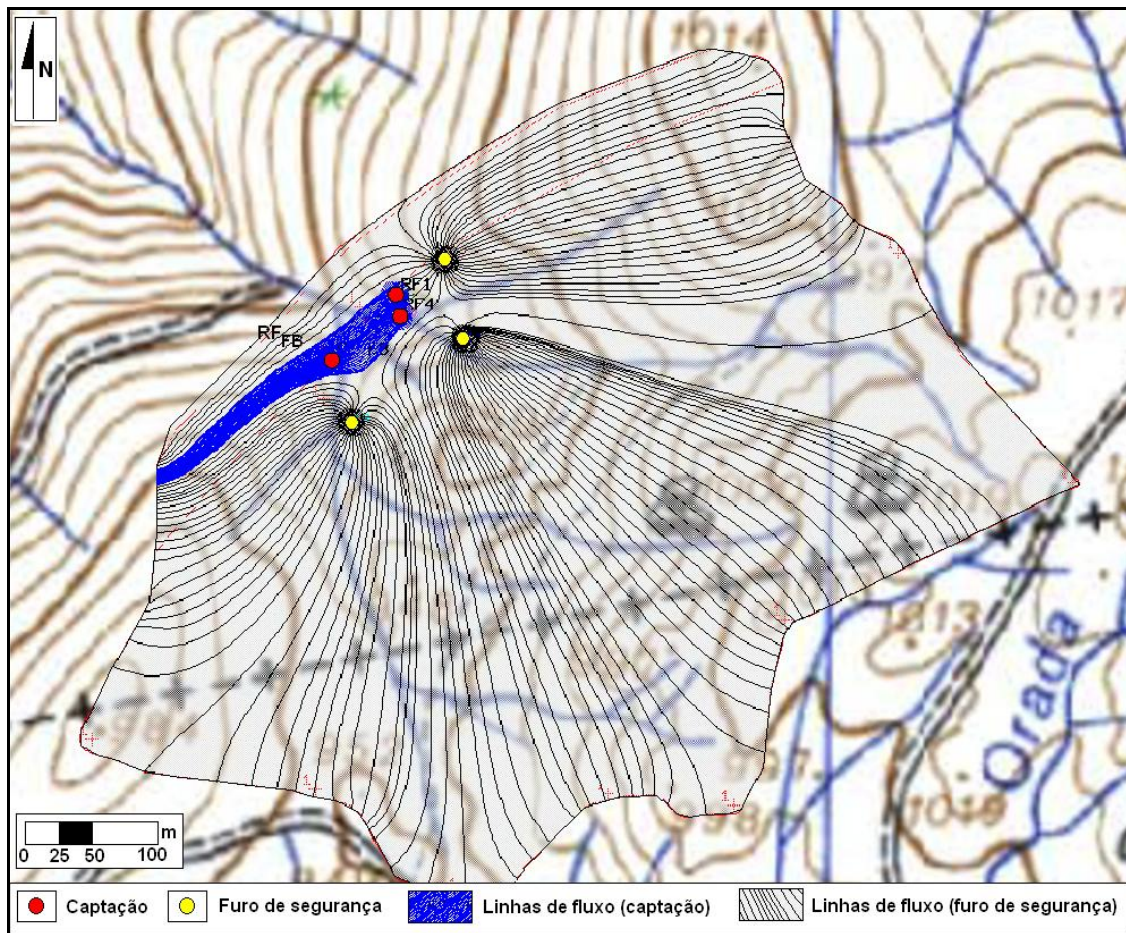


Figura 4.12 - Distribuição das linhas de fluxo das captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub>, sem extracção, e de três furos de segurança a extrair um caudal de  $70 \text{ m}^3/\text{d}$ , cada um.

# CAPÍTULO 5

## 5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 5.1 - Conclusões

A Água Fonte da Fraga é actualmente captada em dois principais sectores de exploração: i) o Sector do Couto, na vertente Sul da Serra da Gardunha, tendo sido nesta área que a *Água Fonte da Fraga* começou e desenvolveu a sua actividade desde 2000; ii) Sector do Ribeiro Frio, na vertente Norte da Serra da Gardunha, e em continuidade territorial com o Sector do Couto; o Sector do Ribeiro Frio teve a sua actividade desde o ano de 2009.

A presente dissertação teve como objectivo estudar o Sector do Ribeiro Frio, nas várias vertentes em termos de caracterização geomorfológica, geológica, hidrológica, hidrogeológica e em particular na modelação do escoamento subterrâneo com base no software *FEFLOW*, de modo a permitir a optimização dos Perímetro de Protecção das captações deste sector, como ainda criar cenários de modelação de contaminantes e mecanismos de defesa para dar maiores garantias de uma exploração sustentada do sistema aquífero da *Água Fonte da Fraga*.

Assim, a partir dos estudos desenvolvidos merecem referencia as principais conclusões:

- 1) em termos geomorfológicos, a zona do Ribeiro Frio constitui uma zona de cabeceiras de linhas de água de ordem 1 a 3 (segundo a classificação de Strahler), drenando estas para uma única linha de água de ordem 3 (Figura 3.6), tendo esta área declives médios de ordem de 21%; a zona de captações localiza-se em altitudes entre 900 e 950 m, e a cerca de 2 dezenas de metros do contacto corneanas-xistos, que se localiza a jusante destas;
- 2) em termos hidrogeológicos a zona do Ribeiro Frio, é classificada por duas unidades hidrogeológicas (Figura 3.17):
  - i) Unidade A, de muito baixa permeabilidade, essencialmente do tipo fissural, constituída por granitóides na quase totalidade da área e corneanas apenas numa estreita faixa de cerca de 20m em planta;
  - ii) Unidade B, praticamente impermeável, constituída essencialmente por xistos e grauvaques, e numa extensão com pouco significado em área, nos terrenos da zona do Ribeiro Frio, mas com continuidade lateral por vários quilómetros quadrados, mas já fora da zona em estudo;

- 3) o sistema aquífero do Ribeiro Frio é do tipo freático ou livre, e corresponde à Unidade A, sendo essencialmente constituído por granitóides hercínicos;
- 4) as captações existentes constituem dois excelentes pontos de água designados por RF<sub>1</sub> (Furo vertical) e RF<sub>4</sub> (nascente em mini-represa especial) e permitem, no seu conjunto explorar cerca de 2,2 l/s, estando ambas legalizadas junto à tutela, Direcção-Geral de Energia e Geologia;
- 5) pelo balanço hidrológico, considerando uma taxa de infiltração de 26,7% em relação à precipitação anual, concluiu-se que ainda há condições do Sector do Ribeiro Frio incluir uma nova captação com um caudal admissível de pelo menos 1 l/s;
- 6) a nova captação (RF<sub>FB</sub>) em proposta, foi localizada com auxílio dos vários aspectos hidrogeológicos de base e ainda a partir dos resultados da modelação do escoamento subterrâneo, localizando-a numa zona de grande concentração de linhas de fluxo de água subterrânea;
- 7) o Perímetro de Protecção foi optimizado por métodos analíticos para as várias captações, salientando-se que antes desta dissertação já estava definido para RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub>, com base em trabalhos anteriores, mas realizou-se de raiz o Perímetro de Protecção para RF<sub>FB</sub> (captação em proposta), tendo sido efectuada a harmonização entre as zonas de protecção, de modo a resultar (Figura 3.28):
  - i) duas áreas distintas para a Zona de Protecção Imediata; uma área comum às captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> e outra área em separado apenas para RF<sub>FB</sub>;
  - ii) duas áreas distintas para a Zona de Protecção Intermédia; uma área comum às captações RF<sub>1</sub> e RF<sub>4</sub> e outra área em separado apenas para RF<sub>FB</sub>;
  - iii) uma área apenas para a Zona de Protecção Alargada, comum a todas as captações RF<sub>1</sub>, RF<sub>4</sub> e RF<sub>FB</sub>;
- 8) em relação à qualidade da água é um recurso que se classifica como *água hipossalina, bicarbonatada sódica e silicatada*, sendo portanto uma água de muito baixa mineralização, inferior a 50 mg/l, designada por *doce (fresh water)* em relação ao resíduo seco, e por *branda (soft)* em relação à sua dureza;
- 9) sobre a modelação do fluxo de água subterrânea, envolvendo em algumas situações transporte de massa com contaminantes, usando o software *FEFLOW 5.4*, salientam-se as seguintes situações:

- i) a partir da análise do sistema das linhas de fluxo (Figura 4.8), admitindo o interior da zona de estudo, ou seja a zona de granitóides, como relativamente homogénea, isto é, sem estruturas de grande significado, aponta na direcção da existência de novas captações, como  $RF_{FB}$ , e até eventualmente uma outra entre esta e  $RF_4$ , de modo a permitir uma exploração mais equilibrada nas várias captações;
- ii) da análise da migração de um possível contaminante ao longo da área em estudo, e analisando situações individualizadas para a zonas Imediata, Intermédia e Alargada, largando virtualmente contaminantes junto às fronteiras das respectivas zonas de protecção (Figuras 4.9, 4.10 e 4.11), verifica-se que nenhuma apresenta um resultado que induza numa situação do contaminante chegar às captações, orientando para que o Perímetro de Protecção está definido com alguma segurança;
- iii) um sistema de protecção da qualidade da água nas captações, pode ser constituído por um conjunto de furos extractores, localizados a montante das captações (Figura 4.12), com a principal função de extrair água contaminada, antes que esta atinja as captações principais; este é um dos exemplos simulados e que deixa em aberto um tipo de solução de protecção de carácter reactivo, a usar em caso de emergência, em situações especiais de acidentes, mas que se espera nunca vir a acontecer.

Por fim, em complemento às conclusões, salienta-se que a modelação da área em estudo procurou recriar as acções dinâmicas da água subterrânea do aquífero do Sector do Ribeiro Frio. Foi um processo lento e complexo o que reflecte alguma das dificuldades sentidas no *interface* do programa com o utilizador. O facto de ser um software pouco intuitivo e que dá primazia à introdução dos dados acontecer através de ficheiros trabalhados previamente e em outro tipo de software, acresce as limitações impostas a utilizadores menos experientes. Outra das dificuldades sentidas no decorrer deste processo foi a discriminação do tipo de contaminante e das suas propriedades, assim como da discretização das condições de fronteira de fluxo e de transporte de soluto. No entanto, os resultados alcançados foram, genericamente, satisfatórios, coerentes com os dados introduzidos e indicando um recurso protegido de forma adequada. Conclui-se portanto que este tipo de software é uma ferramenta válida na compreensão do funcionamento de um modelo geohidráulico com estas propriedades.

Espera-se portanto que o presente trabalho consiga contribuir para uma divulgação mais alargada deste género de problemas, constituindo assim um pequeno passo dado, rumo ao melhor entendimento dos modelos de escoamento de águas subterrâneas.

## 5.2 - Perspectivas Futuras

Ao longo do desenvolvimento deste estudo foram abordados diversos aspectos sobre o tema, no entanto, alguns ficaram por desenvolver e podem, numa perspectiva futura, vir a ser considerados no âmbito de estudos a realizar na mesma área temática. Em seguida apresenta-se um conjunto de ideias para trabalhos futuros:

- dotar o Sector do Ribeiro Frio com um sistema de informação piezométrica, combinado com um levantamento das singularidades ali presentes, capaz de servir de base a estudos mais aprofundados sobre o modelo geohidráulico da região;
- desenvolver um estudo com este género de software, mas que utilize a informação das estruturas geológicas (falhas, filões e outros) caso existam, e da piezometria, mencionada no ponto anterior, de modo a comparar esses resultados com os obtidos no presente trabalho;
- realizar a captação  $RF_{FB}$  (aqui proposta) e comprovar da sua produtividade, que se antevê ter o caudal admissível de pelo menos 1.0 l/s;
- ampliar o conjunto de simulações a executar com o software, variando as opções de simulação oferecidas pelo modelo numérico com diversos métodos de definição de perímetros de protecção aplicáveis a este tipo de maciços;
- avaliar questões complementares ao tema “*Águas Subterrâneas vs Economia*” analisando o impacto que o volume de negócio de empresas de captação de águas subterrâneas, como o da Beira Vicente, têm sobre a economia local das pequenas povoações próximas às captações.

# BIBLIOGRAFIA

ABAS (2010). Agua e Meio Ambiente Subterrâneo, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (site). Acedido em 27 de Setembro de 2010 em [http://www.abas.org.br/publicacoes\\_artigos.php](http://www.abas.org.br/publicacoes_artigos.php)

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

APA (2007). Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (site). Acedido em 12 de Janeiro de 2011 em <http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/>

CEAS (2011). Comissão Especializada de Águas Subterrâneas (site). Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Acedido em 22 de Março de 2011, em [http://www.aprh.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=154%3Aceas&catid=26&Itemid=31&lang=pt](http://www.aprh.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=154%3Aceas&catid=26&Itemid=31&lang=pt).

Custódio da Paz (2009). Modelação Matemática do Escoamento e da Poluição do Sistema Aquífero Caldas da Rainha - Nazaré. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. 60 pp. Acedida em 11 de Fevereiro de 2010, em <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/572494/1/dissertacao.pdf>.

Davis, S.N. (1969). Porosity and permeability of natural materials, Academic Press, New York.

Diamantino, C. M. S. (2009). Recarga Artificial de Aquíferos: Aplicação ao Sistema Aquífero da Campina de Faro, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 272 pp.

Diersch, H.-J. G. (2009). *FEFLOW 5.4*. Finite element subsurface flow system - User's Manual, WASY GmbH, Berlin, Germany, 202 pp.

DL (1990a) - Decreto-Lei n.º 84/90 de 16 de Março do Diário da República n.º 63, I Série. Regulamento de Exploração das Águas de Nascente.

DL (1990b) - Decreto-Lei n.º 86/90 de 16 de Março do Diário da República n.º 63, I Série. Regulamento de Águas Minerais Naturais.

DL (1990c) - Decreto-Lei n.º 90/90 de 16 de Março do Diário da República n.º 63, I Série. Disposições Gerais.

DL (1997) - Decreto-Lei n.º 235/97 de 3 de Setembro do Diário da República n.º 203, I-A Série. Transposição da Directiva Comunitária n.º 91/676/CE.

DL (1999a) - Decreto-Lei n.º 382/99 de 22 de Setembro do Diário da República n.º 222, I Série. Delimitação de Perímetros de Protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público.

DL (1999b) - Decreto-Lei n.º 68/99 de 11 de Março do Diário da República n.º 59, I-A Série. Alteração ao Decreto-Lei n.º 235/97.

DL (2006) - Decreto-Lei n.º 77/2006 de 30 de Março do Diário da República n.º 64, I-A Série. Quadro de acção comunitária no domínio da política da Água.

DL (2007a) - Decreto-Lei n.º 226-A/2007 de 31 de Maio do Diário da República n.º 197, I-A Série. Títulos de utilização de recursos hídricos.

DL (2007b) - Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto do Diário da República n.º 164, I Série. Transposição da Directiva Comunitária n.º 98/83/CE.

DL (2008) - Decreto-Lei n.º 166/2008 de 22 de Agosto do Diário da República n.º 162, I Série. Regime jurídico da Reserva Ecológica Nacional.

DL (2009) - Decreto-Lei n.º 245/2009 de 22 de Setembro do Diário da República n.º 184, I Série. Alteração ao Decreto -Lei n.º 226 -A/2007, de 31 de Maio.

EGEO (2010a). Sistema Nacional de Informação Geocientífica (site). Acedido em 21 de Janeiro de 2011, em [http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico\\_hidro/glossario](http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/glossario).

EGEO (2010b). Sistema Nacional de Informação Geocientífica (site). Acedido em 28 de Outubro de 2010, em [http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico\\_geologico/fotos.aspx](http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_geologico/fotos.aspx).

EPA (1993). Wellhead Protection in Confined, Semi-Confined, Fractured, and Karst Aquifer Settings. Office of Water, EPA.

Ferreira, H.A. (1970). O Clima de Portugal. Normas Climatológicas do Continente, Açores e Madeira correspondentes a 1931-1960. Fasc. XIII. 2ª Ed. Lisboa. 207p.

Ferreira Gomes, L.M. (2000). Estudo Hidrogeológico para localização de captações em Casal da Fraga - São Vicente da Beira. Beira Vicente. Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda. Agosto 2000. 27p.

Ferreira Gomes, L.M. (2010). Elementos sobre águas subterrâneas. Apontamentos no âmbito da Unidade Curricular Geotecnia Ambiental. Curso de Mestrado em Eng. Civil - Geotecnia em Ambiente. Universidade da Beira Interior. Documento interno.

Ferreira Gomes, L.M., Matias, P., Mendes, J.M.; Mendes, E. (2008a). Natural framing of the new spring water Fonte da Fraga-Portugal. XXXVI Congress - International Association of Hydrogeologists. Integrating Groundwater - Science and well-being . Toyama. Japão, 26/10-1/11. 2008. Ed. Makoto Taniguchi, et al; Paper nº 282 em CD, S33 Deep groundwater and regional groundwater system, 10p. Abstract em livro: p.264.

Ferreira Gomes, L.M.; Mendes, E. e Condesso de Melo, M.T. (2008b). Delimitação de perímetros de protecção de captações de água subterrânea em zonas de montanha por métodos gráficos. Rev. Recursos Hídricos. APRH, Associação Portuguesa dos Recursos Hídrico. ISSN 0870 1741. Vol. 29#02, pp.15-26.

Ferreira Gomes, L.M. (2011). Modelos Geohidráulicos de Águas Minerais e de Nascente - Casos de Estudo da região Centro. 16pp.

Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. (2002). Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies. Washington D.C., The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 103pp.

Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in van Duijvanbooden, W.; van Waegeningh H.G. (eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information N.º 38 of the international Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

GF (2011). UK Groundwater Forum (site). Acedido em 31 de Março de 2011, em <http://www.groundwateruk.org/Tough-Choices-to-Make.aspx>

IGEO (2011). Mapas Portugal, Instituto Geográfico Português. Acedido em 2 de Janeiro de 2011 em: <http://www.igeo.pt/atlas/Mapas.html>.

IGM (2001). Água subterrânea: conhecer para preservar o futuro, Instituto Geológico e Mineiro (site). Acedido em 10 de Setembro de 2010, em: [http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes\\_online/diversos/agua\\_subterranea/indice.htm](http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm)

IGME (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterrânea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 273p.

IM (2010). Acompanhamento do clima, Instituto de Meteorologia, IP, Portugal (site). Acedido em 25 de Janeiro de 2011 em <http://www.meteo.pt/pt/oclima/acompanhamento/>

INAG (1997). Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Instituto da Água, I. P., (INAG, I.P.), Lisboa, 236p.

Julivert, M.; Fontboté, J., Ribeiro, A. & Conde, L. (1974). Memória explicativa del mapa tectónico De la península ibérica y baleares, Inst. Geol. Min. España, Madrid.

Krijgsman, B.; Lobo Ferreira, J.P. (2001). A methodology for delineating wellhead protection areas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 76 pp, acedido em [http://www-dh.lnec.pt/Gias/english/projects/BK\\_LF\\_ICT2001.pdf](http://www-dh.lnec.pt/Gias/english/projects/BK_LF_ICT2001.pdf)

Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1979). Soil Mechanics - SI version. John Wiley, New York, 553p.

Lei 58,2005 - Lei n.º 58 de 29 de Dezembro do Diário da República n.º 249, I-A Série. Lei da Água.

Lei,2005 - Lei n.º 54 de 15 de Novembro do Diário da República n.º 219, I-A Série. Estabelece a titularidade dos Recursos Hídricos.

Leitão, T. (1997). Metodologias de Reabilitação de Aquíferos Poluídos. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, publicada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Teses e Programas de Investigação LNEC, 1997.

Lencastre, A.; Franco, F. M. (1992). Lições de Hidrologia, 2ª ed. Universidade Nova de Lisboa, 453 pp.

LNEG (2010). Glossário de Termos Hidrogeológicos, Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Acedido em 25 de Novembro de 2010, em [http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico\\_hidro/glossario.aspx](http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/glossario.aspx)

LNEG (2011). Hidrogeologia - Água subterrânea: conhecer para preservar, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (site). Acedido em 15 de Fevereiro de 2011, em <http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/488/1/27629.pdf>

López-Geta, J.; Azcoiti, J.; González, G.; Gil, F. (2009). Las aguas subterráneas - Un recurso natural del subsuelo. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España.

Mendes, E. (2006). Perímetros de Protecção de Captações de Água Subterrânea para consumo humano em zonas de Montanha. Caso de Estudo da Cidade da Covilhã. Tese de Mestrado em Geotecnia Ambiental, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 122p. + Anexos 127p.

Mendes, E.; Ferreira Gomes, L.M. and Condesso de Melo, M.T. (2009). Una metodología para a la definición del perímetro de protección de captaciones de agua subterránea en regiones montañosas - Caso de estudio en el macizo granítico de la Serra da Estrela (Portugal). Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe. ISSN:0213-4497. Coruña. Vol. 34, pp. 165-178.

Mendes, E. (2010). Modelos Geohidráulicos em meios fracturados de rochas graníticas - Caso de estudo do aquífero da fonte da fraga - Serra da Gardunha. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 161p. + Anexos 195p.

Mendes, E.; e Ferreira Gomes, L.M.; Condesso de Melo, M.T. ; Ribeiro, L.F. T. (2010a). Caracterização hidrogeológica da água de nascente Fonte da Fraga. 10º Congresso da Água - Marcas d'Água. APRH, Algarve. 21 a 24 de Março. Resumos de Comunicações, p.29 (ISBN 978-972-99991-9-2); paper nº 145, 12p.

Mendes, E.; Carvalho, P.E.M.; Ferreira Gomes, L.M.; Cavaleiro, V. M. P. (2010b). Enquadramento hidroquímico do aquífero superficial de Castelo Novo, Serra da Gardunha, X Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto. 28 de Março a 1 de Abril. Memórias Nº.14, (ISSN Nº 087-1607), pp. 1155-1162.

Moinante, M. J. A. (2003). Delimitação de Perímetros de Protecção de Captações de Águas Subterráneas - Estudo comparativo utilizando métodos analíticos e numéricos. Tese apresentada à Universidade Técnica de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Georrecursos, publicada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC, 272p.

Nicolau, R. (2002). Modelação e mapeamento da distribuição espacial de precipitação uma aplicação a Portugal Continental. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Oliveira, M.M. (2002). Cartografia da Vulnerabilidade à Poluição das águas Subterrâneas do Concelho de Montemor-o-Novo Utilizando o Método DRASTIC. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Prada, S.L.R.N. (2000). Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do Grau de Doutor em Geologia, Universidade da Madeira: 351 pp.

Ribeiro, O.; Lautensach, H.; Davean, S. (1988). Geografia de Portugal II - O Ritmo Climático e a Paisagem. Ed. João Sá da Costa, Lisboa, 625 p.

Ribeiro, O., Lautensach, H., Daveau, S. (1997). Geografia de Portugal: O Ritmo Climático e a Paisagem, Volume II, 3ª edição. Edições João Sá da Costa, Lisboa, 623 p.

Ribeiro, A.; Antunes, M.T.; Ferreira, M.P.; Rocha, R. B.; Soares, A. F.; Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F.; Carvalho, D.; Monteiro, J. H. (1979). Introduction à la géologie générale du Portugal. Ser. Geol. Portugal, Lisboa.

SGP (1992). Carta Geológica de Portugal, Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

UBI (2004). Relatório sobre: Águas de São Vicente da Beira - Análise da situação existente sobre produção, aspectos ambientais e propostas de intervenções. Beira Vicente - Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda. Casal da Fraga - São Vicente da Beira. 35p. 6 Anexos. Relatório Interno.

UBI (2008). Licenciamento de nova captação. Ribeiro Frio 1 - RF<sub>1</sub>. Águas de S. Vicente da Beira Vicente. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda. Casal da Fraga - São Vicente da Beira. Novembro/2008. 31p., 4 Anexos.

UBI (2010). Licenciamento de nova captação. Ribeiro Frio 4 - RF<sub>4</sub>. Águas de S. Vicente da Beira Vicente. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda. Casal da Fraga - São Vicente da Beira. Novembro/2010. 36p.

UNESCO (2005). Água subterrânea - reservatório para um planeta com sede, Planeta terra, Ciências da Terra para a Sociedade, UNESCO. Acedido em 14 de Outubro de 2010 em <http://www.yearofplanetearth.org/>

USGS (2011). United States Geological Survey (site). Acedido em 2 de Fevereiro de 2011 em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_cycle)

Wallin, R. (1997). Wellhead Protection: a Guide for Arizona Communities. Arizona Department of Environmental Quality Division. Tucson, Arizona.

Wang, H.F.; Anderson M.P. (1982). Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods”, Academic Press.

Wendland, E.; Ruber, O. (1998). Hydrogeologische Modelle, Lehrstuhl für Angewandte Hydrogeologie, Ruhr-Universität Bochum, Alemanha, 141 p.

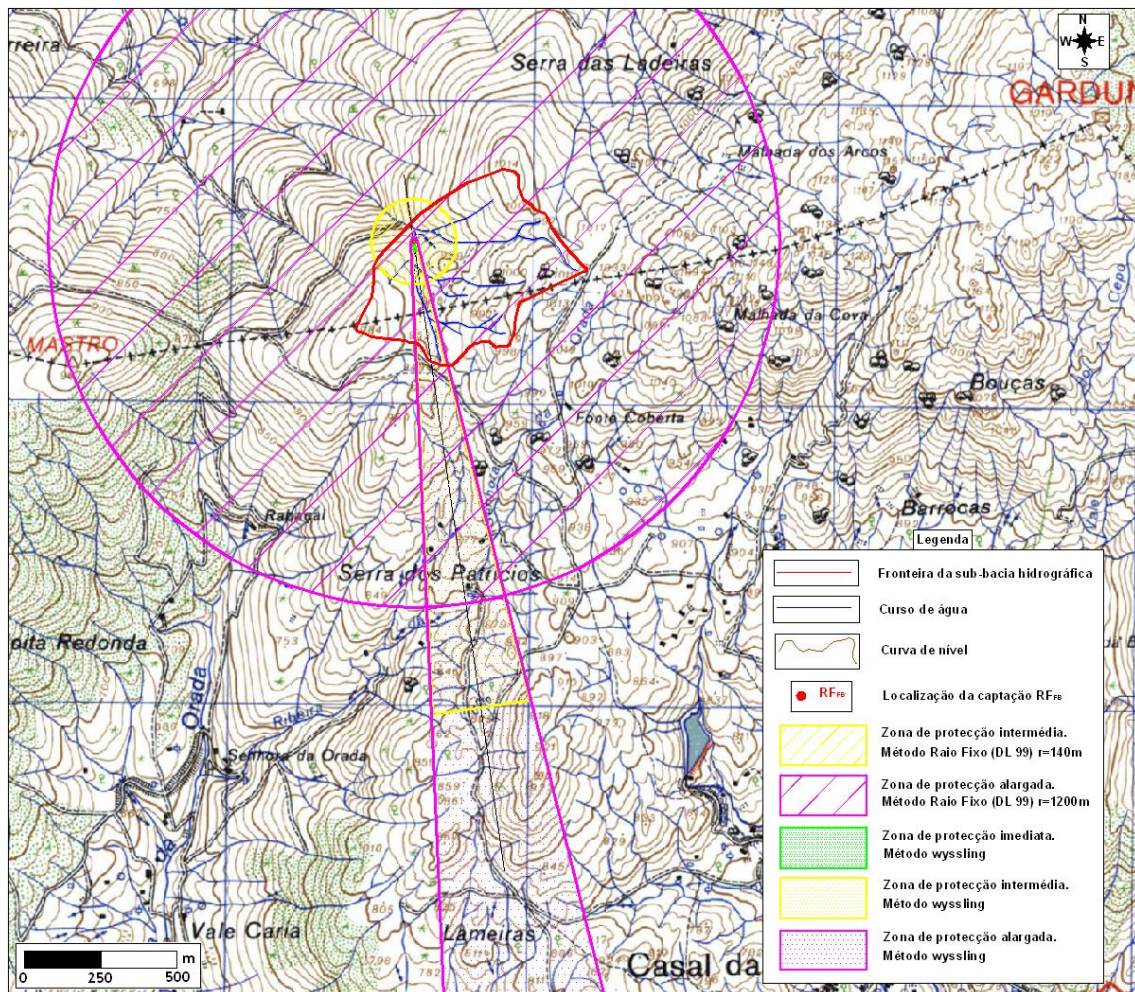
Wendlander (2003). Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas, Laboratório de Hidráulica Computacional, Universidade de São Paulo, 19 p.



## ANEXOS

### A1- Elementos de apoio à optimização do Perímetro de Protecção da Captação RF<sub>FB</sub>

Os resultados gráficos do perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub>, proposta no desenvolvimento deste trabalho, resultam da aplicação do método proposto por Mendes (2006), descrito no Capítulo 2. A aplicação deste método (Figura A1) culminou nos resultados do perímetro de protecção da captação RF<sub>FB</sub>, apresentados no Capítulo 4.



### A2 - Elementos Básicos do software FEFLOW

#### A2.1 - Descrição do modelo numérico

Segundo Diamantino (2009) o escoamento subterrâneo é geralmente descrito pela aplicação da Lei de Darcy e pelo princípio da conservação de massa. A equação de fluxo subterrâneo pode escrever-se do seguinte modo:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K_y \nabla h) + q_s \quad (A.1)$$

onde:

$S_s$  - Armazenamento específico;

$h$  - Nível piezométrico;

$t$  - Tempo;

$k_{ij}$  - Condutividade hidráulica na zona saturada;

$q_s$  - Representa as entradas ou saídas de água do sistema.

A equação de fluxo subterrâneo pode ser solucionada por diversos esquemas implementados em programas comerciais de modelação numérica, como é o caso do *FEFLOW*.

Segundo Diersch (2009) o modelo *FEFLOW* baseia a análise numérica, em regime transitório, nos princípios físicos fundamentais de conservação de massa do fluido, do meio poroso e constituintes químicos, conservação do momento e de conservação da energia. O meio poroso saturado pode descrever-se por um sistema de duas fases, fase líquida e fase sólida. O indicador da fase varia  $\alpha = s, f$ , em que  $s$  indica a fase sólida e  $f$  a fase líquida, que neste caso é representada pela água. As fracções de volume de cada fase definem-se de acordo com  $\varepsilon = \varepsilon_f$  e  $\varepsilon = 1 - \varepsilon$ , em que  $\varepsilon$  indica a porosidade do meio poroso. As formulações matemáticas subjacentes encontram-se detalhadamente descritas em Diersch (2009), sendo desenvolvidas em separado dependendo do tipo de modelo, do tipo de superfície piezométrica ou do tipo de aquífero. Para o espaço 3D e 2D (modelo vertical e assimétrico), as equações representativas do modelo são as seguintes:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = Q_p + Q_{EB}(C, T) \quad (A.2)$$

$$q_i^f = -K_{ij} f_{ij} \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_o^f}{\rho_o^f} e_j \right) \quad (A.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon RC) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( q_i^f C - D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \varepsilon R \vartheta C = Q_C \quad (\text{forma divergente}) \quad (A.4)$$

$$\varepsilon R_d \frac{\partial C}{\partial t} + q_i^f \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + (\varepsilon R \vartheta + Q_p) C = Q_C \quad (\text{forma convectiva}) \quad (A.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\varepsilon \rho^f \xi^f + (1 - \varepsilon) \rho^s c^s) T] + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho^f q_i^f c^f T) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}) = Q_T \quad (\text{forma divergente}) \quad (A.6)$$

$$[\varepsilon \rho^f c^f + (1 - \varepsilon) \rho^s c^s] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho^f c^f q_i^f \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \rho^f c^f Q_p (T - T_o) = Q_T \quad (\text{forma convectiva}) \quad (A.7)$$

Com as seguintes equações constituintes (Diersch, 2009):

Nível Piezométrico:

$$h = \frac{p^f}{\rho_o^f g} + x_i \quad (\text{A.8})$$

Tensor da condutividade hidráulica:

$$K_{ij} = \frac{k_{ij} \rho_o^f g}{\mu_o^f} \quad (\text{A.9})$$

Função da relação da viscosidade do fluido:

$$f_\mu = \frac{\mu_o^f}{\mu^f(C, T)} \quad (\text{A.10})$$

Tensor da dispersão hidrodinâmica:

$$D_{ij} = (\varepsilon D_d + \beta_T V_q^f) \delta_{ij} + (\beta_L - \beta_T) \frac{q_i^f q_j^f}{V_q^f} \quad (\text{A.11})$$

Sendo que a equação do transporte na forma “*divergence*”, calcula o fluxo de contaminante total através das fronteiras do modelo, por advecção e por dispersão (parte convectiva + parte dispersiva do fluxo). Por sua vez, no caso da equação do transporte na forma “*convectiva*”, esta incorpora a equação da conservação de massa e calcula apenas o fluxo de contaminante por advecção (parte convectiva do fluxo).

Factor de retardamento:

$$R = 1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \chi(C) \quad (\text{A.12})$$

$$R_d = 1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \hat{\varepsilon} \left[ \frac{\chi(C) \cdot C}{\partial C} \right] \quad (\text{A.13})$$

Tensor da termo-dispersão hidrodinâmica:

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^{cond} + \lambda_{ij}^{disp} \quad (\text{A.14})$$

$$\lambda_{ij}^{cond} = [\varepsilon \lambda^f + (1-\varepsilon) \lambda^s] \delta_{ij} \quad (\text{A.15})$$

$$\lambda_{ij}^{disp} = \rho^f c^f \left[ \alpha_T V_q^f \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{q_i^f q_j^f}{V_q^f} \right] \quad (\text{A.16})$$

$$Q_T = \varepsilon \rho^f Q_T^f + (1-\varepsilon) \rho^s Q_T^s \quad (\text{A.17})$$

Estas equações são resolvidas para as seguintes quatro variáveis primárias (Diersch,2009):

h - Nível piezométrico;

$q_i^f$  - Velocidade de Darcy do vector de escoamento;  
 $C$  - Concentração do componente químico;  
 $T$  - Temperatura.

em que:

$\rho^f, \rho_0^f$  - Densidade do fluido e densidade do fluido de referência, respectivamente;  
 $\rho^s$  - Densidade do solo;  
 $S_0$  - Coeficiente de armazenamento específico;  
 $K_{ij}$  - Tensor da condutividade hidráulica;  
 $e_j$  - Vector unitário gravitacional;  
 $f_\mu$  - Função da relação de viscosidade constitutiva;  
 $Q_{EB}$  - Termo da aproximação de Boussinesq;  
 $R$  - Factor de retardamento;  
 $R_d$  - Termo derivado do retardamento;  
 $D_{ij}$  - Tensor da dispersão hidrodinâmica;  
 $\upsilon$  - Taxa de decaimento;  
 $\varepsilon$  - Porosidade;  
 $c^f, c^s$  - Capacidade de calor específica do fluido e do sólido respectivamente;  
 $\lambda_{ij}$  - Tensor de termo-dispersão hidrodinâmica;  
 $Q_x$  - Função de recarga/sumidouro do fluido ( $x=\rho$ ), da massa de contaminante ( $x=C$ ) e de calor ( $x=T$ );  
 $\alpha$  - Razão entre a diferença de densidades do fluido;  
 $\beta$  - Coeficiente de expansão do fluido;  
 $C_0, T_0$  - Concentração e temperaturas de referência, respectivamente;  
 $C_s$  - Concentração máxima;  
 $p^f$  - Pressão do fluido;  
 $g$  - Aceleração gravitacional;  
 $K_{ij}$  - Tensor da permeabilidade;  
 $\mu, \mu_0^f$  - Viscosidade dinâmica do fluido e o seu valor de referência, respectivamente;  
 $D_d$  - Coeficiente de difusão molecular do fluido;  
 $V_q^f$  - Velocidade de Darcy absoluta do fluido;  
 $\beta_L, \beta_T$  - Dispersividade longitudinal e transversal das espécies químicas, respectivamente;  
 $\chi^{(C)}$  - Função da concentração dependente da adsorção;  
 $\lambda_{ij}^{cond}$  - Parte condutiva do tensor de termo-dispersão;  
 $\lambda_{ij}^{disp}$  - Parte dispersiva do tensor de termo-dispersão;  
 $\lambda^f, \lambda^s$  - Condutividade termal para fluido e sólido, respectivamente;  
 $\alpha_L, \alpha_T$  - Termo-dispersividade longitudinal e transversal do fluido, respectivamente.

## **A.3 - Procedimento de Modelação com recurso ao FEFLOW**

Neste ponto descrevem-se as etapas envolvidas no desenvolvimento do modelo 2D do escoamento subterrâneo e do transporte de massa, do sistema aquífero da água *Fonte da Fraga*, presente no Sector do Ribeiro Frio, com o software, que originaram os resultados gráficos apresentados no Capítulo 4.

### **A.3.1 - Criação da malha**

O primeiro passo com vista à modelação baseia-se na criação de uma malha de elementos finitos que tem como base o sistema em estudo que se quer estudar, assim como das discontinuidades que existem no seu interior ou num determinada zona de interesse.

Este processo iniciou-se com a importação e ajuste de um mapa (Figura A.2), construído previamente com recurso ao software *AutoCad*, onde é definida a geometria da área a modelar assim como as principais singularidades ali presentes.

O passo seguinte serve-se das opções “*Design superelement Mesh*” e “*New mesh editor*” (Figura A.3) para efectuar a marcação, no mapa importado, das singularidades, neste caso a faixa de corneanas (Figura A.4), e dos limites da área que se pretende modelar, tal como se demonstra na Figura A.5.

A etapa posterior foi a criação da malha de elementos triangulares aplicada a toda a área da zona a modelar. Durante a simulação os resultados são calculados em cada nó da malha e interpolados no interior dos elementos finitos (Diersch, 2009). O software apresenta três opções para a criação da malha (geração automática, em área e gradual) (Figura A.6), assim como possibilita vários graus de refinamento da mesma, em locais a definir pelo utilizador (Figura A.7). O tipo de elemento que constitui a malha também pode ser seleccionado de acordo com a dimensão do modelo. No exemplo de um problema a 2 dimensões dispõe de elementos quadrangulares com 4 e 8 nós e triangulares com 3 e 6 nós.

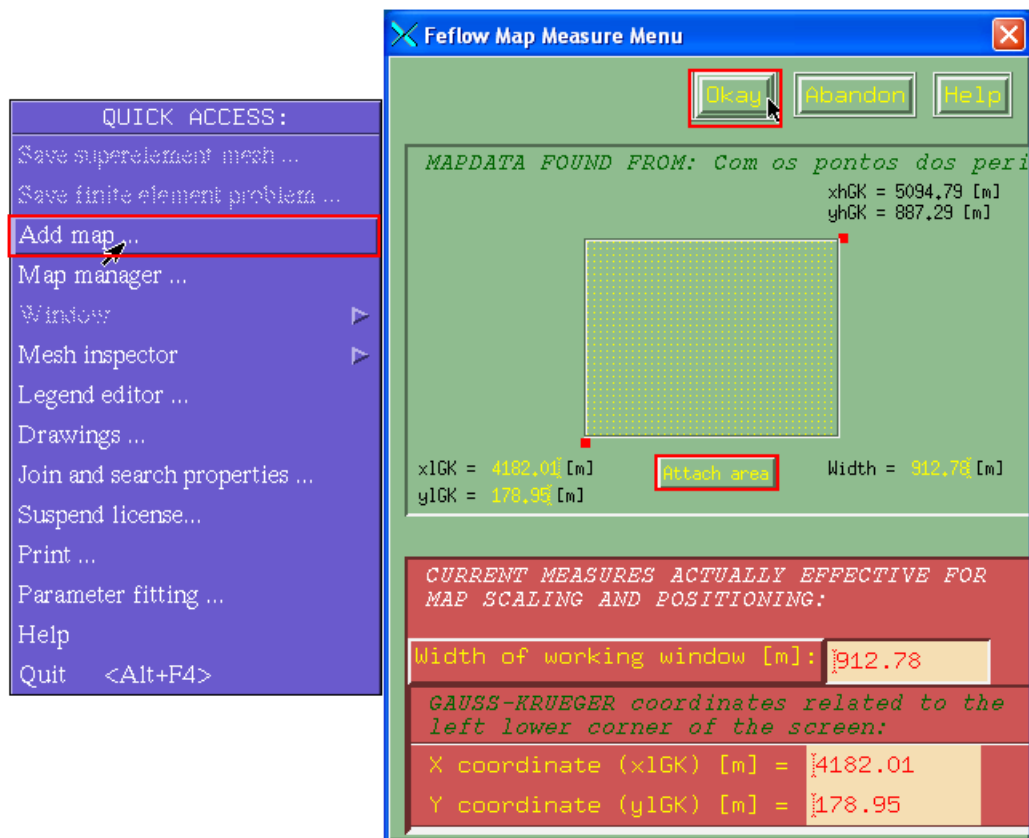


Figura A.2 - Menu de importação do mapa e ajuste das dimensões da janela de trabalho.

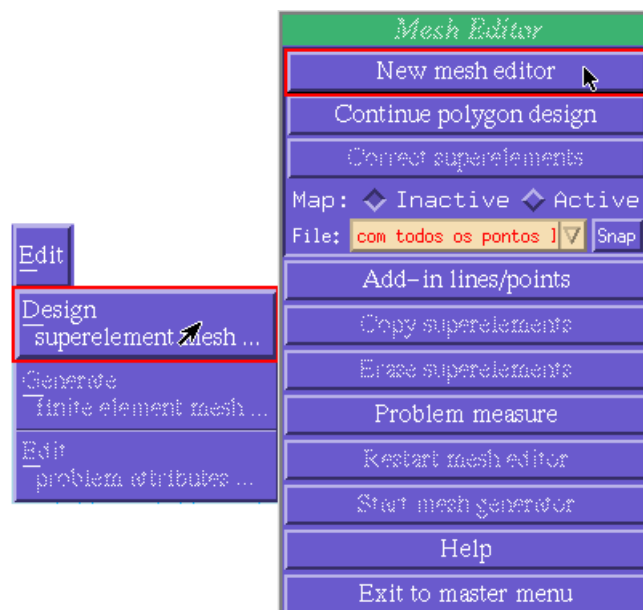


Figura A.3 - Menus iniciais para a criação da malha.

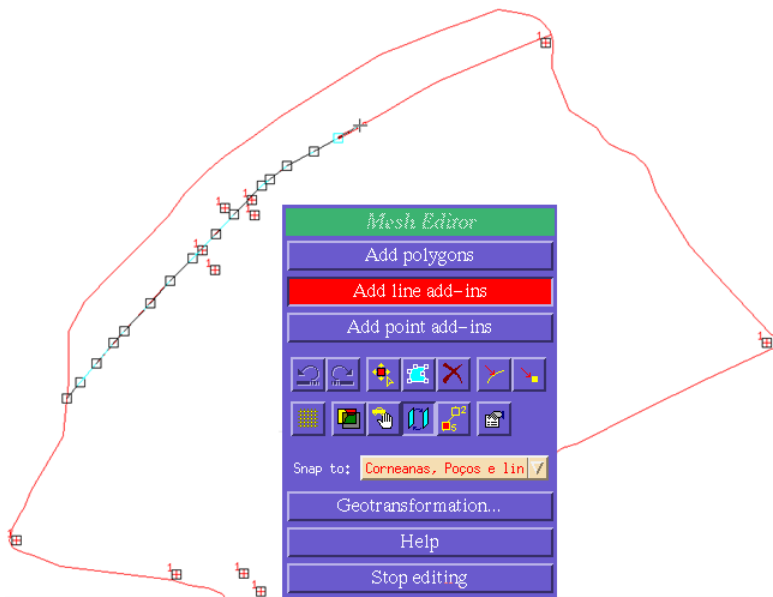


Figura A.4 - Marcação de uma singularidade (linha de corneas) no mapa importado.

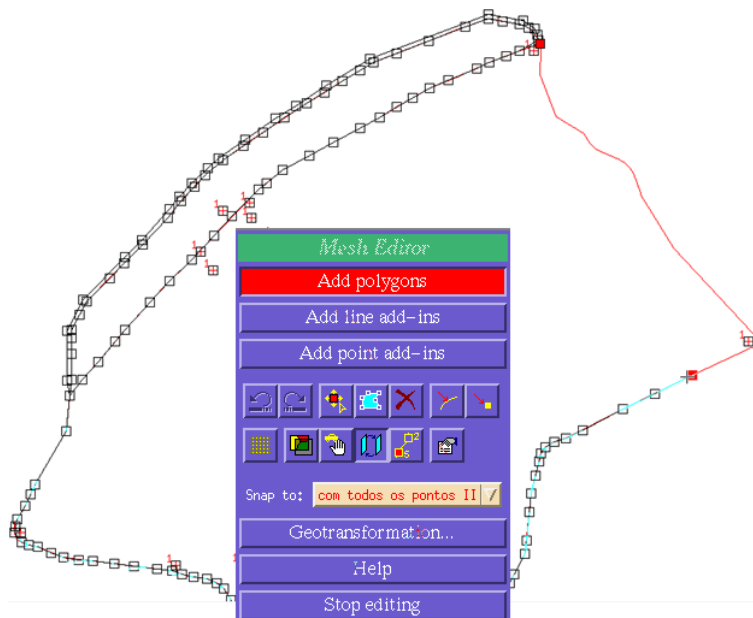


Figura A.5 - Marcação do contorno da fronteira da área que se pretende modelar.

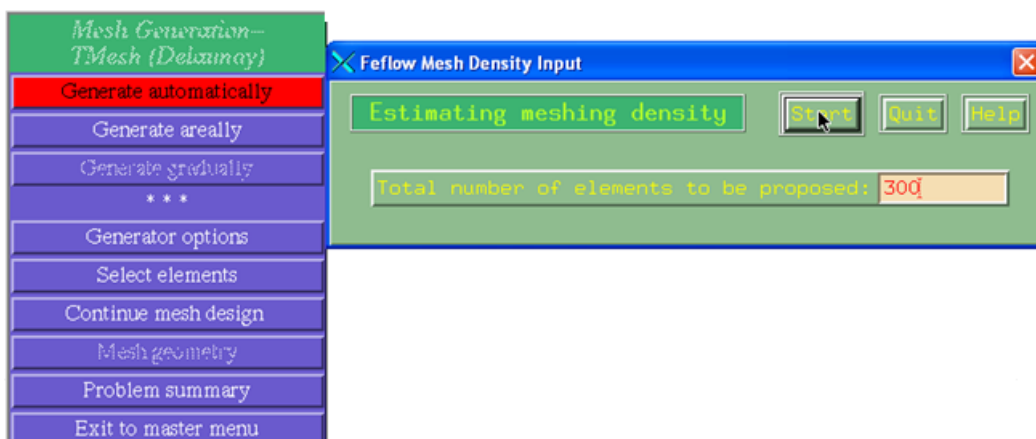


Figura A.6 - Menu para a criação da malha, com uma estimativa inicial de 300 elementos triangulares.



Figura A.7 - Menu de opções para a criação e refinamento da malha.

### A.3.2 - Definição e discretização do tipo de problema

A definição do tipo de problema inicia-se com a escolha do meio a ser estudado (saturado ou não saturado), do tipo de simulação (apenas fluxo ou fluxo e transporte de massa em condições estacionárias ou transitórias), do tipo de aquífero (confinado ou não confinado), da dimensão do modelo (2D neste exemplo) e do plano de projecção que se pretende (horizontal, vertical ou assimétrico) (Figura A.8).

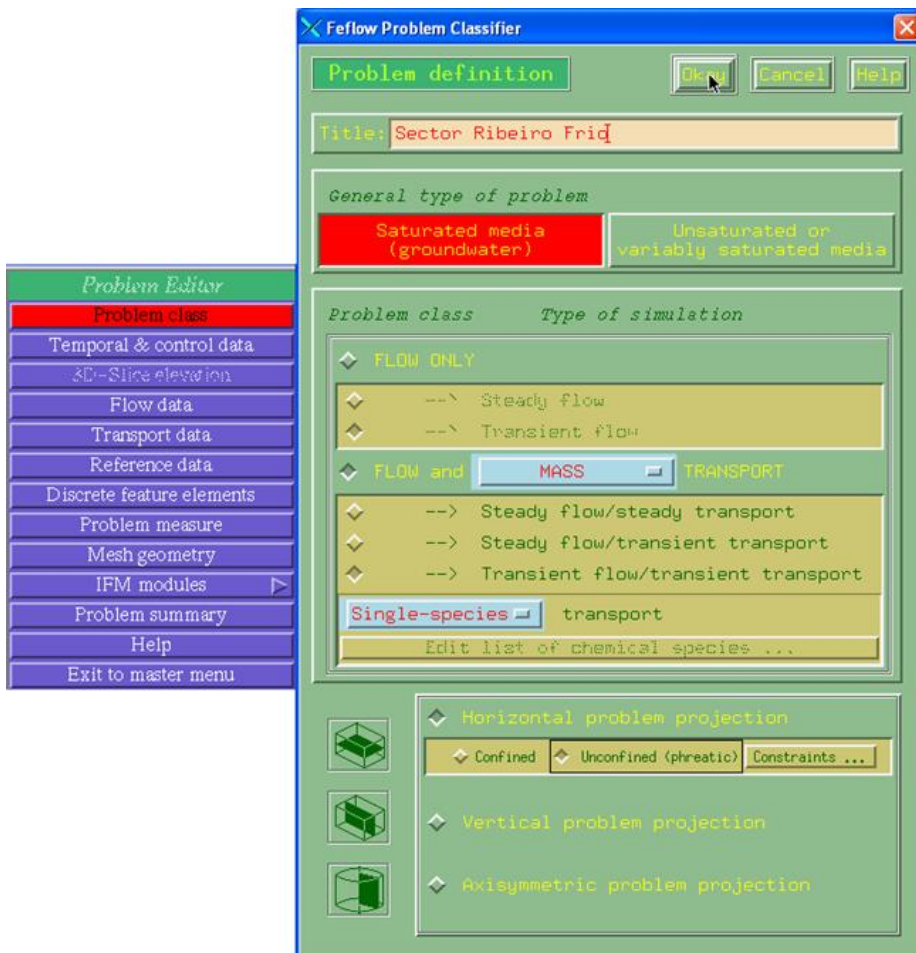


Figura A.8 - Menu de definição das características do problema.

De acordo com Diamantino (2009) a simulação em condições transitórias permite a escolha de diferentes opções relativamente à discretização temporal, que incluem esquemas de intervalos de tempo constantes, variáveis ou por cálculo automático. Os intervalos de tempo calculados automaticamente são executados realizando um esquema de integração do tempo de 1ª ordem (*Forward Euler/Backward Euler FE/BE*) ou um esquema de integração do tempo de 2ª ordem (*Forward Adams Bashforth/Backward Trapezoid AB/TR*) (Figura A.9).



Figura A.9 - Menu de definição das condições temporais.

### A.3.3 - Definição das condições iniciais

A definição das condições iniciais (Figura A.10) representa a distribuição inicial dos níveis freáticos em pontos onde o seu valor é conhecido ou para a totalidade da área a estudar. Esta regionalização de valores pode ser obtida através da importação dos dados, que pode ser realizada a partir de um ficheiro de dados (*database*), ou por um sistema de coordenadas com a respectiva função (*dataedit*), sendo depois interpolados para toda a área por um dos seguintes métodos: *krigagem*, *inter/extrapolação de Akima*, *distancia inversa* e *interpolação linear 1D*, ou ainda pela introdução, de forma interactiva, do valor que se pretende para toda a área, para um elemento finito, para um nó da malha ou para uma área pré-definida (Figura A.11).

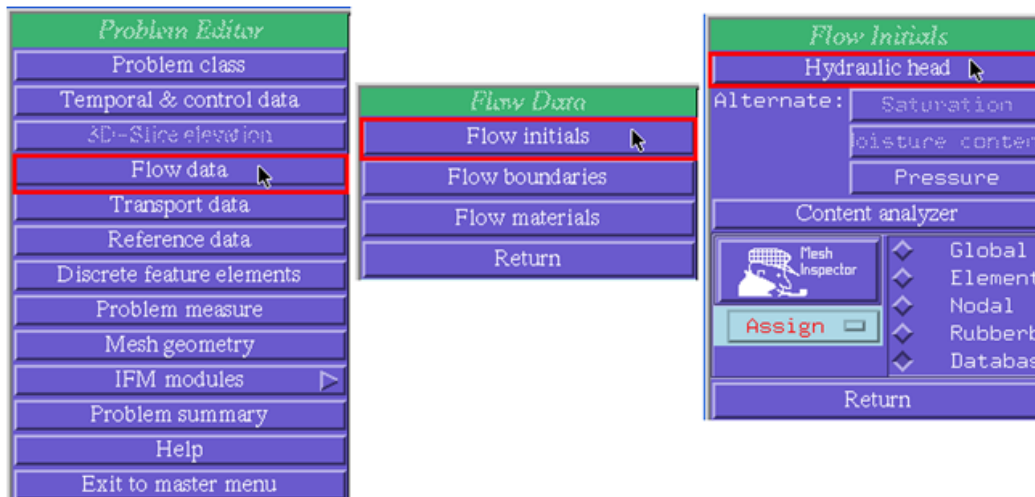


Figura A.10 - Menus de comandos para definição dos níveis hidrostáticos iniciais.

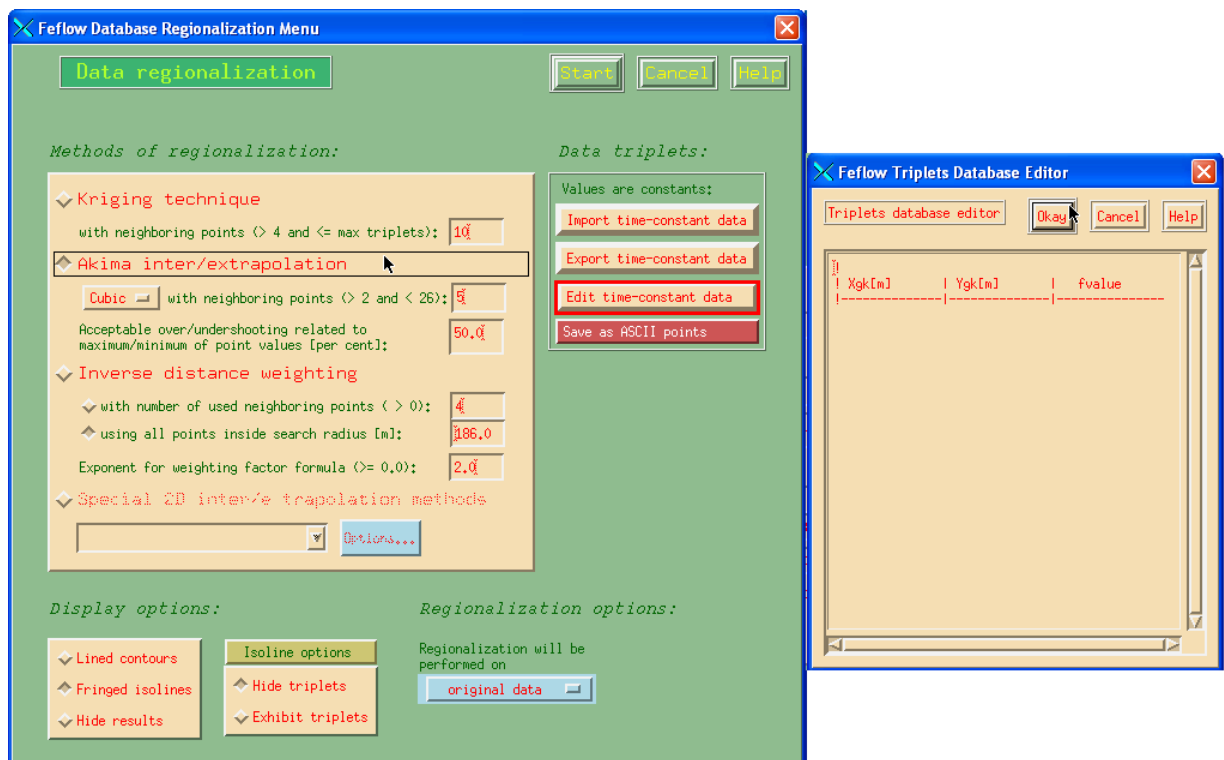


Figura A.11 - Menu de importação e edição de dados para definição das condições iniciais de fluxo.

### A.3.4 - Condições de fronteira

A definição das condições de fronteira assegura, através de restrições impostas em determinados nós das malhas, a representação da interface que ocorre entre o domínio da área modelada e o ambiente envolvente. Especificam-se a variável dependente (nível freático) ou a variável dependente (fluxo) nas fronteiras do modelo através de formulações matemáticas.

Algumas considerações gerais sobre a imposição de condições de fronteira (Figura A.12) são referidas em Diamantino (2009), das quais se salientam as seguintes:

- 1) Devem ser localizadas e orientadas em consistência com a característica física que pretendem representar;
- 2) Devem ser impostas o mais afastado possível da zona de interesse para que qualquer alteração imposta no interior do domínio da área modelada não se reflecta na própria condição de fronteira;
- 3) Devem ser atribuídas de modo que o efeito que pretende representar seja realista.

Normalmente podem tirar partido das fronteiras físicas ou hidráulicas da área modelada. As fronteiras físicas estão normalmente relacionadas com a presença de uma formação geológica impermeável ou de corpos de água superficial. Geralmente as fronteiras impermeáveis são atribuídas à base ou às fronteiras laterais do domínio modelado.

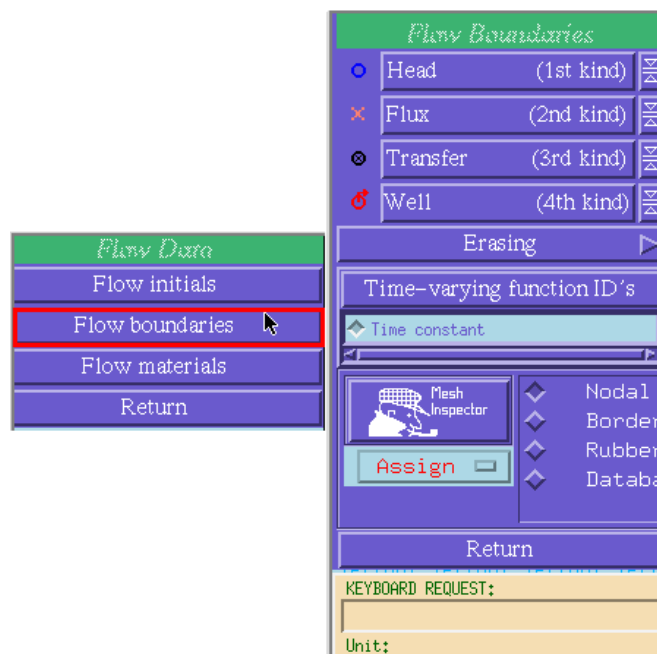


Figura A.12 - Menu de definição das condições de fronteira de fluxo.

As condições de fronteira podem-se definir da seguinte forma (Diersch, 2009):

- 1º Tipo ou de *Dirichlet*, quando a variável de estado (potencial hidráulico, concentração ou temperatura) permanece constante ao longo do tempo, serve ainda para fixar o valor de uma destas variáveis num determinado nó ou conjunto de nós;
- 2º Tipo ou de *Neumann*, quando o fluxo (de um fluido, de calor ou de massa) permanece constante. Atribui um fluxo hidráulico a um nó;
- 3º Tipo ou de *Cauchy*, quando existe a troca de fluido entre o aquífero e outro meio, em função da diferença de potencial entre ambos e da condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica define-se como um parâmetro hidráulico que regula a entrada ou saída de água de um aquífero, através de uma fronteira semi-permeável;

- 4º Tipo descreve a injeção ou extração de caudal num nó pontual ou num conjunto de nós.

A Tabela A.1 descreve as condições de fronteira para um modelo de escoamento subterrâneo formulado com recurso ao FEFLOW.

Tabela A.1 - Condições de fronteira para o modelo de escoamento definido no FEFLOW (Diersch, 2009).

Condições de Fronteira	Unidades	Observações
1º Tipo ou Dirichlet Potencial hidráulico constante	[m]	Descreve o nível piezométrico num determinado nó ou conjunto de nós da malha.
2º Tipo ou Neumann	[m/d] ou [m <sup>2</sup> /d]	Fixa o fluxo de um fluido num determinado nó ou conjunto de nós adjacentes. No caso de um problema horizontal 2D e aquífero confinado, o fluxo de um fluido tem ser estabelecido integrado em função da profundidade.
3º Tipo ou Cauchy Transferência	[m]	Define o nível piezométrico de referência numa área exterior ao domínio do modelo, como é o caso de um rio ou um lago; neste tipo de condição tem que ser definida uma taxa de transferência entre este corpo superficial e o aquífero.
4º Tipo Fonte pontual	[m <sup>3</sup> /d]	Representa a extração ou injeção de água através de um furo representado por um nó da malha.

### A.3.5 - Definição dos parâmetros do meio poroso

Neste ponto são definidas as características físicas dos materiais presentes na área a modelar. Estas características, que condicionam o fluxo de água subterrânea, podem ser introduzidas ao modelo através dos menus apresentados na Figura A.13

Os parâmetros do meio poroso dependem da dimensão 2D ou 3D da simulação, do tipo de projecção, do meio através do qual se realiza a modelação do fluxo (zona saturada ou zona não saturada). Para meios saturados e simulações 2D é necessário definir os parâmetros hidráulicos referidos na Tabela A2 (Diersch, 2009).

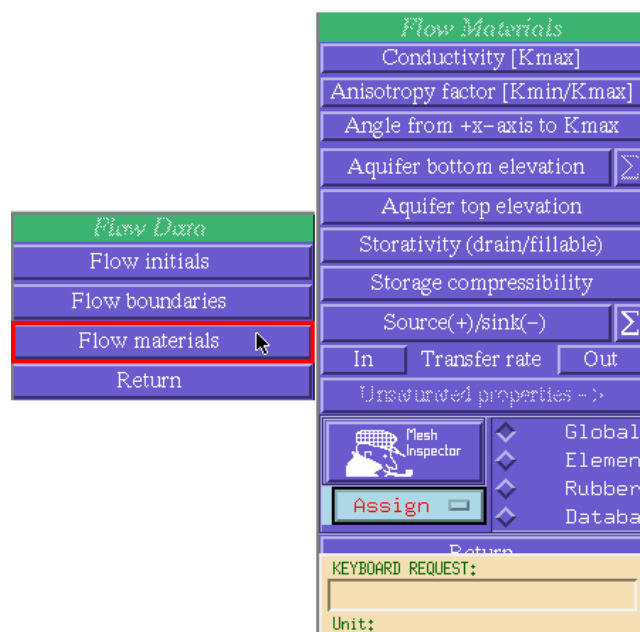


Figura A.13 - Menu de definição das características físicas do meio.

Tabela A.2 - Parâmetros dos materiais para o modelo de escoamento em 2D definido no FEFLOW (Diersch, 2009).

Parâmetro do meio poroso	Símbolo	Unidades
Condutividade	$K_{max}$	$[10^{-4} \text{ ms}^{-1}]$
Factor de Anisotropia	aniso	1
Ângulo desde o eixo horizontal a $K_{max}$	$\phi$	$[^\circ]$
Razão entre densidades	$\alpha$	$[10^{-4}]$
Coefficiente de armazenamento específico (aquíferos confinados)	$S_o$	$[m^{-1}]$
Recarga (+) / Descarga (-)	$Q_p$	$[10^{-4} \text{ d}^{-1}]$
Taxa de transferência do aquífero (entrada)	$\Phi_h^{in}$	$[10^{-4} \text{ d}^{-1}]$
Taxa de transferência do aquífero (saída)	$\Phi_h^{out}$	$[10^{-4} \text{ d}^{-1}]$

### A.3.6 - Parâmetros de transporte de massa

Tal como acontece no caso do modelo de escoamento de fluxo subterrâneo, também para a modelação do transporte de massa se estabelecem as condições iniciais (Figura A.14), as condições de fronteira (Figura A.15) e as propriedades dos materiais (Figura A.16). As condições iniciais consistem na introdução das concentrações iniciais relativas à situação da contaminação que se pretende simular. Na Tabela A.3 faz-se a descrição das condições de fronteira a definir para o modelo de transporte de massa.

Tabela A.3 - Condições de fronteira para o modelo de transporte de massa definido no *FEFLOW* (Diersch,2009).

Condições de fronteira		Unidades	Observações
1ª Ordem (Dirichlet)	Concentração imposta	[mg/L]	Define a concentração do contaminante a modelar.
2ª Ordem (Neumann)	Fluxo de massa imposto	[mg/L] * [m/d]	Define o fluxo de entrada do contaminante no modelo.
3ª Ordem (Cauchy)	Transferência de massa	[mg/L]	Define o fluxo de entrada do contaminante através de uma zona lixiviante.
4ª Ordem	Fonte pontual	[mg/L] * [m/d]	Define uma fonte ou sumidouro para um contaminante.

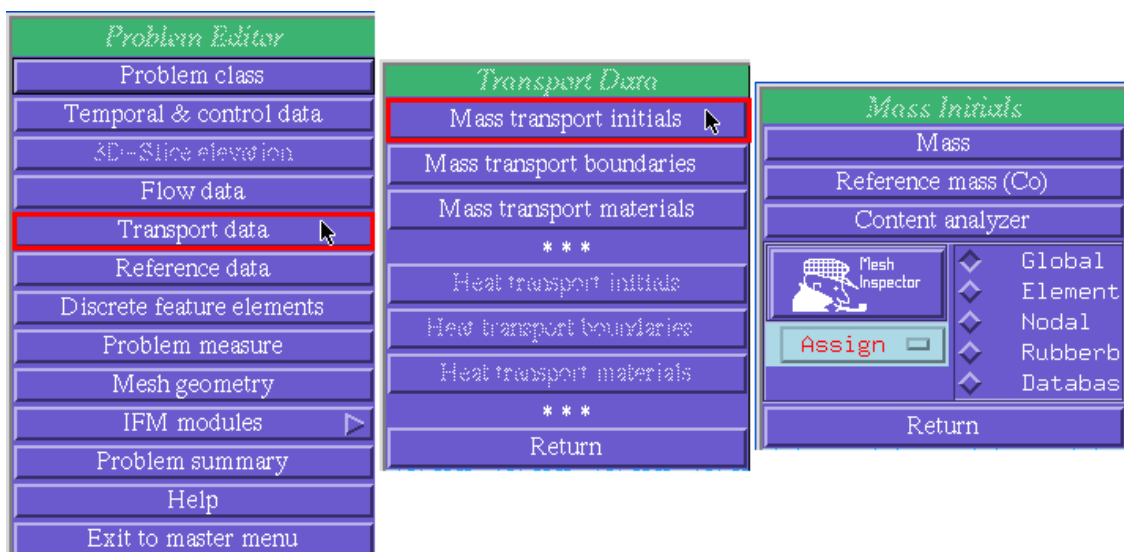


Figura A.14 - Menu para a introdução de dados referentes aos valores iniciais de contaminação.

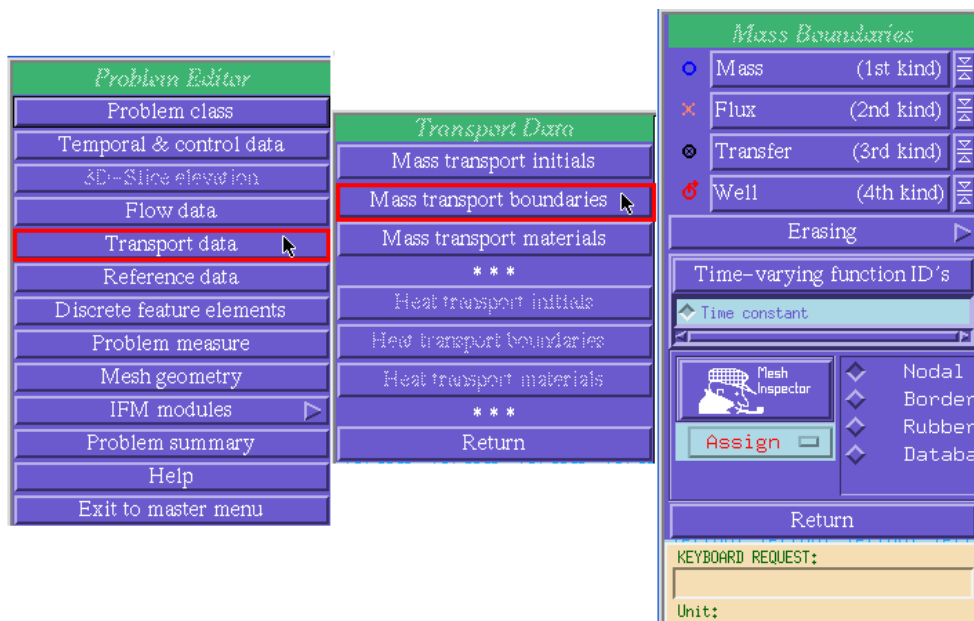


Figura A.15 - Menu de definição das condições de fronteira relativas ao transporte de soluto.



Figura A.16 - Menu de definição das características do meio, condicionantes da dispersão da pluma de contaminante.

Os mecanismos de transporte de solutos no meio poroso modelado podem ser regulados através da definição das propriedades dos materiais (Tabela A.4) que intervêm neste processo.

Tabela A.4 - Parâmetros dos materiais para o modelo de transporte de massa 2D definido no FEFLOW (Diersch, 2009).

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Espessura do aquífero	$B$	$m$
Porosidade	$\epsilon$	1
Adsorção Henry:		
Coeficiente de adsorção	$k$	1
Adsorção Freundlich:		
Coeficiente de adsorção	$b_1$	$(mg/l)^{1-b_2}$
Expoente de adsorção	$b_2$	1
Adsorção Langmuir:		
Coeficiente de adsorção (numerador)	$K_1$	1
Expoente de adsorção (denominador)	$K_2$	$l/mg$
Difusão molecular	$D_d$	$10^{-9} m^2 s^{-1}$
Dispersividade longitudinal	$\beta_L$	$m$
Dispersividade transversal	$\beta_T$	$m$
Taxa de decaimento	$\vartheta$	$10^{-4} s^{-1}$
Recarga (+) / Descarga (-)	$Q_c$	$gm^{-2} d^{-1}$
Taxa de transferência do aquífero (entrada)	$\Phi_c^{in}$	$md^{-1b}$
Taxa de transferência do aquífero (saída)	$\Phi_c^{out}$	$md^{-1c}$

No que diz respeito à interação entre o meio poroso e o soluto, os processos de adsorção podem ser caracterizados pelas seguintes equações de adsorção: *Henry*, *Freundlich* e

*Langmuir* cujas respectivas expressões matemáticas descrevem a relação entre a concentração e a quantidade adsorvida na superfície do solo. A mais conhecida, expressa pela Lei de adsorção de *Henry* pode escrever-se, segundo Diersch (2009), da seguinte forma:

$$R = \varepsilon (1-\varepsilon) K \quad (\text{A.18})$$

$$R_d = \varepsilon + (1-\varepsilon) K \quad (\text{A.19})$$

Em que,  $k$  é o coeficiente e de adsorção de *Henry*. Este coeficiente pode ser calculado pela aplicação da seguinte expressão:  $K = K_d \cdot \rho^S$ , em que,  $K_d$  é o coeficiente de distribuição fase sólida/fase líquida para um dado elemento ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) e  $\rho^S$  a densidade do sólido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Outro mecanismo de transporte de solutos é a difusão molecular que se traduz num movimento próprio das moléculas de soluto, que conduz ao equilíbrio de concentração no meio. Este mecanismo pode ocorrer na ausência de qualquer movimento hidráulico e só deixa de existir quando se anulam os gradientes de concentração (Diamantino, 2009).

### A.3.7 - Pontos de observação e execução do simulador

Uma das ferramentas que o programa oferece é a possibilidade de definir pontos de observação dentro do modelo que foi construído. Essa opção pode ser seleccionada no menu apresentado na Figura A.17 e a descrição e alteração das propriedades dos pontos nodais a receber os pontos de observação é exposta na Figura A.18. A escolha da localização destes pontos terá que ter em conta os locais que poderão vir a ser os mais representativos de toda a área estudada ou os locais de maior importância, como é o caso dos furos de extracção.

Na fase final deste processo é possível aceder a um quadro resumo (Figura A.19) das principais características que foram definidas ao longo das várias etapas que culminam com as opções do menu apresentado na Figura A.20 que executa o software.

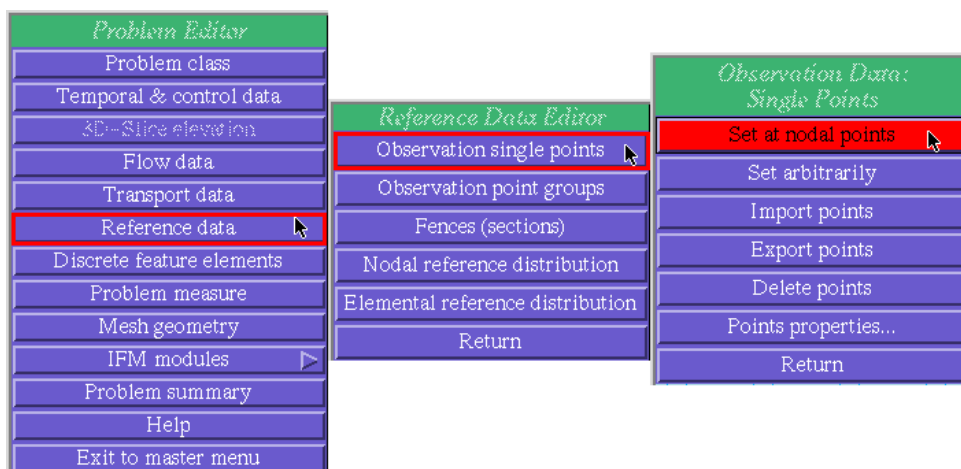


Figura A.17 - Menu de definição dos pontos nodais a receber os pontos de observação.

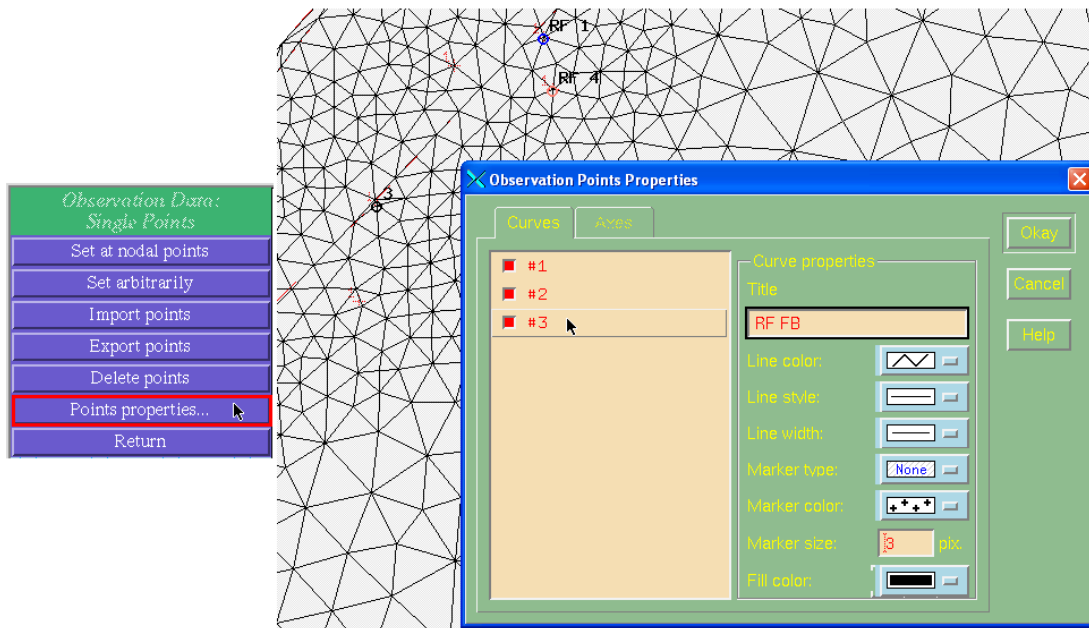


Figura A.18 - Menu de ajuste das propriedades dos pontos de observação.

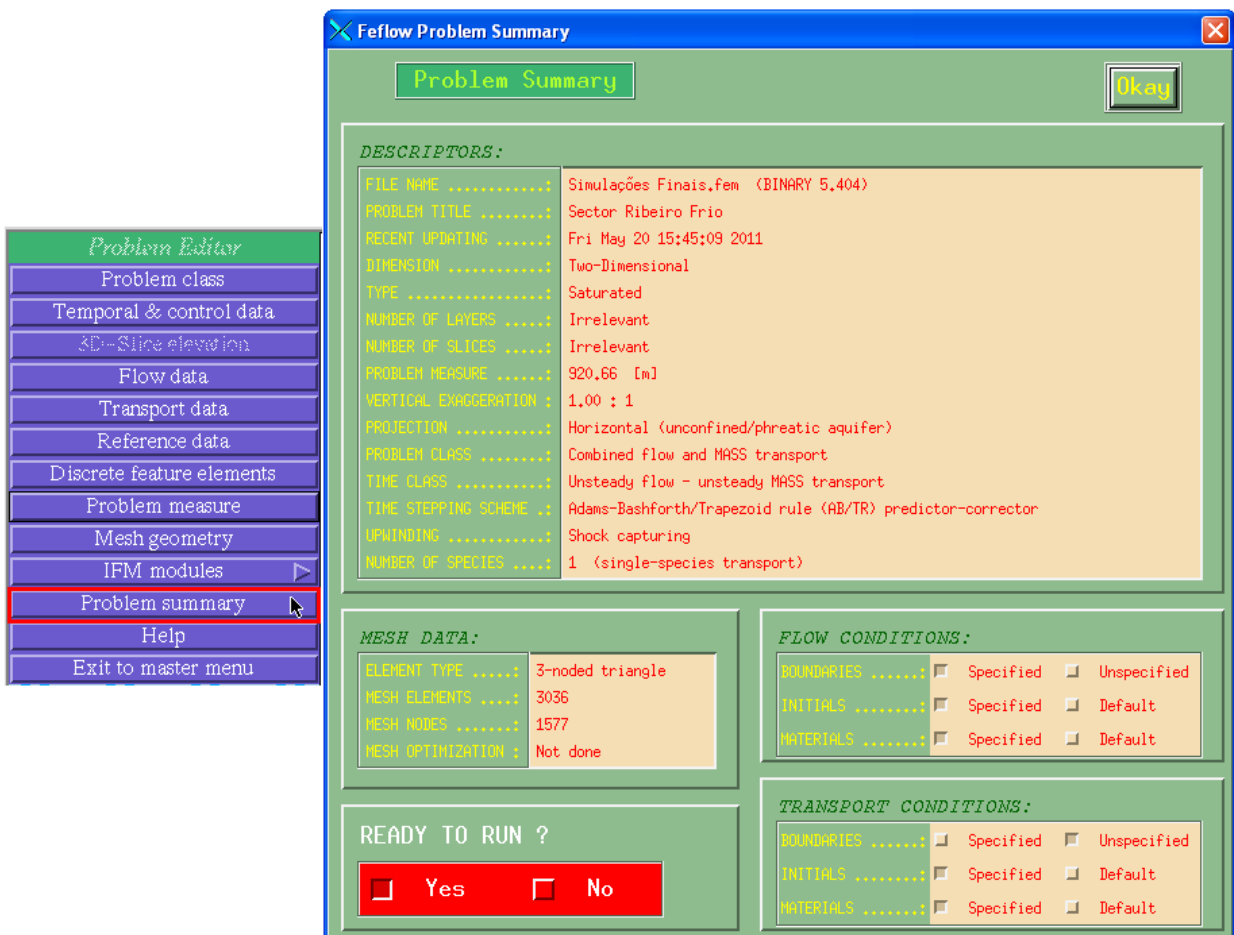


Figura A.19 - Resumo das principais características definidas no processo de modelação.

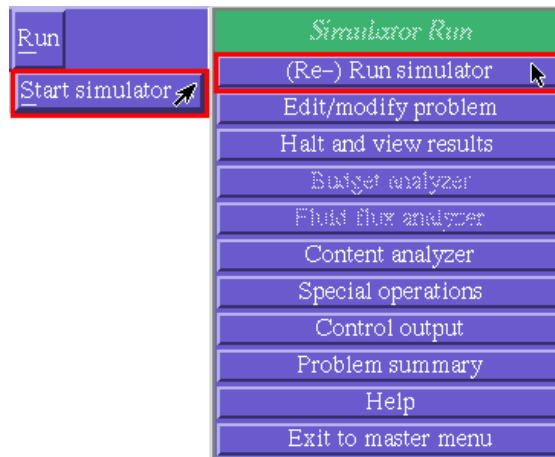


Figura A.20 - Menu de execução do simulador.