

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA



MODELOS GEOHIDRÁULICOS EM MEIOS FRACTURADOS DE ROCHAS GRANÍTICAS

Caso de Estudo do Aquífero da Fonte da Fraga - Serra da Gardunha

ERIC MENDES

**Covilhã
Setembro 2010**

MODELOS GEOHIDRÁULICOS
EM MEIOS FRACTURADOS DE ROCHAS GRANÍTICAS
CASO DE ESTUDO DO AQUÍFERO DA FONTE DA FRAGA - SERRA DA GARDUNHA

DISSERTAÇÃO APRESENTADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL

Orientação Científica:

Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Gomes (UBI)

Co-orientação Científica:

Prof. Doutor Luís Filipe Tavares Ribeiro (IST)

Prof.^a Doutora Maria Teresa Condesso de Melo (IST)

Trabalho financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e a empresa Beira Vicente (Fonte da Fraga) na concessão da Bolsa de Doutoramento em Empresa com a referência SFRH/BDE/33328/2008.

**À Lara,
por todo o apoio,
compreensão e sacrifício.**

AGRADECIMENTOS

Durante a realização deste trabalho tive o privilégio de contar com a colaboração de várias pessoas e instituições que enriqueceram e tornaram possível este trabalho, e que contribuíram para a minha maturidade científica. De algumas destas relações resultaram laços de amizade fortes que certamente perdurarão.

Assim, gostaria de expressar os meus agradecimentos a todos quantos participaram nesta etapa da minha formação pessoal, académica e profissional, nomeadamente:

- ao Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Gomes, do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior, pela orientação desta dissertação, pelos incansáveis incentivos, bem como pela enorme disponibilidade e paciência demonstrada nas “discussões” e esclarecimentos sobre a matéria em estudo. Sublinho gratamente, a confiança que depositou em mim e o magnífico espírito de trabalho que dinamizou, bem como a amizade demonstrada ao longo destes últimos anos;
- aos Prof. Doutores Luís Filipe Tavares Ribeiro e Maria Teresa Condesso de Melo, do Instituto Superior Técnico, co-orientadores, pela oportunidade das suas sugestões e aos apoios dispensados para a elaboração desta dissertação bem como o interesse que sempre demonstraram na prossecução da qualidade deste trabalho;
- à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e à empresa Beira Vicente (Fonte da Fraga) no apoio financeiro pela atribuição da Bolsa de Doutoramento em Empresa;
- ao Sr. Dr. Jerónimo Matias, Pedro Matias e José Manuel, da Beira Vicente pelas facilidades na utilização de todo o material indispensável para a realização deste estudo bem como pelos valiosos e importantes contributos dados ao longo deste trabalho;

- à unidade de investigação CVRM-Centro de GeoSistemas do Instituto Superior Técnico por todas as facilidades concedidas e em especial pela disponibilidade do software FEFLOW 5.4;
- ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da UBI que me proporcionou as condições necessárias à concretização desta dissertação;
- ao Instituto Geográfico Português pela cedência gratuita de informação geográfica da Serra da Gardunha, ao abrigo do programa de Fornecimento de Informação Geográfica para Investigação, Ensino e Edição – Programa FIGIEE;
- ao Prof. Doutor Luís Oliveira Sousa do Departamento de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro pela interpretação das lâminas delgadas das formações geológicas presentes na zona de estudo;
- ao Prof. Doutor José Paulo Monteiro do Departamento de Ambiente e Ciências da Terra da Universidade do Algarve pela possibilidade das sugestões dadas para o desenvolvimento do modelo numérico;
- ao colega Rui Twohig Hugman do Departamento de Ambiente e Ciências da Terra da Universidade do Algarve pelas ajudas fundamentais, na fase inicial, do desenvolvimento do modelo numérico no FEFLOW;
- ao Técnico Joaquim Manuel Ramos Varandas do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da UBI, pelo seu incansável apoio e companheirismo, sempre muito intenso e especialmente demonstrado nas inúmeras saídas de campo realizadas;
- à Lara, a quem devo e com quem partilhei os momentos mais agradáveis e mais importantes desta fase da minha vida;
- a todos quantos, de algum modo, contribuíram para a concretização deste trabalho (amigos, colegas, funcionários da UBI e funcionários da Beira Vicente) e que aqui não foram referidos, o autor agradece a atenção e dedicação de que foi alvo.

RESUMO

A presença de problemas concretos do desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos leva à necessidade de conceptualização dos sistemas hidrogeológicos, criando-se assim a cenarização de modelos conceptuais prováveis. Os modelos são aplicados em numerosas situações, abrangendo as mais diversas escalas.

Pretende-se com o presente trabalho contribuir para o conhecimento da modelação dos recursos hídricos subterrâneos em meios fracturados, em particular das rochas granitóides do centro de Portugal. Como caso de estudo são analisados os pontos de água do principal aquífero fracturado da Serra da Gardunha, e que serve de base às captações em exploração pela Beira Vicente.

Neste contexto, foi conduzido um estudo detalhado, onde numa primeira parte é feita uma introdução ao tema, com a apresentação dos objectivos, uma revisão do estado da arte, e a descrição da metodologia do trabalho.

No segundo capítulo, aborda-se a temática do escoamento subterrâneo e da modelação hidrogeológica.

No terceiro capítulo, é feita uma caracterização da área em estudo em termos geomorfológicos e geológicos quer regionais e locais.

O quarto capítulo aborda os aspectos hidrogeológicos, nomeadamente de recarga aquífera, hidrodinâmica e hidroquímica.

No quinto capítulo, procede-se à construção de um modelo numérico. Neste item é apresentado o software utilizado e com base no modelo construído com este software define-se um local para se realizar um novo furo de pesquisa com potencial de se tornar numa nova captação de produção de água do tipo Fonte da Fraga.

Finaliza-se a tese com a apresentação das conclusões e perspectivas futuras.

Palavras-chave: água subterrânea, modelos geohidráulicos, Serra da Gardunha, Fonte da Fraga.

ABSTRACT

The presence of the development of real problems in the groundwater resources takes to the necessity of conceptualization the hydrogeological systems, which create the scenery of conceptual, probably models. The models are applied in a variety of situations reaching the most different scales.

This work pretends to contribute to the knowledge of groundwater modelling resources into fractured courses, specially from granitoid rocks from the centre of Portugal. In this study are examined points of water from the main fractured aquifer from Gardunha's mountain which is the base for the captations in the exploitation by Beira Vicente.

Into this context a minucious study was elaborated, in the first part an introduction to the theme is done, with the presentation of the contents, a revision of the art's state and the description of the work's methodology.

In the second chapter, we talk about the groundwater flow and the hydrogeological models.

In the third chapter a description of the area in study is done, geomorphologically and geologically, either regional or local aspect.

The fourth chapter is about the hydrogeological aspects, specially the aquifer recharge, hydrodynamics and hydrochemistry.

In the fifth chapter a numerical model is created. Here the software used is presented and with it the local to do a new well is determined. This new well has potencial to become a new captation for the production of water like "Fonte da Fraga" water.

At the last this dissertation ends with the presentation of the conclusions and the perspectives for the future.

Keywords: groundwater, hydrogeological model, Gardunha's mountain, Fonte da Fraga

ÍNDICE GERAL

MENÇÃO DE APOIO	ii
DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GERAL	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABELAS	10
ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA	12

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema	16
1.2. Objectivo	18
1.3. Estudos Anteriores	19
1.4. Metodologia	23

Capítulo 2

O ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO

2.1. Aspectos Gerais	25
2.2. Parâmetros Hidrogeológicos Fundamentais	31
2.2.1. Porosidade	32
2.2.2. Condutividade hidráulica	33
2.2.3. Transmissividade	37

2.2.4. Coeficiente de armazenamento	37
2.3. A Modelação Hidrogeológica	38
2.3.1. Modelos numéricos	43
2.3.1.1. Método numérico baseado em diferenças finitas	43
2.3.1.2. Método numérico baseado em elementos finitos	45

Capítulo 3

ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO

3.1. Geomorfologia	48
3.1.1. Enquadramento regional	48
3.1.2. Enquadramento local	52
3.2. Geologia	55
3.2.1. Enquadramento regional	55
3.2.2. Enquadramento local	55
3.2.3. Fracturação	65

Capítulo 4

ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO

4.1. Elementos Hidrológicos	70
4.1.1. Elementos climáticos	71
4.1.2. Composição físico-química elementar da precipitação	73
4.1.3. Balanço hidrológico sequencial mensal	76
4.2. Recarga Aquífera	78
4.2.1. Recarga aquífera a partir do balanço hidrológico	79

4.2.2. Recarga aquífera a partir do balanço de cloretos	80
4.2.3. Recarga aquífera a partir de hidrogramas	81
4.3. Hidrodinâmica	88
4.4. Unidades Hidrogeológicas	90
4.5. Pontos de Água	92
4.5.1. Captações	92
4.5.2. Furos de pesquisa	94
4.6. Hidroquímica	96
4.6.1. Caracterização hidroquímica clássica	96
4.6.2. Caracterização isotópica	102
4.6.2.1. Isótopos estáveis de ^{18}O e ^2H	103
4.6.2.2. O isótopo radioactivo de hidrogénio (^3H)	108

Capítulo 5

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO AQUÍFERO DA FONTE DA FRAGA

5.1. Descrição do Modelo FEFLOW	112
5.2. Etapas na Construção do Modelo Utilizando o FEFLOW	116
5.2.1. Geração da malha	116
5.2.2. Definição do problema	117
5.2.3. Discretização temporal	118
5.2.4. Discretização espacial vertical	119
5.2.5. Dados relativos ao modelo de fluxo	119
5.3. Aplicação do FEFLOW à Zona de Estudo	122
5.3.1. Definição da área	122

5.3.2. Desenvolvimento da malha do modelo	122
5.3.3. Estabelecimento dos parâmetros de entrada	125
5.3.4. Balanço hídrico	135
5.3.5. Optimização do local do novo furo de pesquisa	139

Capítulo 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. Conclusões	145
6.2. Perspectivas Futuras	149

BIBLIOGRAFIA	151
--------------	-----

ANEXOS

I. Valores de caudal monitorizados ao longo dos anos de 2002 a 2006	162
II. Caracterização do novo furo de pesquisa	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1. Esboço sobre o ciclo hidrológico (Delgado Rodrigues, 1981).	26
Figura 2.2. Zona não saturada e zona saturada no subsolo (adaptado de IGM, 2001).	27
Figura 2.3. Nível de água subterrânea em furos captando diferentes tipos de aquíferos (adaptado de EPA, 1994).	29
Figura 2.4. Esboço esquemático do dispositivo utilizado por Darcy (EGEO, 2010).	34
Figura 2.5. Valores de condutividade hidráulica de diferentes materiais (adaptado de Freeze e Cherry, 1979).	36
Figura 2.6. Esquema genérico sobre modelo conceptual em situações de topografia com relativa simetria. Adaptado de Doménico e Schwartz, 1990, <i>in</i> Sousa Oliveira, 2005.	38
Figura 2.7. Esquema genérico sobre o modelo conceptual em situações de topografia particular. Adaptado de Custódio e Llamas, 1983, <i>in</i> Sousa Oliveira, 2005.	39
Figura 2.8. Esboço do modelo conceptual da zona da Serra da Estrela – Covilhã, evidenciando as grandes falhas semi-verticais a favorecer a recarga em profundidade (Mendes, 2006).	39
Figura 2.9. Esboços sobre singularidades geológicas na influência dos circuitos de água subterrânea (adaptado de Custódio e Llamas, 1983, <i>in</i> Sousa Oliveira, 2005).	40
Figura 2.10. Modelo conceptual da hidrodinâmica subterrânea do flanco oriental do sinclinal do Buçaco na região de Midões, Penacova (Azevedo <i>et al.</i> , 2010).	41
Figura 2.11. Modelo conceptual do funcionamento do Sistema Aquífero Moura-Ficalho (Marques da Costa, 2001)	42
Figura 2.12. Grelha de um modelo baseado em diferenças finitas (Fetter, 2001): a) Discretização nos blocos ou células; b) Discretização nos vértices ou nós.	44
Figura 2.13. Malha de elementos finitos (Fetter, 2001).	45

Capítulo 3

Figura 3.1. Modelo digital de terreno da Serra da Gardunha.	50
Figura 3.2 – Rede de drenagem das áreas da Serra da Gardunha.	51
Figura 3.3. Fotografia sobre a zona principal da área em estudo dos terrenos da água Fonte da Fraga, da Serra da Gardunha (vista de montante para jusante).	53
Figura 3.4. Fotografia sobre a zona principal da área em estudo dos terrenos da água	53

Fonte da Fraga, da Serra da Gardunha (vista de jusante para montante).	
Figura 3.5. Imagens de morfologias graníticas da área do aquífero da Fonte da Fraga: a) e b) disjunção esferoidal; c) bloco residual; d) bacias de pedra; e) e f) blocos fracturados; g) tors; h) bloco pedunculado.	54
Figura 3.6. Mapa geológico da zona onde se insere a sub-bacia hidrográfica em estudo - Sector SW da Serra da Gardunha.	56
Figura 3.7. Mapa geológico, em pormenor, da zona onde se insere a sub-bacia hidrográfica em estudo - Sector SW da Serra da Gardunha.	57
Figura 3.8. Imagem da formação de cobertura: aluviões actuais.	58
Figura 3.9. Imagem da formação de cobertura: depósitos de vertente.	58
Figura 3.10. Imagem dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).	59
Figura 3.11. Imagem dos granitos moscovíticos-biotíticos ($\gamma''3d$).	59
Figura 3.12. Aspecto da elevada fissuração do quartzo; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).	60
Figura 3.13. Feldspato potássico - aspectos típicos observados; note-se a macla em xadrez e as pertites; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).	61
Figura 3.14. Aspecto típico das plagioclases, com intensa alteração; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).	62
Figura 3.15. Aspecto da biotite; note-se a intensa alteração; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).	62
Figura 3.16. Aspecto da moscovite; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).	63
Figura 3.17. Imagem dos filonetes de quartzo.	63
Figura 3.18. Imagem das formações metamórficas: a) corneanas; b) xistos mosqueados.	64
Figura 3.19. Aspecto geral das corneanas; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita).	65
Figura 3.20. Aspecto geral dos xistos mosqueados, onde é nítida a presença dos pórfiros; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita).	65
Figura 3.21. Carta de alinhamentos baseada na interpretação de imagens obtidas por fotografia aérea a cores de espectro visível na área do aquífero da Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto	67

Geográfico Português (IGP, 2009).

Figura 3.22. - Histogramas circulares dos alinhamentos obtidos por interpretação das imagens de fotografia aérea a cores de espectro visível. a) frequência simples em função da direcção. b) comprimentos de alinhamentos em função da direcção. n=132, para a área do aquífero da Fonte da Fraga. **68**

Capítulo 4

- Figura 4.1. Precipitação anual a partir de valores registados na estação 13L/04UG – S. Vicente da Beira (SNIRH, 2009). **72**
- Figura 4.2. Pluviómetro instalado na zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga: a) Aspecto geral do pluviómetro; b) Interior do pluviómetro. **74**
- Figura 4.3. Expressão gráfica do balanço hidrológico para a zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. ETP é a evapotranspiração potencial; ETR é a evapotranspiração real; DH é o défice hídrico; SH é o superavit hídrico. **77**
- Figura 4.4. Projectão dos valores de precipitação e caudal monitorizado ao longo dos anos de 2002 a 2006, na zona dos terrenos do aquífero da Fonte da Fraga. **84**
- Figura 4.5. Períodos de recessão ao longo dos vários anos: a) ano de 2002; b) ano de 2003; c) ano de 2004; d) ano de 2005, para a zona dos terrenos do aquífero da Fonte da Fraga. **85**
- Figura 4.6. Períodos de recessão ao longo do ano 2006, na zona dos terrenos do aquífero da Fonte da Fraga. **86**
- Figura 4.7. Resultados dos ensaios de caudal efectuados nos três furos de pesquisa vertical e respectivos valores de transmissividade de condutividade hidráulica obtidos em cada patamar de ensaio. **89**
- Figura 4.8. Esboço do modelo conceptual da zona dos pontos de água da Fonte da Fraga (Ferreira Gomes *et al.*, 2008). **92**
- Figura 4.9. Localização dos principais pontos de água existentes na área de estudo - Sector SW da Serra da Gardunha. **93**
- Figura 4.10. Diagrama de Piper para as águas estudadas a partir dos pontos de água principais do aquífero da água Fonte da Fraga, Serra da Gardunha. **99**
- Figura 4.11. Diagrama de Schoeller-Berkaloff (modificado) para as águas em estudo dos pontos de água principais do aquífero da água Fonte da Fraga, Serra da Gardunha. Unidades de referência dos parâmetros: pH (adimensional); Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$); restantes parâmetros (mg/l). **99**

Figura 4.12. Representação esquemática do fraccionamento isotópico em diversas etapas do ciclo hidrológico (Coplen <i>et al.</i> , 2000).	103
Figura 4.13. Diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ dos teores isotópicos da água da precipitação em estudo.	106
Figura 4.14. Diagrama de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ com a representação dos dados dos pontos de água em estudo.	107
Figura 4.15. Diagrama de composição isotópica $\delta^{18}\text{O}$ vs altitude de emergência das águas subterrâneas em estudo.	107
Figura 4.16. Diagrama de composição isotópica $\delta^2\text{H}$ vs altitude de emergência das águas subterrâneas em estudo.	108

Capítulo 5

Figura 5.1. Menu de definição do problema.	117
Figura 5.2. Menu de discretização temporal.	118
Figura 5.3. Menu das condições iniciais do modelo de fluxo. a) Geral; b) Menu de interpolação de dados.	119
Figura 5.4. Menus gerais: a) das condições de fronteira do modelo de fluxo; b) dos parâmetros dos materiais do modelo de fluxo.	121
Figura 5.5. Localização da área a modelar com os respectivos pontos de água do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).	123
Figura 5.6. Localização da área a modelar correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	124
Figura 5.7. Aspecto da malha de elementos triangulares na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	125
Figura 5.8. Aspecto da malha de elementos triangulares na sub-bacia hidrográfica em estudo, após o refinamento, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).	126
Figura 5.9. Elevação vertical da malha da sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	127
Figura 5.10. Distribuição dos níveis hidroestáticos na sub-bacia hidrográfica em	129

estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero Fonte da Fraga.	
Figura 5.11. Distribuição das isolinhas de níveis hidroestáticos na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).	130
Figura 5.12. Gráfico com os valores de recarga, caudais simulados e caudais reais, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Nota: os caudais reais correspondem ao somatório dos caudais parciais das várias captações.	132
Figura 5.13. Distribuição dos níveis na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao último dia de simulação (31/12/2006).	133
Figura 5.14. Visualização em 3D da distribuição dos níveis na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao último dia de simulação.	133
Figura 5.15. Gráfico com os valores de recarga admitindo um cenário de três anos sucessivos com recarga correspondente à precipitação de um período hidrológico normal, e caudais previstos (simulados), para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	134
Figura 5.16. Gráfico com os valores de recarga admitindo um cenário de três anos sucessivos de acordo com o que ocorre num hidrológico de menor precipitação, e caudais previstos (simulados), para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	134
Figura 5.17. Gráfico de balanço hídrico com os caudais reais monitorizados, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	136
Figura 5.18. Gráfico de balanço hídrico com os caudais simulados, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	136
Figura 5.19. Distribuição dos vectores de fluxo na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	141
Figura 5.20. Distribuição dos vectores de fluxo na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).	142
Figura 5.21. Localização do novo furo de prospecção e pesquisa no sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	143

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1. Porosidade total e eficaz para diversos materiais (Lencastre e Franco, 1992).	33
Tabela 2.2. Condutividade hidráulica de diversos tipos de materiais (Custódio e Lamas, 2001).	36

Capítulo 4

Tabela 4.1. Estatística dos valores de precipitação dos anos hidrológicos de 1931/1932 a 2006/2007 da estação meteorológica 13L/04UG –S. Vicente da Beira (SNIRH, 2009).	71
Tabela 4.2. Valores de temperatura médios dos anos hidrológicos de 1931/1932 a 1959/1960 da estação meteorológica de Castelo Branco. (Ferreira, 1970).	73
Tabela 4.3. Resultados em termos de valores estatísticos básicos dos parâmetros analisados da água da chuva da zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	75
Tabela 4.4. Balanço hidrológico mensal (*) para a zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	77
Tabela 4.5. Resultados hidrológicos nos períodos de recessão ao longo dos vários anos, para a zona dos terrenos do aquífero da Fonte da Fraga.	87
Tabela 4.6. Principais características das captações do Aquífero Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.	94
Tabela 4.7. Principais características dos furos de pesquisa da zona de estudo – área do aquífero Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.	95
Tabela 4.8. Síntese informativa sobre as análises estudadas da água do aquífero Fonte da Fraga	97
Tabela 4.9. Elementos estatísticos básicos principais dos parâmetros analisados das águas dos pontos de água principais do aquífero da Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.	98
Tabela 4.10. Resultados dos elementos menores pesquisado nos pontos de água principais do aquífero da Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.	100

Tabela 4.11. Valores paramétricos de uma água para consumo humano, de acordo com o Decreto-Lei Nº 306/2007 de 27 de Agosto, em vigor em Portugal.	101
Tabela 4.12. Composição isotópica da água da precipitação da zona de estudo.	105
Tabela 4.13. Interpretação qualitativa, utilizando os valores de trítio, do “tempo de residência médio das águas subterrâneas” (Adaptado de Clark e Fritz (1997) <i>in</i> Sousa Oliveira, 2001).	109
Tabela 4.14. Teores de trítio nas amostras de água da precipitação.	109
Tabela 4.15. Teores de trítio das amostras água subterrânea em estudo.	110

Capítulo 5

Tabela 5.1. Parâmetros dos materiais necessários para o modelo de fluxo.	121
Tabela 5.2. Valores de balanço hídrico com os caudais reais monitorizados e caudais simulados, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	135
Tabela 5.3. Valores de balanço hídrico com caudais simulados admitindo o cenário de três anos consecutivos de precipitação equivalentes a um período hidrológico normal, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	137
Tabela 5.4. Valores de balanço hídrico com caudais simulados admitindo o cenário de três anos seguidos de grande seca, ou seja considerando a precipitação do período hidrológico mais seco, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.	138

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

A	área
a_s	quantidade de cloretos lixiviados do solo ou de origem artificial
a_v	retenção de cloretos pela vegetação
a'_v	devolução de cloretos pela decomposição da vegetação que morre
b	espessura do aquífero
C	concentração do componente químico
C_0	concentração de referência
C_s	concentração máxima
C_p	teor de cloretos na água da chuva
C_i	teor de cloretos nas águas subterrâneas
c^f	capacidade de calor específico do fluido
c^s	capacidade de calor específico do sólido
DH	défice hídrico
D_d	coeficiente de difusão molecular do fluido
D_{ij}	tensor da dispersão hidrodinâmica
ETP	evapotranspiração potencial
ETR	evapotranspiração real
E_s	escoamentos superficiais
E_{sub}	volume de excedentes que se infiltra para recarregar o aquífero
e_j	vector gravitacional unitário
f_μ	viscosidade constituinte
G	escoamentos subterrâneos
h	carga hidráulica
I	infiltração
K	condutividade hidráulica
k_{ij}	tensor de permeabilidade
L	distância
L	perda potencial de água, em cada intervalo de tempo do período seco
L'	extensão do aquífero
P	precipitação
Q	caudal
q	caudal específico
Q_0	caudal da nascente no início da recessão
Q_{EB}	termo da aproximação de Boussinesq

Q_x	função fonte/sumidouro do fluido
q_i^f	vector de velocidade de Darcy do fluído
R	escoamentos superficiais
R	factor de retardação
r	coeficiente de correlação
R_d	termo derivado da retardação
S	coeficiente de armazenamento
SH	superavit hídrico
S_0	coeficiente de armazenamento específico
S_{so}	armazenamento de água que fica no solo de capacidade utilizável pelas plantas
T	transmissividade
T	temperatura
t	tempo
T_0	temperatura de referência
V	Volume total
V_0	volume de água armazenado
V_D	volume de água drenado por gravidade
V_v	volume de vazios
α	coeficiente de esgotamento da nascente
α	rácio da diferença de densidades
α_L	termo-dispersividade longitudinal
α_T	termo-dispersividade transversal
β	coeficiente de expansão do fluido
β_L	dispersividade longitudinal
β_T	dispersividade transversal,
ς	temperatura normalizada
$\chi(C)$	função de adsorção dependente da concentração
Δh	variação de carga hidráulica
ΔS_s	variações do armazenamento de água à superfície
ΔS_{so}	variações do armazenamento de água no solo arável
ΔS_{sso}	variações do armazenamento de água no subsolo
ε_e	Porosidade eficaz
ε	porosidade
ϕ	Ângulo entre o eixo dos x e o K

Φ_h^{out}	Taxa de transferência do aquífero
Φ_h^{in}	Taxa de transferência para o aquífero
η	porosidade
η_e	porosidade efectiva
λ_{ij}	tensor da termo-dispersão hidrodinâmica
λ^{cond}	parte condutora do tensor de termo-dispersão
λ^{disp}	parte dispersante do tensor de termo-dispersão
λ^f	condutividade termal para o fluido
λ^s	condutividade termal para o sólido
μ^f	viscosidade dinâmica do fluido
μ_0^f	valor de referência da viscosidade dinâmica do fluido
ρ^f	pressão do fluido
ρ^f	densidade do fluido
ρ_0^f	densidade do fluido de referência
υ	taxa de decaimento
ω	fracção de massa
Ξ_{aniso}	Factor de anisotropia K_{min}/K_{max}

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema	16
1.2. Objectivo	18
1.3. Estudos Anteriores	19
1.4. Metodologia	23

1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são definidos os objectivos deste trabalho e realiza-se o enquadramento ao tema desta dissertação. É ainda, efectuado um breve levantamento dos estudos anteriores sobre esta temática da modelação hidrogeológica bem como dos principais trabalhos desenvolvidos e publicados sobre a região. A finalizar, este capítulo descreve-se a metodologia utilizada no presente estudo.

1.1. Enquadramento do Tema

As águas subterrâneas correspondem à componente não visível e mais lenta do ciclo da água. O tempo decorrido entre a infiltração de uma gota de água da chuva no terreno até à sua ressurgência em nascentes, poços, furos, galerias, ou outras manifestações quer naturais quer forçadas, pode variar desde alguns dias a milhares de anos, como se verifica com algumas águas minerais de circuito lento e profundo.

A presença de problemas concretos no desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos leva à necessidade de conceptualização dos sistemas hidrogeológicos, criando-se assim a cenarização de modelos conceptuais prováveis. Os modelos são aplicados em numerosas situações, abrangendo as mais diversas escalas.

A modelação tem sido considerada um instrumento fundamental para o estudo de sistemas hidrogeológicos. A título de exemplo salientam-se os trabalhos realizados por Andrade Afonso *et al.*, 1995; Marques, 1999; Vieira da Silva *et al.*, 2000; Portugal Ferreira e Sousa Oliveira, 2000; Lima, 2000; Sousa Oliveira, 2001; Ferreira Gomes *et al.*, 2002; Chapman *et al.*, 2003; Aires-Barros e Marques, 2003; Carvalho e Almeida, 2003; Lima e Oliveira, 2006; Rosário Carvalho, 2008; Marques e Carreira, 2008; Marques da Costa, 2008; e Adam, 2009.

Segundo o léxico de termos hidrogeológicos (EGEO, 2010), um modelo corresponde à 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.

Para se tentar entender este conceito poderá dizer-se, de uma forma muito simplificada, que um modelo conceptual poderá corresponder ao trajecto ou percurso subterrâneo que uma partícula de água segue, desde a sua origem até à zona de ressurgência ou nascente.

O início deste percurso é uma situação que com alguma aproximação se sabe, tomando de base que as águas subterrâneas têm origem meteórica, ou seja, são infiltradas em áreas de montanha, ou pelo menos em áreas com cotas mais altas do que as dos locais de descarga. Note-se que, também, pode haver água de outras origens, como é o caso da água de origem magmática, água resultante de libertação de fenómenos diagenéticos e até de fenómenos de metamorfismo, mas devido à pouca importância que genericamente se entende terem no contributo das águas subterrâneas, não se consideram neste trabalho, ou seja, admite-se que a água que entra no referido circuito, tem origem nas águas resultantes da chuva e de outros fenómenos meteóricos associados.

Por outro lado, as zonas de descarga natural, muitas vezes designadas por emergências, ou ainda por ressurgências, correspondem a pontos, locais ou áreas onde a água subterrânea emerge ou ressurge naturalmente à superfície, e no geral, bem conhecidos, ao ponto de terem sido factores fundamentais na instalação e/ou desenvolvimento de um povoamento, veja-se o exemplo das unidades termais.

1.2. Objectivo

A Serra da Gardunha, localizada no Maciço Hespérico, é composta essencialmente por granitóides hercínicos, e representam uma importante reserva nacional de água subterrânea de excelente qualidade. A abundância permite que se desenvolva uma actividade económica em torno do engarrafamento de águas de nascente, com reconhecida qualidade e implementação no mercado nacional e internacional.

Ocupando 1º lugar no *ranking* nacional de vendas, com a produção de 98 milhões de litros relativos ao ano 2007 (DGEG, 2009), as captações da Fonte da Fraga, são exploradas como águas de nascente de acordo com os Decretos-Lei n.ºs 84/90 e 90/90 de 16 de Março, pela Empresa Beira Vicente – Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda.

O objectivo principal da presente tese consiste na implementação de um modelo de fluxo do escoamento subterrâneo, do principal aquífero fracturado da Serra da Gardunha, e que serve de base às captações em exploração pela Beira Vicente na produção da Água de Nascente Fonte da Fraga.

Considera-se que o modelo a definir possa ser utilizado no apoio à gestão dos recursos hídricos bem como no apoio a diferentes cenários de exploração tais como a implementação de novos furos de captação.

Pretende-se ainda, contribuir para o conhecimento da geometria e da dinâmica da massa de água subterrânea desta região e das relações entre estas e as águas superficiais.

Constitui também objectivo deste estudo, contribuir para o conhecimento da modelação dos recursos hídricos subterrâneos em meios fracturados, em particular das rochas granitóides do centro de Portugal.

1.3. Estudos Anteriores

Sobre estudos da presente temática ou afim, a nível nacional, com carácter similar ao presente trabalho, em que se contribui para o conhecimento de modelo conceptual hidrogeológico, merecem referência, de entre outros, os trabalhos de:

- i) Lima (2000) onde é feita uma caracterização hidrogeológica da região do Minho. Os objectivos principais visaram: i) aprofundar o conhecimento relativo aos recursos hídricos subterrâneos dos terrenos graníticos do NW de Portugal, incluindo águas minerais e águas comuns; ii) contribuir para o conhecimento hidrogeológico dos meios fracturados, em particular das rochas granitóides. Constituíram, por isso, objecto desse estudo, não só as águas subterrâneas de circulação pouco profunda, mas também as ocorrências hidrominerais, relacionadas com circuitos mais profundos;
- ii) Monteiro (2001) com a apresentação de um modelo numérico baseado em elementos finitos, em 3D, visando caracterizar o aquífero carbonatado de Castelo de Vide. O respectivo estudo descreve ainda os aspectos relacionados com a geologia e hidrogeologia da região;
- iii) Sousa Oliveira (2001) onde é feita a caracterização dos sistemas hidrominerais das águas gasocarbónicas do norte de Portugal, em terrenos pertencentes à zona geotectónica da Galiza – Trás-os-Montes e que no conjunto constituem a Província Hidromineral das águas bicarbonatadas sódicas e gasocarbónicas. O estudo aborda de uma forma integrada, elementos de natureza geomorfológica, litoestratigráfica, tectónica, hidrogeológica, geofísica e hidrogeoquímica;
- iv) Marques da Costa (2008) com o estudo da modelação matemática dos recursos hídricos subterrâneos da região de Moura, onde são apresentados diversos modelos matemáticos locais, analíticos, semi-analíticos e numéricos, utilizados no sentido de se interpretar diversas características do fluxo hídrico subterrâneo. É igualmente apresentado um modelo regional de diferenças finitas do principal aquífero da região;

- v) Azevedo *et al.* (2008) apresentam um modelo conceptual para o aquífero das Corgas (Sazes do Lorvão) e que compreende segmentos e processos hidrogeológicos, como a recarga aquífera, o armazenamento, a hidrodinâmica aquífera e a descarga aquífera;
- vi) Barreiras (2009) com o estudo hidrogeológico de uma área pertencente ao concelho do Seixal, onde é realizada a modelação hidrogeológica e caracterização de cenários de exploração. A caracterização hidrogeológica foi feita a partir da bibliografia disponível, e de dados de base, completando uma síntese sobre o conhecimento da região. Para a modelação hidrogeológica, utilizou-se o método das diferenças finitas através do código Modflow inserido no programa Processing Modflow for Windows.

Sobre a região de estudo, de um modo geral, é rudimentar o conhecimento hidrogeológico da região do interior do País, designadamente das suas formações fracturadas (graníticas e metamórficas).

Conhecem-se, no entanto, alguns trabalhos de âmbito local relativos à prospecção e pesquisa de águas de nascente ou de águas minerais, sobretudo para o seu aproveitamento na indústria de engarrafamento ou em estâncias termais. Esses trabalhos circunscrevem-se às áreas adjacentes das nascentes ou captações já existentes, pelo que visam essencialmente, em cada caso, a definição dos locais mais favoráveis à implantação de novas captações eventualmente mais profundas.

No que respeita às águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público, tem-se verificado que, até ao momento, não é comum realizar estudos hidrogeológicos prévios. A localização das captações têm sido feitas tendo em atenção apenas a distância aos reservatórios e eventualmente o conhecimento empírico das empresas de sondagens.

A situação descrita resulta e contribui para a quase inexistência de trabalhos hidrogeológicos na região. Além disso, até à data, para a área em estudo da presente dissertação, nomeadamente a Serra da Gardunha, não existe a Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 ou à escala 1/200 000. A informação publicada resume-se essencialmente à carta geológica à escala de 1/500 000.

Os primeiros trabalhos conhecidos no âmbito da hidrogeologia regional dizem respeito à caracterização físico-química das águas sulfúreas da Touca (Alpedrinha). Lepierre em 1921 (Marques da Mata, 1963) estuda quatro nascentes de água sulfúrea da Touca e publica no “Portugal Hidrológico” elementos sobre a que considera mais importante, concluindo que se trata de uma “água límpida, transparente, incolor, não depositando e apresentando o cheiro próprio das águas sulfúreas”.

Em 1922, em pleno coração da Serra da Gardunha, por contrato de concessão outorgado pelo Estado Português, passa a ser explorada com a venda aos consumidores, em garrações, a água “concedida como oligossalina, muito radioactiva” Alardo. Não se conhece a data das análises físico-químicas que levaram à caracterização desta água, no entanto, existe a referência que em 1920 o caudal da Nascente Alardo primitiva era de 0,45 m³/d (Geoambiente, 1992).

Os trabalhos referidos, limitam-se a descrever a composição química das diferentes águas. Por isso, e sem retirar o mérito que lhes é devido, não podem ser considerados trabalhos de hidrogeologia no estado do conhecimento actual.

No início da década de 90, a sociedade detentora da concessão hidromineral HM 51 – Alardo, encomendou à Geoambiente a realização do primeiro estudo hidrogeológico sobre esta concessão (Geoambiente, 1992), com os objectivos de: i) avaliar a capacidade do aquífero poder suportar de forma sustentada as captações que possuía e outras a realizar; ii) no futuro próximo, se estabelecer um programa de protecção e gestão dos recursos hidrominerais da concessão. Neste estudo foi desenvolvido um modelo geológico e hidrogeológico do aquífero por aplicação de meios geofísicos de reconhecimento, fotointerpretação e grande componente de campo.

Em 1993, é realizado o anteprojecto detalhado do Túnel da Gardunha (COBA, 1993) onde, de entre outros, é feita uma breve abordagem à hidrogeologia regional da Serra da Gardunha referindo-se ao modo de percolação da água neste maciço.

Em 1996, com o estudo hidrogeológico de duas nascentes situadas em Rabaçal - Sra. da Orada (Hidroterra, 1996) começam-se a desenvolver esforços no sentido de instalar uma

unidade de engarrafamento de águas de nascente “Água Fonte da Fraga” na encosta sul da Serra da Gardunha.

Almeida *et al.* (2000) com a publicação dos “Sistemas Aquíferos de Portugal Continental” fazem uma abordagem da hidrogeologia das rochas granitóides que afloram na zona Centro-Ibérica, no entanto a caracterização realizada ignora o potencial hídrico existente na Serra da Gardunha.

Em 2000, começam a ser exploradas pela empresa Beira Vicente – Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda. a água de nascente Fonte da Fraga. Com o crescimento da marca devido à sua grande expansão de mercado nacional e internacional, são realizados relatórios e estudos hidrogeológicos da área de exploração, contribuindo estes para o enriquecimento do conhecimento hidrogeológico da região.

Assim, em GeolInterior (2001, 2003a,b, 2005) são apresentados estudos hidrogeológicos com o intuito de legalizar novas captações. Nestes estudos são expostos, de entre outros, a caracterização físico-química da água captada, as unidades hidrogeológicas consideradas e a apresentação de um esboço do modelo hidrogeológico da zona em estudo.

Em UBI (2006a,b) são apresentados mais dois estudos hidrogeológicos de legalização de novas captações onde se destaca, de entre outros, o estudo feito sobre a avaliação da vulnerabilidade e risco de poluição das formações geológicas presentes e são redefinidos os perímetros de protecção das captações existentes.

Ferreira Gomes *et al.* (2008) apresentam os principais aspectos geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos da área das captações, referem as características do sistema de captação, e enunciam as características físico-químicas, radiológicas e microbiológicas desta nova água de mesa.

Além dos estudos referidos, há ainda a considerar diversos trabalhos desenvolvidos pelo autor desta dissertação e que estão citados na bibliografia. Realçam-se os primeiros trabalhos (Mendes *et al.*, 2010a,b), relativo à hidrogeologia da região da Serra da

Gardunha, que abriu perspectivas para estudos subsequentes, muitos dos quais são parte integrante desta dissertação.

1.4. Metodologia

O presente trabalho decorreu no período de 2007 a 2010 inclusivé e adoptou uma metodologia organizada em seis grandes fases, de acordo com o exposto:

- i) pesquisa bibliográfica, com a sintetização de elementos sobre o tema e em particular sobre aspectos geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos da região;
- ii) análise estatística dos elementos existentes nos arquivos da Beira Vicente, nomeadamente sobre caudais explorados, qualidade e estabilidade hidroquímica das águas subterrâneas captadas;
- iii) trabalhos de campo diversos, com vista à definição das diferentes unidades litológicas, bem como as principais famílias de fracturas existentes no maciço granítico da Serra da Gardunha. Foram também efectuadas colheitas de águas para análises físico-químicas e isotópicas;
- iv) desenvolvimento de diferentes tipos de modelos matemáticos de escoamento subterrâneo com a aplicação do software FEFLOW 5.4, com a comparação dos resultados obtidos e a análise de diferentes cenários de evolução;
- v) realização de ante-projecto e acompanhamento de 1 sondagem especial (furo de pesquisa e potencial captação), estrategicamente localizada com a realização dos usuais estudos associados;
- vi) organização dos elementos, interpretação e escrita da presente tese.

Ao longo dos diferentes capítulos serão ainda feitas referências complementares e apresentados alguns elementos detalhados sobre aspectos de carácter metodológico.

Capítulo 2

O ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO

2.1. Aspectos Gerais	25
2.2. Parâmetros Hidrogeológicos Fundamentais	31
2.3. A Modelação Hidrogeológica	38

2. O ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO

Neste capítulo pretende-se evidenciar os aspectos gerais do escoamento subterrâneo, bem como definir alguns parâmetros hidrogeológicos fundamentais. Abordar-se também, de uma maneira genérica, a modelação hidrogeológica e em particular os modelos numéricos.

2.1. Aspectos Gerais

A água subterrânea representa uma das fases do complexo ciclo hidrológico (Figura 2.1). Não tendo princípio nem fim pode-se, por simplicidade de raciocínio, admitir que o ciclo hidrológico se inicia com a precipitação (chuva, neve, granizo, etc.).

Durante um evento de precipitação, o solo pode absorver a água caída, até um certo valor de intensidade desse evento. A partir desse valor, a água não se infiltra, e começa a escoar superficialmente.

Do ciclo hidrológico interessa realçar a componente subterrânea. Desde que a água chega à superfície terrestre e se infiltra, atravessa várias zonas com diferentes características e comportamentos (Figura 2.2). Assim, da superfície para o interior da Terra encontram-se as seguintes zonas:

- i) Zona de evapotranspiração (ZET) – nesta zona, alguma água pode ser sujeita a evapotranspiração directa para a atmosfera, outra pode ser usada no metabolismo das plantas e outra pode continuar a descer. A espessura desta zona é de aproximadamente 2 metros, podendo variar com a capacidade das plantas desenvolverem as suas raízes;
- ii) Zona intermédia (ZI) – chega até esta zona a água que não é usada na evapotranspiração. A espessura desta zona depende de vários factores, sendo por isso muito variável;
- iii) Franja capilar (FC) – corresponde a uma faixa estreita, na qual a água pode ter movimento descendente, por acção da força da gravidade, e movimento ascendente, por acção das forças de capilaridade entre partículas adjacentes. Trata-se de uma zona em que a água está em movimento constante;
- iv) Zona saturada (ZS) – toda a água que passa pela franja capilar vai descendo lentamente, até que chega à zona de saturação, juntando-se à água aí existente, aumentando a quantidade de água armazenada, ou passando a deslocar-se integrada no deslocamento de água subterrânea desta zona.

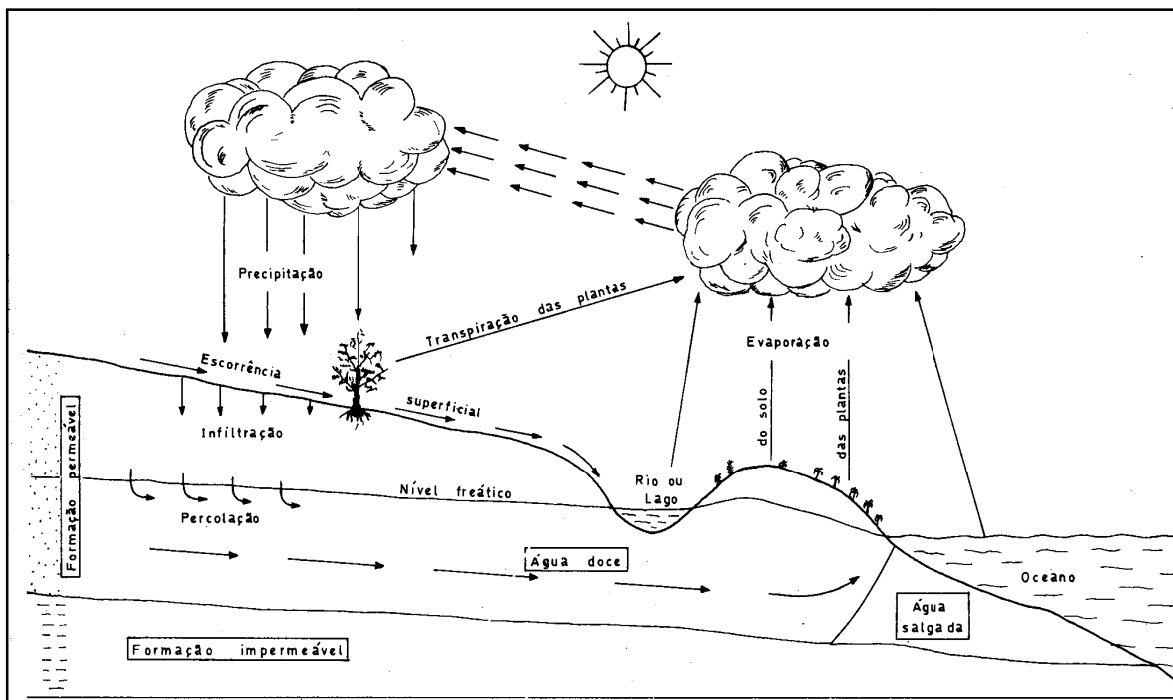


Figura 2.1. Esboço sobre o ciclo hidrológico (Delgado Rodrigues, 1981).

Na zona saturada não existem espaços preenchidos por ar, daí a sua designação de saturada. Nas zonas mais superficiais (ZET, ZI e FC), além da matéria sólida e da água, também existem pequenos espaços preenchidos por ar.

Os solos e as formações rochosas, que normalmente se encontram a maiores profundidades, possuem características que lhes permitem armazenar maiores ou menores quantidades de água. A formação geológica que consegue armazenar água e permite a sua circulação, de forma a que possa ser extraída rentavelmente, designa-se por aquífero.

Os aquíferos genericamente podem ser do tipo livre e do tipo confinado e, no desenvolvimento de estratégias de gestão das águas subterrâneas, é de grande importância o conhecimento do seu fluxo subterrâneo.

Os aquíferos livres ou freáticos desenvolvem-se desde a superfície até uma formação subjacente menos permeável; o nível da água (nível freático) encontra-se, muitas vezes, em contacto directo com a atmosfera, e oscila livremente de acordo com o volume de água armazenado no aquífero. Estes aquíferos podem ser directamente recarregados pela infiltração, uma vez que não existe uma barreira que impeça o fluxo da água a partir da superfície.

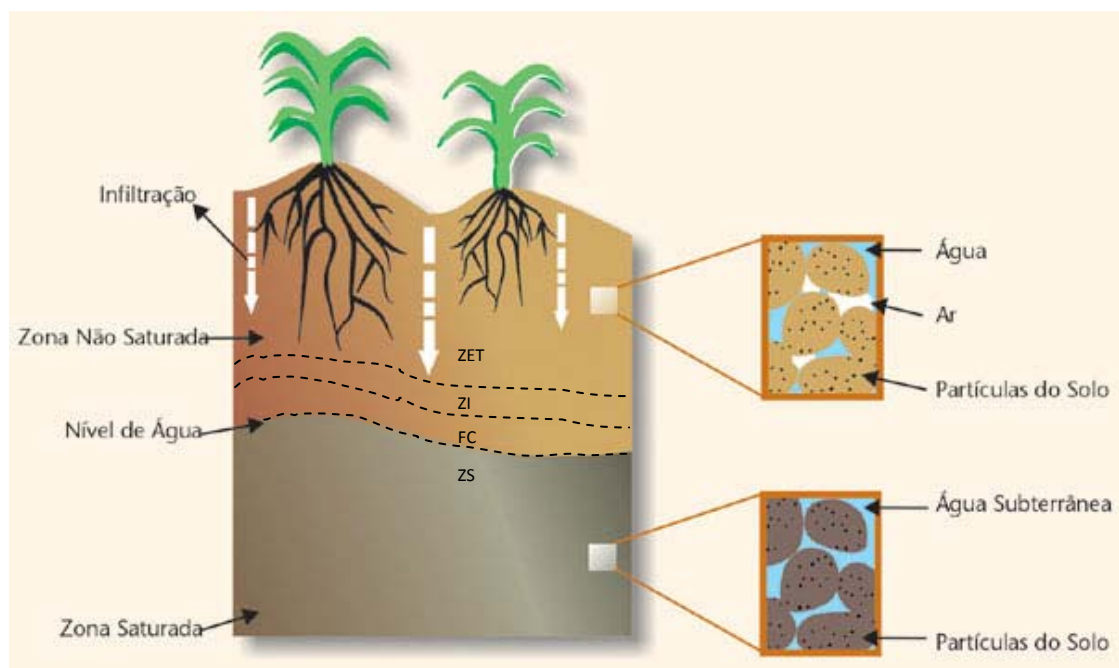


Figura 2.2. Zona não saturada e zona saturada no subsolo (adaptado de IGM, 2001).

Os aquíferos confinados são limitados por formações geológicas de muito baixa permeabilidade, tanto superior como inferiormente, e encontram-se normalmente a maiores profundidades que os aquíferos livres (Figura 2.3). A pressão da água subterrânea é superior à atmosférica, provocando artesianismo, ou seja, elevando o nível da água (nível piezométrico) acima da base da unidade confinante superior, quando nela é implantado um furo penetrante.

Se as formações geológicas não são aquíferas podem ser definidas como:

- i) Aquitardo – formação geológica que pode armazenar água mas que a transmite lentamente não sendo rentável o seu aproveitamento a partir de poços ou furos;
- ii) Aquicluso – formação geológica que pode armazenar água mas não a transmite (a água não circula);
- iii) Aquífugo – formação geológica impermeável que não armazena nem transmite água.

Tendo em conta o meio de escoamento, os aquíferos poderão ser porosos, fissurados, mistos (porosos e fracturados) e cársicos.

Nos aquíferos porosos a porosidade é primária, ou seja, os poros existentes representam os espaços que se formam entre os grãos quando o sedimento se depositou originalmente. Como os poros são numerosos e aleatórios, a sua concentração e orientação tende a ser isotrópica (uniforme em todas as direcções) no seio do aquífero. Neste caso, o fluxo da água é controlado primeiramente pela direcção do gradiente no meio poroso, e a velocidade da água pode ser calculada pela Lei de Darcy (item 2.2.2).

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 (ou seja, 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.

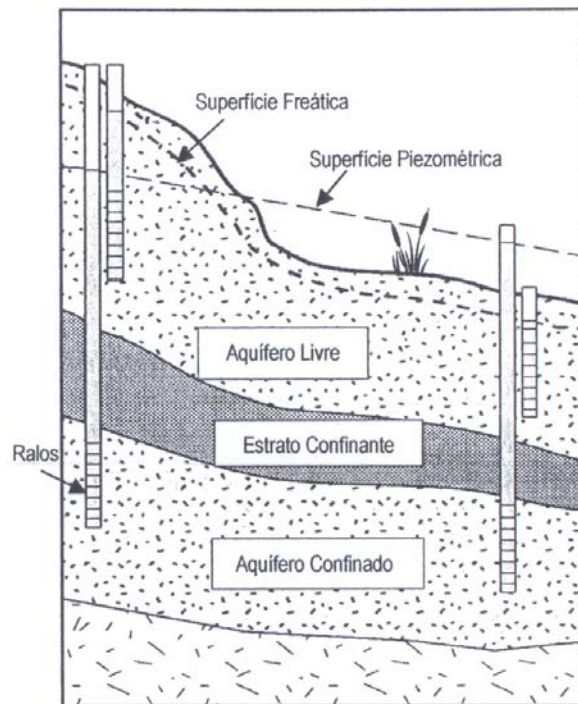


Figura 2.3. Nível de água subterrânea em furos captando diferentes tipos de aquíferos (adaptado de EPA,1994).

Os aquíferos carsificados e fracturados podem ocorrer em diversas condições de confinamento. Em condições livres ou de fraco confinamento, podem apresentar elevadas velocidades de fluxo perante situações de recarga rápida, como acontece em caso de precipitações intensas.

O fluxo da água nos aquíferos cársicos pode ser difuso ou por condutas, podendo ocorrer também uma mistura dos dois tipos de fluxo. Segundo EPA (1994), o termo cársico deverá ser aplicado no caso de aquíferos carbonatados, onde o fluxo de água subterrânea por condutas assume grande importância; apesar de nem todas as rochas carbonatadas (calcários e dolomitos) constituírem aquíferos cársicos, deve ser assumido o fluxo por condutas sempre que se estiver na presença de aquíferos carbonatados.

Quando o fluxo apresenta 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 uma partícula poluente, por exemplo, é transportada muito rapidamente desde o ponto de entrada até ao ponto de saída e poderá ser eliminada do sistema mais rapidamente.

O comportamento dos aquíferos fracturados pode ter semelhanças com o dos aquíferos carsificados com fluxo por condutas, apesar do fluxo não atingir velocidades tão elevadas, uma vez que a ausência da dissolução não facilita o alargamento das fracturas. A disponibilidade da água subterrânea depende da natureza das fracturas e da sua interligação.

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:

- i) a densidade de fracturação é elevada;
- ii) a orientação das fracturas não é uniforme, havendo intersecções das mesmas;
- iii) a abertura das fracturas é uniforme e fina;
- iv) o volume do aquífero considerado é grande.

Em DEQ (1996), são fornecidos “critérios subjectivos” que permitem determinar se um aquífero fracturado pode, ou não, ser considerado como tendo comportamento poroso, com base em recomendações da EPA e que se apresentam em seguida.

Perante a execução de ensaios de caudal, um aquífero 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 versus tempo, em furo de observação localizados em diferentes direcções relativamente à captação principal, deverão ter formas idênticas;
- iii) o cone de rebaixamento definido a partir dos vários furos de observação deverá ser circular ou ligeiramente elíptico (um cone de rebaixamento linear ou irregular poderá ser um indicador da presença de fracturas).

Num aquífero de comportamento poroso, a distribuição da condutividade hidráulica (K) deverá ser uniforme ou apresentar distribuição log-normal; num meio fracturado, a distribuição K poderá ser bimodal, uma vez que podem surgir dois valores de K , um relativo à condutividade ao longo das fracturas e outro à condutividade entre as fracturas (DEQ, 1996).

Segundo Fetter (2001), a composição química da água poderá indicar a existência de fluxo ao longo de fracturas se, por exemplo, ocorrerem variações significativas no espaço e no tempo.

As heterogeneidades presentes no aquífero, indiciadas por contraste 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 K , mesmo que essa direcção não seja a do gradiente hidráulico regional. Um exemplo é o caso dos aquíferos aluvionares, que podem apresentar no seu interior canais de grande permeabilidade, cuja direcção raramente forma uma linha recta. Se os canais estiverem envolvidos por materiais pouco permeáveis (siltes, argilas, etc.) a água subterrânea fluirá preferencialmente no seu interior, mesmo que a sua direcção seja diferente da do gradiente hidráulico regional (DEQ, 1996).

Elementos de hidrologia subterrânea sobre o tipo de aquíferos com desenvolvimento detalhado poderão ser observados em vários autores como Lencastre e Franco (1984) e Custódio e Llamas (2001).

2.2. Parâmetros Hidrogeológicos Fundamentais

Os aquíferos, como sistemas físicos, possuem um certo funcionamento, regulado por descargas naturais, extracções e recargas.

Desta forma, torna-se importante quantificar certos parâmetros fundamentais, os quais caracterizam os aquíferos. Dispor de tais parâmetros é possível definir ou prever, a resposta do aquífero, face ao deslocamento da água extraída pela captação.

Entre os referidos parâmetros estão a porosidade (η), condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S). Neste item, apresenta-se uma breve noção dos mesmos, de modo a servir de apoio ao desenvolvimento da presente tese.

2.2.1. Porosidade

A porosidade total ou simplesmente a porosidade de um solo ou rocha pode ser definida (Eq. 2.1) como a relação entre o volume de vazios e o volume total:

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

Onde: η = porosidade; V_v = volume de vazios; V = Volume total.

A porosidade poderá ser expressa em percentagem, bastando por isso multiplicar o valor de η por 100.

A porosidade, genericamente, depende do tamanho e da densidade relativa dos grãos. Se os grãos são de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que no caso de grãos uniformes, porque os grãos pequenos ocupam os espaços vazios entre os maiores.

Ao extrair-se água de um aquífero, parte do líquido é retido pelas forças moleculares e apenas parte do volume total armazenado é libertado. Desta forma, na hidrogeologia é necessário definir-se o conceito de porosidade efectiva. Este parâmetro pode ser definido como a quantidade de água fornecida por unidade volumétrica do material, ou seja a razão entre o volume de água efectivamente libertado de uma amostra do maciço poroso saturado e o volume total (Eq. 2.2):

$$\eta_e = \frac{V_D}{V} \quad (2.2)$$

onde: η_e = porosidade efectiva; V_D = volume de água drenado por gravidade; V = Volume total.

A porosidade efectiva, da mesma forma que a porosidade total, é uma grandeza adimensional e pode ser expressa em percentagem.

Apresentam-se na Tabela 2.1 valores de porosidade total e eficaz para diferentes tipos de maciços segundo Lencastre e Franco (1992).

Tabela 2.1. Porosidade total e eficaz para diversos materiais (Lencastre e Franco, 1992).

Material		Porosidade, n (%)					Porosidade efectiva, n_e (%)			Observa- ções
Tipo	Descrição	Média	Normal		Extraor- dinária		Média	Máxima	Mínima	
			Máx.	Mín.	Máx.	Mín.				
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 Vacuolares	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 detritico	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	
	Siltes	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 — n e n_e aumentam com a meteorização

B — n e n_e aumentam devido a fenómenos de dissolução

C — n e n_e diminuem com o tempo

D — n pode diminuir e n_e aumentar com o tempo

E — n é muito variável, dependendo das circunstâncias

F — variável segundo o grau de cimentação e solubilidade

2.2.2. Condutividade hidráulica

Em 1856, Henry Darcy, engenheiro hidráulico francês, pesquisava o escoamento de água num filtro de areia utilizando um dispositivo similar ao apresentado na Figura 2.4. Darcy concluiu que o caudal de escoamento (volume por unidade de tempo) era:

- i) proporcional à secção transversal (A) do filtro;
- ii) proporcional à diferença de cargas hidráulicas (h_1 e h_2), entre os piezómetros 1 e 2 (Figura 2.4);
- iii) inversamente proporcional à distância (L) entre os piezómetros 1 e 2 (Figura 2.4).

A fórmula de Darcy (Eq. 2.3) pode então ser escrita como:

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (2.3)$$

onde: K = coeficiente de proporcionalidade, chamado de condutividade hidráulica.

Podemos entender a diferença de cargas hidráulicas ($h_1 - h_2$) dividida pelo comprimento (L) como sendo a taxa de perda de carga por unidade de comprimento, o que recebe o nome de gradiente hidráulico.

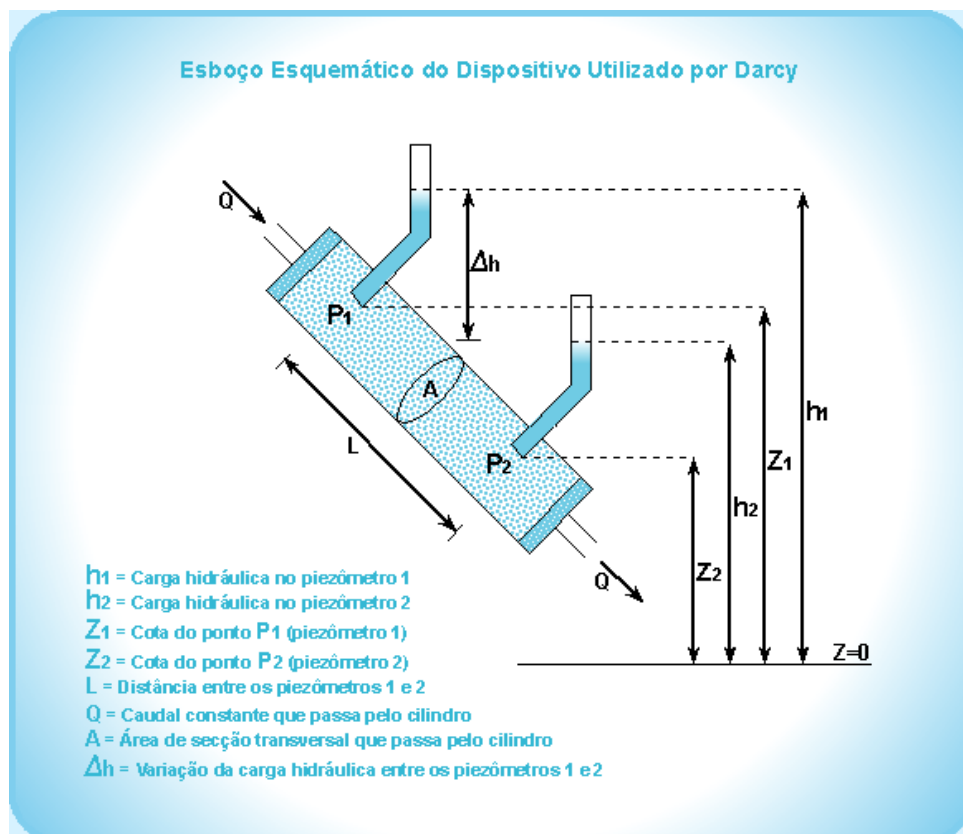


Figura 2.4. Esboço esquemático do dispositivo utilizado por Darcy (EGEO, 2010).

O coeficiente de proporcionalidade K , que aparece na Lei de Darcy, pode ser chamado de condutividade hidráulica e tem em conta as características do meio, incluindo a porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, e as características do fluído que está a escoar.

Num meio isotrópico a condutividade hidráulica pode ser definida como a velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário., ou seja, a facilidade que a formação aquífera tem em exercer a função de condutor hidráulico.

Segundo Custódio e Llamas (2001), a Lei de Darcy é uma lei macroscópica que representa o comportamento de um número elevado de poros ligados entre si. Não representa de modo algum o comportamento da água dentro de cada poro e permite tratar o escoamento subterrâneo como um fluxo não viscoso. A Lei de Darcy pode derivar-se a partir das equações de Navier-Stokes para os fluidos viscosos, se se tem em conta a existência do meio poroso, caracterizado pelos seus valores médios.

O caudal específico, q , é outra forma de expressar a Lei de Darcy que pode ser expressa como o caudal de água subterrânea dividido pela área de secção transversal, normal à corrente, também conhecida como velocidade de Darcy, dado por (Eq.2.4):

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad (2.4)$$

O escoamento subterrâneo não se encontra restringido a uma direcção como na coluna de ensaio de Darcy. O escoamento subterrâneo é um modelo complexo tridimensional. Assumindo que se descreve a geometria subsuperficial num sistema de coordenadas Cartesianas (x, y, z), podem existir componentes do escoamento em cada direcção. A Lei de Darcy para escoamentos em três dimensões (Eq. 2.5) é análogo ao descrito para uma dimensão (Fitts, 2002):

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{dh}{dx} \\ q_y &= -K_y \frac{dh}{dy} \\ q_z &= -K_z \frac{dh}{dz} \end{aligned} \quad (2.5)$$

O vector resultante da soma das três componentes do caudal específico vem dado por (Eq.2.6):

$$|q| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \quad (2.6)$$

A condutividade hidráulica pode ser expressa em m/s ou cm/s, e pode ser determinada através de fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo.

Apresentam-se na Tabela 2.2 e na Figura 2.5 valores de condutividade hidráulica para diferentes tipos de materiais naturais.

Tabela 2.2. Condutividade hidráulica de diversos tipos de materiais (Custódio e Lamas, 2001).

Tipos de solo	K (m/s)
Seixos limpos	$> 10^{-2}$
Areia grossa	10^{-2} a 10^{-3}
Areia média	10^{-3} a 10^{-4}
Areia fina	10^{-4} a 10^{-5}
Areia siltosa	10^{-5} a 10^{-6}
Siltos	10^{-6} a 10^{-8}
Argilas	10^{-8} a 10^{-10}

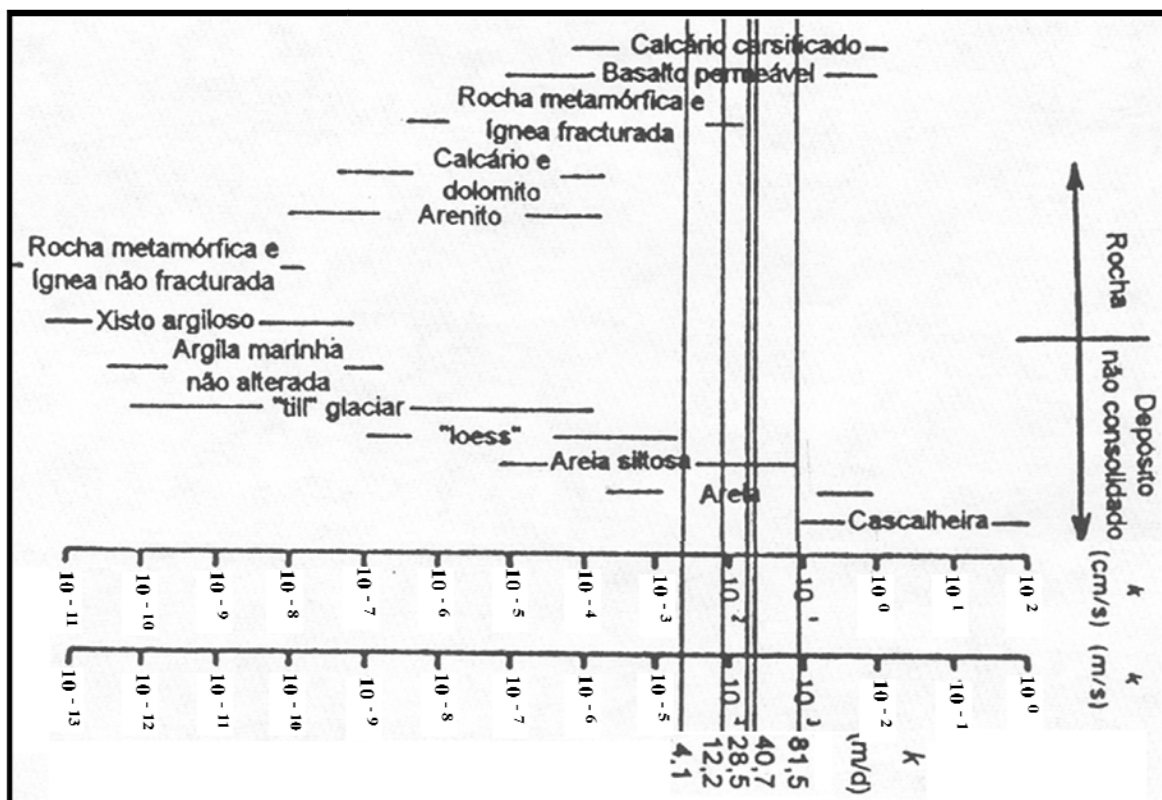


Figura 2.5. Valores de condutividade hidráulica de diferentes materiais (adaptado de Freeze e Cherry, 1979).

2.2.3. Transmissividade

A transmissividade corresponde à capacidade de um meio para transmitir água. Pode ser definido como a quantidade de água que se escoar através da secção vertical do aquífero quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade e expressa-se em m²/dia ou cm²/s. Pode ser calculada através do produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero (Eq. 2.7).

$$T=K.b \quad (2.7)$$

Onde: T= transmissividade; K= condutividade hidráulica; b= espessura saturada do aquífero.

2.2.4. Coeficiente de armazenamento

O coeficiente de armazenamento é um parâmetro 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 (Eq. 2.8).

$$S = \frac{V}{A.\Delta h} \quad (2.8)$$

Onde: V= volume de água drenado; A= área; Δh= variação da carga hidráulica.

Nos aquíferos livres, o valor do coeficiente de armazenamento coincide praticamente com o valor da porosidade eficaz 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 eficaz, apresentando, geralmente, valores compreendidos entre 10⁻³ e 10⁻⁶ (Fetter, 2001).

Elementos de hidráulica subterrânea com desenvolvimento detalhado sobre estes assuntos poderão ser observados em vários autores como Lencastre e Franco (1992), Custódio e Llamas (2001) e Fetter (2001).

2.3. A Modelação Hidrogeológica

O aperfeiçoamento do conhecimento científico dos sistemas aquíferos através dos modelos hidrogeológicos trás, indubitavelmente, vantagens e benefícios não só, para a comunidade científica especializada, como também para a sociedade em geral, isto porque, um modelo, pela sua definição, é uma ferramenta de gestão e suporte à decisão. Quando aplicado à hidrogeologia, com as suas limitações, o modelo representa o sistema aquífero para um adequado nível de detalhe, constituindo-se uma ferramenta científica de previsão, com vista à quantificação dos impactos no sistema por acções específicas hidrológicas, por bombeamento ou irrigação.

O modelo, por si só, não é um objectivo mas sim uma ferramenta para atingir um objectivo. É utilizado para a representação de uma situação real ou natural, que sofre determinados estímulos exteriores, e no qual se pretende prever comportamentos perante alterações das condições ou dos estímulos iniciais.

Quando se tem ideia, do início do trajecto da água, por onde evolui e onde descarrega, pode-se a partir daqui, desenvolver um esquema preliminar bidimensional, tridimensional, ou até um formulário matemático a descrever este circuito (Figuras 2.6 e 2.7).

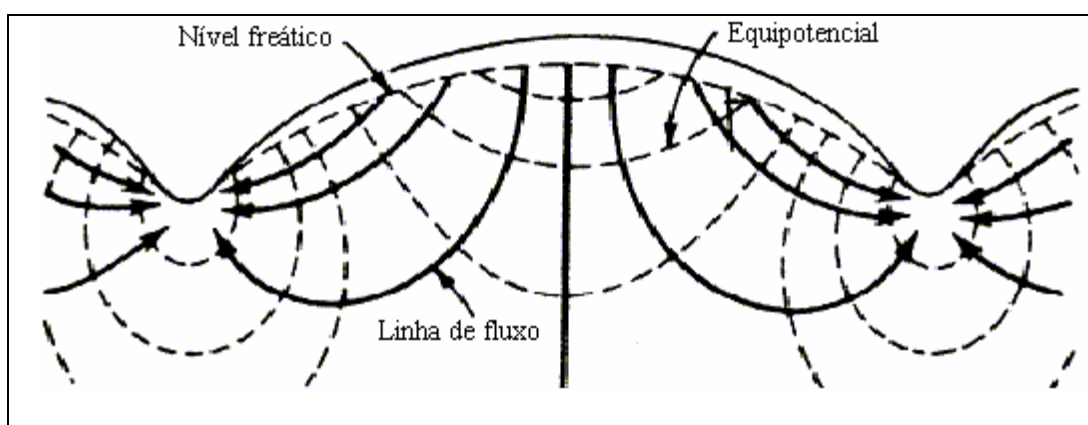


Figura 2.6. Esquema genérico sobre modelo conceptual em situações de topografia com relativa simetria.
Adaptado de Doménico e Schwartz, 1990 in Sousa Oliveira, 2005.

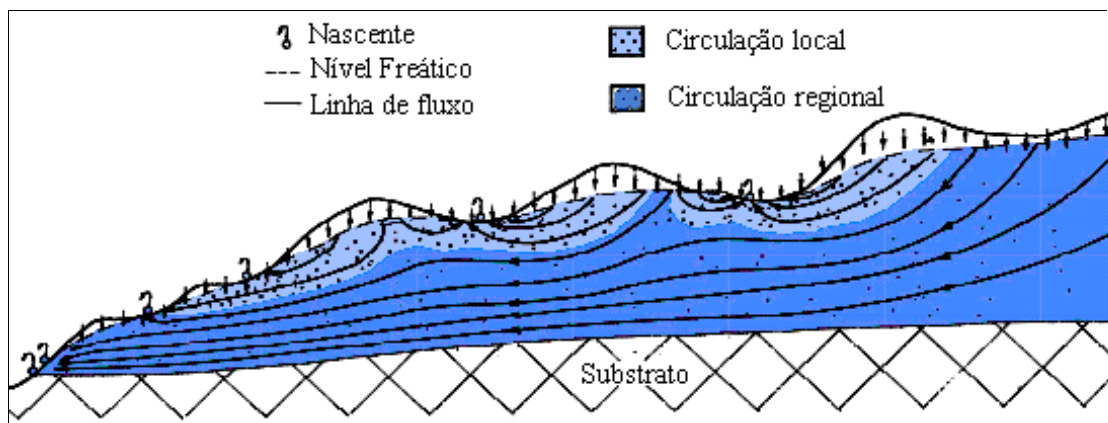


Figura 2.7. Esquema genérico sobre o modelo conceptual em situações de topografia particular. Adaptado de Custódio e Llamas, 1983 in Sousa Oliveira, 2005.

Por exemplo, na região oriental do maciço granítico da Serra da Estrela, Figura 2.8, após um período razoável de precipitação, verifica-se a infiltração de um fluxo que evolui em termos subterrâneos e tende a ressurgir em nascentes logo a seguir, em zonas de cotas mais baixas em relação à cota de recarga; a evolução do fluxo subterrâneo para grandes profundidades, por vezes, tende a acontecer quando, em particular, surgem falhas semi-verticais que favorecem a recarga profunda e ao longo de grandes distâncias. A complexidade das heterogeneidades e em especial da fracturação dos maciços poderá ser um dos factores que condiciona o caminho preferencial das partículas da água.

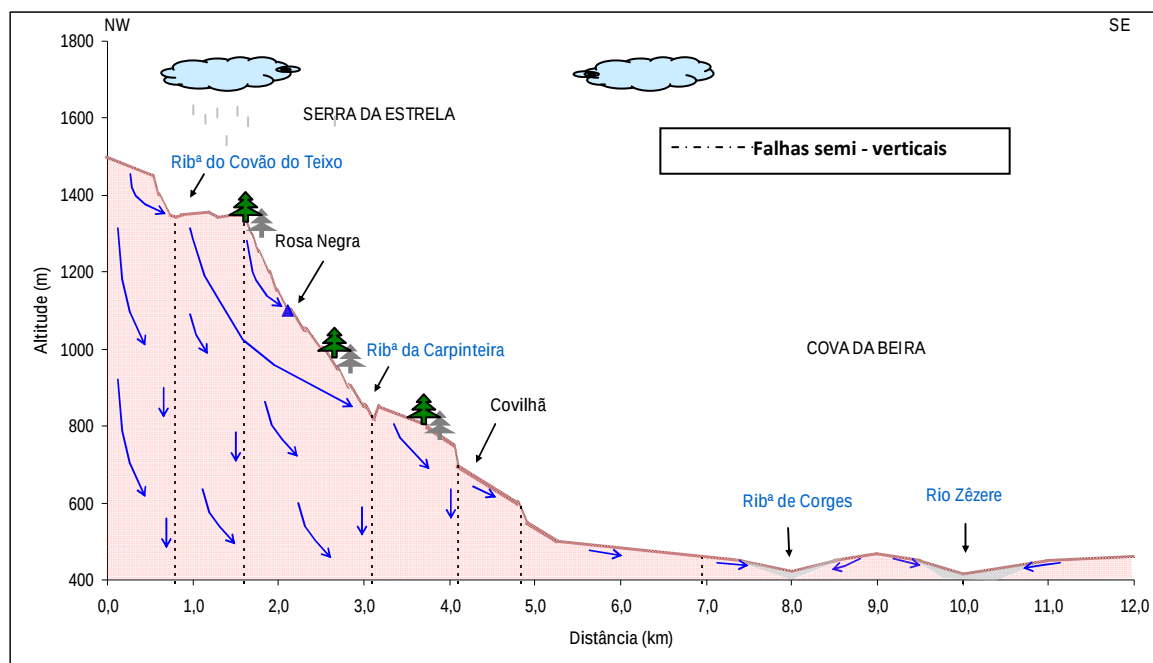


Figura 2.8. Esboço do modelo conceptual da zona da Serra da Estrela – Covilhã, evidenciando as grandes falhas semi-verticais a favorecer a recarga em profundidade (Mendes, 2006).

Em função do tipo de maciço, poderão existir várias situações hidrogeológicas, e a título de exemplo, apresentam-se na Figura 2.9 esquemas sobre singularidades geológicas que condicionam o local das ressurgências.

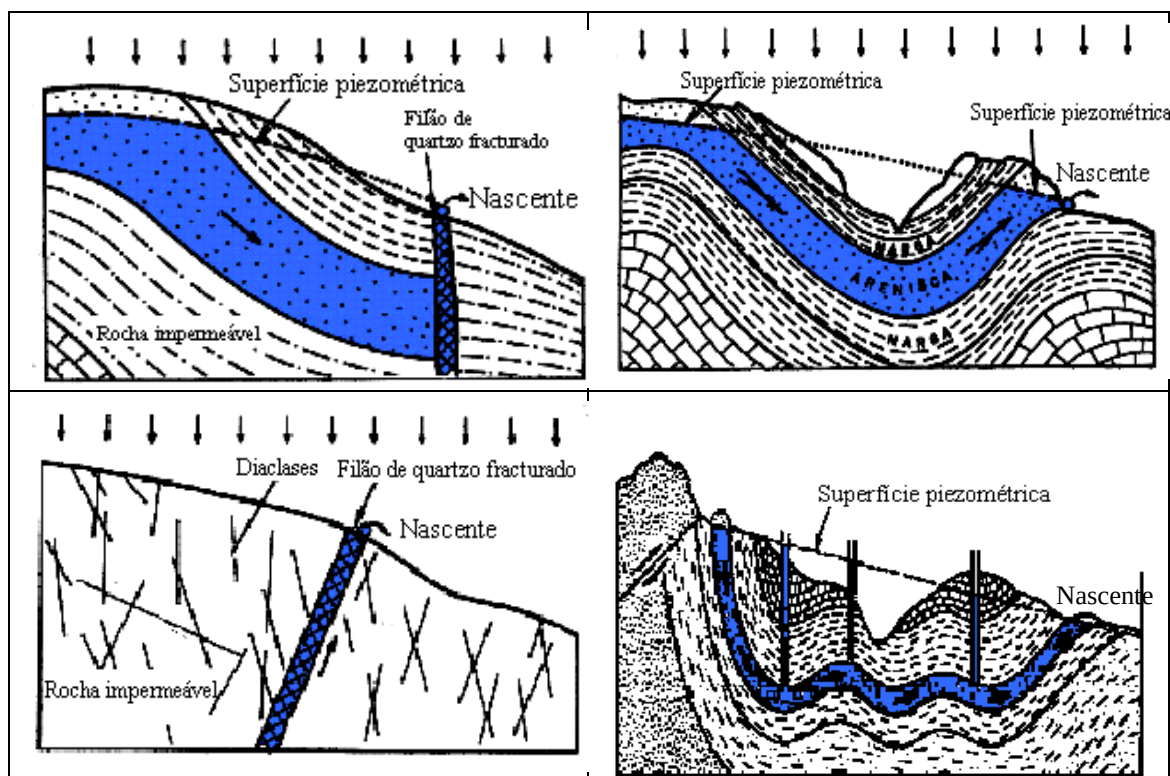


Figura 2.9. Esboços sobre singularidades geológicas na influência dos circuitos de água subterrânea (adaptado de Custódio e Llamas, 1983 in Sousa Oliveira, 2005).

Outro exemplo, é apresentado na Figura 2.10, onde é feita a caracterização hidrogeológica do flanco oriental do sinclinal do Buçaco na região de Midões, Penacova. Segundo Azevedo *et al.* (2010) a recarga das unidades aquíferas implantadas nas formações paleozóicas é dominada pela infiltração nos afloramentos das próprias formações. O armazenamento e a hidrodinâmica (circulação sub-vertical) intra-aquíferas são condicionados pela estratificação e pelas diversas famílias de fracturas, regionais e locais. A descarga aquífera efectua-se através da circulação (drenância) inter-unidades aquíferas; descarga para a superfície, originando exurgências por poços e furos.

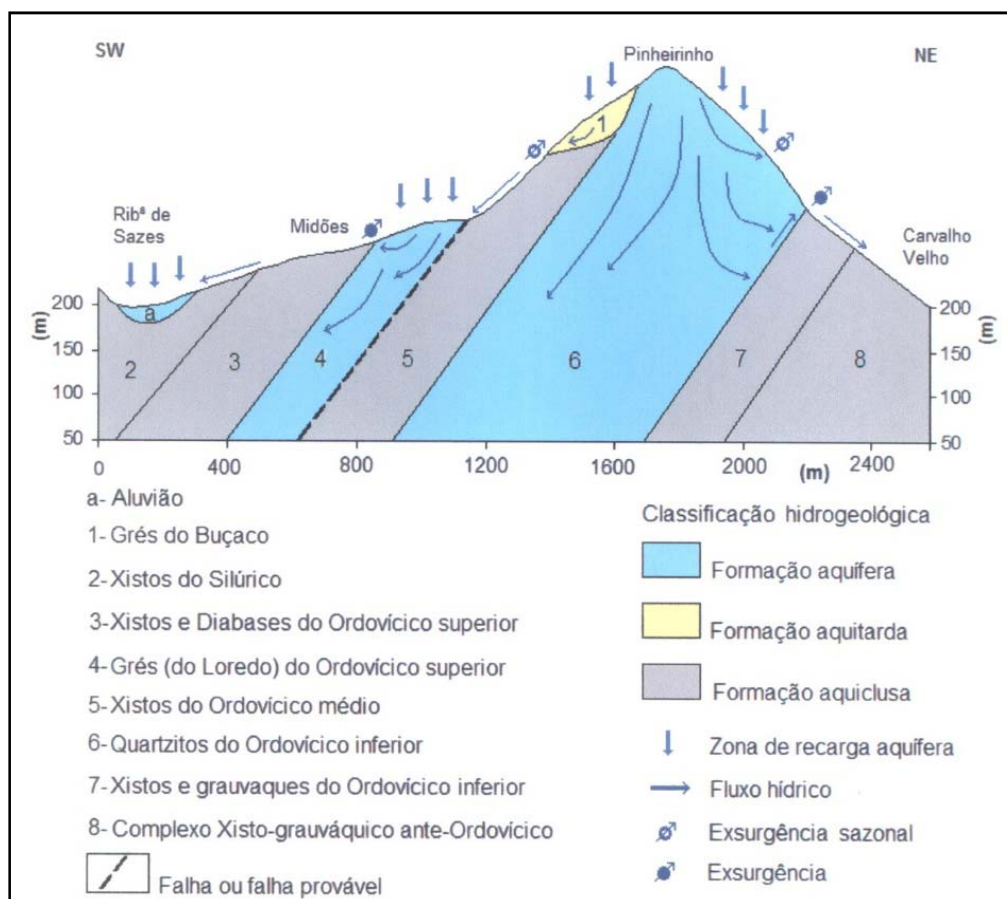
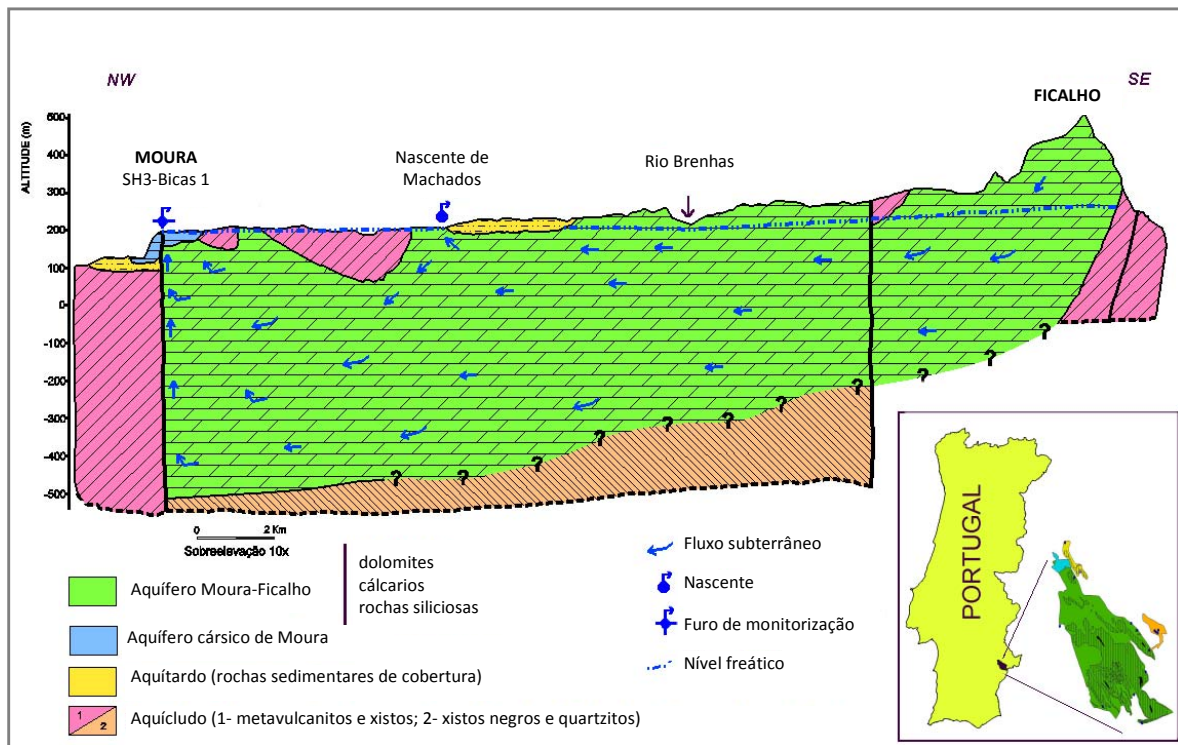


Figura 2.10. Modelo conceptual da hidrodinâmica subterrânea do flanco oriental do sinclinal do Buçaco na região de Midões, Penacova (Azevedo *et al.*, 2010).

Uma outra situação particular relaciona-se com os aquíferos cársicos. Estes correspondem a sistemas complexos e extremamente vulneráveis à contaminação e a alterações originadas pelas acções do homem nos ecossistemas locais, sendo por este motivo crucial a análise entre outros das fontes de contaminação, das áreas preferenciais de recarga e das direcções locais e regionais de fluxo. A título de exemplo, encontra-se na Figura 2.11 um modelo conceptual do funcionamento do sistema aquífero Moura-Ficalho desenvolvido por Marques da Costa (2001).

O modelo conceptual deve incluir as condições de recarga, a estrutura do reservatório geológico (litologias, heterogeneidades, tipos de permeabilidade, estruturas hidrogeológicas que condicionam a circulação e a sua distribuição no espaço) a tipologia da água, e as condições de descarga (Carvalho, 2008).



Um modelo conceptual é tanto mais representativo do sistema real quanto melhor for capaz de reproduzir o seu comportamento, estados desse sistema, acções que se desenvolvem sobre ele e leis que o controlam e relacionam. Terá que ser dinâmico, sendo adaptado à medida que evolui o conhecimento hidrogeológico sobre a área, e terão ainda que ser incorporados alguns graus de liberdade para permitir a simulação de um largo espectro de respostas. Deve ainda ser possível antecipar respostas, variando entre resultados desejados e não desejados.

Pode dizer-se que um especialista em águas subterrâneas só terá condições para criar um modelo conceptual, tentando intervir num dado problema se for o caso, quando tem do terreno uma visão global, num “puzzle” em que encaixa a estrutura do reservatório, hidráulica subterrânea e o factor tempo.

A necessidade de compreensão do funcionamento hidrogeológico de um aquífero leva assim ao estabelecimento de modelos conceptuais hidrogeológicos que podem ser simulados em modelos matemáticos (analíticos, numéricos ou estocásticos) de fluxo e/ou transporte de massa e calor.

2.3.1. Modelos numéricos

Os modelos hidrogeológicos são utilizados para simular o escoamento de água ou de outros fluidos no meio subterrâneo. Este escoamento pode dar-se com o meio poroso saturado, ou com o meio não saturado.

Uma abordagem clássica, consiste em aplicar um conjunto de soluções analíticas desenvolvidas para casos práticos específicos relacionados com a captação de água subterrânea em aquíferos de diversos tipos. Estas consistem em formulações clássicas desenvolvidas por Theis, Jacob, Hantush, entre outros, válidas para escoamento em meios porosos e sujeitas a um determinado enquadramento conceptual. Existem alguns modelos analíticos disponíveis no mercado que são evoluções de programas de análise de ensaios de bombagem, ou revisões informáticas mais recentes de conceitos analíticos menos testados.

Actualmente, a solução mais empregue no estudo do escoamento subterrâneo é a modelação numérica pelo método das diferenças finitas e pelo método dos elementos finitos. Nestes modelos o espaço a modelar é discretizado numa rede de elementos de forma a representar as características impostas pela geometria e pelos fenómenos hidrogeológicos associados. Para essa rede é integrada um conjunto de equações descritivas dos fenómenos de escoamento.

O escoamento da água subterrânea é descrito de uma forma explícita pela equação em derivadas parciais, baseada na lei de Darcy representando a conservação de momento, associada à equação de continuidade representando a conservação da massa do fluido (Fetter, 2001).

2.3.1.1. Método numérico baseado em diferenças finitas

Num modelo conceptual que é contínuo, presume-se conhecer as propriedades do aquífero em cada ponto dentro do seu domínio. Pode-se substituir o modelo contínuo por um conjunto de pontos combinados num padrão de grelha. Na Figura 2.12, representa-se um exemplo de uma grelha de diferenças finitas.

De acordo com Fitts (2002), um método numérico baseado em diferenças finitas é muito versátil, relativamente simples e bastante utilizado na modelação de escoamento. As equações diferenciais que descrevem o escoamento subterrâneo incluem termos que representam derivadas de variáveis contínuas no espaço e no tempo. Este método baseia-se na aproximação destas derivadas (declives de curvas) por variações lineares discretas sobre intervalos discretos de espaço e tempo.

Se os intervalos forem suficientemente pequenos, então todos os incrementos lineares vão representar uma boa aproximação da superfície curvilínea (Delleur, 1998).

No lugar de usar soluções analíticas para as equações gerais do escoamento, o método numérico baseado em diferenças finitas utiliza um conjunto de equações algébricas que são baseadas na conservação da massa e na lei de Darcy. Estas equações algébricas são resolvidas para cargas desconhecidas em nós discretos localizados no interior de uma rede ortogonal de nós. Um dos esquemas do método das diferenças finitas coloca os nós no centro de cada bloco, Figura 2.12a, e o outro nos cantos dos nós, Figura 2.12b.

O domínio modelado é subdividido ou discretizado numa grelha de blocos rectangulares. Em cada bloco, as propriedades físicas do domínio são assumidas homogéneas (condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento). O domínio pode ser heterogéneo assumindo diferentes propriedades para os diferentes blocos. As principais direcções da condutividade hidráulica devem estar alinhadas com as direcções ortogonais da grelha.

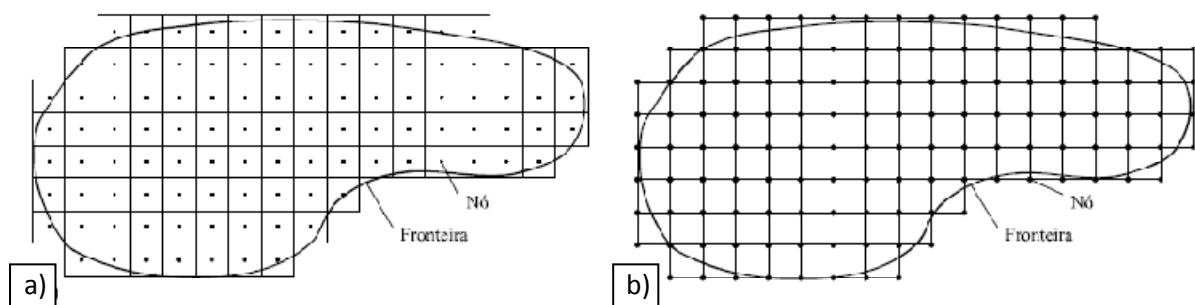


Figura 2.12. Grelha de um modelo baseado em diferenças finitas (Fetter, 2001): a) Discretização nos blocos ou células; b) Discretização nos vértices ou nós.

Nos modelos em regime transitórios, o tempo também é discretizado. O tempo progride com um passo discreto, com uma solução aproximada a cada incremento.

Para uma compreensão detalhada dos modelos numéricos baseados em diferenças finitas, aconselha-se, de entre outros, Wang e Anderson (1982).

2.3.1.2. Método numérico baseado em elementos finitos

O método dos elementos finitos é um método numérico utilizado para aproximar a solução a soluções de equações diferenciais parciais.

Os modelos de elementos finitos oferecem uma abordagem alternativa à modelação numérica do escoamento subterrâneo. No lugar de usar uma rede rectangular de nós como a usada no método das diferenças finitas, o aquífero é dividido em polígonos fechados, normalmente triângulos.

A Figura 2.13 representa os polígonos (elementos) de um aquífero. Os triângulos intersectam os nós que representam as incógnitas, como seja, a carga hidráulica, a calcular. O valor da carga no interior de cada elemento é determinado por interpolação entre os nós.

O problema dos elementos finitos resume-se à determinação da melhor solução aproximada para o tipo restrito de distribuição de carga permitido no elemento. Existem vários métodos para procurar a melhor solução aproximada. O mais popular e generalizado é o método de Galerkin. Este método determina a solução minimizando um parâmetro designado de residual, que mede quanto a solução aproximada se afasta da equação geral. O método de Galerkin pode ser aplicado a todas as equações de escoamento subterrâneo (Fitts, 2002).

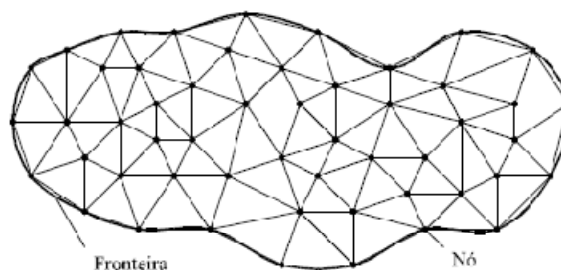


Figura 2.13. Malha de elementos finitos (Fetter, 2001).

Segundo Fetter (2001), os modelos de elementos finitos têm a vantagem de serem muito mais flexíveis na caracterização de geometria do aquífero do que um modelo de diferenças finitas e necessitam de menos nós.

As bases matemáticas do método dos elementos finitos são muito mais complexas do que o método das diferenças finitas. Este método encontra-se descrito de forma sistemática em Wang e Anderson (1982).

No capítulo 5, será feito um desenvolvimento de um modelo utilizando um software que tem por base elementos finitos.

Capítulo 3

ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO

3.1. Geomorfologia	48
3.2. Geologia	55

3. ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO

Neste capítulo descrevem-se os principais elementos geomorfológicos e geológicos da região em estudo. Nos aspectos geomorfológicos são ainda apresentadas algumas imagens da diversidade morfológica causada pelos processos de meteorização. Sobre os aspectos geológicos mostram-se também um conjunto de imagens resultantes da análise microscópica das formações presentes na área de estudo.

3.1. Geomorfologia

3.1.1. Enquadramento regional

Em termos geomorfológicos regionais a zona em estudo é marcada por três importantes unidades geomorfológicas da Beira Baixa (Figura 3.1):

- i) a Serra da Gardunha, com cotas que atingem os 1227 metros;
- ii) a Cova da Beira, apresentada com um fundo aplanado, de altitudes entre 400 e 500 metros;
- iii) extensa Plataforma de Castelo Branco, de altitudes entre 300 e 400 metros e que atinge o Vale do Tejo a sul.

A área em estudo localiza-se na vertente sul da Serra da Gardunha. Esta serra localizada entre Douro e Tejo e entre os rios Pônsul e Zêzere tem cerca de 20 km de comprimento e 10 km de largura, nascendo nela o rio Ocreza, um dos afluentes do Tejo (Figura 3.2).

A Serra da Gardunha compreende ainda três importantes sub-bacias hidrográficas: a norte e oeste a sub-bacia do Zêzere; a sul a sub-bacia do Ocreza; e a leste a sub-bacia do Pônsul.

Podem notar-se, na Serra da Gardunha, dois aspectos geomorfológicos distintos e que se encontram relacionados com a natureza geológica dos terrenos. Nas imediações das localidades de Castelo Novo e Alpedrinha os terrenos, de natureza granítica, apresentam um relevo em forma de batólito, onde as linhas de água não são tão evidenciadas em relação às restantes áreas em estudo; a noroeste e sudoeste destas localidades, onde ocorrem terrenos de natureza metassedimentar, a morfologia é caracterizada pela presença de linhas de água mais evidenciadas que as das áreas anteriores, as quais ocorrem em vales mais encaixados e recortados.

Em termos gerais, a rede de drenagem apresenta com frequência troços de linhas de água rectilíneos (Figura 3.2), e são numerosos os paralelismos entre conjuntos de linhas de água. Estas observações, conjugadas com o conhecimento da monotonia litológica, terrenos graníticos e metassedimentares, permitem atribuir à facturação o principal papel na modelação da rede de drenagem.

Nos terrenos graníticos, as fracturas possuem um padrão ortogonal e são compostas por três conjuntos de descontinuidades que se interceptam, formando aproximadamente ângulos rectos. Este sistema é resultante de uma compressão, formando sistemas de cisalhamento conjugados (Vidal Romani e Twidale, 1998) os quais possibilitam o avanço de frentes de alteração.

O processo responsável pela modelação das mais variadas morfologias graníticas reside na meteorização diferencial, que decorre nas fracturas de importância local e/ou regional.

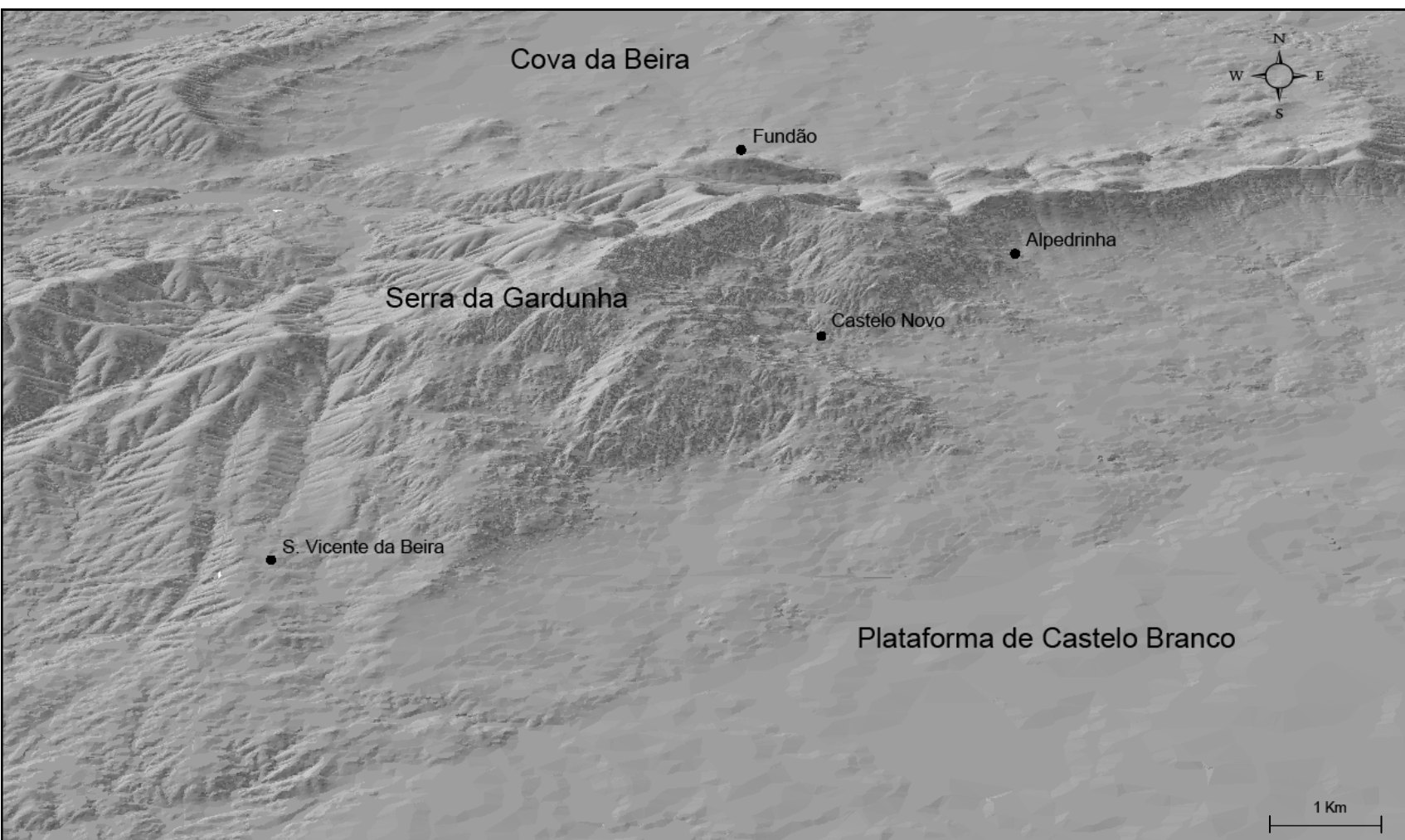


Figura 3.1. Modelo digital de terreno da Serra da Gardunha.

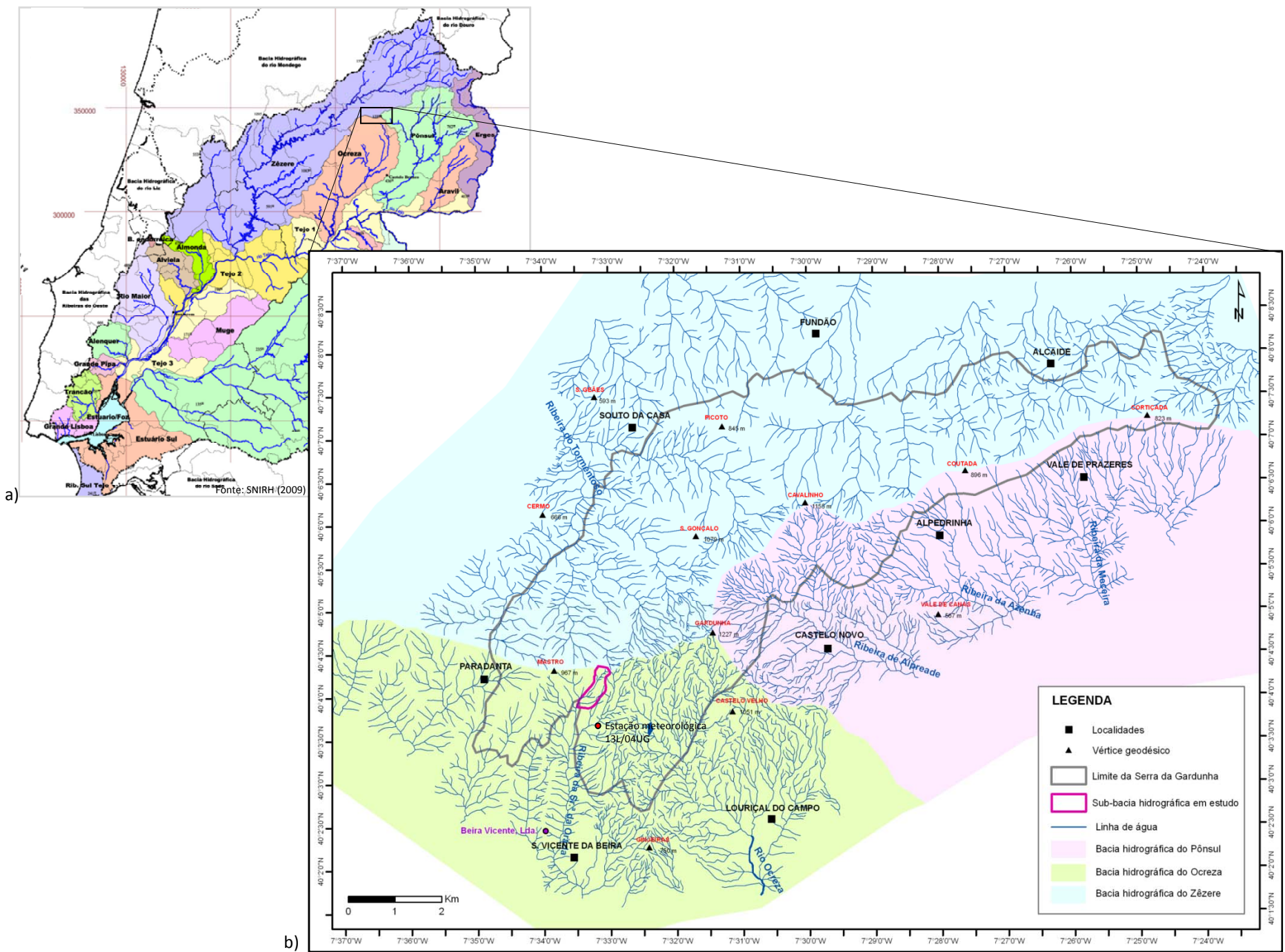


Figura 3.2 – Enquadramento hidrográfico: a) na bacia hidrográfica do Tejo; b) de pormenor nas áreas da Serra da Gardunha.

A meteorização é um processo de “natureza descontraída”, visto que não constrói, somente segue os caminhos de fragilidade estrutural pré-estabelecidos nos maciços. Assim, a diversidade morfológica causada por este processo, origina formas tão variadas entre os quais se destacam: blocos residuais, tors, blocos fendidos, tafonis, bacias de pedra, blocos pedunculados.

3.1.2. Enquadramento local

A zona das captações legalizadas das águas de nascente Fonte da Fraga localiza-se a cerca de 3Km para SW do marco geodésico mais elevado da Serra da Gardunha, que está à cota de 1227m. Imagens típicas sobre a zona global da área de trabalho, podem observar-se nas Figuras 3.3 e 3.4. Algumas imagens singulares sobre blocos com morfologias particulares da área de trabalho, podem observar-se na Figura 3.5.

Em relação às sub-bacias das captações e sub-bacias vizinhas, as áreas de planalto são quase nulas, bem como as áreas de declives suaves (declives inferiores a 10%); as sub-bacias das captações apresentam quase na globalidade declives superiores a 25% e só cerca de 17% da sua área apresenta declives entre 10 e 25%; situações similares apresentam as sub-bacias vizinhas.

Salienta-se que na zona em estudo, acontecem por vezes grandes sulcos em escavações recentes de terrenos graníticos, na sequência de chuvadas com alguma intensidade; são naturalmente, consequência dos grandes declives associados à alteração dos maciços rochosos, que possibilitam fluxos superficiais torrenciais com elevada capacidade de erosão.

As linhas de água onde se localizam as captações, bem como as que lhe estão contíguas transportam os seus fluxos em termos globais de Norte para Sul, confluindo com a Ribeira da Senhora da Orada, que por sua vez irá confluir com o rio Ocreza, já muito longe da zona de estudo, que é o segundo rio mais importante, depois do rio Pônsul, do Concelho de Castelo Branco. A jusante estes rios confluem com o rio Tejo.



Figura 3.3. Fotografia sobre a zona principal da área em estudo dos terrenos da água Fonte da Fraga, da Serra da Gardunha (vista de montante para jusante).



Figura 3.4. Fotografia sobre a zona principal da área em estudo dos terrenos da água Fonte da Fraga, da Serra da Gardunha (vista de jusante para montante).

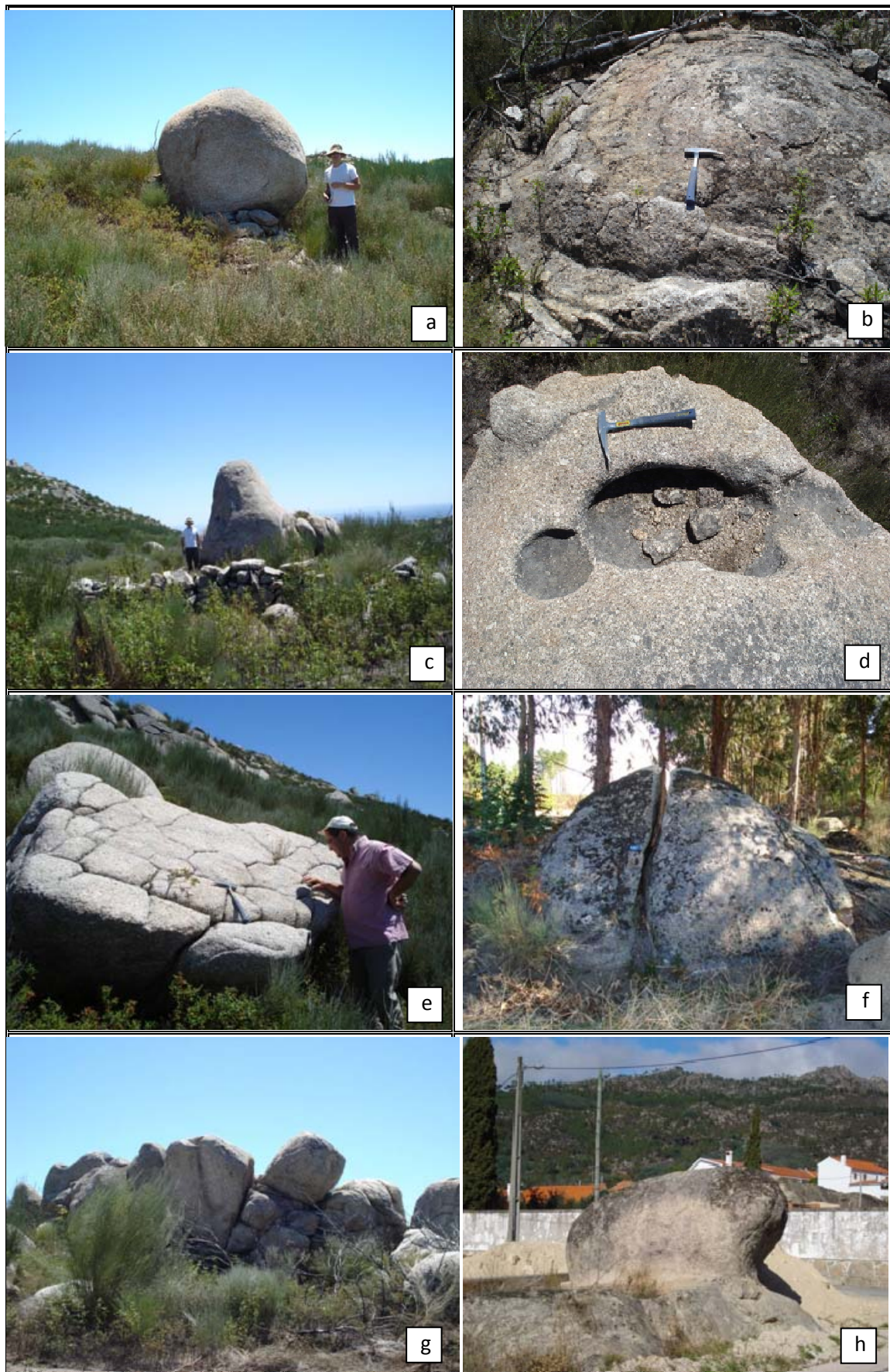


Figura 3.5. Imagens de morfologias graníticas da área do aquífero da Fonte da Fraga: a) e b) disjunção esferoidal; c) bloco residual; d) bacias de pedra; e) e f) blocos fracturados; g) tors; h) bloco pedunculado.

3.2.Geologia

3.2.1. Enquadramento regional

A Serra da Gardunha está integrada no sistema montanhoso da Cordilheira Central Ibérica que corta diagonalmente as formações mais antigas da Península Ibérica, o Maciço Hespérico. Segundo Ribeiro (1954) e Vieira (2004), a Cordilheira Central corresponde a uma morfoestrutura de tipo “montanha de blocos” com desenvolvimento WSW-ENE, com cerca de 500 Km de extensão e 40 Km de largura, estendendo-se desde a Serra da Lousã até à Somosierra, a norte de Madrid.

As principais unidades do relevo da Cordilheira Central são, referenciando de Oeste para Este, as Serras da Lousã, Açor, Gardunha, Estrela, Gata, Gredos, Guadarrama e Somosierra. Com excepção das duas primeiras, as restantes serras estão separadas por corredores aplanados de direcção NE-SW, oblíquos à direcção geral da cordilheira (Daveau, 1969; Vieira, 2004).

A geologia da Serra da Gardunha é dominada pela ocorrência de granitóides hercínicos, de idades compreendidas entre os 380 a 290 milhões de anos (Ma) intruindo metassedimentos de idade precâmblica a câmblica, com cerca de 500 a 650 Ma (Vieira, 2004).

A informação publicada resume-se essencialmente à carta geológica à escala de 1/500000 editada pelo Instituto Geológico e Mineiro (actual Laboratório Nacional de Energia e Geologia), folha 1, e cujo extracto da região onde se insere a área de estudo se apresenta na Figura 3.6.

3.2.2. Enquadramento local

Para as áreas directamente associadas ao aquífero da água de nascente Fonte da Fraga, ocorrem as seguintes unidades (Figura 3.7):

Figura 3.6. Mapa geológico da zona onde se insere a sub-bacia hidrográfica em estudo - Sector SW da Serra da Gardunha.

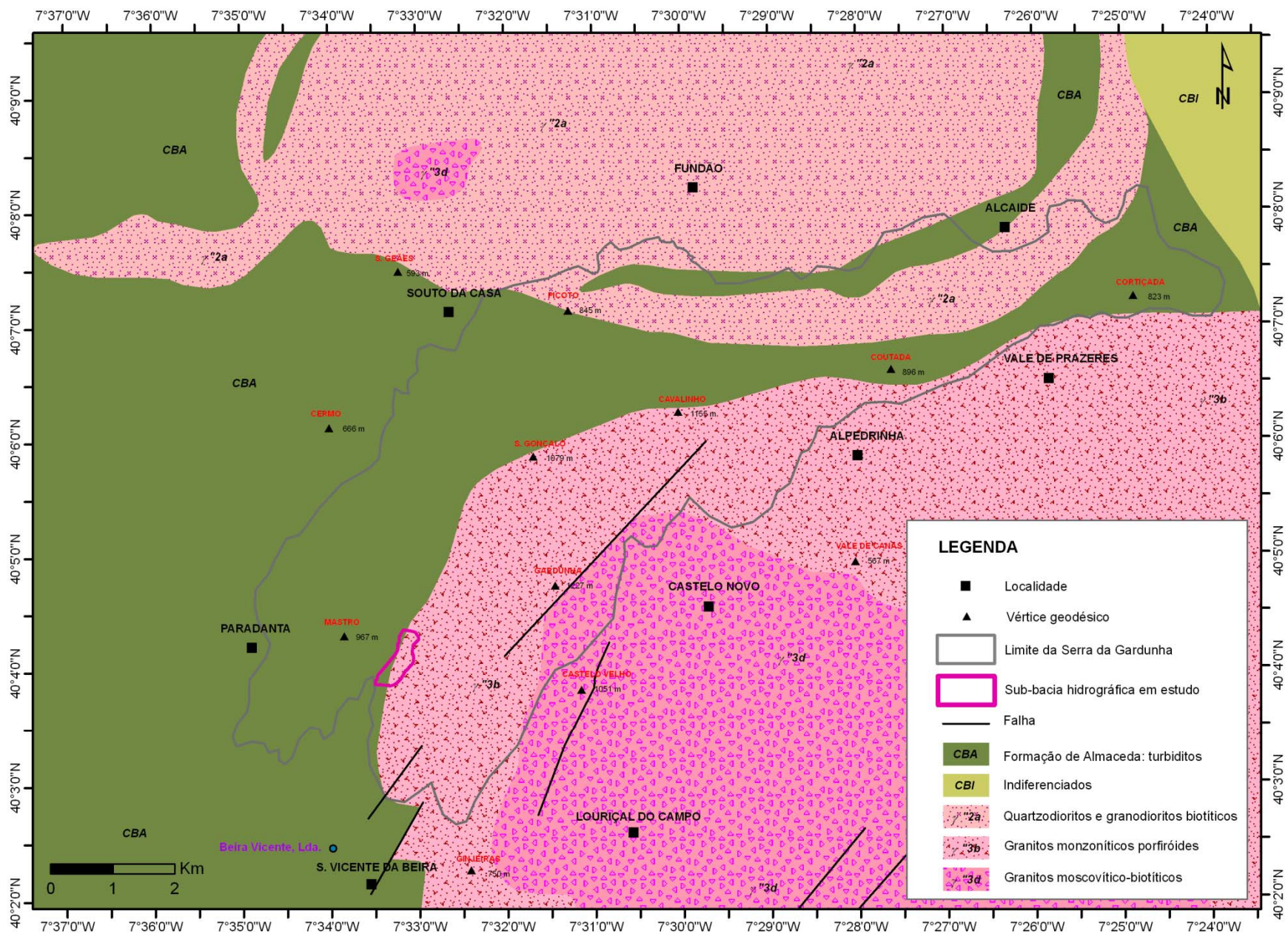
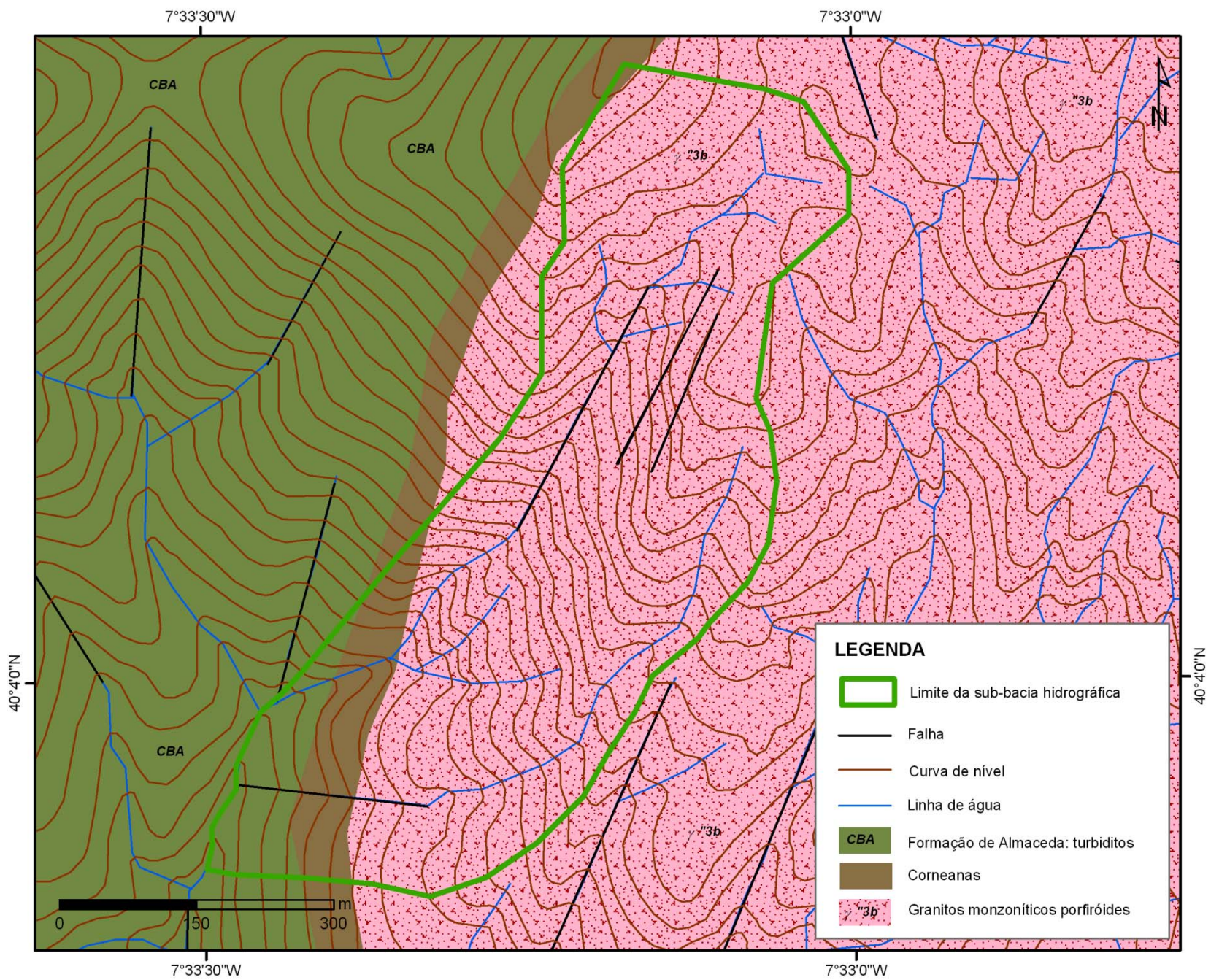


Figura 3.7. Mapa geológico, em pormenor, da zona onde se insere a sub-bacia hidrográfica em estudo - Sector SW da Serra da Gardunha.



Depósitos de Cobertura

a – Aluviões actuais (Figura 3.8); são constituídas essencialmente por areias e cascalheiras, resultantes da desagregação das rochas existentes na região, correspondendo assim a terrenos de idade recente.



Figura 3.8. Imagem da formação de cobertura: aluviões actuais.

dv – Depósitos de vertente (Figura 3.9); estas formações ocorrem pontualmente, no entanto, devido à sua pequena área aflorante, no presente trabalho não são consideradas.



Figura 3.9. Imagem da formação de cobertura: depósitos de vertente.

Rochas Ígneas

γ - Granitóides; de acordo com as respectivas fases de instalação, as rochas graníticas na área em apreço correspondem a granitóides da série tardia (380-290 Ma, (Vieira, 2004)), relacionados com os efeitos da última fase de deformação hercínica (F3). Assim, consideram-se dois grupos litológicos: os granitos monzoníticos de grão médio (Figura 3.10), porfiróides, com duas micas, essencialmente biotíticos ($\gamma''3b$); e os granitos tardios (Figura 3.11), de grão fino, moscovítico-biotíticos ($\gamma''3d$).



Figura 3.10. Imagem dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).



Figura 3.11. Imagem dos granitos moscovíticos-biotíticos ($\gamma''3d$).

Esta sequência de granitóides, relacionados com cisalhamentos dúcteis, segue um processo evolutivo que se traduz em modificações texturais e mineralógicas. Assim, ao longo deste processo, as texturas grosseiras, porfiróides, são substituídas por texturas finas, não porfiróides; as fácies biotíticas passam a duas micas e mesmo a leucogranitos moscovítico-biotíticos.

Sobre estas formações efectuaram-se alguns estudos microscópicos, com o intuito de clarificar a identificação mineralógica. Assim, expõem-se a seguir alguns elementos nesse sentido:

- Quartzo

O quartzo ocorre essencialmente na matriz, em cristais xenomórficos, límpidos, de um modo geral bem desenvolvidos, podendo atingir 2-3mm de dimensão (Figura 3.12).

A sua fissuração é elevada, são frequentes as fissuras transgranulares e intragranulares. As fissuras transgranulares apresentam grande extensão e abertura fora do comum, e mostram deposição de óxidos e até crescimento de micas brancas.

Também ocorre como inclusão no feldspato potássico, em pequenos cristais idiomórficos, embora com pouca frequência.

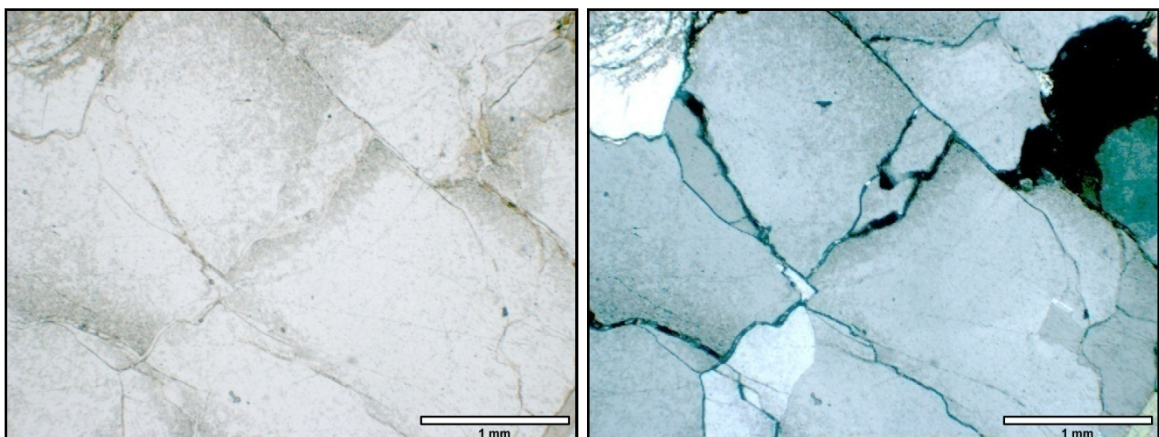


Figura 3.12. Aspecto da elevada fissuração do quartzo (luz normal - esquerda; luz polarizada - direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).

- Feldspato Potássico

O feldspato potássico possui com frequência a macla em xadrez da microclina (Figura 3.13). Os cristais são hipidiomórficos, por vezes bem desenvolvidos (4mm × 2mm). Apresentam frequentes vénulas pertíticas que cortam os cristais.

Contém ainda, inclusões de quartzo, plagioclases e micas brancas, embora pouco frequentes.

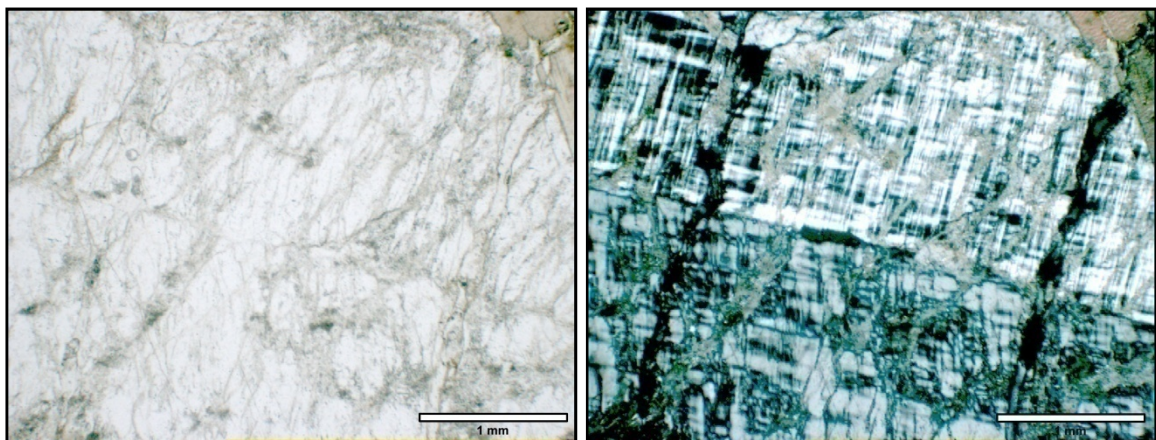


Figura 3.13. Feldspato potássico - aspectos típicos observados (note-se a macla em xadrez e as pertites; luz normal - esquerda; luz polarizada - direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).

- Plagioclases

As plagioclases (Figura 3.14), que correspondem a albites, ocorrem em cristais hipidiomórficos com desenvolvimento assinalável e atingem com frequência a dimensão de 5mm × 3mm (foi observado um cristal com 10mm). Apresentam uma elevada alteração, com a formação de moscovite, sericite e óxidos que, na maioria, cobrem a totalidade do cristal. Algumas mostram-se zonadas, com maior alteração na zona central.

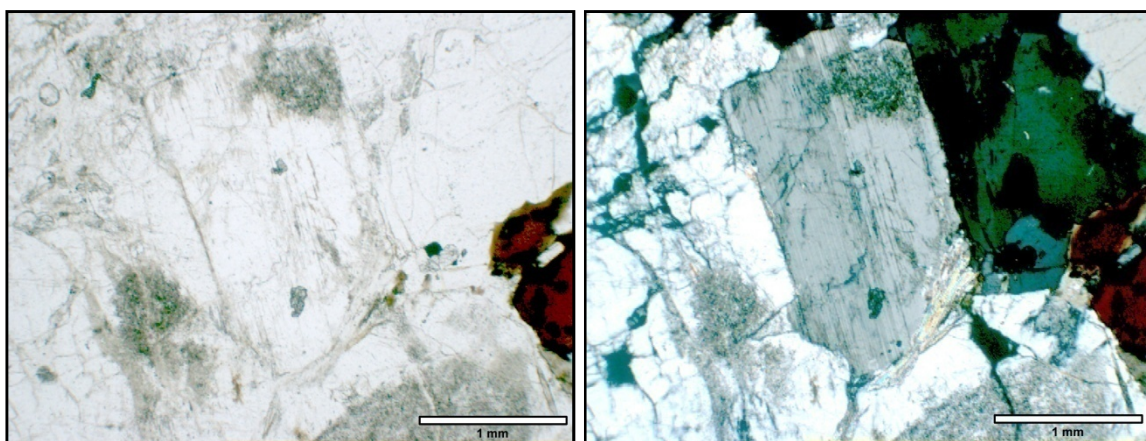


Figura 3.14. Aspecto típico das plagioclases, com intensa alteração (luz normal - esquerda; luz polarizada - direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).

- Biotite

A biotite distingue-se em cristais hipidiomórficos com dimensões variáveis (mais frequentes $2\text{mm} \times 1\text{mm}$) e com frequentes halos pleocróicos (Figura 3.15). Alguns cristais encontram-se por vezes muito corroídos e muito alterados, com a formação de clorite, moscovite, óxidos de ferro e de titânio e epídoto, que se desenvolvem preferencialmente ao longo dos planos das clivagens. Por vezes esta alteração é muito intensa, com a destruição da estrutura do mineral original.

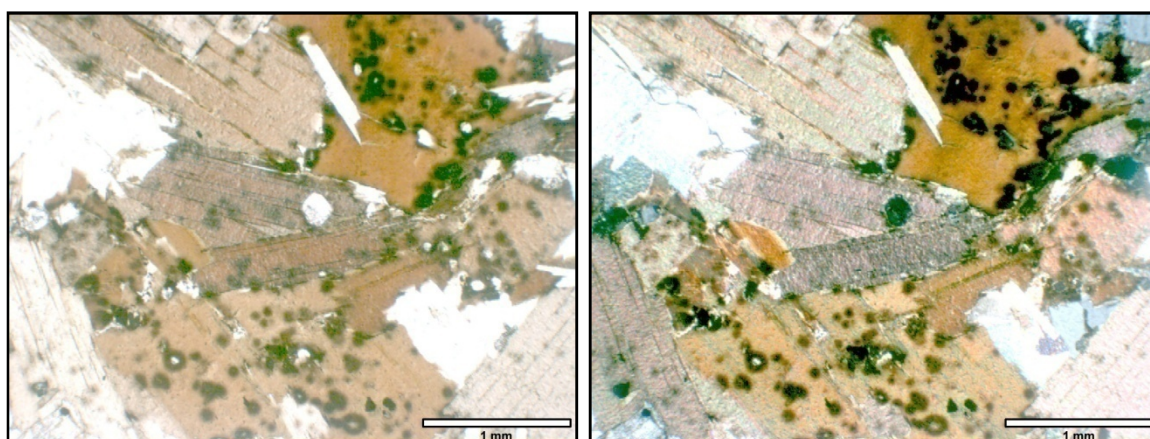


Figura 3.15. Aspecto da biotite; note-se a intensa alteração (luz normal - esquerda; luz polarizada - direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).

- Moscovite

A moscovite presente é secundária (resulta essencialmente da alteração da biotite). Ocorre em pequenas palhetas hipidiomórficas associadas à biotite (Figura 3.16), ou em pequenos cristais no interior dos feldspatos (maioritariamente das plagioclases).

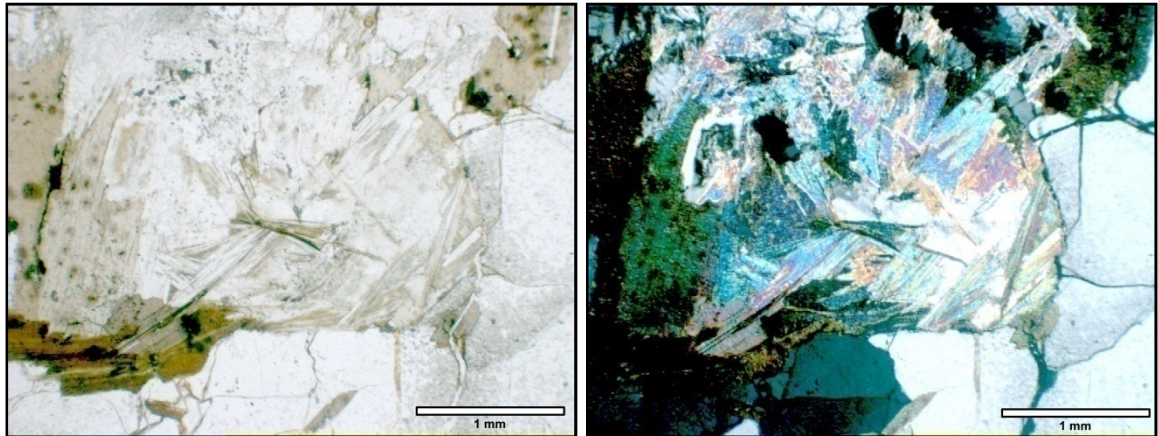


Figura 3.16. Aspecto da moscovite (luz normal - esquerda; luz polarizada - direita), dos granitos monzoníticos de grão médio ($\gamma''3b$).

q - Filões e filonetes de quartzo (Figura 3.17); surgem normalmente associados a falhas ou fracturas, por vezes com extensões significativas. Os mais antigos encontram-se associados à última fase de cristalização magmática.



Figura 3.17. Imagem dos filonetes de quartzo.

Rochas Metamórficas

Ocorrem numa extensa mancha de rochas de natureza metassedimentar incluídas nos terrenos do denominado Complexo Xisto-Grauváquico do grupo das Beiras.

Esta sequência de rochas compreende uma série monótona de alternâncias de xistos e grauvaques correspondendo a sedimentos marinhos, da região do talude continental, normalmente designados por turbiditos.

As acções térmicas sobre as rochas encaixantes manifestam-se em auréola de metamorfismo de contacto com corneanas pelíticas e quartzo-feldspática (Figura 3.18a), que atingem em média 20 a 30m de extensão, micaxistos e xistos mosqueados (Figura 3.18b) também são visíveis nas proximidades destas faixas de metamorfismo de contacto.

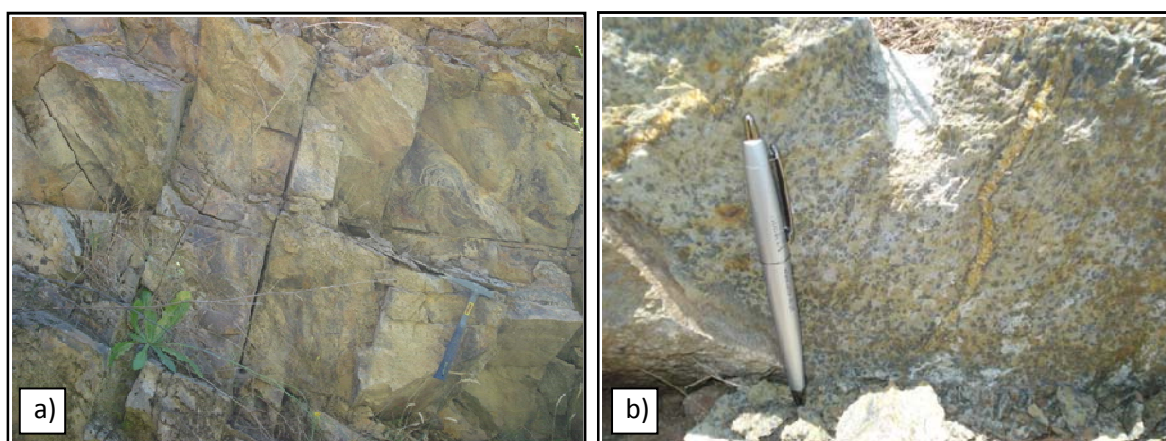


Figura 3.18. Imagem das formações metamórficas: a) corneanas; b) xistos mosqueados.

Também nestas formações efectuaram-se alguns estudos microscópicos que se passam a apresentar:

- Corneana

Exibe uma textura nematoblástica e é constituída por grandes quantidades de anfíbolos (horblenda verde, actinolite), plagioclases, opacos e quartzo (Figura 3.19).

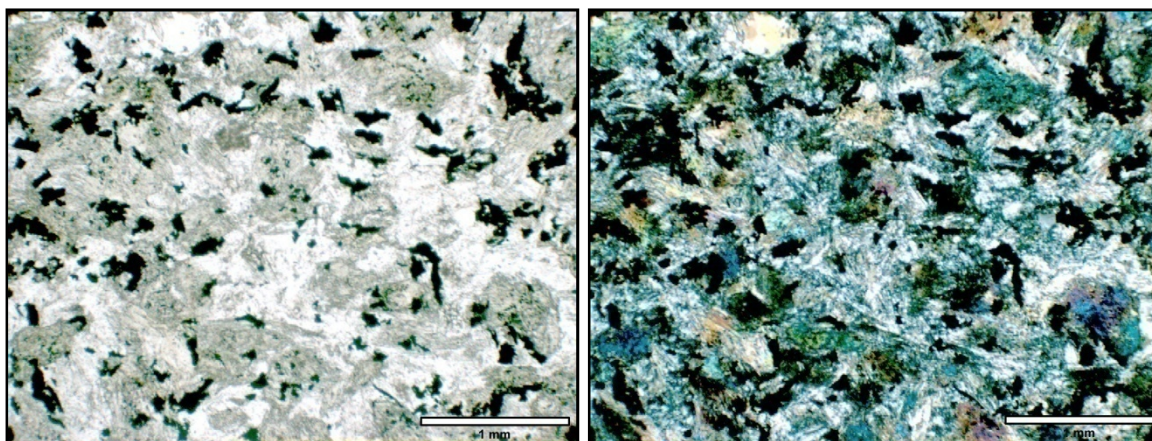


Figura 3.19. Aspecto geral das corneanas; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita).

- Xisto mosqueado

Apresenta nítida textura porfiroblástica com a matriz a ser constituída por quartzo (Figura 3.20), moscovite e biotite. Nas amostras mais meteorizadas a biotite da matriz está cloritizada ou foi completamente transformada em clorite. Os pórfiros são constituídos por micas brancas (moscovite, sericite), quartzo, clorite e óxidos de ferro (opacos).

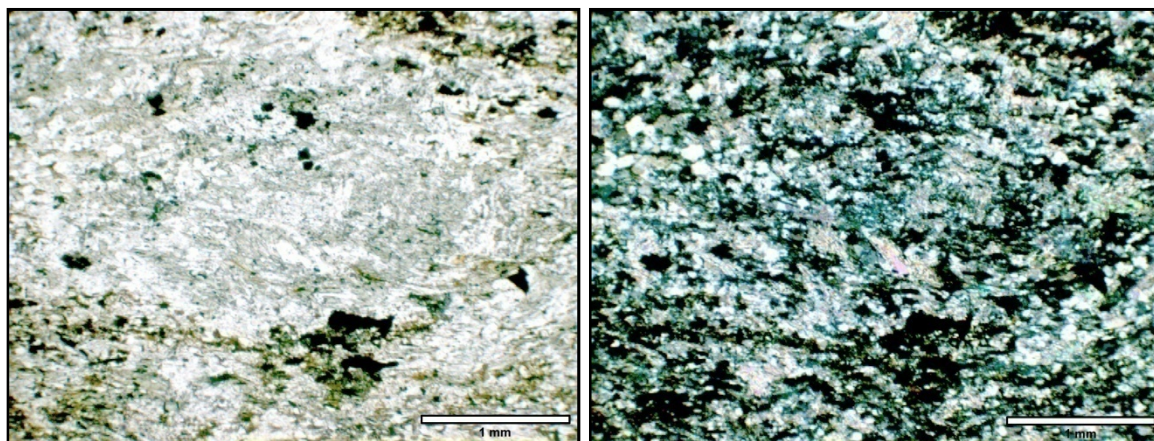


Figura 3.20. Aspecto geral dos xistos mosqueados, onde é nítida a presença dos pórfiros; luz normal (esquerda); luz polarizada (direita).

3.2.3. Fracturação

Segundo Almeida (2005), a análise espacial das relações angulares entre os diferentes alinhamentos cartografados faz-se com recurso a ferramentas estatísticas descritas,

sendo mais vulgarmente utilizadas as formas gráficas de projecção estereográfica e diagrama de densidades e histogramas circulares vectoriais, também conhecidos como diagramas de rosetas.

Estas formas de representação gráfica permitem analisar as relações espaciais entre os diferentes locais de amostragem, bem como entre as diferentes famílias cartografadas. Se a projecção de pólos de planos, diagrama π , e a sua análise como diagrama de densidade, é mais apropriado ao estudo de dados recolhidos em campo, onde tanto a direcção das estruturas planares, como a sua pendente são obtidas por medição directa, já o histograma circular pode ser aplicado quer aos dados recolhidos em campo, quer àqueles obtidos por interpretação e detecção remota baseados em modelos digitais de terreno e imagens de fotografia aérea e satélite, fornecendo assim uma base para a sua comparação e interpretação.

Para a presente área de estudo, recorrendo-se à fotografia aérea, à cartografia topográfica e ao levantamento de campo, foi possível identificar os principais alinhamentos (Figura 3.21), assumidos como manifestação topográfica correspondentes a fracturas, e fazer o seu tratamento estatístico através de diagramas de roseta proporcionais à frequência ou ao comprimento dos mesmos (Figura 3.22).

No total foram identificados 132 alinhamentos de eventual origem tectónica na área representada na Figura 3.21.

Da análise dos diagramas de rosetas, conclui-se que a família de alinhamentos com maior representação possui direcção 20° - 40° seguida da direcção 110° - 120° . No que se refere à distribuição por comprimentos totais, observa-se o mesmo padrão de diagrama predominando a família de direcções 20° - 40° seguida da direcção 110° - 120° .

Em termos gerais, o predomínio das direcções 20° - 40° corresponde aos acidentes mais recentes, de idade alpina, sendo também apontados como os responsáveis pela evolução em blocos da região granítica (Teixeira *et al.* 1974, 1975).

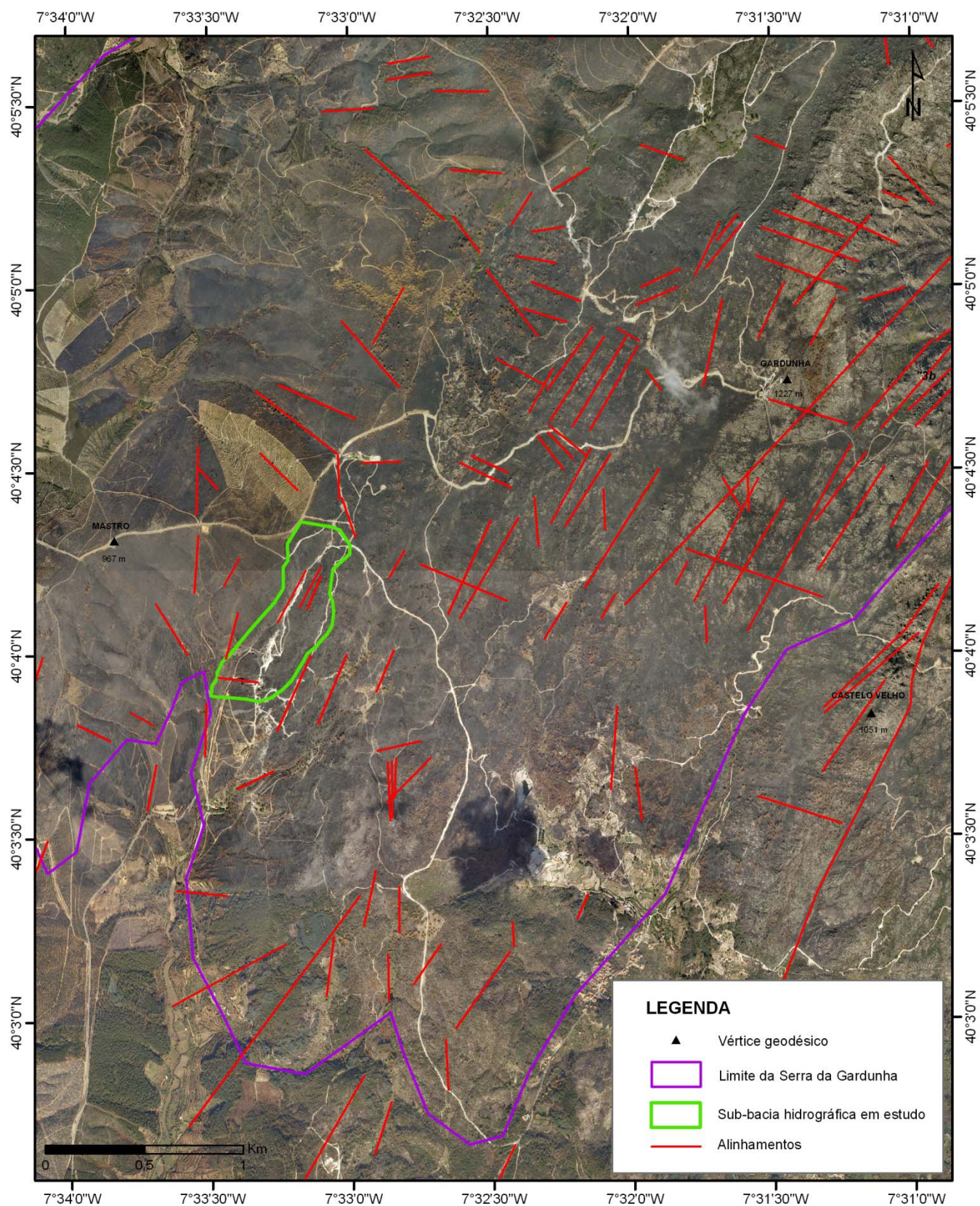
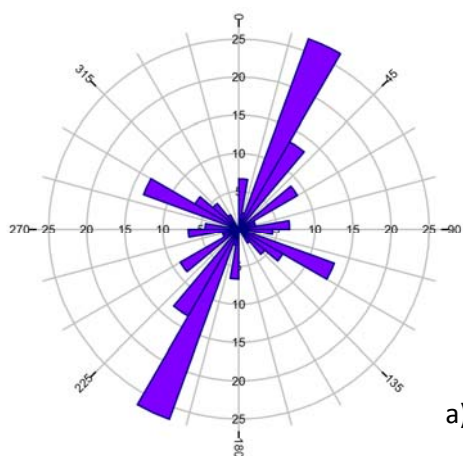
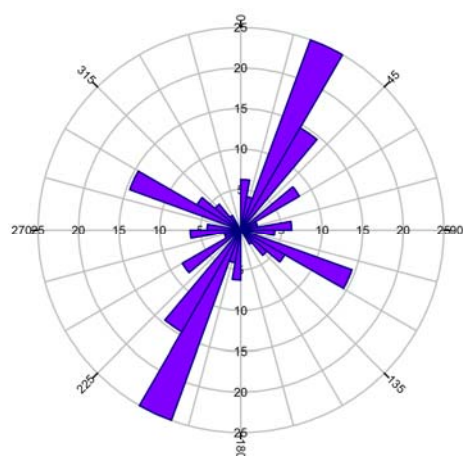


Figura 3.21. Carta de alinhamentos baseada na interpretação de imagens obtidas por fotografia aérea a cores de espectro visível na área do aquífero da Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).



a)



b)

Figura 3.22. - Histogramas circulares dos alinhamentos obtidos por interpretação das imagens de fotografia aérea a cores de espectro visível. a) frequência simples em função da direcção. b) comprimentos de alinhamentos em função da direcção. $n=132$, para a área do aquífero da Fonte da Fraga.

Capítulo 4

ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO

4.1. Elementos Hidrológicos	70
4.2. Recarga Aquífera	78
4.3 Hidrodinâmica	88
4.4. Unidades Hidrogeológicas	90
4.5. Pontos de Água	92
4.5. Hidroquímica	96

4. ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO

Neste capítulo apresentam-se numa primeira fase, e de uma forma sintética, os elementos hidrológicos, para posteriormente se explanar com algum desenvolvimento os aspectos relacionados com a recarga aquífera, unidades hidrogeológicas, pontos de água e hidroquímica.

4.1. Elementos Hidrológicos

O vapor de água contido na atmosfera dá origem à precipitação sob diversas formas, quando se verificam variações das condições meteorológicas. As primeiras quedas pluviométricas destinam-se à satisfação das exigências resultantes da capacidade de campo e da evapotranspiração, após o que se origina o escoamento superficial e/ou a infiltração com a consequentemente recarga dos aquíferos.

A precipitação é uma das componentes primárias do ciclo hidrológico. Constitui a fonte fundamental de recarga dos aquíferos. A importância da precipitação é redobrada se se admitir que ela também é, em muitas situações, a principal fonte de alimentação subterrânea de bacias hidrogeológicas contíguas.

4.1.1. Elementos climáticos

Dos elementos climáticos disponíveis para a caracterização da zona em estudo, usaram-se os elementos de precipitação apresentados na Tabela 4.1, por serem aqueles, registados na estação meteorológica de S. Vicente da Beira, instalada na vertente sul da Serra da Gardunha genericamente coincidente com a área de estudo (Figura 3.2).

Da análise da Tabela 4.1 verifica-se que os meses de maior precipitação são Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro, os quais representam 53% da precipitação total. Por oposição os meses de Julho e Agosto são os que mostram uma menor precipitação.

Tabela 4.1. Estatística dos valores de precipitação dos anos hidrológicos de 1931/1932 a 2006/2007 da estação meteorológica 13L/04UG –S. Vicente da Beira (SNIRH, 2009).

Precipitação Mensal (mm)												
	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET
n	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	2.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Média	107.0	139.6	139.1	136.7	115.1	106.1	77.6	71.8	31.0	10.9	10.4	48.2
Máximo	280.2	438.8	635.2	570.3	364.4	319.0	200.3	264.6	233.1	85.6	73.5	199.4
Estação meteorológica 13L/04UG – S. Vicente da Beira do INAG (Latitude: 40°03'N; Longitude: 7°55'W; Altitude: 572m).												

Na Figura 4.1, estão representados os valores referentes à distribuição anual da precipitação. Da figura constata-se que em termos médios na região em apreço o valor de precipitação total anual ronda os 993.5mm. O valor mínimo registado, de 363.8mm, equivale ao ano hidrológico 2004/2005, e que se traduziu num ano com precipitação muito abaixo do normal.

Para além dos valores de precipitação na fase líquida, não se pode deixar de referir outras formas de precipitação atmosférica, entre as quais se destacam a neve, o granizo, a geada e o nevoeiro e que desempenham um papel relevante na hidrologia regional.

A neve assume particular importância, não só como importante fonte de alimentação da escorrência superficial durante o degelo, mas também, através da fracturação e do

diaclasses, na recarga dos aquíferos da região, por cobrir os terrenos durante os meses de Inverno, formando por vezes um manto que chega a atingir cerca de 1m de espessura.

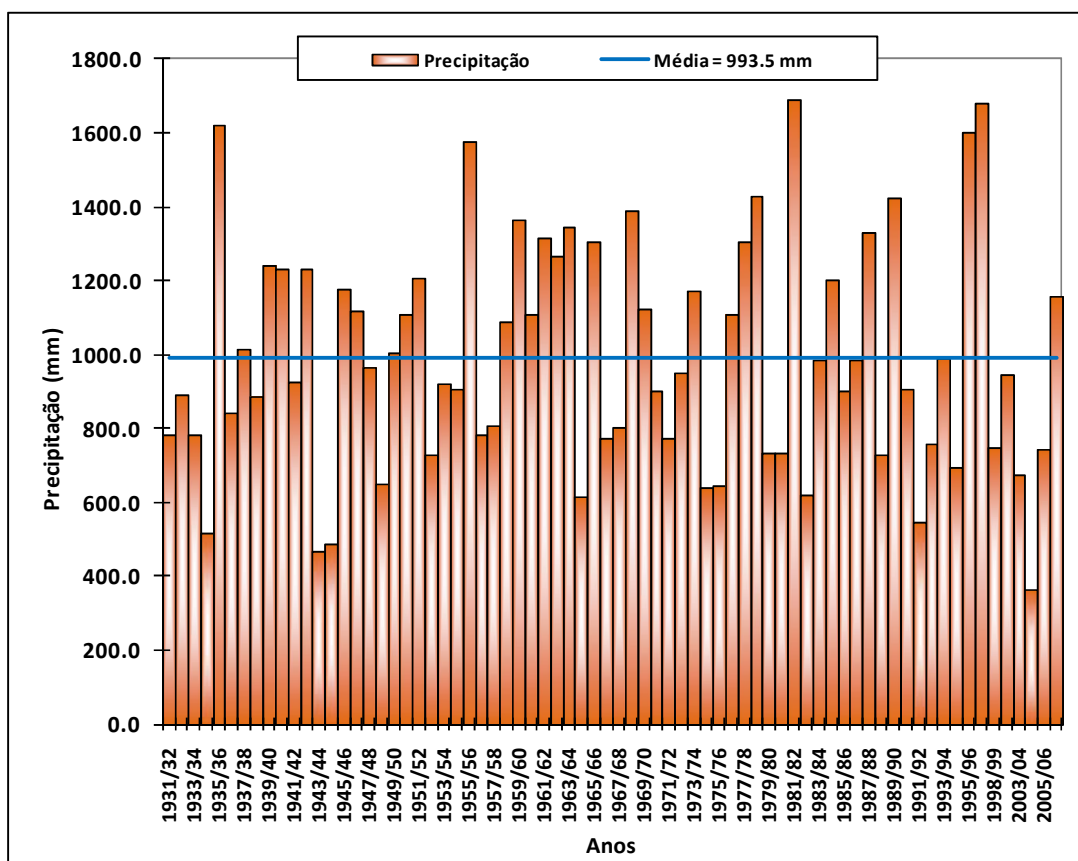


Figura 4.1. Precipitação anual a partir de valores registados na estação 13L/04UG – S. Vicente da Beira (SNIRH, 2009).

Sob o ponto de vista climático é importante referir, que no âmbito do presente trabalho, foi também considerada a evolução das temperaturas médias para a zona de estudo, pois esta variável, condiciona a evapotranspiração real e as consequentes recargas subterrâneas.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores médios mensais registados na estação climatológica de Castelo Branco. Note-se que, relativamente aos dados de temperatura foi apenas possível utilizar os disponíveis nesta estação, devido à inexistência deste tipo de dados noutras estações climatológicas próximas da zona de estudo.

Tabela 4.2. Valores de temperatura médios dos anos hidrológicos de 1931/1932 a 1959/1960 da estação meteorológica de Castelo Branco (Ferreira, 1970).

Mês	Temperatura média mensal (°C)
Janeiro	7.9
Fevereiro	9.2
Março	11.6
Abril	14.0
Maiο	16.9
Junho	21.4
Julho	24.6
Agosto	24.4
Setembro	21.5
Outubro	16.5
Novembro	11.6
Dezembro	8.4
Ano	15.6

4.1.2. Composição físico-química elementar da precipitação

O conhecimento da composição química da precipitação numa dada região, a sua distribuição espacial e a variabilidade sazonal são aspectos de maior importância em estudos hidrogeológicos, não só no que se refere às interpretações hidrogeoquímicas mas também no que respeita à avaliação quantitativa de algumas fases do ciclo hidrológico, particularmente da infiltração (Lima, 2000).

A composição química da precipitação é determinada pela fonte do vapor de água e pelos iões adquiridos ou perdidos, durante o seu transporte na atmosfera (Appelo e Postma, 1994).

Segundo Berner e Berner (1987), estas substâncias dissolvidas repartem-se, em geral, por cerca de 27% de sais marinhos transportados pelo vento, 17% de sais solúveis de sulfatos, nitratos e amónia formados por emissões gasosas naturais ou antropogénicas, e 41% de poeiras de solo e rocha. Estas percentagens podem ser muito variadas tanto no espaço como no tempo.

Os aerossóis podem ainda incluir uma pequena percentagem de fragmentos produzidos em fogos florestais, partículas derivadas da actividade agrícola, emissões antropogénicas directas e hidrocarbonetos (Langmuir, 1997).

No sentido de efectuar uma caracterização da composição química da precipitação da Serra da Gardunha analisaram-se um conjunto de 6 amostras colhidas entre 1 de Maio de 2009 e 1 de Fevereiro de 2010. Apesar do período em análise ser relativamente curto, os dados obtidos forneceram elementos essenciais para a presente investigação.

Foram colhidas amostras de água a partir de um pluviómetro, Figura 4.2, instalado na área em estudo a 770m de altitude e a 115Km de distância em linha recta da costa marítima portuguesa, a partir das quais foram determinados os seguintes parâmetros: pH, condutividade eléctrica (a 20°C), sílica, dureza, resíduo seco, mineralização total, sódio, cálcio, potássio, magnésio, ferro, azoto amoniacal, bicarbonato, cloreto, sulfato, fluoreto, nitrato e nitrito. Na Tabela 4.3 mostra-se a síntese estatística dos elementos estudados.



Figura 4.2. Pluviómetro instalado na zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga: a) Aspecto geral do pluviómetro; b) Interior do pluviómetro.

Os processos responsáveis pela mineralização da chuva recolhida são em parte complexos de identificar. Contudo, a condutividade eléctrica revela boa dependência, com factores de correlações em que (r) é superior a 0.94, em relação ao bicarbonato, azoto amoniacal e magnésio. Os valores mais elevados deste parâmetro estão associados às análises onde os períodos de ausência de precipitação são maiores. Os valores de pH são ligeiramente ácidos sendo o valor mais alto registado de 6.58.

O sódio e o cloreto detêm muito boa correlação, $r=0.96$, denunciando em parte que a precipitação da região tem uma origem predominantemente de ambiente marinho (Négrei e Roy, 1998).

Tabela 4.3. Resultados em termos de valores estatísticos básicos dos parâmetros analisados da água da chuva da zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

Parâmetro	n	Mínimo	Média	Mediana	Máximo
pH (-)	6	6.36	6.46	6.45	6.58
Cond.($\mu\text{S}/\text{cm}$)	6	12.8	16.8	14.7	25.0
Sílica (mg/l)	6	0.3	0.6	0.5	1.1
Dureza (mg/l)	6	<1.0	-	-	1.4
R.S. (mg/l)	6	6	9	9	12
Min. (mg/l)	6	8	11	10	17
Na^+ (mg/l)	6	0.71	0.86	0.87	0.95
Ca^{2+} (mg/l)	6	<0.3	-	-	<0.3
K^+ (mg/l)	6	0.31	0.50	0.52	0.65
Mg^{2+} (mg/l)	6	0.12	0.13	0.13	0.16
Fe^{2+} (mg/l)	6	<0.03	-	-	<0.03
NH_4 (mg/l)	6	0.57	1.24	0.85	2.50
HCO_3^- (mg/l)	6	3.0	5.1	4.2	8.5
Cl^- (mg/l)	6	1.1	1.4	1.5	1.6
SO_4^{2-} (mg/l)	6	0.5	0.7	0.8	1.0
F^- (mg/l)	6	<0.1	-	-	<0.1
NO_3^- (mg/l)	6	0.6	0.7	0.7	0.7
NO_2^- (mg/l)	6	0.029	0.032	0.033	0.035

Nota: Cond. = Condutividade eléctrica; R.S. = Resíduo seco a 180° ; Min. = Mineralização total

O potássio assume, em todas as amostras, uma importância considerável, superior à do magnésio. O facto de proporcionarem uma boa correlação com o sulfato, mostram desta forma, o contributo parcial dos processos continentais na mineralização das amostras de chuva analisadas.

Nas amostras estudadas verifica-se a presença de teores de azoto amoniacal, nitrito e nitrato. Os valores encontrados poderão estar em parte relacionados, para além do anteriormente referido sobre a componente associada com as emissões gasosas naturais ou antropogénicas, com algum contributo da poluição da actividade da avifauna. O

dispositivo de recolha está permanentemente aberto à atmosfera e recolhe portanto, não só a precipitação líquida como também diversas partículas sólidas, tais como poeiras e eventuais dejectos da avifauna.

Todavia, este aspecto não deve inviabilizar as interpretações a fazer até porque, como sustentam Finzi *et al.* (1991) em estudo da mesma natureza, os resultados obtidos em sistemas permanentemente abertos e sistemas selectivos são comparáveis.

4.1.3. Balanço hidrológico sequencial mensal

Para o cálculo do balanço hidrológico sequencial mensal, utiliza-se a metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1957, *in* Lencastre e Franco, 1992), utilizando a equação 4.1:

$$P - (ETR + \Delta S_{so}) = R + \Delta S_s + G + \Delta S_{sso} \text{ (mm)} \quad (4.1)$$

em que:

P - precipitação;

ETR - evapotranspiração real;

R - escoamento superficial;

G - escoamento subterrâneo;

ΔS_s - variação do armazenamento de água à superfície;

ΔS_{so} - variação do armazenamento de água no solo arável;

ΔS_{sso} - variação do armazenamento de água no subsolo.

Os resultados do balanço hidrológico sequencial mensal encontram-se na Tabela 4.4, e em termos gráficos na Figura 4.3.

Tabela 4.4. Balanço hidrológico mensal para a zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

Termo	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
P	136.7	115.1	106.1	77.6	71.8	31	10.9	10.4	48.2	107	139.6	139.1	993.5
ETP^(*)	15.5	22	35.4	53.1	78.3	119	146.3	135	99.8	58.7	29.7	16.7	809.5
P-ETP	121.2	93.1	70.7	24.5	-6.5	-88	-135.4	-124.6	-51.6	48.3	109.9	122.4	184.0
L					-6.5	-94.5	-229.9	-354.5	-406.1				
Ss_o^(**)	100	100	100	100	93.5	5.5	0	0	0	48.3	100	100	
ΔSs_{oi}	0	0	0	0	-6.5	-88	-5.5	0	0	48.3	51.7	0	
ETR	15.5	22	35.4	53.1	78.3	119	16.4	10.4	48.2	58.7	29.7	16.7	503.4
DH	0	0	0	0	0	0	129.9	124.6	51.6	0	0	0	306.1
SH	121.2	93.1	70.7	24.5	0	0	0	0	0	0	58.2	122.4	490.1

Notas: P - precipitação; ETP - evapotranspiração potencial; L - perda de potencial de água em cada intervalo de tempo do período seco; Ss_o - armazenamento de água que fica no solo de capacidade utilizável pelas plantas; ΔSs_{oi} - variação de armazenamento de água; ETR - evapotranspiração real; DH - déficit hídrico; SH - superavit hídrico. Todos os termos têm as unidades em mm.

(*) ETP calculada pelo método de Thornthwaite (Lencastre e Franco, 1992).

(**) Admite-se que n_u se encontra integralmente satisfeito no início do período seco, ou seja, Ss_o=100mm, em Maio.

Dos resultados do balanço hidrológico verifica-se a ocorrência de um período seco e um período húmido; o primeiro é traduzido pelos défices hídricos (DH), que vai de Julho a Setembro; o segundo, o período húmido, traduzido pelo superavit hídrico (SH), que vai de Novembro a Abril, verificando-se o excesso máximo de água, em Dezembro.

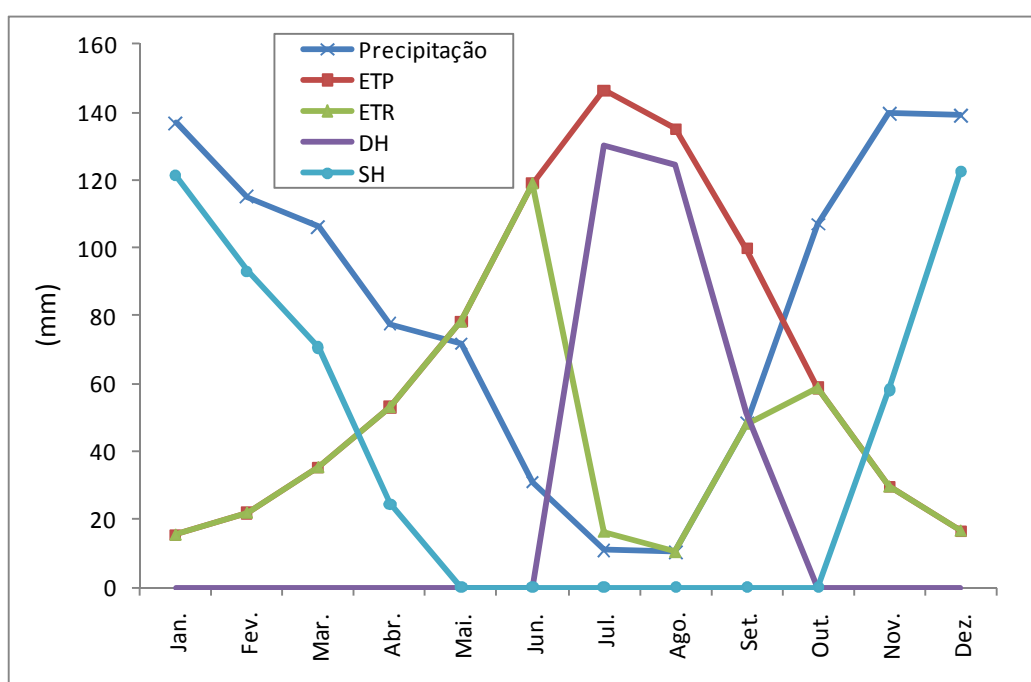


Figura 4.3. Expressão gráfica do balanço hidrológico para a zona do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. ETP é a evapotranspiração potencial; ETR é a evapotranspiração real; DH é o déficit hídrico; SH é o superavit hídrico.

Segundo Custódio e Llamas (2001) a recarga aquífera, avaliada com base em balanços sequenciais mensais, utiliza os valores de superavit hídrico, que corresponde ao escoamento total. Subtraindo a parte relativa ao escoamento estritamente superficial, a fracção remanescente equivale à recarga aquífera.

Naturalmente que esta metodologia está repleta de incertezas, desde o cômputo da precipitação até à estimativa da evapotranspiração potencial e real, passando pela definição do armazenamento máximo do solo. No entanto, e para termo de comparação, no item 4.2.1 realiza-se a estimativa da recarga aquífera efectuada com base em balanços hídricos mensais.

4.2. Recarga Aquífera

A recarga das águas subterrâneas é um factor determinante nos estudos hidrogeológicos e na gestão das extracções de água subterrânea, tendo em vista a definição de um valor de extracção seguro (em termos de manutenção, a longo prazo, da quantidade e da qualidade da água), sendo este aspecto um dos requisitos da Directiva-Quadro da Água (Mendes Oliveira, 2006).

Existem diversas formas de recarga aquífera sendo as mais comuns: a infiltração da água da chuva, a infiltração a partir de cursos de água e de outros corpos hídricos superficiais, a infiltração da água de rega e/ou da acção humana (recarga artificial).

Cada forma de recarga pode ser quantificada por diversos métodos, os quais são possíveis de agrupar da seguinte forma (Lerner *et al.*, 1990):

- i) medições directas;
- ii) métodos de balanço hidrológico;
- iii) métodos baseados na lei de Darcy;

iv) técnicas envolvendo traçadores;

v) fórmulas empíricas.

No presente trabalho, a quantificação da recarga de águas subterrâneas é feita pela análise do balanço hidrológico, método envolvendo os traçadores naturais de cloretos e pela análise dos hidrogramas de nascentes.

4.2.1. Recarga aquífera a partir do balanço hidrológico

Considerando os resultados do balanço hidrológico apresentado no item 4.1.3, e assumindo o valor de coeficiente de escoamento superficial médio de $c=37\%$, obtido por Lima (2000) para a região do Minho onde predominam formações ígneas e metamórficas com características morfológicas idênticas à presente área de estudo, obtém-se o valor de escoamento superficial (E_s) de 181.3 mm/ano. Uma vez que é a partir dos excedentes (superavit hídrico - SH) que existe recarga subterrânea e ou escoamento superficial, é possível estabelecer a seguinte relação (Eq. 4.2.):

$$SH = E_s + E_{sub} \quad (4.2)$$

em que:

SH - superavit hídrico;

E_s - escoamento superficial;

E_{sub} - escoamento subterrâneo.

Assim, o volume de excedentes que se infiltra para recarregar o aquífero (E_{sub}) corresponde a 308.8 mm/ano o que equivale a 31% da precipitação anual.

A descrição da aplicação desta metodologia pode ser consultada, por exemplo, em Lima (2000) e em Lencastre e Franco (1984).

4.2.2. Recarga aquífera a partir do balanço de cloretos

A recarga aquífera pode ser estimada a partir de traçadores químicos, como o ião cloreto, que é produzido naturalmente na atmosfera terrestre. O ião cloreto tem a vantagem de ser facilmente mensurável e de ser, normalmente, um ião estável na água subterrânea (Marques da Costa, 2008).

O balanço do ião cloreto é dado pela Equação 4.3 (Custódio e Llamas, 2001):

$$\frac{I}{1000} C_i = \frac{(P-E_s)}{1000} C_p + a_s - a_v + a'_v \quad (4.3)$$

em que:

I - infiltração (mm);

P - precipitação (mm);

C_i - teor de cloretos nas águas subterrâneas (mg/l);

C_p - teor de cloretos na água da chuva (mg/l);

E_s - escoamento superficial (mm);

a_s - quantidade de cloretos lixiviados do solo ou de origem artificial (g/m²/ano);

a_v - retenção de cloretos pela vegetação (g/m²/ano);

a'_v - devolução de cloretos pela decomposição da vegetação que morre (g/m²/ano);

O coeficiente de infiltração pode ser calculado pela Equação 4.4. (Custódio e Llamas, 2001):

$$\frac{I}{P} = \left(1 - \frac{E_s}{P}\right) \frac{C_p}{C_i} + 1000 \frac{a_s - a_v + a'_v}{P C_i} \quad (4.4.)$$

Considerando nula a quantidade de cloretos lixiviados do solo ou introduzidos artificialmente (a_s=0) e que existe equilíbrio entre formação e decomposição de matéria orgânica (a_v = a'_v), a expressão toma a forma (Eq. 4.5.):

$$\frac{I}{P} = \left(1 - \frac{E_s}{P}\right) \frac{C_p}{C_i} \quad (4.5.)$$

Assumindo o valor anteriormente apresentado de 0.37 para o coeficiente escoamento superficial médio, e os teores médios de cloreto na água da chuva e da água subterrânea (Tabela 4.3 e 4.9, respectivamente), o valor da recarga aquífera regional para a Serra da Gardunha, considerando ainda o valor de precipitação média anual de 993.5mm, rondará 34% da precipitação ($E_{sub}=0.34P$).

Este valor, aparentemente elevado mas que é concordante com o estimado no balanço hidrológico sequencial mensal, é semelhante ao obtido por Fernandes (1992; 1995) na região de Trás-os-Montes interior, onde predominam formações metamórficas. O autor, também com base em balanço de cloretos, determina taxas de recarga aquífera que variam entre 30% e 37% da precipitação média anual. Lima (2000) na região do Minho obtém taxas de recarga aquífera que, de acordo com a metodologia utilizada, variam entre 26.1% nas terras altas da Serra do Gerês e 36.9%, em Melgaço.

4.2.3. Recarga aquífera a partir de hidrogramas

A análise das curvas de recessão dos hidrogramas, especialmente nos períodos não influenciados por fenómenos de recarga, permite caracterizar as propriedades do aquífero dado que as expressões que descrevem o esgotamento estão relacionadas com parâmetros tais como a geometria, a transmissividade e o coeficiente de armazenamento (Bear, 1979).

Segundo Custódio e Llamas (2001), este processo físico de libertação da água subterrânea pode ser matematicamente representada por uma equação exponencial (Eq.4.6):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (4.6)$$

onde,

- Q_t , caudal da nascente no instante t (m^3/dia);
- Q_0 , caudal da nascente no início da recessão (m^3/dia);

- α , coeficiente de esgotamento da nascente, que depende das características geométricas e dos parâmetros S e T do aquífero (dia^{-1});
- t, tempo decorrido desde o início da recessão.

Segundo os mesmos autores, α corresponde a (Eq. 4.7):

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4 S L'^2} \quad (4.7)$$

sendo:

- T, transmissividade do aquífero (m^2/dia);
- S, coeficiente de armazenamento;
- L', extensão do aquífero (m).

O volume de água armazenado (V_0) pode ser calculado através da Equação 4.8 (Custódio e Llamas, 2001):

$$V_0 = \int_0^\infty Q dt = \int_0^\infty Q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (4.8)$$

onde:

- Q_0 , corresponde ao caudal no início da recessão,
- α , corresponde coeficiente de esgotamento, o qual é definido pelo declive da recta de regressão.

Considerando a área da bacia, é possível calcular a quantidade de água infiltrada (I), ou seja (Eq. 4.9):

$$I = \frac{V_0}{A} \quad (4.9)$$

sendo:

- V_0 , volume de água armazenado (m^3),
- A, área de bacia hidrográfica inerente à captação (m^2).

Segundo Schoeller (1965, *in* Sousa Oliveira, 2001), os valores de α da ordem de 10^{-3} associam-se a escoamentos que se processam fundamentalmente em fracturas,

enquanto que valores da ordem de 10^{-2} , ou superiores, caracterizam escoamentos de aquíferos mais permeáveis.

Os pontos de água seleccionados para a monitorização da produtividade, neste trabalho, correspondem a uma nascente (C1) e três furos semi-horizontais (C2, C3 e C6). Os respectivos dados de caudal utilizados encontram-se representados no Anexo I. O período em análise equivale ao intervalo anual de 2002 a 2006 e os dados de precipitação são os apresentados para a estação meteorológica 13L/04UG - S. Vicente da Beira (SNIRH, 2009).

A Figura 4.4, representa a projecção dos valores de precipitação e caudal monitorizado *versus* tempo. Desta, em termos gerais, observa-se que em cada ano existe um período de decréscimo de caudal que se inicia aproximadamente em Abril e que termina por meados de Outubro. Pode verificar-se também, a fraca precipitação registada no ano hidrológico de 2004/05, ano com uma precipitação muito abaixo do normal, o qual se traduz num decréscimo contínuo de caudal das captações ao longo de todo o ano hidrológico, não existindo deste modo um período de recarga.

Sobre a resposta das captações aos eventos pluviosos, observa-se que no geral, não existe uma resposta súbita de produtividade após cada evento. É provável que a maior parte da recarga destas captações se processe a partir de facturas mais profundas, não estando assim expostas directamente à superfície.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, procedeu-se à análise individual de cada ano com a projecção em gráfico dos pares de valores “ln caudal versus tempo”.

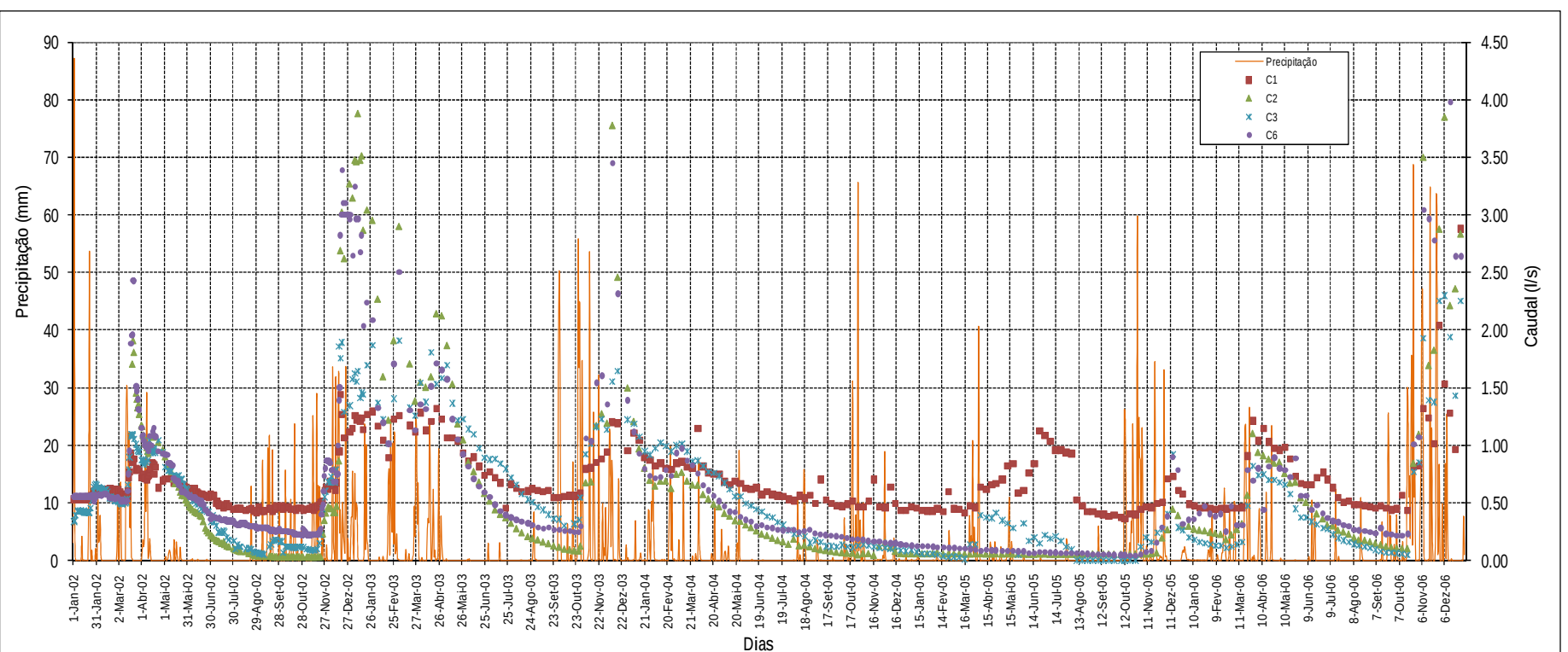


Figura 4.4. Projeção dos valores de precipitação e caudal monitorizado ao longo dos anos de 2002 a 2006, em alguns pontos de água do aquífero da Fonte da Fraga.

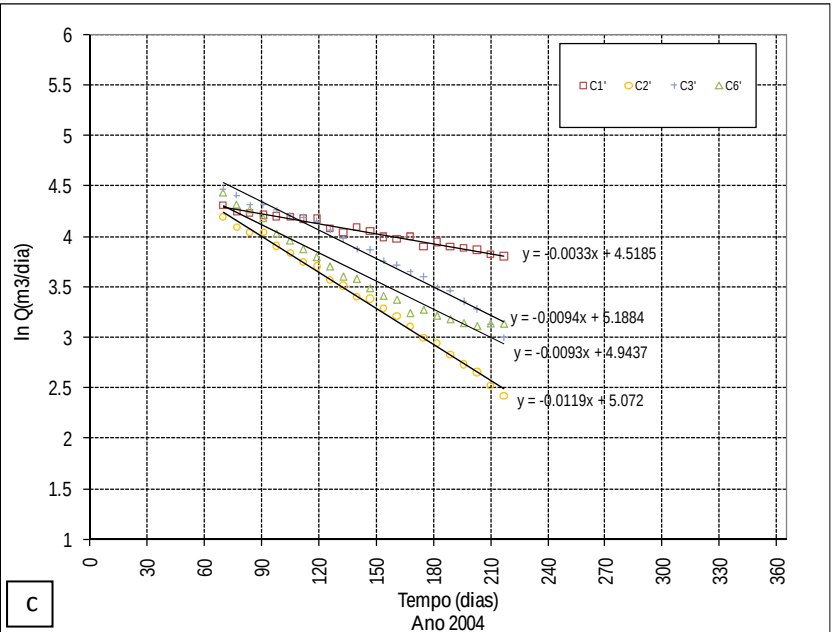
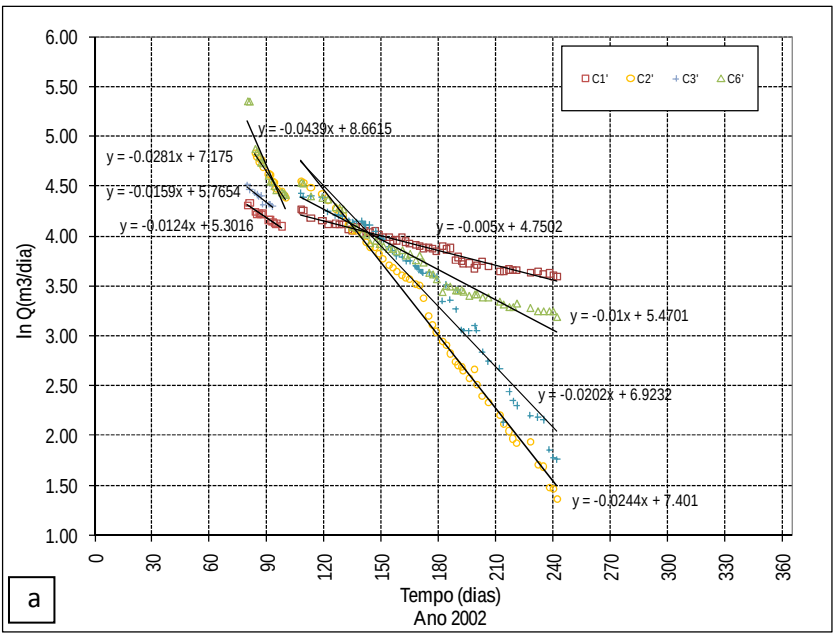
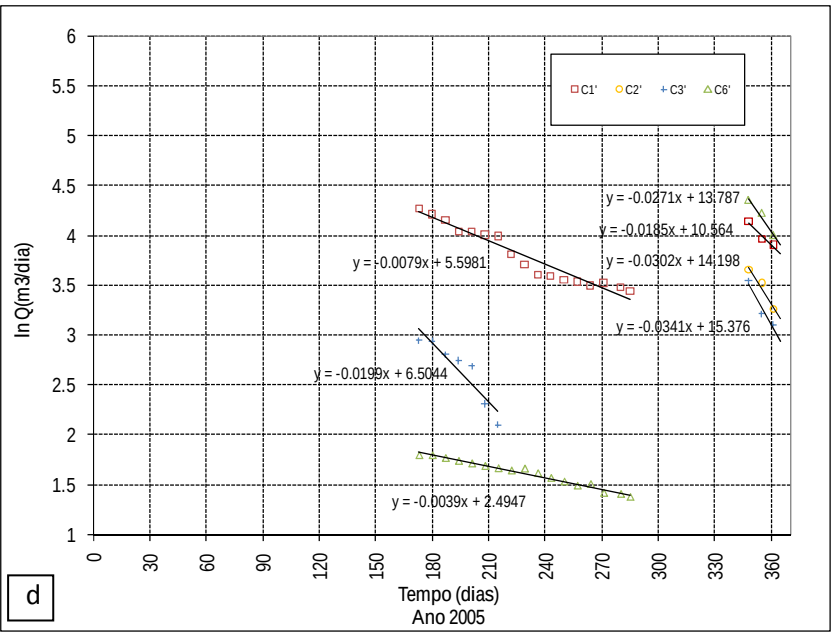
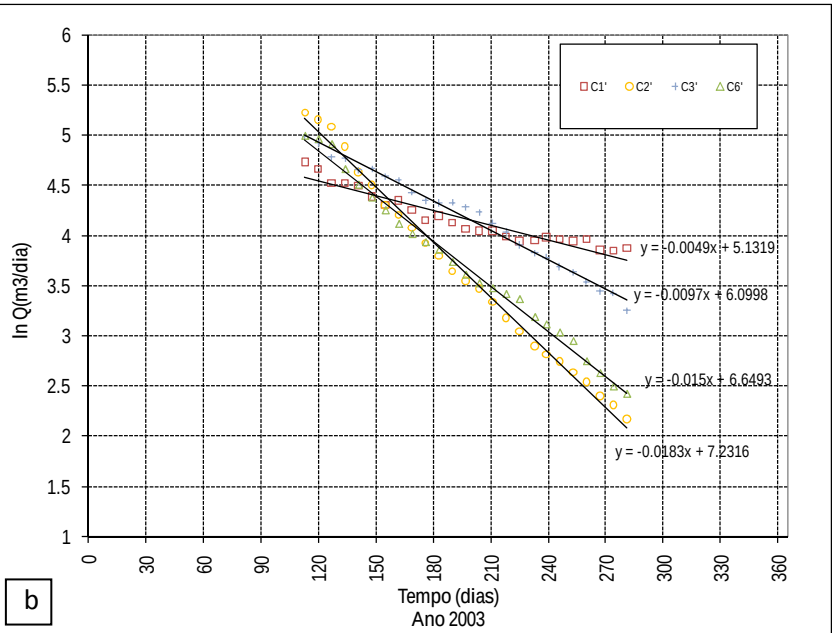


Figura 4.5. Períodos de recessão ao longo dos vários anos: a) ano de 2002; b) ano de 2003; c) ano de 2004; d) ano de 2005, para alguns pontos de água do aquífero da Fonte da Fraga.

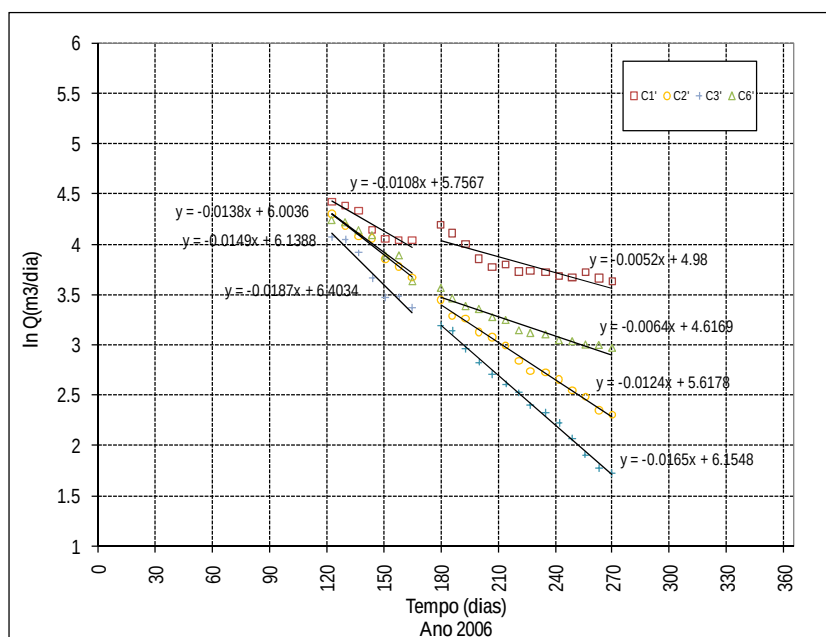


Figura 4.6. Períodos de recessão ao longo do ano 2006, para alguns pontos de água do aquífero da Fonte da Fraga.

Os dados referentes ao período de recarga de cada curva de recessão não são apresentados por questões de melhor leitura em termos gráficos. No entanto, na Tabela 4.5 encontra-se representado o valor total, em mm, de precipitação que contribuiu para a recarga de cada episódio de recessão.

Dos elementos expostos, verifica-se que o valor médio de taxa de infiltração em relação à precipitação é de 15%, sendo o ponto de água C1 o que apresenta o valor mais elevado, em todos os anos.

Os valores obtidos, menores que os estimados pelo métodos do balanço hidrológico sequencial mensal e do balanço de cloretos, entendem-se serem mais próximos da realidade tendo em conta as características geológicas e geomorfológicas da região.

Sobre os coeficientes de esgotamento observa-se que existe uma distinção em termos de comportamento gráfico. Verifica-se que em C1 aquele coeficiente tende para valores da ordem de grandeza 10^{-3} e no conjunto dos restantes pontos de água, nomeadamente C2, C3 e C6, os coeficientes tendem para valores de ordem de grandeza 10^{-3} a 10^{-2} , orientando assim a possível drenagem num meio mais permeável.

Tabela 4.5. Resultados hidrológicos nos períodos de recessão ao longo dos vários anos, para alguns pontos de água do aquífero da Fonte da Fraga.

.Ano	Período de recessão	Nº de dias de recessão	Ponto de água (*)	Coefficiente de esgotamento	Q ₀ (m ³ /d)	Precipitação (mm)	Taxa infiltração (%)	Média da taxa de infiltração (%)
2002	21/3 a 10/4	21	C1	1.2X10 ⁻⁰²	73.9	400.3	19	17
			C2	2.8X10 ⁻⁰²	125.6		14	
			C3	1.6X10 ⁻⁰²	93.6		19	
			C6	4.4X10 ⁻⁰²	210.2		15	
	18/4 a 30/8	135	C1	5.0X10 ⁻⁰³	71.4	488.3	37	21
			C2	2.4X10 ⁻⁰²	94.3		10	
			C3	2.0X10 ⁻⁰²	83.7		11	
			C6	1.0X10 ⁻⁰²	93.5		24	
2003	23/4 a 8/10	169	C1	4.9X10 ⁻⁰³	113.7	944.1	31	20
			C2	1.8X10 ⁻⁰²	184.9		14	
			C3	9.7X10 ⁻⁰³	146.0		20	
			C6	1.5X10 ⁻⁰²	147.7		13	
2004	10/3 a 4/8	148	C1	3.3X10 ⁻⁰³	74.0	753.4	38	19
			C2	1.2X10 ⁻⁰²	66.1		9	
			C3	9.4X10 ⁻⁰³	87.3		16	
			C6	9.3X10 ⁻⁰³	83.9		15	
	22/6 a 12/10	113	C1	7.9X10 ⁻⁰³	97.3	402.2	39	16
	22/6 a 3/8	43	C3	2.0X10 ⁻⁰²	19.0		3	
	22/6 a 12/10	113	C6	3.9X10 ⁻⁰³	6.0		5	
2005	14/12 a 31/12	18	C1	1.9X10 ⁻⁰²	62.9	319.2	13	8
			C2	3.0X10 ⁻⁰²	38.7		5	
			C3	3.4X10 ⁻⁰²	34.6		4	
			C6	2.7X10 ⁻⁰²	77.6		11	
2006	3/5 a 14/6	43	C1	1.1X10 ⁻⁰²	82.8	601.3	16	11
			C2	1.5X10 ⁻⁰²	73.8		10	
			C3	1.9X10 ⁻⁰²	58.4		7	
			C6	1.4X10 ⁻⁰²	69.1		11	
	29/6 a 27/9	91	C1	5.2X10 ⁻⁰³	66.0	625.6	26	11
			C2	1.2X10 ⁻⁰²	31.3		5	
			C3	1.7X10 ⁻⁰²	24.4		3	
			C6	6.4X10 ⁻⁰³	35.3		11	

Notas: área drenante de 0.28 km²; (*) a caracterização detalhada dos vários pontos de água é efectuada no item 4.5.

Ainda, sobre a estimativa de recarga em terrenos fracturados refere-se que Lima e Silva (1995) em trabalhos desenvolvidos na região de Braga, admitem uma taxa de infiltração média de 18%; Lima (2000) considera um valor de coeficientes de esgotamento de 1.6×10^{-2} para quatro nascentes situadas na região do Gerês; Sousa Oliveira (2001) em trabalhos desenvolvidos na região de Mirandela e Vinhais considera coeficientes de esgotamentos de 1.5×10^{-3} e 1.6×10^{-3} respectivamente; Mendes (2006) para a vertente oriental da Serra da Estrela admite uma taxa de infiltração média de 15% e valores de coeficiente de esgotamentos de 1.1×10^{-2} .

4.3. Hidrodinâmica

Para a caracterização do funcionamento hidrogeológico da área em estudo, recorreu-se, além da monitorização da produtividade de alguns pontos de água (apresentada no item anterior) à análise e interpretação de ensaios de caudal.

Os ensaios de caudal constituem a metodologia mais usual de caracterização das captações e dos aquíferos onde estão implantadas, designadamente na avaliação dos respectivos parâmetros hidráulicos.

Interpretar um ensaio de caudal é, na opinião de Kruseman e De Ridder (1990), mais arte que ciência, uma vez que a experiência e a “sensibilidade” do investigador são aspectos determinantes no processo. Em terrenos graníticos este aspecto é de sobremaneira importante dada a complexidade dos mesmos que advém da heterogeneidade e anisotropia comum nestes meios.

Os dados tratados neste trabalho correspondem aos resultados de ensaios de caudal efectuados em três furos de pesquisa verticais e que foram realizados pelas respectivas empresas construtoras.

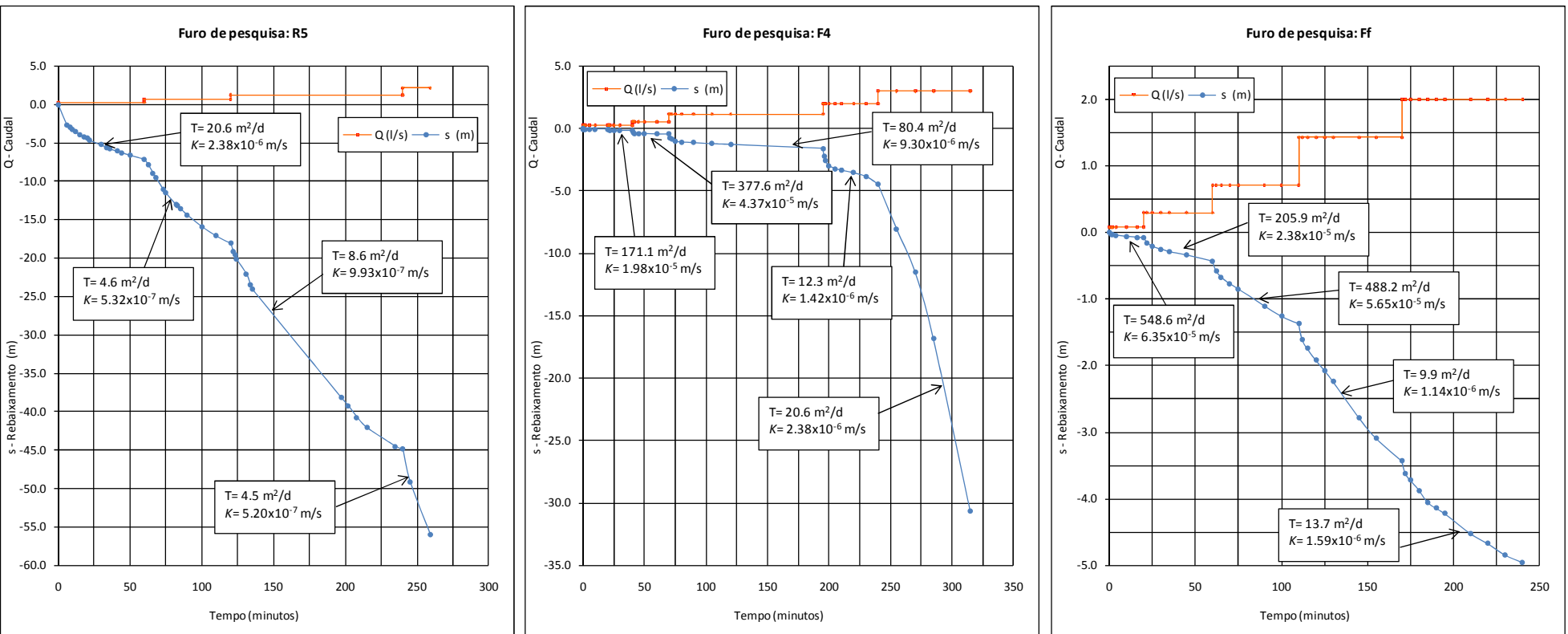
Entendeu-se que, além da reprodução dos valores de cada ensaio se deveria calcular os respectivos valores de transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, visto que pelas empresas construtoras só foi efectuado o cálculo do caudal máximo admissível de cada furo de pesquisa.

Os ensaios de caudal efectuados correspondem a ensaios escalonados, sendo deste modo o caudal variável ao longo do tempo.

Assim, na Figura 4.7 estão representados os valores dos ensaios realizados nos furos de pesquisa R5, F4 e Ff. Ainda nesta figura é possível visualizar os valores de transmissividade e condutividade hidráulica obtidos em cada patamar de cada ensaio de caudal.

Para uma melhor compreensão da distribuição geográfica destes furos de pesquisa, é apresentada na Figura 4.9 a sua localização na área de estudo.

Figura 4.7. Resultados dos ensaios de caudal efectuados nos três furos de pesquisa vertical e respectivos valores de transmissividade de condutividade hidráulica obtidos em cada patamar de ensaio.



Para a interpretação de cada ensaio, admitiu-se um aquífero livre, num modelo contínuo e equivalente a um meio poroso e aplicando o Método de Jacob (Freeze e Cherry, 1979) em regime transitório, considerando ainda a zona produtiva de cada captação de 30m, obtiveram-se, como valores médios de transmissividade 9.6, 132.4 e 253.2m²/d e de condutividade hidráulica 1.11×10^{-6} , 1.53×10^{-5} e 2.93×10^{-5} m/s respectivamente, para os furos de pesquisa R5, F4 e Ff.

Refere-se, que não foi possível estimar os valores de coeficiente de armazenamento devido à inexistência de dados de observação da evolução dos níveis freáticos em piezómetros ou outros furos de pesquisa relativamente próximos.

Ainda, no âmbito da caracterização hidráulica deste tipo de maciço, merece referência o trabalho de Carvalho *et al.* (2004), cujas investigações realizadas, ao analisar os resultados de um grande número de ensaios de caudal, conduziram a uma caracterização da transmissividade da ordem de 4.8 a 466.7 m²/d.

Espinha Marques *et al.* (2009) para uma área da Serra da Estrela com características geológicas e geomorfológicas muito idênticas à do presente estudo obtêm valores de condutividade hidráulica da ordem de 1.75×10^{-5} m/s.

4.4. Unidades Hidrogeológicas

Em termos de sectores hidrogeológicos, na região em estudo que se relaciona directamente com o sistema aquífero da Fonte da Fraga, consideram-se três unidades distintas, e que são as seguintes:

- Unidade A - Depósitos de vertente, de permeabilidade do tipo intersticial geralmente alta. Poderá apresentar espessuras que variam entre 10 cm a 5 m;
- Unidade B - Granitóides e Corneanas, de permeabilidade geralmente do tipo fissural e pontualmente intersticial. Caracterizam-se em termos médios por uma permeabilidade baixa; em locais de granito decomposto (W5) e em zonas muito

fracturadas a permeabilidade pode ser pontualmente alta e elevada, respectivamente. A zona mais produtiva desta unidade encontra-se até à profundidade de 100m. Depois desta cota as fracturas são esporádicas e muito fechadas inviabilizando assim a exploração de água a maiores profundidades;

- Unidade C - Rochas xistentas do Complexo Xisto-Grauváquico, de permeabilidade do tipo fissural, geralmente muito reduzida, podendo atingir espessuras muito elevadas.

Segundo UBI (2006a), a Unidade A constitui um aquífero livre, sem importância em termos de armazenagem de água, uma vez que é pouco espesso e perde a água quase na totalidade em época do período seco. A Unidade B constitui um aquífero livre com condutividade hidráulica (K) média da ordem de 10^{-5} m/s e um coeficiente de armazenamento (S) da ordem de 10^{-3} . A Unidade C funciona como barreira impermeável, facilitando a emergência da água subterrânea.

A relação entre as várias unidades hidrogeológicas está patente na Figura 4.8. Refere-se no entanto, que nesta figura não é apresentada a Unidade A devido à sua reduzida espessura.

As águas da precipitação são infiltradas nas áreas de cotas acima de 730m, em terrenos graníticos e pontualmente (devido à sua pequena representatividade) em terrenos dos depósitos de vertente; 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 e em particular a Unidade B. Entretanto, o fluxo descendente na Unidade B, encontra a Unidade C, rochas xistentas, e ressurge no seu contacto, pois estas rochas além de serem quase impermeáveis, apresentam atitude geral de xistosidade de $N10^{\circ}E, 90^{\circ}$ (planos aproximadamente perpendiculares à direcção do fluxo), funcionando como uma barreira aos fluxos que descem a Serra nas áreas dos granitóides.

As ressurgências de maior potencial, na zona de estudo, situam-se nas proximidades da cota 710m. Alguns fluxos que não chegam a ressurgir nesta área, migram junto ao

contacto corneanas/xistos, de norte para sul, de modo a ressurgirem na linha de água da Senhora da Orada.

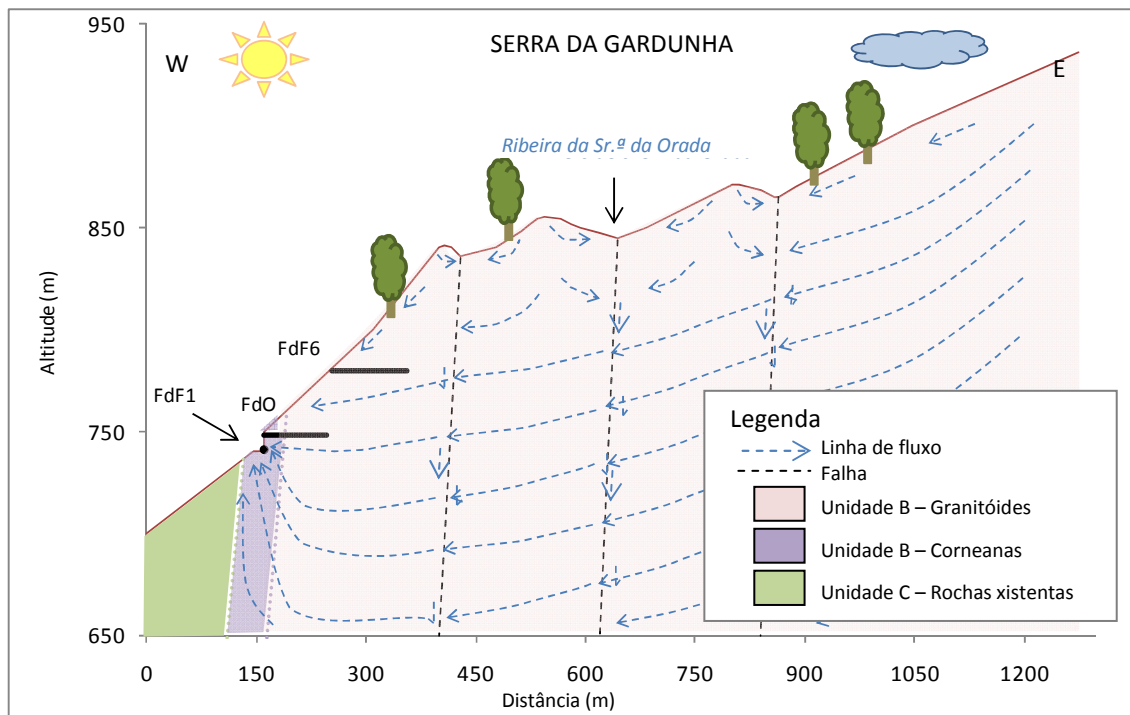


Figura 4.8. Esboço do modelo conceptual da zona dos pontos de água da Fonte da Fraga (adaptado de Ferreira Gomes *et al.*, 2008).

4.5. Pontos de Água

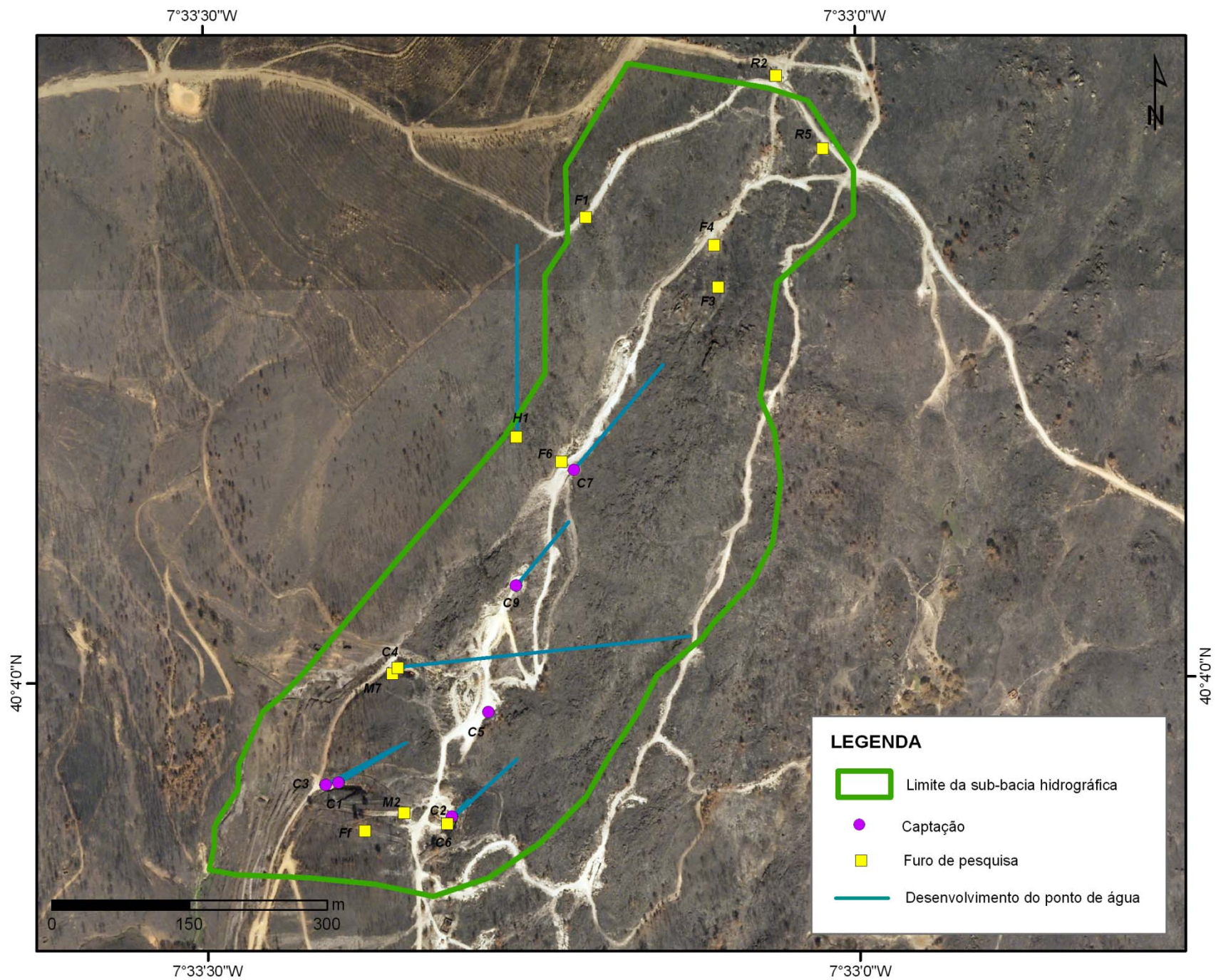
No sentido de efectuar uma caracterização dos pontos de água existentes na área de estudo, entendeu-se dividir as mesmas em duas categorias: captações e furos de pesquisa.

Na Figura 4.9, é visível a distribuição dos pontos de água na área de estudo.

4.5.1. Captações

As captações correspondem aos principais pontos de água onde se disponibiliza um maior número de informação de natureza construtiva ou mesmo de elementos qualitativos e quantitativos da água captada, encontrando-se estas legalizadas na Direcção de Geral de Energia e Geologia (DGEG).

Figura 4.9. Localização dos principais pontos de água existentes na área de estudo - Sector SW da Serra da Gardunha.



As captações principais na área em estudo correspondem: 1 nascente, 1 dreno e 4 furos semi-horizontais. As principais características podem ser observadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Principais características das captações do aquífero Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.

Designação	Tipo	Coordenadas da boca da captação			Comprimento (m)	Direcção	Cota do NF ^(*) (m)	Litologia
		M (m)	P (m)	Cota (m)				
FdF1 ou C1	Nascente	249079	344462	735	-	-	735	Contacto corneanas/granitóides
FdF2 ou C2	Furo semi-horizantal	249199	344419	771	25	N45°E	771	Granitóides
FdF3 ou C3	Furo semi-horizantal	249064	344460	729	85	N60°E	729	Xistos mosqueados (0 a 40m) Corneanas (40 a 71m) Granitóides (71 a 85m)
FdF5 ou C5	Dreno	249242	344540	794	25	N82°E	794	Granitóides
FdF7 ou C7	Furo semi-horizantal	249335	344804	865	150	N39°E	865	Granitóides
FdF9 ou C9	Furo semi-horizantal	249272	344678	817	90	N39°E	817	Granitóides

NF = nível freático; (*) nas captações horizontais, considera-se a profundidade do NF, como aquela que corresponde ao ponto em planta da captação em que foi detectado o NF, aquando da sua construção.

4.5.2. Furos de pesquisa

Os furos de pesquisa são aqueles cuja natureza informativa é relativamente escassa, funcionando também como pontos de observação ou nos casos onde existe algum potencial de exploração, encontram-se em fase de estudos ou pesquisas. Ocorrem também situações em que esses pontos já não existem devido ao facto de aquando da sua construção não apresentarem grandes produtividades tendo sido neutralizados. Assim, considerando o exposto sobre estes pontos de água, encontram-se na área em estudo 3 furos semi-horizontais e 9 furos verticais. As suas principais características podem ser observadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Principais características dos furos de pesquisa da zona de estudo – área do aquífero Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.

Designação	Tipo	Coordenadas da boca da captação			Comp. ou Prof. (m)	Direcção	Cota do NF ^(*) (m)	Litologia
		M (m)	P (m)	Cota(m)				
H1	Furo semi-horizontal	249272	344839	818	210	N-S	818	Granitóides (0 a 185m) Xistos mosqueados (185 a 210m)
M2	Furo vertical	249149	344428	760	62	-	<698	Granitóides (0 a 62m)
M7	Furo vertical	249138	344580	750	100	-	722	Xistos mosqueados (0 a 19m) Corneanas (19 a 100m)
R2	Furo vertical	249555	345233	950	70	-	938	Granitóides (0 a 70m)
R5	Furo vertical	249606	345153	952	60	-	907	Granitóides (0 a 60m)
F1	Furo vertical	249348	345078	954	181	-	859	Granitóides (0 a 181m)
F3	Furo vertical	249492	345003	935	103	-	<832	Granitóides (0 a 103m)
F4	Furo vertical	249488	345048	934	70	-	894	Granitóides (0 a 70m)
F6	Furo vertical	249321	344812	863	103	-	<760	Terra Vegetal (0 a 3m) Granitóides (3 a 103m)
Ff	Furo vertical	249107	344410	750	160	-	728	Granitóides (0 a 160m)
C4	Furo semi-horizontal	249143	344588	751	319	N84°E	751	Corneanas (0 a 3m) Granitóides (3 a 319m)
C6	Furo semi-horizontal	249203	344425	770	103	N48°E	770	Granitóides (0 a 103)

NF = nível freático; (*) nos furos horizontais, considera-se a profundidade do NF, como aquela que corresponde ao ponto em planta da captação em que foi detectado o NF, aquando da sua construção. Nas situações de furos secos (em furos horizontais), considera-se como profundidade do NF, aquela que é igual ou superior à profundidade do ponto mais a montante do furo.

4.6. Hidroquímica

4.6.1. Caracterização hidroquímica clássica

O conhecimento detalhado da composição química típica de uma água à saída da captação é fundamental para o estudo e compreensão do seu quimismo e imprescindível para a despistagem de indícios de poluição ambiental e de fenómenos de degenerescência e evolução química (Machado, 1999).

Com o objectivo de caracterizar o ambiente hidrogeológico da área em estudo procedeu-se à análise dos elementos físico-químicos existentes nos arquivos da Beira Vicente. Entretanto, refere-se que alguns elementos sobre este item foram apresentados em Mendes *et al.* (2010a, 2010b).

A informação analisada corresponde a 7 pontos de água, Tabela 4.8, os quais perfazem um total de 298 análises de elementos maiores e 7 análises de elementos menores.

Os boletins analíticos foram efectuados no Laboratório de Análises do Instituto Superior Técnico. Os métodos analíticos utilizados para a determinação dos diferentes parâmetros consistiram em: potenciometria (POT) para a determinação do pH; condutimetria (COND) para a determinação da condutividade eléctrica; cromatografia iónica (CI) para a determinação do sódio, cálcio, potássio, magnésio, cloro, sulfato, fluoreto, nitrato; volumetria-potenciometria (VOL-POT) para a determinação do bicarbonato; emissão por plasma (ICP) para a determinação do ferro, bário, estrôncio, manganês, vanádio; espectrofotometria de absorção molecular (EAM) para determinação da sílica; gravimetria (GRAV) para a determinação do resíduo seco a 180º; espectrofotometria de absorção atómica em câmara de grafite (AA-CG) para a determinação da prata, alumínio, cádmio, cobalto, crómio, cobre, molibdénio, níquel, chumbo; espectrofotometria de absorção atómica a vapor frio (FIAS) para a determinação do mercúrio; espectrofotometria de absorção atómica em gerador hidretos (AA-GH) para a determinação do antimónio, selénio e espectrofotometria de absorção atómica em chama (AA-C) para a determinação do zinco.

Tabela 4.8. Síntese informativa sobre as análises estudadas da água do aquífero Fonte da Fraga.

Pontos de água	Período	Nº análises elementos maiores	Nº análises elementos menores
C1	26/4/1994 a 25/6/2008	45	1
C2	26/4/1994 a 25/6/2008	45	1
C3	12/1/2000 a 25/6/2008	43	1
C5	23/1/2002 a 25/6/2008	61	1
C6	23/1/2002 a 19/6/2006	34	1
C7	23/1/2002 a 25/6/2008	42	1
C9	18/5/2005 a 25/6/2008	28	1

O estudo hidroquímico que se passa de seguida a apresentar, terá por base o tratamento em conjunto de toda a informação recolhida, uma vez que o estudo individual de cada ponto de água orienta para a presença do mesmo tipo de águas em todos os pontos estudados.

Assim, a Tabela 4.9 representa os resultados da análise estatística dos elementos maiores e parâmetros físico-químicos estudados.

Em termos gerais, pode-se referir que a composição química da água subterrânea reflecte, por um lado, a composição da água da chuva, e por outro, o resultado das reacções químicas entre a água que se infiltra, os minerais, a matéria orgânica e os gases presentes no solo, zona não saturada e saturada do aquífero.

Da observação da Tabela 4.9, verifica-se que as águas possuem reacção levemente ácida, variando o pH entre 5.59 e 6.66, são doces e brandas possuindo uma dureza (CaCO_3) inferior a 13 mg/l. No respeitante à mineralização total, as águas são hipossalinas, tendo ainda um valor de resíduo seco a 180°C igual ou inferior a 46 mg/l.

Sob o ponto de vista químico, a sua composição relativa pode ser expressa por ordem decrescente de importância, sob a forma $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ para os catiões e $\text{HCO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ para os aniões. Evidenciam-se ainda as reduzidas concentrações de ferro, fluoreto e nitritos em solução, encontrando-se estes, e em especial o nitrito, na grande maioria abaixo do limite de quantificação.

Tabela 4.9. Elementos estatísticos básicos principais dos parâmetros analisados nas águas do aquífero da Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.

Parâmetro	n	Mínimo	q1	Média	Mediana	q3	Máximo	Desvio Padrão	Variância
pH (-)	298	5.59	5.83	5.93	5.89	5.98	6.66	0.17	0.03
Cond.($\mu\text{S}/\text{cm}$)	298	20.6	28.0	30.6	29.7	32.4	43.5	4.4	19.1
CO ₂ (mg/l CaCO ₃)	298	6	18	24	23	29	36	3	22
Sílica (mg/l)	298	10.7	14.6	15.6	15.6	16.8	21.1	1.7	2.9
Dureza (mg/l)	298	1.2	3.0	4.4	4.0	5.0	13.0	1.7	2.8
R.S. (mg/l)	298	24.0	30.0	33.0	32.0	34.0	46.0	4.0	13.0
Min. (mg/l)	298	25.4	35.0	37.8	37.1	39.0	52.1	4.5	20.0
Na ⁺ (mg/l)	298	3.2	4.3	4.6	4.5	4.9	5.7	0.5	0.2
Ca ²⁺ (mg/l)	298	0.63	0.87	1.19	1.00	1.30	4.70	0.54	0.29
K ⁺ (mg/l)	298	0.16	0.24	0.28	0.27	0.31	0.60	0.08	0.01
Mg ²⁺ (mg/l)	298	0.12	0.22	0.35	0.28	0.48	0.91	0.17	0.03
Fe ²⁺ (mg/l)	298	<0.03	-	-	-	-	0.11	-	-
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	298	6.8	10.1	11.6	11.1	12.1	20.7	2.4	5.7
Cl ⁻ (mg/l)	298	2.1	2.6	2.7	2.7	2.8	3.2	0.2	0
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	298	0.30	0.50	0.70	0.50	0.90	3.40	0.30	0.11
F ⁻ (mg/l)	298	<0.03	-	-	-	-	0.85	-	-
NO ₃ ⁻ (mg/l)	298	0.21	0.40	0.79	0.60	1.00	2.40	0.40	0.19
NO ₂ ⁻ (mg/l)	298	<0.01	-	-	-	-	<0.01	-	-

Nota: Cond. = Condutividade eléctrica; R.S. = Resíduo seco a 180°; Min. = Mineralização total

Em termos de classificação e de acordo com a composição iónica maioritária, tal como se pode verificar nos diagramas de Piper e de Schoeller-Berkaloff (modificado) representados nas Figuras 4.10 e 4.11 respectivamente, as águas no geral, classificam-se como bicarbonatadas sódicas, pertencente à família das águas silicatadas, dada a percentagem de SiO₂ em relação à mineralização total ter muito significado.

O teor de sílica poderá estar associado à hidrólise dos minerais silicatados presentes nas rochas ígneas podendo este processo contribuir igualmente para o aumento do teor de HCO₃⁻ e metais alcalinos (Na⁺+K⁺) ou alcalino terrosos (Ca²⁺+Mg²⁺).

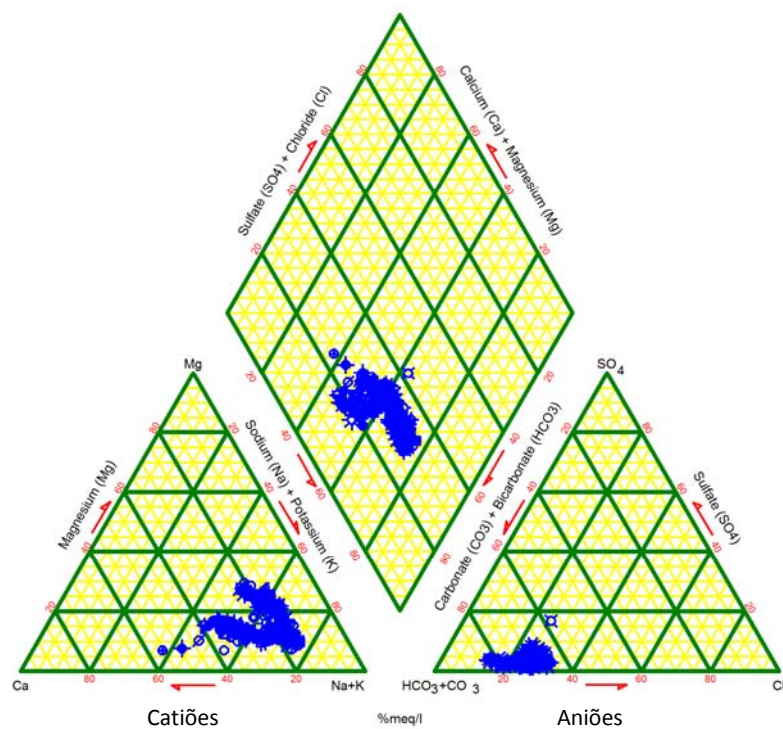


Figura 4.10. Diagrama de Piper para as águas estudadas a partir dos pontos de água principais do aquífero Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.

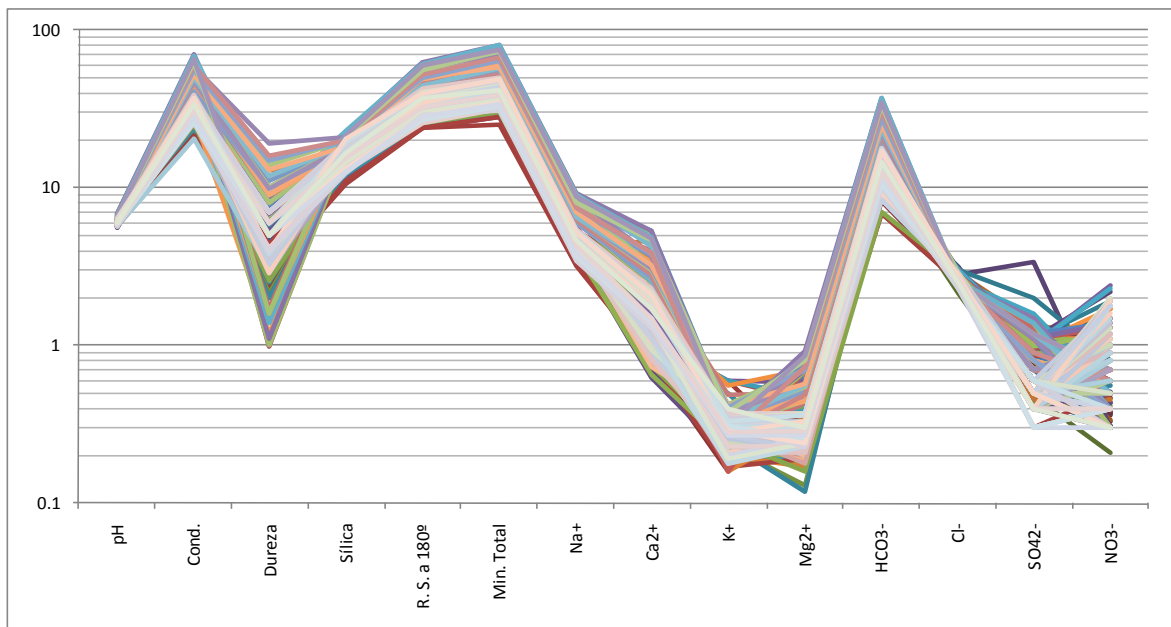


Figura 4.11. Diagrama de Schoeller-Berkaloff (modificado) para as águas em estudo dos pontos de água principais do aquífero Fonte da Fraga, Serra da Gardunha. Unidades de referência dos parâmetros: pH (adimensional); Cond. (μS/cm); restantes parâmetros (mg/l).

Sobre os elementos menores estudados (Tabela 4.10), verifica-se que na grande maioria as concentrações destes elementos encontram-se abaixo do limite de detecção.

O alumínio parece ser o único elemento que se encontra com concentrações detectáveis. O seu teor varia de 2.3 a 60 µg/l com um valor médio e de mediana de 13 e 7 µg/l, respectivamente. Este intervalo é considerado óptimo tendo em conta que o alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre (Mendes e Oliveira, 2004), podendo ainda existir em minerais diversos, tais como os feldspatos, as micas e os minerais de argila. Estes autores estimam ainda que as rochas graníticas possuem cerca de 73 g/kg deste elemento químico.

Tabela 4.10. Resultados dos elementos menores pesquisado nos pontos de água principais do aquífero da Fonte da Fraga, Serra da Gardunha.

Parâmetro (µg/l)	C1	C2	C3	C5	C6	C7	C9
Ag	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8
Al₃⁺	3.0	2.3	7.0	7.0	8.0	60.0	4.0
Ba²⁺	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Cd	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Co	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cr	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cu	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Hg	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Mo	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Sr²⁺	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Mn²⁺	<5	<5	<5	<5	<5	<5	7
Ni	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Pb	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Sb	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Se	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
V	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Zn	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20

Todos os elementos analisados, quer maiores e menores, encontram-se dentro dos parâmetros admissíveis em termos de água para consumo humano de acordo com o Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto (Tabela 4.11).

Tabela 4.11. Valores paramétricos de uma água para consumo humano, de acordo com o Decreto-Lei Nº 306/2007 de 27 de Agosto, em vigor em Portugal.

Parâmetro	Unidades	Valor paramétrico	Observações
pH	-	entre 6,5 e 9	Nota 1 e 5
Condutividade	µS/cm a 20°	2500	Nota 1
Dureza	mg/l CaCO ₃	entre 150 e 500	Nota 1 e 2
Na	mg/l	200	-
Ca	mg/l	100	Nota 1 e 2
Mg	mg/l	50	Nota 1 e 2
Fe	µg/l	200	-
Cl	mg/l	250	Nota 1
SO ₄ ²⁻	mg/l	250	Nota 1
Mn	µg/l	50	-
Al	µg/l	200	-
Sb	µg/l	5	-
Cd	µg/l	5	-
Cr	µg/l	50	Nota 3
Cu	mg/l	2	Nota 3
Pb	µg/l	25	Nota 3 e 4
Hg	µg/l	1	-
Ni	µg/l	20	Nota 3
Se	µg/l	10	-

Notas: 1 — A água não deve ser factor de deterioração dos materiais com os quais está em contacto, ou seja, deve ser desejavelmente equilibrada. Para verificar esta propriedade, podem ser utilizados diversos métodos, nomeadamente o índice de Langelier (IL), que, desejavelmente, deve estar compreendido entre - 0,5 < IL < + 0,5. 2 — Quando um sistema de abastecimento é gerido apenas por uma entidade gestora, estes parâmetros devem ser também determinados a montante da distribuição, no âmbito do programa de controlo operacional. 3 — No caso das entidades gestoras em baixa, o valor aplica-se a uma amostra de água destinada ao consumo humano obtida na torneira, por um método de amostragem adequado, e recolhida de modo a ser representativa do valor médio semanal ingerido pelos consumidores. Sempre que apropriado, os métodos de amostragem e de controlo serão postos em prática de maneira harmonizada, a elaborar de acordo com o n.º 4 do artigo 7.º da Directiva n.º 98/83/CE, devendo até lá as entidades gestoras seguir as recomendações emanadas pela autoridade competente. Para as entidades gestoras em alta, não há um método de amostragem específico, o que não as isenta da pesquisa destes parâmetros. 4 — Quanto à água a que se referem as alíneas a), b), c), d) e f) do n.º 2 do artigo 10.º, este valor deve ser respeitado, o mais tardar, 15 anos civis após a entrada em vigor da Directiva n.º 98/83/CE. No período compreendido entre 5 e 15 anos após a entrada em vigor da Directiva n.º 98/83/CE, o valor paramétrico para o chumbo é de 25 µg/l Pb. Devem ser tomadas todas as medidas necessárias para reduzir, tanto quanto possível, a concentração do chumbo na água

destinada ao consumo humano durante o período necessário ao cumprimento do valor paramétrico. A aplicação destas medidas deve, prioritariamente, privilegiar os pontos em que as concentrações de chumbo na água destinada ao consumo humano são as mais elevadas. As entidades gestoras devem seguir as recomendações emanadas pela autoridade competente no que diz respeito à amostragem. 5 — Para a água sem gás contida em garrafas ou outros recipientes, o valor mínimo do *pH* pode ser reduzido para 4,5 unidades. Para a água, em garrafas ou outros recipientes, naturalmente rica ou artificialmente enriquecida em dióxido de carbono, o valor mínimo pode ser mais baixo.

A única situação que merece alguma referência, se assim se puder considerar, é a da dureza onde os valores obtidos nas águas estudadas variam entre 1.2 e 13 mg/l de CaCO_3 , encontrando-se assim, estas concentrações, muito abaixo do intervalo estipulado no preceituado Decreto-Lei. No entanto, entende-se que a presente situação é irrelevante dado que os teores de dureza variam, significativamente, com a natureza geológica dos terrenos atravessados, ou com os quais a água esteve em contacto. Uma água dura aparece, geralmente, em zonas onde os solos sejam calcários ou dolomíticos. Uma água doce ou macia pode aparecer em regiões nas quais predominam solos graníticos. Ainda sobre este assunto, Mendes e Oliveira (2004) classificam as águas com teores de dureza inferiores a 150 mg/l de CaCO_3 como águas de boa qualidade, não tendo qualquer tipo de consequências negativas para a saúde humana.

4.6.2. Caracterização isotópica

Segundo Carreira (2008), a determinação de isótopos ambientais tem sido decisiva na investigação de problemas hidrogeológicos, tais como na identificação de mecanismos de salinização em águas subterrâneas, na definição de áreas de recarga, na identificação de paleoáguas, na quantificação de misturas entre unidades hídricas, na datação dos recursos hídricos (tempo de trânsito, definição de linhas de fluxo, etc) e na identificação da origem de fontes poluidoras (matéria orgânica e/ou fertilizantes).

Estas técnicas recorrem a isótopos ambientais estáveis ou radioactivos, sendo os mais frequentemente utilizados o oxigénio 18 (^{18}O), o deutério (^2H) e o trítio (^3H), respectivamente.

4.6.2.1. Isótopos estáveis de ^{18}O e ^2H

Na composição da água entram três isótopos estáveis de oxigénio (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O) e dois de hidrogénio (^1H e ^2H), os quais dão origem a nove tipos de moléculas de água estáveis, cujas massas moleculares variam entre 18 e 22 g/mol (Araguás, 1991).

Os estudos efectuados com base em isótopos estáveis têm como base o fenómeno do fraccionamento: a separação entre o isótopo leve e o isótopo pesado de um determinado elemento (Figura 4.12).

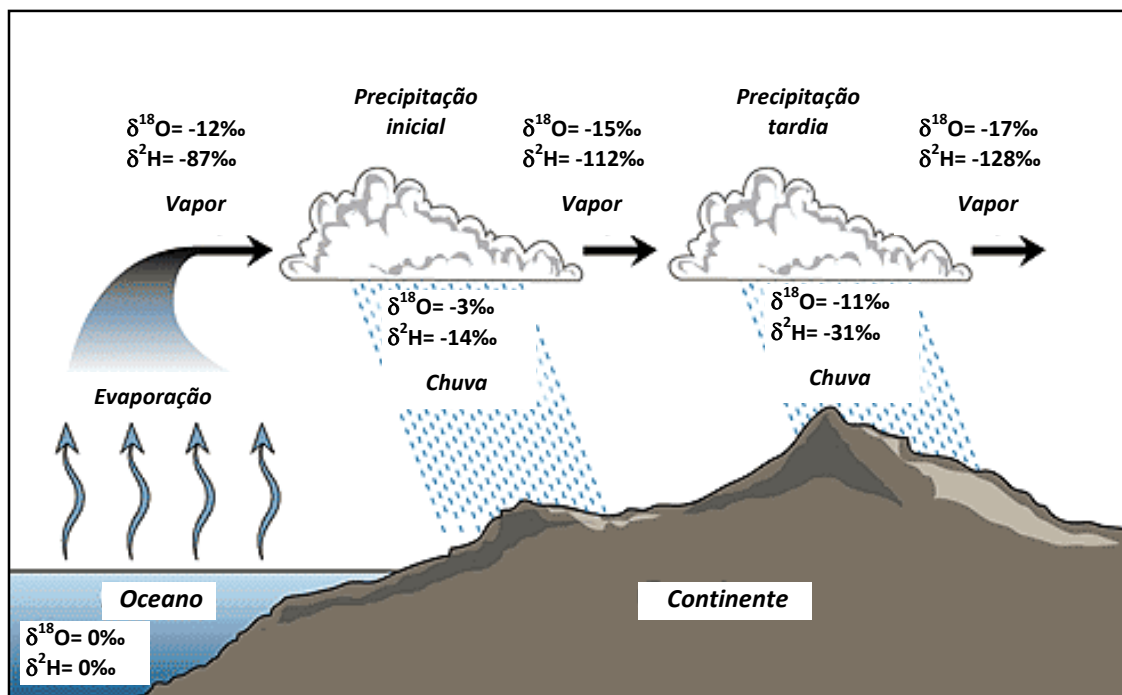


Figura 4.12. Representação esquemática do fraccionamento isotópico em diversas etapas do ciclo hidrológico (adaptado de Coplen *et al.*, 2000).

O fraccionamento ocorre no ciclo hidrológico associado a fenómenos de evaporação ou aquecimento das moléculas de água. Os resultados da análise isotópica na amostra de água, segundo Clark e Fritz (1997), vêm expressos através da notação δ do seguinte modo (Eq. 4.10):

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (4.10)$$

onde R é a razão entre o isótopo pesado e o isótopo leve. O valor de δ é expresso em permilagem (‰). Se $\delta > 0$ a amostra revela um enriquecimento no isótopo pesado; se $\delta < 0$ a composição isotópica é considerada leve.

A água que se evapora ao longo do ciclo hidrológico tem uma composição isotópica mais leve do que a água que permanece no estado líquido. Do mesmo modo, a água que sofre precipitação é isotopicamente mais pesada do que a que permanece como vapor na atmosfera — ou seja, é mais enriquecida em ^2H e em ^{18}O .

Por comparação dos rácios $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$ de um conjunto de amostras de águas continentais com os rácios definidos para o padrão SMOW (Standard Mean Ocean Water), determinado por Craig (1961) a partir de uma composição média das águas oceânicas, é possível calcular, por regressão linear, uma recta que relaciona $\delta^2\text{H}$ com $\delta^{18}\text{O}$.

Essa recta pode ser estimada para uma região, no entanto, este autor estimou a Equação 4.11 como a equação das águas meteóricas mundiais (Global Meteoric Water Line - GMWL):

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (4.11)$$

onde,

$$\delta^2\text{H}(\text{‰}) = \left[\frac{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{amostra}}}{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{SMOW}}} - 1 \right] 10^3 \quad (4.12)$$

e,

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left[\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{amostra}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}} - 1 \right] 10^3 \quad (4.13)$$

A composição isotópica das águas subterrâneas varia no espaço e no tempo (Marques, 1999). A variabilidade espacial depende de:

- i) efeito de altitude: a precipitação que ocorre a maiores altitudes tende a apresentar valores de δ mais negativos do que a ocorrida a menor altitude;

- ii) efeito de latitude: a precipitação que ocorre a latitudes mais elevadas apresenta valores de δ mais negativos do que a que ocorre a latitudes mais equatoriais;

Por seu lado, a variabilidade temporal depende de:

- i) recarga sazonal: a precipitação nos meses mais frios apresenta valores de δ mais negativos;

No presente trabalho foram analisadas 6 amostras de água da precipitação recolhida no pluviómetro de amostragem já referido, correspondentes a períodos pluviais entre Setembro de 2009 e Fevereiro de 2010 e ainda 10 amostras de água pertencentes aos pontos de água C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C9, C12 e R2 tendo sido estas recolhidas no mês de Fevereiro. Não obstante o reduzido número de amostras, os resultados obtidos suscitam determinadas interpretações que não se poderão deixar de apresentar.

As análises isotópicas foram efectuadas pelo Centrum Voor Isotopenonderzoek da Universidade de Groningen na Holanda. Os resultados estão expressos em notação δ em relação ao padrão internacional (VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water).

A Tabela 4.12 representa os resultados isotópicos da água da precipitação. Destes verifica-se que os teores de $\delta^2\text{H}$ variam entre -55.1‰ e -29.6‰, enquanto que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -8.59‰ e -5.70‰.

Tabela 4.12. Composição isotópica da água da precipitação da zona de estudo.

Ref. ^a	Mês de colheita	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	pp mensal (mm)
1	Set./09	-29.6	-5.7	43.2
2	Out./09	-34.6	-5.91	186.3
3	Nov./09	-51.4	-8.4	195.8
4	Dez./09	-55.1	-8.59	368.1
5	Jan./10	-41.2	-6.71	263.4
6	Fev./10	-53.3	-8.44	326.7

Verifica-se ainda, que as precipitações mais pesadas ocorrem em Setembro e as mais leves em Dezembro. A explicação para este facto poderá ter por base um fenómeno que se designar de “efeito de massa”.

Segundo Mook (2005) a composição isotópica da precipitação poderá ter uma grande variabilidade temporal, normalmente associada à intensidade e duração dos eventos pluviosos.

Genericamente, verifica-se um empobrecimento em isótopos pesados na precipitação associada a períodos muito pluviosos. Este comportamento explica-se pelo fraccionamento isotópico que ocorre durante o esvaziamento do reservatório atmosférico. No decurso de um evento pluvioso, a precipitação torna-se progressivamente mais leve, pelo que a composição média da precipitação é função da duração e intensidade do evento pluvioso.

A projecção dos resultados num diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 4.13) mostra que estes valores, na generalidade, se localizam na recta das águas meteóricas do oeste mediterrâneo (Western Mediterranean Meteoric Water Line - WMMWL) de equação (Eq. 4.14) (Celle, 2000; Celle *et al.*, 2004; Barbieri *et al.*, 2005):

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 13.7 \quad (4.14)$$

Segundo Celle *et al.* (2001) e Ouda *et al.* (2005) esta situação revela que a fonte de vapor de água que origina a precipitação da região não tem origem apenas no Oceano Atlântico mas também, de um contributo da massa de vapor vinda do Mar Mediterrâneo.

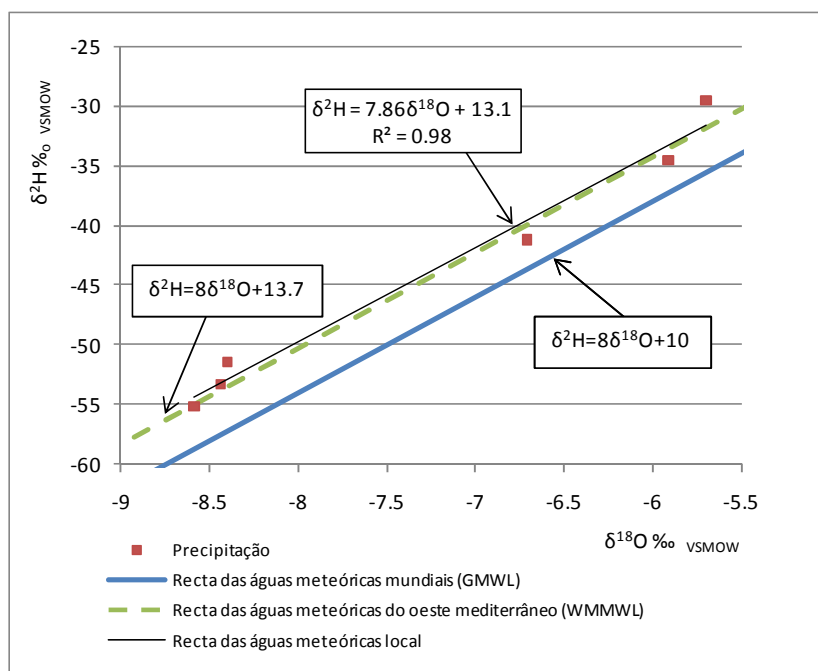


Figura 4.13. Diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ dos teores isotópicos da água da precipitação em estudo.

A Figura 4.14 representa as composições isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ dos pontos de água subterrâneos estudados. Verifica-se através desta projecção, e como seria de esperar, que se tratam de águas meteóricas e que não existem indícios de interacção água-rocha a temperaturas elevadas.

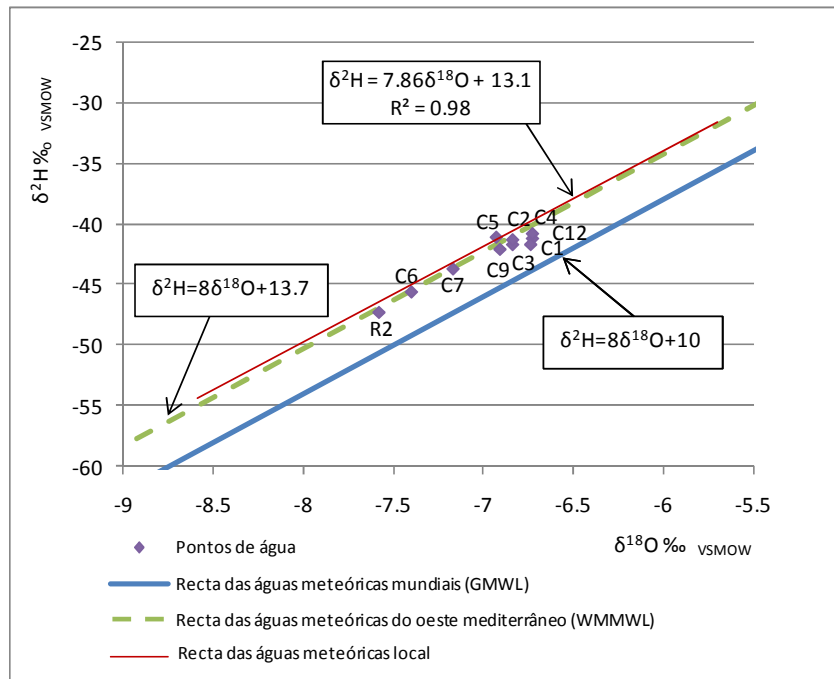


Figura 4.14. Diagrama de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ com a representação dos dados dos pontos de água em estudo.

Os gradientes isotópicos do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são $-0,37\text{‰}$ e $-2,57\text{‰}$, respectivamente, por cada 100m de altitude (Figura 4.15 e 4.16). Estes valores encontram-se dentro do intervalo valores de gradiente isotópico registados nas estações mediterrâneas, os quais variam, por 100m de altitude, entre $-0,15\text{‰}$ e $-0,5\text{‰}$ no caso do ^{18}O , e $-1,0\text{‰}$ e $-4,0\text{‰}$ no caso do ^2H (Gat, 1980; Yurtsever e Gat, 1981).

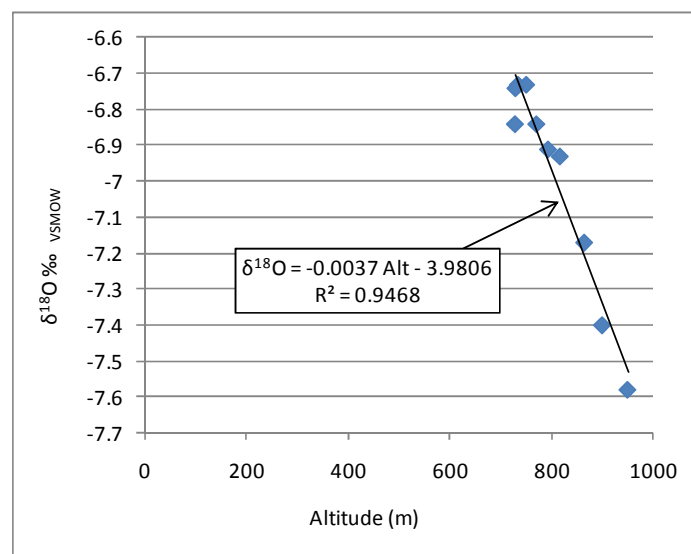


Figura 4.15. Diagrama de composição isotópica $\delta^{18}\text{O}$ vs altitude de emergência das águas subterrâneas em estudo.

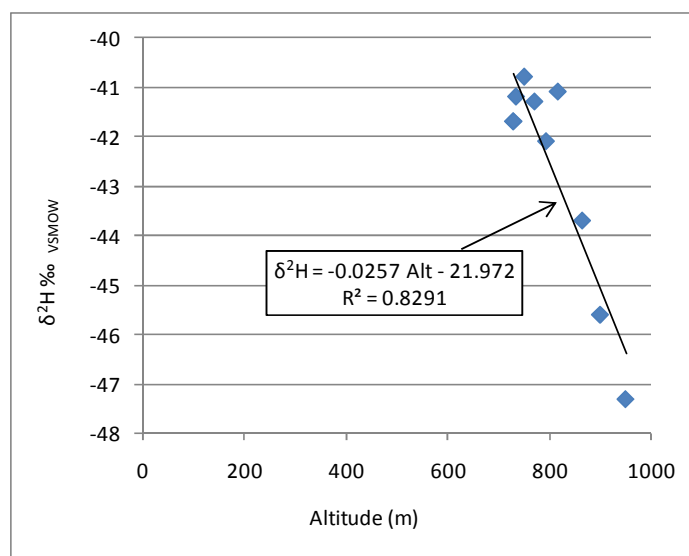


Figura 4.16. Diagrama de composição isotópica $\delta^2\text{H}$ vs altitude de emergência das águas subterrâneas em estudo.

4.6.2.2. O isótopo radioactivo de hidrogénio (^3H)

O isótopo radioactivo do hidrogénio (^3H , trítio) tem um tempo de meia-vida de 12,32 anos (Lucas e Unterweger, 2000). A sua origem pode ser natural ou artificial. No segundo caso, o trítio teve origem nos ensaios termonucleares que ocorreram, especialmente no Hemisfério Norte, entre 1952 e 1963, libertando cerca de 600kg de ^3H (Rozanski *et al.*, 1991). Por essa razão, o conteúdo em trítio das águas subterrâneas infiltradas após aquelas data será, em princípio, mais elevado do que nas águas de infiltração mais antiga. As concentrações são expressas em valores absolutos, cuja unidade é designada por Unidade de Trítio (UT). Uma unidade de trítio corresponde à razão $^3\text{H}/^1\text{H}=10^{-18}$.

Em estudos hidrogeológicos, a determinação de teores de trítio em águas subterrâneas tem, geralmente, em vista alguns dos seguintes objectivos (Mook, 2005):

- i) identificação e datação de águas subterrâneas relativamente modernas, ou seja, com menos de 50 a 60 anos;
- ii) identificação de águas subterrâneas antigas – a ausência de trítio no sistema indica a inexistência de uma componente de água moderna.

A utilização do trítio na quantificação da idade absoluta das águas subterrâneas, “tempo de residência médio das águas subterrâneas”, é complexa, podendo não se efectuar datações (Sousa Oliveira, 2001).

Assim, na Tabela 4.13 apresenta-se uma interpretação qualitativa desenvolvida por Clark e Fritz (1997).

Tabela 4.13. Interpretação qualitativa, utilizando os valores de trítio, do “tempo de residência médio das águas subterrâneas” (Adaptado de Clark e Fritz, 1997 *in* Sousa Oliveira, 2001).

Regiões continentais	Regiões costeiras e de pequena latitude	Interpretação qualitativa
		“Tempo de residência médio da água subterrânea”
<0.8 UT	<0.8 UT	submoderno – recarga anterior a 1952
0.8 a 5 UT	0.8 a 2 UT	mistura entre recarga submoderna e recente
5 a 15 UT	2 a 8 UT	moderno (<5 a 10 anos)
15 a 30 UT	8 a 20 UT	presença de alguma “bomba” 3H
30 a 50 UT	>20 UT	componente de recarga considerável a partir dos anos 60 ou 70
>50 UT		recarga dominante nos anos 60

Na Tabela 4.14 apresentam-se os valores de trítio obtidos nas amostras de água da precipitação. Destes, e não obstante o reduzido número de amostras, verifica-se que existe alguma correlação entre a quantidade de precipitação que cai na região e o teor deste elemento isotópico, notando-se assim um incremento deste com o aumento da quantidade da água da chuva.

Tabela 4.14. Teores de trítio nas amostras de água da precipitação.

Ref. ^a	Mês de colheita	3H (UT)	pp mensal (mm)
1	Set./09	2.33±0.20	43.2
2	Out./09	2.46±0.20	186.3
3	Nov./09	2.54±0.20	195.8
4	Dez./09	2.69±0.20	368.1
5	Jan./10	2.60±0.20	263.4
6	Fev./10	2.62±0.20	326.7

Os valores de trítio obtidos nos diferentes pontos de água subterrânea em estudo apresentam-se na Tabela 4.15. As concentrações deste elemento determinadas nas referidas amostras caracterizam um tempo de residência relativamente curto, uma vez que os valores obtidos são bastante próximos dos valores da média aritmética da água da precipitação registada (média = 2.54 ± 0.20).

Aplicando a interpretação qualitativa da Tabela 4.3, desenvolvida por Clark e Fritz (1997), os resultados evidenciam uma mistura entre recarga submoderna e recente corroborando mais uma vez o curto período de residência das águas subterrâneas no sistema.

Tabela 4.15. Teores de trítio das amostras água subterrânea em estudo.

Ponto de água	^3H (UT)
C1	2.33 ± 0.20
C2	2.36 ± 0.17
C3	2.44 ± 0.17
C4	2.82 ± 0.17
C5	2.74 ± 0.15
C6	2.72 ± 0.17
C7	2.78 ± 0.20
C9	2.42 ± 0.17
C12	2.27 ± 0.20
R2	2.85 ± 0.20

Capítulo 5

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO AQUÍFERO DA FONTE DA FRAGA

5.1. Descrição do Modelo FEFLOW	112
5.2. Etapas na Construção do Modelo Utilizando o FEFLOW	116
5.3. Aplicação do FEFLOW à Zona de Estudo	122

5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO AQUÍFERO DA FONTE DA FRAGA

Neste capítulo, apresenta-se numa breve descrição o software utilizado, para no seguimento, com algum detalhe, se expor todo o procedimento efectuado para estabelecer o modelo de escoamento subterrâneo do aquífero das águas de nascente da Fonte da Fraga. Com o desenvolvimento e uso deste modelo realiza-se ainda a avaliação do balanço hídrico subterrâneo para um período de 5 anos (entre 1 de Janeiro de 2002 a 31 de Dezembro de 2006) utilizando-se os valores de registos semanais de caudais dos pontos de água principais. No seguimento, calculam-se ainda os balanços hídricos, para cenários considerando situações de anos normais e de anos de seca, em relação à precipitação que poderá ocorrer na bacia em estudo. Evidenciam-se também alguns resultados de exercícios com o software Feflow, de modo a adquirir sensibilidade para a situação do modelo geohidráulico da zona de trabalho. Na parte final deste capítulo destaca-se um local ideal para a realização de um novo furo de pesquisa com potencial de se tornar numa nova captação de produção de água do tipo Fonte da Fraga, caso os resultados levem nesse sentido.

5.1. Descrição do Modelo FEFLOW

O modelo matemático FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation) foi desenvolvido pelo WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlim, Alemanha.

Consiste num modelo interactivo de simulação em 2D ou 3D do fluxo subterrâneo, variável em função da densidade e dos processos de transporte de massa e de calor nas águas subterrâneas, utilizando o método numérico de resolução das equações diferenciais parciais por elementos finitos.

Este software é uma ferramenta para a modelação das águas subterrâneas e de entre outros aspectos, permite:

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

O sistema de simulação FEFLOW de modelos de fluxo, contaminantes e transporte de calor pode processar estes fenómenos em conjunto ou em separado. Está baseado nos princípios físicos de:

- i) conservação de massa de fluidos e sólidos;
- ii) conservação de massa de contaminantes e constituintes químicos;
- iii) conservação de energia (primeira lei da termodinâmica, Diersch 2002).

Segundo Diersch (2002), as equações base do modelo FEFLOW, para processos 3D e 2D (vertical e eixos simétricos, respectivamente) são as seguintes (Eq. 5.1 a 5.5):

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = Q_\rho + Q_{EB}(C, T) \quad (5.1)$$

$$q_i^f = -K_{ij} f_\mu \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_0^f}{\rho_0^f} e_j \right) \quad (5.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon R C) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(q_i^f C - D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \varepsilon R \vartheta C &= Q_C && \text{forma divergente} \\ \varepsilon R_d \frac{\partial C}{\partial t} + q_i^f \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + (\varepsilon R \vartheta + Q_\rho) C &= Q_C && \text{forma convectiva} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(\varepsilon \rho^f c^f + (1 - \varepsilon) \rho^s c^s) T] + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho^f q_i^f c^f T) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) &= Q_T && \text{forma divergente} \\ [\varepsilon \rho^f c^f + (1 - \varepsilon) \rho^s c^s] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho^f c^f q_i^f \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho^f c^f Q_\rho (T - T_0) &= Q_T && \text{forma convectiva} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

com as seguintes equações constituintes:

$$\left. \begin{aligned} \rho^f &= \rho_0^f \left[1 + \frac{\alpha}{(C_s - C_0)} (C - C_0) - \beta (T - T_0) \right] \\ h &= \frac{p^f}{\rho_0^f g} + x_l \quad K_{ij} = \frac{k_{ij} \rho_0^f g}{\mu_0^f} \quad \alpha = \frac{[\rho^f(C_s) - \rho_0^f]}{\rho_0^f} \\ f_\mu &= \frac{\mu_0^f}{\mu^f(C, T)} = \frac{1 + 1,85\omega_{(C=C_0)} - 4,1\omega_{(C=C_0)}^2 + 44,5\omega_{(C=C_0)}^3}{1 + 1,85\omega - 4,1\omega^2 + 44,5\omega^3} \cdot \frac{1 + 0,7063\varsigma - 0,04832\varsigma^3}{1 + 0,7063\varsigma_{(T=T_0)} - 0,04832\varsigma_{(T=T_0)}^3} \\ \varsigma &= \frac{(T-150)}{100}, \omega = \frac{C}{\rho^f} \\ D_{ij} &= (\varepsilon D_d + \beta_T V_q^f) \delta_{ij} + (\beta_L - \beta_T) \frac{q_i^f q_j^f}{V_q^f} \\ R &= 1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \chi(C) \quad R_d = 1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial[\chi(C).C]}{\partial C} \\ \lambda_{ij} &= \lambda_{ij}^{cond} + \lambda_{ij}^{disp} \quad Q_T = \varepsilon \rho^f Q_T^f + (1 - \varepsilon) \rho^s Q_T^s \\ \lambda_{ij}^{cond} &= [\varepsilon \lambda^f + (1 - \varepsilon) \lambda^s] \delta_{ij} \quad \lambda_{ij}^{disp} = \rho^f c^f \left[\alpha_T V_q^f \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{q_i^f q_j^f}{V_q^f} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

que são resolvidas para as quatro variáveis primárias:

h = potencial hidráulico;

q_i^f = vector de velocidade de Darcy do fluido;

C = concentração do componente químico;

T = temperatura;

onde:

ρ^f, ρ_0^f = densidade do fluido e do fluido de referência, respectivamente;

ρ^s = densidade do sólido;

S_0 = coeficiente de armazenamento específico;

K_{ij} = condutividade hidráulica;

e_j = vector gravitacional unitário;

f_μ = viscosidade constituinte;

Q_{EB} = termo da aproximação de Boussinesq;

R = factor de retardação;

R_d = termo derivado da retardação;

D_{ij} = tensor da dispersão hidrodinâmica;

υ = taxa de decaimento;

ε = porosidade;

c^f, c^s = capacidade de calor específico do fluido e do sólido, respectivamente;

λ_{ij} = tensor da termo-dispersão hidrodinâmica;

Q_x = função fonte/sumidouro do fluido para $x = \rho$, do contaminante para $x = C$ e do calor para $x = T$;

α = rácio da diferença de densidades;

β = coeficiente de expansão do fluido;

C_0, T_0 = concentração e temperatura de referência, respectivamente;

C_s = concentração máxima;

ρ^f = pressão do fluido;

g = aceleração da gravidade;

k_{ij} = tensor de permeabilidade

μ^f, μ_0^f = viscosidade dinâmica do fluido e o seu valor de referência, respectivamente;

ζ = temperatura normalizada;

ω = fracção de massa;

D_d = coeficiente de difusão molecular do fluido;

$V_q^f = \sqrt{q_i^f q_i^f}$ fluxo do fluido absoluto de Darcy;

β_L, β_T = dispersividade longitudinal e transversal, respectivamente;

$\chi(C)$ = função de adsorção dependente da concentração;

λ^{cond} = parte condutora do tensor de termo-dispersão;

λ^{disp} = parte dispersante do tensor de termo-dispersão;

λ^f, λ^s = condutividade termal para o fluido e sólido, respectivamente;

α_L, α_T = termo-dispersividade longitudinal e transversal, respectivamente.

5.2. Etapas na Construção do Modelo Utilizando o FEFLOW

5.2.1. Geração da malha

O primeiro passo da modelação é a criação ou geração de uma malha de elementos finitos adaptada à área em estudo. Segundo Diersch (2002), durante a simulação os resultados são calculados em cada nó da malha e interpolados no interior dos elementos finitos.

Para gerar a malha, o FEFLOW tem à sua disposição três opções: i) automática, ii) em área, e iii) gradual. Este possibilita também diferentes graus de refinamento em locais

definidos e permite a escolha do tipo de elemento da malha, de acordo com o tipo de modelação (2D ou 3D). Para problemas 2D dispõe de elementos quadrangulares de 4 e 8 nós e triangulares de 3 e 6 nós e para problemas 3D de elementos prismáticos quadrangulares de 8 e 20 nós e prismáticos triangulares de 6 e 15 nós.

5.2.2. Definição do problema

A definição do problema (Figura 5.1) faz-se pela escolha do meio que se pretende estudar (saturado ou não saturado), o tipo de simulação (apenas fluxo ou fluxo e transporte de massa em condições estacionárias ou transitórias), o tipo de aquífero (confinado ou não confinado), a dimensão do modelo (2D ou 3D) e, no caso de 2D, o plano de projecção que se pretende (horizontal, vertical ou assimétrico).

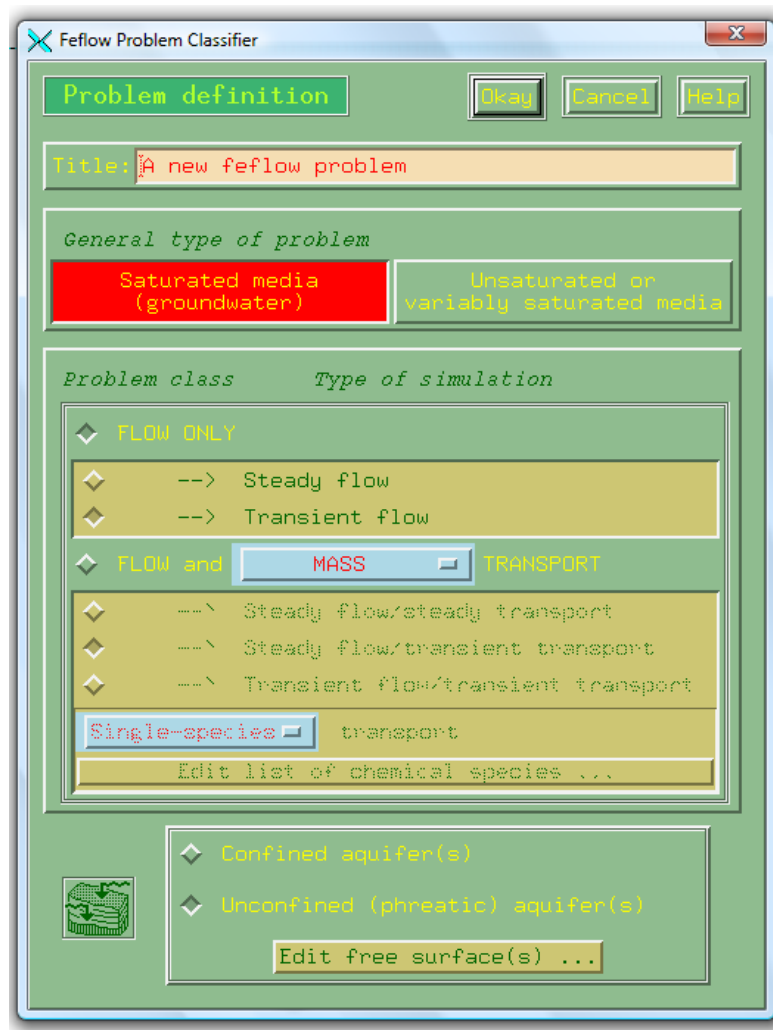


Figura 5.1. Menu de definição do problema.

5.2.3. Discretização temporal

Em relação à discretização temporal (Figura 5.2), a simulação em condições transitórias permite a escolha de diferentes opções: i) esquemas de intervalos de tempo constantes, ii) variáveis, ou por iii) cálculo automático.

Os intervalos de tempo calculados automaticamente são executados realizando um esquema de integração do tempo de:

- i) 1ª ordem – Forward Euler/Backward Euler FE/BE
- ii) 2ª ordem – Forward Adams Bashforth/Backward Trapezoid AB/TR

Segundo Diersch (2002), a escolha de intervalos de tempo automático do tipo FE/BE é a mais adequada para problemas de densidade variável.

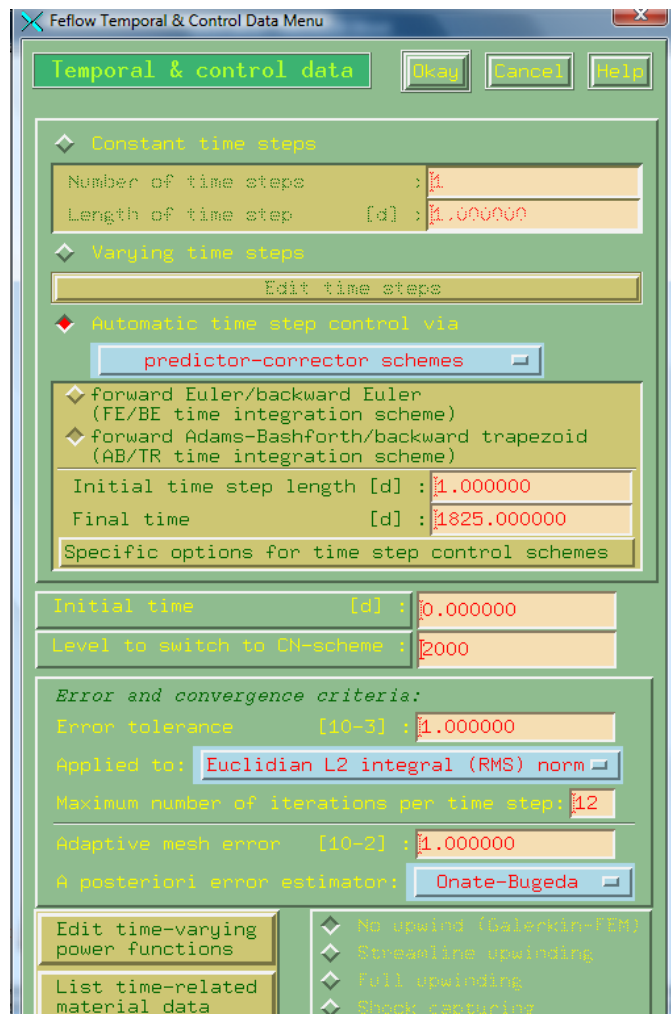


Figura 5.2. Menu de discretização temporal.

5.2.4. Discretização espacial vertical

No caso de modelos 3D definem-se as unidades estratigráficas e a topografia através dos planos (slice) que são superfícies que limitam as camadas (layer) e que apresentam os nós dos elementos finitos que constituem a malha. Cada camada é assim limitada por dois planos e é formada pelos elementos da malha.

5.2.5. Dados relativos ao modelo de fluxo

No que se refere aos dados do fluxo subterrâneo é necessário estabelecer as condições iniciais (Figura 5.3a), as condições de fronteira e os parâmetros dos materiais. As condições iniciais correspondem à distribuição inicial dos níveis piezométricos. A importação dos dados pode ser realizada a partir de um ficheiro de dados (database), sendo depois interpolados para toda a área por um dos seguintes métodos (Figura 5.3b):

- i) Krigagem;
- ii) Inter/extrapolação de Akima;
- iii) Inverso da distância;
- iv) Interpolação linear 1D.

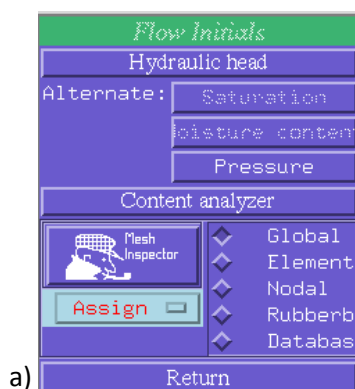
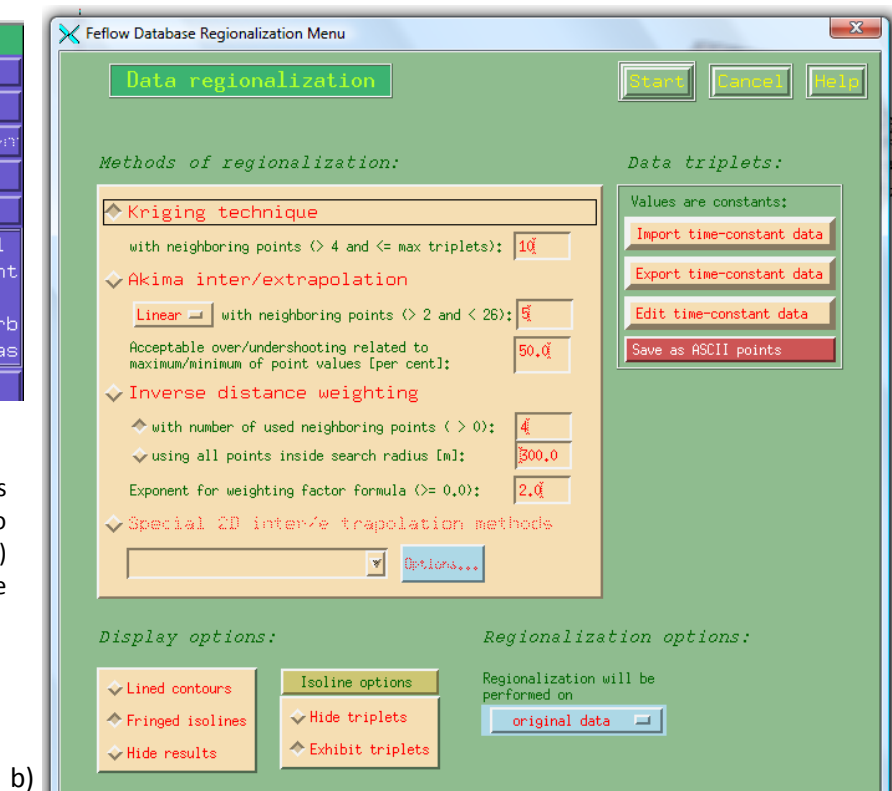


Figura 5.3. Menu das condições iniciais do modelo de fluxo. a) Geral; b) Menu de interpolação de dados.



As condições de fronteira para o modelo de fluxo (Figura 5.4a) são do seguinte tipo (Diersch, 2002):

- i) 1ª ordem – Dirichlet, m – (nível piezométrico imposto) – descreve o nível piezométrico num dado nó da malha;
- ii) 2ª ordem – Neumann, m/dia ou m²/dia – (fluxo imposto) – 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 de ser estabelecido integrado em função da profundidade;
- iii) 3ª ordem – Cauchy, m – (transferência) – define o nível piezométrico de referência numa área exterior ao domínio do modelo, como é o caso de um rio ou de um lago. Neste tipo de condições tem que ser definida uma taxa de transferência entre este corpo superficial e o aquífero;
- iv) 4ª ordem – Furos – correspondem à injeção ou à extracção de água através de um furo que se representa por um nó na malha.

Segundo Diersch (2002), as condições de fronteira podem ser limitadas por restrições (constraint), que se definem como sendo limites mínimos e máximos que tornam válida uma dada condição de fronteira. As condições de fronteira podem ser constantes ou variáveis em função do tempo, assim como as restrições que as limitam. Os parâmetros dos materiais a definir (Figura 5.4b) dependem da dimensão (2D ou 3D), do tipo de projecção (no caso de problemas 2D) e da modelação do fluxo se realizar na zona saturada ou na zona vadosa.

Na Tabela 5.1 podem observar-se com mais clareza os diferentes parâmetros dos materiais que são necessários para construir o modelo de fluxo (para meios saturados).

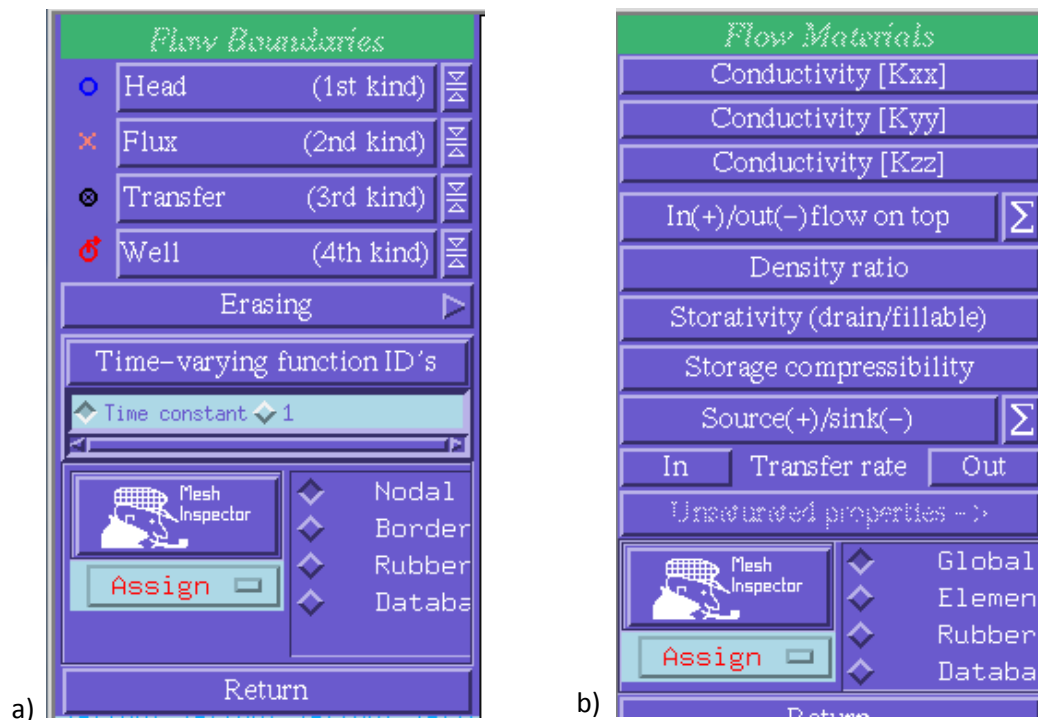


Figura 5.4. Menus gerais: a) das condições de fronteira do modelo de fluxo; b) dos parâmetros dos materiais do modelo de fluxo.

Tabela 5.1. Parâmetros dos materiais necessários para o modelo de fluxo.

Parâmetros	Aplicação	Simbologia
Condutividade hidráulica (K)	Modelo de fluxo a 2D	K
Ângulo entre o eixo dos x e o K	Modelo de fluxo a 2D	ϕ
Factor de anisotropia $K_{\min}/K_{\max}$	Modelo de fluxo a 2D/3D	Ξ_{aniso}
Rácio entre a diferença de densidades	Modelo de fluxo a 2D/3D	α
Coefficiente de armazenamento específico	Modelo de fluxo a 2D/3D	S_0
Fontes (+) / Sumidouros (-)	Modelo de fluxo a 2D/3D	Q_p
Taxa de transferência para o aquífero	Modelo de fluxo a 2D/3D	Φ_h^{in}
Taxa de transferência do aquífero	Modelo de fluxo a 2D/3D	Φ_h^{out}
Condutividade hidráulica K_{xx} * ou K_{1m} **	Modelo de fluxo a 3D	K_{11} ou K_1^m
Condutividade hidráulica K_{yy} * ou K_{2m} **	Modelo de fluxo a 3D	K_{22} ou K_2^m
Condutividade hidráulica K_{zz} * ou K_{3m} **	Modelo de fluxo a 3D	K_{33} ou K_3^m
Recarga (+) / Evaporação (-)	Modelo de fluxo a 3D	P_0
Porosidade eficaz	Modelo de fluxo a 3D	ε_e

Nota: * - eixos paralelos à anisotropia; ** - anisotropia geral.

5.3. Aplicação do FEFLOW à Zona de Estudo

5.3.1. Definição da área

A área a modelar, com 0.30Km^2 , corresponde a uma sub-bacia hidrográfica (Figura 5.5), onde se encontram inseridas a maioria dos pontos de água da zona do aquífero da Fonte da Fraga.

Refere-se que dos pontos de água apresentados no item 4.5 disponibiliza-se de um registo semanal de caudal em: C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 e C9; pelo que, e como se verá no desenrolar deste capítulo, a simulação incidirá principalmente nestes pontos de água, apesar de pontualmente se ter em atenção os outros parâmetros necessários e existentes nos restantes pontos de água.

Trata-se de uma área relativamente homogénea, em termos geológicos em que 85% da área é dominada pelos granitóides, 8% pelas corneanas e 7% pelos xistos mosqueados, e corresponde à sub-bacia hidrográfica onde se dispõe de mais informação (Figura 5.6).

5.3.2. Desenvolvimento da malha do modelo

Tendo em conta a área a modelar, gerou-se de forma automática uma malha de 895 elementos finitos do tipo triangular (Figura 5.7). Em redor dos pontos de água e das estruturas geológicas (falhas) onde se pretende um maior detalhe na informação, a malha sofreu um refinamento, aumentando o número de elementos finitos para 4328 com um total de 4452 nós. A Figura 5.8 representa a malha resultante desse refinamento a qual foi projectada na fotografia aérea da região com recurso a um software de sistemas de informação geográfica.

Sobre a discretização espacial vertical definiu-se a topografia da bacia em estudo, através da introdução dos pontos cotados inerentes às curvas de nível da própria bacia, resultando deste modo a elevação vertical apresentada na Figura 5.9.

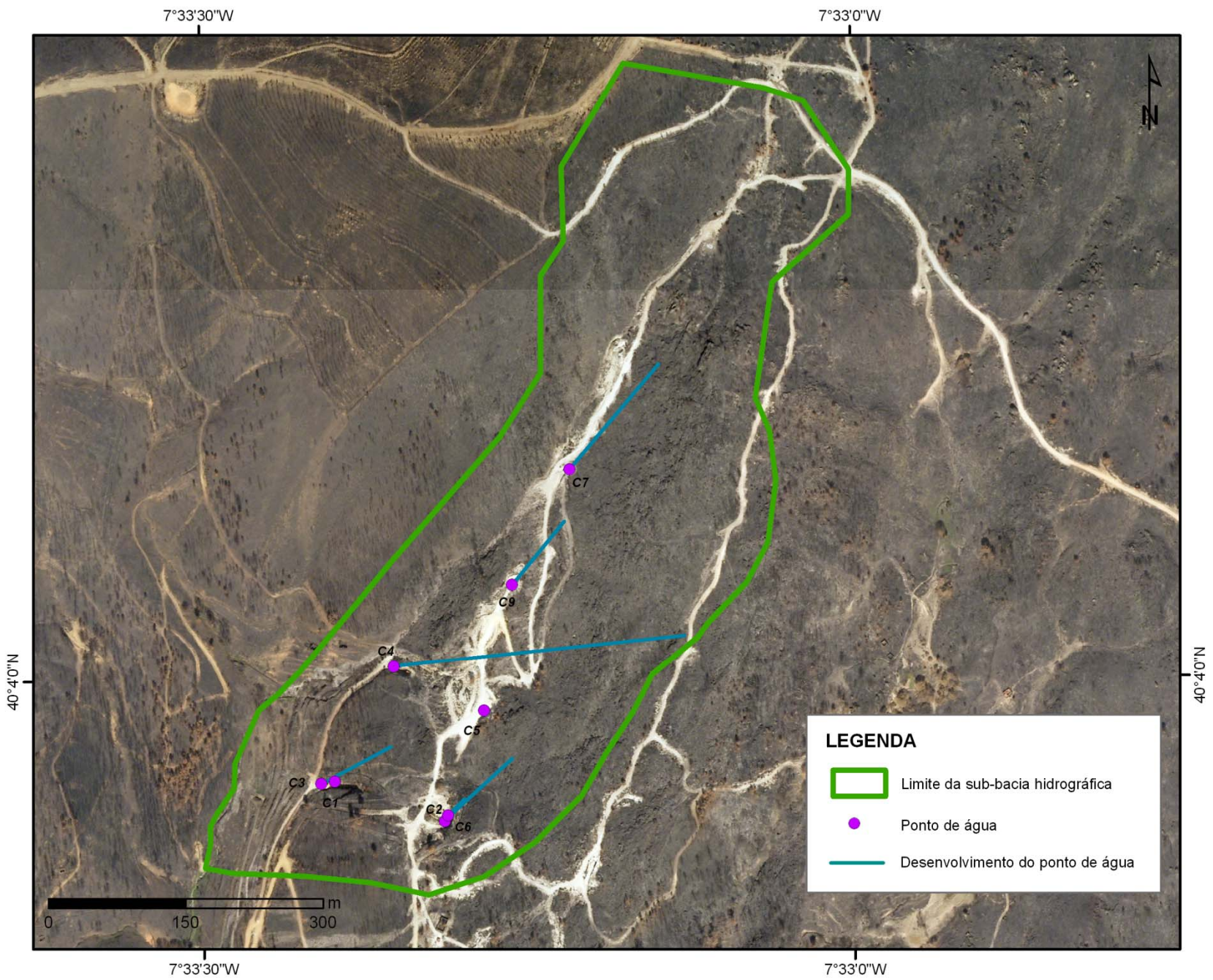


Figura 5.5. Localização da área a modelar com os respectivos pontos de água do aquífero da água de Nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).

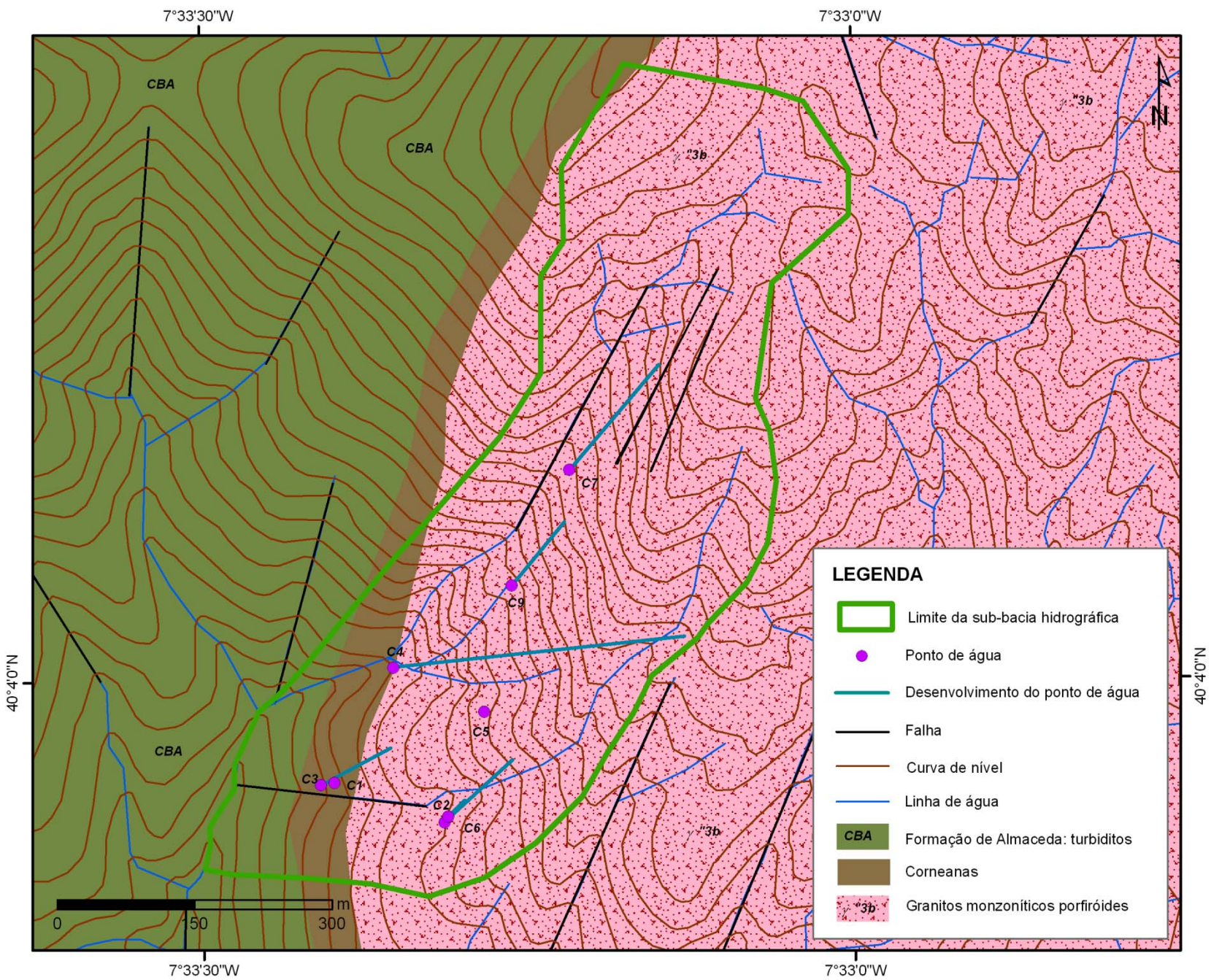


Figura 5.6. Localização da área a modelar correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

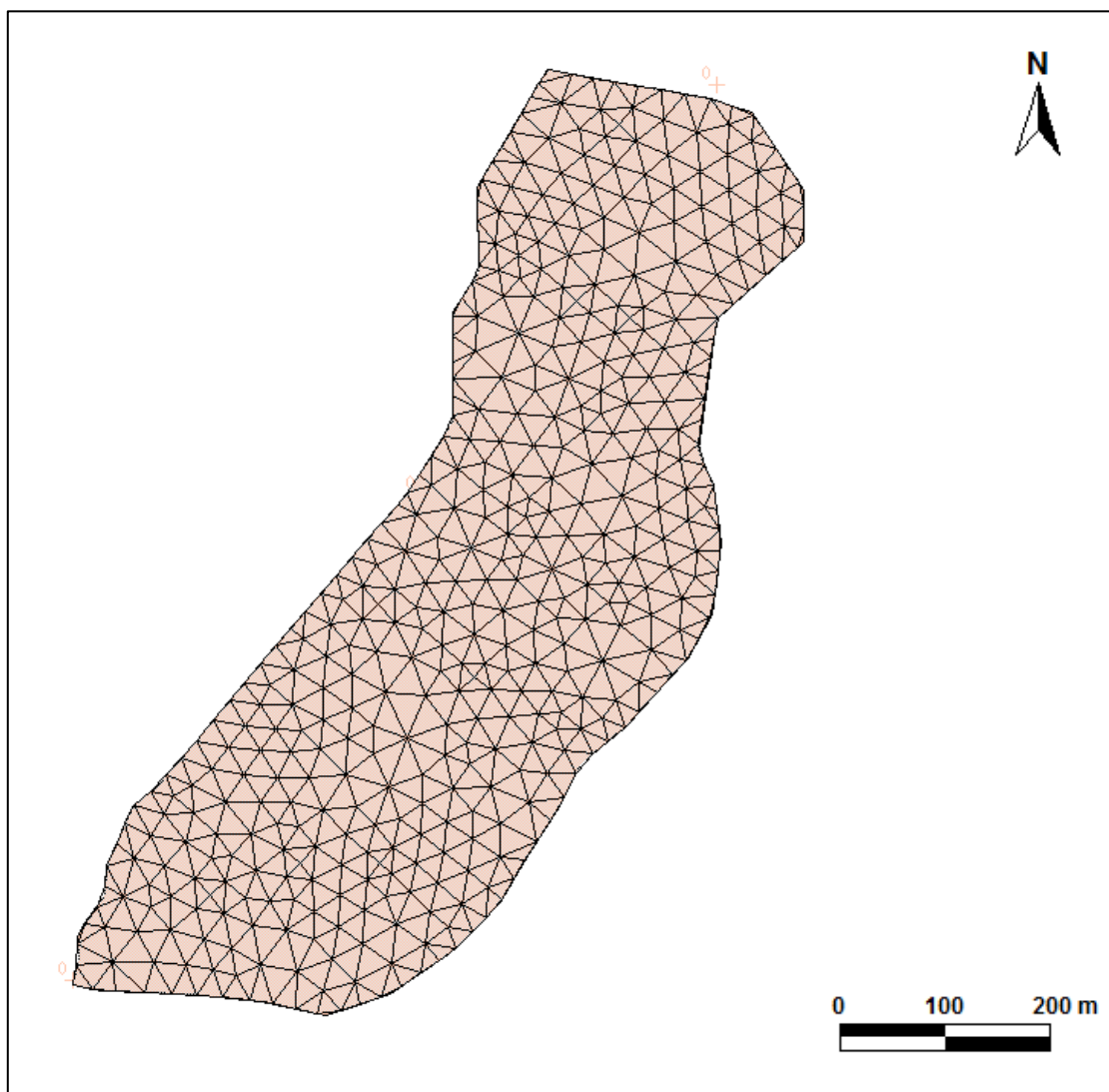


Figura 5.7. Aspecto da malha de elementos triangulares na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

5.3.3. Estabelecimento dos parâmetros de entrada

Pretende-se simular em 3D, o fluxo em regime transitório, num meio saturado de um aquífero livre com cerca de 100m de espessura.

Em relação à discretização temporal, a simulação decorreu com um incremento de tempo diário, entre 1 de Janeiro de 2002 e 31 de Dezembro de 2006 (total de 1825 dias), realizando um esquema de integração do tempo de 2ª ordem – Forward Adams Bashforth/Backward Trapezoid AB/TR.

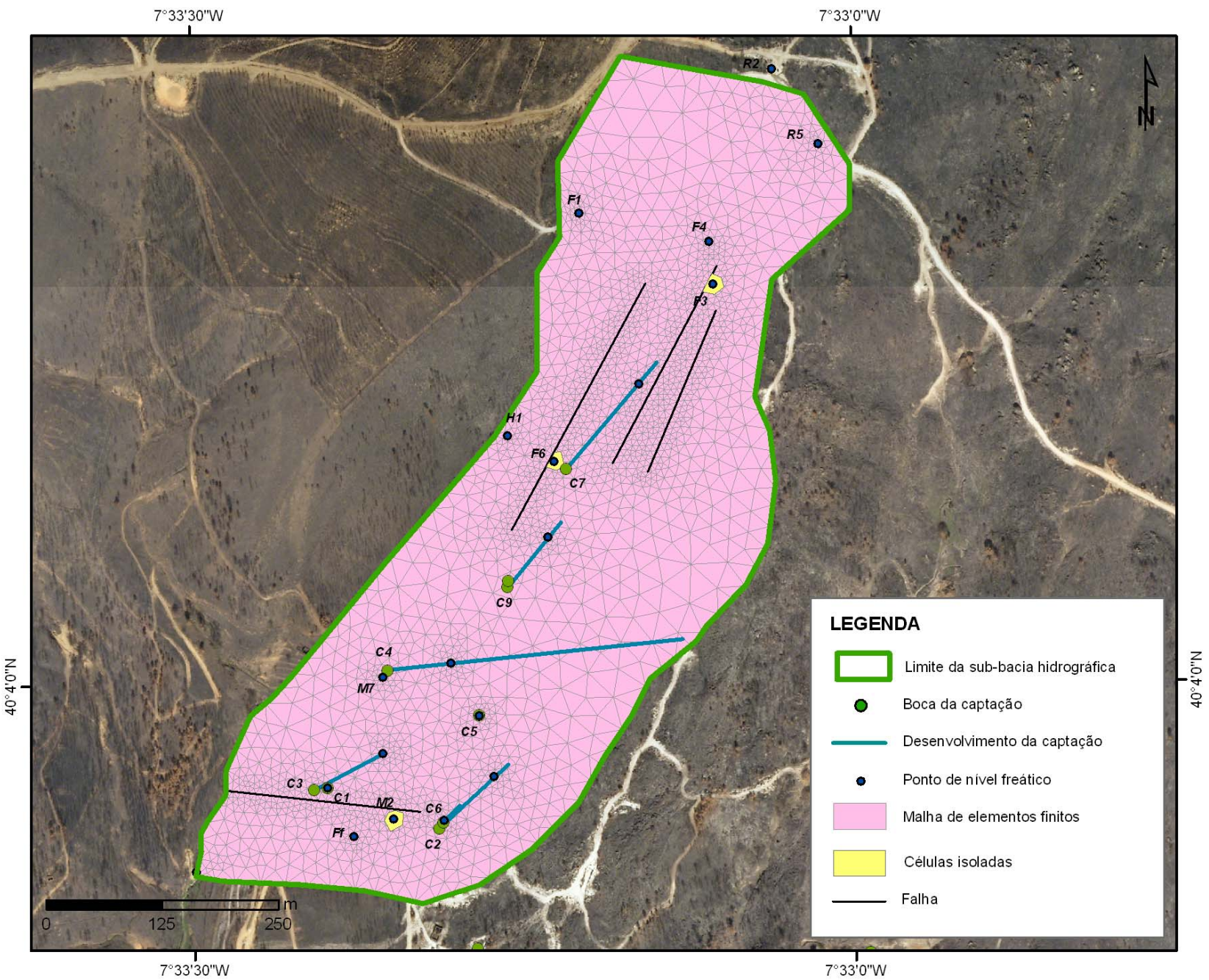


Figura 5.8. Aspecto da malha de elementos triangulares na sub-bacia hidrográfica em estudo, após o refinamento, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).

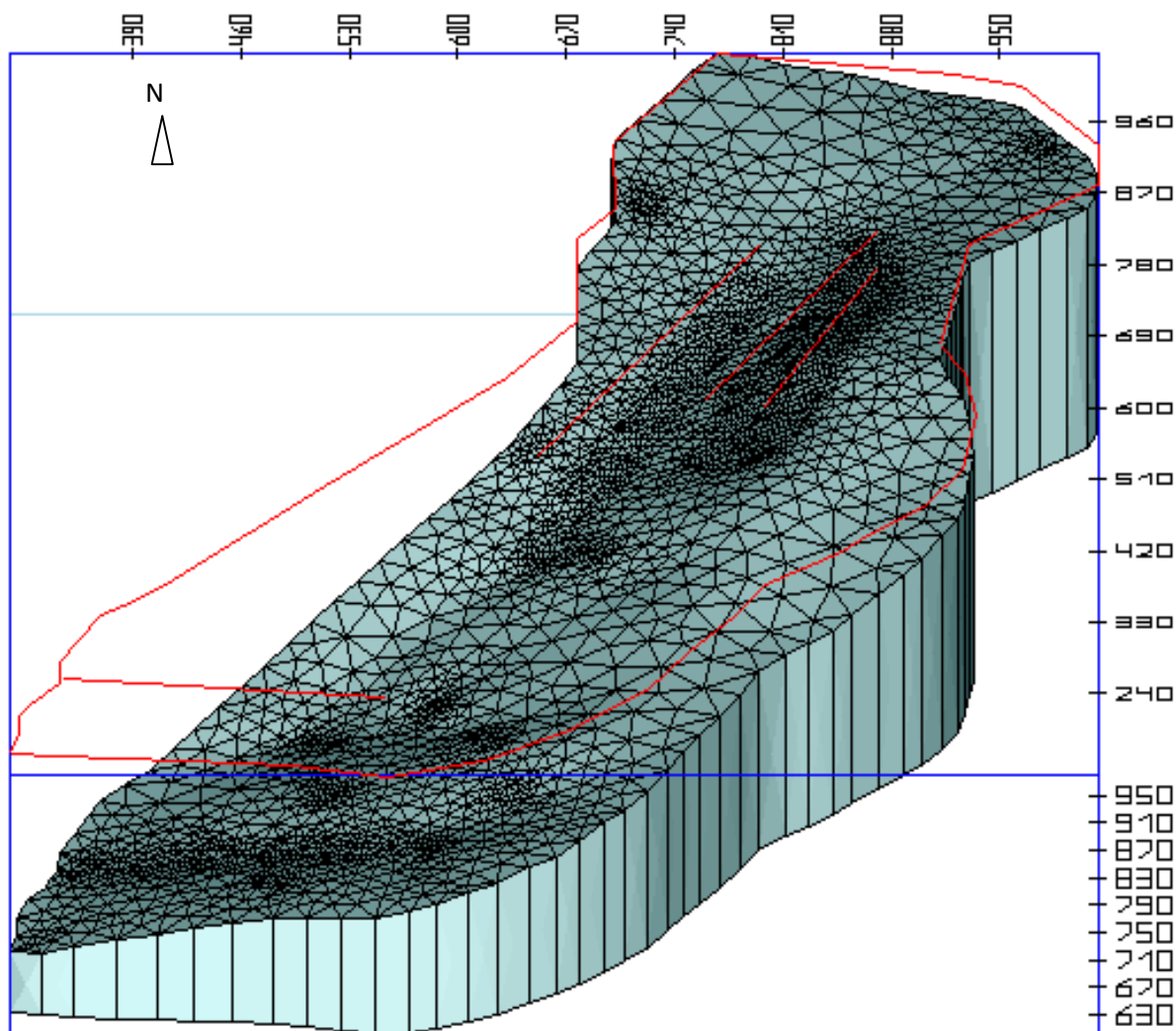


Figura 5.9. Elevação vertical da malha da sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

Em relação ao erro e às normas utilizadas para o cálculo, no decorrer do processo iterativo, utilizaram-se as opções indicadas como padrão pelo modelo (erro=0.001).

Relativamente às condições iniciais da distribuição espacial dos níveis freáticos na bacia em estudo, foram introduzidos os valores correspondentes ao nível freático de todos os pontos de água apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Refere-se que a informação recolhida, tendo por base a análise dos níveis freáticos, foi diferenciada de três maneiras consoante o tipo de captação:

- i) nos furos verticais, fez-se a análise directa do nível hidrostático registado nos respectivos relatórios de execução tendo-se convertido esse valor em cota;

- ii) nos furos semi-horizontais, foram consideradas para este efeito, o comprimento, em planta, a partir do qual se começou a debitar caudal, tendo-se de seguida determinado essa cota;
- iii) na nascente, foi considerada como nível freático a cota de exurgência.

Salienta-se também que existem três pontos de água secos e que se encontram inseridos em polígonos designados por “células isoladas” como se ilustra na Figura 5.8. Estas células correspondem aos elementos da malha em redor do nó que foi dado como seco.

A Figura 5.10 representa a distribuição dos níveis hidrostáticos resultante da análise dos níveis freáticos, os quais foram interpolados para toda a área pelo método de Krigagem. Estes dados foram transportados para a plataforma de sistemas de informação geográfica resultando deste modo a Figura 5.11.

Como condições de fronteira para o modelo de fluxo foram aplicadas unicamente as do tipo “1ª ordem – Dirichelet” nos nós da malha onde se encontram implantados os pontos de água a monitorizar. Isto deve-se ao facto de se tratarem de captações semi-horizontais, onde o caudal obtido na boca da captação se obtém por gravidade, não existindo deste modo qualquer sistema artificial de bombagem e que inviabiliza deste modo a aplicação das condições de fronteira do tipo “4ª ordem – Furos”. Salienta-se que o caudal obtido nestes pontos não é imposto, ou seja, não se pode regular consoante se deseja muito ou pouco caudal, como acontece nos furos verticais onde existe um sistema de extracção.

Sobre a recarga aquífera foi considerado o valor 26.7% da precipitação observada para a presente área de estudo. Este valor corresponde à média dos três métodos de estimativa de recarga apresentados no item 4.2. Foi ainda considerado que só existiria recarga acima dos 730m de cota obtendo-se assim uma área de infiltração de 0.28Km².

Relativamente aos parâmetros dos materiais, nomeadamente condutividade hidráulica (K) e coeficiente de armazenamento (S), os valores introduzidos numa fase inicial da modelação, corresponderam aos apresentados no item 4.3 e 4.4, respectivamente. Após

várias simulações com estes valores, verificou-se que os resultados da modelação não eram muito satisfatórios, pelo que se decidiu calibrar o modelo com estes parâmetros.

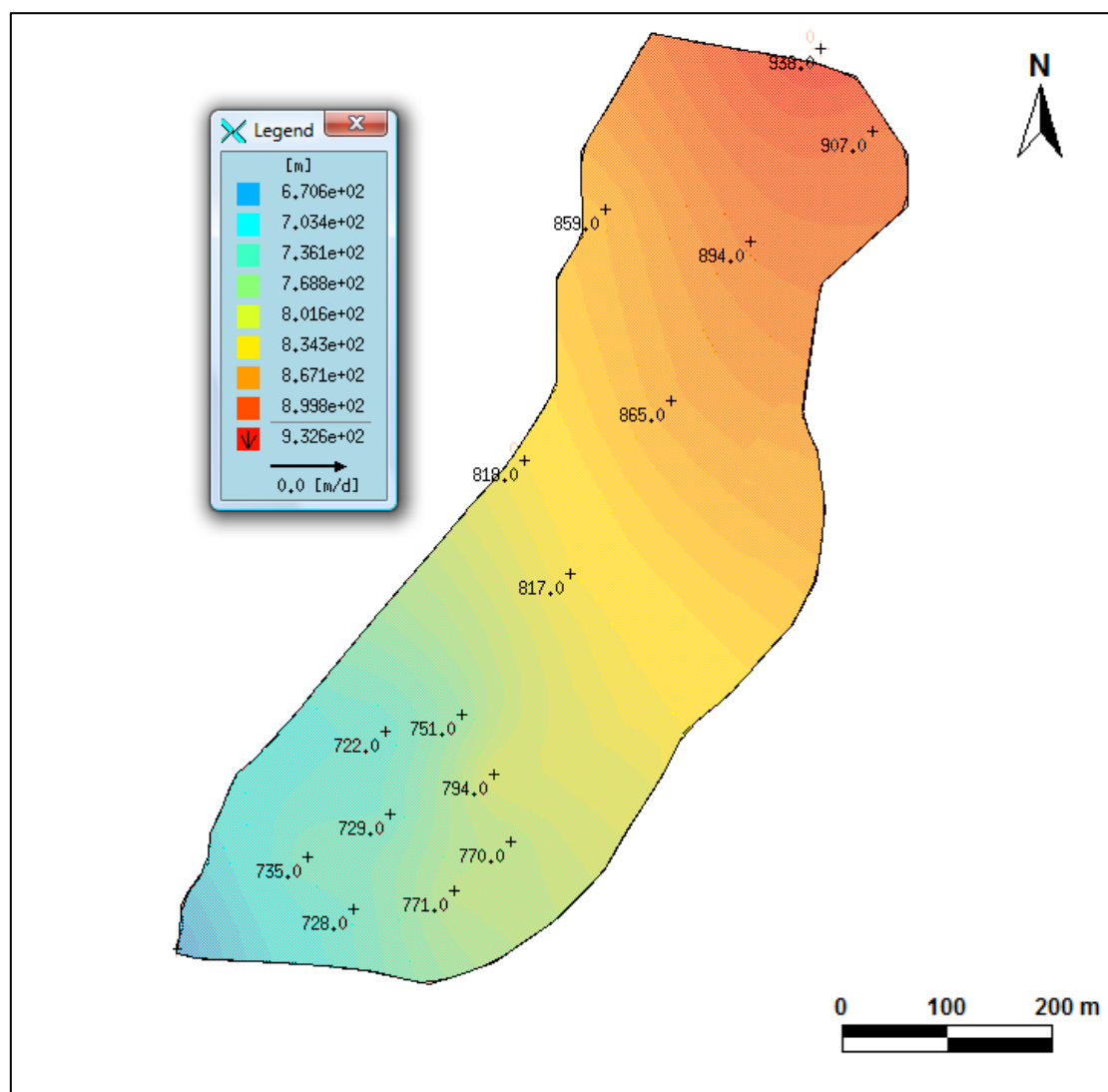


Figura 5.10. Distribuição dos níveis hidroestáticos na sub-bacia hidrográfica em estudo (em cotas), correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

O processo de calibração foi um passo bastante moroso e importante durante a modelação. Existem vários métodos de calibração, os automáticos e os de tentativa e erro, cada um com as suas vantagens e inconvenientes. No modelo realizado optou-se pelo método da tentativa e erro aplicado às variáveis de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento. Assim, a calibração consistiu no ajuste das variáveis, por tentativa e erro, de modo a que a solução final dos caudais simulados se aproximassem dos valores reais.

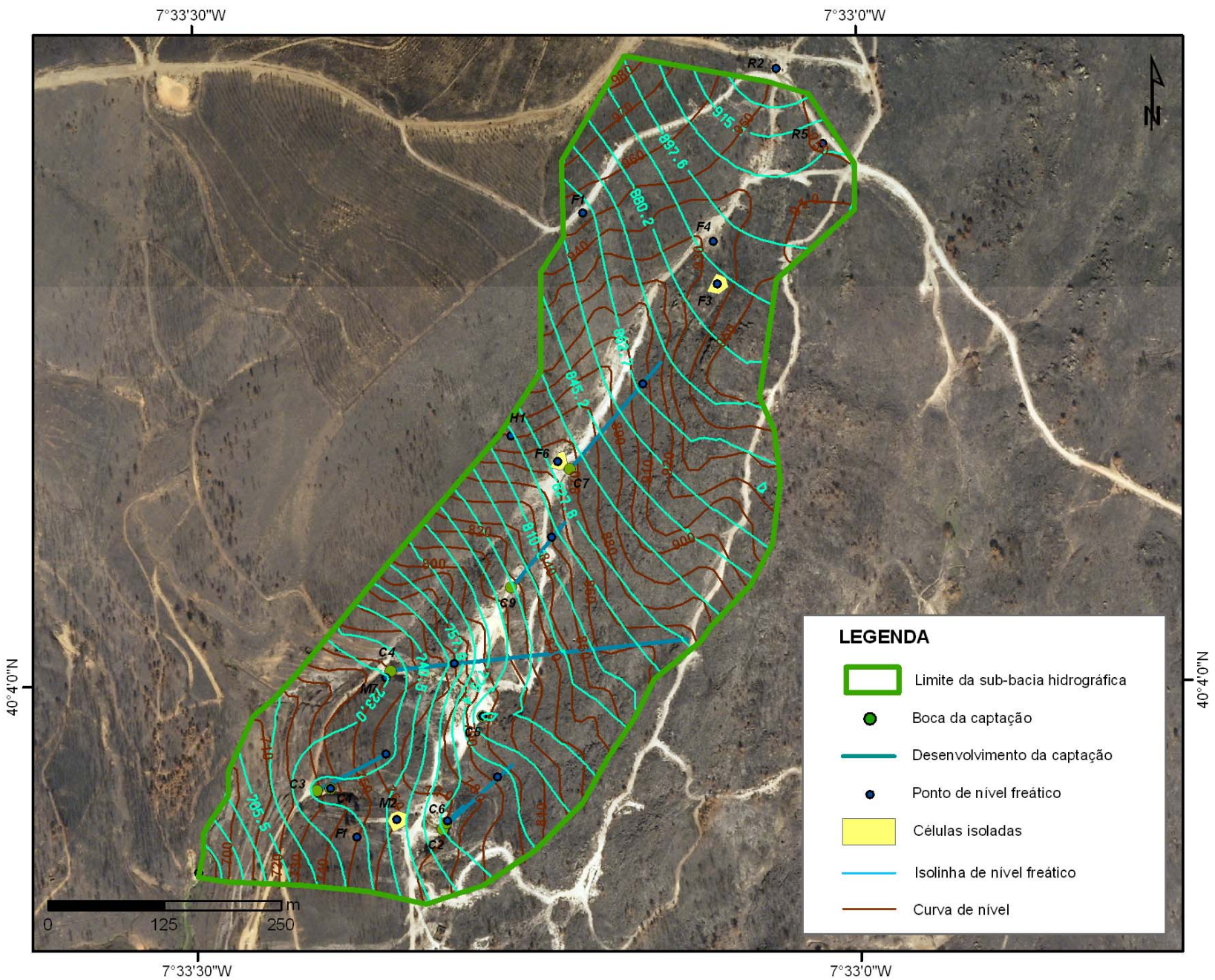


Figura 5.11. Distribuição das isolinhas de níveis hidroestáticos na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).

A melhor calibração obtida, com um coeficiente de correlação de $r=0.71$ entre os valores de caudais simulados e reais, correspondeu ao modelo onde foram aplicados, para os granitos e as corneanas, os valores de $K= 1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ e $S= 0.001$, e para as formações xistentas os valores de $K= 1 \times 10^{-13} \text{m/s}$ e $S= 0.0001$.

Na Figura 5.12 apresenta-se o gráfico que relaciona os caudais simulados com os caudais reais da melhor calibração e nas Figuras 5.13 e 5.14 mostra-se, a título de exemplo para a visualização do desenvolvimento do modelo, o último passo de simulação correspondendo ao dia 31/12/2006.

Note-se que o modelo de simulação de fluxo desenvolvido, não simula rigorosamente as situações extremas, de grandes picos temporários de caudal nem da anulação temporária dos mesmos em certas captações. Na realidade observaram-se situações em que alguns pontos de água deixaram temporariamente de correr e noutros em que o caudal triplicou de uma semana para a outra. Esses fenómenos não foram possíveis de reproduzir com o modelo de fluxo desenvolvido. Apesar destas limitações o modelo indica um incremento de caudal após cada episódio de recarga e uma redução significativa dos caudais na ausência da mesma.

Este modelo permite também simular caudais a explorar no futuro, impondo situações climáticas de partida. Por exemplo, admitindo-se que ocorrem durante três anos seguidos a precipitação similar ao valor médio anual apresentado na Figura 4.1, obter-se-ia uma evolução dos caudais de acordo com a situação representada na Figura 5.15.

Por outro lado, admitindo-se que ocorrem três anos seguidos de precipitação registada muito abaixo de todos os apresentados na Figura 4.1, obter-se-ia uma evolução dos caudais de acordo com o representado na Figura 5.16.

Denota-se deste modo, que se está perante uma ferramenta de extrema utilidade no sentido de prever os caudais exploráveis, função de vários cenários prováveis.

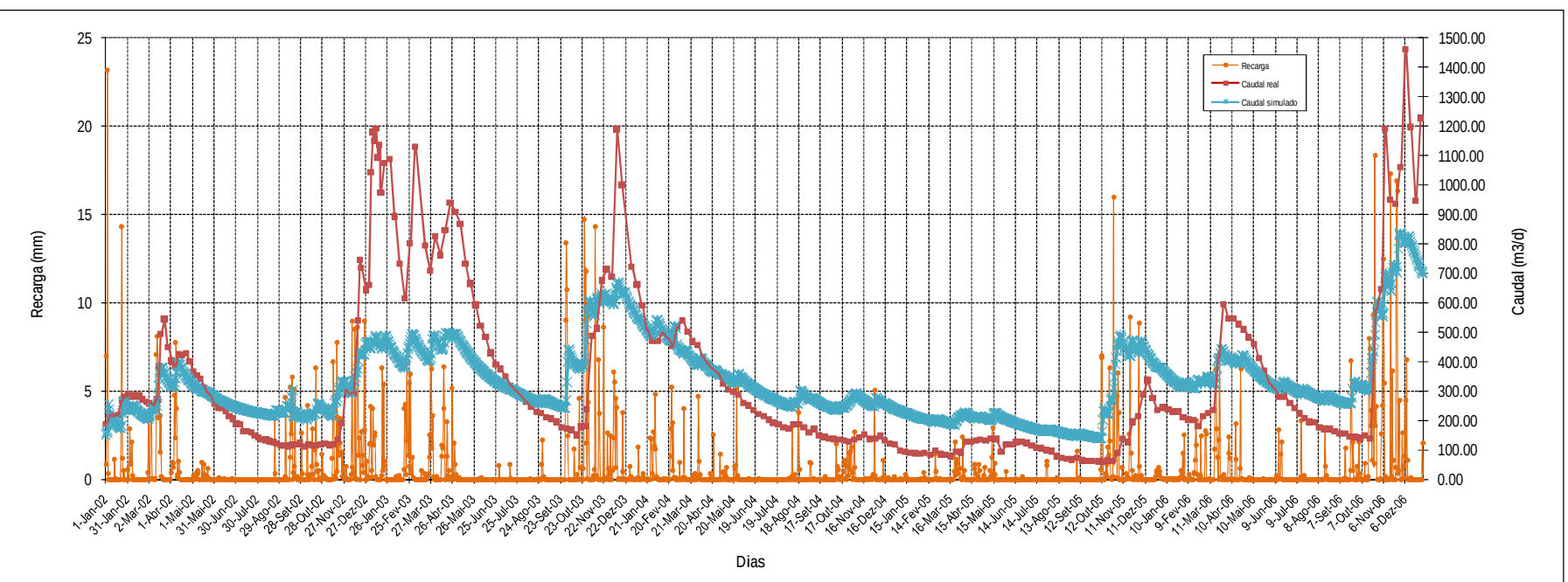


Figura 5.12. Gráfico com os valores de recarga, caudais simulados e caudais reais, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Nota: os caudais reais correspondem ao somatório dos caudais parciais das várias captações.

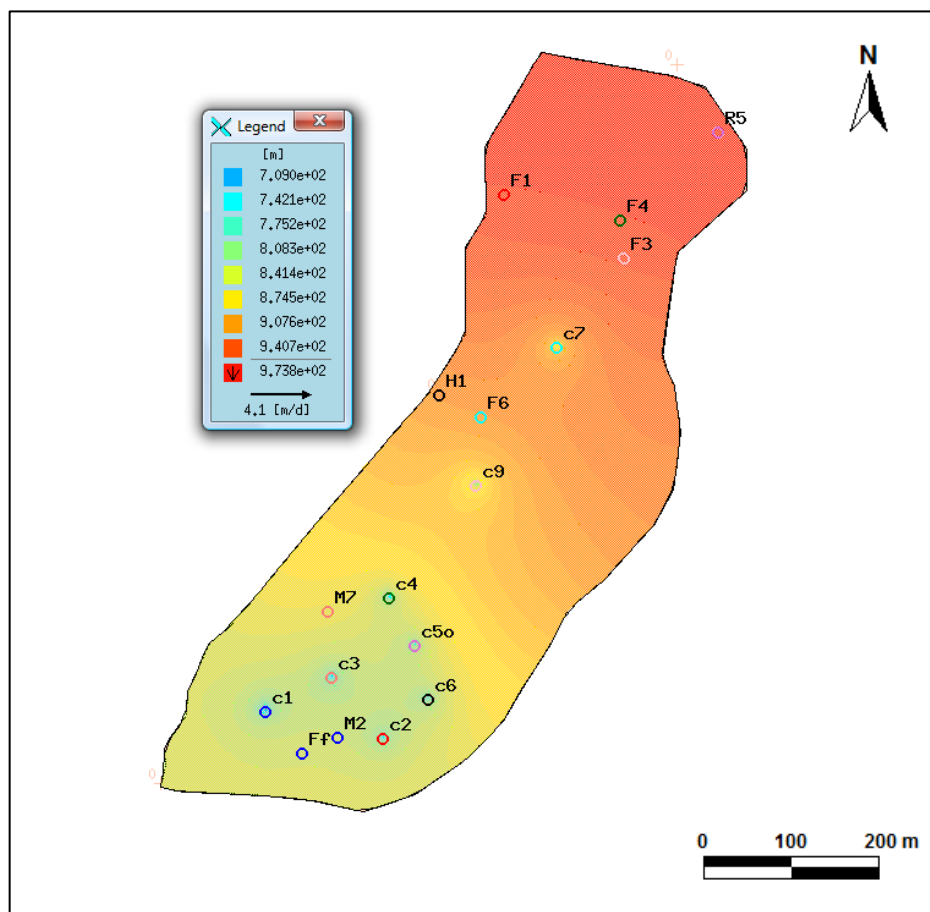


Figura 5.13. Distribuição dos níveis na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao último dia de simulação.

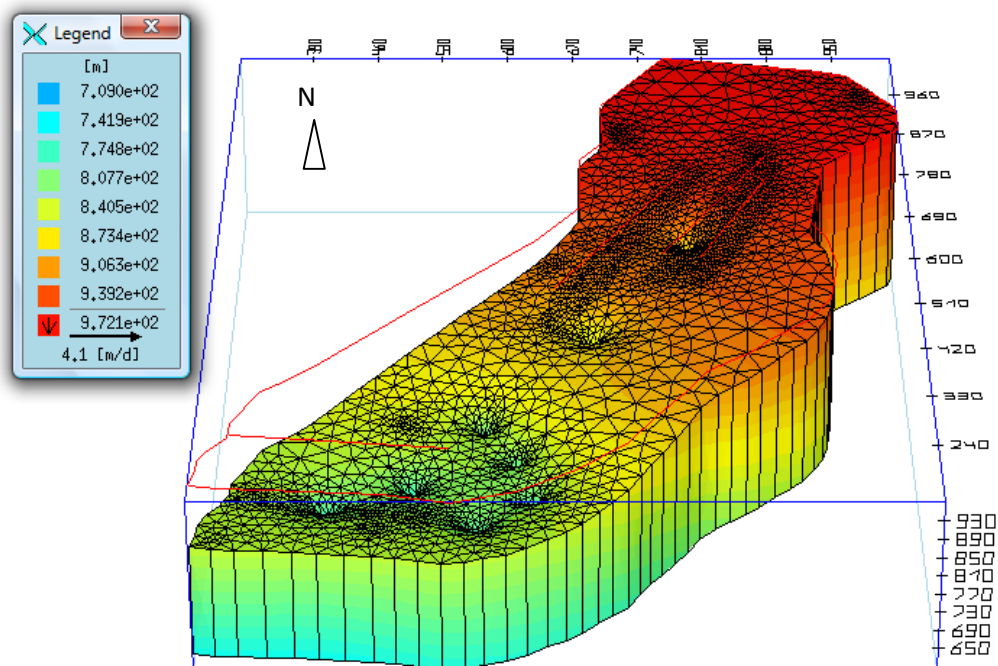


Figura 5.14. Visualização em 3D da distribuição dos níveis na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao último dia de simulação.

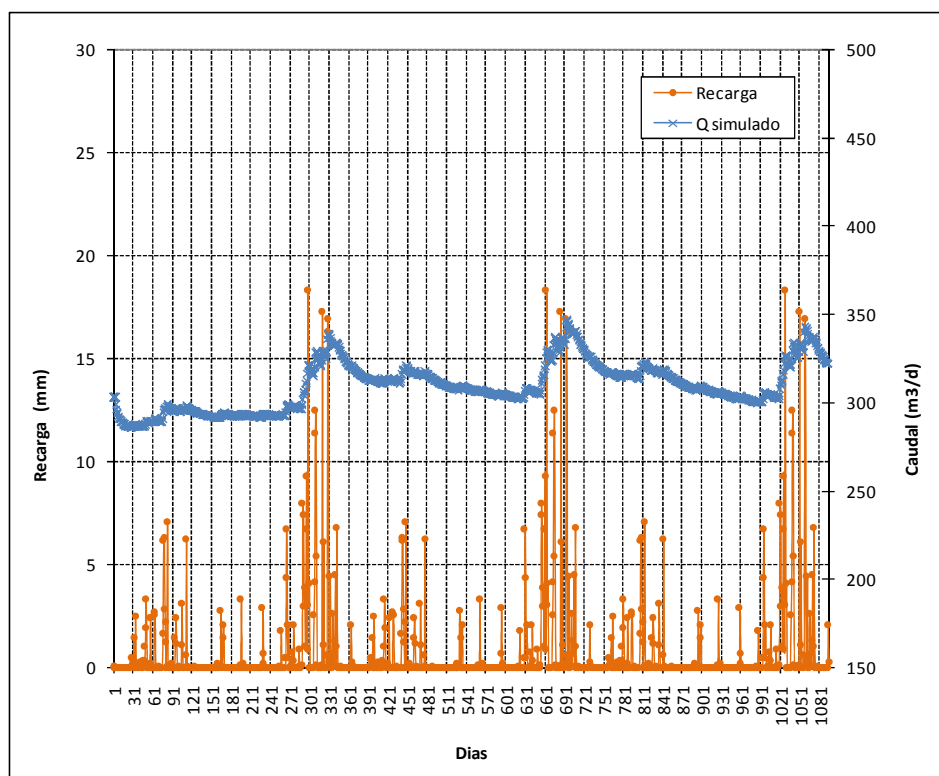


Figura 5.15. Gráfico com os valores de recarga admitindo um cenário de três anos sucessivos com recarga correspondente à precipitação de um período hidrológico normal, e caudais previstos (simulados), para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

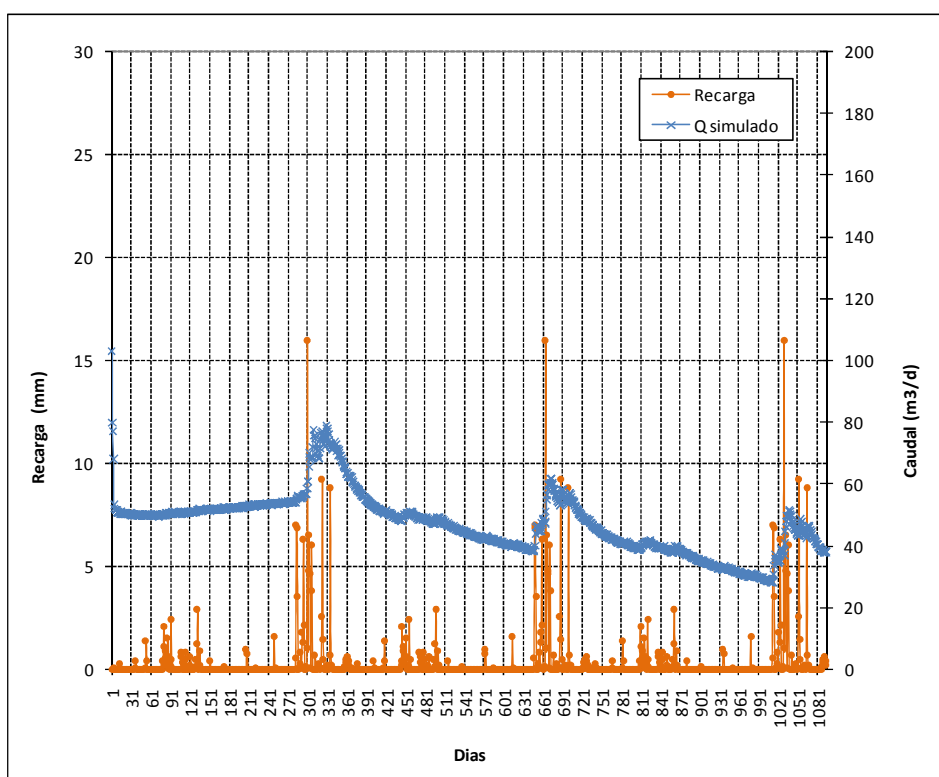


Figura 5.16. Gráfico com os valores de recarga admitindo um cenário de três anos sucessivos de acordo com o que ocorre num hidrológico de menor precipitação, e caudais previstos (simulados), para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

5.3.4. Balanço hídrico

Na Tabela 5.2 e nas Figuras 5.17 e 5.18 apresentam-se os valores dos balanços de entradas e saídas do sistema ao longo dos anos envolvidos na calibração e simulação do modelo de fluxo. Evidencia-se que existe um balanço hídrico negativo, ou seja, nos vários anos envolvidos na simulação, o caudal de saída é sempre superior ao caudal de entrada quer se trate do valor de caudal real ou do valor do caudal simulado.

Tabela 5.2. Valores de balanço hídrico com os caudais reais monitorizados e caudais simulados, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

Ano	Recarga (m ³ /ano)	Q saída real (m ³ /ano)	Q saída simulado (m ³ /ano)	Balanço hídrico real (m ³ /ano)	Balanço hídrico simulado (m ³ /ano)
2002	77036	97364	97722	-20328	-20686
2003	80162	228340	153894	-148178	-73732
2004	21316	102171	123545	-80855	-102229
2005	40420	42143	85249	-1723	-44829
2006	78982	152252	146562	-73270	-67580
Total	297917	622270	606972	-324353	-309055

Este facto leva a efectuar as seguintes considerações:

- o valor de taxa de infiltração em relação à precipitação será superior ao considerado na presente simulação, facto este, que não parece ser o mais razoável visto que o valor utilizado de 26.7%, é no entendimento do autor considerado ligeiramente alto;
- a zona a considerar como área de recarga será superior à considerada para a presente simulação. Esta premissa é considerada pelo autor mais plausível, na medida em que poderão existir famílias de fracturas com desenvolvimento entre o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga com as áreas vizinhas, e que na presente simulação não foram tidas em linha de conta. Poderão existir assim fracturas que funcionem como conectores hidráulicos com as bacias vizinhas da presente área de estudo contribuindo deste modo para a recarga das águas subterrâneas deste sector.

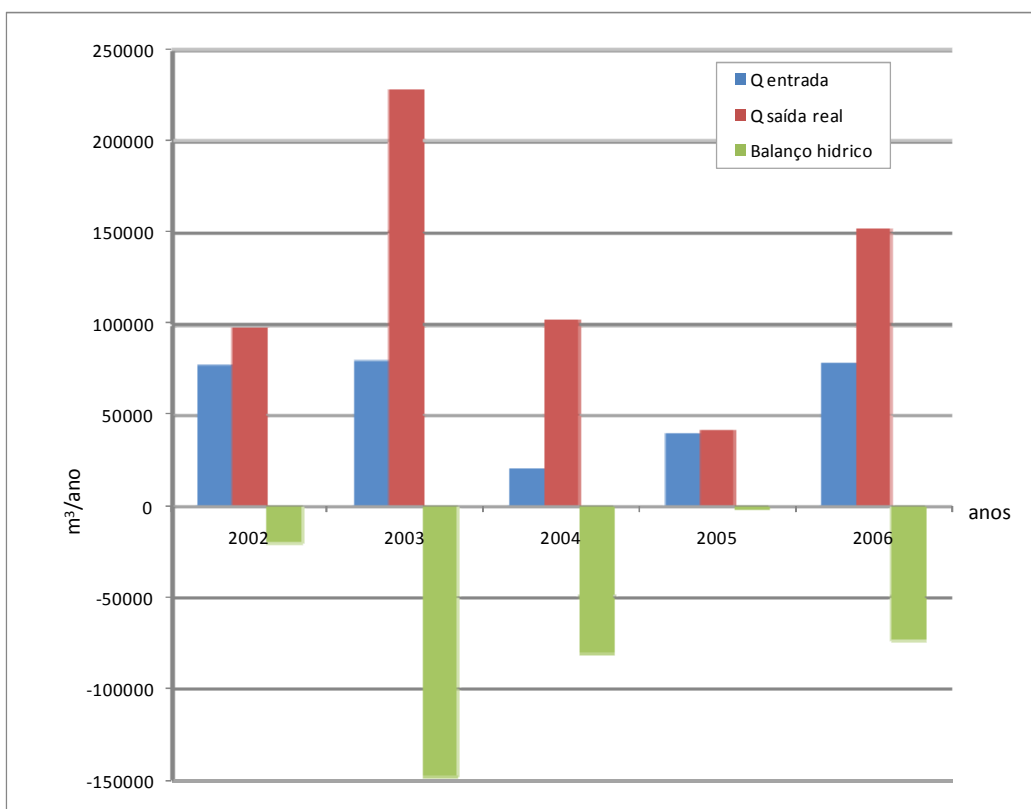


Figura 5.17. Gráfico de balanço hídrico com os caudais reais monitorizados, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

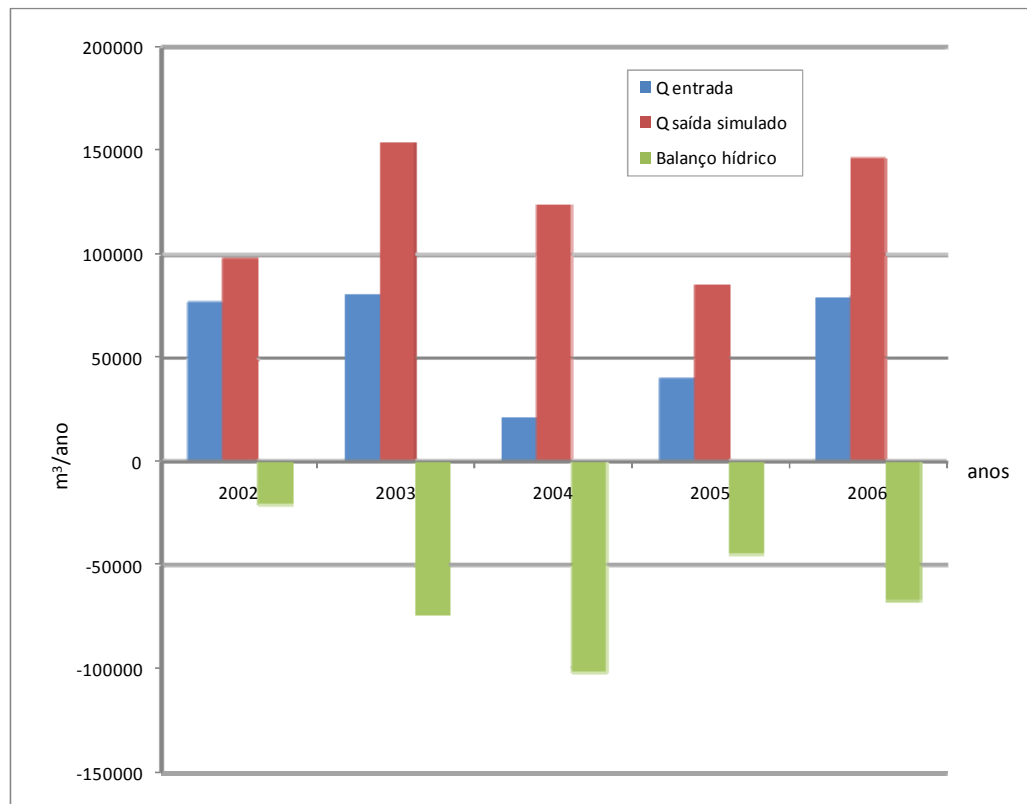


Figura 5.18. Gráfico de balanço hídrico com os caudais simulados no modelo, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

Admitindo-se também a simulação efectuada para três anos consecutivos de precipitação média anual, ou seja, admitindo o cenário com recarga correspondente à precipitação de um período hidrológico normal, os valores de balanço hídrico corresponderiam aos representados na Tabela 5.3. Destes e tendo por base o valor de produção de 98 000m³ relativos ao ano 2007 (DGEG, 2009), verifica-se em termos médios a capacidade de produção de mais 15% (caudal de saída simulado) em relação às necessidades de engarrafamento da Beira Vicente. Assim, num ano considerado normal, admitindo que seria possível armazenar toda a descarga natural e transforma-la em produto final (água de nascente Fonte da Fraga), a Beira Vicente teria capacidade de se abastecer só a partir da zona em estudo.

Tabela 5.3. Valores de balanço hídrico com caudais simulados admitindo o cenário de três anos consecutivos de precipitação equivalentes a um período hidrológico normal, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

	Recarga (m³/ano)	Q saída simulado (m³/ano)	Balanço hídrico simulado (m³/ano)
1º ano	73253	108962	-35708
2º ano	73253	114834	-41581
3º ano	73253	114738	-41485
Total	219760	338534	-118774

Na simulação efectuada para o cenário de três anos consecutivos de grande seca, ou seja, considerando a precipitação do período hidrológico mais seco observado, o balanço hídrico corresponderia ao apresentado na Tabela 5.4. Nesta situação e considerando igualmente o valor de produção real acima apresentado (98 000m³), em termos médios, a Beira Vicente só poderia produzir 33% do que foi realizado em 2007.

O cenário anterior seria catastrófico para a Beira Vicente, pois com três anos de seca seguidos, não conseguiria ter capacidade de satisfação do mercado que já conseguiu em 2007. Felizmente, este cenário nunca aconteceu desde que a empresa está no mercado, no entanto, de acordo com alguns estudos que são do conhecimento comum, há a tendência do aumento global da temperatura para a região de Portugal com uma consequente diminuição de precipitação, e este cenário não se exclui de todo.

Como consequência, naturalmente que a empresa, para manter a capacidade de produção em situações de cenários de anos maus hidrologicamente, terá que alargar a zona de produção, como aliás já tem vindo a evoluir nesse sentido nos últimos anos.

Tabela 5.4. Valores de balanço hídrico com caudais simulados admitindo o cenário de três anos seguidos de grande seca, ou seja considerando a precipitação do período hidrológico mais seco, para o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.

	Recarga (m³/ano)	Q saída simulado (m³/ano)	Balanço hídrico simulado (m³/ano)
1º ano	26824	28878	-2054
2º ano	26824	34534	-7710
3º ano	26824	34438	-7614
Total	80472	97850	-17378

Outra solução, mais conservadora, será o melhoramento das actuais captações, ou sua substituição, na mesma zona de exploração, de modo a que se consiga obter o recurso potencialmente disponível, com captações em que hidraulicamente se tenha melhor controlo, como é o caso de captações verticais.

Quando ocorrem episódios de precipitação, dá-se a recarga, e nas captações muito superficiais, resulta quase de imediato a descarga e com grandes picos de produção, geralmente de difícil aproveitamento por dificuldades, não só de stock a granel, como de engarrafamento. Isto leva a que, em períodos de picos de grande precipitação, possa haver desperdício devido a tais factores.

Assim, com captações verticais, consegue-se uma exploração com evolução de menores oscilações ao longo do ano, e naturalmente com uma maior eficácia no aproveitamento do recurso.

De qualquer modo, salienta-se nesta fase das discussões, que a realidade, não é tão linear como se poderá depreender das reflexões anteriores, pois no aquífero fissural de rochas graníticas da Serra da Gardunha, na maioria das vezes, quando se perfura a mais de 100m de profundidade, o maciço é seco, ou seja, não é produtivo. Por outro lado, a complicar a situação enfatiza-se que é frequente ocorrerem zonas completamente secas, desde a

superfície até grandes profundidades, como aconteceu por exemplo nos furos de pesquisa F3, F6, e M2, completamente secos, considerados por isso como células sem água isoladas na modelação do problema (Figura 5.8).

Assim, as relações entre a geologia e hidrogeologia, em associação a ferramentas analíticas e naturalmente de softwares como o Feflow, mas sem excluir o bom senso e experiência local, levarão a localizar novas potenciais captações, de modo a haver mais garantias para a produção da água de nascente do tipo Fonte da Fraga.

5.3.5. Optimização do local do novo furo de pesquisa

No seguimento de inúmeros exercícios de simulações, obtiveram-se em especial as imagens das Figuras 5.19 e 5.20, que apresentam uma boa noção sobre os caminhos preferências das partículas de água, considerando um regime transitório e numa fase inicial do processo. As partículas de água tendem de grosso modo a evoluir de NE para SW, com algumas mudanças pontuais que naturalmente tem a ver com as heterogeneidades do maciço e com as saídas nos pontos de água.

Entretanto, salienta-se a existência de locais em toda a área do aquífero, que funcionam como “ilhas secas”. Algumas dessas “ilhas” foram evidenciadas na Figura 5.8, através das células isoladas e que correspondem a locais sem água, como se comprovou pela existência nesses locais de furos de pesquisa que resultaram sempre secos. Estas situações alertam para o modo de ocorrência das águas subterrâneas neste tipo de aquíferos fissurados. Não existem nestes meios situações homogêneas em termos da distribuição da água subterrânea o que pode levar a muitos insucessos quando se pretende localizar novas captações.

No entanto, com o auxílio dos elementos geológico-estruturais em associação com a informação resultante de outros furos de prospecção e pesquisa e também com o auxílio de ferramentas numéricas tais como acontece neste trabalho com o software Feflow poder-se-á, sendo desejável, minimizar alguns desses insucessos.

Assim, com base no exposto foi localizado um novo ponto de prospecção e pesquisa no local designado por MF1 e que se apresenta na Figura 5.21.

Este local, pela simulação efectuada com o Feflow, corresponde a uma zona onde convergem os vectores de fluxo e encontra-se também a sul de uma estrutura geológico-estrutural (falha) considerada como uma barreira impermeável. Admite-se que este novo ponto, no futuro, possa funcionar como uma nova captação, sem interferência de significado com as captações já legalizadas e em especial as mais próximas (C1 e C3).

Por outro lado, se se vier a verificar que a falha não é completamente estanque, causando interferências nas captações existentes nomeadamente em C1 e C3, poderá levar a que estas últimas no futuro sejam abandonadas, ou neutralizadas, em prol de se explorar naquela área apenas a nova captação.

Menciona-se ainda que a localização de MF1, foi colocada ligeiramente mais para Oeste, com a noção e necessidade que tratando-se de um furo vertical, conviria ter alguns metros iniciais desenvolvidos na formação xistenta, por esta ser quase impermeável, potenciando assim, uma melhor captação no que diz respeito ao isolamento de águas superficiais. Esta situação só é possível porque se sabe, que de acordo com o conhecimento comum e também comprovado pela experiência local, que o contacto da formação granítica com as corneanas, em termos globais é aproximadamente paralelo ao contacto corneanas com a formação xistenta, e ambos os contactos, na zona em questão (onde se localizou MF1) inclinam para oeste.

No Anexo II apresentam-se os resultados obtidos neste furo de prospecção e pesquisa.

Figura 5.19. Distribuição dos vectores de fluxo na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga

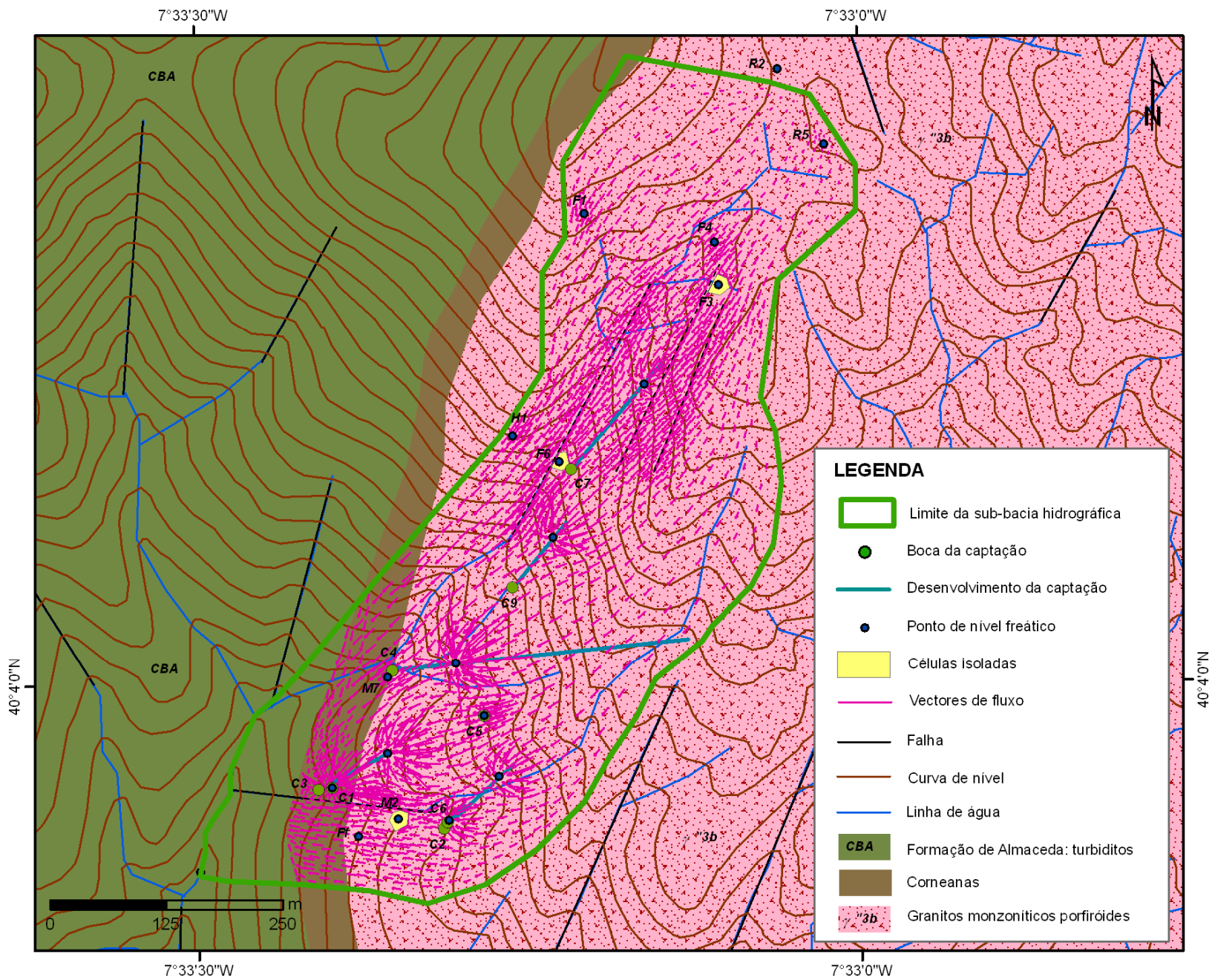


Figura 5.20. Distribuição dos vectores de fluxo na sub-bacia hidrográfica em estudo, correspondendo ao sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).

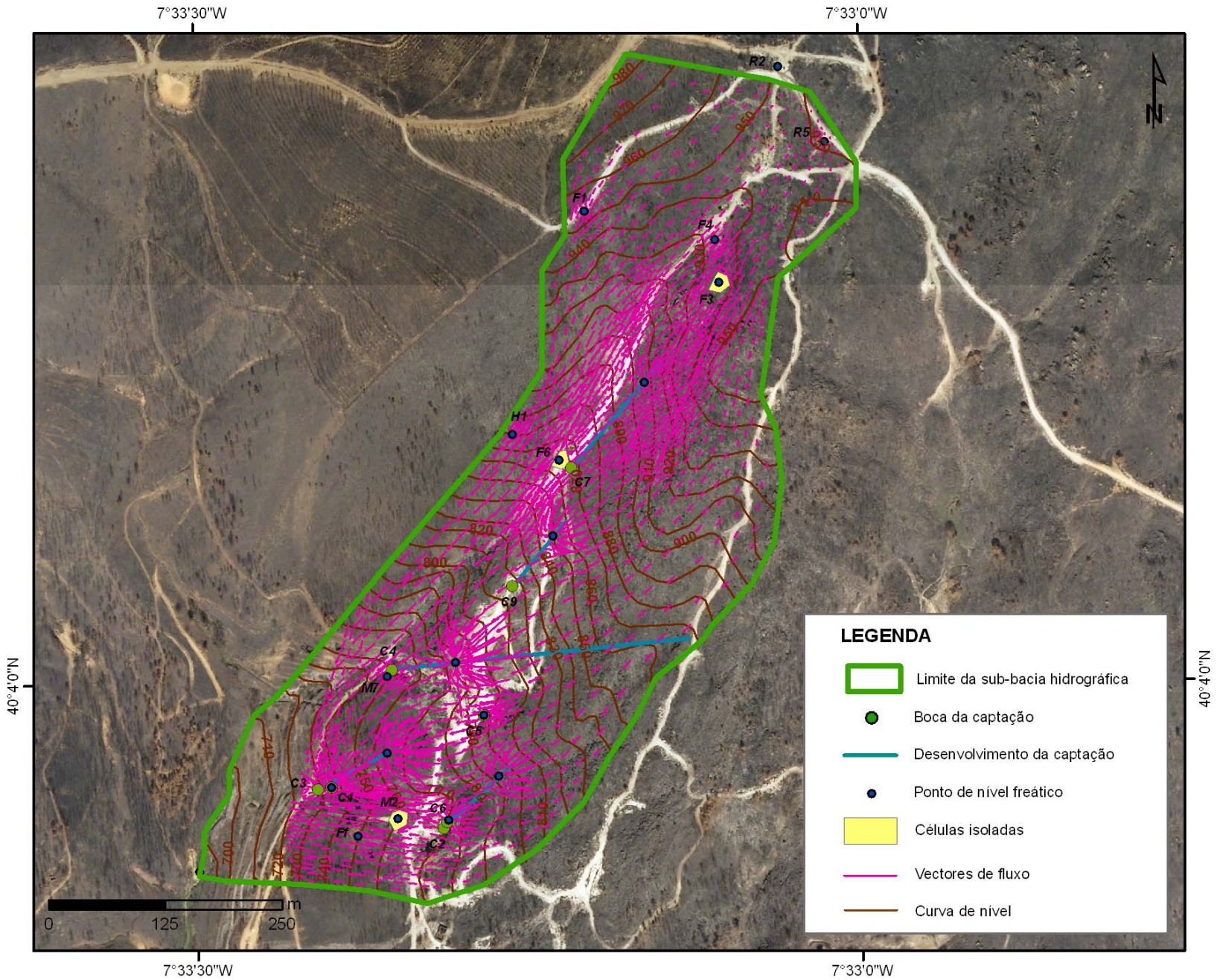
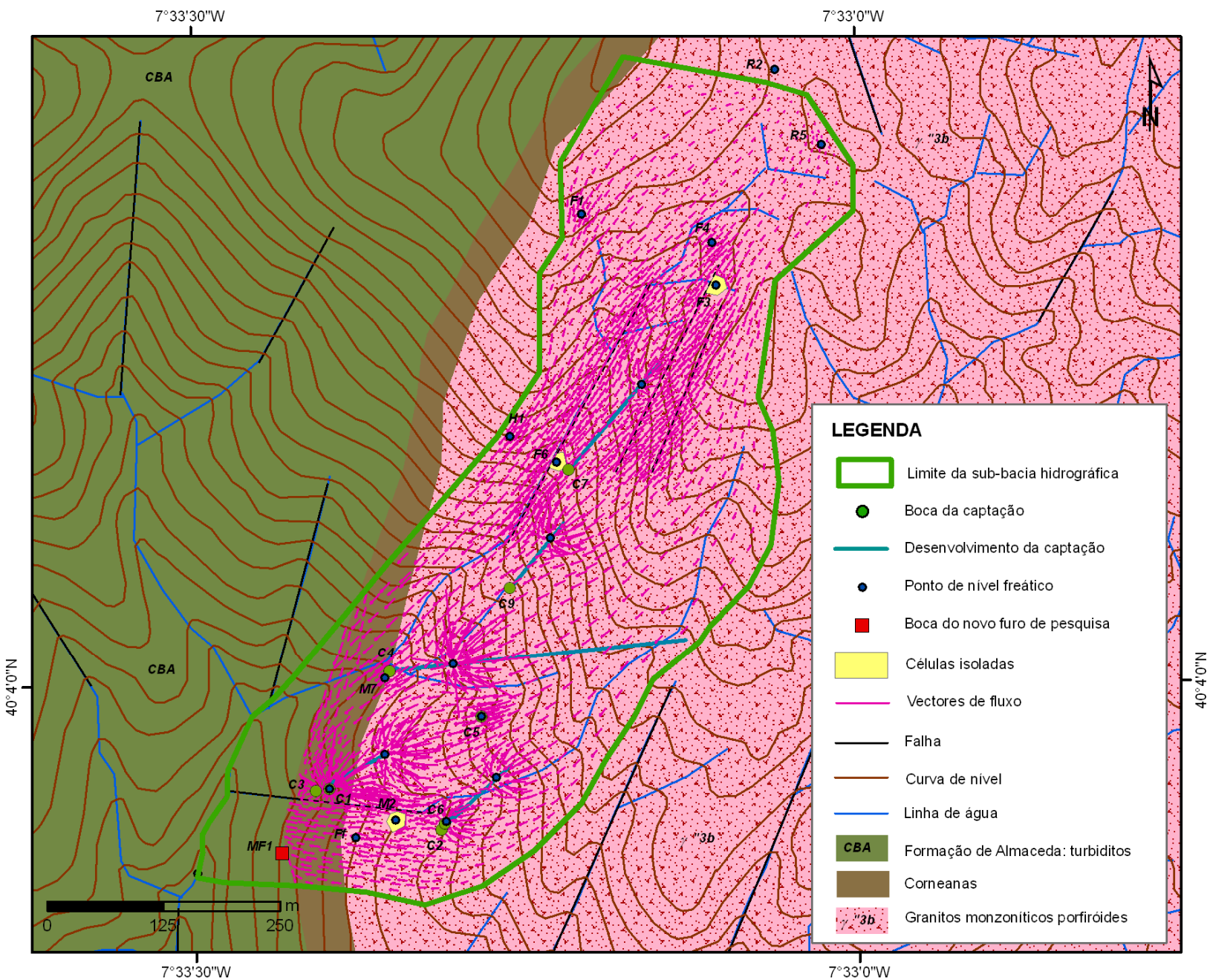


Figura 5.21. Localização do novo furo de prospecção e pesquisa no sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga.



Capítulo 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. Conclusões	145
6.2. Perspectivas Futuras	149

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. Conclusões

A Serra da Gardunha, localizada no Maciço Hespérico, é composta essencialmente por granitóides hercínicos e representam uma importante reserva nacional de água subterrânea de excelente qualidade. É nesta Serra que se localiza o aquífero da Fonte da Fraga e que ao longo deste trabalho foi alvo de estudos que contribuíram para um melhor conhecimento geológico, hidrológico, hidroquímico e hidrodinâmico, tendo sido possível retirar as conclusões descritas nos parágrafos seguintes:

- 1) As principais litologias na área de estudo correspondem a granitóides da série tardia, relacionados com os efeitos da última fase de deformação hercínica, e podem agrupar-se em dois grupos: os granitos monzoníticos de grão médio, porfiróides, com duas micas, essencialmente biotíticos ($\gamma''3b$); e os granitos tardios, de grão fino, moscovítico-biotíticos ($\gamma''3d$). Em termos de fracturação do maciço verifica-se que a família de alinhamentos com maior representação possui direcção 20° - 40° seguida da direcção 110° - 120° .
- 2) Em termos médios na região em estudo, a partir de uma análise de registos entre 1931/1932 a 2006/2007, verifica-se que o valor de precipitação total anual é de 993.5mm. O valor mínimo registado, de 363.8mm, foi obtido recentemente, no ano hidrológico 2004/2005, e traduziu-se um ano com precipitação muito abaixo do normal.

- 3) A partir do balanço hidrológico realizado, verifica-se que o período seco traduzido pelos défices hídricos (DH) de 306.1mm, vai de Julho a Setembro; o período húmido, traduzido pelo superavit hídrico (SH) de 490.1mm, vai de Novembro a Abril, verificando-se ainda o excesso máximo de água, em Dezembro.
- 4) Os estudos físico-químicos sobre a água da chuva da zona de estudo, denunciam em parte que a precipitação da região tem uma origem predominantemente de ambiente marinho, apesar de haver um contributo parcial na mineralização a partir de processos continentais. A mineralização total das amostras analisadas, em média é de 11 mg/l.
- 5) O aquífero da Fonte da Fraga é composto essencialmente pela unidade hidrogeológica “Granitóides e Corneanas”, de permeabilidade geralmente do tipo fissural e pontualmente intersticial; é recarregado essencialmente por infiltração da água da chuva, sendo a sua descarga efectuada fundamentalmente através da exploração da água subterrânea. Sobre a recarga aquífera, os estudos efectuados a partir do balanço hidrológico, orientam para que seja de 31% da precipitação anual; os cálculos efectuados a partir do balanço de cloretos indicam valores de 34% da precipitação; e pelo método de análise dos hidrogramas verifica-se que o valor médio de taxa de infiltração em relação à precipitação seja de 15%. A média dos três métodos (26.7%) é o valor que se entendeu usar nos estudos seguintes da presente tese.
- 6) A composição natural da água subterrânea do aquífero da Fonte da Fraga apresenta genericamente fácies bicarbonatada sódica, baixa mineralização (≤ 52.1 mg/l), pH ácido (5.59 a 6.66) e baixa dureza (≤ 13 mg(CaCO₃)/l). Sob o ponto de vista químico, a sua composição relativa pode ser expressa por ordem decrescente de importância, sob a forma $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ para os cations e $\text{HCO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ para os aniões. Evidenciaram-se ainda as

reduzidas concentrações de ferro, fluoreto e nitritos em solução, encontrando-se estes, e em especial o nitrito, na grande maioria abaixo do limite de quantificação. Sobre os elementos menores, verifica-se que na grande maioria as concentrações destes elementos encontram-se abaixo do limite de detecção.

- 7) Os resultados isotópicos da água da precipitação apresentam teores de $\delta^2\text{H}$ que variam entre -55.1‰ e -29.6‰, enquanto que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -8.59‰ e -5.70‰. A projecção destes resultados num diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ mostrou que estes valores, na generalidade, se localizam na recta das águas meteóricas do oeste mediterrâneo (Western Mediterranean Meteoric Water Line - WMMWL).
- 8) O aquífero apresenta águas provenientes de infiltração recente e com baixos tempos de residência, inferior a 5 anos. Verificou-se através da projecção $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$, e como seria de esperar, que se tratam de águas meteóricas e que não existem indícios de interacção água-rocha a temperaturas elevadas. Os gradientes isotópicos do $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são -0,37‰ e -2,57‰, respectivamente, por cada 100m de altitude.
- 9) A simulação efectuada no aquífero da Fonte da Fraga em 3D e em regime transitório, permitiu verificar um balanço hídrico negativo nos vários anos envolvidos, não só com base nos caudais reais obtidos ao longo do tempo na monitorização, como também com base nos caudais resultantes da simulação, ou seja, o caudal de saída foi sempre superior ao caudal de entrada. Este facto leva a considerar que: i) o valor de taxa de infiltração em relação à precipitação será superior ao considerado na presente simulação, facto este que não parece ser o mais razoável visto que o valor utilizado de 26.7% é no entendimento do autor considerado ligeiramente alto; ii) a zona a considerar como área de recarga será superior à considerada para a presente simulação, situação que leva a supor que há contribuições de fluxo subterrâneo a partir de bacias vizinhas. Esta última hipótese é considerada pelo autor mais

plausível, na medida em que poderão existir famílias de fracturas com desenvolvimento entre o sector principal do aquífero da água de nascente Fonte da Fraga com as áreas vizinhas, e que na presente simulação não foram tidas em linha de conta, por não terem sido observadas. Poderão existir assim fracturas que funcionem como conectores hidráulicos com as bacias vizinhas da presente área de estudo contribuindo deste modo para a recarga das águas subterrâneas desta bacia.

- 10) Este modelo permitiu também simular caudais a explorar no futuro, impondo cenários hidrológicos. Por exemplo, admitindo-se o cenário com recarga correspondente à precipitação de três anos consecutivos de um período hidrológico normal, os valores de balanço hídrico orientam para a capacidade de produção de mais 15% (caudal de saída simulado) em relação às necessidades de engarrafamento da Beira Vicente. Refere-se ainda que neste cenário a Beira Vicente teria capacidade de se abastecer só a partir da presente zona em estudo. Por outro lado, admitindo-se que ocorrem três anos seguidos de precipitação do período hidrológico mais seco observado, o balanço hídrico mostra que a Beira Vicente só poderia produzir 33% das suas necessidades. Este cenário seria catastrófico para a Beira Vicente, pois com três anos de seca seguidos, não conseguiria ter capacidade de satisfação do mercado que já conseguiu em 2007.
- 11) Com base no modelo de fluxo foi projectada e realizada uma nova captação (MF1) que terá como função principal captar o fluxo excedente e não aproveitado pelas outras captações. Sobre a nova captação, o furo MF1 foi efectuado num local a jusante das captações C1, C2 e C3, contudo, ainda dentro dos limites da propriedade dos terrenos da Beira Vicente. Esta nova captação foi considerada um êxito em termos de produtividade tendo superado as expectativas iniciais, sendo o seu caudal máximo admissível de 1.9 l/s.

12) Finalmente, considera-se o software Feflow uma ferramenta importante no desenvolvimento de modelos numéricos em meios fracturados, no entanto, e para sua aplicação na presente área de estudo verificaram-se algumas dificuldades nomeadamente na implantação de captações horizontais. O software no entendimento do autor poderia ter mais tipos de definições de captações, como os casos que ocorrem no presente estudo, em que existem nascentes, drenos e furos horizontais, não limitando o uso apenas a captações verticais. Sentiram-se também algumas dificuldades em termos de grafismo. O software não possui uma boa base gráfica, tendo sido necessário recorrer à exportação dos dados para uma plataforma de sistemas de informação geográfica para se obterem melhores apresentações de resultados.

6.2. Perspectivas Futuras

As conclusões deste trabalho não encerram o estudo dos modelos geohidráulicos em meios fracturados, pelo contrário abrem novas perspectivas de investigação e fornecem dados que podem ser usados para avaliar a evolução do fluxo subterrâneo em termos regionais. Reconhece-se ainda a complexidade de alguns assuntos, difíceis de esclarecer e associados a uma escala regional. No entanto a aquisição de novos dados associada às interpretações já conhecidas ajudarão a refinar a compreensão do sistema.

Assim propõe-se, para trabalhos futuros com vista ao estudo do modelo de fluxo regional, o seguinte:

- i) definição de uma rede de piezómetros ao longo de toda a bacia com o intuito de poder monitorizar os níveis freáticos;
- ii) efectuar ensaios de caudal (de longa duração), seleccionando diferentes pontos em ambientes hidrogeológicos com características distintas, de modo a quantificar com maior certeza os caudais admissíveis;

- iii) análise detalhada das estruturas geológicas existentes e em especial fracturas regionais entre as várias bacias hidrográficas;
- iv) elaboração de um novo modelo alargado a uma área maior tendo por base várias bacias hidrográficas vizinhas e onde se possam comparar os resultados com os encontrados no presente trabalho;
- v) elaboração de um modelo à escala regional, englobando toda a Serra da Gardunha.

BIBLIOGRAFIA

Adam, P. (2009) – “Application of selected geothermometers to exploration of low-enthalpy thermal water: the Sudetic Geothermal Region in Poland”, *in* Environmental Geology 58: pp. 1629-1638.

Aires-Barros, L.A., Marques, J.M. (2003) – “Geochemical studies as support of geothermics”, *in* A geologia de engenharia e os recursos geológicos, Coimbra, 15p.

Almeida, C.; Mendonça, J.J.L.; Jesus, M.R.; Gomes, A.J. (2000) – “Sistemas Aquíferos de Portugal Continental”, INAG, Lisboa, 661p.

Almeida, P.G.F.L.B. (2005) – “Deformação em comportamento frágil na região da Serra da Estrela”, Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 368p.

Andrade Afonso, A.R., Mendes Victor, A., Portugal Ferreira, M., Dupis, A., Aires-Barros, L., Santos, F., Trota, A., Marques, J., Moreira, M., Ribeiro, J., Sousa Oliveira, A. (1995) – “Evaluation of geothermal resources in the Chaves region (north Portugal)”, *in* Proceedings of World Geothermal Congress, Florence, Italy, pp. 1349-1353.

Araguás, L.A. (1991) – “Adquisición de los Contenidos Isotópicos (^{18}O e D) de las Águas Subterráneas: Variaciones en la Atmosfera y en la Zona no Saturada del Suelo”, Tese de Doutoramento, Universidad Autónoma de Madrid, 286p.

Appelo, C.A.J.; Postma, D. (1994) – “Geochemistry, Groundwater and Pollution”. A. A. Balkema, Rotterdam, 536p.

Azevedo, J.M.M.; Andrade, A.I.S.S.; Figueiredo, F.P.O., Silva, F.; Serafino, J.F.C. (2008) – “Modelo Hidrogeológico Conceptual para o Aquífero das Corgas, Sazes do Lorvão”, in 9º Congresso da água, APRH, Estoril, 9p.

Azevedo, J.M.M.; Félix, F.; Figueiredo, F.P.O. (2010) – “Caracterização Hidrogeológica do Flanco Oriental do Sinclinal do Buçaco na Região de Midões, Penacova”, in 10º Congresso da água, APRH, Alvor, 11p.

Barbieri M, Boschetti T, Petitta M, Tallini M (2005) – “Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, central Italy)” in *Applied Geochemistry*, 20: pp.2063–2081

Barreiras, N.M.J. (2009) – “Contribuição para a Caracterização e Modelação Hidrogeológica do Concelho do Seixal”, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 150p.

Bear, J. (1979) – “Hydraulics of Groundwater”. McGraw-Hill, 569p.

Berner, E.K.; Berner, R.A. (1987) – “The Global Water Cycle. Geochemistry and Environment”. Prentice Hall, 396p.

Carreira, P. M. (2008) - “Isótopos ambientais (^2H , ^{13}C , ^{18}O , ^3H e ^{14}C) em estudos de hidrogeologia e em estudos paleoclimáticos” in *Actas do seminário Geoquímica isotópica na caracterização, avaliação e monitorização de recursos hidrominerais*, FCUL, Lisboa, pp. 40-47.

Carvalho, M.R., Almeida, C. (2003) - “Hidrogeologia do sistema aquífero superficial do Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores)”, in *VI Congresso Nacional de Geologia, Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, nº esp. V, CD-ROM, E13-E16.

Carvalho, J.M.; Medeiros, A.L.C.; Garcia, S.C.F.M.V. (2004) - “Caracterização hidrodinâmica de algumas áreas do Maciço Antigo Português”, in *6º Congresso da Água*, APRH, Lisboa, 16 p.

Carvalho, J. M. (2008) – “Modelos conceptuais hidrogeológicos e pesquisa e captação de recursos hidrominerais em rochas cristalinas”, *in* Actas do seminário Geoquímica isotópica na caracterização, avaliação e monitorização de recursos hidrominerais, FCUL, Lisboa, pp. 59-65.

Celle, H. (2000) – “Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée occidentale, approche isotopique et chimique [Characterization of the precipitation around the western Mediterranean, isotopic and chemical approach]”. Tese de Doutoramento, Universidade de Avignon, França, 222p.

Celle, H.; Travi, Y.; Blavoux, B. (2001a) – “Isotopic typology of the precipitation in the western Mediterranean region at three different time scales” *in* Geophysical Research Letters 28(7): pp.1215–1218

Celle, H.; Gonfiantini, R.; Travi, Y.; Sol, B. (2004) – “Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of the Rayleigh model to selected rainfalls in southern France.” *in* Journal of Hydrology 289: pp.165–177

Chapman, J. B.; Lewis, B.; Litus, G. (2003) – “Chemical and isotopic evaluation of water sources to the fens of South Park, Colorado”, *in* Environmental Geology 43: pp. 533-545.

Clark, I.; Fritz, P. (1997) – “Environmental isotope in hydrogeology”. Lewis Publishers, New York, 328 p.

Craig, H. (1961) – “Isotopic variations in meteoric waters” *in* Science, 133: pp. 1702- 1703.

COBA (1993) – “Ante-projecto do Túnel da Gardunha”. COBA - Consultores para Obras, Barragens e Planeamento, SA, 59p.

Coplen, T.B.; Herczeg, A.L.; Barnes, C. (2000) – “Isotope engineering: using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems” *in* Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, ed. by P.G. Cook and A.L. Herczeg, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000.

Custódio, E.; Llamas, M. R. (2001) – “Hidrologia Subterranea”, 2ª ed. Ed. Omega, 2 vols., 2359p.

Daveau, S. (1969) – “Structure et relief de la Serra da Estrela”, *in* Finisterra, Revista Portuguesa de Geografia, vol. IV - 7 e 8, Lisboa, pp. 31-63.

Delgado Rodrigues, J. (1981). Noções de Hidrologia. Rev. APG, Geonovas nº 7 pp.11-30.

Delleur, J.W. (1998) - “The handbook of groundwater engineering”. CRC Press – Springer.

DEQ (1996) – “Wellhead Protection Program, Guidance Manual”. Department of Environmental Quality and Oregon Health Division, 203p.

DGEG (2009) – Direcção Geral de Energia e Geologia, acedido em 13/2/2009 em <http://www.dgge.pt/>

Diersch, H.J.G. (2002) – “Feflow – Reference manual”. Wasy Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, 278p.

EGEO (2010) – Sistema Nacional de Informação Geocientífica, acedido em 5/3/2010, em http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/lexico.htm

EPA (1994) – “Ground water and wellhead protection: handbook”. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Water, 269p.

Espinha Marques, J.; Duarte, J.M.; Constantino, A.T.; Aguiar, C.; Rocha, F.T.; Marques, J.M.; Samper, J.; Borges, F.S.; Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I. (2009) – “Avaliação *in situ* da condutividade hidráulica de solos de montanha: um caso de estudo na Serra da Estrela (Centro de Portugal)” *in* Cadernos Laboratório Xeológico de Laxe, volume 34, pp. 143-164.

Fernandes, L.F. (1992) – “Hidrogeologia de Dois Importantes Aquíferos (Sabariz/Cova de Lua) do Maciço Polimetamórfico de Bragança”. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 172 p.

Fernandes, L.F. (1995) – “Estudo Hidrogeológico dos Aquíferos de Sabariz e de Cova de Lua do Maciço de Bragança”, *in* Resumos Alargados do IV Congresso Nacional de Geologia, Memórias Nº 4, pp.451-454.

Ferreira, H.A. (1970) - “O clima de Portugal, normas climatológicas do continente, Açores e Madeira correspondentes a 1931-1960”, Serviço Meteorológico Nacional, Lisboa, 207p.

Ferreira Gomes, L.M.; Gouveia Pereira, J.J.; Reis Ferreira, S.M.; Bezerra, A. (2002) – “Contribuição para o Conhecimento do Modelo Geohidráulico da Água Mineral das Termas de Carvalhal – Castro Daire”, *in* 6º Congresso da Água, APRH, Porto.

Ferreira Gomes, L.M.; Matias, P.; Mendes, J.M.; Mendes, E.; (2008) “Natural framing of new spring water Fonte da Fraga (Portugal)”, *in* XXXVI Congress International Association of Hydrogeologists, Integrating Groundwater Science and Human Well-being, Toyama, Japan, 10p.

Fetter, C.W. (2001) – “Applied Hydrogeology”, (4 ed.). Prentice Hall.

Finzi, G.; Novo, A.; Viarengo, S. (1991) – “An Application of Multivariate Analysis to Acid Rain Data, in Northern Italy to Discriminate Natural and Man-Made Compounds”, *in* Environmental Monitoring and Assessment, vol.17: pp. 273-280.

Fitts, C.R. (2002) – “Groundwater Science”. Academic Press.

Freeze, R.A.; Cherry, J.A. (1979) – “Groundwater”. Prentice Hall.

Gat, J.R. (1980) – “The Isotopes of Hydrogen and Oxygen in precipitation” *in* Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, 1 (eds. P. Fritz & JCh Fontes), Elsevier, Amsterdam, pp. 21-47.

Geoambiente (1992) – “Estudo hidrogeológico da concessão Alardo”. Empresa das Águas do Alardo, 27p.

GeoInterior (2001) – “Licenciamento de nova captação. Fonte da Orada – FdO (Captação Nº3 – C3). Águas de S. Vicente da Beira Vicente”. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda., Casal da Fraga – São Vicente da Beira, 35p.

GeoInterior (2003a) – “Licenciamento de nova captação. FONTE DA FRAGA 6 – FdF6 (Captação Nº6). Águas de S. Vicente da Beira Vicente”. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda., Casal da Fraga – São Vicente da Beira, 33p.

GeolInterior (2003b) – “Licenciamento de nova captação. FONTE DA FRAGA 7 – FdF7 (Captação Nº7). Águas de S. Vicente da Beira Vicente”. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda., Casal da Fraga – São Vicente da Beira, 33p.

GeolInterior (2005) – “Licenciamento de nova captação. FONTE DA FRAGA 5 – FdF5 (Captação Nº5). Águas de S. Vicente da Beira Vicente”. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda., Casal da Fraga – São Vicente da Beira, 28p.

Hidroterra (1996) – “Estudo Hidrogeológico de duas nascentes situadas em Rabaçal – Sra da Orada”. Lisboa.

IGM (2001) - Instituto Geológico e Mineiro, “Água subterrânea: conhecer para preservar o futuro”, acedido em 15/5/2009, em: http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm

IGP (2009) - Instituto Geográfico Português, acedido em 24/6/2009 em <http://www.igeo.pt/>

Kruseman, G. P.; De Ridder, N. A. (1990) – “Analysis and Evaluation of Pumping Test Data”. Second Edition. International Intitute for Land Reclamation and Improvement, publication 47, The Netherlands, 377p.

Langmuir, D. (1997) – “Aqueous Environmental Geochemistry”. Prentice Hall, New Jersey, 600p.

Lima, A.S.; Silva, M.O. (1995) – “Estudo hidrogeológico dos granitóides da região de Braga (NW de Portugal)”, *in* Memórias, Publicações do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, nº4, pp. 461-465.

Lima, A.S. (2000) – “Hidrogeologia de terrenos graníticos do Minho: Noroeste de Portugal”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 451p.

Lima, A.S., Oliveira, A.C.V. (2006) – “Conceptualização de modelos hidrogeológicos em águas sulfúreas”, *in* Actas do II Fórum Ibérico de Águas Engarrafadas e Termalismo, Porto, 14p.

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

Lerner, D.N.; Issar, A.S.; Simmers, I. (1990) – “Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge”. International Contributions to Hydrogeology, I. A. H., Verlag Heinz Heise, 345p.

Lucas, L.L.; Unterweger, M.P. (2000) – “Comprehensive review and critical evaluation of half-life of tritium” *in* Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 105: pp.541-549

Machado, M.J.C. (1999) – “Averiguação da qualidade química”, *in* Preservação da qualidade das águas minerais naturais e águas de nascente, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, pp. 66-72.

Marques da Costa, A.T. (2001) - “Sistema Aquífero Moura-Ficalho”. Anexo II - Fichas dos Sistemas Aquíferos do Alentejo do Relatório Técnico do Projecto de Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. CCRA, Évora.

Marques da Costa, A.T. (2008) – “Modelação Matemática dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Moura”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 207p.

Marques da Mata, M. (1963) – “Anuário médico-hidrológico de Portugal”. Direcção Geral de Saúde, Lisboa, 960p.

Marques, J.M.; Carreira, P.M. (2008) – “Origem de algumas águas gasocarbónicas do N de Portugal: da geoquímica convencional à geoquímica isotópica”, *in* Actas do seminário Geoquímica isotópica na caracterização, avaliação e monitorização de recursos hidrominerais, FCUL, Lisboa. pp. 33-39.

Marques, J.M. (1999) – “Geoquímica dos fluidos e da interacção água-rocha: os casos das águas mineralizadas quentes e frias de Chaves, Vilarellho da Raia, Vidago e Pedras Salgadas”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 276p.

Mendes, B.; Oliveira, J.F.S. (2004) – “Qualidade da água para consumo humano”. Lidel, 626p.

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, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 249p.

Mendes, E.; Ferreira Gomes, L.M.; Ribeiro, L.F.T.; Condesso de Melo, M.T. (2010a) “Caracterização hidrogeológica da água de nascente Fonte da Fraga”, *in* 10º Congresso Nacional da Água, APRH, Alvor, 12p.

Mendes, E.; Carvalho, P.E.M.; Ferreira Gomes, L.M.; Cavaleiro, V.M.P. (2010b) – “Estudo hidroquímico do aquífero mineral de Castelo Novo, Serra da Gardunha”, *in* X Congresso de Geoquímico dos Países de Língua Portuguesa e XVI Semana de Geoquímica, Porto, 8 p.

Mendes Oliveira, M. (2006) – “A estimativa da recarga de águas subterrâneas numa área de Estarreja considerando a posição do nível freático”, *in* 8º Congresso da Água, APRH, Figueira da Foz, 15p.

Monteiro, J.P. (2001) – “Characterisation of a carbonate aquifer for the application of a regional discrete continuum flow model –Castelo de Vide carbonate aquifer, Alentejo, Portugal”, PhD Thesis, Neuchâtel University, Switzerland, 143p.

Mook, W. G. (2005) – “Introduction to Isotope Hydrology, Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Carbon and Oxygen”. Taylor and Francis, London, 226p.

Négrel, P.; Roy, S. (1998) – “Chemistry of Rainwater in the Massif Central (France): a Strontium Isotope and Major Element Study”, *in* Applied Geochemistry, vol.13: pp. 941-952.

Ouda, O.; El Hamdaoui, A.; Ibn Majah, M. (2005) – “Isotopic composition of precipitation at three moroccan stations influenced by oceanic and mediterranean air masses”. International Atomic Energy Agency, Technical Documents, Vienna, pp. 125–140

Portugal Ferreira, M.; Sousa Oliveira, A. (2000) – “Lithologic and tectonic control of the mineral waters in the hercynian belt: northeast Portugal”, *in* Groundwater Geochemistry and Water Quality, 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brasil.

Ribeiro, O. (1954) – “Estrutura e relevo da Serra da Estrela”. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Tomo homenaje a E. Hernández-Pacheco), pp. 549-566.

Rosário Carvalho, M. (2008) – “Contribuição da geoquímica isotópica na definição de modelos conceptuais de sistemas hidrominerais: exemplos de aplicação na ilha de S. Miguel (Açores)”, *in* Actas do seminário Geoquímica isotópica na caracterização, avaliação e monitorização de recursos hidrominerais, FCUL, Lisboa, pp. 48-58.

Rozanski, K; Gonfiantini, R.; Aráguas, L. (1991) – “Tritium in the global atmosphere: Distribution patterns and recent trends” *in* Journal of Physics G: Nuclear Particle Physics, 17: pp.5523-5536

SNIRH (2009) – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, acedido em 3/6/2009 em <http://snirh.pt/>

Sousa Oliveira, A. (2001) – “Hidrogeologia dos sistemas gasocarbónicos da província hidromineral transmontana: Ribeirinha (Mirandela), Sandim (Vinhais), Segirei e Salgadela (Chaves)”, Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 442p.

Sousa Oliveira, A. (2005) – “Modelos Geohidráulicos”. Palestra apresentada no âmbito de Mestrado de Geotecnia Ambiental – Eng.º Civil. Universidade da Beira Interior.

Teixeira, C.; Santos, J.P.; Carvalho, H.F.; Fernandes, A.P.; Veirinho, M. (1974) – Carta Geológica de Portugal, na escala de 1/50 000. Notícia explicativa da folha 20-B, Covilhã. Direcção geral de minas e serviços geológicos, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Teixeira, C.; Santos, J.P.; Carvalho, H.F.; Fernandes, A.P.; Veirinho, M.M. (1975) – Carta Geológica de Portugal, na escala de 1/50 000, folha 20-B, Covilhã. Direcção geral de minas e serviços geológicos, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

UBI (2006a) – “Licenciamento de nova captação. Fonte da Fraga 9 – FdF9 (Captação nº9). Águas de S. Vicente da Beira Vicente”. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda., Casal da Fraga – São Vicente da Beira, 37p.

UBI (2006b) – “Licenciamento de nova captação. Fonte da Fraga 12 – FdF9 (Captação nº12). Águas de S. Vicente da Beira Vicente”. Beira Vicente, Exploração e Comercialização de Águas de Mesa, Lda., Casal da Fraga – São Vicente da Beira, 28p.

Vidal Romani, J.R.; Twidale, C.R. (1998) – “Formas y Paisajes Graníticos”. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións, 411p.

Vieira da Silva, A.M., Condesso de Melo, M.T., Marques da Silva, M.A. (2000) – “Modelo conceptual e caracterização hidrogeológica preliminar do sistema aquífero da Serra do Buçaco”, in “As águas subterrâneas no noroeste da Península Ibérica”, APRH, Coruña, 8p.

Vieira, G.T. (2004) – “Morfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela: Ambientes frios do Plistocénico Superior e dinâmica actual”, Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 724p.

Yurtsever, Y.; Gat, J.R. (1981) – “Atmospheric Waters: in Stable Isotope Hydrology Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle”. International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series, 210, Vienna, pp.110-142

Wang, H.; Anderson, M.P. (1982) – “Introduction to groundwater modeling – Finite difference and finite element methods”. W.H. Freeman and Company.

Anexos

I. Valores de caudal monitorizados ao longo dos anos de 2002 a 2006	162
II. Caracterização do novo furo de pesquisa	185

I. VALORES DE CAUDAL MONITORIZADOS AO LONGO DOS ANOS DE 2002 A 2006

Neste anexo, apresentam-se os dados de monitorização de caudal dos pontos de água C1, C2, C3 e C6 ao longo dos anos de 2002 a 2006 e que foram usados, essencialmente, para a análise do item 4.2.3.

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
01-01-2002				
02-01-2002	0.53		0.34	0.56
03-01-2002				
04-01-2002	0.54		0.39	0.56
05-01-2002				
06-01-2002				
07-01-2002	0.53		0.43	0.56
08-01-2002	0.53		0.43	0.56
09-01-2002				
10-01-2002				
11-01-2002	0.53		0.44	0.56
12-01-2002				
13-01-2002				
14-01-2002	0.53		0.42	0.56
15-01-2002				
16-01-2002				
17-01-2002	0.53		0.42	0.56
18-01-2002	0.53		0.41	0.56
19-01-2002				
20-01-2002				
21-01-2002	0.55		0.42	0.56
22-01-2002				

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
23-01-2002				
24-01-2002	0.55		0.45	0.56
25-01-2002	0.56		0.51	0.56
26-01-2002				
27-01-2002				
28-01-2002	0.59		0.61	0.56
29-01-2002				
30-01-2002				
31-01-2002	0.62		0.66	0.55
01-02-2002				
02-02-2002				
03-02-2002				
04-02-2002	0.60		0.63	0.57
05-02-2002				
06-02-2002				
07-02-2002	0.61		0.61	0.56
08-02-2002				
09-02-2002				
10-02-2002				
11-02-2002	0.62		0.62	0.58
12-02-2002				
13-02-2002	0.61		0.61	0.58

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
14-02-2002				
15-02-2002	0.61		0.60	0.57
16-02-2002				
17-02-2002				
18-02-2002	0.62		0.54	0.54
19-02-2002				
20-02-2002				
21-02-2002	0.59		0.54	0.54
22-02-2002				
23-02-2002				
24-02-2002				
25-02-2002	0.62		0.52	0.53
26-02-2002	0.59		0.52	0.54
27-02-2002				
28-02-2002				
01-03-2002	0.61		0.50	0.55
02-03-2002				
03-03-2002				
04-03-2002	0.59		0.50	0.53
05-03-2002				
06-03-2002				
07-03-2002	0.57		0.50	0.51
08-03-2002				
09-03-2002				
10-03-2002				
11-03-2002	0.56		0.49	0.51
12-03-2002				
13-03-2002				
14-03-2002	0.60		0.66	0.60
15-03-2002				
16-03-2002	0.77		0.90	0.95
17-03-2002				
18-03-2002	0.93		1.08	1.88
19-03-2002				
20-03-2002	0.85	1.70	1.10	1.96
21-03-2002				
22-03-2002	0.88	1.81	1.06	2.43
23-03-2002				
24-03-2002				
25-03-2002	0.80	1.45	1.01	1.51
26-03-2002				
27-03-2002	0.79	1.33	0.96	1.40

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
28-03-2002				
29-03-2002	0.79	1.27	0.94	1.31
30-03-2002				
31-03-2002				
01-04-2002	0.72	1.17	0.87	1.15
02-04-2002				
03-04-2002	0.74	1.09	0.87	1.09
04-04-2002				
05-04-2002	0.71	1.01	0.85	1.00
06-04-2002				
07-04-2002				
08-04-2002	0.70	0.98	0.85	0.98
09-04-2002				
10-04-2002	0.74	0.93	0.95	0.95
11-04-2002				
12-04-2002	0.79	1.02	0.97	1.08
13-04-2002				
14-04-2002				
15-04-2002	0.85	1.07	0.96	1.00
16-04-2002				
17-04-2002	0.75	1.07	0.96	1.15
18-04-2002				
19-04-2002	0.81	1.08	0.94	1.07
20-04-2002				
21-04-2002				
22-04-2002				
23-04-2002	0.63	1.03	1.04	0.94
24-04-2002				
25-04-2002				
26-04-2002				
27-04-2002				
28-04-2002				
29-04-2002	0.69	0.96	0.94	0.93
30-04-2002				
01-05-2002				
02-05-2002	0.71	0.90	0.81	0.91
03-05-2002				
04-05-2002				
05-05-2002				
06-05-2002	0.71	0.83	0.78	0.85
07-05-2002				
08-05-2002	0.71	0.81	0.78	0.84

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
09-05-2002				
10-05-2002	0.71	0.77	0.77	0.83
11-05-2002				
12-05-2002				
13-05-2002	0.67	0.71	0.74	0.71
14-05-2002				
15-05-2002	0.67	0.67	0.73	0.69
16-05-2002				
17-05-2002	0.69	0.67	0.73	0.69
18-05-2002				
19-05-2002				
20-05-2002	0.69	0.64	0.73	0.65
21-05-2002				
22-05-2002	0.66	0.59	0.70	0.64
23-05-2002				
24-05-2002	0.66	0.57	0.70	0.59
25-05-2002				
26-05-2002				
27-05-2002	0.66	0.56	0.66	0.60
28-05-2002				
29-05-2002	0.64	0.53	0.62	0.58
30-05-2002				
31-05-2002	0.62	0.50	0.61	0.57
01-06-2002				
02-06-2002				
03-06-2002	0.63	0.47	0.56	0.56
04-06-2002				
05-06-2002	0.60	0.46	0.54	0.56
06-06-2002				
07-06-2002	0.61	0.44	0.52	0.54
08-06-2002				
09-06-2002				
10-06-2002	0.62	0.43	0.52	0.55
11-06-2002				
12-06-2002	0.60	0.42	0.49	0.52
13-06-2002				
14-06-2002	0.59	0.41	0.49	0.53
15-06-2002				
16-06-2002				
17-06-2002	0.58	0.39	0.47	0.50
18-06-2002				
19-06-2002	0.57	0.39	0.45	0.52

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
20-06-2002				
21-06-2002	0.56	0.34	0.44	0.48
22-06-2002				
23-06-2002				
24-06-2002	0.56	0.28	0.44	0.44
25-06-2002				
26-06-2002	0.56	0.26	0.42	0.43
27-06-2002				
28-06-2002	0.54	0.24	0.42	0.41
29-06-2002				
30-06-2002				
01-07-2002	0.57	0.22	0.33	0.36
02-07-2002				
03-07-2002	0.55	0.21	0.39	0.38
04-07-2002				
05-07-2002	0.56	0.19	0.33	0.38
06-07-2002				
07-07-2002				
08-07-2002	0.50	0.18	0.30	0.37
09-07-2002				
10-07-2002				
11-07-2002	0.49	0.17	0.25	0.37
12-07-2002	0.48	0.16	0.24	0.36
13-07-2002				
14-07-2002				
15-07-2002	0.48	0.15	0.24	0.35
16-07-2002				
17-07-2002				
18-07-2002	0.46	0.17	0.26	0.35
19-07-2002	0.47	0.14	0.25	0.35
20-07-2002				
21-07-2002				
22-07-2002	0.49	0.13	0.20	0.34
23-07-2002				
24-07-2002				
25-07-2002	0.47	0.12	0.18	0.34
26-07-2002				
27-07-2002				
28-07-2002				
29-07-2002				
30-07-2002				
31-07-2002	0.44	0.10	0.17	0.33

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
01-08-2002				
02-08-2002	0.45	0.10	0.10	0.32
03-08-2002				
04-08-2002				
05-08-2002	0.45	0.09	0.13	0.31
06-08-2002				
07-08-2002	0.45	0.08	0.12	0.31
08-08-2002				
09-08-2002	0.45	0.08	0.12	0.32
10-08-2002				
11-08-2002				
12-08-2002				
13-08-2002				
14-08-2002				
15-08-2002				
16-08-2002	0.44	0.08	0.10	0.31
17-08-2002				
18-08-2002				
19-08-2002				
20-08-2002	0.44	0.06	0.10	0.30
21-08-2002				
22-08-2002				
23-08-2002	0.45	0.06	0.10	0.30
24-08-2002				
25-08-2002				
26-08-2002	0.43	0.05	0.07	0.30
27-08-2002				
28-08-2002	0.42	0.04	0.07	0.30
29-08-2002				
30-08-2002	0.42	0.05	0.07	0.28
31-08-2002				
01-09-2002				
02-09-2002	0.46	0.04	0.06	0.29
03-09-2002				
04-09-2002	0.43	0.04	0.06	0.29
05-09-2002				
06-09-2002	0.43	0.04	0.06	0.28
07-09-2002				
08-09-2002				
09-09-2002	0.43	0.04	0.05	0.29
10-09-2002				
11-09-2002				

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
12-09-2002				
13-09-2002				
14-09-2002				
15-09-2002				
16-09-2002	0.45	0.04	0.12	0.26
17-09-2002				
18-09-2002	0.45	0.04	0.14	0.26
19-09-2002				
20-09-2002	0.43	0.04	0.17	0.26
21-09-2002				
22-09-2002				
23-09-2002	0.45	0.03	0.18	0.26
24-09-2002				
25-09-2002	0.47	0.03	0.17	0.25
26-09-2002				
27-09-2002				
28-09-2002				
29-09-2002				
30-09-2002	0.46	0.03	0.16	0.25
01-10-2002				
02-10-2002	0.47	0.03	0.16	0.25
03-10-2002				
04-10-2002	0.45	0.03	0.07	0.25
05-10-2002				
06-10-2002				
07-10-2002	0.45	0.03	0.12	0.25
08-10-2002				
09-10-2002	0.46	0.03	0.12	0.25
10-10-2002				
11-10-2002	0.46	0.03	0.12	0.24
12-10-2002				
13-10-2002				
14-10-2002	0.44	0.03	0.12	0.24
15-10-2002				
16-10-2002	0.44	0.03	0.11	0.24
17-10-2002				
18-10-2002	0.45	0.03	0.11	0.23
19-10-2002				
20-10-2002				
21-10-2002	0.44	0.03	0.11	0.23
22-10-2002				
23-10-2002	0.45	0.03	0.12	0.22

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
24-10-2002				
25-10-2002	0.45	0.03	0.12	0.22
26-10-2002				
27-10-2002				
28-10-2002	0.45	0.03	0.12	0.21
29-10-2002				
30-10-2002	0.44	0.03	0.11	0.27
31-10-2002				
01-11-2002				
02-11-2002				
03-11-2002				
04-11-2002	0.45	0.03	0.10	0.22
05-11-2002				
06-11-2002	0.45	0.03	0.10	0.22
07-11-2002				
08-11-2002	0.45	0.03	0.09	0.22
09-11-2002				
10-11-2002				
11-11-2002	0.46	0.03	0.09	0.23
12-11-2002				
13-11-2002	0.44	0.03	0.09	0.23
14-11-2002				
15-11-2002	0.46	0.03	0.09	0.23
16-11-2002				
17-11-2002				
18-11-2002	0.47	0.03	0.10	0.23
19-11-2002				
20-11-2002	0.48	0.03	0.15	0.24
21-11-2002				
22-11-2002	0.50	0.04	0.22	0.28
23-11-2002				
24-11-2002				
25-11-2002	0.51	0.23	0.45	0.48
26-11-2002				
27-11-2002	0.60	0.35	0.55	0.73
28-11-2002				
29-11-2002	0.63	0.41	0.60	0.87
30-11-2002				
01-12-2002				
02-12-2002	0.62	0.46	0.68	0.87
03-12-2002				
04-12-2002	0.68	0.46	0.68	0.84

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
05-12-2002				
06-12-2002	0.67	0.45	0.73	0.78
07-12-2002				
08-12-2002				
09-12-2002	0.65	0.42	0.68	0.69
10-12-2002				
11-12-2002	0.61	0.42	0.68	0.69
12-12-2002				
13-12-2002	0.67	0.47	0.79	0.75
14-12-2002				
15-12-2002				
16-12-2002	0.95	0.87	1.86	1.39
17-12-2002				
18-12-2002	1.44	2.69	1.76	2.82
19-12-2002				
20-12-2002	1.27	3.02	1.89	3.39
21-12-2002				
22-12-2002				
23-12-2002	1.06	2.62	1.29	3.00
24-12-2002				
25-12-2002				
26-12-2002				
27-12-2002				
28-12-2002				
29-12-2002				
30-12-2002	1.11	3.27	1.34	2.96
31-12-2002				
01-01-2003				
02-01-2003				
03-01-2003	1.15	3.14	1.57	2.65
04-01-2003				
05-01-2003				
06-01-2003	1.25	3.47	1.63	3.25
07-01-2003				
08-01-2003	1.22	3.46	1.55	2.97
09-01-2003				
10-01-2003	1.24	3.88	1.64	2.97
11-01-2003				
12-01-2003				
13-01-2003	1.21	3.47	1.41	2.67
14-01-2003				
15-01-2003	1.23	3.51	1.46	2.82

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
16-01-2003				
17-01-2003	1.13	2.87	1.44	2.03
18-01-2003				
19-01-2003				
20-01-2003				
21-01-2003				
22-01-2003	1.27	3.04	1.69	2.24
23-01-2003				
24-01-2003				
25-01-2003				
26-01-2003				
27-01-2003				
28-01-2003				
29-01-2003	1.29	2.95	1.87	2.09
30-01-2003				
31-01-2003				
01-02-2003				
02-02-2003				
03-02-2003				
04-02-2003				
05-02-2003	1.16	2.27	1.37	1.33
06-02-2003				
07-02-2003				
08-02-2003				
09-02-2003				
10-02-2003				
11-02-2003				
12-02-2003	1.04	1.59	1.23	1.20
13-02-2003				
14-02-2003				
15-02-2003				
16-02-2003				
17-02-2003				
18-02-2003				
19-02-2003	0.89	1.22	1.01	1.01
20-02-2003				
21-02-2003				
22-02-2003				
23-02-2003				
24-02-2003				
25-02-2003				
26-02-2003	1.23	1.91	1.41	1.71

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
27-02-2003				
28-02-2003				
01-03-2003				
02-03-2003				
03-03-2003				
04-03-2003				
05-03-2003	1.25	2.90	1.91	2.51
06-03-2003				
07-03-2003				
08-03-2003				
09-03-2003				
10-03-2003				
11-03-2003				
12-03-2003				
13-03-2003				
14-03-2003				
15-03-2003				
16-03-2003				
17-03-2003				
18-03-2003				
19-03-2003	1.17	1.71	1.33	1.31
20-03-2003				
21-03-2003				
22-03-2003				
23-03-2003				
24-03-2003				
25-03-2003				
26-03-2003	1.11	1.38	1.26	1.13
27-03-2003				
28-03-2003				
29-03-2003				
30-03-2003				
31-03-2003				
01-04-2003				
02-04-2003	1.28	1.55	1.54	1.36
03-04-2003				
04-04-2003				
05-04-2003				
06-04-2003				
07-04-2003				
08-04-2003				
09-04-2003	1.13	1.50	1.38	1.31

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
10-04-2003				
11-04-2003				
12-04-2003				
13-04-2003				
14-04-2003				
15-04-2003				
16-04-2003	1.21	1.59	1.81	1.51
17-04-2003				
18-04-2003				
19-04-2003				
20-04-2003				
21-04-2003				
22-04-2003				
23-04-2003	1.32	2.14	1.53	1.71
24-04-2003				
25-04-2003				
26-04-2003				
27-04-2003				
28-04-2003				
29-04-2003				
30-04-2003	1.23	2.12	1.58	1.66
01-05-2003				
02-05-2003				
03-05-2003				
04-05-2003				
05-05-2003				
06-05-2003				
07-05-2003	1.07	1.87	1.69	1.57
08-05-2003				
09-05-2003				
10-05-2003				
11-05-2003				
12-05-2003				
13-05-2003				
14-05-2003	1.06	1.53	1.36	1.23
15-05-2003				
16-05-2003				
17-05-2003				
18-05-2003				
19-05-2003				
20-05-2003				
21-05-2003	1.04	1.19	1.22	1.05

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
22-05-2003				
23-05-2003				
24-05-2003				
25-05-2003				
26-05-2003				
27-05-2003				
28-05-2003	0.93	1.05	1.23	0.92
29-05-2003				
30-05-2003				
31-05-2003				
01-06-2003				
02-06-2003				
03-06-2003				
04-06-2003	0.86	0.85	1.14	0.81
05-06-2003				
06-06-2003				
07-06-2003				
08-06-2003				
09-06-2003				
10-06-2003				
11-06-2003	0.90	0.77	1.10	0.71
12-06-2003				
13-06-2003				
14-06-2003				
15-06-2003				
16-06-2003				
17-06-2003				
18-06-2003	0.81	0.68	0.97	0.64
19-06-2003				
20-06-2003				
21-06-2003				
22-06-2003				
23-06-2003				
24-06-2003				
25-06-2003	0.74	0.58	0.89	0.59
26-06-2003				
27-06-2003				
28-06-2003				
29-06-2003				
30-06-2003				
01-07-2003				
02-07-2003	0.77	0.52	0.88	0.55

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
03-07-2003				
04-07-2003				
05-07-2003				
06-07-2003				
07-07-2003				
08-07-2003				
09-07-2003	0.72	0.44	0.88	0.48
10-07-2003				
11-07-2003				
12-07-2003				
13-07-2003				
14-07-2003				
15-07-2003				
16-07-2003	0.67	0.40	0.84	0.43
17-07-2003				
18-07-2003				
19-07-2003				
20-07-2003				
21-07-2003				
22-07-2003				
23-07-2003	0.45	0.37	0.80	0.39
24-07-2003				
25-07-2003				
26-07-2003				
27-07-2003				
28-07-2003				
29-07-2003				
30-07-2003	0.66	0.33	0.72	0.37
31-07-2003				
01-08-2003				
02-08-2003				
03-08-2003				
04-08-2003				
05-08-2003				
06-08-2003	0.62	0.28	0.66	0.35
07-08-2003				
08-08-2003				
09-08-2003				
10-08-2003				
11-08-2003				
12-08-2003				
13-08-2003	0.60	0.24	0.58	0.33

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
14-08-2003				
15-08-2003				
16-08-2003				
17-08-2003				
18-08-2003				
19-08-2003				
20-08-2003				
21-08-2003	0.60	0.21	0.53	0.32
22-08-2003				
23-08-2003				
24-08-2003				
25-08-2003				
26-08-2003				
27-08-2003	0.62	0.19	0.51	0.31
28-08-2003				
29-08-2003				
30-08-2003				
31-08-2003				
01-09-2003				
02-09-2003				
03-09-2003	0.61	0.18	0.46	0.29
04-09-2003				
05-09-2003				
06-09-2003				
07-09-2003				
08-09-2003				
09-09-2003				
10-09-2003	0.60	0.16	0.44	0.28
11-09-2003				
12-09-2003				
13-09-2003				
14-09-2003				
15-09-2003				
16-09-2003				
17-09-2003	0.61	0.15	0.40	0.29
18-09-2003				
19-09-2003				
20-09-2003				
21-09-2003				
22-09-2003				
23-09-2003				
24-09-2003	0.55	0.13	0.36	0.26

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
25-09-2003				
26-09-2003				
27-09-2003				
28-09-2003				
29-09-2003				
30-09-2003				
01-10-2003	0.54	0.12	0.36	0.26
02-10-2003				
03-10-2003				
04-10-2003				
05-10-2003				
06-10-2003				
07-10-2003				
08-10-2003	0.55	0.10	0.30	0.26
09-10-2003				
10-10-2003				
11-10-2003				
12-10-2003				
13-10-2003				
14-10-2003				
15-10-2003	0.56	0.09		0.25
16-10-2003				
17-10-2003				
18-10-2003				
19-10-2003				
20-10-2003				
21-10-2003	0.56	0.09	0.32	0.24
22-10-2003				
23-10-2003				
24-10-2003				
25-10-2003				
26-10-2003				
27-10-2003	0.56	0.08	0.35	0.24
28-10-2003				
29-10-2003	0.59	0.13	0.55	0.30
30-10-2003				
31-10-2003				
01-11-2003				
02-11-2003				
03-11-2003				
04-11-2003				
05-11-2003	0.79	0.68	0.92	1.06

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
06-11-2003				
07-11-2003				
08-11-2003				
09-11-2003				
10-11-2003				
11-11-2003				
12-11-2003	0.80	0.68	1.01	1.03
13-11-2003				
14-11-2003				
15-11-2003				
16-11-2003				
17-11-2003				
18-11-2003				
19-11-2003	0.85	1.17	1.16	1.54
20-11-2003				
21-11-2003				
22-11-2003				
23-11-2003				
24-11-2003				
25-11-2003				
26-11-2003	0.88	1.27	1.22	1.60
27-11-2003				
28-11-2003				
29-11-2003				
30-11-2003				
01-12-2003				
02-12-2003				
03-12-2003	0.94	1.19	1.13	1.35
04-12-2003				
05-12-2003				
06-12-2003				
07-12-2003				
08-12-2003				
09-12-2003				
10-12-2003	1.20	3.77	1.55	3.45
11-12-2003				
12-12-2003				
13-12-2003				
14-12-2003				
15-12-2003				
16-12-2003				
17-12-2003	1.19	2.46	1.64	2.31

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
18-12-2003				
19-12-2003				
20-12-2003				
21-12-2003				
22-12-2003				
23-12-2003				
24-12-2003				
25-12-2003				
26-12-2003				
27-12-2003				
28-12-2003				
29-12-2003				
30-12-2003	0.95	1.50	1.22	1.39
31-12-2003				
01-01-2004				
02-01-2004				
03-01-2004				
04-01-2004				
05-01-2004				
06-01-2004				
07-01-2004	1.11	1.21	1.19	1.11
08-01-2004				
09-01-2004				
10-01-2004				
11-01-2004				
12-01-2004				
13-01-2004				
14-01-2004	1.05	0.97	1.08	0.93
15-01-2004				
16-01-2004				
17-01-2004				
18-01-2004				
19-01-2004				
20-01-2004				
21-01-2004	0.90	0.80	0.95	0.79
22-01-2004				
23-01-2004				
24-01-2004				
25-01-2004				
26-01-2004				
27-01-2004				
28-01-2004	0.87	0.70	0.92	0.73

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
29-01-2004				
30-01-2004				
31-01-2004				
01-02-2004				
02-02-2004				
03-02-2004				
04-02-2004	0.82	0.65	0.98	0.72
05-02-2004				
06-02-2004				
07-02-2004				
08-02-2004				
09-02-2004				
10-02-2004				
11-02-2004	0.84	0.69	1.02	0.73
12-02-2004				
13-02-2004				
14-02-2004				
15-02-2004				
16-02-2004				
17-02-2004				
18-02-2004	0.80	0.69	0.99	0.78
19-02-2004				
20-02-2004				
21-02-2004				
22-02-2004				
23-02-2004				
24-02-2004				
25-02-2004	0.79	0.63	0.95	0.73
26-02-2004				
27-02-2004				
28-02-2004				
29-02-2004				
01-03-2004				
02-03-2004				
03-03-2004	0.85	0.75	1.00	0.93
04-03-2004				
05-03-2004				
06-03-2004				
07-03-2004				
08-03-2004				
09-03-2004				
10-03-2004	0.86	0.77	1.01	0.97

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
11-03-2004				
12-03-2004				
13-03-2004				
14-03-2004				
15-03-2004				
16-03-2004				
17-03-2004	0.81	0.69	0.95	0.86
18-03-2004				
19-03-2004				
20-03-2004				
21-03-2004				
22-03-2004				
23-03-2004				
24-03-2004	0.80	0.66	0.86	0.82
25-03-2004				
26-03-2004				
27-03-2004				
28-03-2004				
29-03-2004				
30-03-2004				
31-03-2004	1.15	0.66	0.86	0.76
01-04-2004				
02-04-2004				
03-04-2004				
04-04-2004				
05-04-2004				
06-04-2004				
07-04-2004	0.81	0.57	0.82	0.65
08-04-2004				
09-04-2004				
10-04-2004				
11-04-2004				
12-04-2004				
13-04-2004				
14-04-2004	0.76	0.54	0.77	0.61
15-04-2004				
16-04-2004				
17-04-2004				
18-04-2004				
19-04-2004				
20-04-2004				
21-04-2004	0.75	0.49	0.76	0.56

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
22-04-2004				
23-04-2004				
24-04-2004				
25-04-2004				
26-04-2004				
27-04-2004				
28-04-2004	0.75	0.47	0.73	0.52
29-04-2004				
30-04-2004				
01-05-2004				
02-05-2004				
03-05-2004				
04-05-2004				
05-05-2004	0.68	0.41	0.67	0.47
06-05-2004				
07-05-2004				
08-05-2004				
09-05-2004				
10-05-2004				
11-05-2004				
12-05-2004	0.66	0.39	0.62	0.43
13-05-2004				
14-05-2004				
15-05-2004				
16-05-2004				
17-05-2004				
18-05-2004				
19-05-2004	0.69	0.35	0.56	0.42
20-05-2004				
21-05-2004				
22-05-2004				
23-05-2004				
24-05-2004				
25-05-2004				
26-05-2004	0.67	0.34	0.55	0.38
27-05-2004				
28-05-2004				
29-05-2004				
30-05-2004				
31-05-2004				
01-06-2004				
02-06-2004	0.63	0.31	0.49	0.35

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
03-06-2004				
04-06-2004				
05-06-2004				
06-06-2004				
07-06-2004				
08-06-2004				
09-06-2004	0.62	0.29	0.48	0.34
10-06-2004				
11-06-2004				
12-06-2004				
13-06-2004				
14-06-2004				
15-06-2004				
16-06-2004	0.63	0.26	0.44	0.30
17-06-2004				
18-06-2004				
19-06-2004				
20-06-2004				
21-06-2004				
22-06-2004				
23-06-2004	0.57	0.23	0.42	0.31
24-06-2004				
25-06-2004				
26-06-2004				
27-06-2004				
28-06-2004				
29-06-2004				
30-06-2004	0.60	0.22	0.38	0.29
01-07-2004				
02-07-2004				
03-07-2004				
04-07-2004				
05-07-2004				
06-07-2004				
07-07-2004	0.57	0.20	0.37	0.28
08-07-2004				
09-07-2004				
10-07-2004				
11-07-2004				
12-07-2004				
13-07-2004				
14-07-2004	0.56	0.18	0.33	0.27

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
15-07-2004				
16-07-2004				
17-07-2004				
18-07-2004				
19-07-2004				
20-07-2004				
21-07-2004	0.55	0.17	0.31	0.26
22-07-2004				
23-07-2004				
24-07-2004				
25-07-2004				
26-07-2004				
27-07-2004				
28-07-2004	0.53	0.14	0.26	0.27
29-07-2004				
30-07-2004				
31-07-2004				
01-08-2004				
02-08-2004				
03-08-2004				
04-08-2004	0.52	0.19	0.23	0.27
05-08-2004				
06-08-2004				
07-08-2004				
08-08-2004				
09-08-2004				
10-08-2004				
11-08-2004	0.56	0.13	0.23	0.24
12-08-2004				
13-08-2004				
14-08-2004				
15-08-2004				
16-08-2004				
17-08-2004				
18-08-2004	0.54	0.14	0.21	0.25
19-08-2004				
20-08-2004				
21-08-2004				
22-08-2004				
23-08-2004				
24-08-2004				
25-08-2004	0.56	0.12	0.15	0.26

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
26-08-2004				
27-08-2004				
28-08-2004				
29-08-2004				
30-08-2004				
31-08-2004				
01-09-2004	0.49	0.11	0.18	0.23
02-09-2004				
03-09-2004				
04-09-2004				
05-09-2004				
06-09-2004				
07-09-2004				
08-09-2004	0.70	0.10	0.16	0.23
09-09-2004				
10-09-2004				
11-09-2004				
12-09-2004				
13-09-2004				
14-09-2004				
15-09-2004	0.52	0.09	0.12	0.22
16-09-2004				
17-09-2004				
18-09-2004				
19-09-2004				
20-09-2004				
21-09-2004				
22-09-2004	0.50	0.08	0.12	0.21
23-09-2004				
24-09-2004				
25-09-2004				
26-09-2004				
27-09-2004				
28-09-2004				
29-09-2004	0.47	0.07	0.12	0.21
30-09-2004				
01-10-2004				
02-10-2004				
03-10-2004				
04-10-2004				
05-10-2004				
06-10-2004	0.47	0.07	0.13	0.20

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
07-10-2004				
08-10-2004				
09-10-2004				
10-10-2004				
11-10-2004				
12-10-2004				
13-10-2004	0.49	0.07	0.12	0.19
14-10-2004				
15-10-2004				
16-10-2004				
17-10-2004				
18-10-2004				
19-10-2004				
20-10-2004	0.51	0.07	0.11	0.19
21-10-2004				
22-10-2004				
23-10-2004				
24-10-2004				
25-10-2004				
26-10-2004				
27-10-2004	0.47	0.05	0.13	0.19
28-10-2004				
29-10-2004				
30-10-2004				
31-10-2004				
01-11-2004				
02-11-2004				
03-11-2004	0.46	0.06	0.14	0.18
04-11-2004				
05-11-2004				
06-11-2004				
07-11-2004				
08-11-2004				
09-11-2004				
10-11-2004	0.51	0.06	0.13	0.17
11-11-2004				
12-11-2004				
13-11-2004				
14-11-2004				
15-11-2004				
16-11-2004				
17-11-2004	0.70	0.05	0.12	0.17

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
18-11-2004				
19-11-2004				
20-11-2004				
21-11-2004				
22-11-2004				
23-11-2004				
24-11-2004	0.46	0.13	0.11	0.16
25-11-2004				
26-11-2004				
27-11-2004				
28-11-2004				
29-11-2004				
30-11-2004				
01-12-2004				
02-12-2004	0.46	0.16	0.11	0.16
03-12-2004				
04-12-2004				
05-12-2004				
06-12-2004				
07-12-2004				
08-12-2004				
09-12-2004	0.64	0.12	0.10	0.15
10-12-2004				
11-12-2004				
12-12-2004				
13-12-2004				
14-12-2004				
15-12-2004	0.50	0.08	0.12	0.15
16-12-2004				
17-12-2004				
18-12-2004				
19-12-2004				
20-12-2004				
21-12-2004				
22-12-2004	0.43	0.06	0.09	0.14
23-12-2004				
24-12-2004				
25-12-2004				
26-12-2004				
27-12-2004				
28-12-2004				
29-12-2004	0.43	0.06	0.08	0.14

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
30-12-2004				
31-12-2004				
01-01-2005				
02-01-2005				
03-01-2005				
04-01-2005				
05-01-2005	0.46	0.06	0.09	0.13
06-01-2005				
07-01-2005				
08-01-2005				
09-01-2005				
10-01-2005				
11-01-2005				
12-01-2005	0.46	0.06	0.07	0.13
13-01-2005				
14-01-2005				
15-01-2005				
16-01-2005				
17-01-2005				
18-01-2005				
19-01-2005	0.44	0.06	0.06	0.12
20-01-2005				
21-01-2005				
22-01-2005				
23-01-2005				
24-01-2005				
25-01-2005				
26-01-2005	0.43	0.06	0.06	0.12
27-01-2005				
28-01-2005				
29-01-2005				
30-01-2005				
31-01-2005				
01-02-2005				
02-02-2005	0.43	0.06	0.06	0.12
03-02-2005				
04-02-2005				
05-02-2005				
06-02-2005				
07-02-2005				
08-02-2005	0.45	0.08	0.05	0.11
09-02-2005				

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
10-02-2005				
11-02-2005				
12-02-2005				
13-02-2005				
14-02-2005				
15-02-2005				
16-02-2005	0.42	0.06	0.04	0.11
17-02-2005				
18-02-2005				
19-02-2005				
20-02-2005				
21-02-2005				
22-02-2005				
23-02-2005	0.59	0.06	0.03	0.11
24-02-2005				
25-02-2005				
26-02-2005				
27-02-2005				
28-02-2005				
01-03-2005				
02-03-2005	0.45	0.06	0.03	0.11
03-03-2005				
04-03-2005				
05-03-2005				
06-03-2005				
07-03-2005				
08-03-2005				
09-03-2005	0.44	0.06	0.03	0.10
10-03-2005				
11-03-2005				
12-03-2005				
13-03-2005				
14-03-2005				
15-03-2005				
16-03-2005	0.41	0.06	0.01	0.10
17-03-2005				
18-03-2005				
19-03-2005				
20-03-2005				
21-03-2005				
22-03-2005				
23-03-2005	0.47	0.06	0.14	0.10

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
24-03-2005				
25-03-2005				
26-03-2005				
27-03-2005				
28-03-2005				
29-03-2005				
30-03-2005	0.46	0.06	0.14	0.09
31-03-2005				
01-04-2005				
02-04-2005				
03-04-2005				
04-04-2005				
05-04-2005				
06-04-2005	0.64	0.06	0.39	0.08
07-04-2005				
08-04-2005				
09-04-2005				
10-04-2005				
11-04-2005				
12-04-2005				
13-04-2005	0.62	0.06	0.37	0.09
14-04-2005				
15-04-2005				
16-04-2005				
17-04-2005				
18-04-2005				
19-04-2005				
20-04-2005	0.66	0.06	0.37	0.09
21-04-2005				
22-04-2005				
23-04-2005				
24-04-2005				
25-04-2005				
26-04-2005	0.67	0.06	0.41	0.09
27-04-2005				
28-04-2005				
29-04-2005				
30-04-2005				
01-05-2005				
02-05-2005				
03-05-2005				
04-05-2005	0.70	0.06	0.35	0.08

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
05-05-2005				
06-05-2005				
07-05-2005				
08-05-2005				
09-05-2005				
10-05-2005				
11-05-2005	0.82	0.06	0.32	0.08
12-05-2005				
13-05-2005				
14-05-2005				
15-05-2005				
16-05-2005				
17-05-2005				
18-05-2005	0.84	0.06	0.28	0.08
19-05-2005				
20-05-2005				
21-05-2005				
22-05-2005				
23-05-2005				
24-05-2005				
25-05-2005	0.59	0.06	0.05	0.08
26-05-2005				
27-05-2005				
28-05-2005				
29-05-2005				
30-05-2005				
31-05-2005				
01-06-2005	0.61	0.06	0.32	0.08
02-06-2005				
03-06-2005				
04-06-2005				
05-06-2005				
06-06-2005				
07-06-2005				
08-06-2005	0.76	0.06	0.17	0.06
09-06-2005				
10-06-2005				
11-06-2005				
12-06-2005				
13-06-2005				
14-06-2005				
15-06-2005	0.84	0.06	0.20	0.06

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
16-06-2005				
17-06-2005				
18-06-2005				
19-06-2005				
20-06-2005				
21-06-2005				
22-06-2005	1.13	0.06	0.15	0.07
23-06-2005				
24-06-2005				
25-06-2005				
26-06-2005				
27-06-2005				
28-06-2005				
29-06-2005	1.08	0.06	0.22	0.07
30-06-2005				
01-07-2005				
02-07-2005				
03-07-2005				
04-07-2005				
05-07-2005				
06-07-2005	1.04	0.06	0.19	0.07
07-07-2005				
08-07-2005				
09-07-2005				
10-07-2005				
11-07-2005				
12-07-2005				
13-07-2005	0.96	0.06	0.21	0.07
14-07-2005				
15-07-2005				
16-07-2005				
17-07-2005				
18-07-2005				
19-07-2005				
20-07-2005	0.96	0.06	0.17	0.06
21-07-2005				
22-07-2005				
23-07-2005				
24-07-2005				
25-07-2005				
26-07-2005				
27-07-2005	0.94	0.06	0.12	0.06

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
28-07-2005				
29-07-2005				
30-07-2005				
31-07-2005				
01-08-2005				
02-08-2005				
03-08-2005	0.93	0.06	0.09	0.06
04-08-2005				
05-08-2005				
06-08-2005				
07-08-2005				
08-08-2005				
09-08-2005				
10-08-2005	0.52	0.05	0.00	0.06
11-08-2005				
12-08-2005				
13-08-2005				
14-08-2005				
15-08-2005				
16-08-2005				
17-08-2005	0.47	0.06	0.00	0.06
18-08-2005				
19-08-2005				
20-08-2005				
21-08-2005				
22-08-2005				
23-08-2005				
24-08-2005	0.43	0.06	0.00	0.06
25-08-2005				
26-08-2005				
27-08-2005				
28-08-2005				
29-08-2005				
30-08-2005				
31-08-2005	0.42	0.06	0.00	0.06
01-09-2005				
02-09-2005				
03-09-2005				
04-09-2005				
05-09-2005				
06-09-2005				
07-09-2005	0.40	0.06	0.00	0.05

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
08-09-2005				
09-09-2005				
10-09-2005				
11-09-2005				
12-09-2005				
13-09-2005				
14-09-2005	0.40	0.06	0.00	0.05
15-09-2005				
16-09-2005				
17-09-2005				
18-09-2005				
19-09-2005				
20-09-2005				
21-09-2005	0.38	0.06	0.00	0.05
22-09-2005				
23-09-2005				
24-09-2005				
25-09-2005				
26-09-2005				
27-09-2005				
28-09-2005	0.39	0.06	0.00	0.05
29-09-2005				
30-09-2005				
01-10-2005				
02-10-2005				
03-10-2005				
04-10-2005				
05-10-2005				
06-10-2005				
07-10-2005	0.37	0.06	0.00	0.05
08-10-2005				
09-10-2005				
10-10-2005				
11-10-2005				
12-10-2005	0.36	0.06	0.00	0.05
13-10-2005				
14-10-2005				
15-10-2005				
16-10-2005				
17-10-2005				
18-10-2005				
19-10-2005	0.40	0.06	0.00	0.04

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
20-10-2005				
21-10-2005				
22-10-2005				
23-10-2005				
24-10-2005				
25-10-2005				
26-10-2005	0.40	0.06	0.00	0.04
27-10-2005				
28-10-2005				
29-10-2005				
30-10-2005				
31-10-2005				
01-11-2005				
02-11-2005	0.44	0.06	0.12	0.05
03-11-2005				
04-11-2005				
05-11-2005				
06-11-2005				
07-11-2005				
08-11-2005				
09-11-2005	0.46	0.06	0.20	0.07
10-11-2005				
11-11-2005				
12-11-2005				
13-11-2005				
14-11-2005				
15-11-2005				
16-11-2005	0.46	0.06	0.16	0.08
17-11-2005				
18-11-2005				
19-11-2005				
20-11-2005				
21-11-2005				
22-11-2005				
23-11-2005	0.49	0.07	0.24	0.16
24-11-2005				
25-11-2005				
26-11-2005				
27-11-2005				
28-11-2005				
29-11-2005				
30-11-2005	0.51	0.20	0.27	0.29

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
01-12-2005				
02-12-2005				
03-12-2005				
04-12-2005				
05-12-2005				
06-12-2005				
07-12-2005	0.71	0.27	0.40	0.38
08-12-2005				
09-12-2005				
10-12-2005				
11-12-2005				
12-12-2005				
13-12-2005				
14-12-2005	0.73	0.45	0.92	0.90
15-12-2005				
16-12-2005				
17-12-2005				
18-12-2005				
19-12-2005				
20-12-2005				
21-12-2005	0.61	0.39	0.29	0.79
22-12-2005				
23-12-2005				
24-12-2005				
25-12-2005				
26-12-2005				
27-12-2005	0.57	0.30	0.26	0.32
28-12-2005				
29-12-2005				
30-12-2005				
31-12-2005				
01-01-2006				
02-01-2006				
03-01-2006				
04-01-2006	0.49	0.30	0.20	0.35
05-01-2006				
06-01-2006				
07-01-2006				
08-01-2006				
09-01-2006				
10-01-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
11-01-2006	0.47	0.27	0.18	0.36
12-01-2006				
13-01-2006				
14-01-2006				
15-01-2006				
16-01-2006				
17-01-2006				
18-01-2006	0.46	0.27	0.16	0.41
19-01-2006				
20-01-2006				
21-01-2006				
22-01-2006				
23-01-2006				
24-01-2006				
25-01-2006	0.46	0.26	0.15	0.47
26-01-2006				
27-01-2006				
28-01-2006				
29-01-2006				
30-01-2006				
31-01-2006				
01-02-2006	0.45	0.24	0.14	0.40
02-02-2006				
03-02-2006				
04-02-2006				
05-02-2006				
06-02-2006				
07-02-2006				
08-02-2006	0.44	0.24	0.13	0.38
09-02-2006				
10-02-2006				
11-02-2006				
12-02-2006				
13-02-2006				
14-02-2006				
15-02-2006	0.45	0.23	0.13	0.40
16-02-2006				
17-02-2006				
18-02-2006				
19-02-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
20-02-2006				
21-02-2006				
22-02-2006	0.45	0.18	0.11	0.25
23-02-2006				
24-02-2006				
25-02-2006				
26-02-2006				
27-02-2006				
28-02-2006				
01-03-2006	0.46	0.22	0.12	0.47
02-03-2006				
03-03-2006				
04-03-2006				
05-03-2006				
06-03-2006				
07-03-2006				
08-03-2006	0.45	0.27	0.14	0.31
09-03-2006				
10-03-2006				
11-03-2006				
12-03-2006				
13-03-2006				
14-03-2006				
15-03-2006	0.46	0.32	0.16	0.31
16-03-2006				
17-03-2006				
18-03-2006				
19-03-2006				
20-03-2006				
21-03-2006				
22-03-2006	0.91	0.57	0.47	0.78
23-03-2006				
24-03-2006				
25-03-2006				
26-03-2006				
27-03-2006				
28-03-2006				
29-03-2006	1.21	1.10	0.82	0.69
30-03-2006				
31-03-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
01-04-2006				
02-04-2006				
03-04-2006				
04-04-2006				
05-04-2006	1.04	0.94	0.74	0.80
06-04-2006				
07-04-2006				
08-04-2006				
09-04-2006				
10-04-2006				
11-04-2006				
12-04-2006	1.15	0.91	0.75	0.44
13-04-2006				
14-04-2006				
15-04-2006				
16-04-2006				
17-04-2006				
18-04-2006				
19-04-2006	1.03	0.88	0.70	0.81
20-04-2006				
21-04-2006				
22-04-2006				
23-04-2006				
24-04-2006				
25-04-2006				
26-04-2006	0.97	0.85	0.70	0.89
27-04-2006				
28-04-2006				
29-04-2006				
30-04-2006				
01-05-2006				
02-05-2006				
03-05-2006	0.96	0.85	0.68	0.80
04-05-2006				
05-05-2006				
06-05-2006				
07-05-2006				
08-05-2006				
09-05-2006				
10-05-2006	0.98	0.76	0.66	0.78

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
11-05-2006				
12-05-2006				
13-05-2006				
14-05-2006				
15-05-2006				
16-05-2006				
17-05-2006	0.88	0.67	0.58	0.72
18-05-2006				
19-05-2006				
20-05-2006				
21-05-2006				
22-05-2006				
23-05-2006				
24-05-2006	0.73	0.68	0.45	0.89
25-05-2006				
26-05-2006				
27-05-2006				
28-05-2006				
29-05-2006				
30-05-2006				
31-05-2006	0.67	0.55	0.37	0.56
01-06-2006				
02-06-2006				
03-06-2006				
04-06-2006				
05-06-2006				
06-06-2006				
07-06-2006	0.66	0.51	0.38	0.56
08-06-2006				
09-06-2006				
10-06-2006				
11-06-2006				
12-06-2006				
13-06-2006				
14-06-2006	0.66	0.45	0.34	0.44
15-06-2006				
16-06-2006				
17-06-2006				
18-06-2006				
19-06-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
20-06-2006				
21-06-2006	0.72	0.41	0.31	0.48
22-06-2006				
23-06-2006				
24-06-2006				
25-06-2006				
26-06-2006				
27-06-2006				
28-06-2006				
29-06-2006	0.76	0.36	0.28	0.41
30-06-2006				
01-07-2006				
02-07-2006				
03-07-2006				
04-07-2006				
05-07-2006	0.70	0.31	0.27	0.37
06-07-2006				
07-07-2006				
08-07-2006				
09-07-2006				
10-07-2006				
11-07-2006				
12-07-2006	0.63	0.30	0.22	0.34
13-07-2006				
14-07-2006				
15-07-2006				
16-07-2006				
17-07-2006				
18-07-2006				
19-07-2006	0.55	0.26	0.20	0.33
20-07-2006				
21-07-2006				
22-07-2006				
23-07-2006				
24-07-2006				
25-07-2006				
26-07-2006	0.50	0.25	0.17	0.31
27-07-2006				
28-07-2006				
29-07-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
30-07-2006				
31-07-2006				
01-08-2006				
02-08-2006	0.52	0.23	0.16	0.30
03-08-2006				
04-08-2006				
05-08-2006				
06-08-2006				
07-08-2006				
08-08-2006				
09-08-2006	0.48	0.20	0.14	0.27
10-08-2006				
11-08-2006				
12-08-2006				
13-08-2006				
14-08-2006				
15-08-2006	0.48	0.18	0.13	0.26
16-08-2006				
17-08-2006				
18-08-2006				
19-08-2006				
20-08-2006				
21-08-2006				
22-08-2006				
23-08-2006	0.48	0.18	0.12	0.26
24-08-2006				
25-08-2006				
26-08-2006				
27-08-2006				
28-08-2006				
29-08-2006				
30-08-2006	0.46	0.16	0.11	0.24
31-08-2006				
01-09-2006				
02-09-2006				
03-09-2006				
04-09-2006				
05-09-2006				
06-09-2006	0.45	0.15	0.09	0.24
07-09-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
08-09-2006				
09-09-2006				
10-09-2006				
11-09-2006				
12-09-2006				
13-09-2006	0.48	0.14	0.08	0.28
14-09-2006				
15-09-2006				
16-09-2006				
17-09-2006				
18-09-2006				
19-09-2006				
20-09-2006	0.45	0.12	0.07	0.23
21-09-2006				
22-09-2006				
23-09-2006				
24-09-2006				
25-09-2006				
26-09-2006				
27-09-2006	0.44	0.12	0.07	0.22
28-09-2006				
29-09-2006				
30-09-2006				
01-10-2006				
02-10-2006				
03-10-2006				
04-10-2006	0.45	0.11	0.06	0.22
05-10-2006				
06-10-2006				
07-10-2006				
08-10-2006				
09-10-2006				
10-10-2006				
11-10-2006	0.56	0.11	0.05	0.22
12-10-2006				
13-10-2006				
14-10-2006				
15-10-2006				
16-10-2006				
17-10-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
	(l/s)			
18-10-2006	0.43	0.11	0.05	0.23
19-10-2006				
20-10-2006				
21-10-2006				
22-10-2006				
23-10-2006				
24-10-2006				
25-10-2006				
26-10-2006	0.81	0.84	0.77	1.01
27-10-2006				
28-10-2006				
29-10-2006				
30-10-2006				
31-10-2006				
01-11-2006				
02-11-2006	0.82	1.10	0.85	1.07
03-11-2006				
04-11-2006				
05-11-2006				
06-11-2006				
07-11-2006				
08-11-2006	1.32	3.50	1.93	3.04
09-11-2006				
10-11-2006				
11-11-2006				
12-11-2006				
13-11-2006				
14-11-2006				
15-11-2006	1.23	1.69	1.39	2.97
16-11-2006				
17-11-2006				
18-11-2006				
19-11-2006				
20-11-2006				
21-11-2006				
22-11-2006	1.01	1.82	1.37	2.78
23-11-2006				
24-11-2006				
25-11-2006				
26-11-2006				

Dia	C1	C2	C3	C6
(l/s)				
27-11-2006				
28-11-2006				
29-11-2006	2.04	2.87	2.26	
30-11-2006				
01-12-2006				
02-12-2006				
03-12-2006				
04-12-2006				
05-12-2006				
06-12-2006	1.54	3.85	2.30	5.56
07-12-2006				
08-12-2006				
09-12-2006				
10-12-2006				
11-12-2006				
12-12-2006				
13-12-2006	1.28	2.21	1.94	3.98
14-12-2006				
15-12-2006				
16-12-2006				
17-12-2006				
18-12-2006				
19-12-2006				
20-12-2006	0.96	2.36	1.43	2.64
21-12-2006				
22-12-2006				
23-12-2006				
24-12-2006				
25-12-2006				
26-12-2006				
27-12-2006	2.88	2.83	2.26	2.64
28-12-2006				
29-12-2006				
30-12-2006				
31-12-2006				

II. CARACTERIZAÇÃO DO NOVO FURO DE PESQUISA

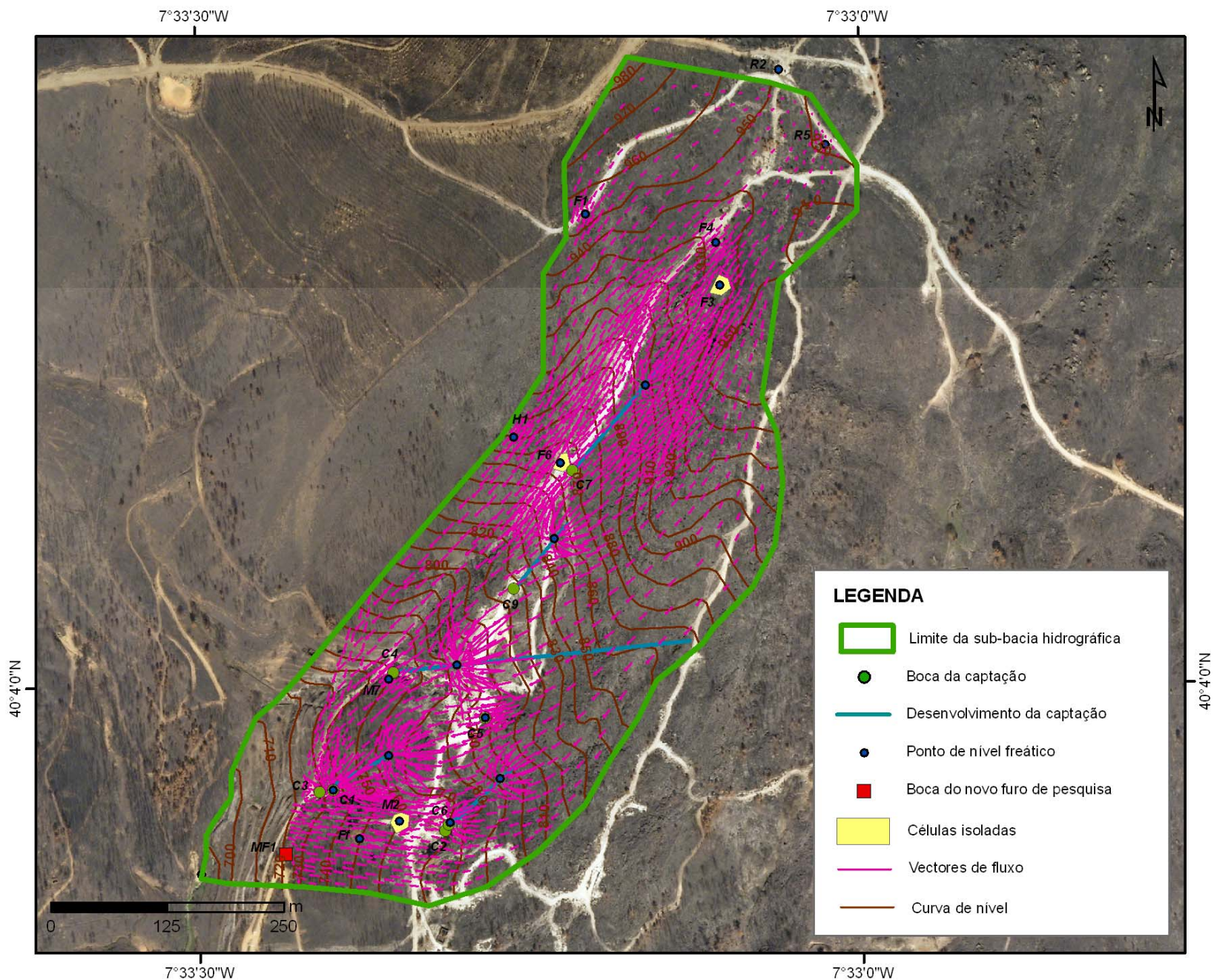
Neste anexo, apresentam-se os aspectos construtivos do novo ponto de água realizado com apoio do desenvolvimento do modelo de escoamento subterrâneo do aquífero das águas de nascente da Fonte da Fraga.

1.1. Localização e Enquadramento

O furo em análise (MF1) foi efectuado num local a jusante das captações C1 e C3, contudo, ainda dentro dos limites da propriedade dos terrenos da Beira Vicente (Figura II.1). O objectivo principal consiste em captar o fluxo de água excedente que não é aproveitado pelas captações mais a jusante, nomeadamente C1, C2 e C3.

Tentou-se localizar este novo ponto de água numa área que não provocasse interferência significativa com as captações existentes. No entanto, se com o desenrolar dos trabalhos de prospecção se verificasse uma eventual interferência, tentar-se-ia fazer com que este novo ponto de água pudesse ser uma captação de excelência, não só por ser vertical de modo a captar o recurso a grande profundidade, como também por poder vir a substituir as 2 captações mais antigas, C1 e C3, como inclusive, já se mencionou no item 5.3.5.

Figura II.1. Localização do novo furo de prospecção e pesquisa MF1, no sector principal do aquífero de água de nascente Fonte da Fraga. Fotografias aéreas fornecidas no âmbito do Programa FIGIEE do Instituto Geográfico Português (IGP, 2009).



Assim, o arranque dos trabalhos de prospecção iniciaram-se com as manobras de limpeza do caminho existente até ao local do novo furo onde se realizou o nivelamento do terreno (nivelamento da plataforma) para a instalação da máquina de sondagem.

Após estes trabalhos iniciais, foi realizado um furo vertical com 204m de comprimento, tendo ficado a sua boca à cota aproximada de 721m. As suas coordenadas segundo o Sistema Hayford Gauss, relativas ao Datum Lisboa, são: M=249028m e P=344393m.

O furo foi realizado pela empresa Francisco Martins Afonso, Lda. tendo os trabalhos principais sido realizados em 2009 e terminado após o devido entubamento e manobras de limpeza, em 19 de Março de 2010.

1.2. Características do Furo de Pesquisa

1.2.1. Método de perfuração e diâmetros

Para os trabalhos de perfuração, e tendo em conta as formações geológicas do local, foram utilizados os equipamentos essenciais e indispensáveis à execução de furos pelo método à rotopercussão, nomeadamente:

- i) sistema de perfuração hidráulico ROC 606;
- ii) compressor Atlas Copco XRVS 455;
- iii) martelos de fundo de furo;
- iv) varas;
- v) ferramentas e outros utensílios.

Em termos genéricos este método utiliza a injeção de ar comprimido a partir de um compressor, que circula com velocidade ascensional, tal que, permite uma perfuração isenta de anomalias e uma melhor limpeza e subida dos detritos resultantes da perfuração.

Na Figura II.2 apresenta-se um corte esquemático do furo realizado onde se pode observar os diâmetros utilizados, como sendo:

- i) dos 0 a 37m – 225mm;
- ii) dos 37 a 204m – 180mm.

1.2.2. Litologia atravessada

Durante os trabalhos de perfuração foram colhidas amostras de terreno, “cuttings”, que permitiram a caracterização geológica das formações atravessadas.

A sua descrição encontra-se no corte de furo apresentado na Figura II.2, sendo na maioria constituídas essencialmente por corneanas e granitos monzoníticos porfiróides de grão grosseiro onde os graus de alteração mais frequentes, de acordo com classificação de ISRM, são W1 a W2, ou seja apresentam alteração ligeira. Em termos específicos de profundidade, de acordo com a observação dos “cuttings” registaram-se as seguintes litologias:

- i) Xisto argiloso de cor acastanhado (W5): dos 0 aos 7m;
- ii) Granito monzonítico porfiróide de cor acastanhado (W4/W5): dos 7 aos 16m;
- iii) Corneana de cor castanho-esverdeado (W3/W4): dos 16 aos 43m;
- iv) Granito monzonítico porfiróide de cor acinzentado (W1/W2): dos 43 aos 47m;
- v) Corneana de cor cinzento-esverdeado (W1/W2): dos 47 aos 163m;
- vi) Granito monzonítico porfiróide de cor acinzentado (W1/W2): dos 163 aos 196m;
- vii) Corneana de cor cinzento-esverdeado (W1/W2): dos 196 aos 204m.

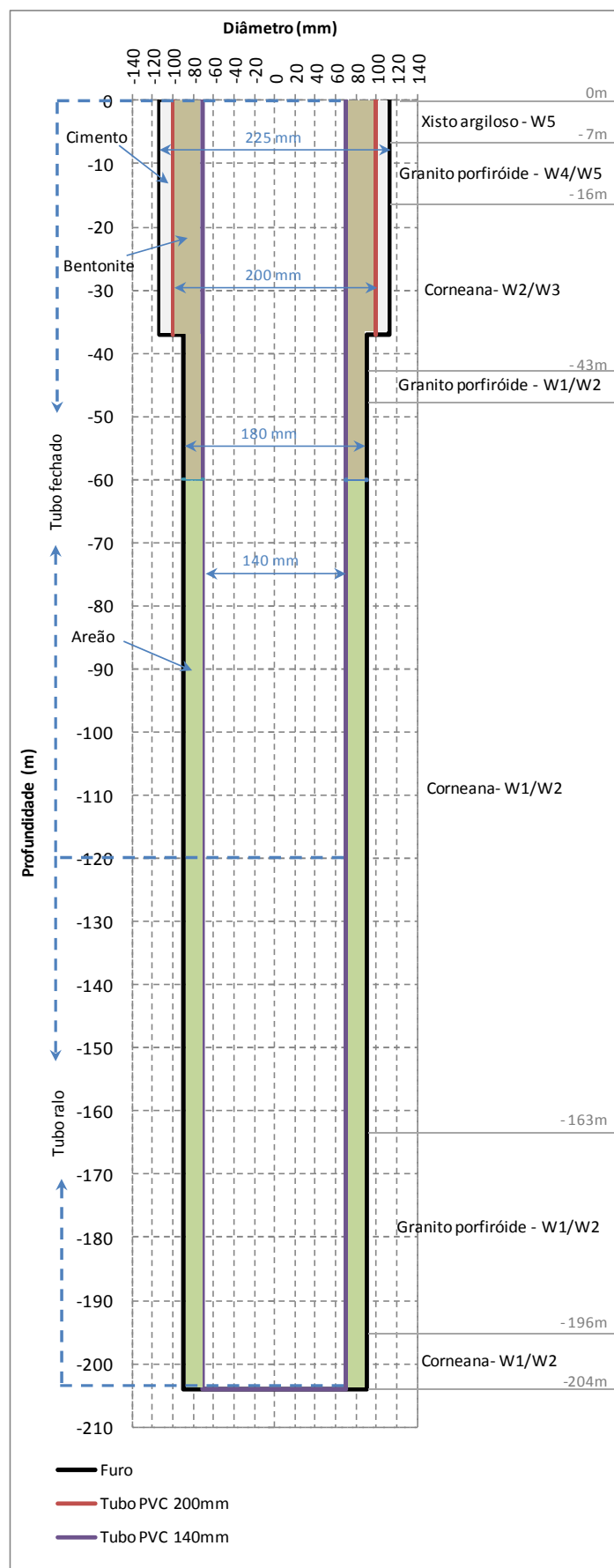


Figura II.2. Esboço do novo furo de prospecção e pesquisa MF1 do sector principal do aquífero de água de nascente Fonte da Fraga.

A Figura II.3 apresenta uma imagem típica das principais litologias do novo furo de prospecção e pesquisa.



Figura I.3. Imagens típicas dos “cuttings” de perfuração de: a) xisto argiloso W5; b) granito W4/W5; c) granito W1/W2; d) corneana W1/W2, do novo furo MF1 do sector principal do aquífero de água de nascente Fonte da Fraga.

1.2.3. Revestimento do furo

Com o intuito de transformar o furo de pesquisa em captação de água, procedeu-se à escolha da coluna definitiva de revestimento. Assim, apresentam-se na Tabela II.1 as profundidades e respectivos revestimento utilizados.

Tabela II.1. Tipos de revestimento e respectivas profundidades no novo furo MF1.

Profundidade	Diâmetro	Tipo
0 aos 37m	200 mm	Tubo fechado em PVC com capacidade de carga de 10Kg/cm ²
0 aos 120m	140 mm	Tubo fechado em PVC com capacidade de carga de 10Kg/cm ²
120 m aos 204m	140 mm	Tubo ralo em PVC com capacidade de carga de 10Kg/cm ²

Salienta-se que de 0 a 37m o tubo fechado foi colocado logo no início, com cimentação no seu espaço anular, após a perfuração ter atingido os 37m; nesta fase o furo já apresentava um caudal de 3.33 l/s, tendo sido neutralizado completamente com a operação de cimentação.

1.2.4. Elementos do recurso

Durante a fase de perfuração procedeu-se também ao controlo do caudal e efectuaram-se medições de alguns parâmetros físico-químicos. O nível freático inicial foi detectado por volta dos 15m. Os valores dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea, sempre que se verificou mudança de caudal, apresentam-se na Tabela II.2.

Tabela II.2. Parâmetros físico registados sempre que verificou mudança de caudal no decorrer da perfuração e ainda na fase final de limpeza do novo furo MF1.

Profundidade (m)	Caudal (l/s)	pH	Condutividade eléctrica (µS/cm)	Temperatura (°C)
16	1.11	6.93	100	13.5
35	3.33	6.97	109	13.4
100	2.50	6.85	107	13.5
196	2.50	6.87	109	13.6
204	3.33	6.90	109	13.6
Final (após 24 horas)	4.34	6.96	108	12.7

1.2.5. Caudal admissível

Com objectivo fundamental de otimizar o caudal admissível, foi realizado um ensaio de caudal escalonado, com uma electrobomba submersível, para caracterizar a captação. Assim, na Tabela II.3 apresentam-se os resultados obtidos durante o respectivo ensaio.

A Figura II.4 representa a evolução dos caudais e os consequentes rebaixamentos de níveis, ao longo do decorrer do ensaio.

A Figura II.5 mostra a construção gráfica da qual é possível propor como caudal crítico o valor de 1.90 l/s. Se este valor fosse extraído durante um ano, acrescentaria a mais 59918.4 m³/ano à produção da água Fonte da Fraga, situação relativamente muito significativa.

Assim, no sentido de comprovar se o seu recurso é de acordo com o quimismo típico da Água Fonte da Fraga (Figura 4.9) deve-se efectuar um controlo clássico de qualidade, com análises mensais físico-químicas e microbiológicas durante 12 meses seguidos.

Tabela II.3. Valores obtidos no desenrolar do ensaio de caudal do novo furo de pesquisa MF1.

Data	Hora	t (min)	Q(l/s)	NF(m)	s (m)	T (°C)	pH	C(μS/cm)
12-04-2010	10:00	0	0	-29.28	0			
12-04-2010	10:00	0	0.19	-29.28	0			
12-04-2010	10:05	5	0.19	-30.36	-1.08			
12-04-2010	10:10	10	0.19	-30.46	-1.18			
12-04-2010	10:15	15	0.19	-30.54	-1.26			
12-04-2010	10:20	20	0.19	-30.59	-1.31			
12-04-2010	10:25	25	0.19	-30.62	-1.34			
12-04-2010	10:30	30	0.19	-30.65	-1.37			
12-04-2010	10:40	40	0.19	-30.67	-1.39			
12-04-2010	10:50	50	0.19	-30.68	-1.40	14.1	6.9	109
12-04-2010	11:00	60	0.19	-30.70	-1.42			
12-04-2010	11:00	60	0.77	-30.70	-1.42			
12-04-2010	11:05	65	0.77	-35.55	-6.27			
12-04-2010	11:10	70	0.77	-36.74	-7.46			
12-04-2010	11:15	75	0.77	-38.00	-8.72			
12-04-2010	11:20	80	0.77	-38.33	-9.05			
12-04-2010	11:25	85	0.77	-38.49	-9.21			
12-04-2010	11:30	90	0.77	-38.69	-9.41			
12-04-2010	11:40	100	0.77	-38.81	-9.53			
12-04-2010	11:50	110	0.77	-38.93	-9.65	16.8	6.96	108
12-04-2010	12:00	120	0.77	-39.02	-9.74			
12-04-2010	12:00	120	2.10	-39.02	-9.74			
12-04-2010	12:05	125	2.10	-48.62	-19.34			
12-04-2010	12:10	130	2.10	-53.96	-24.68			
12-04-2010	12:15	135	2.10	-55.52	-26.24			

Continua

Data	Hora	t (min)	Q(l/s)	NF(m)	s (m)	T (°C)	pH	C(μS/cm)
12-04-2010	12:20	140	2.10	-55.81	-26.53			
12-04-2010	12:25	145	2.10	-56.70	-27.42			
12-04-2010	12:30	150	2.10	-57.41	-28.13			
12-04-2010	12:40	160	2.10	-58.01	-28.73			
12-04-2010	12:50	170	2.10	-59.02	-29.74			
12-04-2010	13:00	180	2.10	-59.60	-30.32			
12-04-2010	13:10	190	2.10	-60.42	-31.14	16.3	6.95	108
12-04-2010	13:20	200	2.10	-61.08	-31.80			
12-04-2010	13:20	200	4.00	-61.08	-31.80			
12-04-2010	13:25	205	4.00	-80.24	-50.96			
12-04-2010	13:30	210	4.00	-90.13	-60.85			
12-04-2010	13:35	215	4.00	-97.33	-68.05	16.4	7.02	108
12-04-2010	13:50	230	4.00	-104.89	-75.61			
12-04-2010	14:00	240	4.00	-108.98	-79.70			

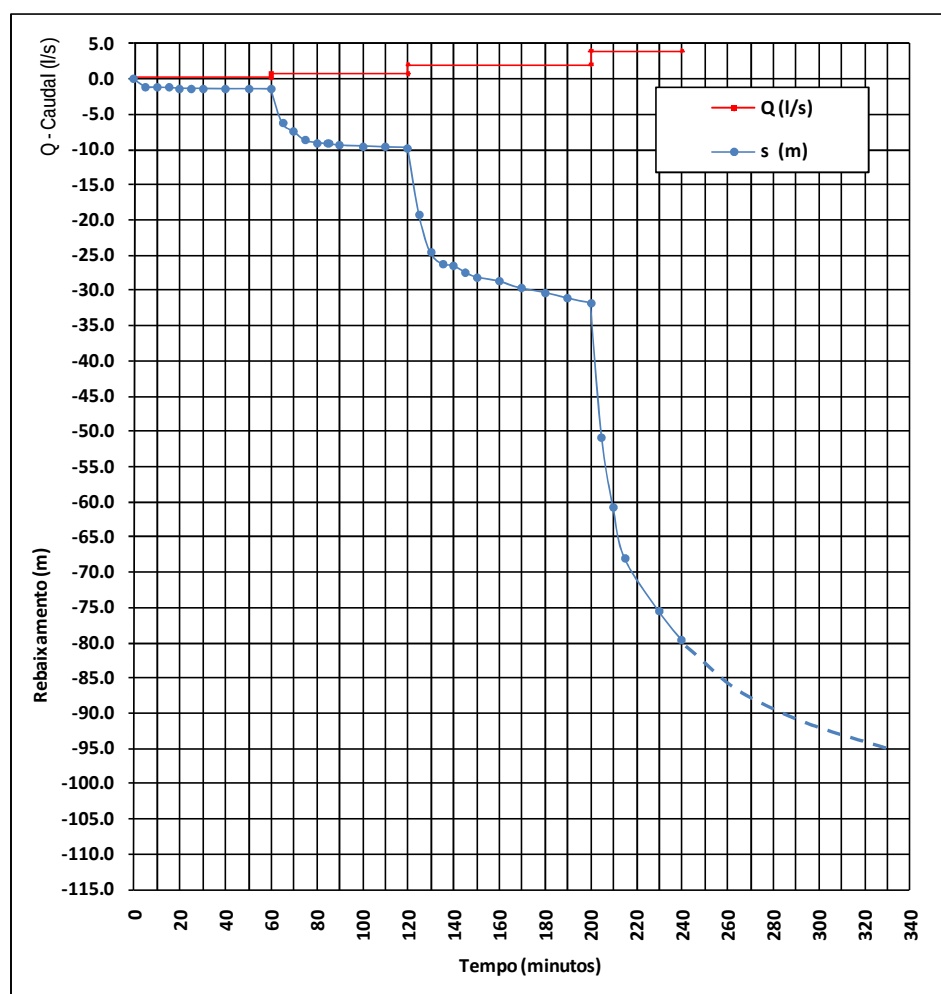


Figura II.4. Resultados do ensaio de caudal efectuado no novo furo de pesquisa MF1.

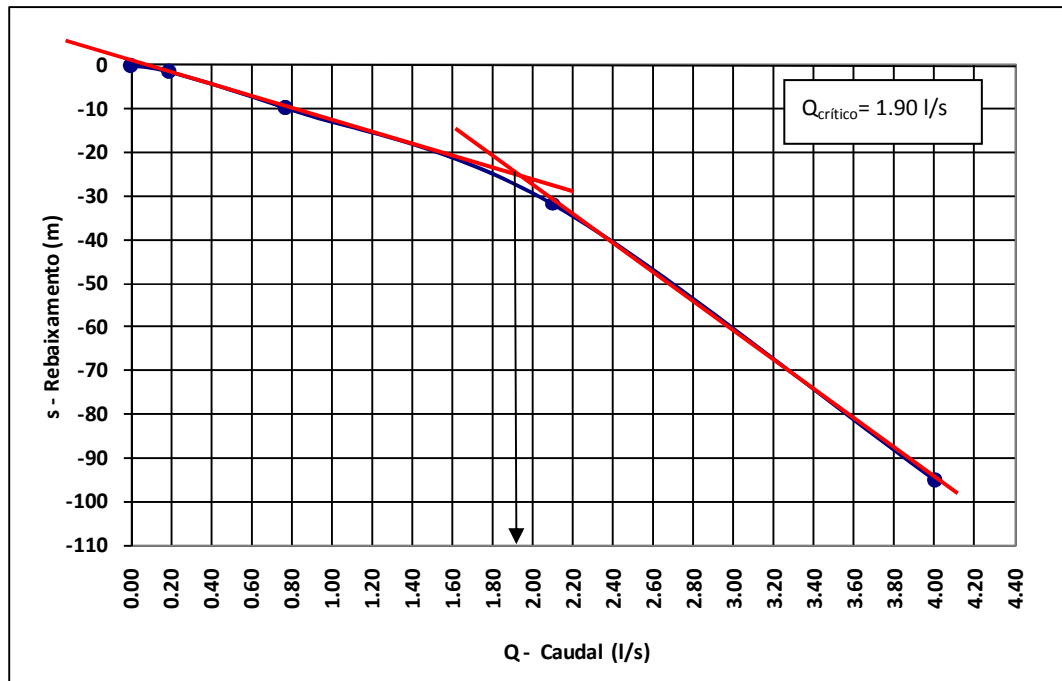


Figura II.5. Curva característica do novo furo de pesquisa MF1.