



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências
2006

José Martins Carvalho **Prospecção e pesquisa de recursos hídricos
subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas
metodológicas**



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências
2006

José Martins Carvalho **Prospecção e pesquisa de recursos hídricos
subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas
metodológicas**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Geociências (Hidrogeologia Aplicada), sob sua exclusiva responsabilidade.

o júri

presidente

Professor Doutor Jorge Ribeiro Frade, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Rafael Fernández Rubio, Professor Catedrático Emérito da Universidad Politécnica de Madrid

Professor Doutor Manuel Oliveira da Silva, Professor Catedrático aposentado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Professor Doutor José António Simões Cortez, Professor Catedrático aposentado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor Ricardo Paulo Serralheiro, Professor Catedrático da Universidade de Évora

Professor Doutor Manuel João Senos Matias, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Manuel Augusto Marques da Silva, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradecimentos calorosos em relação a apoios específicos recebidos para a elaboração desta dissertação são devidos:

- i) Aos Professores Catedráticos Doutor Francisco Álvaro Gonçalves[†] (UE, Évora), Doutor Rafael Fernández Rubio (ETSIM, Madrid) e Doutor José António Simões Cortez (UP, Porto) pelo incentivo sempre manifestado e facilidades para consulta de bibliografia, conselhos e exemplo pessoal de elevados padrões morais, éticos, profissionais e científicos.
- ii) Ao Professor-Coordenador Doutor Helder Iglésias Chaminé (ISEP, Porto e MIA-UA, Aveiro), amigo e confidente nas horas boas e menos boas, companheiro de grandes aventuras hidrogeológicas, e impulsor decisivo e efectivo da decisão de terminar esta dissertação.
- iii) Ao Professor Catedrático Doutor Fernando Tavares Rocha (UA, Aveiro) pela força moral e confiança transmitidas e pelas facilidades concedidas para que esta dissertação pudesse ser apresentada a um júri de Doutoramento na Universidade de Aveiro.
- iv) Ao Professor Catedrático Doutor Manuel Augusto Marques da Silva (UA, Aveiro) pela amizade de muitos anos, fortemente manifestada na disponibilidade total, a título pessoal e institucional, para apoiar a redacção desta dissertação e pela confiança científica e profissional amplamente demonstradas sempre e, particularmente, agora.

Agradeço aos co-autores dos artigos que integram este trabalho e, ainda, a Alberto Gomes (FLUP), Albino Medeiros (ACavaco), Alice Fialho (INAG), Ana Pires (MIA-UA), Carlos Laia, Dina Fialho (CCDR-Alentejo), Helder I. Chaminé (ISEP; MIA-UA), João Pinto, Jorge Espinha Marques (FCUP), José Francisco Alcântara da Cruz (DGGE), José Teixeira (MIA-UA), Júlio Carneiro (UE), Manuel Antunes da Silva (Unicer-Águas), Manuel Augusto Marques da Silva (UA), Maria José C. Afonso (ISEP), Nadir Plasencia (EDP Produção EM), Paulo E. Fonseca (FCUL), Pedro Francisco e Sónia Garcia, pelo empenhamento manifestado na preparação de figuras, cedência de bibliografia, preparação de dados, revisão de texto e tarefas de impressão. Deixo também uma palavra de reconhecimento a todos os familiares, colegas e amigos que ao longo dos anos me encorajaram a preparar uma dissertação de doutoramento.

Dedico esta dissertação à minha mulher Alda e aos meus filhos Rita, Joana e Tiago com os quais fui aprofundando o verdadeiro significado da Vida.

resumo

O Norte e Centro do Maciço Antigo de Portugal são ocupados por rochas granitóides e metassedimentares onde estão instalados aquíferos descontínuos, utilizados no consumo humano, público e privado, e em actividades industriais e agrícolas. Ocorrem, também vários balneários termais, usando águas termominerais (temperaturas até 76 °C) e oficinas de engarrafamento de águas minerais naturais e de nascente. Nalguns locais, onde os recursos e a procura convergem, é realizada utilização geotérmica no aquecimento urbano. A actividade de pesquisa e captação é muito intensa mas a prospecção com aplicação de técnicas científicas adequadas reduz-se ao domínio das águas minerais naturais e de nascente e recursos geotérmicos. A fracturação é o factor determinante na produtividade hídrica destas rochas, mas a respectiva distribuição regional pode ser aproximada a partir da litologia. Os grandes acidentes tectónicos regionais desempenham um factor de favorabilidade nos caudais, mas é a conectividade da fracturação à escala do afloramento a controlar as produções. Os caudais de exploração de longo prazo em furos verticais apresentam valores medianos de 0,74l/s nas rochas metassedimentares quartzíticas e de 0,02 l/s nas rochas granitóides. O Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) é de 0,27 determinando caudais de exploração entre 1/3 a 1/4 dos caudais de perfuração, com martelo de fundo de furo. O inverso do Índice Metros Caudal (IMC) de uma dada área, determinável no terreno a partir dos metros totais perfurados e dos caudais obtidos, é equivalente à transmissividade mediana nessa área. O IMC serviu de base a uma proposta de cartografia hidrogeológica regional, incluindo a do custo da água. Os valores medianos da transmissividade são de 3,1m²/dia, nas rochas metassedimentares e de 1,7 m²/dia nos granitóides. As transmissividades mais altas nos pólos de captação de águas termominerais apresentam valores superiores, até duas ordens de magnitude, das dos locais de emergência das águas normais. Propõem-se metodologias de desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos normais, e hidrominerais e geotérmicos, numa perspectiva científica integradora, adaptada à procura, orientada para as pessoas e respeitando os valores sociais, culturais e ambientais.

abstract

Metasedimentary and granitic rocks outcropping in northern and central Portugal hold discontinuous aquifers that are used for human, public and private needs, in addition to industrial and agriculture activities. Furthermore, several thermal spas are running regularly, some of them using thermomineral waters (temperature up to 76°C), as well as natural mineral water and spring water bottling units. At some locations, where heating and resource needs overlap, some geothermal direct use operations are running normally. Groundwater exploration is rather important but the utilization of scientific tools is scarce, except for the spa, bottling and geothermal markets. Faulting is the major feature controlling productivity in these rocks, but the regional distribution can be achieved through lithology. Main tectonical accidents act as regional favourability factors but production is function of the fracture connectivity at a local level. Median long-term well capacities (only vertical drilled wells) range from 0,74 l/s in quartzite to 0,02 l/s in granite. The Coefficient of Reduced Capacity (CRC) is 0,27, say the existing long-term well capacity is *ca.* 1/3 to 1/4 of the air-flow production when drilling with down – the - hole hammer method. The inverse of the Meters Capacity Index (MCI) obtainable through the total drilled meters in a given area and the total well yield is equivalent to the median transmissivity in this area. The MCI was used to produce a proposal for the regional hydrogeological mapping, including water cost. Transmissivities median are as follows: 3,1m²/day in metasedimentary rocks and 1,7m²/day in granite. The higher transmissivities, located over the thermomineral occurrences, are of two orders of magnitude greater than those of normal waters. Development methodologies for groundwater, natural mineral water and geothermal resources are proposed considering a scientific integrated approach, taking into account the needs, but including social, cultural and environmental issues.

Índice

Nota Prévia	xiii
--------------------------	-------------

Capítulo I - Introdução Geral	1
--	----------

1. Generalidades.....	3
2. Enquadramento da memória.....	5
3. Estrutura da memória.....	13
4. Listagem dos artigos científicos incorporados nesta dissertação.....	21

Capítulo II - Prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em rochas cristalinas	23
--	-----------

1. Considerações iniciais.....	25
2. Prospecção, pesquisa e captação no Maciço Antigo.....	25
2.1. Os conceitos.....	25
2.2. O abastecimento público da vila de Arraiolos: um exemplo.....	30
3. As metodologias de prospecção e pesquisa.....	33
3.1. Generalidades.....	33
3.2. Modelação hidrogeológica: os modelos conceptuais.....	37
4. A água subterrânea em rochas cristalinas.....	43
4.1. Generalidades.....	43
4.2. Constrangimentos geomorfológicos.....	44
4.2.1. A área de Castelo Novo–Alpedrinha (Fundão): um exemplo.....	47
4.2.2. Alteração e alterabilidade dos maciços na pesquisa de água subterrânea.....	55
4.3. Constrangimentos geológico-estruturais.....	56
4.3.1. A área de Castelo de Vide: um exemplo.....	62
4.4. Caracterização hidrodinâmica.....	65
4.5. Avaliação das condições de recarga.....	68
4.6. Factores de favorabilidade e indicadores de prospecção.....	69
4.7. Técnicas e métodos da prospecção e pesquisa.....	75
5. Reflexão final.....	111
6. Artigos Científicos.....	114

Capítulo III - Cartografia hidrogeológica do maciço antigo português: uma proposta.....115

1. Introdução.....	117
2. Condicionamentos geotectónicos e geomorfológicos regionais.....	121
3. Recarga e recursos à escala regional e local.....	123
4. Caracterização hidrodinâmica.....	131
4.1 A área de Venda Nova: um exemplo.....	137
5. Produtividade de furos de pesquisa e captação e risco geológico de insucesso associado à prospecção.....	139
6. Unidades hidrogeológicas, risco geológico de insucesso e custo da água.....	143
7. Artigos Científicos.....	161

Capítulo IV - Águas minerais naturais e de nascente e recursos geotérmicos.....163

1. Enquadramento geral da prospecção e da pesquisa de águas minerais naturais.....	165
2. Recursos hidrominerais e geotérmicos e sua importância sócio-económica.....	169
3. Classificação de nascentes, águas e aquíferos hidrominerais.....	173
4. Localização das explorações de água mineral natural e de água de nascente.....	176
5. Desenvolvimento de recursos hidrominerais e geotérmicos.....	180
5.1 Especificidades.....	180
5.2 Técnicas e tecnologias.....	182
5.3 Estratégias de prospecção e pesquisa.....	188
5.4 O papel das falhas.....	191
5.5 A dessacralização dos modelos.....	194
6. Alguns aspectos geológicos e hidrodinâmicos das zonas de descarga.....	197
7. Recursos geotérmicos.....	205
7.1 Generalidades.....	205
7.2 A Geotermia.....	206
7.3 Recursos geotérmicos no Maciço Antigo Português.....	209
8. Gestão de Recursos hidrominerais e geotérmicos e de águas de nascente.....	212
8.1 O Caudal de Exploração de captações de água mineral natural e de nascente.....	214
8.2 O Plano de Exploração das concessões hidrominerais e geotérmicas.....	226
8.3 Área de Concessão e Perímetro de Protecção.....	230

8.4 O papel do Director Técnico de Exploração.....	232
9. Artigos Científicos	235

Capítulo V - Conclusões e recomendações.....237

1. Generalidades.....	239
2. Problemas e desafios.....	240
3. Conclusões	243
4. Linhas metodológicas de investigação a promover.....	248
5. Uma nota reflexiva final.....	249

CAPÍTULO VI - Referências bibliográficas.....251

ANEXOS

ANEXO A-I: Esboço Hidrogeológico do Norte e Centro do Maciço Antigo Português (escala 1/500.000)

Índice de Figuras

Capítulo I - Introdução Geral

Figura I-1: Localização das captações de água para abastecimento público no Maciço Antigo do Norte de Portugal.....	11
Figura I-2: Distribuição das captações de água subterrânea para abastecimento Público no Maciço Antigo do Norte de Portugal por tipologia.....	12

Capítulo II - Prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em rochas cristalinas

Figura II-1: Localização dos artigos apresentados no Capítulo II.....	26
Figura II-2: Estabelecimento do Plano de Pesquisa em aquíferos de rochas cristalinas.....	43
Figura II-3: Mapa de enquadramento geológico regional da Serra da Gardunha, com a localização das nascentes de Castelo Novo e das Termas da Touca.....	49
Figura II-4: Localização das captações de Castelo Novo em Agosto de 1998.....	52
Figura II-5: Aspectos geológico-estruturais e hidrogeomecânicos relacionados com as descontinuidades.....	58
Figura II-6: Esboço geológico sucinto da região de Castelo de Vide.....	62
Figura II-7: Drenância vertical da zona alterada para a zona fracturada, induzida por bombagem.....	68
Figura II-8: Factores de favorabilidade e indicadores de prospecção.....	71
Figura II-9: Armadilhas hidrogeológicas em rochas cristalinas.....	72
Figura II-10: Ficha para registo de indicadores de prospecção para implantação de furos de pesquisa e eventual captação.....	73
Figura II-11: Caudais máximos de perfuração em contactos geológicos e estruturas do tipo cavalgamento em Trás-os-Montes.....	74
Figura II-12: Influência de filonetes de quartzo no caudal de furos verticais em Trás-os-Montes.....	74
Figura II-13: Fafe – Aplicação de cartografia geotécnica a estudos de prospecção hidrogeológica na região de Fafe.....	77
Figura II-14: Exemplo de uma ficha do inventário hidrogeológico usualmente usada no terreno em campanhas de prospecção hidrogeológica.....	78
Figura II-15: Utilização de um inventário de condutividade eléctrica da água na detecção de zonas contaminadas.....	80
Figura II-16: Efeito de escala na detecção de fracturação.....	83
Figura II-17: Localização dos furos de pesquisa na área das Caldas da Cavaca.....	93

Capítulo III - Cartografia hidrogeológica do maciço antigo português: uma proposta

Figura III-1: Localização dos artigos incluídos no Capítulo III.....	120
Figura III-2: Modelo digital de terreno.....	121
Figura III-3: Fluxograma síntese da metodologia utilizada para avaliação dos recursos subterrâneos renováveis.....	125
Figura III-4: Carta de isoietas anuais médias do Maciço Antigo Português.....	126
Figura III-5: Carta da temperatura anual média do ar no Maciço Antigo Português.....	127
Figura III-6: Esboço de unidades hidrogeológicas do Norte e Centro do Maciço Antigo Português.....	149
Figura III-7: Esboço de Carta de Desenvolvimento de Recursos Hídricos subterrâneos de Trás-os-Montes.....	153
Figura III-8: Esboço de Carta de Aptidão das Águas Subterrâneas para Pequenos Regadios em Trás-os-Montes.....	159

Capítulo IV - Águas minerais naturais e de nascente e recursos geotérmicos

Figura IV-1: Localização dos artigos incluídos no Capítulo IV.....	166
Figura IV-2: Localização das principais ocorrências de água mineral natural na zona Norte do Maciço Antigo.....	177
Figura IV-3: Localização das explorações de água mineral natural e de águas de nascente.....	179
Figura IV-4: Prospecção geofísica estratégica e tática no sector Norte de Pedras Salgadas.....	190
Figura IV-5: Furos de pesquisa de água gasocarbónica na falha Penacova-Régua-Verin, em Vidago.....	192
Figura IV-6: Pesquisa de água gasocarbónica na área de Melgaço.....	196
Figura IV-7: Caudais antes e depois de intervenções em águas sulfúreas Portuguesas.....	200
Figura IV-8: Caudais de exploração de águas minerais da Categoria I em rochas graníticas em função da distância aos contactos com rochas metassedimentares.....	203
Figura IV-9: Relação entre caudais de exploração de águas minerais da Categoria I e distância às linhas de água.....	204
Figura IV-10: Utilizações da energia geotérmica.....	206
Figura IV-11: Coeficiente de redução de caudal (CRC) em águas de ciclo curto na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Antigo Português.....	223
Figura IV-12: Coeficiente de redução de caudal (CRC) vs. caudal máximo de perfuração, para as águas gasocarbónicas e águas sulfúreas.....	224

Índice de Quadros

Capítulo I – Introdução geral

Quadro I-1: Localização, domínios, litologias, técnicas usadas e resultados apresentados nesta dissertação: uma visão integradora.....	16
--	----

Capítulo II - Prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em rochas cristalinas

Quadro II-1: Resumo comparativo dos resultados da prospecção e pesquisa em Arraiolos reportados no artigo [1], Carvalho (1979).....	32
Quadro II-2: Captações da área de Castelo Novo e da Touca (valores medianos)	53
Quadro II-3: Características hidrogeológicas nos quartzitos de Castelo de Vide.....	64
Quadro II-4. Comparação das transmissividades obtidas nos furos descritos nos artigos [2] e [4].....	110

Capítulo III - Cartografia hidrogeológica do maciço antigo português: uma proposta

Quadro III-1: Valores medianos do caudal de exploração e da transmissividade pelas principais litologias.....	136
---	-----

Capítulo IV - Águas minerais naturais e de nascente e recursos geotérmicos

Quadro IV-1: Principais direcções de fracturação em algumas águas minerais Portuguesas confirmadas com prospecção geoeléctrica.....	199
Quadro IV-2: Distribuição da mediana dos caudais de exploração (l/s) por furo e por litologia no Maciço Antigo.....	200
Quadro IV-3: Transmissividades de águas minerais e não minerais por litologia.....	201
Quadro IV-4: Projectos geotérmicos no Maciço Antigo Português onde existem utilizações para além das balneoterápicas.....	213

Nota Prévia

*Esta é a minha profissão e também o meu passatempo.
Feliz é o Homem que consegue fazer da sua profissão um passatempo.*

George Bernard Shaw

Este trabalho, sendo uma síntese de actividades profissionais de muitos anos, transpostas em artigos científicos agora revisitados e comentados, foi paradoxalmente redigido em poucos meses, face ao desafio envolvente lançado pelo Professor Doutor Manuel Augusto Marques da Silva em meados de 2004, nos intervalos de intensa actividade de consultadoria e de alguma docência, ao nível de pré- e pós-graduação, na Universidade de Évora, no Instituto Superior de Engenharia do Porto e na Universidade de Aveiro.

O contexto referido não me permite enumerar sistematicamente todos, pessoas e instituições, que directa ou indirectamente apoiaram investigações aqui reportadas ou deram suporte colateral. Embora correndo o risco de ser injusto, decidi lembrar aqui, em jeito auto-biográfico, alguns marcos duma carreira que concorreram, directa ou indirectamente, para o nascimento desta dissertação

A actividade no Ensino Superior, mantida em tempo parcial há mais de vinte anos, em paralelo com o labor de geólogo profissional, quase começava em 1968 em Moçambique, na então Lourenço Marques, quando o Professor Doutor J. M. Correia Neves me desafiou com um *“que tal uma aventurazinha universitária?”*. Anos depois, em 1982, sim, a aventura começou na Universidade de Évora pela mão do saudoso Professor Doutor Catedrático Francisco Álvaro Gonçalves[†], que tudo fez para que eu abandonasse a actividade de geólogo profissional, tendo inclusive promovido, em 1991, a minha intenção de doutoramento naquela Universidade, no que foi, então, apoiado pelos Professores Catedráticos Engenheiro Rafael Fernández Rubio (ETSIM, Madrid) e Engenheiro José António Simões Cortez (FEUP, Porto). Mais tarde, os Professores Catedráticos Doutor Manuel Oliveira da Silva (FCUL, Lisboa) e Doutor Carlos Alberto da Costa Almeida (FCUL, Lisboa) manifestaram igual disponibilidade mas o meu profundo empenhamento na actividade privada, não me conferia autonomia para dar esse passo. Por isso, os apelos para que preparasse a dissertação, continuados pelos Professores Doutor António Alexandre Ventura Araújo e Doutor Rui Manuel Soares Dias no Departamento de Geociências (UE, Évora), caíram sucessivamente em “saco roto”.

Adicionalmente uma passagem de dez anos, entre 1984 e 1994, pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto veio permitir-me, afortunadamente, travar conhecimento com inúmeros alunos que hoje são referências no ensino, na investigação e na actividade profissional em Portugal e no estrangeiro.

Terminado o ciclo de Évora onde integrei até Julho de 2005 o grupo de Hidrogeologia do Departamento de Geociências, regresso agora ao Porto: no Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia (ISEP), em equipa com antigos alunos e amigos, e ilustres colegas, espero continuar a apoiar estudantes a quem a minha modesta experiência, porventura, possa ajudar.

O desafio permanente de uma carreira de Hidrogeólogo profissional muito intensa não me deixou seduzir pelas agruras e pela exigência da vida docente e de investigação que em Portugal ronda o sacerdócio, tais as dificuldades existentes.

Valerá a pena referir que esta dissertação é um exemplo atípico da tão badalada colaboração Universidade–Empresa: todas as actividades aqui reportadas foram inteiramente financiadas pelas empresas onde o signatário exerceu ou exerce a sua actividade e, portanto, pelos respectivos clientes. A todas essas numerosas entidades anónimas deixo aqui uma saudação expressiva pois sem elas, e a sua confiança, esta caminhada não teria sido possível.

O percurso fora dos muros da Universidade foi iniciado no Alentejo, na *Mining Exploration International (Portugal)*, pela mão do Professor Doutor José Ávila Martins, a pedido do Professor Doutor Gaspar Soares de Carvalho, meu professor de geologia na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e forte referência afectiva, profissional e científica. Fazer prospecção mineira num Verão inclemente de 1966, naquelas então muito distantes paragens do Rio Guadiana, era duro, mas o desafio de começar uma carreira de geólogo ultrapassava todas as barreiras. Germinou, então, a semente da profissão.

No estertor do sonho imperial, Portugal mobilizava, nessa época, praticamente todos os jovens para a Guerra do Ultramar. Como consequência em Moçambique, na Engenharia Militar Portuguesa, feito geólogo militar, vivi,

seguramente, durante mais de dois anos, os dias mais intensos da minha vida profissional. No "mato" de Cabo Delgado, Niassa e Tete aprendi que a sobrevivência de uma vida, na guerra e na paz, pode depender da existência e operacionalidade de uma captação de água subterrânea. Em quatro anos de Engenharia Militar Portuguesa conheci a perspectiva do Engenheiro, fundamental no equacionar e na resolução dos problemas concretos dos Recursos Hídricos e da Sociedade.

Ainda em Moçambique, na Geotécnica e Minas Lda., tive a sorte de conhecer o Doutor António Saldanha de Sousa Neves, então jovem Doutor (PhD) pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), brilhante geofísico e hidrogeólogo que me ensinou, com independência perante ideias feitas, honestidade intelectual, fino humor e muita irreverência, que a prospecção e pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas é tarefa muito séria e exige trabalho de campo, georreferenciado ao metro, pesquisa bibliográfica e uma atitude de superação constante, considerando todas as disciplinas disponíveis para o efectivo entendimento do reservatório geológico. A “descoberta” da hidráulica, essencial para o hidrogeólogo, essa, veio mais tarde.

De regresso ao então Continente, em 1973, ingressei na grande e ignorada escola da hidrogeologia aplicada Portuguesa dos anos 1960 e 1970 que foi a empresa Sondagens e Fundações ACavaco Lda, dirigida pelos sócios-gerentes Engenheiros Augusto Cavaco, Diamantino Henriques de Mendonça e José Alfredo Botelho Chaves, onde o rigor metodológico na aquisição e tratamento de dados, a todos os níveis de intervenção técnica, rondava a perfeição paranóica. Nessa estrutura, com o apoio de notáveis, esforçados e, às vezes estóicos colegas, encarregados, mestres e operários — sábios na arte de “saber fazer” — foi-me permitido adquirir grande parte das competências de que hoje disponho.

Seguiu-se a descoberta da hidrogeologia das termas e dos recursos geotérmicos, das águas engarrafadas e da actividade profissional em quatro continentes — tudo sobre a égide da hidrogeologia das rochas cristalinas — paixão que persiste, agora como consultor independente.

Durante quase quatro décadas de actividade de prospecção e pesquisa de água subterrânea tive o ensejo de conhecer ilustres colegas, nacionais e estrangeiros, com os quais muito aprendi de ciência e de técnica, de ética e do rigor científico e profissional, mas também dos prazeres simples da vida. Permito-me destacar aqui dois já falecidos, os Geólogos Doutor Georges Zbyszewski e Doutor Pierre Yves Berthou que constituem referências profissionais e científicas marcantes. O Doutor Zby, nos momentos difíceis, recordava-me que *“o importante é cumprirmos sempre o nosso dever”*. Ao Doutor P. Y. Berthou, tragicamente desaparecido no exercício da profissão no Brasil, devo o conceito, já no início da década de 1980, de que uma dissertação de doutoramento pode ter uma organização semelhante à da que agora decidi submeter.

Algumas empresas, devidamente assinaladas no texto, acederam à divulgação de dados dos seus arquivos, disponibilidade que obviamente se regista com os devidos agradecimentos.

Às Universidades de Évora (UE), do Porto (UP) e de Aveiro (UA) e ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) devo a possibilidade única do contacto permanente com ilustres professores e com o fulgor da juventude. Com os alunos vivi dias apaixonantes de companheirismo e de descoberta científica e tecnológica. Nesse contexto julgo ter ganho forças para resistir à erosão dos anos. Sem essa ligação complementar, árdua mas reconfortante, o signatário seria hoje intelectualmente mais fraco, cientificamente muito menos preparado e humanamente mais pobre.

A Fundação Calouste Gulbenkian financiou parte das deslocações a dois congressos em solo Europeu nos anos 1990, circunstância que também aqui se deixa registada. Esta dissertação integra-se nos projectos de investigação, em curso, da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, HIMOCATCH (*Role of High Mountain Areas in Catchment Water Resources, Northern/Central Portugal*; POCTI/CTA/44235/2002) e GROUNDURBAN (*Urban groundwater and environmental management in the Northwest Portugal: Porto metropolitan area case study*; POCTI/CTE-GIN/59081/2004).

Finalmente, este trabalho só foi possível, não apenas por ter desfrutado nos últimos meses do incentivo de alguns colegas, amigos e familiares, mas

ainda porque — muita gente — desde modestos pastores, operários e funcionários anónimos, até ilustres figuras da sociedade civil e militar portuguesa, colegas, amigos, concorrentes e clientes, me terem permitido um percurso pessoal de que me orgulho. Ao terminar esta dissertação, é bom sentir-me reconfortado pela obra feita, mas, sobretudo, feliz na minha pele de Homem, e com a minha profissão.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

*...a chuva e a neve descem do céu e não voltam mais para lá
senão depois de empapar a terra, de a fecundar e fazer germinar
para que dê semente ao semeador e pão ao que come...*

Isaiás 55:10

1. Generalidades

As águas subterrâneas integram a 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 aparição em nascentes, galerias, poços, furos, ou outras manifestações naturais ou forçadas, pode variar entre alguns meses a vários anos; centenas ou milhares de anos no caso das águas minerais e termominerais de circuito lento e profundo. Este ciclo é movido pela acção da gravidade, pelo calor da terra e pela energia solar, embora para as águas mais profundas possam ser aduzidos outros mecanismos.

Quando o cidadão comum é confrontado com as questões da água (disponibilidade, qualidade, adequabilidade para usos consumptivos e não consumptivos, incluindo os energéticos e os conflitos locais ou internacionais) vem à mente a água superficial: os rios, os grandes lagos, as barragens e as albufeiras, as grandes obras de adução do passado ou actuais. Contudo, o balanço hídrico à escala do planeta conduz a taxas de distribuição da seguinte ordem de grandeza (Lvovich, 1979): 96,5% da água da Terra corresponde à água salgada dos oceanos, estando a água doce avaliada em, apenas, 3,5% do total; desta magra fatia, 69% é constituída por água das calotes glaciárias, *icebergs*, glaciares e neves eternas, 30% correspondem a águas subterrâneas e apenas 1% ao conjunto das águas superficiais, da atmosfera e da água biológica.

A água subterrânea é um recurso geológico *invisível* de inegável valor económico, social e político, fragilizado quer por questões ligadas à quantidade quer por problemas de qualidade, nomeadamente contaminação e degradação. Por isso a reabilitação de aquíferos é hoje prática rotineira nos países mais avançados. A essas questões correspondem acções de investigação pura e aplicada, de gestão, de monitorização, de protecção e de conservação — a pensar nas gerações futuras — e, claro, a prospecção, pesquisa e captação, motor de todas as outras medidas. Ora, todas as actividades ligadas às águas subterrâneas obrigam à conceptualização do aquífero, unidade fundamental da Hidrogeologia e dos Recursos Hídricos subterrâneos. Os profissionais da hidrogeologia executam tarefas a nível da investigação, da pesquisa e captação, do controlo dos recursos e da contaminação das águas subterrâneas. Uma

formação sólida nesta área é, por estas razões, fundamental, quer para o investigador na área da Hidrogeologia e Recursos Hídricos quer para o profissional que vai integrar os resultados desta investigação na sua prática de engenharia.

A Hidrogeologia é, porventura, o ramo das ciências geológicas que mais se desenvolveu nas últimas três décadas (Fetter, 2001). Contudo o interesse pelo estudo da água encontra-se já bem expresso nos escritos de, por exemplo, Leonardo da Vinci (ca. 1508-10, cf. Desmond & Pedretti, 2000), H. Bernard Palissy (1580), Pierre Perrault (1674), Henry Darcy (1856), O. E. Meinzer (1923), Charles Theis (1935) e Tolman (1937). Este crescimento tem sido marcado, a partir dos meados da década de 70 do Século XX, pelo acréscimo progressivo de actividades no domínio do transporte de massa, da remediação (Sahuquillo 2002) e, mais recentemente, da biorremediação (Belitz, 2001). O incremento dos instrumentos computacionais, a sua evidente utilidade, crescente facilidade de manejo e riqueza gráfica envolvente, têm levado a descurar a faceta básica desta actividade científica: as águas subterrâneas ocorrem no campo e é neste que toda a actividade científica e tecnológica deverá primordialmente ser realizada. A Hidrogeologia é actualmente uma disciplina muito dinâmica, de grande impacto científico — e por vezes social — que congrega as Geociências e Ciências da Engenharia apoiando-se, para tal, em instrumentos que vão desde a geologia à modelação geomatemática.

A prospecção hidrogeológica (*e.g.*, Castany 1982, Fetter 2001, Sanders 1998, Assaad et al. 2004) reúne, em geral, meios indirectos, tais como: reconhecimentos geológicos e geomorfológicos prévios de terreno, cartografia geológico-estrutural, cartografia fotogeológica e hidrogeológica, rastreios hidroquímicos e levantamentos geofísicos. A modelação de sistemas hidrogeológicos, numa base georreferenciada, é hoje uma ferramenta de rotina na prática hidrogeológica. A exploração do georrecurso, água subterrânea, engloba a construção de estruturas captantes, geralmente furos verticais, inclinados ou horizontais, e a monitorização da extracção em termos dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e hidrodinâmicos.

A Hidrogeologia é entendida como o estudo das águas subterrâneas e enquadra as relações entre os processos geológicos e a água (Fetter, 2001). É

um ramo da Hidrologia, a qual é entendida como a ciência que estuda a ocorrência, a distribuição, o movimento e os fenómenos físico-químicos da totalidade da água do planeta Terra. É uma área do conhecimento fortemente interdisciplinar, i.e., ao técnico especialista em hidrogeologia com diversos perfis e competências específicas — Geólogo, Engenheiro Geólogo, Engenheiro de Recursos Hídricos, Engenheiro Geotécnico, Engenheiro de Minas, Engenheiro Civil, Engenheiro Agrónomo, Geógrafo do Território, etc. — é exigido treino em geologia, geomorfologia, hidráulica, matemática, física, química e computação.

2. Enquadramento da memória

O Dec-Lei 216/92 de 13 de Outubro permite que a dissertação de doutoramento seja preparada com base no aproveitamento total ou parcial de trabalhos anteriormente publicados, ainda que em colaboração com os seus pares. O legislador procurava que a dissertação pudesse ser o coroar de actividade normal, corrente, de produção científica do respectivo autor, no seio das equipas de investigação em que se inseriu.

Longe vão os tempos em que apenas era valorizado o trabalho solitário do investigador intrépido, capaz de realizar a totalidade absoluta das tarefas que conduziam à produção do ambicionado volume final da dissertação. Hoje as equipas vencedoras na investigação científica, e na vida empresarial, exigem dos seus membros, disciplina, rigor, competência e capacidade de integrar grupos. Assim, em Ciência deixou de haver o acto isolado.

No caso dos artigos científicos e em relatórios inéditos no âmbito de actividade profissional extra-académica também são, por vezes, dezenas os autores a assinar e assumir a autoria do documento final. Surgem assim, além-fronteiras e em Portugal, artigos científicos assinados por múltiplos autores, com listas bibliográficas extensíssimas. São frequentes, a nível internacional, as dissertações de doutoramento que incluem, em maior ou menor escala, artigos científicos previamente publicados em revistas com o sistema de arbitragem científica e, se possível, em revistas indexadas em bases de dados internacionais (e.g., *ISI - 'Institute for Scientific Information', GeoBase, Current Book Contents,...*). Em Portugal, no domínio das Ciências da Terra, têm sido raros os

investigadores, quer da carreira universitária quer da carreira de investigação em laboratórios do estado (*e.g.*, Dias 1997, Oliveira 1987 e Coke 2000) a optar por esta modalidade propiciada pelo Dec-Lei 216/92 de 13 de Outubro.

O presente trabalho sintetiza mais de três decénios de labor no domínio da prospecção e pesquisa de água subterrânea no designado Maciço Antigo Português (*i.e.*, corresponde à zonação geotectónica do maciço definida por Lotze 1945, com os refinamentos subsequentes de Julivert *et al.* 1978, de Ribeiro *et al.* 1979 e de Farias *et al.* 1987, nas seguintes Zonas: Centro-Ibérica, Galiza-Trás-os-Montes e de Ossa-Morena) incluindo artigos científicos redigidos inteiramente pelo autor e alguns em que, em colaboração, o mesmo desempenhou papel significativo na discussão e redacção dos manuscritos. A maioria dos trabalhos de campo foram da responsabilidade directa e muitas vezes de execução pessoal do autor.

Embora a actividade desenvolvida pelo signatário desta dissertação tenha incluído a Zona de Ossa-Morena (*e.g.*, Carvalho 1979, Carvalho *et al.* 1999, 2004 e numerosos relatórios inéditos) apenas foi seleccionada para esta dissertação a Zona Centro-Ibérica e a Zona Galiza-Trás-os-Montes por serem as de cobertura mais ampla, homogénea e diversificada no que respeita, quer a águas “normais” quer a águas minerais. Além disso foi sobre esta zonas que foram apresentados, ao sabor do percurso profissional do autor e ao longo dos anos, a maioria dos trabalhos de divulgação e de cariz técnico-científico que pareceu lógico incorporar aqui. Fica, assim, justificado o título escolhido.

A ordem dos artigos no texto não é a cronológica mas a que pareceu melhor adaptada ao formato final escolhido, no sentido de que constituam um conjunto coerente, articulado através de textos integradores escritos especialmente nesta circunstância.

O âmbito deste trabalho cobre com alguma extensão a prospecção e a pesquisa hidrogeológica em meios cristalinos e cristalofílicos, isto é o de rochas ígneas e metamórficas aqui designadas, porventura impropriamente (AGI 1962), por cristalinas (*cf.* Wright 1992, Rice 1963). Designação alternativa, de raiz anglo-saxónica, poderia ter sido a de “rochas duras” [“Hard Rocks”] (*e.g.*, Lloyd 1999, Larsson 1984) mas, porque esta última abarca domínios litológicos mais amplos

do que os considerados neste trabalho, não a utilizamos aqui. A designação rochas compactas e fissuradas tem sido também usada em língua portuguesa (Almeida 1970) mas também não foi retida por demasiado vaga e extensiva e não representativa apenas do Maciço Antigo.

Abordar-se-á neste documento a problemática da prospecção e pesquisa de águas “normais”, de águas minerais usadas em termalismo ou na indústria do engarrafamento e a de recursos geotérmicos de baixa entalpia a elas associados. As águas de nascente, que em rigor são águas “normais” reclassificadas administrativamente para utilização no engarrafamento, foram também abrangidas. Esta opção resulta das actividades desenvolvidas de prospecção, pesquisa e captação de águas subterrâneas terem atravessado transversalmente todos os domínios referidos, que aliás ocorrem no mesmo espaço geográfico e hidrogeológico.

Não é apresentada a metodologia de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos em depósitos aluvionares e de outros alteritos em ligação hidráulica com as linhas de água superficiais que correspondem às situações em que é possível captar os caudais mais elevados da região estudada e de outras áreas similares do Mundo. O leitor poderá encontrar esse tema tratado em Carvalho & Guedes (1978) e, mais extensivamente, em Mendonça (1985). E saberá bem visitar os trabalhos pioneiros de Moitinho de Almeida & Zbyszewsky (1947, 1949) belos pela sua forte componente de geologia fundamental, precisos pelo rigor das descrições e análise dos factores que governam o escoamento subterrâneo nestas unidades geológicas e úteis na esquematização dos parâmetros que condicionam a prospecção e a pesquisa.

Na literatura hidrogeológica portuguesa tem sido usual a designação de Maciço Antigo Português (O. Ribeiro *et al.* 1987, INAG 1997) e por Maciço Hespérico (Lotze 1945, Teixeira & Gonçalves 1980, Pedrosa 1999), ou, mais recentemente em acepções com uma conotação geotectónica mais vincada, por Maciço Varisco Ibérico ou Terreno Autóctone Ibérico (Ribeiro *et al.* 1990). O autor utilizou anteriormente algumas destas designações de forma indistinta.

Os artigos mais antigos (*e.g.*, Carvalho & Guedes 1978, Carvalho & Mendonça 1980) respeitam à fase de prospecção e pesquisa “pura e dura”

correspondente a intenso labor de campo por todo o território português. Nas publicações mais recentes (*e.g.*, Carvalho *et al.* 2000, 2003, 2005) é patente a evolução para temas como a avaliação de recursos hídricos subterrâneos à escala regional em que a complexidade e multidisciplinaridade das questões a estudar obrigou à integração e coordenação de várias equipas. Portanto, neste trabalho, predominando as preocupações com a prospecção e pesquisa à escala local, evolui-se posteriormente para a caracterização hidrogeológica regional, predição de produtividades aquíferas e caudais de exploração sustentados e para a proposta de cartas hidrogeológicas temáticas na óptica do utilizador.

Propositadamente não foi aqui considerada a questão da captação dos recursos hídricos subterrâneos: é um tema específico do domínio da Engenharia dos Recursos Hídricos e da Engenharia de Sondagens que justifica abordagem específica noutra circunstância. Os interessados podem consultar, entre outros, os trabalhos de Carvalho (1973, 2000), de Clark (1988), de Driscoll (1986), Harlan *et al.* (1989), Rowles (1991) e NGWA (1998). Também não se aborda o problema da monitorização, protecção e gestão dos recursos hídricos subterrâneos; no entanto as cartas temáticas apresentadas constituem uma incursão no papel das águas subterrâneas no Ordenamento do Território (*e.g.*, Merritts *et al.* 1998, Carvalho 1999, Murck & Skinner 1999).

A conceptualização de aquíferos é conseguida considerando aspectos litológicos e geológicos, hidrodinâmicos e hidroquímicos (*e.g.*, Castany 1982, Custodio & Llamas 1983, Domenico & Schwartz 1990, Stone 1999, Hiscock *et al.* 2002).

A prática científica da prospecção e pesquisa hidrogeológicas é um processo decisional que exige o domínio da caracterização total dos aquíferos e suas interdependências à escala regional e local (geologia, hidrodinâmica, hidroquímica e hidrobiologia). Este último ramo da ciência é fundamental nas questões ligadas às águas utilizadas nas indústrias do termalismo e do engarrafamento de água (Senior & Ashurst 1998, LaMoreaux & Tanner 2001).

Uma abordagem integradora ligada à geologia fundamental torna-se indispensável para fundamento das decisões de carácter técnico-económico que é necessário assumir no exercício desta actividade. Portanto, o saber do

hidrogeólogo prospector, embora não estando na moda nem no topo das preocupações da comunidade científica, não pode ser considerado um ramo menor da actividade hidrogeológica (Bisson & Lehr 2004, Assaad *et al.* 2004). A sua prática exige cada vez maior interdisciplinaridade e versatilidade e a respectiva importância vai, pelo menos, manter-se no futuro (Fitts 2002).

Em Portugal, muitas autarquias estão a optar por manter as velhas origens subterrâneas, pelo menos como sistemas de reserva, e para o combate às secas, depois da grande maioria se ter ligado às redes de distribuição em alta, a partir de águas superficiais, com muito entusiasmo. Pode ter nascido, assim, em Portugal, uma metodologia lógica de uso conjunto águas superficiais-águas subterrâneas, não por opção assumida dos decisores mas pela pressão das evidências. Vários milhares de captações para abastecimento a pequenas povoações continuam em funcionamento (Travassos 2003) e assim irão continuar no futuro pois, como se verá no capítulo III, quando este recurso é racionalmente aproveitado, corresponde a uma água barata. Em todo o mundo o papel do abastecimento de água a pequenos e médios aglomerados a partir de águas subterrâneas vai continuar a intensificar-se dadas as vantagens que lhe estão associadas (Gonzalez-Yelamos *et al.* 1992, Gustafson & Krasny 1993, 1994, Carvalho 2000).

A hidroquímica pode aportar importante contributo à prospecção por via directa e enquanto componente essencial da criação de modelos conceptuais hidrogeológicos, ferramenta básica dos trabalhos de prospecção e pesquisa. Nos trabalhos e artigos científicos aqui apresentados, a hidroquímica desempenhou um papel marginal, embora decisivo, no caso das águas minerais naturais. Serviu fundamentalmente para caracterizar a procura e para apoiar a conceptualização dos sistemas hidrogeológicos.

Esta dissertação resulta inteiramente de actividade “industrial” no terreno, isto é, desligado de programas de apoio à investigação científica. Quer dizer, a esmagadora maioria dos trabalhos teve como objectivo final a captação de água subterrânea para os mais diversos fins e tipos de procura; alguns deles foram utilizados posteriormente para fins de investigação científica em várias universidades Portuguesas (*e.g.*, Afonso 1997, Pereira 1999, Calado 2001, Espinha Marques 2001, Lima 2001).

Sendo o tema primordial desta dissertação a prospecção e a pesquisa, foi julgado adequado apresentar situações correspondentes a águas “normais” e águas minerais. A nível de gestão, isto é da actividade económica, as águas “normais” pertencem ao domínio hídrico (Dec-Lei 45/94 de 22 de Fevereiro e são geridas pelo Instituto da Água (INAG) do Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional; as águas minerais naturais, recursos geotérmicos e águas de nascente (recursos geológicos segundo o Dec-Lei 90/90 de 16 de Março) são tuteladas pela Direcção Geral de Geologia e Energia (DGGE) do Ministério da Economia e da Inovação. Contudo, a água é só uma e no terreno são grandes as interações, as interdependências e mesmo os conflitos entre recursos classificados administrativamente de forma diferente mas que em muitos casos coexistem, contactam lateralmente e, às vezes, pertencem ao mesmo aquífero. Não se pode separar aquilo que a natureza une! Por isso, no Anexo A-I é apresentado um esboço hidrogeológico do Maciço Antigo do Norte de Portugal integrando todas as águas subterrâneas, do domínio hídrico e recursos geológicos.

Por isso, mais do que de Hidrogeologia, trata-se aqui de alguns domínios especializados da Engenharia dos Recursos Hídricos no sentido de Linsley *et al.* (1992), isto é, da utilização e gestão do recurso natural “água subterrânea” de forma a ser utilizado pela sociedade de modo sustentável. Por este trabalho pairam a hidrogeologia aplicada, a geologia económica e a engenharia. De resto, como refere Sahuquillo (2002), os problemas da água no futuro terão de ser vistos cada vez mais na óptica económica, social e política.

No início do século XXI as nossas sociedades estão paradoxalmente confrontadas com o mesmo problema de séculos atrás, isto é, o de assegurar água potável a todo o ser humano e mais um: que os ecossistemas, suporte da vida, subsistam. Existe e agudiza-se um problema global de hidroeconomia incluindo as águas subterrâneas (Custodio & Gurgui 1989), de geopolítica da água (Burke & Moench 2000, Laimé 2003, Diop & Rekacewicz 2003) e de hidropolítica, no sentido de Sironeau (1998). Estes problemas não são apenas dos outros e em países distantes. Na Península Ibérica não podem ser ignorados os problemas da partilha de recursos comuns aos dois países, e em ambos, entre o Norte excedentário em água e o Sul, um pré-deserto (Maia & Vlachos 2001).

As águas subterrâneas constituíram, no passado, o suporte quase exclusivo dos abastecimentos urbanos situados no Maciço Antigo. Na actualidade o seu papel está, geralmente, limitado ao abastecimento de pequenos núcleos populacionais, pequenas indústrias e pequeno regadio, mas continuam a desempenhar um papel quase exclusivo no dia a dia das populações rurais.

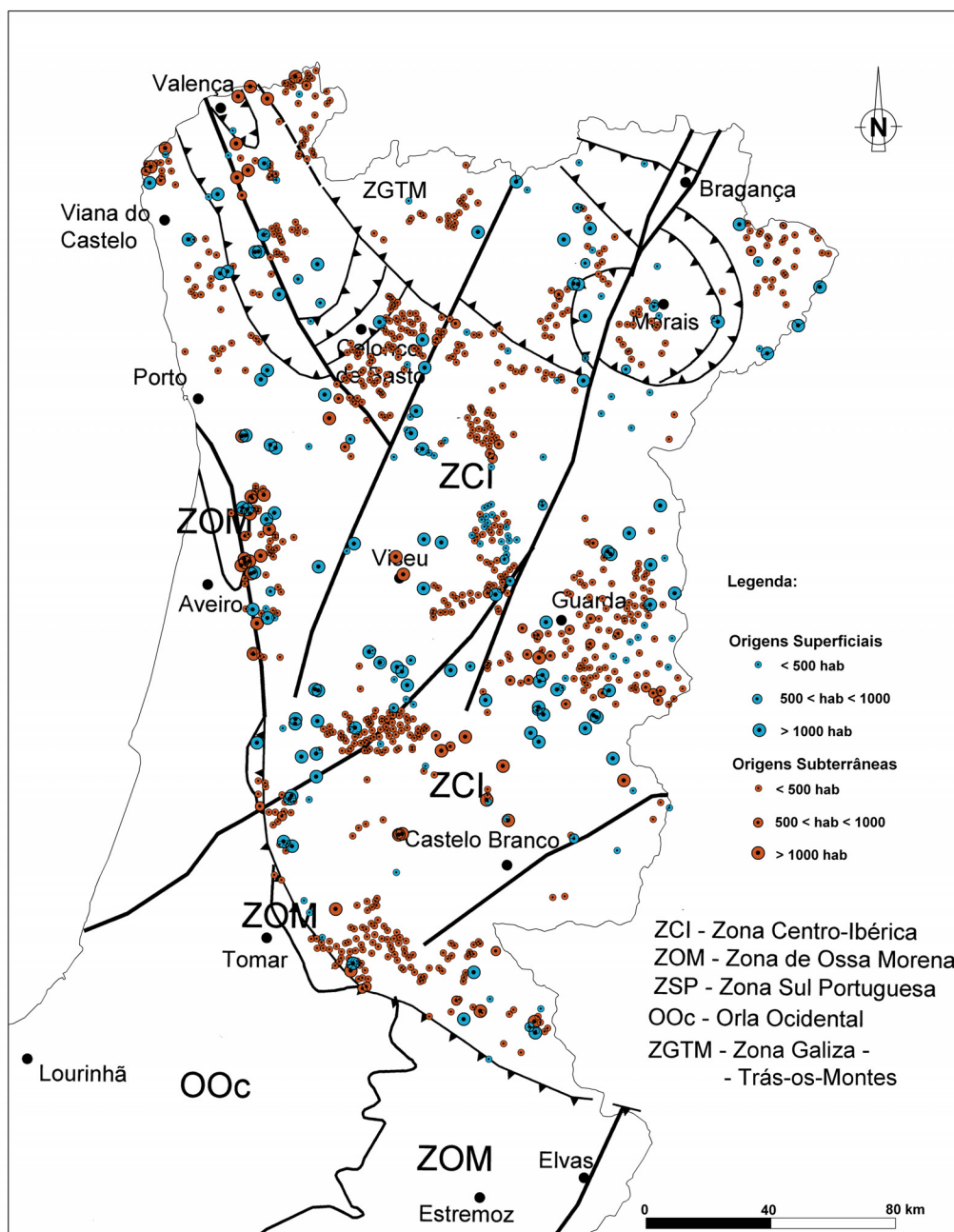


Figura I-1: Localização das captações de água para abastecimento público no Maciço Antigo do Norte de Portugal (adaptado de Travassos 2003).

No que concerne às utilizações para abastecimento público estão em funcionamento em Portugal Continental no Maciço Antigo do Norte de Portugal

(Travassos 2003) 1160 captações predominando o tipo furo vertical (38% da população total) e as captações gravíticas do tipo galeria e arranjo de nascente, conforme se representa nas figuras I-1 e I-2.

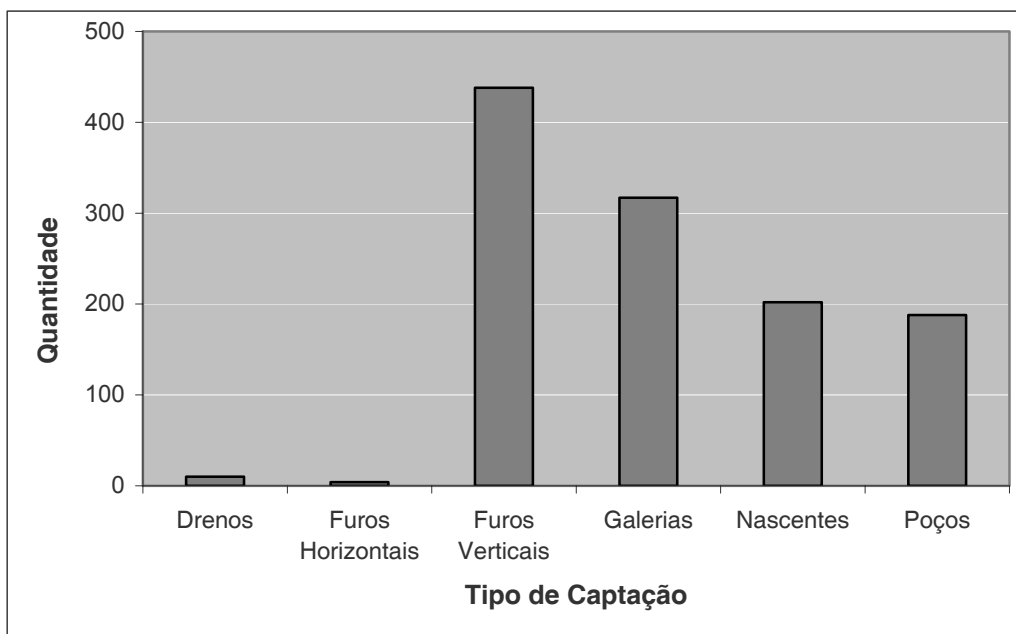


Figura I-2: Distribuição dos tipos de captação de água subterrânea para abastecimento público no Maciço Antigo do Norte de Portugal.

As águas minerais naturais e de nascente engarrafadas têm vindo a crescer de importância, seguindo a tendência do mercado Europeu, desempenhando um papel relevante na nossa economia (Cruz 2002). De igual modo as estâncias termais, actualmente em ciclo de crescimento e modernização, jogam um papel insubstituível na economia das regiões onde estão instaladas, constituindo, em certos casos, a principal fonte produtiva em alguns concelhos do Norte e interior do País (Caldas do Gerês, Termas de Monfortinho, etc).

3. Estrutura da memória

O presente trabalho está organizado em seis capítulos devotados ao problema da prospecção e pesquisa de água subterrânea, águas minerais e recursos geotérmicos de baixa entalpia, com ênfase para os terrenos da Zona Centro-Ibérica. Os trabalhos científicos anteriormente publicados pelo autor, sozinho ou em colaboração, são incorporados no texto e impressos em *papel reciclado*, bem como devidamente assinalados pela sigla [nº artigo]. A numeração das páginas é sequencial, sem adicionar as páginas respeitantes a cada artigo incluso.

O presente capítulo I (**Introdução geral**) constitui uma memória de enquadramento e justificativa da dissertação e pretende enquadrá-la no âmbito da Hidrogeologia contemporânea ao serviço do Homem.

O capítulo II (**Prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em rochas cristalinas**), pretende constituir uma síntese das características hidrogeológicas que condicionam a prospecção e a pesquisa e das técnicas que foram usadas. Alguns conceitos são ilustrados com exemplos concretos da Zona Centro-Ibérica. Neste capítulo são incorporados alguns artigos em que o objectivo básico foi a detecção de estruturas hidrogeológicas produtivas mas em que se evidencia a preocupação em incluir, para suporte da robustez das técnicas de prospecção utilizadas tendo em vista futuras operações, a informação hidrodinâmica — e menos vezes hidroquímica — resultante dos furos de pesquisa posteriormente realizados. Procura mostrar-se que as investigações hidrogeológicas são integradas numa lógica económica apoiada por uma conceptualização correcta de modelos supostos que suportem a circulação da água subterrânea.

O capítulo III (**Cartografia hidrogeológica do Maciço Antigo Português: uma proposta**) corresponde a uma tentativa de sistematização à escala regional de muita da informação hidrogeológica agora trabalhada.

São abordados temas como a avaliação da recarga, recursos e produtividades dos aquíferos e das captações, caracterização hidrodinâmica e três ensaios de cartografia hidrogeológica temática baseados nas unidades litológicas e no Índice Metros Caudal [IMC] (Carvalho 1993, Carvalho et al. 2003, 2004). Neste capítulo são, também, apresentadas formulações experimentais determinadas na Zona

Centro-Ibérica para: (i) a transmissividade em função do caudal específico de furos de pesquisa e eventual captação para vários tempos de bombagem, (ii) a transmissividade mediana local em função do Índice Metros Caudal (IMC), e, (iii) o Coeficiente de Redução de Caudal (CRC), factor que relaciona o caudal de exploração sustentável com o caudal instantâneo obtido durante a perfuração em furos de pesquisa e eventual captação. Duas das cartas temáticas relacionam-se com o custo da água na Zona Centro-Ibérica e na Zona Galiza-Trás-os-Montes, designadamente: (i) da água para abastecimento público na zona Centro-Ibérica, e, (ii) da água para agricultura em Trás-os-Montes. Na elaboração destas cartas foi tido em conta o risco geológico associado à prospecção, a partir do IMC. Uma Carta de Desenvolvimento de Recursos Hídricos Subterrâneos em Trás-os-Montes, concebida para servir de base à localização de futuras pesquisas de água naquela região (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987, 1989) só agora é tornada pública.

O capítulo IV (**Águas minerais e de nascente e recursos geotérmicos**) discute o problema da prospecção e pesquisa de águas minerais e de nascente e de recursos geotérmicos de baixa entalpia à luz do enquadramento institucional em Portugal e na União Europeia e dos condicionalismos técnico-económicos e sociais da envolvente. O peso económico destes recursos geológicos é posto em evidência o que justifica a maior grandeza dos investimentos técnico-financeiros amiúde disponibilizados ao respectivo desenvolvimento. São também apresentados exemplos típicos da prospecção e pesquisa desses recursos e sintetizados os conhecimentos existentes sobre a respectiva caracterização hidrodinâmica. No final é feita uma avaliação do potencial dos recursos geotérmicos da Zona Centro-Ibérica para usos directos e do estado actual do seu aproveitamento.

No capítulo V (**Conclusões e recomendações**) são resumidos os resultados principais das investigações realizadas e sugeridas propostas de intervenção e de investigação para o futuro.

Por fim, o capítulo VI (**Referências**) é constituído pelas referências bibliográficas de todos os trabalhos citados na dissertação.

O quadro I-1 sintetiza a tipologia e distribuição dos artigos, os temas abordados e os resultados reportados no final de cada um.

Este trabalho, não sendo uma obra de hidrogeologia regional clássica, ambiciona: (i) constituir um contributo para a metodologia de prospecção e pesquisa hidrogeológica em rochas cristalinas portuguesas; (ii) estabelecer pontes com a hidrogeologia regional, a engenharia dos recursos hídricos e a hidroeconomia, chamando a atenção para a necessidade de produção de cartas temáticas viradas para o utilizador; e, (iii) constituir um ponto de partida e de reflexão para jovens investigadores em hidrogeologia.

O cidadão informado e os técnicos de espectro diverso, potenciais utilizadores de informação sobre águas subterrâneas, geralmente não entendem as cartas hidrogeológicas clássicas. O técnico “profano”, não-iniciado, necessita de conhecer, sempre que possível em estreita colaboração com especialistas credenciados em desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos, a previsão sobre: (i) a profundidade das obras de pesquisa e captação; (ii) o risco geológico associado à prospecção e pesquisa; (iii) a produtividade dos aquíferos; (iv) os caudais de exploração sustentáveis das obras de captação (*long term-well capacity* da literatura anglo-saxónica); (v) o custo da água; e, (vi) as suas características de defesa contra a contaminação. Este último aspecto está liminarmente fora dos limites definidos para este trabalho.

Seria reconfortante para o autor que a leitura deste escrito pudesse ser útil aos jovens investigadores e técnicos que se interessam pelos problemas de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas e pelo papel das mesmas no Ordenamento do Território. Enfim, porventura a mensagem principal, seria a de que a prospecção e a pesquisa de água subterrânea continuam sendo tarefas fundamentais da técnica e da ciência ao serviço do Homem e da Sociedade.

Quadro I-1: Localização, domínios, litologias, técnicas usadas e resultados apresentados nesta dissertação: uma visão integradora.

Artigos	Localização	Domínio geoestrutural	Litologias	Técnicas usadas	Resultados Finais
Capítulo II - Prospecção e Pesquisa de Águas Subterrâneas em Rochas Cristalinas					
Artigo 1	Arraiolos	ZOM	M/G	PG/IH/GR/FP/EC/PHA	MP/MCA
Artigo 2	Arraiolos/Trofa/Oliveira de Azeméis	ZOM/ZCI	M/G	PG/GR/FP/EC/PH	MP/MCA
Artigo 3	Porto	ZCI	M/G	PG/IH/GR/FP/EC/PHA	MP/MCA
Artigo 4	Oliveira Azeméis	ZOM/ZCI	M/G	PG/IH/GR/FP/EC/PHA	MP/MCA
Artigo 5	Oliveira de Azeméis e Fafe	ZOM/ZCI	M/G	PG/IH/GR/FP/EC/PHA	MP/RD/MCA
Artigo 6	Aguiar da Beira (Cavaca)	ZCI	G	PG/IH/GR/PH	MP/MT/MCA
Capítulo III - Cartografia Hidrogeológica do Maciço Antigo Português: uma Proposta					
Artigo 7	Maciço Antigo	ZCI/ZGTOM/ZOM	M/G	IH/FP/EC/PHA	RD/ IMC/CRC/MCA
Artigo 8	Trás-os-Montes	ZCI/ZGTOM	M/G	FP/EC	RD/MT/CA/IMC/MCA
Artigo 9	Minho, Trás-os-Montes e Beiras	ZCI/ZGTOM	M/G	IH/AR	RD
Artigo 10	Minho, Trás-os-Montes e Beiras	ZCI/ZGTOM	M/G	IH/FP/EC/PHA	MT/RD/MT/CA/IMC/MCA
Artigo 11	Minho, Trás-os-Montes e Beiras	ZCI/ZGTOM	M/G	IH/FP/EC/PHA	MT/RD/MT/CA/IMC/MCA
Artigo 12	Grande Porto	ZCI	G	PG/IH	MCA
Artigo 13	Porto e Serra da Estrela	ZCI	M/G	PG/IH/PHA	MCA
Capítulo IV - Águas Minerais e Recursos Geotérmicos					
Artigo 14	Vilarelho da Raia	ZCI	M/G	PG/IH/GR/FP/EC/PHA	MP/MCA
Artigo 15	Moledo (Douro)	ZCI	M/G	PG/IH/GR	MP/RD/MCA
Artigo 16	Moledo (Douro)	ZCI	M/G	PG/IH/GR	RD/MCA
Artigo 17	Moledo (Douro)	ZCI	M/G	PG/IH	RD/MCA
Artigo 18	S. Pedro do Sul	ZCI	M/G	PG/IH/GR/GO/FP/EC/PHA	MP
Artigo 19	S. Pedro do Sul	ZCI	M/G	PG/IH/GR/GO/FP/EC/PHA	MP
Artigo 20	Monfortinho	ZCI	M/G	PG/IH/FP/EC/PHA	MP/MCA
Artigo 21	Maciço Antigo	ZCI/ZGTOM/ZOM	M/G	IH/FP/EC/PHA	MP/MCA
Artigo 22	Maciço Antigo	ZCI/ZGTOM/ZOM	M/G	IH/FP/EC/PHA	MP/RD/MCA
Artigo 23	Trás-os-Montes	ZCI	M/G	PG/IH/GR/FP/EC/PHA	MP/RD
Artigo 24	Maciço Antigo	ZCI/ZGTOM/ZOM	M/G	PG/IH/GR/GO/FP/EC/PHA	MP/RD
Artigo 25	Maciço Antigo	ZCI/ZGTOM/ZOM	M/G	PG/IH/GR/GO/FP/EC/PHA	MP/RD

ZCI - Zona Centro-Ibérica

ZGTOM - Zona Galiza - Trás-os-Montes

ZOM - Zona de Ossa Morena

G- Granitóides

M- Rochas Metassedimentares

AR - Avaliação da Recarga

EC - Ensaios de Caudal

FP - Furos de pesquisa

GO - Geofísica (outros métodos)

GR - Geofísica (resistividades)

IH - Inventário hidrogeológico

PG - Prospecção geológica

PHA - Parâmetros hidrodinâmicos

CA - Custo da água

CRC - Coeficiente de Redução de Caudal

IMC - Índice Metros Caudal

MCA - Conceptualização de Aquíferos

MP- Metodologias de prospecção

MT - Mapas temáticos

RD - Regionalização de dados

Como já foi referido, a lógica deste trabalho aparece um pouco ao arrepio das tendências ditas “modernas” da hidrogeologia, dominadas pela geoestatística e uma forte componente computacional, muitas das vezes sem uma efectiva ligação ao campo e sem uma base cartográfica a escala adequada; nesses casos, a espacialização e a quantificação dos dados pode tornar-se um mero exercício abstracto do(s) autor(es). Por outras palavras, as ferramentas do domínio da computação, sendo vitais e fundamentais em qualquer estudo hidrogeológico, deverão ser encaradas, apenas, como mais um nível de informação. Aliás, este sentimento numa sociedade de informação tecnológica (e ainda não totalmente de uma verdadeira sociedade do conhecimento científico e tecnológico...) está bem patente nas palavras de um aluno que me dizia: “*Professor, os modelos são o futuro...*”. O que se pretende enfatizar aqui é que não há produto final recheado

de saídas gráficas bonitas e cenários apoiados em modelação, sem antes existirem dados de base representativos numa base cartográfica georreferenciada a escala adequada.

A qualidade em hidrogeologia começará sempre por um bom trabalho de campo e é evidenciada pela organização do livro de campo do hidrogeólogo (Fetter 2001) e pela análise dos relatórios das sondagens e furos, estruturas de eleição para o encontro com os “afloramentos” do recurso, que é visível também em nascentes, poços, rios, lagos e oceanos (Sanders 1998).

A prospecção de água é talvez a tarefa mais difícil, árdua e ingrata do hidrogeólogo. O fulcro desta actividade não é a apresentação de comunicações num qualquer congresso científico e de artigos em revistas científicas de elevado prestígio internacional. É, sim, o mergulho no mundo real. Trata-se de resolver ao vivo, no local e na hora, os problemas, por vezes dramáticos, de pessoas e de comunidades humanas.

Só o manejo assisado de todos os indícios, ferramentas e instrumentos no domínio do conhecimento do território permite alcançar com êxito, e com alguma sorte, o objectivo final. Por outras palavras: só conhecendo o modelo conceptual dos aquíferos e o enquadramento sócio-económico dos utilizadores é possível ter sucesso. E o sucesso em captação de água é fácil de avaliar pois infere-se por factos: ocorreu ou não água na qualidade e quantidade requerida e a custos razoáveis sem impactes ambientais negativos. Banks & Rhor-Torp (1993), com alguma crueza, referem a impossibilidade de, em muitos contextos, os estudos tectónicos, geofísicos, geomorfológicos, ou outros no âmbito da Hidrogeologia, poderem garantir a ocorrência de bons caudais em ambiente de rochas cristalinas.

O autor desta dissertação não ficaria de bem com a sua consciência se não deixasse aqui expresso um comentário sobre a radiestesia e sua prática pelos designados vedores. De facto, durante as actividades que deram origem ao presente trabalho, várias foram as vezes em que se cruzou com praticantes dessa actividade (alguns famosos, muitos gente anónima) e numerosos dos furos que implantou tiveram, sabe-o agora, a “benção” final de alguém da “arte”. Concomitantemente o seu primeiro trabalho de pesquisa científica (Carvalho

1965) foi realizado na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto na disciplina de Antropologia, sob a orientação do Prof. Doutor J. Santos Júnior, sobre o tema da “prospecção popular da água subterrânea”.

No decorrer dos trabalhos aqui reportados, e noutros, foi possível assistir com perplexidade a actividades radiestésicas inusitadas, grandes incongruências hidrogeológicas, sucessos factuais, e também insucessos em que intervieram vedores nos seus próprios terrenos. Uma constatação é certa: quando não são impostos patamares qualitativos e quantitativos aos caudais a captar a probabilidade de sucesso dos vedores aumenta. Na maioria dos ambientes hidrogeológicos, mesmo os mais hostis, sempre se encontra alguma água subterrânea. Este facto, e os “poderes ocultos” de que supostamente gozam os radiestesistas, potenciam o enorme prestígio (e a aura de sucesso) de que gozam entre os utilizadores a níveis técnicos e culturais dos mais insuspeitos.

Por outro lado, passada a verdura dos primeiros anos, houve também ocasião de ter consciência, ao longo da prática profissional, de como são ainda pouco robustas as técnicas de prospecção para a detecção de estruturas hidrogeológicas circuladas com água em rochas compactas e fissuradas, com ou sem carsificação (Banks *et al.* 1993). Essa circunstância é particularmente penosa para o hidrogeólogo, pressionado pelos prazos e pelos custos, na prática corrente: a informação hidrogeológica é reduzida, a litologia não está à vista ou não exhibe alternâncias ou heterogeneidades, a fotografia aérea não aporta qualquer informação, a geomorfologia nada sugere e o orçamento disponível não comporta a realização de prospecção geofísica.

A opção por um ou outro local de perfuração é então baseada em critérios pouco mais que logísticos: um piscar de olhos à geobotânica (War Department 1944, Brooks 1983), a proximidade a linhas de água superficial, aos pontos de consumo, à rede eléctrica, às redes de adução ou aos reservatórios de distribuição. Na prática estamos perante a realização de “furos estatísticos” em que se perfura sem objectivos geológicos definidos, simplesmente para descobrir e controlar o que aparecer! Como será mostrado nos capítulos II e III, os custos de perfuração estão actualmente a níveis tão baixos que faz sentido realizar intervenções controladas deste tipo tendo em conta o alto nível da informação

conseguida. A coabitação com o omnipresente vedor é quase sempre inevitável nestes casos.

As investigações sobre a prática da radiestesia do *United States Geological Survey* (USGS), do início do século XX, nos Estados Unidos da América, culminaram no artigo de Ellis (1917), que enunciava claramente que “*a radiestesia não tinha base científica e que investigações complementares em torno deste tema seriam um desperdício do dinheiro público*”. Por outro lado, são famosos os trabalhos do Prof. Yves Rocard, um dos pais do programa nuclear francês (Rocard 1962, 1981, 1983) defendendo supostas interações biomagnéticas para justificar as capacidades dos radiestesistas. A bibliografia sobre o tema é infindável.

O último programa conhecido para investigação da eficácia da radiestesia, no valor de US\$ 250.000 (Wagner *et al.* 1990, Enright 2004) foi empreendido a partir de 1986 num local experimental escolhido pela Universidade de Munique. Após vários anos de investigações por físicos da Universidade e mais de 500 operadores, os resultados obtidos foram interpretados de forma diversa pela comunidade científica (Betz 1997, Betz *et al.* 1996, Enright 1995, 1996) podendo afirmar-se, pesando as razões aduzidas, que a experiência não foi conclusiva, isto é, que há dúvidas residuais sobre a validade empírica dos resultados. Os poderosos métodos estatísticos usados sobre um fundo experimental insuspeito não terão validado claramente a aptidão dos radiestesistas, mas também não a desmentem, pelo menos em relação aos mais “sensíveis”.

À luz dos actuais conceitos da ciência hidrogeológica, a busca de água pela radiestesia cai nos domínios esconsos da percepção extra-sensorial e mais não se pode fazer do que olhar com humildade expectante para os resultados da aplicação destas técnicas, sempre de raiz popular ou então alicerçadas em teorias muito “nebulosas” do ponto de vista do método científico. Atender-se-á, contudo, que autores como Damásio (2003) reconhecem a participação essencial do corpo e das emoções nos processos do raciocínio e do conhecimento e que este é subjectivo e resulta da actividade dos organismos na luta pela sobrevivência e por uma vida melhor.

Ao radiestesista, que supostamente acerta (quase) sempre, o hidrogeólogo deve opor o perfil de gestor do risco geológico. Esta postura nem sempre é a mais fácil de pôr em prática mas é assertiva e a única que as actuais ferramentas científicas e tecnológicas permitem assumir. Definitivamente, o hidrogeólogo prospector tem de saber gerir a incerteza e a complexidade sabendo fazer uso das suas capacidades físicas e intelectuais e também de inteligência emocional, na prática técnico-científica e nas relações interpessoais. Essa atitude pressupõe rigor, humildade, honestidade intelectual, capacidade de síntese e de contextualização, elevada exigência moral e de ética profissional, e uma correcta gestão das expectativas dos que recorrem aos seus serviços.

O conhecimento pertinente deve ser capaz de situar toda a informação no seu contexto e, se possível, no conjunto em que se inscreve, e a progressão do conhecimento dá-se, fundamentalmente, pela capacidade de contextualizar e globalizar (Morin 2002). Como a “*A experiência é a madre de todas as cousas*” dizia Duarte Pacheco Pereira (1505-1508), no seu *Esmeraldo de Situ Orbis* (in Almeida 1998) e “*a sabedoria é filha da experiência*” (Leonardo Da Vinci in Maccurdy 1955), entende-se que para bem resolver as questões para que é solicitado, todo o especialista em águas subterrâneas deve ser capaz de molhar os pés na água dos aquíferos que estuda...

4. Listagem dos artigos científicos incorporados nesta dissertação

Capítulo II - Prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em rochas cristalinas

- [1] Contribuição para a prospecção e pesquisa hidrogeológica no Maciço Hespérico Português. *Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa*, 1979, Vol. 16, pp. 305-326.
- [2] A Metodologia de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofílicas portuguesas. *Volume d'Homage au Géologue G. Zbyzewsky, Éditions Recherche sur les Civilisations*, Paris 1984. pp. 137-153.
- [3] Captação de água em formações graníticas da área do Porto. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, Lisboa, 1985, Vol 24, pp. 305-312.
- [4] O ramo oeste do carreamento de S. João-de-Ver: estudos de cartografia estrutural e de hidrogeologia no sector de Santiago de Riba-Ul–Oliveira de Azeméis (faixa metamórfica de Espinho–Albergaria-a-Velha, NW de Portugal). *Geólogos, Revista Departamento de Geologia da Universidade do Porto*, 1999, Vol. 5, pp. 57-65.
- [5] O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Revista Universidade de Aveiro*, 2004, Vol. 16.
- [6] Prospecção hidrogeológica da área do sistema hidromineral das Caldas da Cavaca (Aguiar da Beira, Portugal Central): implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Proceedings del I Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios*, Madrid, 13 pp. (in press)

Capítulo III - Cartografia hidrogeológica do Maciço Antigo Português: uma proposta.

- [7] Caracterização hidrodinâmica de algumas áreas do maciço antigo português. *7º Congresso da Água, APRH*, Lisboa, 2004, edição em Cd-Rom.
- [8] Groundwater exploration in hard rocks for small scale irrigation in Trás-os-Montes, Portugal. In: *Hydrogeology of Hard Rocks*, IAH, Oslo, 1993, Vol. 24 (Part 2), pp. 1021-1030.
- [9] Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: *Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica. Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid, 2000, pp. 163-172.
- [10] Productivity and water cost in fissured-aquifers from the Iberian crystalline basement (Portugal): hydrogeological constraints. In: *Water, mining and environment Book Homage to Professor Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid, 2005, pp. 193-207.
- [11] Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional. In: *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: recursos geológicos e formação. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva. Série Investigação Imprensa da Universidade*, Coimbra, 2003, Vol. 2, pp. 245-264.

- [12] Urban groundwater resources: a case study of Porto City in north-west Portugal. *International Association of Hydrogeologists Special Volume*, Balkema publishing, 2005 (in press)
- [13] Hydrogeology of hard-rocks in the Portuguese Iberian Massif: Porto urban area and Serra da Estrela mountain region. *Proceedings The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources - Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, Univ. Minho, Guimarães, LNEC-IAHS, 12 pp. (Cd-Rom edition).2005.

Capítulo IV - Águas minerais e de nascente e recursos geotérmicos

- [14] Vilarelho da Raia: um exemplo de prospecção e captação de água mineral gaso-carbónica no Maciço Hespérico. In: IV Congresso Nacional de Geologia, Porto. *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Univ. Porto, 1995, Vol. 4, pp. 439-444.
- [15] Tectónica regional do sector de Caldas do Moledo-Granjão-Cidadelhe (Falha de Penacova-Régua-Verín, Norte de Portugal): implicações no controlo das emergências hidrominerais. *Comunicações Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 2001, Vol. 88, pp. 203-212.
- [16] The newly described 'Poço Quente' thermal spring (Granjão-Caldas do Moledo sector, N Portugal): hydrogeological and tectonic implications. *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 2001, Vol. 15 (1/2), pp. 49-64.
- [17] Geothermal fluids circulation at Caldas do Moledo area, Northern Portugal: geochemical and isotopic signatures. *Geofluids*, 2003, Vol. 3 (3), pp. 189-201.
- [18] Geothermal resources exploration in the hercynian basement, S. Pedro do Sul, Portugal. In: Geothermics'94 in Europe. *Document BRGM*, Orleans, 1994, Vol. 20, pp. 85-88.
- [19] O campo geotérmico de S. Pedro do Sul: situação actual e perspectivas. *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Univ. Porto, 1995, Vol. 4, pp. 857-862.
- [20] A Hidrogeologia das águas minerais naturais de Monfortinho. *Geonovas, Rev. Assoc. Portg. Geólogos*, Lisboa, 2001, Vol. 15, pp. 61-70.
- [21] Mineral water exploration and exploitation at the portuguese Hercynian Massif. *Environmental Geology*, 1996, Vol. 27, pp. 252-258.
- [22] Mineral and thermal water resources development in the portuguese Hercynian Massif. In: *Hydrogeology of Hard Rocks*, IAH, Oslo, 1993, Vol. 24 (Part 2), pp. 548-561.
- [23] Pólos geotérmicos de Trás-os-Montes: recursos e metodologias de desenvolvimento. *Anais da UTAD*, Vila Real, 1988, Vol. 2, pp 23-45.
- [24] Low temperature geothermal reservoirs in the Portuguese Hercynian Massif. *World Geothermal Congress*, Florence, 1995, Vol. 2, pp. 1343-1348.
- [25] Recursos geotérmicos de Portugal continental: da utopia à realidade. In: *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Univ. Porto, 1995, Vol. 4, pp 851-856.
- [26] Portugal country geothermal update. World Geothermal Congress. Antalya, Turkey, 2005, (Cd-Rom Edition).

CAPÍTULO II

**PROSPECÇÃO E PESQUISA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM ROCHAS CRISTALINAS**

*Moisés levantou a mão
e feriu o rochedo com a sua vara duas vezes;
as águas jorraram em abundância,
de sorte que bebeu o povo e os animais.*

NÚMEROS 20: 11

1. Considerações iniciais

Este capítulo pretende sintetizar os factores hidrológicos, geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos que condicionam as actividades da prospecção e pesquisa no Maciço Antigo Português dos terrenos incluídos na Zona Centro-Ibérica, na Zona Galiza-Trás-os-Montes e, em parte, na Zona de Ossa-Morena, e os seus resultados, bem como as metodologias e técnicas utilizadas.

Em rigor, só as metodologias e técnicas de prospecção que forem validadas com sondagens mecânicas e/ou furos que permitam confirmar as características litológicas, hidrodinâmicas e hidroquímicas inferidas poderão ser consideradas adequadas. Por isso, são incorporados os artigos [1], Carvalho 1979, [2], Carvalho 1984, [3], Machado Lima *et al* 1985, [4], Chaminé *et al* 1999, [5] Carvalho & Chaminé, 2004 e [6], Carvalho *et al* 2005, nos quais o objectivo básico foi a apresentação de casos de detecção de estruturas hidrogeológicas produtivas onde foi patente a preocupação em inserir informação hidrodinâmica — e, por vezes, hidroquímica — para calibração dos resultados e avaliação da robustez das metodologias e técnicas de prospecção utilizadas. Na figura II-1 apresenta-se a localização espacial dos artigos atrás referidos.

2. Prospecção, pesquisa e captação no Maciço Antigo

2.1. Os conceitos

Existe, geralmente, alguma confusão em relação aos termos prospecção, pesquisa e captação de águas subterrâneas, havendo mesmo algum desfasamento entre a terminologia usada em Portugal e no Brasil e porventura noutros Países de Língua Oficial Portuguesa (PALOP). Assim, em língua portuguesa, prospecção pode ser considerado sinónimo de pesquisa. É esse o entendimento no Brasil. Leinz & Mendes (1963) assumem o termo prospecção equivalente aos ingleses *prospecting* e *prospection*; enquanto que Feitosa & Manuel Filho (2000) ignorando o termo prospecção, definem pesquisa como “o conjunto de operações ou estudos que permitem a localização e a caracterização de aquíferos dos quais se pode obter água em quantidade e qualidade adequadas ao fim pretendido”. Estes últimos autores consideram, ainda, como equivalentes de pesquisa os termos investigação e exploração.

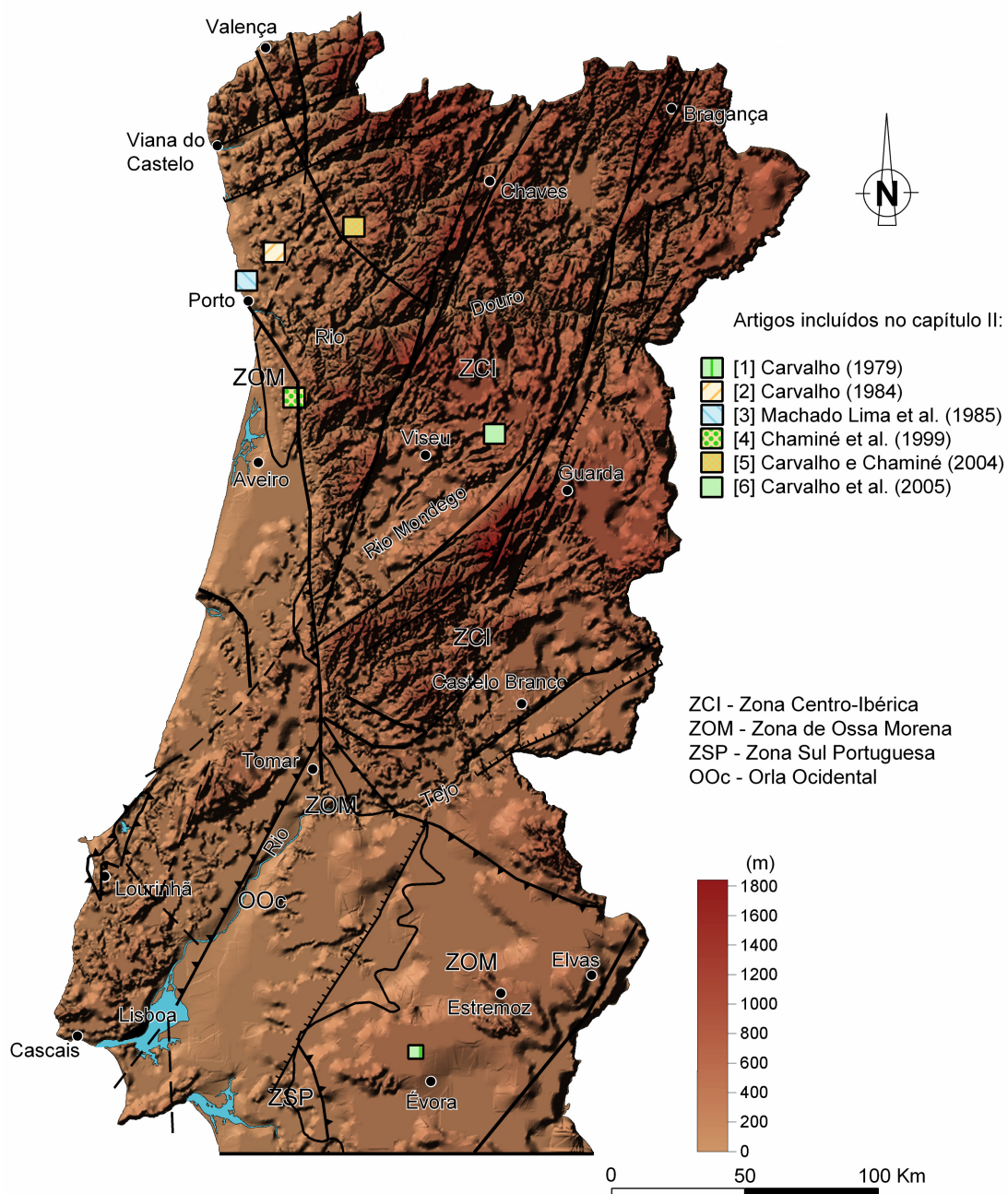


Figura II-1: Localização dos artigos apresentados no capítulo II.

Entre nós, Almeida *et al.* (2000) não incluem os termos prospecção e pesquisa no “Glossário de Termos Hidrogeológicos” disponível no Instituto da Água (INAG). Por outro lado, o “Léxico de Termos Hidrogeológicos” do INETI (ex-Instituto Geológico e Mineiro, IGM; consultado em 17.08.2004 em http://www.igm.ineti.pt/e-Geo/BDs/lexico_hidro/bibliografia.htm) considera prospecção igual a pesquisa.

Em castelhano, francês e inglês existem dois termos para as operações que antecedem a captação e outro para esta última operação. Assim, *prospección y exploración* (castelhano), *prospection et exploration* (francês) e *prospecting (prospection) and exploration* (inglês) opõem-se respectivamente a *captación (explotación)*, *captage (exploitation)* e *exploitation* (cf. Castany 1968, Ferreiro & Bartolomé 1996, Custódio & Llamas 1983, Langgut 1984, Driscoll 1986, Brassington 1988). Porém, Larsson (1984), Hamill & Bell (1986) e Lloyd (1999) adoptaram para as rochas duras (“hard-rocks”) terminologias menos comuns, dividindo as tarefas de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos em três categorias: *Investigation*, *Exploration* e *Construction*.

Em Portugal os dicionários (e.g., Academia das Ciências de Lisboa 2001 e Lello Universal 1980) tendem a privilegiar o termo prospecção aplicado às actividades ligadas à mineração e à descoberta da água subterrânea. Prospecção e pesquisa são consideradas sinónimas.

No entanto, o Dec-Lei 90/90 de 16 de Março (DGGM 1990) que se destina a disciplinar o regime jurídico de revelação e aproveitamento de recursos geológicos (depósitos minerais, recursos hidrominerais, recursos geotérmicos e massas minerais e águas de nascente) estabelece no Capítulo II, Artigo 9º, nº1 o articulado seguinte: (...) “*Quanto aos recursos que se integram no Domínio Público podem ser constituídos os seguintes direitos:*

a) *De prospecção e pesquisa, permitindo a prática de operações visando a descoberta dos recursos e a determinação das suas características, até à revelação da existência de valor económico:*

b) *De exploração, permitindo o exercício da actividade posterior à prospecção e pesquisa, ou seja, o aproveitamento económico dos recursos.”*

Cruz (2002) considera ainda, referindo-se aos atrás mencionados recursos geológicos, uma fase que designa por reconhecimento que seria “*o conjunto de actividades a desenvolver antes de se avançar para os trabalhos de prospecção e pesquisa*”, isto é, toda a prospecção que não incluísse meios mecânicos.

DGSB (1952) no Caderno de Encargos-tipo para a realização de empreitadas de pesquisa e captação de água, que teve aceitação universal em Portugal até meados dos anos 70, do Século XX, designava as obras a realizar

por sondagens de pesquisa e captação de água. No texto era usada, indiscriminadamente, a expressão furo, enquanto que Paradela (1959, 1960, 1962) associava claramente a geofísica à prospecção e os “furos de sonda” à pesquisa.

Hoje, na hidrogeologia portuguesa, é omnipresente a designação “furo” (e na linguagem corrente a expressão incorrecta “furo artesiano”) para designar qualquer sondagem ou perfuração tubular realizada no solo com meios mecânicos para a extracção de água. A designação “sondagem” caiu em desuso mas faz sentido a sua utilização quando se tratar de uma obra cujo objectivo seja primordialmente a prospecção e a pesquisa, como é o caso frequente, das águas minerais e dos recursos geotérmicos.

A designação “poço” é reservada para estruturas captantes de grande diâmetro e pequena profundidade, escavadas com meios mecânicos ou não, sendo ainda usada residualmente para designar as captações por furos de grande diâmetro e capacidade, como por exemplo os das captações da EPAL no Baixo Vale do Tejo (Mendonça *et al.* 1982). Neste último caso temos uma forma de distinguir furo de captação de furo de pesquisa, ou de prospecção.

O desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos no sentido de Hamill & Bell (1986) e de Fetter (2001) compreende:

(i) a prospecção, que integra, sobretudo, estudos e reconhecimentos de superfície, mas pode incluir sondagens no caso dos objectivos estarem mal definidos à superfície, ou se localizarem a grande profundidade;

(ii) a pesquisa, destinada a caracterizar o recurso, o que pressupõe a realização de sondagens e ensaios para avaliação das productividades e da qualidade da água;

(iii) a captação, que inclui a construção da obra (generalizadamente furos, hoje em dia) para a extracção dos caudais pretendidos, compatíveis com as disponibilidades estimadas na fase de pesquisa;

(iv) A exploração incluindo a extracção, a monitorização, a protecção e a gestão.

Esta hierarquização de tarefas faz todo o sentido e tem sido usada em campanhas de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos para grandes abastecimentos públicos como os da EPAL para Lisboa (Mendonça *et al.* 1982), na construção de poços colectores de grande caudal para o abastecimento de cidades como Porto, Vila do Conde, Barcelos e Coimbra (Mendonça 1985) e para o abastecimento de grandes indústrias. É praticada, habitualmente, em programas de prospecção e pesquisa de águas minerais naturais e recursos geotérmicos.

No caso das águas comuns do Maciço Antigo, a que correspondem aquíferos descontínuos de baixos caudais, o valor acrescentado da água e a magnitude dos riscos envolvidos nas operações de revelação e captação tem levado à adopção de metodologias aligeiradas em que a uma fase de prospecção se segue a realização dos designados furos de pesquisa e eventual captação. Embora os imperativos económicos dos projectos tenham rotinado esta prática, há que dizer que se trata de opção de que resultam frequentemente más pesquisas e más captações. Esta circunstância resulta das dificuldades em otimizar — no mesmo projecto de perfuração e captação — os objectivos, por vezes antagónicos, de uma e outra fase.

Neste trabalho, conforme já foi justificado no capítulo I, não são discutidos os problemas específicos da tecnologia de captação de água subterrânea. Pormenores sobre o tema podem ser consultados, por exemplo, em Driscoll (1986), Harlan *et al.* (1989), Lauga (1990), Plote (1986), Rowles (1991), Clark (1988) e Carvalho (1973, 1991).

Em suma, entende-se aqui por prospecção e pesquisa a prática de operações visando a descoberta dos recursos e a determinação das suas características, até à revelação da existência de valor económico-social; a exploração seria o exercício da actividade posterior à prospecção e pesquisa, ou seja, o aproveitamento económico dos recursos. Em Hidrogeologia o termo captação é mais usado que o de exploração mas é de carácter mais restritivo que este último pois engloba, geralmente, apenas as estruturas físicas de extracção da água.

A prospecção hidrogeológica reúne, em geral, meios indirectos, tais como: reconhecimentos geológicos e geomorfológicos prévios de terreno, cartografia geológica, fotogeológica e hidrogeológica, inventário hidrogeológico, rastreios hidroquímicos e levantamentos geofísicos. A pesquisa engloba a realização de trabalhos de sondagem com meios mecânicos (actualmente estes métodos são quase exclusivos estando em desuso a pesquisa com escavações manuais ou mesmo mecânicas) que permitam a realização de ensaios de caracterização hidrodinâmica e hidroquímica dos aquíferos ou zonas aquíferas. A exploração engloba a construção de estruturas captantes, geralmente furos verticais, inclinados ou horizontais, a monitorização da extracção — em termos físico-químicos, microbiológicos e hidrodinâmicos — a gestão e a protecção.

2.2. O abastecimento público da vila de Arraiolos: um exemplo

Foi decidido incorporar e revisitar aqui o artigo [1], Carvalho (1979), realizado na Zona de Ossa-Morena (Complexo Eruptivo de Évora; Gonçalves 1971, Soares de Andrade 1983, Gonçalves & Carvalhosa 1994) pois é um exemplo típico da forma como era visto em Portugal o problema da prospecção, pesquisa e captação em rochas cristalinas no início dos anos 70 do século XX e a esse respeito poderá ser considerado um exemplo paradigmático.

O trabalho em questão foi realizado para o reforço do abastecimento público da vila de Arraiolos e destinava-se exclusivamente à prospecção e pesquisa, pois a captação seria posteriormente conseguida por poços de grande diâmetro com furos radiais. Essa solução de captação retomava a tradicional e excelente solução tradicional de poço com galeria escavada. A ideia, então, era a de instalar os drenos a profundidades da ordem de 30 ou 40 m, técnica tornada possível pela disponibilização em Portugal de equipamentos de martelo de fundo de furo que podiam operar horizontalmente no interior de poços. Estes poços eram escavados a pá e pica e martelo picador com diâmetros da ordem dos 4 m. Tal solução apoiava-se no entendimento que então existia (Moitinho de Almeida 1970) de que a circulação mais importante nos maciços ígneos e rochas metassedimentares Portugueses se fazia apenas na zona alterada do maciço, a profundidades não ultrapassando algumas dezenas de metros. Foi o que aconteceu em Arraiolos

onde, após a realização dos trabalhos de prospecção e pesquisa que se reportam no artigo [1], Carvalho (1979), foi construído um desses poços que ainda hoje está integrado no sistema de abastecimento público ao concelho.

Nalguns casos, a solução poço com drenos horizontais gerou falsas expectativas pois o dimensionamento das obras e as capacidades de extracção instaladas eram geralmente sobredimensionados em relação às condições de alimentação natural dos reservatórios geológicos em que se inseriam.

O referido artigo [1], Carvalho (1979), constitui, assim, um exemplo de aplicação bem sucedido e didáctico com uma falha geológica fotointerpretada a ser confirmada por informação hidrogeológica de vários tipos e prospecção geofísica (método da resistividade eléctrica).

Neste estudo geoelectrico para prospecção de águas subterrâneas em rochas cristalinas, que terá sido o primeiro no então Portugal Metropolitano após as campanhas reportadas por Paradela (1962), foi procurada a detecção de zonas de fractura a partir da aproximação clássica a anomalias de baixa resistividade eléctrica (Nunes de Sousa 1966, Astier 1971, Skinner & Heinson 2004, entre outros). Contudo a interpretação hidrogeológica do papel da falha então localizada só foi realizada *a posteriori* pois pesou no momento da decisão de implantação dos furos de pesquisa a visão redutora da falha unicamente estrutura condutora de água subterrânea. Verificou-se, ainda, que o método geoelectrico registou bem as variações litológicas, o que é de importância decisiva para o mapeamento hidrogeológico de zonas de forte heterogeneidade do reservatório geológico. O quadro II-1 resume os resultados obtidos.

Quadro II-1. Resumo comparativo dos resultados da prospecção e pesquisa em Arraiolos reportados no artigo [1], Carvalho (1979).

Parâmetro identificador	AC1	AC2	AC3	AC4
Localização em relação à anomalia de baixa resistividade	No bordo e a montante em relação ao fluxo subterrâneo	No núcleo da anomalia	No núcleo da anomalia	No núcleo da anomalia
Resistividade eléctrica para AB=150 m (ohm-m)	290	200	40	100
Profundidade (m)	50	50	50	50
Caudal de ensaio (l/s)	2,5	1,7	1,7	1,3
Caudal específico para 12 horas (l/s/m)	0,20	0,07	0,07	0,06
Transmissividade (m ² /dia)	6,0	1,7	1,7	1,7

Nas imediações de Arraiolos foi inventariada uma população de 13 furos de pesquisa executados na mesma época e na mesma unidade geológica, sem controlo geofísico mas com reconhecimento geológico e critérios logísticos. Esse conjunto foi analisado, do ponto de vista hidrodinâmico, considerando as relações obtidas por Carvalho *et al.* (2004) (ver capítulo III, artigos [7] e [10] tendo-se chegado aos valores seguintes:

- (i) Índice Metros Caudal_{bruto} (GIMC): $0.43 \text{ m/m}^3\text{dia}^{-1}$ (cerca de 37 m/ls^{-1})
- (ii) Transmissividade deduzida do GIMC ($1/\text{GIMC}$): cerca de $2,3 \text{ m}^2/\text{dia}$

A transmissividade obtida pela equação de Theis (1935) e pela aproximação de Cooper-Jacob (1946) nos furos AC2, AC3 e AC4 foi de $1,7 \text{ m}^2/\text{dia}$, conforme se mostra no quadro II-1. Estes resultados, para além de contribuírem para a validação da utilização do Índice Metros-Caudal_{bruto} (GIMC), sugerem que as transmissividades (e os futuros caudais de exploração) dos furos realizados no núcleo da falha não diferem significativamente dos implantados apenas com critérios logísticos. O furo mais produtivo, situado na posição mais promissora em termos de modelo hidrogeológico conceptual — distinto da opção simplista de considerar a falha o meio mais transmissivo — tem uma transmissividade tripla da mediana da área.

Bredehoeft (2005) refere que 20 a 30% dos modelos conceptuais hidrogeológicos utilizados são inadequados e de que há uma forte incerteza, frequentemente subestimada, associada à actividade da conceptualização. O exemplo acima discutido, mostra como podem ser falaciosas certas aproximações conceptuais insuficientemente apoiadas em trabalho de campo, designadamente em relação ao papel das falhas.

3. As metodologias de prospecção e pesquisa

3.1. Generalidades

Não é fácil enumerar as metodologias e as técnicas que podem ser postas ao dispor de campanhas de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em rochas cristalinas pois os progressos tecnológicos, particularmente no domínio da detecção remota, da prospecção geofísica e das técnicas de processamento têm sido enormes. Portanto, não se trata aqui de fazer o estado da arte sobre este tema, mas de apresentar ideias gerais sobre as metodologias aplicadas, conclusões sobre a respectiva eficácia e reflexões úteis para o lançamento de operações semelhantes.

Em primeiro lugar há que referir que a prospecção e pesquisa de águas subterrâneas repousa sobre dois princípios que o responsável pela operação deve ter sempre em mente: (i) a dialéctica oferta–procura, e, (ii) a necessidade da conceptualização sistemática do modelo hidrogeológico ocorrente, cuja robustez evoluirá em função do avanço do projecto.

A dialéctica oferta–procura condiciona o nível de esforço técnico-científico a disponibilizar e leva a que numa óptica de custo–benefício se adaptem as actividades a desenvolver e respectiva expressão espacial e temporal à magnitude e urgência do problema que se quer resolver. As necessidades qualitativas e quantitativas têm de ser bem equacionadas: onde, para que utilização, que caudais são necessários e qual a duração temporal da procura.

Por isso qualquer trabalho de investigação hidrogeológica (Brassington 1998), começa sempre por um estudo de gabinete (estudo prévio) em que: (i) devem ser inventariados e analisados todos os dados de natureza topográfica,

hidrológica, geológica, geomorfológica e hidrogeológica que se revelem de interesse para o problema em apreço, e, (ii) se caracteriza adequadamente a tipologia da procura.

Os principais elementos de trabalho a analisar a nível da geologia, à escala regional e local, surgem normalmente da recolha de documentação vária e de um aturado conhecimento de terreno, em particular para o território português, a saber:

i) Análise documental de mapas geológico-estruturais e geomorfológicos, a escalas várias, do Maciço Ibérico (*e.g.*, Ribeiro *et al.* 1972, Brum Ferreira 1981, Cabral & Ribeiro 1988, Pereira *et al.* 1989, Oliveira *et al.* 1992);

ii) Interpretação fotogeológica de megaestruturas com base em imagens de satélite de Portugal Continental (*e.g.*, Conde & Santarém Andrade 1976, Conde 1983, Santarém Andrade 1983);

iii) Análise morfoestrutural baseada nos levantamentos topográficos e na fotografia aérea, escalas aproximadas 1/25.000 e 1/10.000, do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE);

iv) Execução de um levantamento geológico de pormenor, a escala conveniente (*e.g.*, 1/500 a 1/5.000), para se obter adequado controlo de terreno. Para o efeito devem definir-se com o máximo rigor, por exemplo, as estruturas filonianas, as falhas e os contactos geológicos. Sempre que possível convém estruturar a informação cartográfica com base em critérios geológicos clássicos onde se ilustra a litologia e a estrutura regional, e em critérios geológicos aplicados conforme recomendado, por exemplo, pela ISRM (1978, 1981), CFCFF (1996), Brassington (1998) e Fetter (2001).

Assim, numa primeira fase recorre-se à caracterização do local através de critérios topográficos e morfoestruturais (escarpas ou taludes, blocos basculados ou elevados, vales rectilíneos, padrão da rede hidrográfica adaptada, etc.) e, numa segunda fase, faz-se a sua caracterização através de critérios geológicos e tectónicos (contactos tectonizados, faixas de alteração, zonas de cisalhamento, texturas orientadas, caixas de falha e espelhos de falha, etc.). Esta abordagem

tem como objectivo central a elaboração, caso não exista, de um mapa geológico-estrutural sintético da região em estudo e, por fim, culminará com a execução de um mapa hidrogeológico local reflectindo, necessariamente, um modelo conceptual assumido.

Definido um modelo geológico e tectónico para uma dada região, o passo seguinte consiste no reconhecimento e posicionamento das estruturas hidrogeológicas que se suspeita condicionarem a circulação hídrica subterrânea. Reside aqui, aliás, a grande diferença, em termos de metodologia utilizada, entre a prospecção de rochas compactas fissuradas e de rochas com permeabilidade de interstícios. Na última, em geral, as estruturas condicionantes apresentam desenvolvimento espacial considerável, não sendo grande problema a sua detecção. Por outro lado, nas rochas compactas fissuradas, a zona de influência de estruturas hidrogeológicas favoráveis exhibe, normalmente, dimensão muito reduzida, da ordem da dezena de metros ou menos, embora ocasionalmente possam atingir extensões de grandeza quilométrica. É este particular comportamento espacial das estruturas hidrogeológicas em rochas cristalinas que obriga a que tanta ênfase seja dada à sua detecção.

De facto, definida ou inferida a existência de uma determinada estrutura hidrogeológica, é muitas vezes recomendável o recurso a meios de prospecção geofísica (especialmente métodos geoelectricos, electromagnéticos e sísmicos) que permitam: i) localizar com um máximo de precisão a estrutura procurada e definir a sua geometria em profundidade; ii) antecipar o comportamento hidrogeológico da estrutura e rochas encaixantes, iii) detectar, eventualmente, outras estruturas hidrogeológicas.

O necessário estudo integrador da informação hidrogeológica, geomorfológica, geotectónica e geofísica permitirá, então, decidir da realização, ou não, de trabalhos adicionais de pesquisa directa com sondagens. A profundidade de investigação a que devem ser referidas a prospecção directa (sondagens mecânicas) e indirecta (geofísica) é um ponto relevante, até pelas implicações económicas que acarreta.

Em síntese, as singularidades geológicas ocorrentes em meios relativamente homogéneos determinarão condições para a circulação e armazenamento de

águas subterrâneas. Desta forma, em estudos de índole aplicada deve ser tentada a avaliação, qualitativa e quantitativa, do potencial das diversas estruturas hidrogeológicas dentro das premissas seguintes:

i) **Falhas ou fracturas:** são, porventura, as estruturas mais citadas na bibliografia sobre a prospecção hidrogeológica em rochas cristalinas. Nem sempre a sua detecção corresponde à solução do problema a resolver. Muitas vezes até, em oposição à ideia feita de que o núcleo de uma falha (materializado por anomalia de baixa resistividade) é o local de maior potencial hidrogeológico de uma dada área, verifica-se, em muitas situações, exactamente o contrário. Os mecanismos de alterabilidade ditam, muitas vezes, a formação de uma caixa de falha argilosa que poderá funcionar como uma barreira à circulação subterrânea. O controlo tectónico sobrepõe-se, muitas vezes, claramente a todos os outros parâmetros (topografia, contactos litológicos, filões). Um outro importante aspecto a discriminar refere-se à análise cartográfica do padrão da fracturação, especialmente no estudo de áreas em que são evidentes nós tectónicos regionais susceptíveis de constituírem pólos de prospecção e pesquisa (*e.g.*, Portugal Ferreira *et al.* 1984, Carvalho *et al.* 1995, Dias *et al.* 2000, Espinha Marques *et al.* 2001);

ii) **Filões:** ligadas estreitamente à tectónica, as estruturas filonianas, apresentam-se, geralmente, extremamente favoráveis. De destacar, sobretudo, o papel produtivo desempenhado pelos filões de quartzo ou filões aplíticos (*e.g.*, P. Martins Carvalho 1969, M. R. Pereira 1992, 1999). Há excepções como se mostrará nesta dissertação;

iii) **Contactos geológicos:** são estruturas hidrogeológicas, em geral, muito negligenciadas, sendo paradoxalmente, das mais frequentes. Evidentemente que a descoberta de um contacto por si só não chega para garantir o sucesso de uma determinada operação. Torna-se necessário que o possível papel hidrogeológico de um contacto seja exaustivamente analisado. O contraste de permeabilidades, a posição relativa quanto à direcção mais provável do fluxo subterrâneo, o grau de alteração ou tectonização e a atitude em profundidade têm de ser equacionados. Numa perspectiva regional, a consideração dos tipos litológicos é extremamente importante e acções de pormenor visando a detecção de contactos topograficamente bem situados podem ser decisivas (*e.g.*, Lima *et al.* 1985);

iv) **Zonas alteradas:** a alteração é um importante factor condicionante da circulação de águas subterrâneas, especialmente em contextos graníticos, até porque está muitas vezes intimamente ligada à tectonização da rocha. Nem sempre as zonas mais alteradas correspondem a maiores produtividades. A experiência tem demonstrado que é imediatamente abaixo dos alteritos que são encontrados os caudais mais elevados (e.g., Larson 1984, Wright & Burgess 1992, Lloyd 1999, Carvalho 1984, Chaminé *et al.* 1999). Esse nível corresponde à rocha relativamente sã com fracturas abertas e a profundidade a que ocorre é variável. Para além de constituir importante indicador para a prospecção e pesquisa, o conhecimento tanto quanto possível exacto da espessura de alteritos joga importante papel no projecto das sondagens de pesquisa. De facto, é frequente depararmos com locais onde a aplicação de equipamentos de perfuração, do tipo martelo de fundo de furo, esbarra com dificuldades dada a fraca coesão dos materiais atravessados. Nestes casos, o recurso a técnicas especiais, percussão mecânica ou rotação nem sempre disponíveis com o equipamento em obra, é quase obrigatório.

3.2. Modelação hidrogeológica: os modelos conceptuais

A conceptualização, ou melhor a cenarização de modelos conceptuais admissíveis, constitui uma prioridade absoluta, pois só nessa base será possível esboçar cenários possíveis de intervenção posterior. O modelo conceptual deve incluir as condições de recarga, a estrutura do reservatório geológico (litologias, cartografia geológico-estrutural, tipo de permeabilidade, estruturas hidrogeológicas que condicionam a circulação e sua distribuição no espaço) a tipologia da água, e a avaliação das condições de descarga, se for o caso. O modelo conceptual deve ser dinâmico, isto é, será adaptado à medida que evolui o conhecimento hidrogeológico sobre a área.

Resumindo, pode dizer-se que o especialista de águas subterrâneas só tem condições para intervir num dado problema quando tem do terreno uma visão a quatro dimensões num *puzzle* em que encaixou estrutura do reservatório, hidráulica subterrânea e o factor tempo. Esta visão espacial e temporal, preditiva

dos caudais que a intervenção virá a propiciar, será sistematicamente confrontada com a procura que determinou as investigações.

Não se deve confundir aqui tempo com “tempo geológico” e mecanismos geodinâmicos associados cuja consideração pode não fazer sentido em prospecção de águas com circuitos hidrogeológicos curtos como são os da maioria das águas “normais” de rochas cristalinas. Mas para águas de circuito hidrogeológico longo e profundo, como é o caso das águas minerais gasocarbónicas e sulfúreas (e.g., Choffat 1917, Calado 2001, Lima 2001) as considerações geodinâmicas e o contexto geotectónico são relevantes e condicionam fortemente os trabalhos.

No desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos em rochas cristalinas onde os “aquíferos” são descontínuos — e a água circula em estruturas de detecção reconhecidamente difícil — é usual considerarem-se duas abordagens sucessivas: (i) a prospecção estratégica, de características regionais, e, (ii) a prospecção tática, de carácter local.

A prospecção estratégica, de malha larga, faz sentido sempre que o objectivo é a captação de água para fins públicos, para o abastecimento de grandes propriedades agrícolas, na indústria do termalismo e da água engarrafada ou outros grandes consumidores. Para abastecimentos locais de pequena dimensão apenas se usam intervenções táticas, que, em casos limite, englobam um simples furo de pesquisa e eventual captação com profundidade e dimensionamento caracterizados pelo estudo hidrogeológico (a nível de estudo prévio). Mas mesmo nestes estudos à escala local há que conhecer os parâmetros condicionadores à escala regional. O artigo [1] (Carvalho 1979) corresponde a um caso em que prevaleceu claramente uma óptica estratégica, dada a malha usada e as extensas áreas investigadas.

As metodologias base de prospecção e pesquisa estão consagradas em numerosos livros de texto e milhares de comunicações na literatura científica (e.g., Custódio & Llamas 1983, Larsson 1984, Driscoll 1986, Hamill & Bell 1986, Wright & Burgess 1992, Brassington 1998, Lloyd 1999, Stone 1999, Singhal & Gupta 1999, Fetter 2001, Moore 2002, Assaad *et al.* 2004, entre outros).

As investigações geralmente consideradas podem ser sistematizadas assim, adaptando Larsson (1984), a saber: (i) Aspectos económicos e sociais para caracterização da procura, (ii) Fotografia aérea e detecção remota, (iii) Aspectos geológicos e tectónicos, (iv) Geofísica; (v) Hidrogeologia, e, (vi) Avaliação e interpretação dos dados e localização dos furos de pesquisa e captação.

As fases atrás referidas, que podem ser encaradas como universais, devem ser postas em prática de acordo com os princípios já referidos da dialéctica oferta–procura, e da necessidade da conceptualização sistemática do modelo hidrogeológico. A avaliação das condições de recarga, interface com as técnicas hidrológicas e hidrogeológicas é indispensável para a salvaguarda da sustentabilidade dos caudais a captar.

Atente-se de seguida como a metodologia pioneira de P. S. Martins Carvalho (1969) se aproximava da preconizada mais tarde por Larsson (1984) à excepção da ausência de proposta de utilização da geofísica, tecnologia de ponta no então Portugal Metropolitano (Paradela 1959, 1962) que não no Portugal Ultramarino (Nunes de Sousa 1966). São tão notáveis a clareza de exposição e de conceitos propostos por P. S. Martins Carvalho (1969) onde são patentes as preocupações com a tectónica, a geomorfologia e as condições de recarga, que foi decidido transcrevê-las aqui:

“(...) Um estudo regional em formações desta natureza deve obedecer às seguintes linhas gerais:

I – Levantamento geológico, que pode ser constituído apenas pela delimitação das unidades litológicas.

II – Estudo tectónico-estrutural pormenorizado, compreendendo fracturas, dobramentos, direcções de foliação, xistosidade, etc. Estudo estatístico das diaclases, determinando as suas orientações preferenciais. Determinação da densidade de fracturas por unidade de superfície. Sempre que possível a fotografia aérea deve servir de base a este estudo que será completado com trabalhos de campo.

III – Traçado da rede hidrográfica com indicação da sua densidade, dos cursos de água de regime permanente e temporário e nestes os que podem ter subescoamento.

IV – Delimitação das várias bacias de drenagem, estudando em cada uma delas a área, extensão e profundidade da alteração das formações, cobertura vegetal e inclinação da bacia. Extensão e espessura dos depósitos de vertente. Estes depósitos têm por vezes apreciáveis reservas de água.

V – Estudo do modelado do relevo, definindo zonas de aplanção, de pouca inclinação, e zonas de forte ravinamento.

VI – Estudo da pluviosidade. Quantidade de precipitação anual e sua distribuição ao longo do ano. O mapa deve ser acompanhado por um esboço numa escala reduzida de um mapa da região com as curvas de pluviosidade (isoietas).

VII – Estudo estatístico dos filões e filonetes de quartzo, pegmatíticos, etc., densidade por unidade de superfície e seu grau de fracturação.

VIII – Implantação dos pontos de água — nascentes, poços, furos, minas, etc. — com indicação dos caudais fornecidos em estiagem e no Inverno, e temperatura da água.

A fotografia aérea será muito útil, ainda, no estudo dos parágrafos III, IV e V. Será a partir de um mapa hidrogeológico deste tipo que se estabelecerão zonas de maior ou menor interesse e se determinarão as áreas a prospectar em pormenor.”

Note-se que nove anos mais tarde Cortez (1978) propunha para as águas minerais um esquema semelhante que pode ser considerado padrão à escala da prospecção estratégica e tática. Segundo este autor, para se alcançarem os objectivos da prospecção “(...) é indispensável proceder a um estudo hidrogeológico, trabalho que, ultimamente, a par com o avanço da Hidrogeologia, se tem vindo a sofisticar, tornando-se cada vez mais completo, exigindo, para a sua realização, verdadeiras equipas, dispondo de material adequado. Um estudo hidrogeológico poderá constar, conforme os casos concretos que se apresentem, de todas, ou parte, das seguintes actividades:

- análise da informação disponível;
- estudo geológico;
- controlo das emergências minerais conhecidas;
- inventariação de pontos de água da região;
- estudo climatológico;
- trabalhos de reconhecimento geológico;
- trabalhos de pesquisa.

A consulta de todos os elementos existentes em arquivo ou na memória de pessoas dignas de confiança relacionadas com o tipo de aquífero mineral em estudo é a primeira coisa a fazer. Para cada caso concreto existe sempre, em maior ou menor escala, mais ou menos antiquada, mas normalmente útil, uma informação que seria estultícia desprezar muito embora se tenha de atribuir a cada dado a sua justa importância”.

Cortez (1978) considera que a prospecção começa pela integração de todos os dados disponíveis (escritos e orais) de modo que a recém começada intervenção tenha em conta os conhecimentos do passado.

A eficácia em prospecção melhora com a utilização sucessiva de técnicas, pois a utilização de um único método raramente permite o estabelecimento de um modelo conceptual hidrogeológico robusto, base essencial para a sistematização dos objectivos geológicos a alcançar em trabalhos subseqüentes de pesquisa e captação. Porque a prospecção e pesquisa hidrogeológica servem para resolver problemas concretos, é bom lembrar que a localização de captações não depende apenas de factores hidrogeológicos.

Uma descrição dos factores que condicionam a localização de furos de pesquisa e eventual captação inclui, pelo menos (Carvalho 2000): (i) Tipologia das necessidades: quantidades, distribuição no espaço e no tempo; (ii) Acessos, (iii) Disponibilidade de água para a perfuração; (iv) Existência de condutas, depósitos de distribuição e electricidade; (v) Ordenamento do espaço superficial e subterrâneo existente e previsto, nomeadamente a inserção nos (Planos Directores Municipais - PDM, Reserva Ecológica Nacional - REN e Reserva Agrícola Nacional - RAN; (vi) Características hidrogeológicas (Incerteza): caudal por captação isolada e caudal seguro do aquífero; (vii) Recarga e contaminação, vulnerabilidade e risco; (viii) Riscos induzidos; (ix) Impactes qualitativos e quantitativos; (x) Interferências com outras captações; e, (xi) Aceitabilidade pela comunidade local. A estes condicionalismos há que acrescentar os que os órgãos de gestão dos recursos (actualmente as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional para as águas "normais" e a Direcção Geral de Geologia e Energia para águas minerais naturais, de nascente e recursos geotérmicos) entendam impor.

Fará sentido recordar que os caudais são condicionados em cada local pelos constrangimentos hidrogeológicos, pelo tipo de obra de captação e pela qualidade do projecto e respectiva execução. Qualidade, neste caso, significa adequação técnico-económica às condições naturais e da procura existente.

O papel dos projectistas de trabalhos de prospecção, pesquisa e captação não se esgota na disponibilização da água à boca do furo. Um abastecimento de

água inclui o sistema completo, ou seja, captação, bombagem, adução, tratamento e monitorização. Por isso a selecção dos locais para a realização de trabalhos de prospecção, pesquisa e captação deve ser vista na lógica do sistema completo.

Deverá ser, também, tido em conta que um abastecimento de importância, não poderá ficar dependente de uma só captação. É necessário prever, pelo menos, uma captação de reserva. Esta precaução exige práticas de exploração muito específicas no caso das águas minerais utilizadas em termalismo médico ou na indústria do engarrafamento de água, pois pode gerar problemas de qualidade: uma captação que não funciona com regularidade é fonte de instabilidade química e microbiológica (ver capítulo IV).

A prospecção e pesquisa só deve ser lançada quando um modelo conceptual dos eventuais aquíferos ocorrentes, obtido conforme se mostra na figura II-2, ainda que preliminar, estiver esboçado.

Após a conceptualização, é possível o lançamento do Plano de Pesquisa, quase sempre Plano de Pesquisa e Captação, que inclui a descrição dos objectivos a alcançar, dos métodos e equipamentos a utilizar, dos prazos e dos custos.

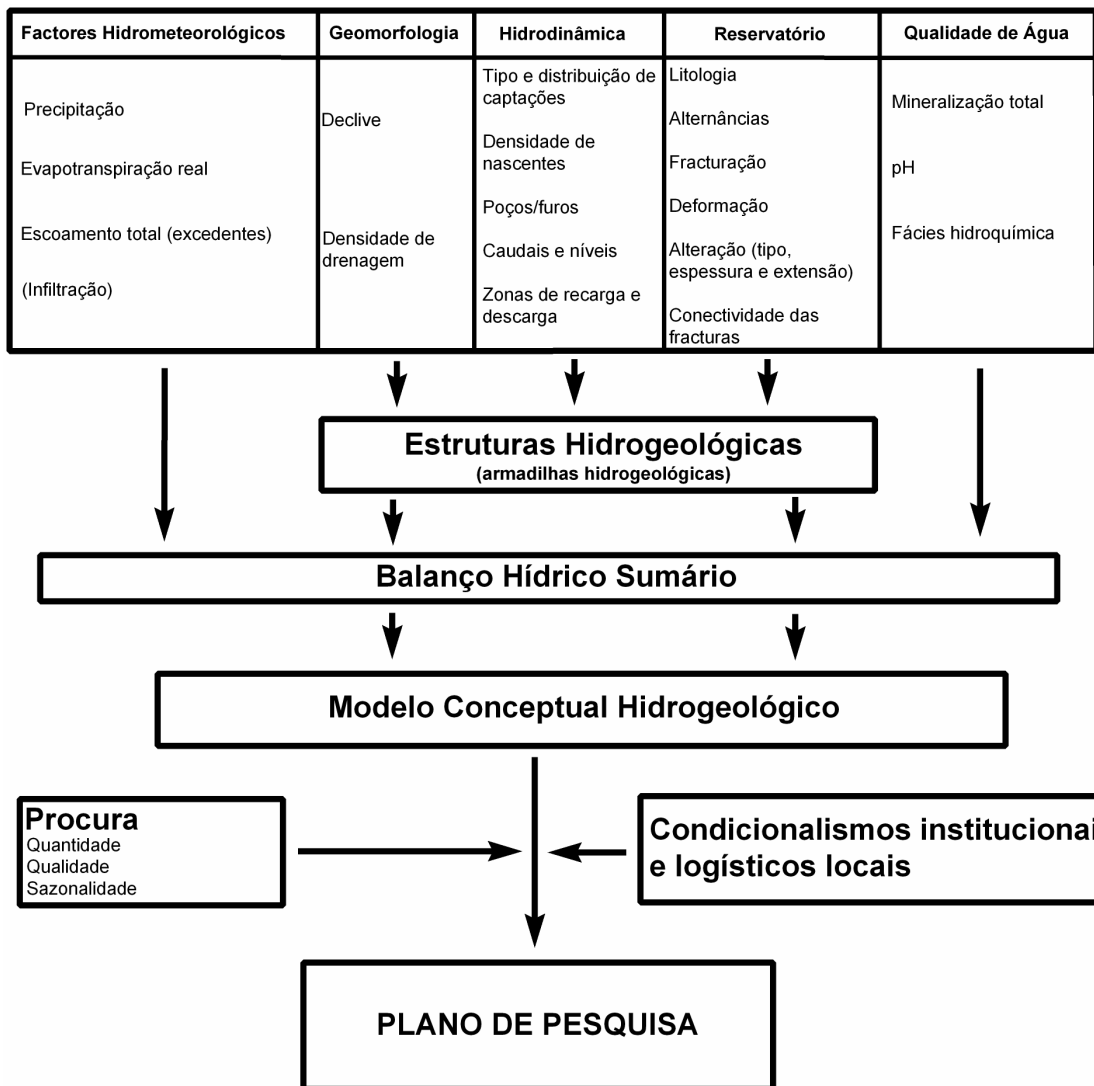


Figura II-2: Estabelecimento do Plano de Pesquisa em aquíferos de rochas cristalinas.

4. A água subterrânea em rochas cristalinas

4.1. Generalidades

As características hidrogeológicas das rochas cristalinas, relevantes para as técnicas e tecnologias de prospecção de água subterrânea, são resultado da história geológica das unidades ocorrentes e incluem aspectos geomorfológicos e topográficos, bem como várias propriedades que condicionam a circulação e armazenamento da água intra-maço rochoso, conforme se resumiu no fluxograma da figura II-2.

A prospecção e a pesquisa de água nestas formações e seu desenvolvimento estão condicionadas pela procura, isto é, pelo fim a que se destina a água, e por aspectos geomorfológicos, geológico-estruturais e hidrodinâmicos que caracterizam a oferta. É fundamental a avaliação das condições de recarga e a distinção, entre os factores de favorabilidade existentes, dos que podem constituir indicadores de prospecção fiáveis. Portanto, as técnicas de prospecção e pesquisa a pôr em prática devem estar adequadas aos condicionalismos hidrogeológicos ocorrentes e também aos da procura.

No presente capítulo II, para além dos artigos apresentados no final, que se pretendem representativos das condições ocorrentes no Maciço Antigo, incorporamos, também, dois exemplos adicionais para melhor discussão de alguns temas.

4.2. Constrangimentos geomorfológicos

A geomorfologia, e em particular a geomorfologia estrutural, desempenha um papel relevantíssimo na prática hidrogeológica de rochas cristalinas porque: (i) condiciona as condições de recarga; e, (ii) pode indiciar feições geológicas de interesse para a prospecção.

De uma forma geral, adaptando Brum Ferreira (1978, 1981), as seguintes formas de relevo podem condicionar a circulação hídrica subterrânea: formas estruturais (escarpas de falha e vales de fractura), aplanamentos, formas fluviais de erosão e acumulação (aluviões e terraços), formas de vertente e interflúvios (alvéolos e bacias de enchimento), formas de erosão e acumulação glaciárias (Serra do Gerês e Serra da Estrela; *e.g.*, Brum Ferreira *et al.* 1992, Teles Vieira 2004) e formas litorais. Por isso a cartografia geomorfológica pode constituir um auxiliar precioso à prospecção e daí, também, a fotointerpretação e a detecção remota das geoformas e das estruturas geológicas serem um instrumento indispensável na prática hidrogeológica (*e.g.*, Chaminé *et al.* 2004, Afonso *et al.* 2004, Carvalho *et al.* 2005, Gomes & Chaminé 2005). Aliás, a hidrogeomorfologia é uma interface emergente e recente na literatura da especialidade internacional (*e.g.*, Sidle & Onda, 2004) e, entre nós, já foram dadas à estampa alguns contributos, quer ao nível da hidrogeografia superficial (*e.g.*, Vieira *et al.*, 2004;

Zêzere et al., 2005) quer ao nível da hidrogeomorfologia subterrânea (e.g., Afonso et al. 2004, 2005a)

A influência da geomorfologia no sucesso de furos de captação de águas subterrâneas, tem sido tema relativamente bem estudado pois, caso houvesse correlação positiva entre formas morfológicas e caudais de exploração, dispor-se-ia de um excelente factor de produtividade e mesmo de um indicador de prospecção. O método de referência deve-se a Legrand (1954, 1967) que a partir de estudos realizados numa região da Carolina do Norte onde ocorriam granitos, gabros, gnaisses e xistos concluiu que a probabilidade de ocorrência dos maiores caudais é nos vales extensos, diminuindo depois para os planaltos, encostas e cumes.

De 1986 a 1989 um grande plano de prospecção, pesquisa e captação de águas subterrâneas em Trás-os-Montes (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987, 1989) conduziu, entre outros resultados, à elaboração de várias análises geoestatísticas por Pereira (1992, 1999) e Pereira & Almeida (1994). Destas análises conclui-se que em Trás-os-Montes Oriental não se registam estatisticamente diferenças significativas das produtividades nas diferentes condições topográficas. Exceptua-se o caso de caudais de perfuração superiores a 3,4 l/s que apenas foram obtidos em zonas de vale. Isto quer dizer, como refere Pereira (1999) com muita clareza *“que apesar da probabilidade de se encontrar água subterrânea nos vales ou nas encostas ser semelhante, os caudais mais elevados são mais frequentes nos vales”*.

Entretanto, Yin & Brook (1992), abordaram a questão numa população de 301 furos de rochas cristalinas nos Estados Unidos da América e concluíram que apesar dos valores médios correspondentes às classes em diferentes situações topográficas, poderem ser diferentes, essas diferenças nem sempre são estatisticamente significativas, devido aos elevados coeficientes de variação dentro das classes.

Michel (1975) referindo-se à região Norte do Reno-Vestefália, no que toca à questão da geomorfologia como factor de favorabilidade hidrogeológica, considera que vales alinhados segundo a direcção da xistosidade regional não são tão prometedores como os que a cortam claramente. Isto quer dizer que para

a mesma litologia (neste caso rochas metassedimentares) o controlo tectónico é decisivo. Esta posição é partilhada por Skorepa & Vrba (1985) para rochas cristalinas da Boémia. Estes autores referem que os caudais mais elevados naquela região são observados em vales, especialmente os condicionados pela tectónica.

Krásny (1999) defende que no Maciço da Boémia a transmissividade é maior nos vales, particularmente naqueles em que existem depósitos detríticos que podem exercer um papel regulador. Não parece ser esta a situação no Norte e Centro do Maciço Antigo, conforme se verá no exemplo de Castelo Novo-Touca apresentado neste capítulo II. Mas aquele autor conclui: *“os recursos de água subterrânea em rochas duras ocorrem em áreas montanhosas devido ao clima e condições geológicas favoráveis, i.e., precipitações elevadas e baixa evapotranspiração resultando numa recarga relativamente constante e gradientes hidráulicos elevados que conduzem a fluxo subterrâneo relativamente intenso apesar da baixa transmissividade dominante”... “Contudo, devido à baixa capacidade de armazenamento dos aquíferos superficiais, o potencial de retenção é limitado e ocorre um rápido esvaziamento dos sistemas em zonas com declives muito pronunciados”*.

Um tema que se prende com a favorabilidade dos vales é o da ligação hidráulica entre a linha de água e a fracturação do maciço. Até que ponto a admissível colmatação da fracturação por materiais finos transportados tem mais peso que o aumento da carga hidráulica que se faz sentir por infiltração induzida? Pode, assim, especular-se que a favorabilidade dos vales pode ser reduzida pela deposição de materiais argilosos aluvionares ou coluvionares.

A via geoestatística não é a mais indicada para avaliar recursos e prever caudais, com base na geomorfologia, no Maciço Antigo Português. De facto: (i) existe a comprovação que, para furos verticais da ordem de 100 m na Zona Centro-Ibérica, a litologia tem um papel determinante nos caudais (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987, 1989, Costa Pereira 1990, 1999, Alençã 1998, Mendonça *et al.* 1999, Lima 2001, ERHSA 2003) que se sobrepõe geralmente aos demais factores de favorabilidade; e, (ii) o tipo de captação condiciona muito a produtividade das obras.

Seguidamente apresentam-se, com base em trabalho (em parte inédito) realizado e/ou coordenado pelo signatário e cruzando informação coligida da bibliografia regional, dois exemplos da Zona Centro-Ibérica para ilustracção das afirmações anteriores.

4.2.1. A área de Castelo Novo–Alpedrinha (Fundão): um exemplo

No sector de Castelo Novo–Touca (Alpedrinha), a SSE do Fundão, dispomos de informação de dois locais afastados cerca de 12 km e separados pelo rebordo tectónico da Serra da Gardunha (figura II-3).

Enquadramento geomorfológico regional

A região de Castelo Novo – Touca (SSE de Fundão) enquadra-se, *sensu latu*, a oriente dos contrafortes dos maciços das Serras de Alvelos, da Gardunha e da Estrela, que constitui parte do denominado segmento Português da Cordilheira Central (*e.g.*, Ribeiro 1940, 1949, Daveau 1985). Numa perspectiva geomorfológica regional o sector em questão situa-se na depressão morfoestrutural, dissimétrica, aplanada e designada por Cova da Beira (Ribeiro 1949), muito próximo ao relevo vigoroso da Serra da Gardunha (por exemplo, v.g. Cavalinho, 1155m; v.g. Coutada, 896 m). Assim, a zona da Cova da Beira estende-se ao longo da Ribeira da Meimosa e alarga-se num amplo anfiteatro sobre o rio Zêzere, sendo limitada por este rio e pelos contrafortes da Serra da Gardunha (Ribeiro 1949).

A ossatura da Serra da Gardunha é constituída sobretudo por rochas graníticas e metassedimentares, ostentando largas superfícies culminantes, de formas bem conservadas e atapetadas por horizontes argilo-arenosos. Estas antigas superfícies de erosão foram recentemente, na escala dos tempos geológicos, levantadas e balançadas, o que faz da Serra da Gardunha uma típica montanha de blocos em escadaria (Ribeiro 1949, 1970). Esta situação morfoestrutural é em tudo similar à descrita, mas aqui de uma forma exuberante, para o maciço da Serra da Estrela (*e.g.*, Ribeiro 1949, Daveau 1985, A. Ribeiro 1984, Teles Vieira 2004). O maciço da Serra da Gardunha é um

elemento geomorfológico determinante na paisagem da região de Castelo Novo e desempenha inequivocamente um papel de barreira climática condicionando, a Sul, uma vasta porção de solos férteis, mais ou menos aplanados (Cova da Beira) com microclimas característicos que favorecem uma prática agrícola intensiva nomeadamente de vinha, de oliveira e de árvores de fruta. A região em estudo enquadra-se, na sistematização das províncias climáticas de Portugal continental (Daveau 1985, Ribeiro *et al.* 1994 a,b), na região continental e província da Beira interior.

A área de Castelo Novo

A zona das captações de Castelo Novo fica situada entre as cotas 650 e 740m, em plena Serra da Gardunha, na zona de transição para o topo (GeoAmbiente 1991, TARH 2002). Neste sector podemos comparar: (i) uma zona declivosa, a cota alta, com blocos com graus de alteração diferenciados; e, (ii) a zona aplanada típica da Cova da Beira.

A área envolvente de Castelo Novo está situada em formações graníticas variscas — mais particularmente granitóides orogénicos tardi- a pós-fase D₃ varisca (série tardia) — conforme critério da carta geológica de Portugal de Oliveira *et al.* (1992). O enquadramento geológico pode ser resumido assim (em parte retomado de GeoAmbiente 1992): (i) a litologia é monótona dentro do padrão granito de grão médio, não porfiróide, com moscovite e biotite; (ii) alguns raros filões de quartzo, brechificados e recimentados têm um papel hidrogeológico ainda não esclarecido; (iii) a fracturação parece relativamente regular, com orientação predominante a NE e afastamentos entre megaestruturas definidas na fotointerpretação, da ordem de 200 a 300 m; (iv) em afloramento o granito apresenta-se alterado, raramente decomposto e são raras as manchas de alteritos, que quando existentes, não ultrapassarão geralmente 5 m de espessura; (v) a fracturação do maciço, a avaliar pelos *logs* dos furos, não ultrapassa 40 a 60 m de profundidade; (vi) o declive da vertente da Serra da Gardunha onde estão instaladas as captações é da ordem de 31%, alcançando, por vezes, 49 %; e, (vii) a distância à culminação à bacia de escoamento mais próxima é de cerca de 400 m e de 1000 m à culminação máxima.

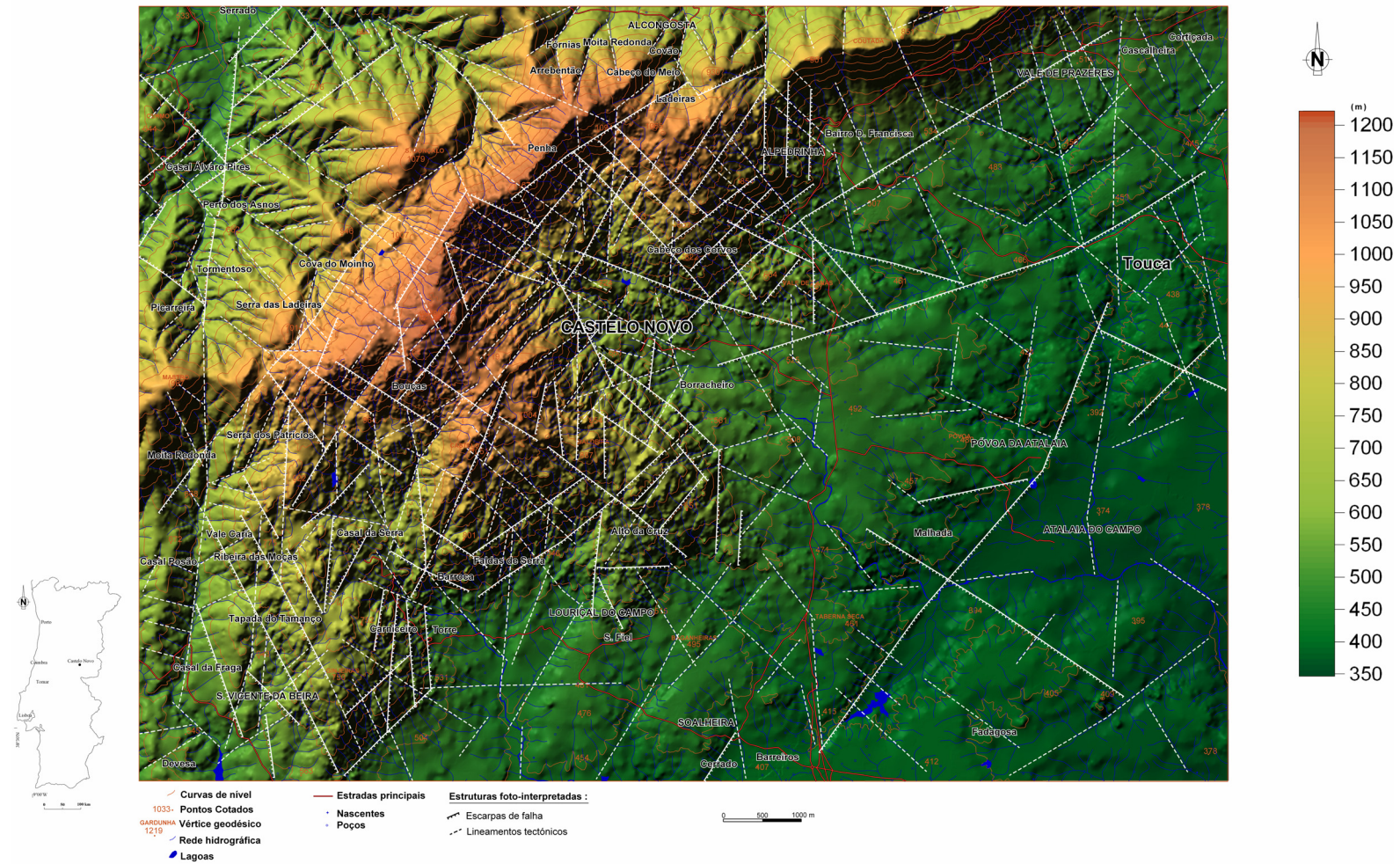


Figura II-3: Mapa de enquadramento geológico regional da Serra da Gardunha, com a localização das nascentes de Castelo Novo e das Termas da Touca.

De acordo com os dados climáticos disponíveis, a precipitação média anual, é da ordem de 1200 a 1400 mm, repartida entre 75 a 100 dias por ano. As precipitações são, portanto, mal distribuídas ao longo do ano. A temperatura anual média não é conhecida localmente. Conforme os dados do Atlas do Ambiente (IA – Instituto do Ambiente 1974), a temperatura anual média, seria de cerca de 10 °C. A evapotranspiração real anual média, determinada pela fórmula semi-empírica de Turc, seria da ordem de 550 mm o que conduziria a escoamentos totais anuais médios de 650 a 800 mm. Note-se o erro importante associado a esta determinação dado o insuficiente conhecimento da temperatura média do ar. Nas condições topográficas e climáticas assinaladas para esta região a componente superficial do escoamento afigura-se importante.

Considerando: (i) a recarga para as captações numa área de 400 por 700m (Fig II-4); e, (ii) o escoamento médio de cerca de 7 m³/hora nas captações horizontais existentes (FH1, FH2, FH3, FH6 e FV7 cada uma com 100m de comprimento), ter-se-ia um coeficiente de infiltração de 18%, correspondente a recargas de 220 a 250 mm, irregularmente distribuídas ao longo do ano hidrológico. Se fosse considerada a recarga até à culminação máxima, situada a 1000 m, seriam obtidos escoamentos mais altos (até 17,5 m³/hora) que não correspondem a cenário credível. Note-se que Carvalho *et al.* (2000) consideraram coeficientes de infiltração de 14 a 17% no Centro e Norte de Portugal, sugerindo, contudo, a utilização de uma taxa generalizada de 10 %.

Os principais recursos hídricos estão instalados, quase exclusivamente, na zona de alteração dos granitos. Os níveis estáticos são muito próximos da superfície. No Inverno, algumas das sondagens existentes, horizontais e verticais (ver figura II-4) são repuxantes. Esta circunstância reflecte algumas condições de confinamento do sistema e a presença de gradientes muito elevados, acompanhando a topografia. É normal em aquíferos descontínuos graníticos a ocorrência de condições de confinamento devido ao desenvolvimento em profundidade da rede de fracturas e outras discontinuidades. A conectividade hidráulica do aquífero estudado parece pequena: duas sondagens apresentam níveis piezométricos mais baixos cerca de 10 m que os da circulação principal.

Todavia, os dados hidroquímicos não suportam grandes diferenças em termos de circulações claramente diferenciadas: de todas as sondagens conhecidas apenas o AC1, sondagem vertical com 62m de profundidade, situada ao lado da mítica nascente Alardo, tem um quimismo correspondente a uma água com maior tempo de permanência no reservatório, isto é de circulação mais profunda e longínqua. Poderão existir direcções privilegiadas de circulação (ao longo da fracturação principal N- S a NE-SW e E-W, materializando um contexto de nó tectónico). As águas são hipossalinas com mineralização total de 31 mg/l.

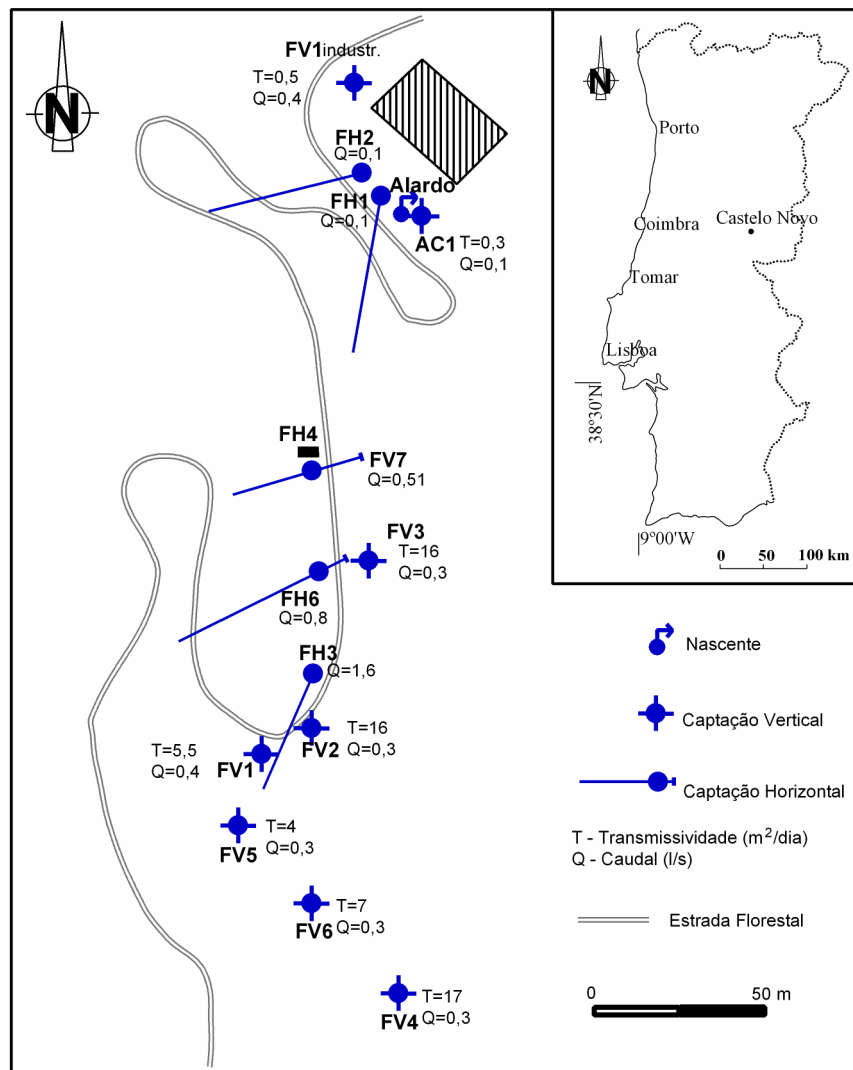


Fig II-4 – Localização das captações de Castelo Novo em Agosto de 1998 (adaptado de Ratinho 1999)

O modelo conceptual do aquífero inclui um conjunto de sub-sistemas descontínuos, semi-cativos com os parâmetros hidrodinâmicos seguintes determinados a partir de uma extensa campanha de ensaios de caudal realizados

em Setembro de 1998: (i) Transmissividade (T): 0,3 a 16 m²/dia para furos até uma profundidade de 60 m, e, (ii) Gradiente hidráulico: 0,12 para NNE. A ausência de registos de medições de influências não permitiram a determinação do Coeficiente de Armazenamento.

Os tipos de captação e sua localização, as transmissividades e os caudais obtidos estão indicados no quadro II-2 e correspondem a ensaios de Setembro de 1998. São também indicados valores correspondentes à Touca (Alpedrinha). Note-se que em Castelo Novo as captações horizontais têm praticamente o dobro do caudal dos furos verticais e que a transmissividade da zona profunda é dupla da da Touca. Os caudais são mais elevados na Touca por corresponderem a maior rebaixamento disponível.

Quadro II-2: Captações da área de Castelo Novo e da Touca (valores medianos).

Características	Castelo Novo		Touca (Alpedrinha)	
	T(m ² /dia)	Caudal (l/s)	T(m ² /dia)	Caudal (l/s)
Zona alterada	16	0,51 furos horizontais	----	----
Zona profunda	4	0,30 furos verticais	2,4	0,5

A área da Touca (Alpedrinha)

Na Touca, onde existe pequeno pólo da captação de água sulfúrea, a área que foi objecto de estudo geológico e hidrogeológico pormenorizado (TARH 2002) não ultrapassa os 446 metros de altitude (vértice geodésico Casa Alta). O sector da Touca é constituído por um relevo aplanado granítico, de forma sub-rectangular, sendo compartimentado, em grande, segundo a orientação geral NNW-SSE e ENE-WSW. Assim, é limitado inferiormente pelo designado lineamento tectónico do segmento, com orientação média W-E, da Ribeira de Alpreade (alinhamento que passa muito próximo aos vértices geodésicos do Cabrão, de Taberna Seca e da Póvoa; a sul da Atalaia do Campo), e superiormente limitado, segundo uma direcção geral NE-SW, entre Alpedrinha e Vale Prazeres, materializado em parte pelo rebordo oriental da Serra da

Gardunha. Assumem também importância local os lineamentos de orientação geral N-S a NNW-SSE, tal como o da Ribeira da Maceira, e os de direcção conjugada, ENE-WSW. A análise da fotografia aérea, apoiada com a análise morfoestrutural regional da carta topográfica do IGeoE, do sector entre Alpedrinha e Touca revelou a presença de uma rede de fracturação regional secundária (e.g., 'falha da Touca', 'falha da Ribeira da Maceira'), associada a falhas regionais de primeira grandeza (e.g., 'falha do Fundão'; cf. Conde 1983). Os estudos geológicos, em regiões contíguas ao Fundão (Alpedrinha), de Cameron (1959, 1960), Barros (1960), Serafino (1960), JEN (1968) e Santarém Andrade (1983), ilustram a existência destes sistemas estruturais à escala regional. Convém destacar que tanto as estruturas (falhas e lineamentos tectónicos) com orientação geral ENE-WSW, como as estruturas conjugadas de direcção NNW- SSE, têm intensa manifestação local.

As características climáticas da Touca podem ser estimadas pela informação da estação climatológica do Fundão (Mendes & Bettencourt 1980), conforme segue: (i) Precipitação anual média: 1036 mm; (ii) Temperatura: 13,9°C; (iii) Evapotranspiração real: 520 mm; e, (iv) Excedentes: 516 mm. A título comparativo refira-se que os excedentes em Castelo Novo foram avaliados entre 650 a 800 mm.

À captação de água sulfúrea, AC2 com 150 m de profundidade, corresponde uma transmissividade de 2,4 m²/dia. Esta transmissividade deve ser mais elevada que a transmissividade regional, correspondente à circulação de águas hipossalinas não sulfúreas, pois algumas captações tubulares investigadas na área (TARH 2002) parecem ter caudais ainda mais baixos que os do AC2-Touca.

Síntese comparativa: algumas ilações

Como síntese deste exemplo comparativo retenham-se as seguintes linhas de orientação: (i) em zonas montanhosas, se existir uma zona alterada, as captações horizontais são tendencialmente mais produtivas que as verticais; (ii) em zonas aplanadas graníticas do tipo das da Touca as condições para a circulação de água subterrânea parecem mais fracas que nas zonas tectonicamente movimentadas adjacentes, ainda que da mesma litologia; e, (iii) o

controlo da geomorfologia nas condições hidrogeológicas deve ser analisado à luz da história geotectónica recente de cada região. Aos factores referidos acrescem, geralmente, maiores quantidades de água disponíveis para a recarga nas zonas montanhosas, como é o caso neste exemplo de Castelo-Novo–Touca.

4.2.2. Alteração e alterabilidade dos maciços na pesquisa de água subterrânea

A alteração de uma rocha consiste na sua desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente (*e.g.*, Aires-Barros 1971, 1991). Para este mesmo autor a noção de alterabilidade prende-se com um conceito dinâmico que se refere à aptidão de uma rocha para se alterar.

Os principais tipos de alteração que afectam as rochas são a alteração deutérica (primária ou hipogénica; fenómenos como a caulínização, a cloritização, a silicificação, a serpentinização, a greisenização, etc. são exemplos deste tipo) e a alteração meteórica (secundária ou supergénica; intrinsecamente relacionada com acções físico-químicas — dissolução, hidratação, oxidação, redução e hidrólise — da biosfera). O caso particular da meteorização de rochas graníticas em climas temperados denomina-se por arenização, não se verificando uma modificação da estrutura original do maciço rochoso (Begonha 2001). Nestas condições, ocorre uma meteorização do tipo esquelético com a estrutura da rocha-mãe conservada, comportando-se a rocha, em termos geotécnicos, como um solo residual. Sequeira Braga *et al.* (1989) propõem que a arenização seja considerada como um dos grandes sistemas mundiais de alteração meteórica.

A alteração deutérica refere-se às transformações, no geral metassomáticas e/ou hidrotermais, das rochas, originadas nos estádios tardios da diferenciação magmática. Assim, é vulgar aparecerem testemunhos e “cuttings” de sondagens de profundidade relativamente elevada com um grau de alteração avançado, pelo menos maior do que em amostras de troços superiores dessa mesma sondagem. Tais factos, na maior parte dos casos, são devidos à alteração deutérica e não a qualquer acção de meteorização (Aires-Barros 1971, 1991).

A ISRM (1978, 1981) e a GSE (1995) avançaram uma classificação do grau de alteração do maciço (designado por W_i) para estudos de geologia aplicada, e que consta, em regra, de seis graus. Do ponto de vista prático é muitas vezes usado na caracterização e descrição do maciço uma classificação dos graus de alteração simplificada, em virtude da intrínseca ambiguidade dos limites sugeridos, ou seja, os graus de alteração resumem-se a W_{1-2} , W_3 e W_{4-5} .

No que toca à alteração meteórica, Skorepa & Vrba (1985) são de opinião que o aumento da espessura dos depósitos eluvionares (ligado a fracturação ou a contactos litológicos) constitui um factor de favorabilidade à circulação de água subterrânea.

Um tanto surpreendentemente no Maciço Antigo a espessura de meteorização não parece ter influência nos caudais captados (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1989, Pereira 1999, Lima 2001) com furos até cerca de 90 m. Este facto tanto pode ter origem na dificuldade real da identificação da alteração na amostragem e nos registos das sondagens como pode estar ligado à evolução geológica e geomorfológica do território no Quaternário.

No entanto há que atentar no facto de Moitinho de Almeida (1970) considerar mais produtivas as unidades graníticas que as unidades metassedimentares. Ora nessa época não operavam ainda as sondas de percussão pneumática com martelo de fundo de furo, o que quer dizer que as pesquisas não entravam na rocha sã, fracturada. O conhecimento reportava-se à zona alterada dos maciços. Sendo assim, pode considerar-se que a tipologia do estado de alteração do maciço condiciona no Maciço Antigo os caudais disponíveis, invertendo, porventura, o potencial hidrogeológico relativo das litologias ocorrentes. Aos níveis de alteração predominantemente argilosos dos xistos corresponderiam menores produtividades que nos produtos de alteração dos granitóides.

4.3. Constrangimentos geológico-estruturais

As unidades geológicas mais ou menos alteradas e fracturadas constituem o reservatório no qual se instalaram os aquíferos descontínuos característicos do Maciço Antigo, em particular da Zona Centro-Ibérica e da Zona Galiza-Trás-os-Montes. A formação dos aquíferos ocorrentes nestas unidades (Singhal & Gupta

1999, Lloyd 1999, Larsson 1985) é condicionada pela história geológica da área, pelo estilo tectónico, pelas estruturas de carácter regional e pelo estado do maciço à escala local.

A história geológica é responsável pela sequência e estado da fracturação e de alteração dos maciços, pela organização da geomorfologia e pelo estilo tectónico (deformação e fracturação). A circulação da água faz-se ao longo de descontinuidades cujas propriedades, particularmente a abertura, o enchimento e a conectividade, são relevantes para a quantidade e qualidade disponíveis.

Entre as descontinuidades podem enumerar-se (Singhal & Gupta 1999): estratificação, xistosidade, falhas, diaclases (ou juntas) e ainda discordâncias e contactos entre rochas diferentes. Paleoestruturas, filões e diques, zonas de cisalhamento, cavalgamentos, alternâncias de rochas de deformação frágil e o estado de deformabilidade do maciço rochoso, podem condicionar as condições e grandeza do escoamento.

A rede de descontinuidades planares (falhas, fracturas *s.l.*) de um dado maciço rochoso em meios fissurados é vista tradicionalmente como o veículo privilegiado para a circulação de águas subterrâneas e de fluidos hidrominerais. Do ponto de vista metodológico a abordagem anterior é correcta, mas devem ser colocadas algumas reservas, relativamente ao seu comportamento hidrogeológico, em função da sua génese e tipologia, idade, unidades geológicas e tipo de água procurado. Na bibliografia geológica foi, desde sempre, amplamente discutido o papel das descontinuidades e o seu comportamento geológico-estrutural, geomecânico e hidrogeológico na compartimentação de maciços rochosos (e.g., ISRM 1978, 1981, Larsson 1984, Oliver 1986, Ramsay & Huber 1987, CFCFF 1996, Ingebritsen & Sanford 1998, Lloyd 1999, Ingebritsen & Manning 1999, Singhal & Gupta 1999, Mazurek 2000, Handy et al. 2001), ver figura II-5.

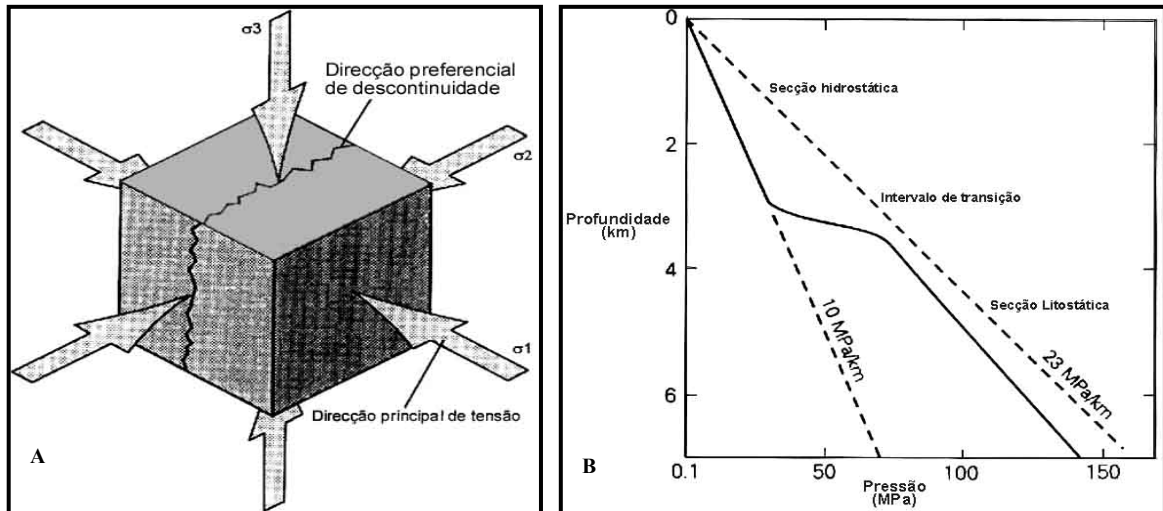


Figura II-5: Aspectos geológico-estruturais e hidrogeomecânicos relacionados com as descontinuidades. A) Bloco diagrama esquemático mostrando a direcção preferencial dos planos de descontinuidade sujeitos a um campo de tensões, com $\sigma_3 \geq \sigma_2 > \sigma_1$ (adaptado de Ingebritsen & Sanford 1998); B) Perfil esquemático relacionando a pressão hidroestática com a profundidade (adaptado de Ingebritsen & Sanford 1998).

A função transmissiva e capacitiva das rochas cristalinas é condicionada pela conectividade das descontinuidades (Marsilly 1986). Esta aumenta com o comprimento das fracturas e diaclases e respectiva densidade, pois a probabilidade de intersecção aumenta (Singhal & Gupta 1999). Desta enumeração pode concluir-se que a caracterização adequada do estado da fracturação do maciço (atitude, espaçamento, persistência, densidade, abertura, rugosidade, enchimento e conectividade; cf. ISRM 1978, 1981, CFCFF 1996) é determinante na compreensão dos mecanismos e grandeza da circulação hídrica subterrânea.

Está por resolver o problema da compreensão dos caminhos de circulação da água intra-descontinuidades. A análise das condições hidrogeológicas nas grandes escavações subterrâneas (e.g., o túnel de Venda Nova II, na Serra do Gerês, ver capítulo III) mostra que o fluxo tem tendência para se concentrar junto dos grandes eixos de fracturação. No entanto a distribuição do fluxo à escala métrica ou decamétrica é muito irregular, não sendo aparente a razão porque umas fracturas são activas para o fluxo e as outras não, ou porque a mesma descontinuidade numa zona é produtiva e noutra não (CFCFF 1996).

A conectividade condiciona o conceito de Volume Representativo Elementar (VRE) — Marsily (1986) e Singhal & Gupta (1999) — essencial para o entendimento da aplicabilidade de modelos de fluxo e transporte de massa dos meios porosos às rochas cristalinas. O VRE é o mais pequeno volume representativo dum maciço rochoso. O VRE aumenta em dimensões com o aumento de espaçamento das descontinuidades. Isto quer dizer que a aplicabilidade de modelos contínuos de fluxo é questionável em muitos maciços rochosos e que há um efeito de escala que tem de ser tido em conta nas actividades de prospecção e pesquisa.

Skorepa & Vrba (1985) assinalam o papel positivo dos contactos geológicos. Será útil referir que, tal como nas falhas, a diversidade de comportamento hidrogeológico dos contactos é grande. Se há metamorfismo de contacto, sem deformação posterior, invariavelmente a rocha resultante pode ser menos transmissiva que as encaixantes, como foi observado por Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1989) em muitos locais de Trás-os-Montes. Contactos por falha são geralmente interessantes, particularmente se se tratar de duas litologias contrastantes. Em eixos sinclinais afectando rochas metassedimentares, quartzitos e arenitos hematíticos da Austrália Ocidental, Bar-Joseph (1985) refere ter encontrado caudais até 8 l/s com transmissividades até 80 m²/dia. O padrão regional do caudal nesta área era de 0,4 l/s com transmissividades até 10 m²/dia. Devem comparar-se estes resultados, pela sua similitude, com os da região de Monfortinho (artigo [20], Carvalho 2001, do capítulo IV).

Para Skorepa & Vrba (1985) falhas, diques e filões podem funcionar como barreiras à circulação. A questão dos filões merece uma referência pois o seu comportamento depende das relações com o sentido do fluxo hidráulico subterrâneo, da litologia e das suas relações com a rocha encaixante. No Maciço Antigo os filões doleríticos (e.g., na região de Terras do Bouro ou na região de Aguiar da Beira; Carvalho *et al.* 2005 artigo [6]) apresentam-se geralmente “colados” à rocha granítica encaixante e não parecem jogar grande papel na circulação hídrica subterrânea.

Os filões de quartzo, quando brechificados, se drenarem zonas de contribuição importantes, podem fornecer caudais sustentáveis dos mais elevados nestas rochas, como muito bem notara P. S. Martins Carvalho (1969).

A heterogeneidade litológica constitui um importante factor que potencia a circulação subterrânea pois as diferentes reacções reológicas do maciço à deformação propiciam a formação de descontinuidades.

O papel hidrogeológico das falhas e de outras singularidades geológicas no regime de circulação e emergência de águas subterrâneas fica bem evidenciado neste trabalho pela leitura dos artigos [1] (Carvalho 1979) e [5] (Carvalho & Chaminé 2004), constituindo este último uma síntese, com base em exemplos das regiões de Oliveira de Azeméis e Fafe, dos conhecimentos actuais na Zona Centro-Ibérica sobre o tema.

As características de reservatório hidrogeológico e os caudais de exploração de captações em rochas cristalinas são condicionadas pela alteração, pela fracturação e pela fracturação profunda. Este problema, que se insere na questão da abordagem da prospecção hidrogeológica com o novo paradigma hidrogeológico das *megabacias*, as “megawatersheds” de Bisson & Leher (2004), é discutido pormenorizadamente no artigo [5] (Carvalho & Chaminé 2004).

O zonamento vertical da alteração e fracturação nas rochas cristalinas do Maciço Antigo é variável dado que as litologias ocorrentes, as condições climáticas e a evolução geotectónica são muito diversas. Trata-se de questão muito importante a nível prático, tratado nos artigos [1], [2] (Carvalho 1979, 1984) e [3] (Machado Lima *et al.* 1985), pois a experiência mundial tem mostrado que a distribuição de caudais com a profundidade atinge um máximo na base da zona alterada, a profundidades variáveis (Larsson 1984, Lloyd 1999, Wright & Burgess 1992).

A sequência vertical em profundidade, e sua espessura, é influenciada por condicionalismos resultantes da geologia regional e à escala do afloramento apresentando, em geral, três partes:

i) uma zona superior, em regra, alterada a muito alterada ou mesmo decomposta. Nestes horizontes a permeabilidade é do tipo intersticial (circulação por poros) podendo coexistir com a circulação fissural;

ii) uma zona intermédia com a tipologia característica de maciço rochoso mais ou menos são, intersectado por descontinuidades abertas (do tipo falha, fractura, diaclase, filão, ou contacto) com permeabilidade fissural;

iii) uma zona inferior geralmente sã e compacta, com descontinuidades fechadas na qual a permeabilidade é praticamente nula.

Resultante da variabilidade acima descrita, o comportamento hidrodinâmico destes diferentes níveis é claramente diferenciado do ponto de vista hidrodinâmico (transmissividades e níveis) conforme se verá adiante.

De uma forma geral, para a Zona Centro-Ibérica pode admitir-se que conforme é referido no artigo [3] (Machado Lima *et al.* 1985), não se justifica a perfuração para além da profundidade de 200 m, embora para situações pontuais bem conceptualizadas possa ser conveniente a pesquisa a profundidades superiores, particularmente no caso das águas minerais, como se verá no capítulo IV.

Os caudais medianos na Zona Centro-Ibérica, conforme se refere no artigo [10], (Carvalho *et al.* 2005) do Capítulo III são para as principais litologias: (i) Rochas metassedimentares, excluindo quartzitos: 0,5 l/s; (ii) Quartzitos: 0,7 l/s, (iii) rochas graníticas: 0,02 l/s. Caudais desta ordem de grandeza são os registados em todas as partes do mundo para furos com profundidades entre 60 e 120 m nestes tipos de rochas (Larsson 1984, Wright & Burgess 1992, Lloyd 1999, Singhal & Gupta 1999, Robins & Misstear 2000, Stober 2000) e no Sul de Portugal (ERHSA 2003).

Cabe aqui uma referência ao potencial hidrogeológico dos alteritos (depósitos aluvionares e coluvionares que, quando em ligação hidráulica com as linhas de água superficiais, correspondem às situações em que é possível captar os caudais mais elevados da Zona Centro-Ibérica tal como noutras formações similares à escala mundial. Esse tema é tratado em Carvalho & Guedes (1978) e, mais extensivamente em Mendonça (1985).

4.3.1. A área de Castelo de Vide: um exemplo

As condições hidrogeológicas da região de Castelo de Vide, situada no flanco SW do sinclinal de Castelo de Vide-Marvão, fornecem uma excelente oportunidade para comentar alguns aspectos da circulação de água em meios cristalinos. Este sector é um dos estudados, em termos de recarga de aquíferos, por Carvalho *et al.* (2000), artigo [9] do capítulo III.

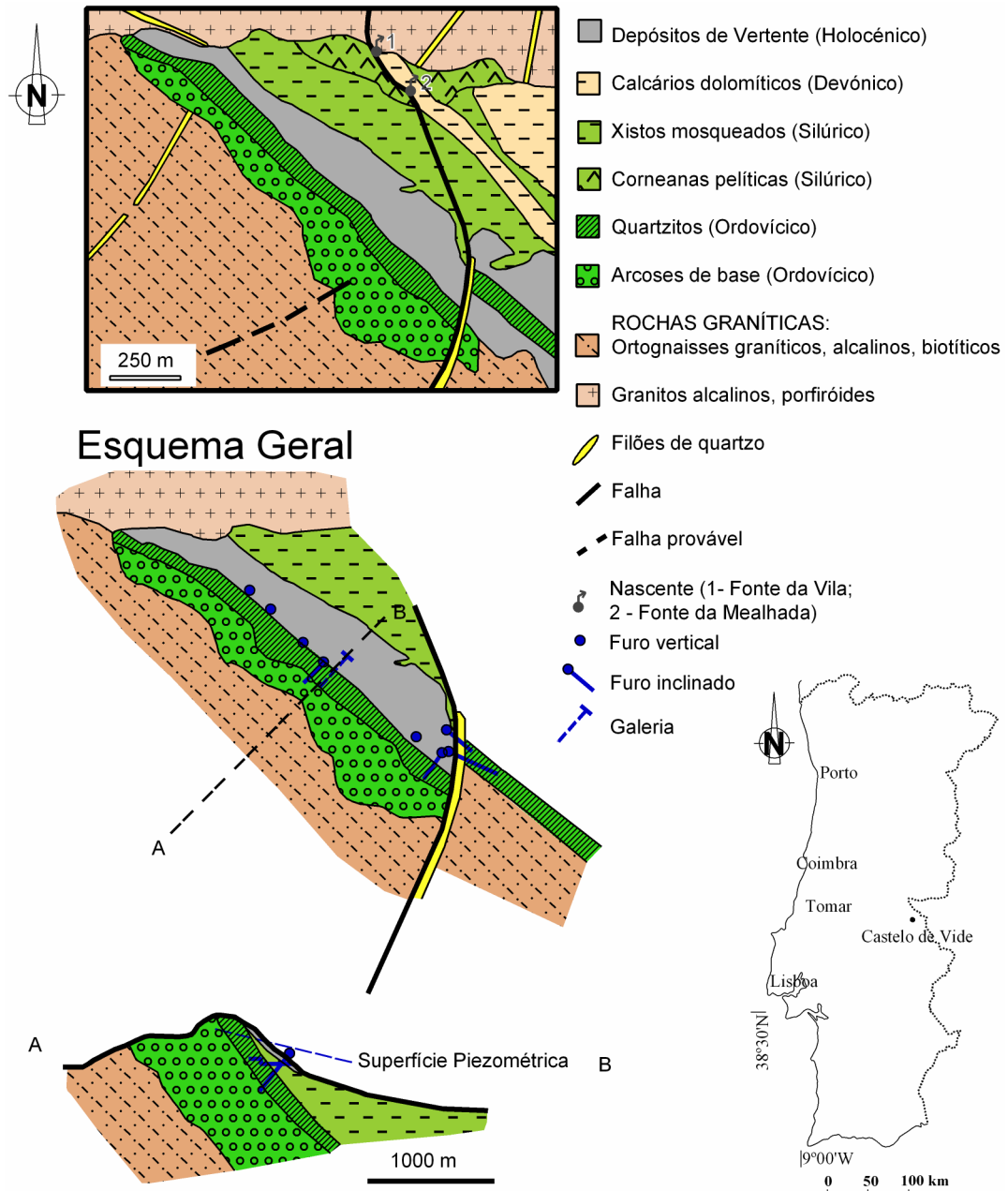


Fig II-6: Esboço geológico sucinto da região de Castelo de Vide (adaptado de Peinador Fernandes et al. 1973, ACavaco 1978).

Conforme se mostra na figura II-6, a zona ocupa uma área de cerca de 6 km² e situa-se no flanco SW do sinclinal de Castelo de Vide-Marvão. A sucessão estratigráfica, de baixo para cima, é a seguinte (Oliveira *et al.* 1992, Peinador Fernandes *et al.* 1973, Arquivos ACavaco): (i) rochas graníticas e gnáissicas variscas; (ii) arcoses da base do Ordovícico; (iii) quartzitos maciços “Armoricanos”, do Ordovícico com uma possança de cerca de 150 m; (iv) xistos silúricos; e, (v) calcários dolomíticos de uma série de transição silúrico-devónica que na área têm uma espessura de cerca de 80m. As camadas metassedimentares inclinam cerca de 65° para NE.

A geomorfologia é dominada pelas cristas quartzíticas orientadas a NW que são rejeitadas horizontalmente no sector Sul pela falha de Castelo de Vide, importante acidente de direcção N-S. A falha exhibe preenchimento irregular de quartzo leitoso. A drenagem faz-se segundo a direcção da xistosidade, de SE para NW através de uma pequena linha de água não permanente. As cotas são da ordem de 704 m (capela de Nossa Senhora da Penha) sobre o afloramento quartzítico e de 500 m no fundo do vale na zona da vila de Castelo de Vide.

Do ponto de vista hidrogeológico ocorrem o aquífero dos quartzitos ordovícicos e o aquífero dos calcários dolomíticos da série de transição silúrico-devónica, separados por uma faixa de xistos negros, mosqueados, do Silúrico, que tem praticamente o papel de camada confinante. Os caudais de exploração nesta unidade xistenta, no sector a Sul da vila de Castelo de Vide até à falha, não ultrapassam 0,4 l/s. A água é hipossalina, muito ferruginosa.

Os calcários dolomíticos da série de transição silúrico-devónica estão carsificados e têm descargas naturais na Fonte da Mealhada e na Fonte da Vila, no centro de Castelo de Vide, sendo, portanto, o fluxo no sentido SE-NW. As águas são mesossalinas (mineralização total de 420 mg/l) e utilizadas na indústria do engarrafamento. Os quartzitos estão muito fracturados e neles circulam águas hipossalinas, silicatadas, com mineralização total de 54 mg/l — utilizadas, também na indústria do engarrafamento — e têm a direcção de fluxo SE-NW, segundo a orientação geral da xistosidade e da estratificação. Têm a descarga natural no contacto a Norte com as arcoses e as rochas granitoides. A precipitação na área é de 890mm, e a temperatura média do ar de 15,5 °C., de

acordo com valores inferidos do Atlas do Ambiente (IA – Instituto do Ambiente 1974).

Existem vários furos de pesquisa e captação, inclinados e verticais, ao longo da crista quartzítica entre a falha de Castelo de Vide e a zona de descarga no contacto com os granitos numa distância de cerca de 2,5 km. Os resultados dos furos estão apresentados no quadro II-3.

Quadro II-3: Características hidrogeológicas nos quartzitos de Castelo de Vide.

Características hidrogeológicas	Furos ao longo da crista	Furos na falha de Castelo de Vide
Nº de furos	7	4
Profundidades (m)	100 a 130	100
Caudal de furação mediano (l/s)	2	0,03
Índice Metros Caudalbruto (GIMC m/l/s)	40	6044
Transmissividade inferida do GIMC (m ² /dia) (*)	2,2	0,01
Transmissividade mediana (m ² /dia) (**)	4,0	-----

(*) A transmissividade mediana é considerada da mesma ordem de magnitude do valor do inverso do Índice Metros Caudalbruto (ver capítulo III, artigos [8] e [10])

(**) Transmissividade obtida segundo (Theis 1935 e Cooper-Jacob 1946)

A transmissividade intra-falha de Castelo de Vide é de cerca de 200 vezes mais baixa que ao longo do afloramento não perturbado por esse acidente, isto é, de duas ordens de magnitude, conforme a metodologia de Krásni (1993). Admite-se que este comportamento hidrogeológico da falha se deva a vários factores: (i) a permeabilidade é reduzida pois trata-se de uma falha antiga sem movimentação recente; e, (ii) é uma falha de compressão. Pensa-se que o facto da falha estar na zona de recarga do aquífero e da área de contribuição do eventual fluxo ser pequena não são factores determinantes para o fraco caudal. Isto é, não foi detectado um problema de alimentação, mas sim um problema de falta de permeabilidade e/ou de conectividade hidráulica.

4.4. Caracterização hidrodinâmica

O entendimento das condições de circulação da água nos aquíferos ultrapassa os limites da geologia. A hidrodinâmica das águas subterrâneas resulta da junção da hidráulica com a geologia. Conhecer as leis que regem o fluxo e o transporte de massa no subsolo, prever os caudais desta ou daquela captação de água subterrânea e otimizar a respectiva localização, alinhar cenários sobre o impacto das grandes obras de engenharia nos ecossistemas são, entre outras, tarefas que é necessário abordar em termos de hidráulica e de geologia.

O comportamento hidrodinâmico do aquífero (Castany 1982) é condicionado pelos factores seguintes: (i) condições e tipos dos limites, caudais das entradas, dos escoamentos e das saídas; (ii) variação das reservas de água subterrânea; (iii) regime de escoamento; e, (iv) estado inicial e as variações no tempo dos caudais, dos níveis piezométricos e das reservas reguladoras.

O comportamento hidrodinâmico exprime-se no modelo conceptual pelo balanço hídrico. É regido pelas leis da hidrodinâmica subterrânea. Os modelos conceptuais são a base do estabelecimento dos modelos matemáticos, hoje ferramenta indispensável ao hidrogeólogo. Mas são, também, a base da prospecção. O hidrogeólogo deve ter um modelo (ou modelos) em mente para decidir onde implantar um furo de pesquisa e captação; se o não tiver não está a ser profissional e não faz nem ciência nem técnica.

A hidrodinâmica dos aquíferos pode ser descrita através de várias leis e expressões matemáticas e hidráulicas que repousam no conhecimento de parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos. Por comodidade, os parâmetros podem ser agrupados em vários grupos, isto é, de armazenamento, de transmissividade, de piezometria e gradiente, e de caudal e velocidade.

O parâmetro hidrodinâmico que mais condiciona a circulação de água é a transmissividade, e um pouco menos o coeficiente de armazenamento (Theis 1935, Krásni 1993, 1999, 2002, Fetter 2001). Por esta razão existe a preocupação sistemática de avaliação da transmissividade, preocupação que perpassa neste trabalho, a par com a do caudal de exploração, o parâmetro que verdadeiramente interessa ao utilizador. A circulação de água nas rochas cristalinas faz-se através

de descontinuidades e também nos espaços intersticiais dos minerais no caso das zonas alteradas.

Os modelos analíticos que tentam representar o fluxo para as captações foram estabelecidos para rochas porosas (Thiem 1906, Theis 1935) questionando-se, portanto, a utilização destes modelos em rochas cristalinas, particularmente na zona fracturada. Por isso tem havido algumas tentativas de utilização de modelos que supostamente reproduzem melhor o fluxo como os de porosidade dupla (ver artigo [14] no capítulo IV) e os da derivada da transmissividade (Horne 1997), entre outros.

Neste trabalho houve três razões para ser utilizado sistematicamente o modelo de Theis (1935), a aproximação de Cooper-Jacob (1946) e o método da recuperação de Theis (Driscoll 1986), para o cálculo da transmissividade (T) [ver artigo [7] Carvalho *et al* 1995 do cap III]: (i) a constatação de que é possível obter bons ajustes para períodos de bombagem relativamente prolongados (6 horas, no mínimo, no caso da Zona Centro-Ibérica); (ii) o método da recuperação de Theis é facilmente realizável em furos de baixa tecnologia no final de extracções com “air-flow”; e, (iii) o facto de se tratar dos modelos de que há maior experiência a nível mundial, sendo, por isso, mais fácil estabelecer comparações e regionalizar a informação.

Portanto, nos trabalhos que conduziram a esta dissertação, os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos através da utilização de aproximações ao modelo contínuo equivalente (CFCFF 1996, Bitzer *et al.* 2001) e, apenas num caso, artigo [14] do capítulo IV, se utilizou um modelo de porosidade dupla no campo hidromineral de Vilarelho da Raia.

Pensa-se que a aproximação contínua é suficiente ao nível da caracterização geral, como a que se pretendeu fazer no capítulo III para as águas “normais” e no capítulo IV para as águas minerais. Nas situações de bombagem praticadas, na esmagadora maioria das situações, o sistema hidrogeológico, claramente para além das dimensões mínimas do Volume Representativo Elementar, responde de forma similar ao do modelo poroso. Contudo, esta aproximação — por razões conceptuais e práticas — deve ser usada com a maior prudência para analisar comportamentos de longo prazo. Vejam-se, por exemplo,

Carvalho et al 2004, artigo [7] (do capítulo III), Carvalho (2000), artigo [20] e Carvalho (1996), artigo [21] (do capítulo IV). Opção similar é reportada por Atobrah (1985) para ensaios em Accra Plains, Ghana. Tudo indica que no futuro esta aproximação de longo prazo ganhará se for feita com recurso aos modelos de evolução da derivada da transmissividade (Horne 1997), hoje já disponíveis comercialmente.

A circulação hídrica subterrânea é tendencialmente do tipo não confinado na zona superior passando a semi-confinada e confinada nas zonas intermédia e inferior e os caudais são geralmente mais importantes na base da zona intermédia, conforme foi verificado por Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1987, 1988, 1989) e se apresenta em Carvalho (1993), artigo [8], do capítulo III.

Na Zona Centro-Ibérica a maioria dos ensaios de caudal interpretados ajustou-se bem ao modelo de Theis para aquíferos confinados. No entanto foi verificado num ou noutro local de rochas graníticas, em maciços muito alterados do Noroeste de Portugal, onde existem furos na zona superior até 20 m e outros captando apenas abaixo dos 90 m, que ao fim de várias semanas de bombagem dos níveis inferiores as influências drenaram por completo a zona superior.

Nas unidades cristalinas pode generalizar-se o funcionamento hidráulico seguinte (Lloyd 1999): (i) um subsistema livre instalado nos alteritos com transmissividade baixa e coeficiente de armazenamento apreciável, e, (ii) um subsistema semi-confinado instalado a maior profundidade com transmissividade elevada e baixo coeficiente de armazenamento, conforme referido em Carvalho (1993), artigo [8] no capítulo III. A superfície livre do subsistema superficial é próxima da superfície piezométrica da do aquífero profundo, podendo estar acima ou abaixo consoante a altitude relativa das zonas de recarga ou o período de recarga/descarga.

A bombagem do sistema profundo provoca uma influência espacial importante, deprime a piezometria e induz a drenância da água do subsistema superior para o inferior. Por isso em termos de captação não há vantagem em colocar os tubos-ralo no subsistema superior em camadas com pequena transmissividade que não fornecem senão caudais reduzidos. A colocação dos tubos-ralo apenas no subsistema inferior com adequado maciço artificial de seixo,

assegurará que a água entrará para o subsistema inferior mais tarde ou mais cedo e melhorará o funcionamento da captação para tempos de bombagem prolongados. Além disto esta solução aumenta o rebaixamento disponível e não há tubos-ralo a descoberto.

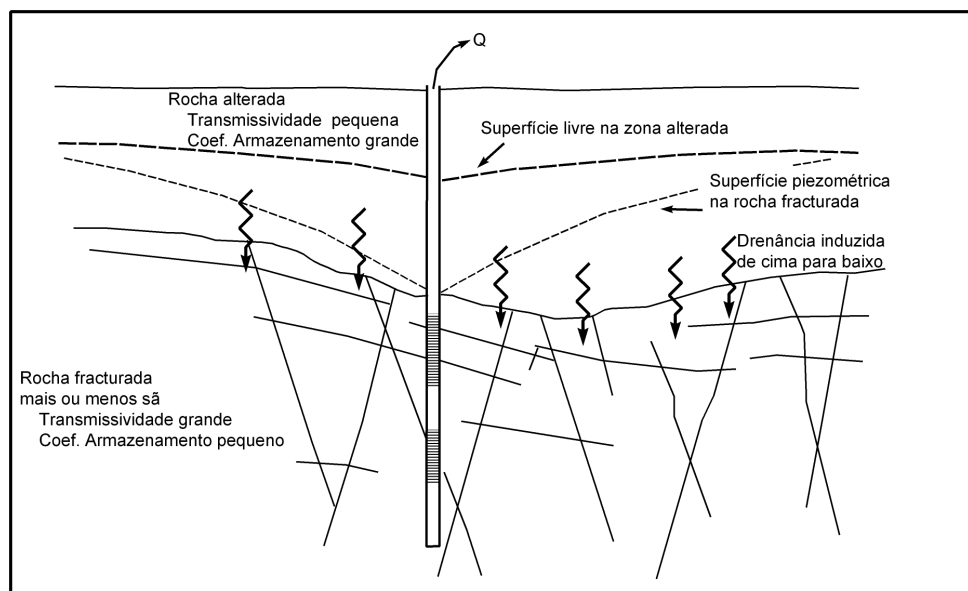


Fig II-7: Drenância vertical da zona alterada para a zona fracturada, induzida por bombagem (adaptado de Lloyd 1999).

4.5. Avaliação das condições de recarga

A avaliação das condições de recarga contemplará, a nível de estudo prévio, a análise da possível zona de contribuição do furo (ou furos) de pesquisa e captação a realizar, considerando um coeficiente de infiltração que se considere razoável.

Poderão ser considerados coeficientes de infiltração da ordem de 10%, ou menores em cenário de seca extrema, conforme proposto por Carvalho *et al.* (2000), artigo [9] do capítulo III. Deverão ser tidos em conta o clima, a geomorfologia, a litologia e a tectónica. Particularmente para bacias pequenas em zonas montanhosas, isto é com fortes gradientes, são expectáveis importantes variações sazonais de caudal (Krásny 1999). Esta avaliação, tantas vezes negligenciada, pode só por si fazer abortar um projecto se declaradamente os recursos renováveis inferidos forem inferiores às necessidades.

4.6. Factores de favorabilidade e indicadores de prospecção

Foi anteriormente referido que a circulação de água subterrânea em rochas cristalinas está condicionada à existência de estruturas geológicas que governem a ocorrência de funções transmissiva e capacitiva significativas que permitam a respectiva exploração de forma adaptada às necessidades do utilizador.

Essas estruturas geológicas são factores de anisotropia ou heterogeneidade geradoras de conectividade no reservatório geológico e correspondem principalmente a falhas, zonas de cisalhamento, contactos geológicos, filões, alternâncias de rochas de deformação frágil e zonas de alteração intensa. São essas estruturas geológicas, bastas vezes enumeradas, que o hidrogeólogo prospector procura, pois é nelas que se encontram eventuais zonas de circulação e armazenamento de água.

Os geólogos de petróleo, com atitude mental e metodologias de prospecção e pesquisa semelhantes às dos hidrogeólogos, procuram estruturas de acumulação de petróleo e de gás natural que designam por “oil traps” (Nelson & Nelson 1967, Michel & Fairbridge 1980, Kingdom Drilling 2004). “Trap” pode ser traduzido por armadilha ou ratoeira ou até trapa. Assim, há total similitude funcional, a nível da prospecção que não propriamente de morfogénese e de funcionamento hidráulico (Ingebritsen & Sanford 1998), entre as “oil traps” dos geólogos do petróleo e as estruturas hidrogeológicas produtivas dos hidrogeólogos. Por isso no artigo [3] Machado Lima *et al.* (1985), retomando a terminologia (“pièges” estratigráficas, petrológicas e estruturais) de Picard (1953), denominam por “armadilhas hidrogeológicas” todas as estruturas, que na óptica do hidrogeólogo prospector, são condutoras de água subterrânea.

Mais recentemente Bisson & Leher (2004) utilizam inequivocamente a expressão “water trap” a propósito de estruturas complexas em unidades do substrato cristalino capazes de favorecer a condução e armazenamento de água subterrânea para uso humano. Adicionalmente, é agora comum (*e.g.*, Gunter & Bachu 2001) a utilização da designação “armadilha hidrogeológica” a propósito dos locais adequados em bacias sedimentares profundas para a sequestração de CO₂. Nesta dissertação, e artigos nela incluídos, a designação **armadilha hidrogeológica** foi usada, na óptica do hidrogeólogo prospector, no sentido de

estrutura hidrogeológica em rochas cristalinas que, servindo ou não como indicador de prospecção, permite a circulação e o armazenamento de água subterrânea.

O enquadramento geral da prospecção e pesquisa hidrogeológica é controlado pela procura, isto é, torna-se indispensável, na fase de estudo prévio, caracterizar exactamente os objectivos que o projecto se propõe suprir: que tipo de água, onde, com que caudal e com que periodicidade de utilização.

A grande preocupação seguinte é a caracterização geológica, hidrodinâmica e hidroquímica dos aquíferos que neste caso estão instalados fundamentalmente em descontinuidades da rocha. Trata-se então de avaliar as características do reservatório que condicionam a circulação da água subterrânea, isto é, as armadilhas hidrogeológicas existentes. É também necessário conhecer a forma e a quantidade como em termos médios se faz a recarga na área.

O conjunto de factores geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos que podem influenciar positivamente o comportamento das formações e o seu funcionamento hidráulico no espaço, à escala regional e local, e no tempo, podem ser designados como **factores de favorabilidade**. São factores de favorabilidade a precipitação, a taxa de infiltração, a infiltração suposta, certas feições geomorfológicas, as armadilhas hidrogeológicas e outros elementos mais ou menos credíveis revelados pelo inventário hidrogeológico ou pela busca bibliográfica (ver figura II-8)

A análise da existência ou do comportamento dos factores de favorabilidade nas condições locais ocorrentes na área do projecto conduz a que sejam utilizados os **indicadores de prospecção**. Como o nome sugere, indicadores de prospecção são estruturas geológicas, geomorfológicas ou outras, bem localizadas ou simplesmente inferidas por fotointerpretação, geofísica, inventários hidrogeológicos, etc. que serão o fio condutor para o lançamento dos trabalhos de pesquisa e captação.

Os indicadores de prospecção permitindo indiciar no espaço, a três dimensões, a localização de armadilhas hidrogeológicas activas, isto é, produtivas, lançam as bases, a nível do reservatório geológico, para a elaboração

do modelo conceptual dos locais onde vão ser realizados furos de pesquisa e eventual captação.

Factores de Favorabilidade Escala local e regional	Indicadores de prospecção Escala local
Precipitação Recarga suposta Taxa de infiltração Bacia hidrogeológica – Litologia Bacia hidrogeológica – Tamanho Bacia hidrogeológica – Área Bacia hidrológica – Linhas de água permanentes Bacia hidrológica – Área Morfologia – Cabeços Morfologia – Contrastes topográficos em zonas aplanadas Morfologia – Escarpas alinhadas Morfologia – Vales Morfologia – Vales perpendiculares à xistosidade Morfologia – Encostas Litologia – Alternâncias Litologia – Filões, filonetes Litologia – Tipo Alteritos – Espessura Alteritos – Extensão Alteritos – Tipo Tectónica – Estruturas sinclinais Tectónica – Falhas normais Tectónica de regime distensivo Fracturação – Diaclases húmidas Fracturação – Extensão Fracturação alimentada por linhas de água e albufeiras Fracturação – Densidade Lineações – Desenvolvimento lateral Lineações – Extensão Nascentes – Ocorrência Nascentes – Densidade Posição da superfície livre Posição do nível piezométrico Zonas húmidas Densidade de nascentes e poços Caudais de exploração Caudais de furacão Transmissividades medianas Anomalias geofísicas e geoquímicas	Armadilhas hidrogeológicas Armadilhas hidrogeológicas supostas Armadilhas hidrogeológicas inferidas de anomalias geofísicas ou geoquímicas Evidências de circulação de água subterrânea Referências históricas da ocorrência de água Outros eventuais factores de favorabilidade

Fig II-8: Factores de favorabilidade e indicadores de prospecção

A figura II-9 mostra uma síntese das armadilhas hidrogeológicas comuns em rochas cristalinas.

Em estudos de prospecção são muito usados os indicadores geomorfológicos, litológicos e tectónicos. Já nos referimos ao indicador topografia no presente capítulo, insistindo-se aqui que deve ser usado com muita circunspecção pois é muito frequentemente sobreposto por factores litológicos e de recarga.

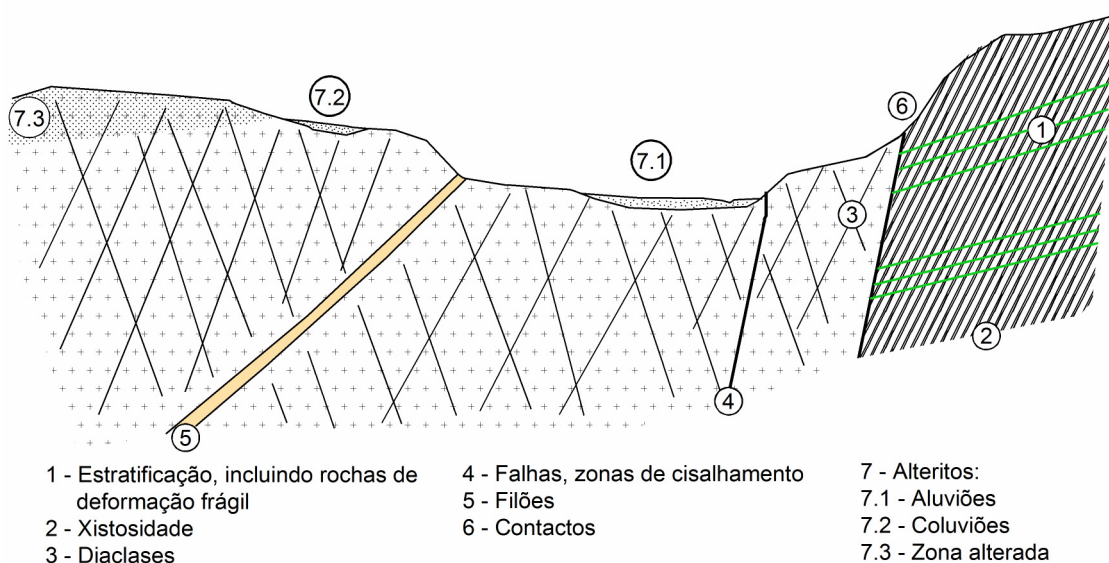


Figura II-9: Armadilhas hidrogeológicas em rochas cristalinas.

A figura II-10 é um exemplo de uma ficha usada num programa de desenvolvimento regional em Trás-os-Montes (Carvalho 1993, artigo [8] deste capítulo) para registo dos indicadores de prospecção.

A figura II-11 mostra o papel que podem desempenhar os indicadores tectónicos na detecção de zonas favoráveis para a realização de furos de pesquisa e corresponde à mesma população de 170 furos da Zona Galiza Trás-os-Montes analisada no artigo [10] Carvalho *et al* 2005 do capítulo III. Verifica-se que os caudais de perfuração médios e medianos são muito mais elevados em furos situados sobre cavalgamentos que os restantes. Já os situados sobre contactos não tectónicos não revelam melhoria substancial em relação aos localizados em rochas metassedimentares sendo, no entanto, superiores aos das rochas graníticas.

**Condições Hidrogeológicas na Captação AC _____
(Previsão)**

ÁREA REPRESENTATIVA _____

1. LOCALIZAÇÃO EM:

Talvegue Largura média _____ m

Vale Aberto Vale encaixado

Planalto Cabeço Bordo Parte central (Distância à linha de base: _____ m)

Encosta

2. CRITÉRIO DE IMPLANTAÇÃO:

	Fotointerpret.	Conf. no campo	Conf. Geofísica	Núcleo	Bordo
Lineação	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fractura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nó Tectónico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contacto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Filão	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diaclase muito importante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Faixa muito alterada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aluviões / Bacia de enchimento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Outros _____					

3. FORMAÇÕES A ATRAVESSAR:

a)

Aluviões <input type="checkbox"/>		Com calhaus <input type="checkbox"/>
Terraços <input type="checkbox"/>		Arenosas <input type="checkbox"/> Argilosas <input type="checkbox"/>
Coluviões <input type="checkbox"/>		Espessura provável _____ m
Depósitos de vertente <input type="checkbox"/>		
Outros _____		

b) Ganitóides do tipo _____

Metavulcanitos Quartzitos Calcários

Micaxistos Gnaisses

Anfibolitos Serpentinóis

Xistos Grauvaques

Filonetes de quartzo Pórfiro Pegmatito Rocha básica Lamprófito Aplito

Fig II-10: Ficha para registo de indicadores de prospecção para implantação de furos de pesquisa e eventual captação.

Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1989), Costa Pereira (1990) e Pereira (1992, 1999) evidenciaram a importância dos filonetes de quartzo como indicadores de prospecção. Este papel positivo parece mais potenciador nos

granitos que em rochas metassedimentares conforme se mostra na figura II-11. Em rochas metassedimentares, longe dos grandes eixos tectónicos, podem não corresponder a mais do que a quartzo de exsudação, dando corpos sem continuidade e, portanto, sem conectividade hidráulica, como se mostra na Figura II-12. Nesta figura são apresentados os caudais de perfuração na população atrás referida de Trás-os-Montes considerando separadamente as populações de rochas metassedimentares e de xistos, fora dos grandes cavalgamentos regionais.

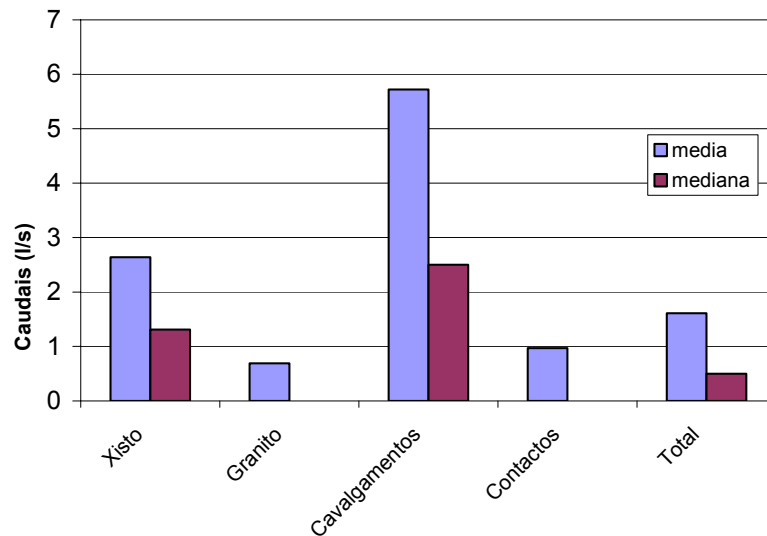


Figura II-11: Caudais máximos de perfuração em contactos geológicos e estruturas do tipo cavalgamento em Trás-os-Montes.

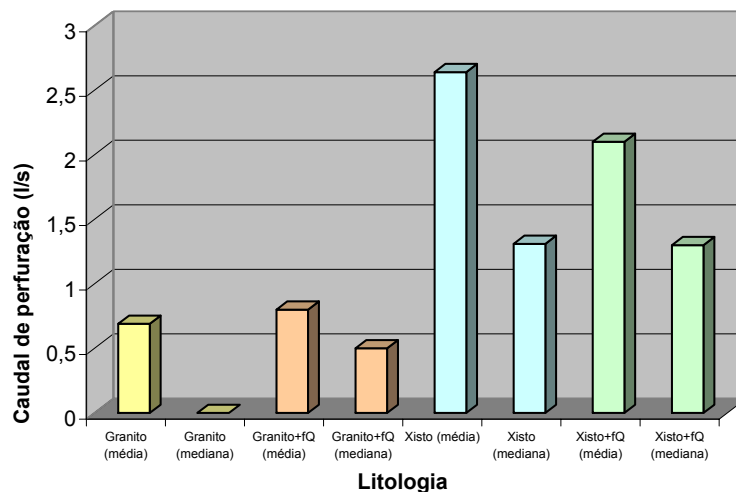


Figura II-12: Influência de filonetes de quartzo no caudal de furos verticais em Trás-os-Montes.

4.7. Técnicas e métodos da prospecção e pesquisa

Foi referido que metodologicamente é habitual abordar a prospecção e a pesquisa de águas subterrâneas a dois níveis espaciais sucessivos: (i) a prospecção estratégica, de características regionais, e, (ii) a prospecção tática, de carácter local.

Tenha-se em atenção que a investigação bibliográfica, especialmente referências sobre a região em estudo, é tarefa relevante. É fundamental, também, o registo de todas as fontes orais (Cortez 1978) de conhecedores dos locais em estudo, tais como pastores, vigários e outras personalidades da região. Fazer bem o trabalho de casa antes de avançar para o campo é indispensável.

As principais técnicas utilizadas nas investigações no Maciço Antigo Português foram as seguintes:

Topografia

As investigações hidrogeológicas exigem a utilização de uma boa carta topográfica. Para investigações estratégicas em Portugal é vulgar usar-se a cartografia à escala 1/25.000 do Instituto Geográfico do Exército ou ampliações desta à escala 1/10.000 que ainda oferece uma definição razoável, dependendo da data de edição. Investigações táticas à escala local obrigam à realização de levantamentos topográficos específicos, se possíveis ligados à Rede Geodésica Nacional. Escalas de trabalho da ordem de 1/1.000 a 1/2.000 são geralmente suficientes mas pode haver necessidade de bases mais pormenorizadas. Uma base topográfica adequada é indispensável pois será sobre ela que, camadas sucessivas de informação serão lançadas posteriormente. Sistemas de Informação Geográfica (SIG) constituem ferramentas novas à consecução desta tarefa (Singhal & Gupta 1999, Almeida *et al.* 2004).

Projectos de captação falham porque não é possível implantar, com rigor métrico, as estruturas potencialmente produtivas, isto é, os indicadores de prospecção que foram utilizados. Não é possível realizar, com êxito, prospecção, pesquisa e captação de águas subterrâneas sem cartografia adequada.

Cartografia hidrogeológica e inventário hidrogeológico

Não há prospecção e pesquisa de águas subterrâneas sem uma carta geológica. É necessário, portanto, lançar mão de estudos de geologia regional e, se inexistentes, realizar estudos de cartografia de carácter local. Na caracterização e descrição geológica pormenorizada das áreas recorre-se, em regra, às técnicas básicas da geologia de campo, da geologia estrutural e da hidrogeologia aplicada (e.g., McClay 1987, Ferrer & González de Vallejo 1999, Fetter 2001, Assaad *et al.* 2004).

A prospecção de água neste tipo de ambientes geológicos exige um registo rigoroso dos materiais e estruturas geológicas e uma interpretação clara dos factores de favorabilidade, futuros indicadores de prospecção do local. A implantação exige, no mínimo, um *croquis* onde a estrutura geológica simples ou complexa apareça registada a escala conveniente. É essencial interpretar as unidades geológicas e geomorfológicas em termos de hidráulica subterrânea, por isso há que descodificar as unidades geológicas e tentar transformá-las em unidades hidrogeológicas (Struckmeier & Margat 1995), o que nem sempre é possível com os meios disponíveis. Em hidrogeologia de rochas cristalinas em que o que se procura é a singularidade e o excepcional, saber cartografar a escalas de pormenor pode fazer a diferença.

Em certos casos, na ausência de critérios hidrogeológicos é recomendável recorrer-se a outras técnicas como as utilizadas correntemente na Geologia de Engenharia e na Geotecnia de maciços rochosos e terrosos. O mapeamento do grau de fracturação e de alteração usando critérios da geologia aplicada à geotecnia e à hidrogeologia propostos, especialmente, pela ISRM [International Society of Rock Mechanics] (1978, 1981), IAEG [International Association Engineering Geology] (1981a,b, 2005), GSE [Geological Society Engineering Group Working Party Report] (1995), Struckmeier & Margat (1995) e CFCFF [Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow] (1996), servem para uniformizar a caracterização da amostragem e, em afloramento, para definir blocos ajudando assim a delinear estruturas hidrogeológicas produtivas. Esta metodologia obriga o hidrogeólogo prospector a fixar-se no terreno, a ser sistemático e, assim, produzir mapas hidrogeológicos baseado em critérios qualitativos e quantitativos. Contudo, exige a existência de bons afloramentos

para a caracterização dos maciços. Um exemplo de aplicação desta técnica, na região de Fafe (Carvalho & Chaminé 2004, artigo [5] e Tarh 2001), está representado na figura II-13.

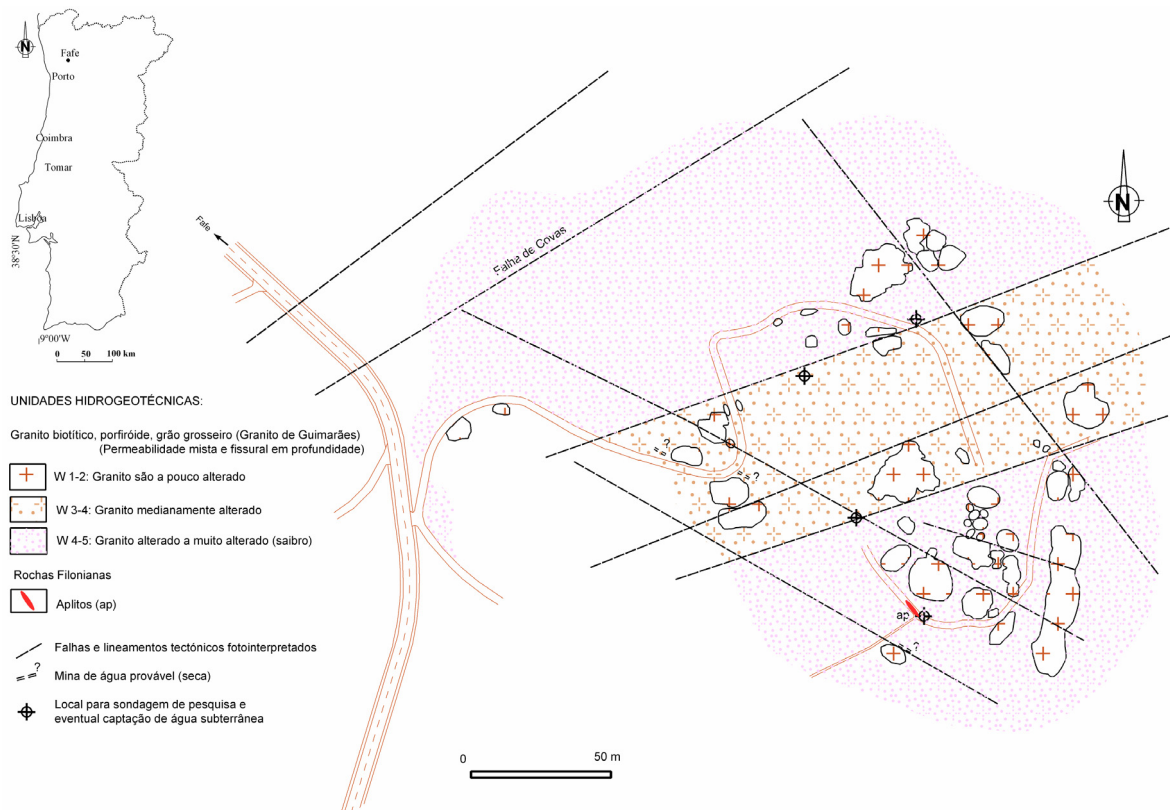


Figura II-13 Fafe – Aplicação de cartografia geotécnica a estudos de prospecção hidrogeológica na região de Fafe (adaptado de TARH, 2001)

O inventário hidrogeológico, que deve ser executado enquanto se realiza o reconhecimento geológico e a cartografia hidrogeológica, é uma técnica básica que fornece excelentes resultados se for executado com o necessário profissionalismo. Fixa os técnicos ao terreno e obriga-os a contactar com os locais e as pessoas que contam as histórias mais fantásticas sobre a água e outros temas. É necessário observar, ouvir, triar, meditar e aprender. Só depois de se apreender a ciência viva local se está em condições de partir para novos desafios. Não é um método barato: por dia não será fácil “fazer” mais de 6 pontos no terreno e é fundamental levar fichas apropriadas (figura II-14).

Nº de Inventário: _____ Designação: _____ Tipo: _____



Planta de localização



Fotografia

Folha nº: ____ da carta topográfica 1/25000

Coordenadas (km): M _____ P _____

Água normal Água mineral Reconhecida oficialmente

Cota (m): _____

Condições de acesso: _____

Proprietário: Câmara Municipal Outro _____

Descrição sucinta:

Uma única descarga Um grupo de nascentes Área de descarga: ____x____ m²
Nascente permanente Nascente temporária

A água emerge através de:

Tubo de diâmetro _____ Solo
Zona alagada Rocha

Geomorfologia

Planalto Encosta Talvegue Observações: _____

Enquadramento geológico e hidrogeológico:

Carta Geológica: _____ Escala: _____

Carta Hidrogeológica: _____ Escala: _____

Nível estratigráfico: _____

Unidade hidrogeológica local ou regional: _____

Litologia: _____

Armadilha hidrogeológica suposta: _____

Qualidade da água e caudal

Data __/__/__ hora __:__ h

Cheiro: _____ Cor: _____ Turbidez: _____

Outras observações: plantas animais algas incrustações

Caudal: _____ m³/hora (medido com _____)

Temp. da água (°C): ____ Temp. do ar (°C): ____ pH: ____ Condutividade eléctrica (µS/cm): ____

Amostra para análise laboratorial nº _____

Utilização

Consumo humano Animais Uso agrícola Uso industrial

Estruturas de desenvolvimento

Construção antiga Construção recente

Data __/__/__ Observações: _____

Furos

Designação do construtor: _____ Outra designação: _____ Data de construção: _____

Profundidade (m): _____ Diâmetro: _____

Entubado Tipo de entubamento _____ Desentubado

Nível estático (m): _____ Referido a: Cabeça Solo Nível dinâmico (m): _____

Equipado com bomba: Sim Não Tipo: _____ Profundidade (m): _____

Caudal (m³/hora): _____ Potência: _____ kW

Tipo de caseta: _____

Observações: _____

Preenchido por: _____ Data: _____

Figura II-14: Exemplo de uma ficha do inventário hidrogeológico usualmente usada no terreno em campanhas de prospecção hidrogeológica.

É habitual o inventário hidrogeológico ser acompanhado pela realização de análises físico-químicas expeditas de campo de, pelo menos, a medição sistemática do pH, de condutividade eléctrica e da temperatura que permitem uma caracterização inicial sucinta dos principais tipos de circulação subterrânea.

Os exemplos apresentados nos artigos [1], Carvalho (1979) e [6] Carvalho et al (2005) inclusos neste capítulo II, mostram como os inventários podem ajudar a caracterizar certas situações e a inferir ou confirmar modelos. Noutras situações, como na da figura II-15, o inventário hidrogeológico, só por si, pode determinar decisões definitivas. No concelho de Resende, na margem esquerda do Rio Douro, com um simples mapa de isocondutividades da água dos poços inventariados foi possível confirmar fontes de contaminação pontual permanente que condicionaram a localização de uma captação para uma unidade da indústria alimentar.

Nesta área o relevo granítico é acidentado com declive para Norte, em direcção ao Douro sendo o sentido de escoamento no sentido NW. São visíveis no canto inferior esquerdo valores altos (mais de $140 \mu\text{Scm}^{-1}$) correspondentes a contaminação resultante de uma povoação sem saneamento básico. Além disso, na parte central detecta-se o avanço de uma pluma de contaminação (com $80 \mu\text{Scm}^{-1}$) proveniente de um foco poluente permanente, em direcção ao local onde se pretendia fazer a nova instalação. As águas normais da área têm $50 \mu\text{Scm}^{-1}$.

Em S. Pedro do Sul (Carvalho *et al* 1995), artigo [19] do capítulo IV), Granjão, Peso da Régua (Espinha Marques *et al* 2001, artigo [15], Espinha Marques *et al* 2001, artigo [16] e Marques *et al* 2003, artigo [17] do capítulo IV) e Touca, em Alpedrinha, Fundão (ver o presente capítulo II), o inventário hidrogeológico revelou manifestações de águas minerais não citadas anteriormente na bibliografia. No sector Romanas-Sabroso, Vila Pouca de Aguiar, um indício fornecido por populares (“os antigos diziam que havia água a borbulhar no rio”) permitiu o lançamento de acções de prospecção e pesquisa que culminaram numa nova captação de água mineral, conforme exemplo apresentado no capítulo IV.

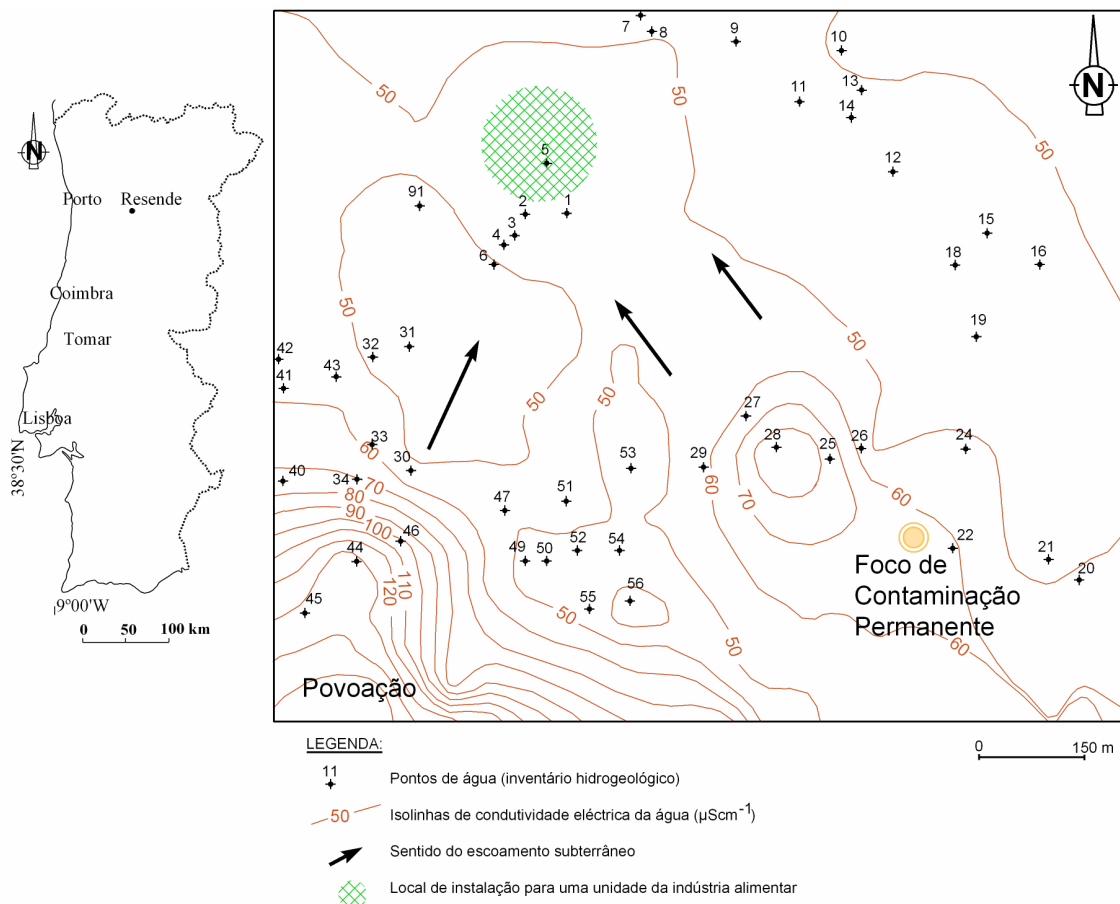


Fig II-15: Mapa de condutividade eléctrica da água subterrânea numa área do concelho de Resende

Fotografia aérea e detecção remota

A fotografia aérea estereoscópica e, mais modernamente, as técnicas de detecção remota são consideradas auxiliares valiosas nos problemas de prospecção de água (e.g. Lloyd 1999, Larsson 1984, Singhal & Gupta 1999, Ricci & Petri 1965).

Nas investigações realizadas na Zona Centro-Ibérica foi utilizada a fotografia aérea na linha do artigo [1] (Carvalho 1979) do presente capítulo II, que pode ser considerado um caso representativo. Geralmente foi usada a cobertura à escala próxima da 1/25.000 do Instituto Geográfico do Exército, embora existam outras coberturas nacionais disponíveis. A nível da detecção remota, a carta de estruturas geológicas, à escala 1/500.000, interpretadas por critérios fotogeológicos da autoria de Conde (1983) é um documento valioso em qualquer

estudo regional do nosso território e foi utilizada com frequência para melhor entendimento do modelo tectónico regional.

De acordo com Singhal & Gupta 1999) a fotografia aérea permite a detecção dos aspectos seguintes: (i) indicadores de primeira ordem, isto é, directos: rios, canais, lagos, nascentes, poços; e, (ii) indicadores de segunda ordem, isto é, indirectos: topografia, geomorfologia, zonas alteradas, litologia, estrutura geológica, lineamentos tectónicos, fracturas e diaclases, falhas e zonas de cisalhamento, tipos de solo, humidade do solo, vegetação, características de drenagem e ainda estruturas geológicas específicas como filões ou diques, depósitos aluvionares, etc.

Muitas destas possibilidades têm aplicação em hidrogeologia de rochas cristalinas. No caso da Zona Centro-Ibérica a ocupação antrópica mascara muitas feições hidrogeológicas que poderiam ser interessantes mas a fotointerpretação continua sendo um instrumento precioso.

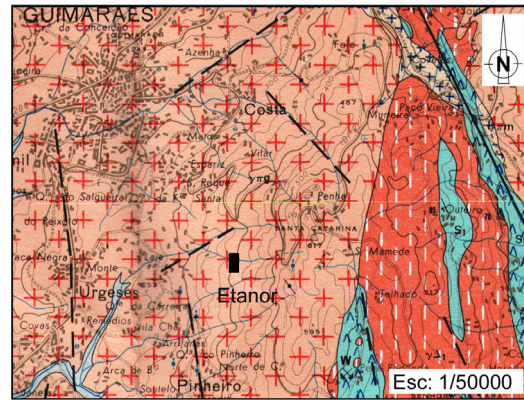
A interpretação da fotografia aérea estereoscópica é um complemento robusto para análise da geomorfologia. Pode considerar-se, aliás, que a vista de pássaro que a fotografia aérea permite é única e permite, num só olhar — e numa visão de conjunto — ler e interpretar aspectos que de outra forma seria quase impossível detectar. Na mesma linha inserem-se as ferramentas hoje disponíveis na Internet, como o Google Earth™.

Um problema clássico de interpretação da fotografia aérea em termos de aplicação à prospecção de água subterrânea em rochas cristalinas é a implantação final no terreno. Com escalas próximas de 1/25.000, dificilmente se consegue precisão superior a 25 m. A utilização de escalas mais detalhadas rouba geralmente a necessária visão de conjunto. Ora, 25 m em hidrogeologia de rochas cristalinas não é precisão suficiente. Este facto suporta a vantagem da utilização de meios complementares de diagnóstico, nomeadamente a prospecção geofísica que pode trazer uma definição mais detalhada se convenientemente assinalada no terreno.

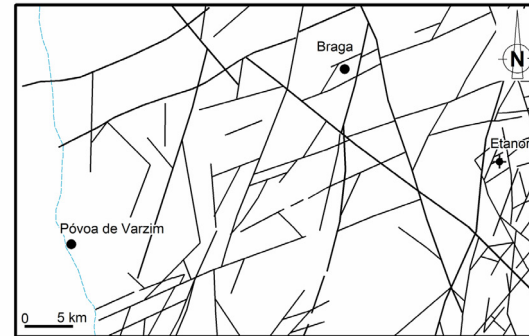
Uma questão que se coloca com alguma frequência é que o trabalho a diferentes escalas pode evidenciar lineamentos tectónicos e, ou anomalias de orientações nem sempre concordantes. É prudente, nesse caso, considerar como

mais representativa a atitude que decorrer da utilização de levantamentos geofísicos que forem julgados fiáveis ou de indicadores de prospecção geológicos e litológicos inequívocos.

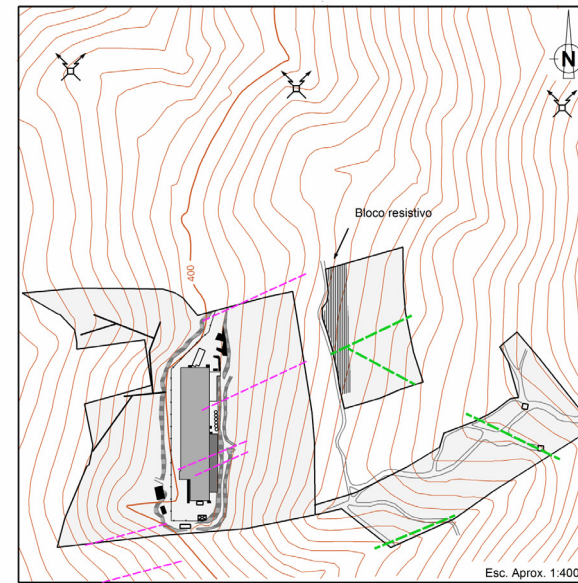
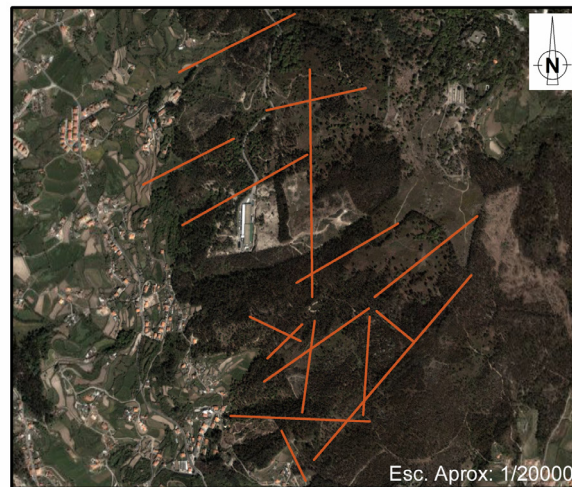
Um caso típico é o da região de Santa Catarina (Guimarães). A carta de lineamentos tectónicos de Conde (1983) apresenta estruturas nas proximidades com direcções NW e N-S; a folha 9- B (Guimarães) da Carta Geológica de Portugal (Montenegro de Andrade *et al.* 1986), as direcções NNE e ENE; a fotografia aérea à escala 1/25.000, orientações N-S e NE. Um levantamento geoelectrico com perfis de pequena penetração (Geoprisma 1994) mostrou claras anomalias ENE. Higuera Gil *et al.* (2001) e Geosurveys (2003) realizaram, mais tarde, na zona envolvente, dois novos blocos de resistividade com AB=600m que confirmaram a direcção ENE e definiram nova estrutura WNW. Este exemplo, apresentado na figura II-16 confirma como é complexa a rede de fracturação e como tem de prevalecer a informação que no terreno é manifestada com maior rigor e expressão. Acrescente-se, por isso, que os perfis geofísicos devem ficar convenientemente assinalados no terreno, ou então haver uma georreferenciação com GPS, que neste momento, para terrenos sem grande cobertura vegetal arbórea é perfeitamente fiável, até com equipamentos modestos.



Adaptado de: Montenegro de Andrade et al., 1996



Adaptado de: Conde, 1983



— Anomalia de Baixa Resistividade (Geoprisma, 1994)
 — Anomalia de Baixa Resistividade (Higuera Gil et al. 2001; Geosurveys, 2003)

Figura II-16: Efeito de escala na detecção da fracturação (adaptado de Conde 1993, Geoprisma 1994, Higuera Gil et al. 2001, Geosurveys 2003).

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em estudos de base em hidrogeologia, incluindo dados da detecção remota com a necessária calibração de terreno, como os que estão em curso na Serra da Estrela (Almeida *et al.* 2004, Espinha Marques *et al.* 2005, Afonso *et al.* 2005 artigo [13] deste capítulo) podem, com certeza, dar forte contributo ao conhecimento do território e às próprias técnicas de investigação convencionais, pela visão integrada e multidisciplinar que proporcionam. Espera-se que ajudem a resolver problemas concretos ligados ao circuito hidromineral de águas termominerais (Unhais da Serra e Manteigas) e das águas “normais” no Parque Natural da Serra da Estrela.

Prospecção geofísica

A circulação de águas subterrâneas em rochas fissuradas como as que ocorrem na Zona Centro-Ibérica é favorecida pela ocorrência de singularidades litológicas, de fracturação ou outras. O que se procura nestes meios, ao nível do reservatório, é exactamente a ausência de homogeneidade e de isotropia, isto é, a diversidade de propriedades dos materiais geológicos.

A localização no espaço, e a três dimensões, de estruturas hidrogeológicas donde é possível extrair, de forma económica, água subterrânea, beneficia da realização de prospecção geofísica com os objectivos seguintes:

- (i) confirmar ou infirmar o modelo hidrogeológico sugerido por estudos anteriormente realizados (levantamentos geológicos e hidrogeológicos, estudos de fracturação com ou sem fotointerpretação, etc.);
- (ii) localizar no terreno a posição das estruturas geológicas que se procuravam ou outras inferidas pelos próprios resultados dos levantamentos geofísicos. Quer dizer, a geofísica procurará confirmar resultados de indicadores de prospecção anteriormente usados e vai constituir-se, ela própria, como novo indicador de prospecção num processo iterativo;
- (iii) se possível, antecipar indicadores da qualidade da água a captar.

Uma campanha de prospecção geofísica deve ser eficaz aos níveis da realização dos trabalhos de campo e da interpretação. Esta última, tanto quanto possível, deve ser realizada *no local da investigação* para adaptação sucessiva

das metodologias e das leituras. Nada mais desastroso do que uma operação sistematizada, “cega”, realizada por operadores não qualificados que não “sentem” as medidas. A eficácia duma campanha de geofísica pode igualmente ser aferida pela robustez e legibilidade das estacas deixadas no terreno ou formas indirectas de georreferenciação que permitam a posterior implantação de trabalhos de pesquisa e captação ou mesmo a reconfirmação da localização de eventuais anomalias.

A prospecção geofísica é uma ferramenta aplicada à geologia com uma capacidade muito maior para confirmar ou refutar hipóteses do que para estabelecê-las (Torres 2000). Daí a necessidade imperativa da existência de modelos conceptuais geológicos e hidrogeológicos prévios (suportados pelos factores de favorabilidade e indicadores de prospecção usados, que indiquem à geofísica os alvos a prospectar). Se possível deve usar-se dispositivos multidireccionais (*e.g.*, Brion & Lachaud 1982, Alte da Veiga 1999).

A investigação a vários níveis é também muito importante como forma de tentar avaliar a inclinação das estruturas a prospectar. Os artigos [1] Carvalho (1979), [2] Carvalho (1984), [3] Machado Lima *et al* (1985) e [5] Chaminé *et al* (2004) são exemplos de investigações a vários níveis e com vários dispositivos para tentar controlar essa dificuldade.

Torres (2000) refere que 65 a 70% dos métodos de prospecção utilizados no mundo de água são geoeléctricos e passa em revista a aplicabilidade dos métodos geofísicos em hidrogeologia, tal como Astier (1971) e Meyeir de Stadelhofen (1991). Fica claramente evidenciado o apoio que todos os métodos poderão dar à prospecção dentro da especificidade de cada um, sendo o seu emprego limitado apenas por razões económicas e também culturais.

A prospecção geoeléctrica é geralmente considerada como muito eficaz a nível da prospecção de água em meios fissurados, pois segundo (Brion & Lachaud 1982): (i) é um método pouco dispendioso, rápido e simples de realizar no terreno; (ii) a interpretação não necessita de grandes meios de cálculo e pode ser realizada no terreno antes do local ser abandonado; e, (III) permite a investigação vertical sob a forma de sondagem eléctrica vertical (SEV).

Torres (2000) analisando os resultados de investigação de cerca de vinte autores internacionais sugere a aplicabilidade das técnicas geoeléctricas às seguintes situações: (i) determinação da posição de falhas e seu rejeito; (ii) avaliação da espessura de coberturas impermeáveis; (iii) “avaliação” da litologia conhecendo a resistividade da água de imbibição; e, (iii) determinação da espessura de zonas alteradas.

Conforme refere Higuera-Gil *et al.* (2001) e se verifica nos artigos [1] , [2], [3], [5], atrás referidos, deste capítulo II e [14] Carvalho *et al* (1995), [15] Espinha Marques *et al* (2001), [16] Espinha Marques *et al* (2001), [18] Carvalho (1994), [19] Carvalho *et al* (1994), e [23] Carvalho & Silva (1988) do capítulo IV, a geofísica, e particularmente o método geoeléctrico das resistividades, no Maciço Antigo Português, tem aplicabilidade à análise hidrogeológica das situações seguintes, quer em águas normais quer em águas minerais:

- (i) espessura e natureza dos alteritos (Carvalho & Guedes 1978), incluindo neste contexto formações detríticas *in situ* ou não (rocha decomposta a muito alterada, coluvião, eluvião e aluvião)
- (ii) contactos geológicos
- (iii) falhas, fracturas, Diaclases e zonas de cisalhamento
- (iv) filões e diques
- (v) bandas de rochas de deformação frágil intercaladas noutras de deformação dúctil.

Alte da Veiga (1999) aplicou vários métodos de prospecção geofísica na região dos granitos de grão grosseiro da região de Gouveia-Seia, nomeadamente eléctricos (sondagens eléctricas, perfis com vários comprimentos de emissão, rectângulo, e tomografias), métodos electromagnéticos (VLF, VLF-R) e gravimetria. Estes levantamentos foram apoiados em levantamentos geológicos de pormenor tendo-se concluído que a fracturação detectada era primordialmente vertical e que terão sido localizadas as zonas com circulação de água preferencial. Estas zonas localizar-se-iam em espelhos de falha, na bordadura de zonas milonitizadas.

Dos exemplos apresentados neste capítulo II e no capítulo IV pode concluir-se que a prospecção geoelectrica abrange um conjunto de técnicas e métodos, de que há um grande somatório de conhecimentos e experiência há várias dezenas de anos e, que, em condições favoráveis, permite uma antecipação da qualidade da água que circula nas unidades geológicas. Esta afirmação é sobretudo válida para a prospecção pelo método das resistividades. “*La resistivité est la reine des méthodes*”, dizia há poucos anos o *EurGeo* Gerald Clément, figura emblemática da geofísica e da geologia francesa.

Carvalho (1994) e Carvalho *et al* (1994) artigos [18] e [19] do capítulo IV, e Lemos *et al.* (1992), citam um caso de aplicação do método gravimétrico à prospecção de recursos geotérmicos em S. Pedro do Sul no qual esta técnica se revelou de grande utilidade a nível estratégico. Um outro exemplo da aplicação da análise geológico-estrutural com geofísica aplicada a um contexto hidrogeológico de nó tectónico, é referido por Dias *et al.* (2000) para o pólo termomineral de Sangemil.

Algumas questões devem ser consideradas ao nível do projecto e da realização de campanhas de prospecção geofísica aplicadas à hidrogeologia e serão tratadas seguidamente com algum pormenor.

A adequação da profundidade de investigação

A profundidade de investigação dos métodos geofísicos deve ser tanto quanto possível semelhante à dos furos de pesquisa e eventual captação que se tem em mente realizar. Por exemplo, partindo dos estudos de investigação académica de Alte da Veiga (1999), e considerando que as estruturas na Zona Centro-Ibérica, em particular da região granítica de Gouveia-Seia, são preferencialmente verticais seria absurdo realizar investigações com os métodos de *Very Low Frequency* (VLF) ou georradar e, com base nelas, projectar uma sondagem de 500 ou 1000 m de profundidade. Por isso na Zona Centro-Ibérica as investigações reportadas nos artigos incluídos nos capítulos II e IV, particularmente quando se tratava de procurar locais de implantação de furos de água mineral, favoreceram a realização de rectângulos de resistividade com linhas de emissão AB que alcançaram 1200 m. Nestes casos, sempre que

possível, foram realizadas sondagens eléctricas prévias para controlo da penetração, recordando Astier (1971): a penetração no método geoeléctrico das resistividades varia entre $AB/(4 \text{ a } 12)$ sendo erróneo assumir aprioristicamente uma penetração de $AB/4$. Em prospecção de águas normais realizadas no âmbito desta dissertação o dispositivo mais comum alcançou AB de 300 ou 400 m, de acordo com as condições locais, inferido previamente com Sondagens Eléctricas Verticais (SEV), ver Machado Lima *et al* (1985), artigo [3] deste capítulo.

A oportunidade técnico-económica da realização de prospecção geofísica

Os actuais preços baixos dos furos de pesquisa e captação, na sequência do advento do método de perfuração com martelo de fundo de furo, tem retirado algum espaço a métodos indirectos como a geofísica e mesmo à prospecção hidrogeológica no geral.

Burgéap (1978) apresentou uma análise económica de vários esquemas simples de métodos de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos para países ACP (África-Caraíbas-Pacífico). Designadamente comparou a situação de implantação directa com a de vários cenários de prospecção, considerando várias taxas de insucesso. A conclusão foi a de que, admitindo uma taxa de insucesso residual final de 0 a 15%, o valor dos trabalhos de reconhecimento a efectuar não deverá ultrapassar 66 a 40% do custo da captação. Por esta razão tem-se procurado na Zona Centro-Ibérica, sempre que o grau de dificuldade e o volume de obra justificam a prospecção geofísica, que o pacote do custo hidrogeologia incluindo geofísica não ultrapasse o custo de um furo de captação, pois taxas de insucesso de 50%, sem geofísica, são relativamente frequentes. Convirá que esta aproximação limite só seja ultrapassada em casos devidamente justificados de consabida dificuldade geológica, em que não sejam conhecidos quaisquer indicadores de prospecção fiáveis.

O apoio da geofísica na diminuição do risco geológico de insucesso

Em termos de “hidrogeologia económica” um furo produtivo é o que satisfaz as necessidades previamente avaliadas em função dos critérios estabelecidos pela procura. Portanto, o sucesso de um furo de pesquisa e eventual captação tem de ser aferido em função das expectativas criadas. No caso do Maciço Antigo os seguintes valores indicativos são seguidos: (i) captação para abastecimento público, ou para consumo humano indiscriminado 200 l/habitante/dia; no entanto em meios rurais, essa captação pode ser significativamente mais baixa, (ii) captação para agricultura, 0,5 a 1,0 l/s/hectare (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal, 1987, 1988, 1989), e, (iii) captação para outros fins, valores a fornecer pelos promotores.

No caso de captação de águas minerais para termalismo, tudo depende da grandeza da actividade económica instalada, mas geralmente considera-se que a duplicação do caudal existente na captação tradicional já é um bom resultado, considerando os constrangimentos ambientais e de gestão desses aquíferos (ver capítulo IV). Quanto à actividade de engarrafamento de águas (águas minerais naturais e de nascente), hoje é difícil a essa indústria sobreviver com menos de 5 l/s, mas tudo depende, mais uma vez do nicho de mercado em que a marca se insere, ver também capítulo IV. A taxa de insucesso considerando estes critérios é variável e está mal aferida. Por exemplo, na Zona Centro-Ibérica, considerando uma população heteróclita de cerca de 62 furos de pesquisa e captação de águas minerais e de nascente, e como produtivos os que são explorados a mais de 0,5 l/s, com a utilização da geofísica a taxa de sucesso passou de 61% para 85% (ver Carvalho *et al* 1996a, artigo [21] do capítulo IV).

Os critérios de implantação

Um momento difícil para o hidrogeólogo prospectador é o da selecção do tipo de pesquisa ou de captação e respectiva implantação. Invariavelmente há hesitações, algumas noites mal dormidas, e a eterna sensação da falibilidade dos métodos, pois agudizam-se várias dificuldades a saber:

- **A definição horizontal e vertical dos métodos**

O tema da selecção final dos locais para implantação de furos de pesquisa e eventual captação é tratado nos artigos [3] Machado Lima et al (1985) e [5] Carvalho & Chaminé (2004), Brion & Lachaud (1982), CIEH (1984), Larsson (1984), Meyeir de Stadelhoen (1991), Wright & Burgess (1992), Singhal & Gupta (1999), Alte da Veiga (1999), Lloyd (1999), entre outros.

Para além da dificuldade em entender o significado hidrogeológico das anomalias geofísicas no contexto real, há que ter-se em conta que a definição dos métodos não é completa, nem a interpretação única, confundindo-se, por vezes, prospecção estratégica e prospecção táctica.

Assim, a nível de prospecção estratégica e no caso de prospecção geoelectrica, na África Ocidental (CIEH 1984) refere que as anomalias com 100 e 40 m de desenvolvimento horizontal seriam as de maior interesse hidrogeológico.

Droque *et al.* (1987), numa síntese da aplicabilidade da geofísica em hidrogeologia de rochas fissuradas, apresenta um esquema em que considera que o limite de detecção das técnicas usadas em prospecção não ultrapassa 7 m. Este facto é devido à própria natureza intrínseca dos métodos (compatibilização entre penetração e definição lateral, distância entre eléctrodos – passo entre as medidas) e também à necessidade de otimizar rendimento da operação. A definição vertical dos métodos varia com a profundidade (Astier 1971) o que torna ainda mais difícil a interpretação.

Uma boa sanja para a observação ao vivo dos indicadores de prospecção pode ajudar a resolver muitas questões, embora se tenha presente que a informação resultante de uma prospecção directa deste tipo se resume, apenas, ao topo superior da zona investigada, não ficando totalmente resolvida a incerteza em profundidade.

- **A dificuldade em estabelecer um modelo de circulação coerente**

Na maioria dos casos é possível estabelecer um modelo de circulação de água subterrânea em grande, atendendo à geomorfologia, à litologia e ao quadro tectónico regional, mas a incerteza é importante em relação ao modelo à escala do afloramento.

Para agravar esta situação, nem sempre há coerência completa entre os resultados de várias abordagens a diferentes escalas. Por outro lado, ainda, as interpretações dos modelos geofísicos, geológicos ou hidrogeológicas não são únicas e tudo isso tem de ser ponderado na hora da decisão. Em rigor, o hidrogeólogo prospector deve ter vários modelos conceptuais que adapta à medida que surgem novos dados e resultados. A interpretação não é única! Pode haver vários modelos que conduzem a soluções de perfuração e de captação diferentes.

Um caso correspondente a um programa de prospecção em curso é reportado no artigo [6] (Carvalho *et al.* 2005) referente à zona envolvente das Caldas da Cavaca (Aguiar da Beira). Na sequência dos estudos realizados, e de duas campanhas de geofísica de pequena penetração utilizando tomografias eléctricas, foram realizados, por agora, cinco furos de pesquisa de água normal. O índice Metros Caudal *bruto* (GMCI do artigo [10] (Carvalho *et al.* 2005) do capítulo III) é de 226 m³/s, a que corresponde uma transmissividade mediana do maciço, para furos de 100 m, da ordem de 0,4 m²/dia. Os furos foram realizados nos vales, ao longo dos principais eixos de fracturação, a menos de 350 m da emergência clássica de água mineral natural das Caldas da Cavaca. Apenas dois furos detectaram circulação subterrânea sendo que o RA5, o mais produtivo (2 l/s durante a perfuração), está situado na falha NNE (confirmada com prospecção geoeléctrica) que passa pelas termas, no cruzamento com uma estrutura NW bem materializada geomorfologicamente no terreno. A transmissividade neste ponto, obtida a partir do caudal específico, com a metodologia do artigo [10] do capítulo III e com ensaios de caudal, é de 2,3 m²/dia. A água (temperatura 21,8°C, condutividade eléctrica 344 µScm⁻¹, pH 8,1) revela mistura com as águas sulfúreas típicas da Cavaca. O outro furo “produtivo”, (o RA3) com 0,3 l/s de caudal de perfuração, situa-se cerca de 150m a Sul, na mesma falha NNE, mas apresenta água típica dos granitos com condutividade eléctrica de 80 µScm⁻¹. Não foi possível aproveitar esta pesquisa por instabilidade das paredes da perfuração. Uma nova tentativa (RA4) realizada à distância de 3 m do RA3 foi totalmente improdutivo. A transmissividade no pólo tradicional das Caldas da Cavaca (Espinha Marques *et al.* 2004) determinada a partir da interpretação de ensaios de caudal (Theis 1935) é de 83 m²/dia.

Os trabalhos vão prosseguir, conforme previsto, para captação de água normal com furos horizontais, em zonas onde o inventário hidrogeológico revelou circulação de águas hipossalinas do tipo das do furo RA3, na passagem da zona alterada (W₄₋₅) para rocha mais sã (W₁₋₂).

Este exemplo mostra como é complexa e evolutiva a caracterização dos modelos conceptuais hidrogeológicos, ao sabor da aquisição de novos dados. Neste caso, como se esperava, e conforme será comentado no capítulo IV, a pesquisa da água normal parece mais complexa que a da água mineral natural.

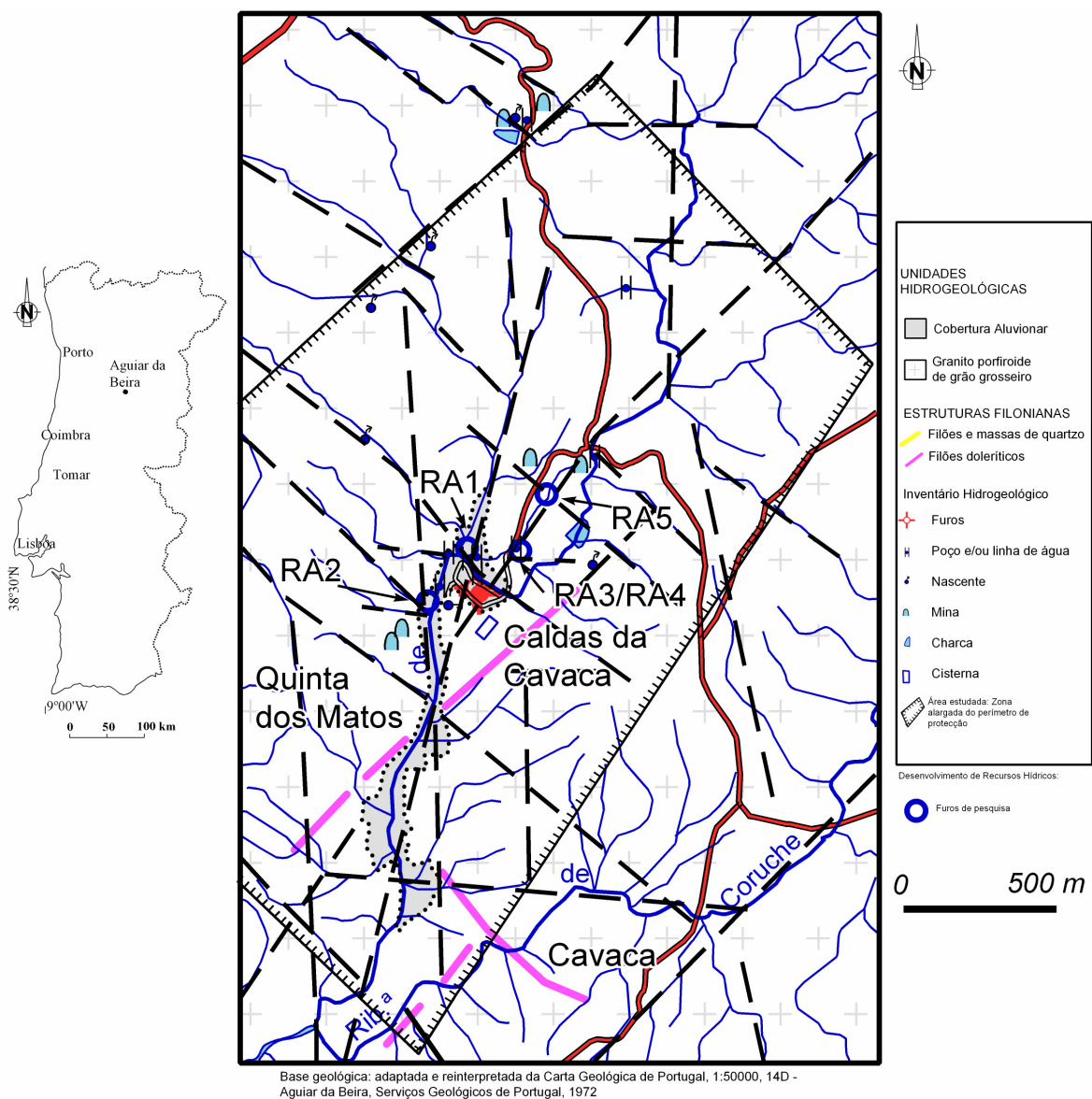


Figura II-17: Localização dos furos de pesquisa na área das Caldas da Cavaca (adaptado de Carvalho *et al* 2005).

Definição do tipo de pesquisa e captação e previsão dos caudais

Para além da localização da captação há que realizar o projecto dos trabalhos de pesquisa e captação. Este projecto é condicionado pelas características litológicas, estruturais, hidrodinâmicas e hidroquímicas previstas. Para isso, a previsão do tipo de captação, do respectivo acompanhamento hidrogeológico e dos ensaios de caudal a realizar, passa pela precisão do modelo hidrogeológico conseguido. Daí a necessidade de se comparar e sobrepor toda a informação num único desenho representativo da distribuição espacial e vertical inferida. A experiência mostra que este desenho deve permitir uma precisão na implantação do local de furação da ordem dos 5 m.

O hidrogeólogo projectista deve ter em atenção que, em rochas cristalinas da Zona Centro-Ibérica, podem ser realizadas outras captações para além do furo vertical, inclinado ou horizontal (Carvalho 1991) a saber: arranjos de nascente, galerias ou minas (hoje quase inteiramente substituídas pelos furos horizontais), poços, drenos horizontais, charcas ou chavancos e as obras mistas que a sua imaginação conceber. A obra de captação deve ser a que melhor se adapte ao modelo hidrogeológico e ao tipo de procura, considerando o critério de obtenção da água ao mais baixo custo possível para um tempo de vida da ordem de 30 anos (Harlan *et al.* 1989, Driscoll 1986).

O âmbito da prospecção e pesquisa está condicionado ao conhecimento que no estudo prévio se possa ter feito em relação ao tipo ou tipos de captação mais adequados para satisfazer a procura ao nível técnico-económico.

Tipos de captação em rochas cristalinas

Em hidrogeologia de rochas cristalinas podem ser considerados vários tipos de captação que serão aqui descritos apenas para salientar que deve haver uma interacção permanente entre os dados da prospecção e a tipologia da obra que pode ser realizada. Sabe-se que a tecnologia do furo vertical está disseminada, e é dominante, mas valerá sempre a pena meditar e comparar soluções alternativas, eventualmente com melhor desempenho e melhor adaptadas às condições locais.

Podem ser considerados os seguintes tipos de captação em ambientes de rochas cristalinas:

(i) Arranjo de Nascentes

Trata-se do tipo de obra de tecnologia mais simples e que menos altera as condições naturais de escoamento. Parte da execução de uma pequena escavação (digamos, da ordem do metro) para libertar a emergência. Evolui, quase sempre, para a construção de uma pequena câmara com tampa colocada horizontal ou verticalmente, de acordo com as condições topográficas locais. Frequentemente, em rochas cristalinas as paredes então a descoberto, total ou parcialmente. Em geral, uma captação deste tipo "cresce" no sentido da galeria, ou do poço, quando se pretende aumentar o caudal, o que nem sempre se consegue com tais práticas.

A decisão de substituir uma nascente captada e, particularmente, a tentativa de nas proximidades reforçar o seu caudal, deverá passar pela análise atenta das condições hidrogeológicas locais para entender os mecanismos naturais da descarga. Frequentemente, à mesma cota, o maciço está já inteiramente drenado e, a cotas mais baixas pode não haver condições adequadas de reservatório. Correspondendo, normalmente, a pontos onde acidentalmente a superfície piezométrica corta, ou está muito próxima do terreno, este tipo de captação ocorre frequentemente em encostas. Menos frequentemente pode ser encontrada em vales ou no bordo de depressões de áreas planálticas.

Com as tecnologias actualmente disponíveis o arranjo de nascentes pode passar por soluções alternativas que dispensam a construção de câmaras de captação, vulneráveis à entrada de animais e do próprio Homem e ao desenvolvimento de vegetais. É o caso da construção de pequenos drenos em material adequado, devidamente envolvidos em seixo, sendo o conjunto protegido por argila ou mesmo uma lage de cimento e posteriormente coberto por terra arável. Não há qualquer impacte ambiental, a protecção é total e o único sinal visível da captação é um pequeno tubo que sai do solo no local onde, no passado, havia uma emergência.

(ii) Galerias

São obras que em Portugal Continental podem ultrapassar a centena de metros de extensão e que são construídas a pá e pica e mais modernamente com martelo picador, ou mesmo com recurso a explosivos. São captações visitáveis, onde um homem se desloca com alguma dificuldade, podendo ser revestidas ou não, conforme as características do terreno. O revestimento pode ser executado na obra ou recorrendo a materiais pré-fabricados, como as “capelas” em betão. Tem a vantagem de permitir uma observação directa das formações, o que pode levar à opção de realizar “travessas” para intersectar descontinuidades que o acompanhamento geológico permita antecipar.

Tradicionalmente, a galeria constituía-se simultaneamente, muitas vezes, como estrutura de prospecção e pesquisa. Correspondendo a estruturas de mão de obra intensiva, a sua aplicação está hoje restringida a situações muito raras. O furo horizontal ditou na prática o fim deste tipo de captação.

A galeria foi a captação-tipo dos terrenos de encosta, contexto em que presentemente predominam os furos horizontais. Menos frequentemente, aparece em zonas planálticas ou de fundo de vale, associada a poços. Algumas captações de elevado caudal (dentro da relatividade das unidades cristalinas) são conhecidas no Norte do País.

A maior debilidade deste tipo de captação é a protecção sanitária. Mesmo com portas supostamente estanques não é possível impedir a proliferação de seres vivos no interior das galerias. No entanto, a captação no topo da galeria e a condução posterior da água ao longo de entubamentos adequados, permite resolver este problema. Desta forma é também minimizado o problema da contaminação local nos primeiros metros, onde a profundidade em relação ao terreno é pequena.

O projecto de uma galeria terá, por base, uma análise cuidada das condições geológicas e de recarga. Ter-se-á em conta, particularmente, a ocorrência de nascentes àquela ou a cotas diferentes e ao comprimento em que, na horizontal o maciço rochoso se encontra alterado ou fracturado. Uma circulação nos primeiros metros não significa que o caudal aumente progressivamente no sentido do avanço da escavação. Com frequência, o surgimento de armadilhas hidrogeológicas no sentido do topo significa a diminuição das primeiras águas

captadas à entrada. Habitualmente projectadas para dentro do maciço, as galerias podem também funcionar como colectores da circulação ao longo da encosta, em obra de funcionamento hidráulico próxima do dreno.

É vulgar as galerias apresentarem caudais muito díspares em função do tempo, podendo a variação das características físico-químicas ser inapreciável. As galerias drenam praticamente, na totalidade, os maciços até à cota onde estão instaladas.

(iii) Poços

Atribui-se aqui a designação “poço”, como já foi referido anteriormente, à obra de captação cujas dimensões laterais permitem o acesso interior para visitas de inspecção, beneficiação ou controlo. Correspondem tradicionalmente a obras escavadas manualmente. Hoje, tendo em conta o quase total desaparecimento dos poceiros, o custo da mão de obra especializada e também a existência vulgarizada de meios mecânicos, muitos dos poços são pura e simplesmente escavados com equipamento do tipo abre valas, sendo por isso a profundidade muito limitada.

É óbvio que, neste caso, a captação é feita apenas nos alteritos e dentro do limite da capacidade do equipamento, sendo raro a profundidade ultrapassar os 6 m. Os diâmetros de entubamento e a respectiva forma são muito variáveis, mas tendem a estabilizar nos diâmetros das manilhas de betão mais frequentes no mercado: 1,5 a 2 metros.

Está fora de questão repetir, agora, as admiráveis obras do passado com poços com dezenas de metros de profundidade, com ou sem galerias horizontais. O poço é hoje uma solução socialmente “desprestigiada” em contra-ponto ao furo. Do ponto de vista hidrogeológico (e esquecendo a questão custo) o poço, em certas circunstâncias, pode apresentar vantagens, nomeadamente:

- pode permitir a intersecção de fracturas que de outra forma não seriam directamente atravessadas pois os poços têm diâmetros notoriamente superiores aos dos furos;

- permite uma boa adaptação às características hidrodinâmicas dos alteritos que como já foi referido têm transmissividades (T) relativamente baixas e coeficientes de armazenamento (S) relativamente altos, por oposição às zonas fracturadas subjacentes.

Do ponto de vista da exploração, os poços também podem apresentar vantagens, nomeadamente:

- podem dispensar, em muitos casos, a bombagem com bombas submersíveis, o mesmo é dizer, o recurso à energia eléctrica;
- no caso de consumidores com ciclos de utilização alternados, o poço funciona como reservatório que é preenchido nos períodos de não utilização e dispensa a existência de reservatórios de armazenamento à superfície.

Os poços apresentam inconvenientes, dos quais se destacam:

- captam em geral aquíferos muito vulneráveis à poluição e a obra em si é, também, geralmente muito vulnerável;
- não são compatíveis com grandes variações sazonais de nível piezométrico que diminuiriam os caudais disponíveis em estiagem e virtualmente ditariam o fim da exploração com bombas centrífugas;
- a ocupação física de espaço que no caso de pequenas parcelas agrícolas pode ser desvantagem de peso.

Os poços podem ser realizados indiferentemente das condições geomorfológicas. Adaptam-se melhor às regiões planálticas ou de fundo de vale com alteritos. Nas vertentes o afluxo de água deixaria de ser radial passando a ser feito apenas do lado da encosta, por isso não é solução tradicional frequente. Nesta posição topográfica poderão constituir uma boa solução, associados a furos horizontais ou galerias.

Uma obra mista associando furo vertical e poço pode constituir opção interessante, nomeadamente onde não se dispuser de energia eléctrica. Neste caso, o poço pode constituir-se como reservatório de águas mais profundas, de superfície piezométrica mais alta, captadas pelo furo, que permitirão o enchimento daquele. O poço pode, então, ser simplesmente explorado com bomba centrífuga

ou outra por simples aspiração. Associação semelhante pode ser praticada com furo e charca.

A conjugação poço e dreno horizontal é frequente. Neste caso, novamente o poço funciona como reservatório e câmara de bombagem. A construção de poços situados em alteritos no fundo de vales, com pequenos açudes e barragens subterrâneas, pode melhorar as condições de exploração em estiagem permitindo otimizar a recarga a partir de pequenas linhas de água eventualmente existentes e reter alguma circulação subaérea.

(iv) Drenos

O dreno é um tipo de captação horizontal, de extensão variável, que pode alcançar algumas centenas de metros. Normalmente é constituído por uma estrutura praticamente horizontal, tubular, perfurada, de diâmetro adequado aos caudais em jogo. Os drenos construídos com inclinação adequada, aduzem normalmente água para poços que podem ter ou não funções de captação mas que funcionam geralmente apenas como câmara de armazenamento e bombagem.

A estrutura tubular é envolvida num maciço filtrante que deve se instalado a seco. Isto significa a necessidade de operações de rebaixamento de nível, normalmente com bombagem directa. Em muito casos, torna-se necessária a entivação das paredes ou mesmo utilização de pontas filtrantes. Os drenos são instalados em alteritos (incluindo aqui depósitos de fundo de vale, aluviões e rocha muito decomposta) situados em zonas aplanadas, planálticas ou em vales. A profundidade de instalação não ultrapassa, geralmente, os 6 a 7 metros.

O dreno horizontal é a estrutura captante que melhor se adapta a terrenos de baixa transmissividade, pequena espessura e desenvolvimento espacial relativamente considerável. Em certos casos, os drenos para além da função captante podem funcionar como dispositivo de drenagem, como em algumas actividades industriais e agrícolas.

(v) Charcos e Chavancos

Correspondem a escavações de profundidades moderadas e grande extensão praticadas geralmente com equipamento de escavação e remoção de terras. As profundidades dependem da espessura dos alteritos mas não ultrapassam geralmente os 4 ou 5 metros e a extensão pode alcançar dimensões até 1 ha. Trata-se de estrutura muito usada na agricultura em propriedades nas quais a área de terreno ocupada pela obra, perdida para a actividade agrícola, não constitui problema.

É um grande reservatório do tipo "poço" que armazena escassa alimentação subterrânea e que colecta também águas do escoamento superficial. Deste ponto de vista aproxima-se duma pequena albufeira. Está, por vezes, associada a valas ou outras estruturas drenantes para tornar agricultáveis terrenos com má drenagem interna. Uma estimativa das perdas por evaporação nestas obras é recomendável antes de ser empreendida a sua construção.

vi) Furos

Correspondem a obras de profundidade (ou comprimento) elevado e pequeno diâmetro, de grandeza decimétrica. As profundidades alcançadas são em geral inferiores a 100 m, mas já foram alcançadas profundidades da ordem de 500 m em projectos ligados à pesquisa e captação de águas minerais (ver capítulo IV).

Como já se referiu, a solução mais comum na Zona Centro-Ibérica é a do furo vertical com martelo de fundo de furo, entubado a PVC, total ou parcialmente, e equipado com bomba eléctrica submersível comandada por dispositivos para assegurar pressão constante. Trata-se de captação que se adapta bem às necessidades domésticas, que se cifram, quase sempre, em poucas dezenas de m³/dia. Esta solução tem sido praticado em virtualmente todas as litologias de rochas cristalinas em todo o mundo e os progressos da técnica tem levado à sua utilização em rochas sedimentares desde que coerentes.

De notar, contudo, que o funcionamento hidráulico de um furo é deficiente em encosta (só há fluxo praticamente de um lado). Neste caso, em encosta, os

furos horizontais podem apresentar vantagens, mas a sua utilização tem-se revelado geralmente desastrosa pois são deixados sem qualquer tamponamento o que provoca o rápido esgotamento dos recursos até à cota de implantação. Em geral, os caudais destes furos são sobreavaliados. A variação interanual de caudal alcança, frequentemente, razões de 1 para 10 ou mesmo superiores.

Quando bem executados, os furos horizontais, tal como as galerias, apresentam a inegável vantagem de dispensar a bombagem.

Quando se trata de projectos de maior exigência, isto é, abastecimento a pequenas indústrias e pequenos aglomerados populacionais, há que perspectivar dimensionamentos mais sofisticados e o recurso a outro tipo de obras: furos inclinados com o método de martelo de fundo de furo ou mesmo a carotagem contínua, em casos especiais, quando se requer apertado controlo hidrogeológico. Os furos inclinados podem constituir excelente solução: (i) quando há dúvidas quanto ao andamento espacial de estruturas subverticais; e, (ii) quando o objectivo geológico a alcançar está fisicamente inacessível pela existência de construções ou outras barreiras. Em flanco de encosta, em relação aos furos horizontais, os furos inclinados têm a vantagem de permitir a prática de rebaixamentos, com equipamento de bombagem adequado, devidamente instalado com centralizadores.

(vii) Obras mistas

A imaginação do Homem tem procurado adaptar soluções às várias condições hidrogeológicas e às diferentes solicitações do consumo. Foram muito usados os poços de grande diâmetro, os poços duplos, os poços com galerias e os poços com drenos. Em certos casos, parte do poço era coberto pela terra arável para não haver perda de terreno de cultura.

Modernamente, a partir dos anos 70 do século XX, tentaram-se os poços com furos horizontais e, em raros casos, executaram-se furos dentro de poços. Trata-se de obras especiais que se poderão justificar perante condições geológicas peculiares e caso o regime de exploração possível se adapte bem às

necessidades do consumidor. Como já foi referido a propósito dos poços, a conjugação da solução poço com dreno e açude, para melhorar a infiltração induzida a partir de pequenas linhas de água, é por vezes tentada. Já o mesmo não se dirá da solução barragem subterrânea conjugada com poço de que não se conhece qualquer aplicação reportada na Zona Centro-Ibérica.

Previsão da qualidade da água e da profundidade a alcançar

A previsão da qualidade da água é realizada via bibliográfica e do inventário hidrogeológico, tendo em conta: (i) o perfil e necessidades do utilizador, e, (ii) eventuais singularidades verticais previstas a nível da coluna geológica a atravessar. Este último aspecto é particularmente relevante para o caso das águas minerais naturais e de nascente (capítulo IV).

Para a perfuração o critério tradicionalmente retido era o desta não ultrapassar em mais de 10 m a zona sã não fracturada. Raciocinando deste ponto de vista para a Zona Centro-Ibérica, poder-se-ia considerar como limite para a pesquisa, profundidades da ordem de 60 m a 80 metros (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987, 1988, 1989; Carvalho 1991, Pereira 1999).

O hidrogeólogo do cristalino procura as diferenças e tem hoje ao dispor equipamentos de perfuração rápidos que lhe permitem pesquisar em profundidade a preços razoáveis. Por isso, a pesquisa até 150 a 200 m está banalizada, Carvalho (2000). O projectista deve, considerando as condições locais, avaliar o risco de insucesso em pesquisas a grande profundidade e acompanhar sistematicamente a perfuração para fazer abortá-la, se necessário.

No caso de abastecimentos de pequeno vulto é vulgar parar a perfuração logo que se estime terem sido atingidos os caudais julgados suficientes. Aqui serão tidos em conta os critérios desenvolvidos no capítulo III, e Carvalho *et al* (2004) artigo [7] e Carvalho *et al* (2005) artigo [10] para a determinação do caudal de exploração (o *long-term well capacity*).

A previsão dos caudais deve ser baseada em dados representativos, obtidos, se possível, a partir de inventário hidrogeológico à escala local. Ter-se-á em conta que caudais de exploração sustentáveis, da ordem de 1, 0 l/s,

constituem um excelente resultado mas que os valores medianos são notoriamente mais baixos, Carvalho *et al* (2004) artigo [7], Carvalho (1993) artigo [8], Carvalho *et al* 2005 artigo [10] e Carvalho *et al* (2003) artigo [11] do capítulo III. A análise dos valores do Índice Metros Caudal *bruto* (GIMC), e do Índice Metros Caudal *ajustado* (IMC), conforme referido no capítulo III, permitirá uma avaliação sucinta da transmissividade mediana e do risco geológico de insucesso. No entanto será sempre conveniente proceder-se a levantamento de pormenor à escala local e projectar e realizar ensaios de caudal adequados.

Banks *et al.* (1993) analisam, com mestria, a questão da implantação de furos produtivos em rochas cristalinas afirmando que, ao menos na Noruega, se trata de uma actividade ainda muito do tipo “*game or chance*”.

Adaptando a experiência de Banks *et al.* (1993) para a Noruega, para o Maciço Antigo teríamos as recomendações seguintes:

- a) Nunca fazer promessas extravagantes e alternativamente tentar passar a mensagem de que nesta actividade há sempre incerteza;
- b) Para fazer previsões usar sempre os valores medianos e não as médias;
- c) Localizar e orçamentar sempre mais que um furo de pesquisa;
- d) Realizar os furos de pesquisa e captação sobre lineamentos tectónicos fotointerpretados, descontinuidades identificadas com cartografia geológica ou geofísica estando consciente que essas fracturas nem sempre são transmissivas e podem estar preenchidas com materiais argilosos;
- e) Usar técnicas de mapeamento local da fracturação e sondas capazes de fazerem furos inclinados e horizontais e do tipo combinado (martelo de fundo de furo, *rotary* a ar ou com lamas bentoníticas).

Métodos de perfuração

A execução de furos de pesquisa e captação de águas subterrâneas é uma actividade muito activa no Maciço Antigo Português. A maioria dos furos é realizada sem projecto de pesquisa e captação, pelo menos a nível de estudo-prévio.

O sector dos empreiteiros de perfuração corresponde a nicho da economia Portuguesa que gozou de forte expansão a partir de 1973, data em que o método de perfuração à percussão pneumática com martelo de fundo de furo foi introduzido em Portugal. A partir dessa época a prospecção, pesquisa e captação em rochas cristalinas foi totalmente revolucionada tendo sido consagrada a figura de furo de pesquisa e eventual captação, solução quase obrigatória, se devidamente acompanhada tecnicamente. A prospecção, ironicamente, continuou quase exclusivamente nas mãos de radiestesistas e afins.

Hoje, em Portugal (Martins Ferreira 2001), contam-se por cerca de uma dezena de milhar as perfurações para obtenção de água realizadas anualmente por mais de três centenas de equipamentos daquele tipo que, como se sabe, é quase específico de rochas compactas e fissuradas. Este método tem a grande vantagem de avanços rápidos e de simultaneamente permitir a recolha de informação sobre a qualidade e quantidade da água dos níveis produtivos sucessivamente intersectados pela perfuração.

O cumprimento do Dec-Lei 46/94 de 22 de Fevereiro, o principal instrumento legal desta actividade, é inferior a 10% (Martins Ferreira 2001), o que dá conta do desnorte reinante. Cerca de 800 equipamentos estarão em actividade e estima-se em 300 000 o número de furos existentes no País (IAH 2005). A execução de furos de captação de água corresponde, portanto, a um enorme mercado paralelo que movimentava anualmente alguns milhões de euros, embora os preços de perfuração estejam ao nível de há 25 anos! A concorrência entre os empreiteiros é de tal ordem que o *marketing* por eles usado privilegia o custo mais baixo, a rapidez quase inexplicável de execução e, ainda, práticas como a tão propalada “*só paga se encontrar água*”.

Lamentavelmente, os critérios de projecto e construção têm baixado de nível de forma radical. Pode afirmar-se sem margem para dúvidas que, em termos médios, a qualidade das obras de pesquisa e captação por furos é pior que a de há 50 anos (DGSB 1952). Este panorama, que dir-se-ia adstrito a pequenas obras, rapidamente foi alargado a utilizadores importantes como entidades estatais, autárquicas, grandes grupos económicos e até as recém criadas entidades gestoras dos sistemas de distribuição de água em alta para abastecimento público.

A oferta para prestação de serviços de perfuração é muito grande e, geralmente, de baixo nível técnico. Do lado da procura, clientes e seus consultores, tem faltado o discernimento para destringir entre o baixo custo de execução e o custo efectivo da água à boca do furo ao fim da vida útil da obra. São, por isso, vulgares os furos mal dimensionados, mal equipados, arrastando finos, que a curto prazo, são substituídos por outros em condições semelhantes, num ritmo infernal. O controlo hidrogeológico durante a perfuração é muito sumário, podendo ser considerada uma excepção o acervo de dados apresentado nesta dissertação.

A realização de captações raramente é lançada com Caderno de Encargos, contendo normas técnicas pertinentes, vinculativas, que permitam seleccionar os empreiteiros e realizar obras de captação dentro das regras da arte.

Recentemente entrou em vigor o Dec-lei 133/2005 de 16 de Agosto que pretende reformar o regime de licenciamento da actividade das entidades que operam no sector da pesquisa, captação e montagem de equipamentos de extracção de água. Trata-se de um mero procedimento administrativo que parece corresponder a uma tentativa votada ao insucesso pois não acautela a qualidade da prática efectiva dos serviços prestados, nem a creditação profissional dos intervenientes.

O dimensionamento típico dos furos verticais realizados no Maciço Antigo, que corresponde a uma tecnologia banalizada localmente, é o da perfuração com diâmetros de 10" a 6" ½ e revestimento posterior em PVC de 10kg/cm², diâmetro 140 mm. Os tubos-ralo são fabricados localmente (praticamente colocados de alto a baixo e com área de entrada muito baixa) e o isolamento do espaço anular é primário ou inexistente. O furo é, geralmente, entubado na totalidade.

Esta opção, que se afasta do que é corrente noutras regiões do Mundo e é típica da escola Americana (AWWA 1958; Driscoll 1986), pode ser resultado de razões comerciais mas, em muitas circunstâncias, resulta da instabilidade das paredes do furo, característica de muitas áreas tectonizadas do Maciço Antigo.

As profundidades alcançadas têm andado ao sabor da capacidade dos equipamentos disponibilizados mas, geralmente, não ultrapassa os 100 ou 150 m.

Em águas minerais (ver capítulo IV) o completamente dos furos de pesquisa e eventual captação é mais sofisticado incluindo o entubamento em aço inox.

Muito frequentemente os caudais de exploração (*long-term well capacity* ou *long-term discharge capacity*; Fitts 2002) são avaliados de forma indevida, exagerados, tomando como tal os ensaios com compressor durante a perfuração. É dada, muitas vezes, garantia de grandes caudais e produzida avaliação incorrecta das disponibilidades, e das variações sazonais. Na base destas avaliações anómalas está a total ausência de suporte hidrogeológico, de ensaios de caudal, ou mesmo de ensaios de caudal credíveis. O desenvolvimento deste tema e a descrição das técnicas de perfuração, controlo e ensaio são tratados no Capítulo III.

Os furos horizontais, construídos em flanco de encosta, não têm geralmente dispositivos de controlo do caudal dada a modesta tecnologia empregue, pelo que se constituem em factor de exaurimento dos recursos.

A entrada em funcionamento do primeiro martelo de fundo de furo em Portugal ocorreu em 1973 e constituiu uma grande revolução no capítulo da pesquisa e captação de água subterrânea em rochas compactas e fissuradas. Um pouco antes a utilização de “super-martelos”, equipamentos de percussão pneumática com martelo localizado à cabeça do furo, correspondeu a um sucesso efémero, pois os diâmetros de perfuração não ultrapassavam 4” e não permitiam, por isso, a instalação de equipamentos de bombagem para elevação da água, então mais volumosos que nos dias de hoje.

A primeira vantagem do martelo de fundo de furo em meios fissurados é de ordem económica. De facto, o custo do metro perfurado com este método é inferior a 50% do das outras técnicas (Bel & Zeryouhi 1982) até então usadas (percussão clássica, *rotary* e rotação). O menor custo advém duma velocidade de avanço muito mais elevada, da transportabilidade e ligeireza dos equipamentos e da não necessidade de utilização de entubamentos auxiliares e de aprovisionamento de água e lamas de perfuração.

Duas dificuldades efectivas limitaram o sucesso das operações com martelo de fundo de furo: (i) em primeiro lugar as dificuldades de perfuração em zonas alteradas ou fortemente tectonizadas e, (ii) os pequenos diâmetros de perfuração.

A primeira das referidas limitações é realmente frustrante: em zonas de maior potencial hidrogeológico em rochas compactas e fissuradas o método funciona mal. A limitação dos diâmetros está hoje ultrapassada tendo em conta a evolução tecnológica dos compressores e do equipamento que é introduzido nos furos e dos próprios caudais sustentados ocorrentes nestas rochas, que não exigem grandes diâmetros de perfuração.

O problema da ultrapassagem das zonas instáveis tem sido resolvido com recurso a técnicas em que um entubamento metálico auxiliar é descido em simultâneo com a perfuração: Odex, Symetrix, Saturn, Neptune, etc. (Plote 1986) e, em geral, do tipo “*under reamer and casing driver*” que poderemos traduzir por dispositivo “alargador excêntrico e instalador de tubagem”. A utilização de “espumas”, produtos tensioactivos que favorecem a evacuação da amostragem (limpeza do furo) e menos a estabilidade das paredes, têm sido usadas com algum sucesso em situações não muito difíceis.

Quando há que ultrapassar camadas com forte carga hidráulica ou grande caudal pode haver necessidade da realização de cimentações, introdução de tubagens auxiliares ou recurso a outras técnicas de perfuração. A alternativa *rotary* com circulação directa tem sido utilizada em zonas de alteração profunda (e.g., Carvalho (1979) artigo [2], Chaminé *et al* (1999) artigo [4] e Carvalho & Chaminé artigo [5], deste capítulo). Todas estas operações mascaram significativamente o controlo hidrogeológico da água e dos caudais afluentes ao furo. Raramente ocorre a necessidade de utilização da percussão clássica mas no Maciço Antigo essa situação já aconteceu, paradoxalmente, em rochas filonianas quartzosas subverticais e em quartzitos do ‘Armoricano’, Ordovícico, muito duros e compactos.

A *rotary* a ar tem sido usada em situações limite em que os elevados caudais não permitem o funcionamento do martelo. Mas esta opção exige equipamento acessório, como varas de contrapeso, cuja mobilização encarece significativamente a obra. Recentemente foi utilizado em Portugal o método do martelo de fundo de furo com circulação inversa que, porque isola o fluido ascendente das paredes da perfuração, é menos agressiva para estas que a circulação normal e pode vir a ter sucesso nos locais onde se exijam maiores diâmetros de perfuração, isto é, onde se preveja a ocorrência de maiores caudais.

Vantagens decisivas de ordem técnico-científica do método de martelo de fundo de furo resultam do fluido de circulação ser o ar, não havendo, por isso, qualquer contaminação significativa das paredes da perfuração e da amostragem. As vantagens atrás referidas podem ser resumidas assim: (i) a amostragem dos terrenos perfurados é praticamente contínua; (ii) é possível o reconhecimento imediato da importância e do caudal instantâneo dos níveis aquíferos atravessados; (iii) é possível informação sobre os níveis piezométricos das zonas atravessadas; (iv) geralmente pode fazer-se a amostragem permanente da qualidade da água encontrada; e, (v) não existe colmatação da fracturação natural, podendo haver, até, ocorrência de algum autodesenvolvimento das zonas produtivas.

Deve, contudo, ter-se em atenção que para caudais muito pequenos pode haver colmatação das fracturas pelos materiais argilosos da perfuração, situação que persiste se no decurso da perfuração não forem encontrados novos níveis produtivos.

Controlo hidrogeológico e ensaios de caudal

O controlo hidrogeológico nos furos destina-se a (Plote 1986, DNEMT 1995):

- (i) Controlar a litologia atravessada e as alternâncias litológicas. O registo da cor, da alternância litológica, do grau de alteração e da fracturação, da cor da amostragem e da água são fundamentais. Na medida do possível, no Maciço Antigo, apesar das dificuldades colocadas pela amostragem, nas nossas investigações procuramos seguir os critérios propostos pela ISRM (1978, 1981) e pela GSE (1995) para o grau de alteração e, se possível, para a fracturação;
- (ii) Registrar as zonas de humidade e as entradas de água;
- (iii) Controlar os caudais registados durante a perfuração e nos ensaios de limpeza, para evacuar a amostragem retida no fundo e desenvolvimento do furo (caudais *air-flow* de perfuração);
- (iv) Controlar os níveis de água durante a furacão (no final e início do turno) que possam dar indicações sobre a natureza hidrodinâmica dos níveis atravessados;

(v) Avaliar a qualidade da água com equipamento de campo para determinação de pH, condutividade eléctrica, temperatura ou outros parâmetros indicadores. No caso de águas minerais (capítulo IV) esta operação pode ser mais sofisticada e incluir parâmetros mais específicos (alcalinidade, teor de CO₂, de sulfuração, do teor em ferro, etc.);

(vi) Projectar a coluna definitiva de entubamento caso o furo seja produtivo;

(vii) Programar os ensaios finais de caudal e estabelecer previsões sobre o caudal de exploração.

Parâmetros como a granulometria da amostragem, a velocidade de avanço e o “bater do martelo”, são indicadores que devem ser registados e utilizados posteriormente, se necessário, pois ajudam a construir o corte do furo que deve ser sistematicamente actualizado com toda a informação atrás referida.

Toda esta informação deve ser confrontada com o modelo conceptual que serviu de base à perfuração e, se necessário, adaptá-lo ou optar por outro.

Os ensaios finais de caudal são realizados com o objectivo de determinar o caudal de exploração (*long-term well capacity*) e a transmissividade e o coeficiente de armazenamento, se houver furos de observação.

Optou-se nesta dissertação por utilizar o termo ensaio de caudal em detrimento dos equivalentes “ensaio de bombagem” — utilizado sistematicamente pelos técnicos e operários das firmas de sondagem portuguesas — e “ensaio de bombeamento” chegado até nós por via erudita através do manual *Água Subterrânea e Poços Tubulares*, UOP Johnson Division (1969), mas não usado em Portugal fora dos meios académicos. Além do termo ensaio de caudal estar também consagrado pelo uso na actividade empresarial corrente, adapta-se indistintamente a furos em que o registo da evolução de níveis e caudais ao longo do tempo é feito quer por extracção artificial, quer por simples artesianismo.

As diagrfias instantâneas e diferidas são de utilização pouco corrente na prática da prospecção de água no Maciço Antigo. Torna-se quase obrigatória, quando se perfuram maciços terrosos materializados por um grau de alteração muito profundo, superior a 100 m (artigo [2], Carvalho 1984, do capítulo II) em que

se apresenta um exemplo em rochas gnáissicas e metassedimentares para captação de água mineral.

Os ensaios de caudal são a forma mais adequada de caracterizar hidrodinamicamente os aquíferos. Por isso são fundamentais para se aferir do mérito das metodologias de implantação usadas. Foi o que se fez no quadro II-4 para se avaliar os resultados das campanhas de geofísica reportadas nos artigos [2] Carvalho (1984) e [4] Chaminé *et al* (2004), efectuadas em unidades do Maciço Antigo do Norte de Portugal.

Quadro II-4. Comparação das transmissividades obtidas nos furos descritos nos artigos [2] e [4].

Designação	AC1 Trofa	AC2 Trofa	AC1 Oliveira de Azeméis	AC2 Oliveira de Azeméis	AC2 Porto	AC3 Porto
Litologia	Filão, em xisto	xisto	Contacto micaxisto/gnaiss e	Contacto micaxisto/gnaiss	Contacto Xisto/Granito	Contacto Xisto/Granito
Profundidade (m)	100	100	180	172	123	150
Caudal (l/s)	3,5	2,5	1,5	1,0	3,5	1,0
Transmissivi dade (m ² /dia)	17	1,7	0,7	0,6	17	2,6
Observações	Anomalia de alta resistividade	Bordo de anomalia de alta resistividade	Anomalia de baixa resistividade concidente com uma estrutura tectónica regional	Anomalia de baixa resitividade concidente com uma estrutura tectónica regional	Contacto por falha	

As transmissividades regionais medianas obtidas por Carvalho *et al.* (2005) para o Maciço Antigo são de 3,1 m²/dia (rochas metassedimentares) e 1,7 m²/dia (granitóides). Lima (2001) para a região Esposende–Vila do Conde e populações totalmente distintas chegou respectivamente a 3 e 2 m²/dia. Em relação aos caudais, Carvalho *et al.* (2005) determinaram caudais medianos de 0,5 e 0,02 l/s, respectivamente.

Portanto, os filões e xistos no caso dos artigos [2], (Carvalho 1984), e [4], Chaminé *et al.* (1999), deram origem a transmissividades e caudais muito superiores aos valores medianos: houve clara eficácia da geofísica pois tratava-se

de armadilhas hidrogeológicas ocultas, isto é, não detectáveis por simples inspeção superficial. Verifica-se que a estrutura tectónica regional (carreamento de S. João-de-Ver, artigos [4], Chaminé *et al.* (1999), e [5], Carvalho & Chaminé 2004) induz a ocorrência de materiais muito argilosos com transmissividade mais baixa que a mediana regional. Os relativamente altos caudais obtidos devem-se ao facto do projecto das captações permitir rebaixamentos muito grandes, apesar da modéstia dos caudais específicos e das transmissividades.

Os casos dos artigos [4] (Chaminé *et al.* 1999) e [5] (Carvalho & Chaminé 2004) correspondem à captação de águas de circulação relativamente profunda, associadas a megaestruturas regionais importantes que poderão inserir-se na nova aproximação para pesquisa de água nas unidades do soco cristalino proposto por Bisson & Lehr (2004), o paradigma das *megabacias hidrogeológicas* (“megawatersheds”).

5. Reflexão final

A prospecção e pesquisa hidrogeológica são actividades complexas, multidisciplinares, que integram preocupações económicas e sociais para satisfação da procura. A prática da prospecção e pesquisa pressupõe a realização de dois níveis de investigação: o nível estratégico em que se procura conhecer os condicionalismos da oferta (recursos hidrogeológicos) à escala regional e o tático onde se procura esclarecer os problemas da zona de descarga (no caso de haver descargas naturais do sistema) ou das condições locais de circulação.

A nível puramente hidrogeológico, como se refere no artigo [5] (Carvalho & Chaminé 2004) deste capítulo, nos exemplos concretos apresentados, mostra-se indubitavelmente o quanto é primordial, para o sucesso de uma operação de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos nestas rochas, a integração coerente de todos os elementos geológicos obtidos a distintas escalas, como dados de geologia e geomorfologia regional, de fotogeologia, de litotectónica, e do estudo da compartimentação do maciço em termos do grau de fracturação e de alteração. Deve-se, na medida do possível, cruzar e sintetizar toda esta informação a escala(s) conveniente(s) e, assim, representá-la em mapas temáticos georreferenciados, se possível sobrepostos para fácil análise

comparada. Outros elementos complementares são os levantamentos geofísicos dado que através deles se visualiza e refina com maior objectividade os indicadores de prospecção definidos conceptualmente a partir de critérios hidrogeológicos. Um mapa global de síntese a escala adequada, devidamente georeferenciado, que suporte a implantação dos locais de captação à escala métrica, é indispensável como corolário de todo o trabalho desenvolvido.

A economia destes projectos nem sempre comporta a realização de levantamentos geofísicos sistemáticos. No caso do Maciço Antigo a prospecção geoeléctrica não parece ter aumentado substancialmente o caudal de exploração por captação (a não ser nas zonas onde não havia qualquer informação geológica prévia) mas terá feito baixar a taxa de insucesso, isto é, o risco geológico. Porque as sondagens mecânicas de pesquisa e captação de água são oferecidas actualmente a preços atractivos, a respectiva implantação tende a ser efectuada exclusivamente com base em critérios geológicos e fotogeológicos.

Se adoptadas por técnicos com formação adequada em geociências (e em particular com uma especialização em hidrogeologia e recursos hídricos), as linhas de orientação aqui esboçadas permitiriam uma aproximação menos subjectiva e melhor dirigida ao problema da selecção de locais de sondagens de pesquisa e captação — e seu projecto — em contexto de rochas cristalinas.

Como forma de valorizar e tornar mais eficaz o desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos, a análise do comportamento hidrogeológico destas rochas deveria, pois, ser incorporada nos instrumentos técnico-industriais de ordenamento do território (*cf.* Carvalho, 1999, 2002 e artigo [6] Carvalho *et al* 2005 e Carvalho *et al* (2000) artigo [9] do capítulo III) particularmente na localização de captações para pequenos abastecimentos urbanos.

Para Bisson & Lehr (2004) a hidrogeologia, a nível da prospecção, parou no tempo e é necessário enveredar, no cenário de penúria de água que se avizinha (*e.g.*, Burke & Moench 2000, Diop & Rekecwicz 2003, Laimé 2003, Custodio 2002, 2005), pelas técnicas sofisticadas da prospecção e pesquisa petrolífera tentando evidenciar megaestruturas — armadilhas hidrogeológicas — à escala regional. Como já foi referido, a esta aproximação chamam Bisson & Lehr (2004) o paradigma das “*megawatersheds*” (*megabacias hidrogeológicas*).

Este novo paradigma das *megabacias hidrogeológicas*, na aproximação ao problema da água subterrânea em rochas cristalinas, pode ser justificado em Portugal nalgumas áreas do Maçico Antigo. Não colide com a filosofia clássica defendida nesta dissertação, todavia pressupõe níveis de investimento que provavelmente não será fácil reunir nos próximos decénios para a captação de águas normais.

6. Artigos científicos

[1] Contribuição para a prospecção e pesquisa hidrogeológica no Maciço Hespérico Português. *Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa*, 1979, Vol. 16, pp. 305-326.

[2] A metodologia de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofilinas portuguesas. *Volume d'Homage au Géologue G. Zbyszewski, Éditions Recherche sur les Civilisations*, Paris 1984. pp. 137-153.

[3] Captação de água em formações graníticas da área do Porto. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, Lisboa, 1985, Vol 24, pp. 305-312.

[4] O ramo oeste do carreamento de S. João-de-Ver: estudos de cartografia estrutural e de hidrogeologia no sector de Santiago de Riba-Ul–Oliveira de Azeméis (faixa metamórfica de Espinho–Albergaria-a-Velha, NW de Portugal). *Geologos, Revista Departamento de Geologia da Universidade do Porto*, 1999, Vol. 5, pp. 57-65.

[5] O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Revista Universidade de Aveiro*, 2004, Vol. 16.

[6] Prospecção hidrogeológica da área do sistema hidromineral das Caldas da Cavaca (Aguar da Beira, Portugal Central): implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Proceedings del I Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios*, Madrid, 2005, 13 pp., (in press)

CAPÍTULO III

**CARTOGRAFIA HIDROGEOLÓGICA DO MACIÇO
ANTIGO PORTUGUÊS: UMA PROPOSTA**

*Uma verdadeira viagem de descoberta não é
procurar novas terras mas ter um olhar novo.*

Marcel Proust

1. Introdução

Tenta-se sistematizar aqui vários anos de pesquisa e captação de águas subterrâneas no Maciço Antigo Português, em particular na Zona Centro-Ibérica e na Zona Galiza-Trás-os-Montes, geralmente apenas com preocupações imediatas em relação à resolução de questões concretas pontuais. Estas preocupações mostraram que a prospecção e a pesquisa só são eficazes se houver conhecimento adequado do circuito hidrogeológico regional e local, bem como o domínio completo das incidências humanas, ambientais e culturais associadas, incluindo a caracterização da procura.

A solução local dos problemas de busca de água subterrânea não está apenas na competência com que se usam as metodologias de prospecção discutidas no capítulo II mas na compreensão da problemática da água, subterrânea e superficial, à escala regional. Essa consciência, progressivamente adquirida na participação em actividades à escala regional (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal 1987, 1988, 1989, Hidrorumo 2000, HIMOCATCH & GROUNDURBAN I&D, em curso, artigo [13]) foi materializada mais tarde em vários artigos: [7] Carvalho *et al* (2004), [8] Carvalho (1993), [9] Carvalho *et al* (2000), [10] Carvalho *et al* (2005), [11] Carvalho *et al* (2003), [12] Afonso *et al* (2005a) e [13] Afonso *et al* (2005b) incluídos neste capítulo III. A localização espacial desses artigos é representada na figura III-1.

Não basta definir com rigor no terreno os indicadores de prospecção correspondentes ou não a armadilhas hidrogeológicas, na acepção de Picard (1953), Machado Lima *et al.* (1985) e Bisson & Leher (2004). Embora se tenha consciência que os problemas de implantação se resolvem no terreno, à escala métrica ou decamétrica, o processo decisional implica o conhecimento hidrogeológico regional. É preciso observar e interpretar os resultados e tentar regionalizá-los um pouco à maneira dos ambientalistas, ou seja, agir localmente e pensar globalmente.

Como corolário de investigações hidrogeológicas pontuais realizadas pretendeu-se nos artigos incluídos neste capítulo: (i) caracterizar a recarga e os recursos à escala regional com base em coeficientes de infiltração avaliados em 22 locais do Maciço Antigo, artigo [9] Carvalho *et al* (2000); (ii) analisar a

distribuição das produtividades e do risco geológico de insucesso por captação unitária e a caracterização hidrodinâmica das principais litologias de rochas cristalinas, artigos [7] Carvalho *et al* (2004), [8] Carvalho (1993), [9] Carvalho *et al* (2000) e [10] Carvalho *et al* 2004; e, (iii) propor modelos de cartografia hidrogeológica dirigida às necessidades dos utilizadores, baseada em grandes unidades litológicas e no Índice Metros Caudal, Carvalho (1993), artigo [7] Carvalho *et al* (2004) e artigo [11] Carvalho *et al*. (2003).

Porque nem sempre estão disponíveis ensaios de caudal, nem é fácil realizá-los em captações activas sem prejudicar a exploração, foram definidas formulações experimentais expeditas para a avaliação da transmissividade em função do caudal específico para vários tempos de bombagem (*cf.* artigos [7] e [10], Carvalho *et al* 2004 e Carvalho *et al* 2005).

Aponta-se também no artigo [10] a via da avaliação da transmissividade mediana numa dada área em função do Índice Metros Caudal (IMC), aproximação que se reputa de muito útil para a caracterização hidrogeológica regional. Efectivamente esta metodologia utiliza a informação dos furos não produtivos, geralmente não tidos em conta, por ser mais cómodo usar apenas os dados de furos equipados, com ou sem ensaios de caudal. O conhecimento hidrogeológico dos furos improdutivo é escasso pois a ninguém — financiadores, projectistas e executantes — é agradável publicitar insucessos! Mas o modelo hidrogeológico de uma dada área não pode ser baseado, apenas, em furos produtivos, pois ter-se-á enorme desvio em relação à realidade, particularmente no que respeita às funções transmissiva e capacitiva que dessa forma seriam sobreavaliadas.

A credibilização das águas subterrâneas e respectiva utilização no Maciço Antigo tem sido condicionada por uma deficiente gestão das expectativas em torno dos caudais de exploração: geralmente ensaios de poucas horas ou extrapolações muito simplificadas do caudal instantâneo de perfuração, ou do caudal de desenvolvimento final com *air-flow*, ou eventualmente com *air-lift*, são tomados como caudais de exploração sustentados. Daí ter sido proposta a figura do Coeficiente de Redução de Caudal (CRC), (*cf.* artigos [7] e [10] Carvalho *et al* 2004 e Carvalho *et al* 2005), deduzida da análise da informação de cerca de 280 furos no Maciço Antigo, para suporte à avaliação do caudal de exploração.

Note-se que o caudal de perfuração, por corresponder, em regra, a extracção de curta duração com forte rebaixamento, dá uma imagem da condutividade hidráulica ou melhor da transmissividade da zona adjacente local, mas nada revela sobre as características globais do sistema hidrogeológico associado à captação, particularmente em relação ao coeficiente de armazenamento.

Neste capítulo e no Anexo A – I são apresentados esboços de cartas hidrogeológicas temáticas, incluindo o custo da água subterrânea para abastecimento público e para agricultura.

A carta da Figura III-6 é um ensaio de representação das unidades hidro-litológicas do Norte e Centro do Maciço Antigo, artigo [11] Carvalho *et al* (2003) detalhada, no final no Anexo A – I. A Carta de Desenvolvimento de Recursos Hídricos Subterrâneos em Trás-os-Montes, Figura III-7, concebida para servir de base à localização de futuras pesquisas naquela região (Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, 1989; artigo [8] Carvalho 1993), jamais foi tornada pública. A da Figura III-8 refere-se ao potencial de águas subterrâneas para agricultura em Trás-os-Montes, actualizando, através dos Coeficientes de Desvalorização da Moeda (Ministério das Finanças 2004), os valores apresentados no artigo [8] Carvalho (1993). Na elaboração destas cartas foi tido em conta o risco geológico de insucesso associado à prospecção, a partir do Índice Metros Caudal.

Decidiu-se não representar nos documentos cartográficos deste capítulo III as águas minerais e de nascente, incluídas em Calado (1995) e Cruz (2002) embora em muitos casos (*vide* capítulo IV) a distinção seja artificial porque baseada em critérios económicos definidos pela legislação dos recursos geológicos em vigor (Dec-Lei 84/90, 86/90 e 90/90 de 16 de Março). Os circuitos hidrogeológicos desde as áreas de recarga até às de descarga são comuns em parte, e adjacentes sempre, pelo que pode ser considerado artificial não os incluir nas cartas hidrogeológicas regionais só porque têm enquadramento legislativo diferenciado.

Porém no Anexo A – I é apresentado um esboço hidrogeológico do Norte e Centro do Maciço Antigo Português à escala 1/500.000 integrando todas as águas subterrâneas, independentemente do enquadramento institucional como recurso hídrico ou recurso geológico.

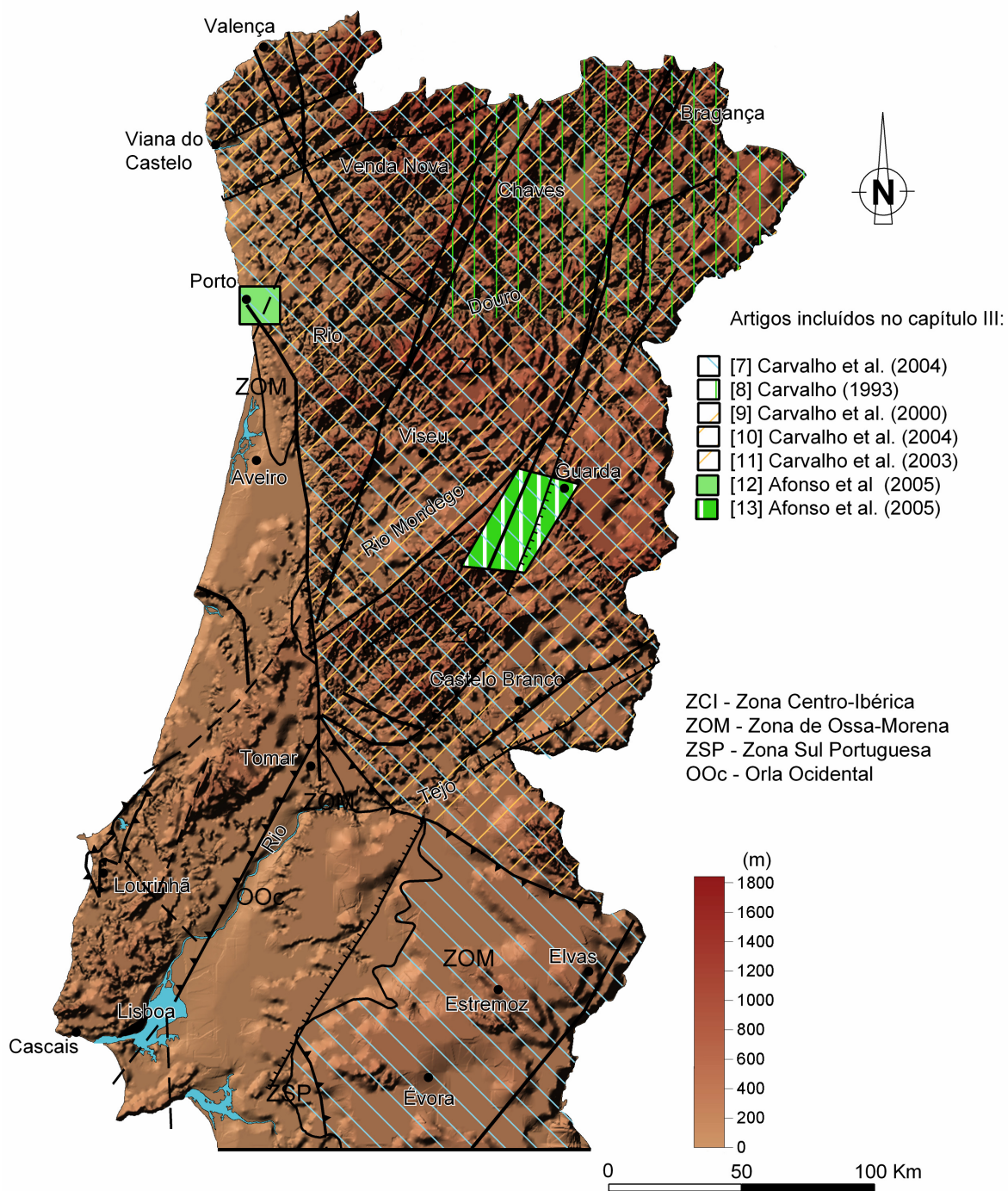


Figura III-1 Localização dos artigos incluídos no capítulo III.

2. Condicionismos geotectónicos e geomorfológicos regionais

O soco antigo corresponde ao afloramento ocidental da Cadeia Varisca Ibérica e ocupa a parte Central e Ocidental da Península Ibérica (Ribeiro *et al.* 1979, 1990). A parte Nordeste, com uma altitude média de 700 m, constitui a ossatura da Meseta Ibérica que é drenada por várias linhas de água, nomeadamente no território Português os rios Minho, Lima, Cávado, Ave, Leça, Douro, Vouga, Mondego e Tejo.

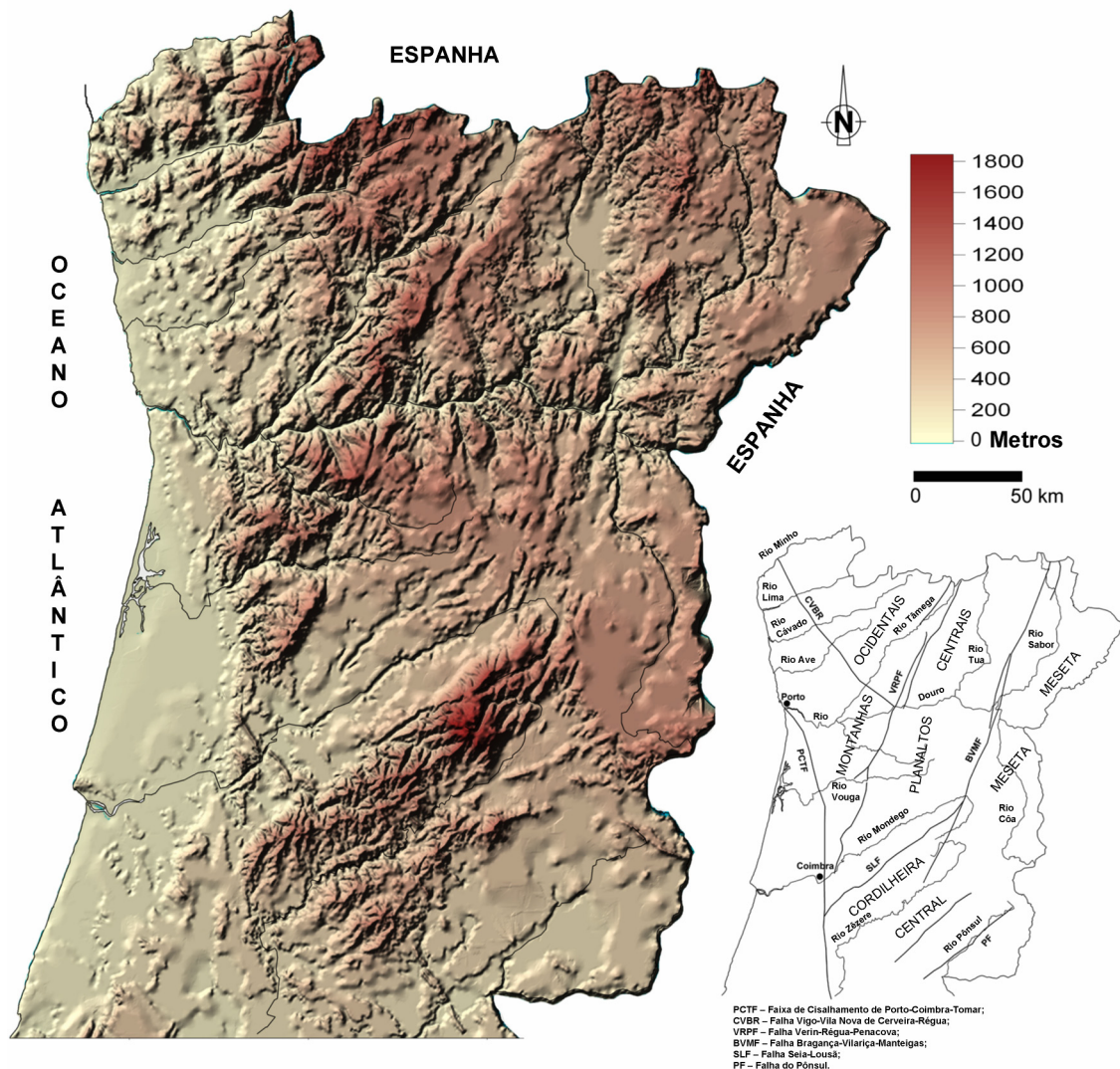


Figura III-2 Modelo digital de terreno.

A região estudada localiza-se, do ponto de vista geotectónico regional, na Zona Centro-Ibérica e na Zona Galiza-Trás-Montes do Maciço Ibérico (Lotze 1945, Farías *et al.* 1987, Ribeiro *et al.* 1990a). Estudos geotectónicos e

geomorfológicos regionais apontam que as principais megaestruturas tectónicas no Norte e Centro de Portugal são: i) a falha Verin–Régua–Penacova e a falha Bragança–Vilariça–Unhais da Serra, com uma orientação média NE-SW (*e.g.*, Ribeiro 1974, 1984, Brum Ferreira 1978, 1980, 1981, Cabral 1995); ii) a faixa de cisalhamento de Porto–Coimbra–Tomar, com direcção NNW-SSE (*e.g.*, Ribeiro *et al.* 1979, Gama Pereira 1987, Chaminé 2000, Chaminé *et al.* 2003); (iii) a faixa de cisalhamento de Vigo–Vila Nova de Cerveira–Régua, com direcção média NW-SE (*e.g.*, Ribeiro 1974, Brum Ferreira 1991, Cabral 1995); e, (iv) a faixa de cisalhamento do Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão igualmente com direcção NW-SE (*e.g.*, Ribeiro 1974, Aguado & Martínez-Catalán 1993, Pinto de Jesus 2001).

Considera-se, em regra, que na região do Norte de Portugal ocorrem três unidades morfotectónicas regionais, a saber (*e.g.*, Girão 1960, Brum Ferreira 1978, 1980, 1991): i) a *Meseta*, uma superfície de aplanação quase perfeita que no território Português se estende a Norte e Sul do Douro; ii) os *Planaltos Centrais* e as *Montanhas Ocidentais* que não representam senão níveis deslocados pelas movimentações tectónicas.

O sector Português do Maciço Ibérico compreende sequências autóctones, parautóctones e alóctones, imbricadas tectonicamente segundo uma geometria complexa de cavalgamentos/carreamentos e outros acidentes tectónicos (*e.g.*, Ribeiro *et al.* 1990a,b, Chaminé *et al.* 2003). As unidades lito- e tectonoestratigráficas autóctones e parautóctones incluem, fundamentalmente, xistos negros, xistos ardosíferos, grauvaques, micaxistos e quartzitos. As unidades tectonoestratigráficas alóctones, situadas na região Nordeste, são constituídas por um complexo ofiolítico, serpentinitos, *flaser* gabros, diques e basaltos. As rochas ígneas incluem granitóides pré-orogénicos a sin- a tardi-orogénicos, relativamente às fases de deformação regional da orogenia varisca (*e.g.*, Ferreira *et al.* 1987, M. L. Ribeiro 1993, G. Dias *et al.* 2000); ocorrem alguns retalhos de rochas de alto grau metamórfico (gnaisses, migmatitos e granitóides pré-Variscos), quer na região de Trás-os-Montes (Ribeiro *et al.* 1964, 1990b, Marques *et al.* 1991-92) quer na região de Porto–Espinho–Coimbra (Ribeiro *et al.* 1979, Gama Pereira 1998, Chaminé *et al.* 2003).

Nesta dissertação adoptou-se a designação genérica de “*xisto*” para todas as rochas metassedimentares em que a foliação tectónica (especialmente, do tipo

clivagem ardosífera ou xistosidade) se revele penetrativa por oposição às rochas ígneas maciças (*sensu* Leinz & Mendes, 1963).

A produtividade hídrica subterrânea das rochas do Maciço Antigo, a nível local, é altamente controlada pela tectónica à escala do afloramento (artigo [11] Carvalho *et al.* 2003) e menos pela tectónica regional, embora, também condicionada por esta. As águas minerais no sentido geológico (ver capítulo IV) são muito condicionadas directamente pela mega-fracturação (Carvalho 1996, Marques *et al.* 2003 artigo [17], Carvalho & Chaminé 2004 artigo [5]) e pelos dispositivos tectónicos locais.

3. Recarga e recursos à escala regional e local

Schoeller (1974) a propósito da avaliação de recursos em rochas calcárias fissuradas e carsificadas definiu **capacidade de ingestão** (Q_M) como “a quantidade máxima de água que um aquífero é capaz de transportar num dado intervalo de tempo, ou seja, corresponderá à capacidade de alimentação máxima real”. Depende essencialmente da condutividade hidráulica, da espessura saturada (aquífero livre) ou espessura (aquífero confinado) e do gradiente hidráulico. É assimilável, portanto, ao caudal de escoamento de Darcy, entendido à escala do aquífero. Schoeller (1974) assinala que esta capacidade de ingestão varia no decurso do ciclo hidrológico.

A **capacidade de infiltração** (Q_i), segundo este autor, seria “a quantidade de água susceptível de se infiltrar, no intervalo de tempo escolhido, considerando a permeabilidade, o pendor, a natureza do solo, a precipitação (P), a evapotranspiração (E), o escoamento superficial (R) e a área da bacia hidrogeológica considerada (S)”. Poder-se-ia chamar a este parâmetro, ainda segundo Schoeller (1974) a “**capacidade de alimentação potencial**”, isto é, a água disponível para a recarga. Nestas condições $Q_i = (P - E - R)S = IS$, sendo I a infiltração. O factor de controlo da alimentação do aquífero é o valor relativo mais pequeno de Q_M e de Q_i .

Droge *et al.* (1987) retomaram as ideias de Schoeller (1974) afirmando que, devido à pequena profundidade da alteração e da fissuração, a capacidade de ingestão é geralmente o factor limitante da alimentação dos aquíferos em rochas

cristalinas. Daí o facto da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, exclusivamente por via hidrometeorológica, conduzir, em regra, a valores sobreavaliados. Dessa forma, o que se calcula é a capacidade de alimentação potencial de Schoeller (1974), ou seja, a água que poderia alimentar o aquífero, se este tivesse capacidade de ingestão disponível, isto é, funções transmissiva e capacitiva adequadas.

Designa-se por **Coeficiente de Infiltração** ou **Taxa de Infiltração** (Unesco 1978), numa dada área, a relação percentual entre a infiltração e a precipitação. Geralmente são usados os valores anuais médios.

No artigo [9] Carvalho *et al.* 2000) incluído neste capítulo é feita uma resenha histórica dos avatares desta questão em Portugal, particularmente a partir da década de 90 do século passado e incluída uma síntese bibliográfica sobre o assunto. As investigações de Carvalho *et al.* (2000) reportadas no artigo [9] tentaram compatibilizar: (i) investigações hidrometeorológicas, nomeadamente mediante a utilização sistemática do método de Castany-Berkaloff (Castany *et al.* 1970); (ii) informação bibliográfica de outros autores; e, facto novo, (iii) informação de pólos de captação de água mineral natural e de nascente de ciclo curto onde há controlo de caudais extraídos e foi possível definir as zonas de contribuição com algum rigor. A figura III-3 constitui uma síntese da metodologia genérica seguida.

Em dois locais onde ocorrem aquíferos instalados em unidades quartzíticas (Castelo de Vide, ver capítulo II, e Monfortinho, Carvalho (2001) artigo [20] do capítulo IV) foi também usado, com resultados concordantes, o método de Kessler (1965).

O Coeficiente de Infiltração obtido a partir de dados experimentais em pólos de captação é ligeiramente mais alto (17%) do que a média determinada exclusivamente por via hidrometeorológica (14%). Isto pode indiciar a existência de recarga induzida pela exploração, situação que não surpreende dada a pressão da procura que nestes casos se concentra exactamente na época em que os excedentes hídricos são mais escassos. Tendo em conta a aproximação generalista defendida no artigo [9] Carvalho *et al.* (2000), os recursos hídricos subterrâneos poderiam ser calculados a partir da infiltração média anual, por isso

se julga oportuno incluir uma carta de isoietas do Maciço Antigo Português na Figura III-4.

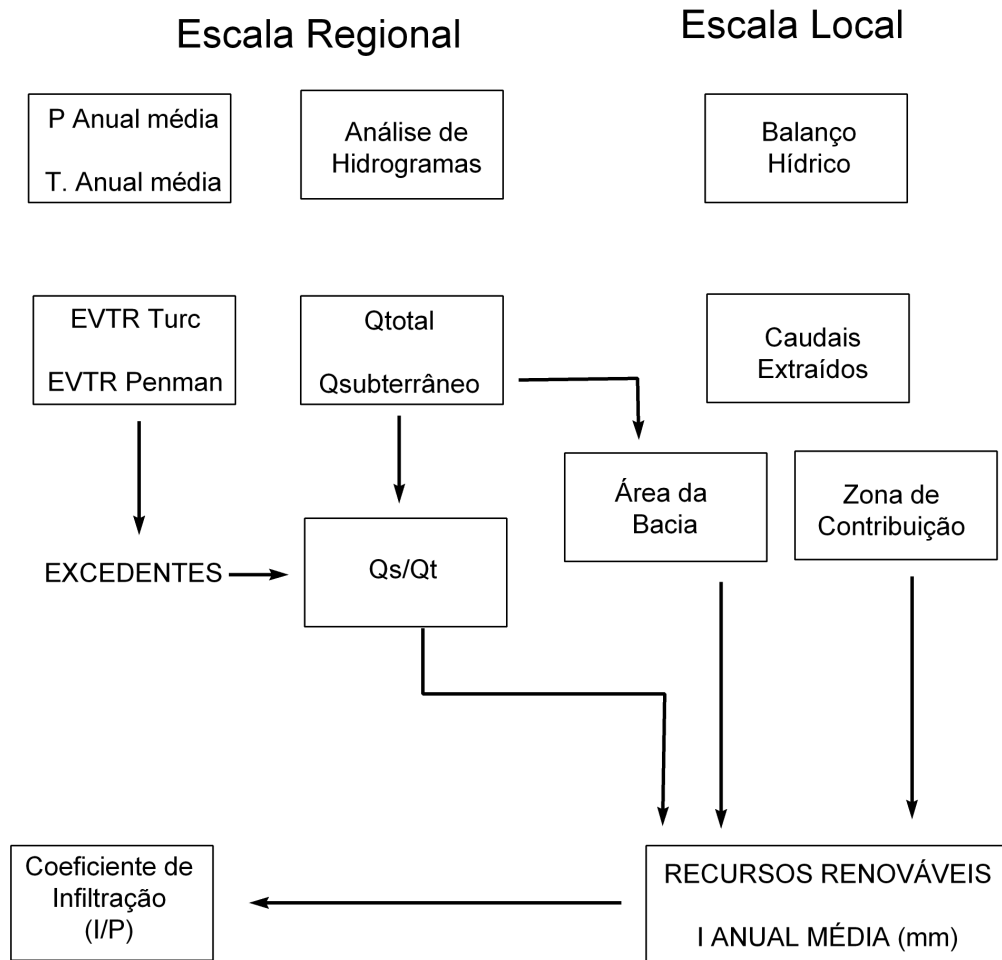


Figura III-3: Fluxograma síntese da metodologia utilizada para avaliação dos recursos subterrâneos renováveis.

A temperatura, cuja distribuição na área se apresenta na figura III-5, controla a evapotranspiração real e condiciona os excedentes totais e os recursos hídricos subterrâneos.

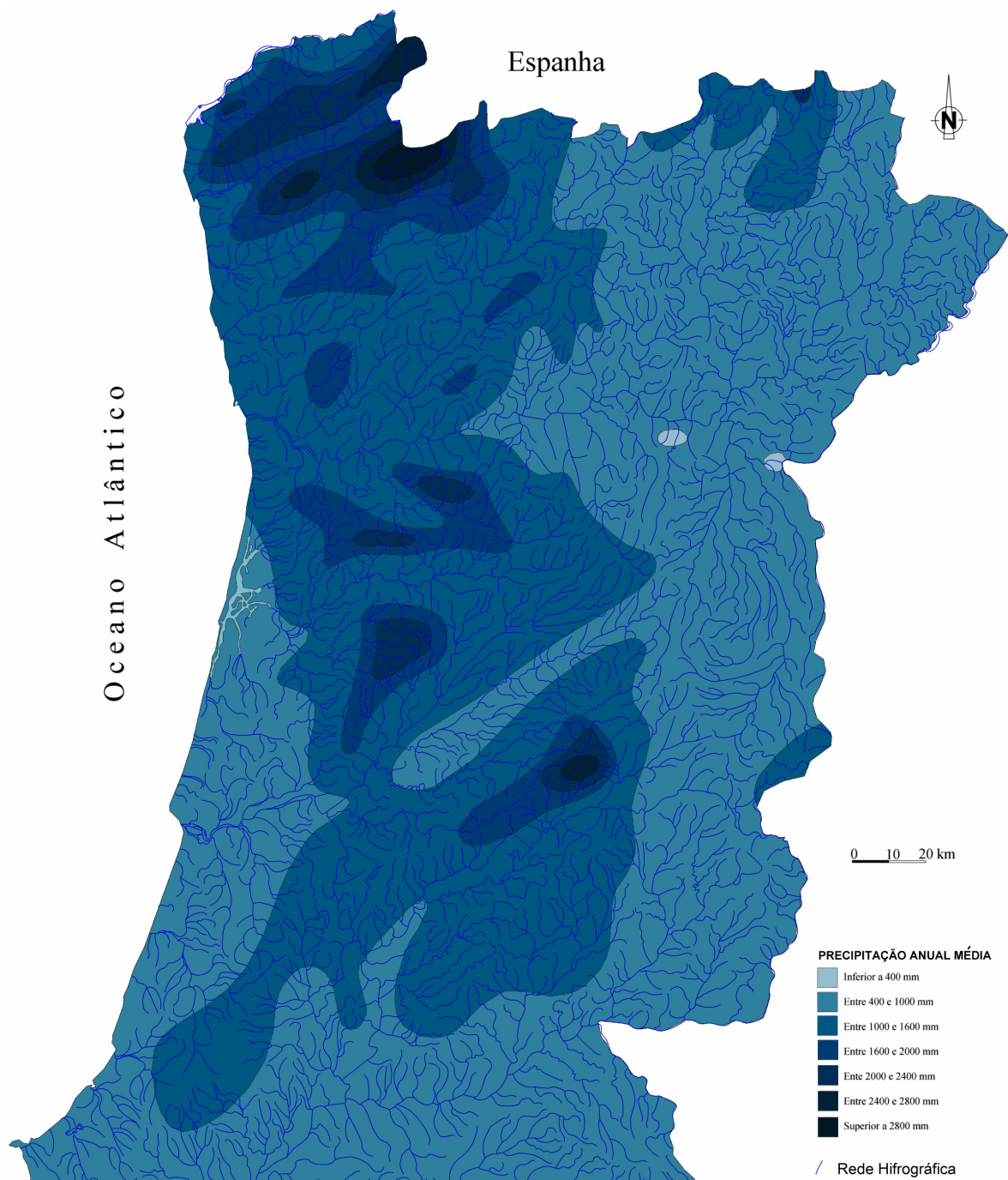


Figura III-4: Carta de isoietas anuais médias do Maciço Antigo Português (fonte: Inst. Ambiente, 1974).

Da leitura das figuras III-2, III-4 e III-5 facilmente se depreende que a grande divisão hidrogeológica do Maciço Antigo Português é determinado pela megaestrutura Verin-Régua-Penacova. A Oeste deste acidente regional, a precipitação anual média excede 1000 mm, chegando a 3000 mm no maciço do Gerês. Para Este e Sul as condições de aridez prevalecem havendo zonas na Bacia do rio Douro, junto à fronteira espanhola, onde a precipitação anual média

baixa dos 500 mm. A temperatura aumenta também no mesmo sentido. As zonas mais aplanadas prevalecem de Oeste para Este.

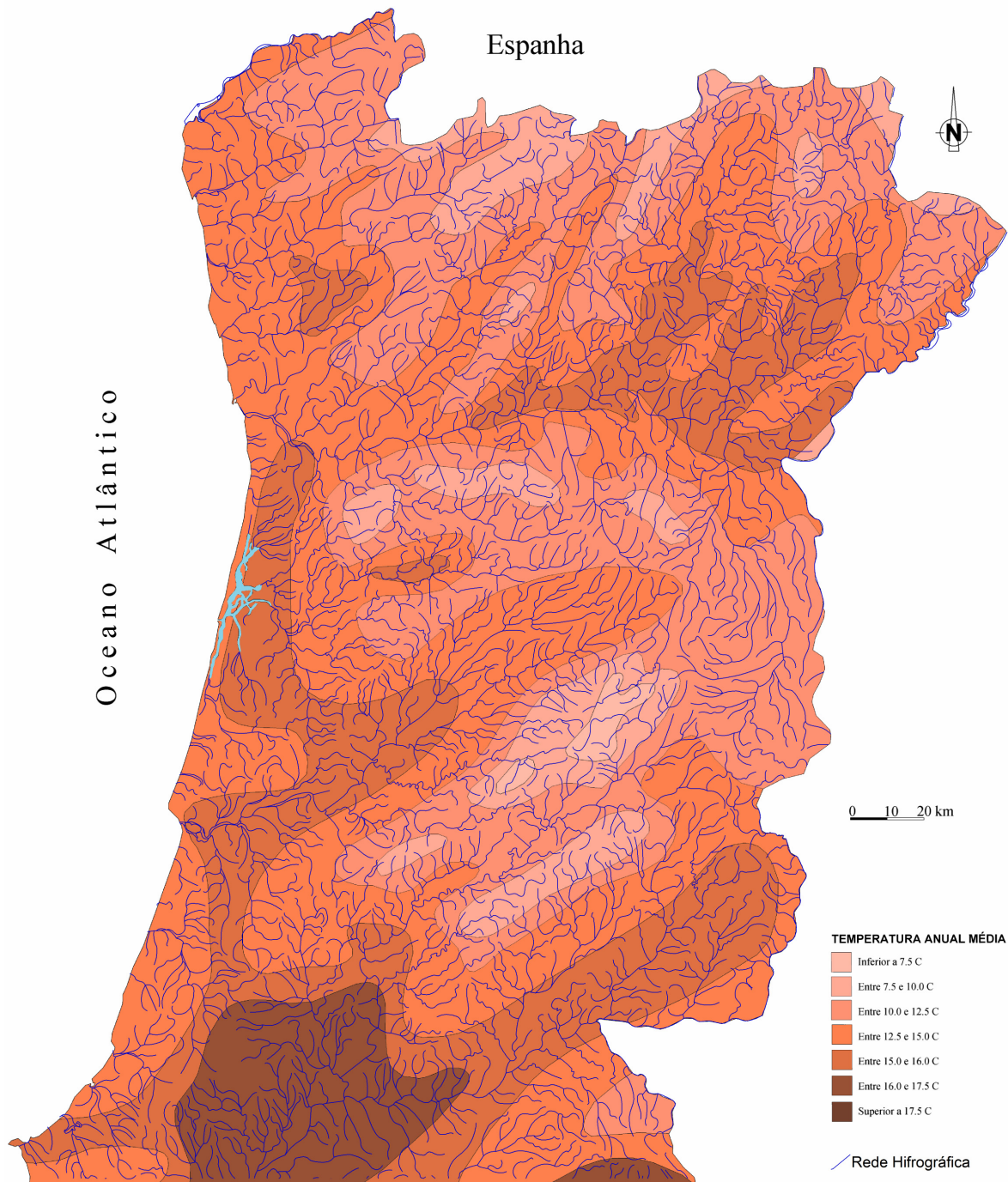


Figura III-5: Carta da temperatura anual média do ar no Maciço Antigo Português (fonte: Inst. Ambiente, 1974).

Resulta dos factos descritos que a recarga é tendencialmente mais elevada na zona Noroeste onde chove mais, havendo, contudo, grandes variações espaciais

e sazonais. Tendo em conta as variações laterais do reservatório geológico e das restantes condicionantes, o coeficiente de infiltração de 17% (artigo [9] Carvalho *et al.* 2000) deve ser usado com muita prudência na avaliação de recursos à escala regional ou local.

Por essa razão, e atendendo ainda aos resultados da aplicação do Modelo de Temez no âmbito da elaboração dos Planos de Bacia Hidrográfica (Hidrorumo 2000), o referido artigo [9] sugere a aplicação de uma taxa de infiltração de 10%, que poderá ainda ser menor se se tratar do projecto de captações no âmbito do combate às secas.

O Coeficiente de Infiltração regionalizado de 10 % foi deduzido de forma conservativa a partir de dados hidrometeorológicos e de dados reais de terreno e corresponderia ao valor anual médio da capacidade de infiltração de Schoeller (1974) controlada pela capacidade de ingestão das rochas. Esta é efectivamente pequena pois a transmissividade e o coeficiente de armazenamento das rochas cristalinas do Maciço Antigo Português são muito reduzidos (*cf.* capítulo II e artigo [7] Carvalho *et al.* 2004 deste capítulo III).

Tendo em conta o exposto, a recarga anual média variaria entre 300 a 50 mm no Maciço Antigo do Norte de Portugal. Lima (2001) para o Minho considera que o coeficiente de infiltração “*não deve ser inferior a 15%, pelo menos para alguns locais*”, opção prudente na linha do anteriormente aqui exposto.

Na folha 1 da Carta Hidrogeológica de Portugal do Instituto Geológico e Mineiro (Pedrosa 1988, 1989) para a região minhota, apresenta-se uma hierarquização do território por classes de aptidão aquífera, definidas supõe-se que por critérios hidrolitológicos, geomorfológicos e hidrometeorológicos. Nesta carta são consideradas três classes de produtividades aquíferas, sendo a de maior grandeza a de $>3 \text{ l/s/km}^2$ (o corresponde a recargas anuais médias de cerca de 93 mm).

Skorepa & Vrba (1985) no maciço de rochas cristalinas da Boémia, com base na separação de hidrogramas de linhas de água consideram que o escoamento subterrâneo não ultrapassa $3,5 \text{ l/s/km}^2$. Esta produtividade aquífera corresponde a uma infiltração de anual média de 110 mm. Curiosamente Krásny (1999), para a mesma região estudada pelos dois autores anteriormente citados, afirma que a

recarga pode exceder 20% da precipitação e alcançar 10 l/s/km² nas zonas montanhosas passando a 1 a 2 l/s/km² nas áreas de cota mais baixa. Esta discrepância dá ideia da complexidade do problema, na República Checa, em Portugal, ou em qualquer outra parte do mundo onde ocorram rochas cristalinas. Ora, infiltrações da ordem de grandeza das propostas por Pedrosa (1988, 1989), Skorepa & Vrba (1985) e Krásny (1999) correspondem a mais de 10% da precipitação anual média no Maciço Antigo Português. Por isso admite-se que as aproximações referidas apoiam a bondade da consideração de um Coeficiente de Infiltração regionalizado de 10% proposto no artigo [9] (Carvalho *et al.* 2000) para o Maciço Antigo Português do Norte e Centro de Portugal.

Recentemente, Alencão (2004) estudou as curvas de recessão de caudal de 12 nascentes de circuito hidrogeológico curto da região de Vila Real concluindo que a taxa de infiltração é da ordem de 2%, apenas excepcionalmente alcançando 10%. Provavelmente os valores de recarga estão sub-avaliados pois o caudal das nascentes não reflectirá a componente profunda do escoamento, porventura existente. Contudo estes resultados, na linha dos de Oliveira (1995), Pacheco (2000) e Alencão *et al.* (2000), reflectem a variabilidade espacial e temporal dos recursos hídricos subterrâneos, a complexidade do tema e a necessidade de estudos integrados com uma forte componente de terreno.

Veja-se neste capítulo III o exemplo de Venda Nova, na confluência dos rios Rabagão e Cávado. A infiltração profunda, controlada no interior da escavação de um circuito hidráulico para instalação de uma central eléctrica subterrânea, foi avaliada em 3% da precipitação. Pode estar aqui uma nova achega para a utilização do valor de uma taxa de infiltração de 3% considerando o combate às secas. Esta taxa pressupõe muito rigor na implantação e no projecto de captações e na determinação dos seus caudais de exploração.

Não faz grande sentido tentar-se a quantificação de recursos hídricos subterrâneos à escala do Maciço Antigo Português, pois ocorrem unicamente sistemas descontínuos, mal individualizados no espaço, exceptuando aquíferos porosos de coberturas sedimentares já bem identificados como os da bacia de Chaves. Quer dizer, embora se admita que existem recursos hídricos subterrâneos consideráveis, a sua distribuição no espaço, os caudais unitários por captação e a sazonalidade das disponibilidades, têm constituído sérias limitações

a uma política tendente à sua valorização. Esta dificuldade tem-se agudizado com a crescente diminuição de pequenos núcleos populacionais devido ao contínuo movimento migratório para os grandes centros (ver figura I do capítulo I).

Na cartografia oficial do INAG (Almeida *et al.* 2000) não é considerado nenhum sistema aquífero no Maciço Antigo Português, a não ser o Aquífero da Veiga de Chaves, evidenciado anteriormente pelos trabalhos de Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1988, 1989). Os trabalhos, traduzidos à escala regional nas figuras III-6, III-7 e III-8, tais como os de Pedrosa (1988, 1989), continuam a não permitir a individualização de sistemas aquíferos caracterizados inequivocamente do ponto de vista geológico, hidrodinâmico e hidroquímico e atribuir-lhe recursos renováveis.

Da mesma forma não faz grande sentido falar-se de reservas (Castany 1982) pois o coeficiente de armazenamento dos sistemas hidrogeológicos é muito pequeno (ver capítulo II), sendo a capacidade de regulação interanual respectiva quase inexistente.

O critério usado neste trabalho para tentar distinguir grandes domínios hidrogeológicos baseou-se, à falta de melhor, na diferenciação litológica (artigos [6] Carvalho *et al.* 2005, [7] Carvalho *et al.* 2004, [9] Carvalho *et al.* 2000 e [10] Carvalho *et al.* 2005) embora se tenha presente que autores como Krásny (2002) entendem que o factor mais relevante no comportamento hidrogeológico das rochas cristalinas seja a fracturação. Melhor seria falar-se em conectividade da rede de fracturação (Marsilly 1986). Ora os dados experimentais analisados mostram que a distribuição de caudais — o mesmo é dizer, da conectividade — é condicionada pela litologia.

Nas condições existentes não é correcto falar-se nos conceitos clássicos de “caudal seguro” (Lee 1915) ou de “caudal perene” (Todd & Mays 2005). Parafrazeando Custódio (1994) o que se torna necessário é buscar metodologias de captação e gestão no espaço que optimizem os caudais extraídos tentando minimizar as consequências ambientais da exploração. Pretende-se a sustentabilidade da utilização dos recursos de água subterrânea que no dizer de Atkinson & Davidson (2002) se pode traduzir no seu uso de forma que passe às gerações futuras numa forma utilizável, sem perda de valor. A aproximação de

Custódio (1994) corresponde à das propostas posteriormente por Kendy (2003), e Bredehoeft (2002): a sustentabilidade dos sistemas deve assentar na monitorização quantitativa e qualitativa das saídas (descargas naturais e extracções), mais do que na vã tarefa de avaliar recursos. Esta via, que exige controlo de campo e monitorização permanentes, terá de ser feita para suporte físico às actividades humanas e conservação da natureza (Marsily 1986). Entre outros aspectos que devem ser tidos em conta, Ludwig *et al.* (1993) e Maimone (2004) incluem o comportamento das comunidades humanas como parte do sistema a ser estudado e gerido.

Resulta claro que a discussão sobre a avaliação dos recursos jamais terá fim pois será difícil gerar consensos sobre o tema: parece, assim, lógica a adopção da *“adaptive management”* (Maimone 2004): *“há uma tensão inerente entre a fixação de caudais sustentáveis, regulados, para os utilizadores e a suspeição de que os conceitos podem mudar”* e os recursos devem ser monitorizados e ajustados ao longo do tempo. Portanto, na gestão adaptativa não há fixação mais ou menos dogmática dos recursos, mas políticas e acções flexíveis adaptadas à resposta dos ecossistemas.

O conceito de classes de produtividade das unidades geológicas, com valores aproximados de disponibilidades por km², adoptado por Paradela (1975), Henriques (1985) e Pedrosa (1988, 1989) é próximo do de recurso. É esse também o entendimento de Larsson (1984) que se refere claramente à produtividade dos aquíferos das rochas ígneas e metamórficas. Para se evitar confusões terminológicas, neste trabalho “produtividade” refere-se unicamente aos caudais dos furos de pesquisa e eventual captação, tema tratado mais à frente neste capítulo III.

4. Caracterização hidrodinâmica

A caracterização hidrodinâmica dos furos e sistemas hidrogeológicos locais que é apresentada nos artigos [7] Carvalho *et al.* (2004), [8] Carvalho (1993), [10] Carvalho *et al.* (2005), e [11] Carvalho *et al.* (2003), deteve-se particularmente na transmissividade (T), a partir da interpretação de ensaios de caudal em furos com profundidades da ordem dos 100 m. Apenas em meia dúzia de casos foi possível

determinar coeficientes de armazenamento (S), à excepção do caso das águas minerais (ver capítulo IV) em que a qualidade e quantidade da informação permitiu a sua determinação de forma generalizada. A avaliação da condutividade hidráulica (k) a partir da espessura considerada com vários critérios (espessura saturada no furo, comprimento de ralos, comprimento entre o primeiro e o último ralo e distância entre o primeiro e o último níveis produtivos) foi abandonada pois conduziu a resultados erráticos.

Não tem significado uma classificação hidrogeológica baseada nos gradientes hidráulicos: estes acompanham a topografia, têm valores muito variáveis, condicionam o escoamento subterrâneo mas não são o factor determinante da produção de água subterrânea.

A transmissividade é o factor principal da produção de água dos aquíferos e pode ser regionalizada a partir de ensaios de caudal de furos. Por isso foi empreendida a respectiva interpretação recorrendo a programas informáticos comerciais como o “*AquiferTest for Windows*” (versão 2.55) da “*Waterloo Hydrogeologic Software*” e o “*Aqtesolv*” (versão 1.1) da “*HydroSolve, Inc.*” e a aproximações deduzidas do caudal específico ao fim de seis horas.

Assim, foram analisadas duas populações distintas: (i) 110 furos de pesquisa e eventual captação da Zona Centro-Ibérica (*s.str.*) incluindo parte da população do artigo [7], e, (ii) 170 furos de Trás-os-Montes (Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, 1988, 1989 e artigo [9] Carvalho *et al.* (2000). Em locais considerados representativos da Zona Centro-Ibérica (Porto e Viseu) foram estudados inicialmente duas dezenas de furos considerando um modelo contínuo equivalente (artigos [7] Carvalho *et al.* 2004 e [10] Carvalho *et al.* (2005). O ajuste conseguido ao modelo de Theis (1935) foi generalizadamente bom.

Os valores obtidos pelo método de Theis (1935) diferem em cerca de 0,5 a 1% dos obtidos com a aproximação logarítmica de Cooper–Jacob (1946), sendo o valor mais alto o correspondente à metodologia clássica de Theis. A correlação é alta com coeficiente de determinação (R^2) de 0,97.

Os valores de transmissividade obtidos pelo método da Recuperação de Theis são menores que os correspondentes a Theis (1935) e podem ser aproximados pela relação: $T_{(recup\ Theis)}=0,72T_{(Theis)}$ com $R^2=0,73$. Anteriormente, Afonso (1997,

2003) verificara, igualmente, em ensaios realizados em rochas graníticas da região do Porto, a tendência para os valores de $T_{(\text{recup Theis})}$ serem mais baixos que os de $T_{(\text{Theis})}$. Este abaixamento poderá corresponder ao efeito da diminuição de espessura saturada.

Nalguns casos verificaram-se efeitos de esvaziamento e/ou desenvolvimento de fracturas e a presença de barreiras impermeáveis. Geralmente, ao fim de poucas horas, foram alcançadas pseudo-estabilizações do nível dinâmico, de pendor variável com o caudal extraído, o tempo de bombagem e o funcionamento hidráulico local do sistema hidrogeológico. A análise do comportamento do troço final “pseudo-estabilizado” é da maior importância para a fixação do caudal de exploração conforme os critérios que serão definidos adiante.

Nas áreas do Porto e Viseu foi analisada, com modelos de regressão linear simples (artigo [7] Carvalho *et al.* 2004), a relação entre a transmissividade calculada pelo modelo de Theis e o caudal específico (Q_{esp}) ao fim de seis horas, à semelhança de trabalho anterior de forte impacto regional em Trás-os-Montes (Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, 1988, 1989). Constatou-se que nessas condições o rebaixamento, para os caudais extraídos, está em geral pseudo-estabilizado. Esta pseudo-estabilização é conseguida pois os caudais de ensaio têm em conta as normas de projecto para o caudal de exploração conforme se refere no tópico 5 deste capítulo, isto é, o caudal de ensaio é condicionado pelo rebaixamento disponível, limitado pela cota superior do tubos-ralo.

Foi definida a relação $T=0,72 Q_{\text{esp}}$ para o tempo de bombagem de 6 horas com R^2 de 0,97, portanto uma correlação fortíssima. Esta relação pode ser comparada com a aproximação de Logan (1964) deduzida para um modelo de bombagem em regime permanente (ver discussão deste assunto nos artigos [7] e [10] Carvalho *et al.* (2004) e Carvalho *et al.* (2005).

Nos sistemas hidrogeológicos da Zona Centro-Ibérica é fundamental referir-se o tempo de bombagem para o qual se calcula a transmissividade pois o coeficiente $C=T/Q_{\text{esp}}$ varia com o tempo, já que o caudal específico diminui. Esta variação deve-se ao aumento da importância das perdas de carga na captação e, porventura no próprio aquífero, que crescem com o caudal bombado.

Conforme se refere no artigo [10] Carvalho *et al.* (2005) foi tentada a análise do comportamento do coeficiente C, em termos médios, em oito áreas da Zona Centro-Ibérica (*s.str.*) em função do tempo até um máximo de 36 horas, tendo-se chegado à regressão logarítmica $C=0,1579L_n t+0,5382$ (t em horas; $R^2=0,97$). Para a Zona Centro-Ibérica, teríamos, assim, uma forma expedita para avaliar a transmissividade em função do caudal específico para um dado tempo de bombagem através da expressão:

$$T=(0,1579L_n t+0,5382)Q_{esp}$$

em que, t em horas, transmissividade em m^2/dia e caudal específico em $m^3/dia/m$.

Esta aproximação é aceitável em modelos de bombagem e rebaixamento como os que são propostos no tópico 5 deste capítulo III, onde são minimizadas as perdas de carga na captação. Quando se praticam rebaixamentos muito elevados, à revelia dos critérios propostos no tópico 5, o parâmetro C pode ter um crescimento exponencial como foi referido por autores como Davies & Wiest (1966) e Lima (2001). Destaque-se que Davies & Wiest (1966) mostraram magistralmente que o rebaixamento de furos da captação em rochas fissuradas é função do caudal de extracção e do tempo de bombagem pondo em evidência a importância do conhecimento do modelo conceptual do aquífero na avaliação do comportamento do caudal específico e do caudal de exploração.

No tópico 6 deste capítulo III, retomando o artigo [8] Carvalho (1993) e Hidroprojecto, Acavaco & Tahal (1987, 1988, 1989) foi definido, a propósito da tentativa de cartografia hidrogeológica à escala regional, o Índice Metros Caudal (IMC).

O Índice Metros Caudal bruto (IMC_{bruto}), designado no artigo [10] Carvalho *et al.* (2005) por *Gross Meters Capacity Index* (GMCI), é a razão numa dada área do total de metros perfurados em todos os furos pelo caudal total obtido. O inverso do IMC_{bruto} tem as dimensões da transmissividade. Os resultados da análise através de modelos de regressão linear simples entre a transmissividade e este índice estão apresentados graficamente no referido artigo [10] e correspondem a:

$$\text{Transmissividade mediana} = 0,92 * 1/IMC_{bruto} \quad R^2=0,47$$

De acordo com a aproximação atrás referida, o inverso do IMC_{bruto} seria praticamente igual à transmissividade mediana na área. Nesta dissertação o IMC_{bruto} foi aplicado, à avaliação da transmissividade nas regiões de Castelo de Vide (Serra de S. Mamede) e na Zona de Ossa-Morena em Arraiolos (ver artigo [1] Carvalho (1979) do capítulo II) com resultados satisfatórios.

Esta metodologia deve ser encarada com prudência enquanto não for validada com análise estatística mais aprofundada, mas pode ser encarada como uma primeira aproximação à magnitude da transmissividade. O IMC desempenha um papel relevante no modelo de cartografia que aqui se propõe, nas figuras III-6, III-7 e III-8. Wright (2000) aplicou na Irlanda os gráficos QSC no qual são comparados o Caudal Específico (SC) num determinado furo e o respectivo caudal (Q) de ensaio, podendo assim considerar-se um índice de produtividade do furo, eventualmente generalizável a unidades geológicas ou domínios geográficos. Havendo amostragem suficiente (Wright 2000 sugere entre 20 a 50 amostras por aquífero) este Índice de Produtividade conduz à definição de cinco classes de produtividade. Ensaíamos esta técnica à população de furos com ensaios de caudal disponíveis no Maciço Antigo mas não foi possível detectar qualquer tendência de distribuição geográfica ou litológica.

No artigo [7] Carvalho *et al.* (2004) refere-se que a distribuição de caudais apresenta medianas inferiores às médias, situação típica de uma distribuição lognormal (Davies & DeWiest 1966, Custodio & Llamas 1983). Banks *et al.* (1993) recomendam o uso da mediana dos caudais pois geralmente os valores típicos registados nos arquivos estão exagerados. Por esta razão, neste trabalho, para que a avaliação de produtividades fosse sempre feita do lado da segurança usamos sistematicamente a mediana para caracterizar caudais e transmissividades.

No artigo [10] Carvalho *et al.* (2005) foi apresentada a síntese dos resultados da transmissividade e dos caudais de exploração para o Maciço Antigo, verificando-se que, para as principais litologias, os resultados são os indicados no quadro III-1.

Quadro III-1: Valores medianos do caudal de exploração e da transmissividade nas principais litologias

Litologia	Caudal de exploração mediano (l/s)	Mediana da transmissividade (m ² /dia)
Rochas metassedimentares (excluindo quartzitos)	0,50	3,1
Quartzitos	0,74	4,0
Granitos	0,02	1,7

Destaca-se que para as populações analisadas — furos com profundidades não ultrapassando 150 m — tendencialmente as captações em rochas metassedimentares são mais produtivas que em granitos e os quartzitos são as rochas com captações mais produtivas. Esta discriminação da produtividade por litologias é reforçada pelo comportamento do Índice Metros Caudal (ver artigos [10] Carvalho *et al.* (2005) e [11] Carvalho *et al.* (2003) e figuras III-6, III-7 e III-8).

Esta constatação, evidenciada anteriormente (e.g., Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, 1988, 1989; Alençao 1998, Mendonça et al. 1999, Pereira 1999, Lima 2001), está na base do zonamento proposto para os recursos hídricos subterrâneos do Maciço Antigo Português. Por outro lado o comportamento hidrogeológico do Maciço Antigo Português não se afasta significativamente dos padrões conhecidos noutras regiões da Europa e no mundo no que respeita a transmissividades e caudais (e.g., Larsson et al. 1987, Wright & Burgess 1992, Lloyd 1999, Singhal & Gupta 1999, Robins & Misstear 2000, Stober & Bucher 2000, ERHSA 2003).

Krásny (2002) atribui uma singularidade à transmissividade de rochas ígneas e metamórficas que não parece ocorrer na Maciço Antigo (ver capítulo II, exemplo de Castelo Novo): as rochas ígneas e metamórficas teriam na zona de recarga uma transmissividade média menor (1,2-2,8 m²/dia) que na de descarga (4,5 -13 m²/dia). Atente-se, ainda assim, nos valores de transmissividades extremamente

próximos dos definidos nos artigos [8] Carvalho (1993) e [10] Carvalho *et al.* (2005) deste Capítulo III. Para Skorepa & Vrba (1985) no maciço da Boémia ocorrem caudais médios de apenas 0,42 l/s. Na Bretanha (Talbo 1983, Carn 1990) o caudal médio de perfuração é de 1,7 l/s caindo para 1,2 l/s, considerando apenas granitos e gnaisses.

O Coeficiente de Armazenamento (S) só pode ser calculado quando se dispõe de furos de observação. Para furos de 100 a 150 m de profundidade cerca de uma dezena de valores são da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} (ver artigo [7] Carvalho *et al.* (2004)) o que conforta razoavelmente a aproximação de Lohman (1972).

4.1 A área de Venda Nova: um exemplo

Um exemplo que se julga representativo de algumas condições hidrodinâmicas ocorrentes nos maciços graníticos das regiões montanhosas do NE do Maciço Antigo corresponde à síntese dos resultados de parte das investigações hidrogeológicas levadas a cabo na Albufeira de Venda Nova, no Rio Rabagão, para construção do Circuito Hidráulico do empreendimento hidroeléctrico de Venda Nova II (Hidrorumo 1997; Lopes Alves 1998), ver figura III-1.

O circuito hidráulico de Venda Nova II consiste no reforço de potência do aproveitamento hidroeléctrico de Venda Nova que entrou em funcionamento em 1951. Este reforço de potência aproveita a queda de 420 m existente entre as albufeiras de Venda Nova e de Salamonde localizadas, respectivamente, no troço final do rio Rabagão e no rio Cávado. O circuito hidráulico subterrâneo tem cerca de 4,5 km de desenvolvimento na margem esquerda do rio Rabagão e inclui uma caverna subterrânea, a uma profundidade da ordem de 350 m, onde se localiza a central.

Para controlo de eventuais influências decorrentes da construção e entrada em funcionamento do circuito hidráulico, a partir de 1997 todas, ou virtualmente todas, as nascentes e captações de água subterrânea situadas numa pequena bacia de 5,7 km² influente na obra foram monitorizadas.

Na área afloram os granitos de Montalegre, de Pondras e da Borralha (i.e., granitos variscos, sintectónicos, porfiríodes de grão médio a grosseiro, de duas micas, essencialmente biotíticos). Marginalmente, no troço NNW e terminal do circuito hidráulico junto ao rio Cavado, ocorrem rochas metassedimentares do Paleozóico com uma xistosidade regional principal orientada para o quadrante NE. O conjunto está cortado por fracturação próxima de N-S e pela falha da Botica, estrutura regional de mais de sete quilómetros de extensão, com uma orientação média NE (pormenores em Noronha & Ribeiro 1983).

No total foram monitorizados 281 pontos de água com periodicidade semestral. Destes pontos de água, 262 são nascentes. A condutividade eléctrica da água destes pontos de água é da ordem de $40 \mu\text{Scm}^{-1}$. No período de 1996-2003 o caudal médio por nascente foi de 0,62 l/s, sendo o caudal mínimo de 0,28 l/s. A mediana da relação $Q_{\text{máximo}}/Q_{\text{mínimo}}$ é de 4,25. O escoamento subterrâneo total, calculado pela aproximação de Castany-Berkalof (1970) é de $1,26 \text{ hm}^3$, isto é, cerca de 40 l/s. A recarga anual média assim deduzida é de 221 mm. A precipitação anual média, determinada num posto udométrico situado no local da obra, foi de 2116 mm o que conduz a um Coeficiente de Infiltração da ordem de 10,4 %. A mediana da variação sazonal da superfície livre foi de 4 m e o coeficiente de armazenamento deduzido é da ordem de 0,10. Este coeficiente de armazenamento está de acordo com os valores geralmente aceites na bibliografia (Custodio & Llamas 1983, Fetter 2001) para a zona alterada. O escoamento subterrâneo anual médio “profundo”, isto é, medido nas “emergências” no interior da obra, é de 12 l/s o que corresponde a 30 % da recarga anual média e a um “coeficiente de infiltração profundo” de 0,03 (cerca de 66 mm/ano).

A condutividade hidráulica do maciço, determinada a partir de ensaios Lugeon, é de 0,1 m/dia na zona alterada e de 0,01 m/dia na zona sã, fracturada. Estes valores são concordantes com os que têm sido obtidos noutras áreas da Zona Centro-Ibérica pois as “transmissividades equivalentes” considerando profundidades até 400 m, seriam de 10 a $1 \text{ m}^2/\text{dia}$, respectivamente na zona alterada e na zona sã, fracturada.

As águas de circulação profunda, afluentes ao circuito hidráulico, têm uma condutividade eléctrica de cerca de $270 \mu\text{Scm}^{-1}$ e são bicarbonatadas sódicas com um teor de fluoreto de 5,1 mg/l.

5. Produtividade de furos de pesquisa e captação e risco geológico de insucesso associado à prospecção

O significado do termo **produtividade**, entendido como sinónimo de caudal, em furos de pesquisa e eventual captação de água subterrânea, deve ser analisado com cuidado em rochas cristalinas pois pode ter várias conotações se o tema não for convenientemente esclarecido à partida.

Nas operações de pesquisa e captação nestas rochas, realizada geralmente com percussão pneumática com martelo de fundo de furo, pode falar-se em pelo menos cinco tipos de observações de caudal a saber: (i) os caudais de perfuração que são os caudais instantâneos obtidos durante a perfuração e que geralmente são medidos sempre que há indicações de aumento de caudal, e de forma periódica, quando se faz a limpeza do furo; (ii) o caudal determinado no fim da perfuração — que nem sempre é o caudal máximo de perfuração com o furo em *open-hole* — para tentar avaliar a produtividade final das camadas atravessadas; (iii) o caudal medido durante e após o desenvolvimento após entubamento e completamento do furo; (iv) o caudal (ou caudais) do ensaio de caudal; e, (v) finalmente, o caudal de exploração, o *long-term well capacity* e *long-term discharge capacity* dos autores anglo-saxónicos.

É por isso muito importante, quando se menciona a produtividade de um furo, clarificar a que tipo de observação se está a fazer referência.

O **caudal de exploração** de um dado furo, conforme o artigo [7] Carvalho *et al.* (2004) deste capítulo III, é o volume de água por unidade de tempo que pode ser extraído de forma sustentável, tendo em conta o dimensionamento da obra, as características da procura e a correcta gestão do aquífero e do meio envolvente.

O problema da definição do caudal de exploração por captação unitária prende-se com os constrangimentos locais e regionais a que é necessário atender, incluindo o modelo conceptual do aquífero (Carvalho 2000), particularmente os seguintes:

(i) Em furos captando apenas na parte superior do maciço, com comportamento próximo de aquífero livre, o rebaixamento não deve exceder 50 a 60% da espessura saturada na captação;

(ii) Em furos que interessem fracturação profunda, com comportamento próximo de aquífero confinado, o rebaixamento não deve ser levado abaixo do topo da fracturação aproveitada com tubos-ralo;

(iii) Os tubos-ralo dos furos, caso existam, nunca devem ficar a descoberto e deve ser respeitado o critério da velocidade de entrada da água na captação não exceder 3 cms^{-1} . Caso o furo seja parcialmente entubado o grupo electrobomba tem de ficar situado na câmara de bombagem materializada pelo revestimento definitivo parcial;

(iv) Não deve ser feita sobrebombagem relativamente à capacidade do aquífero e ao dimensionamento da captação;

(v) A operação dos furos deve prever a colocação do grupo electrobomba submersível vários metros abaixo do nível dinâmico.

(vi) A nível de gestão global dos sistemas hidrogeológicos deve procurar-se que a exploração não conduza a diminuições irreversíveis das descargas naturais ou dos níveis piezométricos;

O cumprimento escrupuloso destas e de outras normas de exploração de carácter mais geral (Carvalho 2000) conduz a que o caudal de exploração seja substancialmente mais baixo que o registado durante a limpeza ou nos ensaios de caudal finais. Esta aproximação reduz drasticamente as ocorrências negativas ligadas à qualidade e quantidade da água captada e sua constância no tempo. A credibilidade das águas subterrâneas sai assim reforçada, embora sem o brilhantismo fugaz da obtenção de grandes caudais instantâneos que são a ruína de muitos projectos.

O caudal de exploração corresponde ao que é possível extrair de uma dada captação tendo em conta constrangimentos técnicos, económicos e mesmo institucionais pois, em rigor, o caudal de exploração é fixado pelos órgãos de tutela, actualmente as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regionais. O caudal de exploração de uma captação não é, por isso, o caudal máximo

extraível mas antes o que as condições hidrogeológicas, a obra, o enquadramento ambiental e as interacções com outros aquíferos ou corpos de água superficial ou as imposições legais permitem.

Esta aproximação acima apontada opõe-se frontalmente à prática corrente da colocação do grupo electrobomba à máxima profundidade permitida pelo entubamento, muito abaixo das principais fracturas produtivas e dos tubos-ralo. As notas seguintes são achegas para o estabelecimento do caudal de exploração de furos de pesquisa, transformados em captação:

(i) Realizar ensaios de caudal escalonados de curta duração e ensaios prolongados, da ordem de 24 a 72 horas a caudal constante;

(ii) Tentar manter níveis dinâmicos estabilizados, acima dos tubos-ralo (caso existam) ou no interior da câmara de captação no caso de furos não entubados, isto é, em *open-hole*;

(iii) Tentar manter o fluxo laminar na captação e no aquífero. Em rochas cristalinas o fluxo já é muitas vezes turbulento, intra-formação. O verdadeiro objectivo é obter água isenta de finos e acessoriamente otimizar os rebaixamentos;

(iv) Controlar a influência dos caudais e dos rebaixamentos no quimismo e qualidade bacteriológica da água;

(v) Ter em conta a vulnerabilidade e risco de contaminação.

Conforme foi anteriormente expresso, resulta claro que a fixação do caudal de exploração de uma captação de água subterrânea não corresponde à simples determinação do caudal crítico com um ensaio escalonado. Este caudal crítico poderá ser o valor máximo aceitável em termos puramente hidrodinâmicos. Corresponderá ao caudal de exploração se não houver sobreposição de outras limitações, nomeadamente a que decorre da posição do topo superior dos tubos-ralo.

Um critério usado para fixar o caudal de exploração em rochas cristalinas portuguesas (Carvalho 2000; artigo [7] Carvalho *et al.* (2004) e artigo [10] Carvalho *et al.* (2005)) é o da extrapolação da curva de rebaixamento do ensaio a caudal constante pela aproximação de Cooper-Jacob até seis meses de

bombagem, conforme se discute no capítulo IV, a propósito das águas minerais naturais de ciclo curto.

Retoma-se aqui a recomendação de que não pode nunca ser confundido o caudal obtido durante a perfuração e em operações subsequentes de completamento da obra, designados frequentemente por caudais “*air-lift*” (mas que geralmente são de simples “*air-flow*”) com o caudal de exploração. Esta falsa aproximação, que colide com os princípios enunciados, leva a importantes sobreavaliações da produtividade real das obras e dos aquíferos, induz em erro os utilizadores e põe em causa a credibilidade do papel das águas subterrâneas em rochas cristalinas no ordenamento do território.

No artigo [7] Carvalho *et al.* (2004) foi proposta a designação de Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) para a relação entre o caudal de exploração (Q_{expl}) e o caudal máximo de perfuração ($Q_{max\ Perf}$) a partir da análise de 251 furos no Maciço Antigo Português. No artigo [10] Carvalho *et al.* (2005) fez-se aproximação semelhante considerando duas populações distintas na Zona Centro Ibérica, num total de 280 furos, e para ambas chegou-se a CRC de 0,27 com dispersão relativamente alta (R^2 de 0,5). Portanto, no Maciço Antigo do Norte e Centro de Portugal, considerando-se a utilização de um Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) de 0,27, os caudais de exploração serão da ordem de 1/3 a 1/4 do caudal máximo de perfuração.

Em zonas de gradientes altos, de pequenas áreas de contribuição para a obra de captação e em furos com rebaixamentos disponíveis diminutos (zonas captantes próximas da superfície), o CRC tende a ser muito baixo. É mais elevado em áreas aplanadas com fracturação ou fissuração bem distribuídas e captações com grande rebaixamento disponível.

Em águas minerais naturais e de nascente em que a necessidade da manutenção da pureza bacteriológica conduz a severas limitações ao rebaixamento (ver capítulo IV, artigos [20] Carvalho (2001) e [21] Carvalho (1996), o CRC pode ser ainda mais baixo, podendo descer abaixo de 0,1. Quer isto dizer que, em condições muito penalizantes, o caudal de exploração em captações destes recursos geológicos pode ser dez vezes menor que o caudal máximo de perfuração.

6. Unidades hidrogeológicas, risco geológico de insucesso e custo da água

A cartografia hidrogeológica de rochas cristalinas é um tema de tal forma complexo que as cartas clássicas (*e.g.*, Unesco 1970, Struckmeier & Margat 1995) se limitam a recomendar que elas sejam figuradas com uma única cor castanha com dois tons correspondentes a: (i) castanho escuro: unidades com aquíferos de pequena importância com recursos locais limitados; e, (ii) castanho claro: unidades sem recursos hídricos subterrâneos. A carta hidrogeológica da Europa à escala 1/1 500 000 (1972) e o mapa de recursos de águas subterrâneas da Comunidade Europeia à escala 1/500 000 (4 folhas) (1982-1986) foram editadas essencialmente com esses critérios. Entre nós, Moitinho de Almeida (1970) na Carta Hidrogeológica de Portugal, à escala 1/1 000 000, seguiu os mesmos critérios e o Maciço Antigo, foi contemplado com apenas duas cores: (i) o castanho claro, incluindo rochas granitóides, consideradas formações compactas fissuradas de permeabilidade reduzida; e, (ii) o castanho escuro, xistos (*sensu lato*) designadas por formações compactas fissuradas de permeabilidade muito reduzida.

A Carta Hidrogeológica de Portugal, à escala 1/200 000, folha 1 (Pedrosa 1998, 1999) rompeu com a tradição e, tentando numa mesma folha, apresentar dados hidrogeológicos muito diversos, inclui manchas de aptidão aquífera (três categorias para meio poroso e três para meio fissurado com as produtividades das unidades aquíferas expressas em l/s/km²).

Enfatiza-se aqui que, sem menosprezo da informação que é tratada nas cartas hidrogeológicas clássicas, de muita importância para o planeamento regional, o utilizador da água subterrânea tem necessidade de conhecer os aspectos seguintes (adaptado de CIEH 1986):

(i) Acessibilidade ao recurso, compreendendo o risco geológico de insucesso e a profundidade;

(ii) Explorabilidade, incluindo a produtividade das obras de captação e a profundidade de colocação da bomba; e,

(iii) Segurança da exploração ditada pela sustentabilidade dos caudais, isto é pelos recursos renováveis, condicionados pela infiltração e pela recarga.

Conforme já tivemos ocasião de referir, nesta dissertação julgamos oportuno apresentar três tentativas de cartografia hidrogeológica na óptica do utilizador nomeadamente: (i) figura III-6, Unidades hidrogeológicas do Norte e Centro da Zona Centro-Ibérica (s.str.); (ii) figura III-7, Esboço da carta de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos de Trás-os-Montes; e, (iii) figura III-8, Esboço da carta do custo da água para agricultura em Trás-os-Montes. Estes documentos são complementados pelo Esboço de carta hidrogeológica apresentado no Anexo A – I, que inclui também as águas minerais naturais, recursos geotérmicos e águas de nascente (tema desenvolvido no capítulo IV).

Nos documentos cartográficos atrás referidos procurou-se integrar o conhecimento existente sobre as características hidrodinâmicas das litologias do Maciço Antigo, da recarga e da produtividade das obras de captação e das unidades geológicas regionais. Valerá a pena sublinhar aqui que as aproximações apresentadas ao zonamento hidrogeológico do Maciço Antigo correspondem ao balbuciar de uma via, pois os critérios ligados à litologia foram claramente prevalecentes. Necessário será encontrar formas em que se caminhe para sub-unidades, considerando especificidades locais deduzidas da litologia, da geomorfologia, da tectónica, da recarga e sobretudo de informação sobre as obras de pesquisa e captação e sua monitorização..

A regionalização das produtividades das obras de captação pode ser realizada com a aplicação da *“classificação da magnitude e variância da transmissividade”* de Krásny (1993). No entanto, no caso do Maciço Antigo de Portugal, esse índice é de interesse limitado pois virtualmente todas as situações se encaixam na Classe IV, transmissividade de 1 a 10 m²/dia (transmissividade baixa) adequada para extracções menores para abastecimento local e, muito raramente, na Classe III, transmissividade de 10-100 m²/dia (transmissividade moderada) adequada para abastecimento de pequenas povoações. Além disso pressupõe o conhecimento da transmissividade o que, no caso do Maciço Antigo, é parâmetro hidrodinâmico difícil de obter pois raramente estão disponíveis ensaios de caudal.

Jenkins & Prentice (1982) apresentaram um método deduzido em estudos realizados no Wake County na Carolina do Norte, E.U.A., para caracterizar o potencial de rochas cristalinas para a implantação de captações. A partir de ensaios de caudal de 24 horas deduziram um Coeficiente de Fracturação (F):

$$F=Q/s\sqrt{(t/\pi)}$$

em que, Q é o caudal e s o rebaixamento para o tempo de bombagem t . São considerados caudais e rebaixamentos ao fim de 24 horas de bombagem. Valores de F baixos significariam caudais baixos; F altos, caudais altos. Note-se que este Coeficiente de Fracturação mais não é do que uma forma de controlar o caudal específico com o tempo de bombagem, assumindo que um ensaio de 24 horas já é representativo das condições ocorrentes em torno da captação. Esta técnica, que parece interessante, não pode ser aplicada sistematicamente no Maciço Antigo por ausência de informação, nomeadamente de ensaios de caudal de 24 horas.

O Índice de Produtividade QSC de Wright (2000), já referido no tópico 3 deste capítulo III, que inclui a realização de gráficos bilogarítmicos no qual são comparados o Caudal Específico (SC) num determinado furo e o respectivo caudal (Q) de ensaio, pode ser também encarado como uma forma de regionalizar produtividades. Já referimos que foi tentada a sua aplicação ao Maciço Antigo sem que se destacassem categorias correlacionáveis com a litologia ou qualquer distribuição geográfica.

A ideia de utilizar um índice em rochas fissuradas como indicador da respectiva produtividade, incluindo caudais extraídos e metros perfurados, encontra-se em autores como Davis & Turk (1964) e Summers (1972). Custodio & Llamas (1983) referem claramente que os furos que atravessam mais que uma unidade litológica podem ser estudados considerando que cada aquífero fornece um determinado caudal por unidade de espessura.

Em Hidroprojecto, ACavaco & Tahal (1987, 1988, 1989) e no artigo [8] Carvalho (1993), foi decidido usar um índice inverso, o Índice Metros Caudal (IMC), relacionando o número total de metros perfurados numa determinada área e o caudal total obtido nesses furos. Essa opção resultou de duas razões práticas a saber: (i) para uma determinada área, conhecendo o IMC facilmente se avalia o

número de metros que é necessário perfurar em termos médios para se obter um determinado caudal; e, (ii) torna-se fácil avaliar o custo da água, incluindo o risco geológico de insucesso associado à prospecção, factor que poucas vezes é tido em conta na regionalização da informação hidrogeológica, porque não disponível.

O Índice Metros Caudal (IMC) foi então definido como a razão, numa dada área, entre o total de metros perfurados em todos os furos e o caudal total obtido em furos com caudais de exploração superiores a 0,5 l/s. Considerou-se o caudal de 0,5 l/s pois este foi considerado o caudal mínimo para suportar uma pequena exploração agrícola rentável (Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1989). Pode acrescentar-se agora, também, que esse caudal é suficiente para o abastecimento urbano a pequenas povoações (200 habitantes para capitações da ordem de 200 l/habitante/dia). Esta técnica de análise foi inicialmente aplicada em catorze áreas representativas de Trás-os Montes cobrindo, cada uma, superfícies da ordem de 2 a 3 km²: artigo [8] Carvalho (1993) e Hidroprojecto, Acavaco & Tahal (1987, 1988, 1989).

O conhecimento de furos não aproveitados e respectivas profundidades só podem ser avaliados com recurso a inventários de campo generalizados, dado o estado actual de incumprimento do Dec-Lei 45/94 de 22 de Fevereiro que regula o planeamento e a utilização dos recursos hídricos, actividades que, como se sabe, têm andado afastadas das preocupações dos decisores políticos. Por isso, geralmente, a determinação do IMC a partir de dados de organismos oficiais, conduz a valores sobreavaliados, ou nem sequer é possível.

O Índice Metros Caudal (IMC) é um índice *ajustado* pois: (i) é calculado com o caudal de exploração dos furos determinados com base nos critérios defendidos nesta dissertação; (ii) despreza caudais inferiores a 0,5 l/s; e, (iii) considera furos com profundidades até 90 m. Foi concebido desta forma com o objectivo de calcular o custo da água permitindo, de um fôlego, avaliar os investimentos para captar 1 l/s, tendo em conta o risco hidrogeológico de insucesso. Valores altos do IMC significam alto risco geológico de insucesso. Quanto mais baixo o índice, maior a favorabilidade para investimentos em pesquisa e captação.

Posteriormente, *cf.* artigos [10] Carvalho *et al.* (2005) e [11] Carvalho *et al.* (2003) tendo-se verificado que o inverso do $IMC_{ajustado}$ tem equação de dimensões

L^2T^{-1} , portanto, iguais às da transmissividade, foi decidido comparar os valores de $1/IMC_{bruto}$, designado no artigo [10] por *Gross Meters Capacity Index* (GMCI) com a média e mediana das transmissividades em cada área. O Índice Metros Caudal bruto (IMC_{bruto}) é definido no artigo [10] como a razão, numa dada área, entre o total de metros realizados e o somatório dos caudais em final de perfuração em todos os furos.

Os resultados da análise através de um modelo de regressão linear simples estão apresentados graficamente no artigo [10] Carvalho *et al.* (2005) e podem ser resumidos assim:

- Transmissividade mediana = $0,92 * 1/IMC_{bruto}$ $R^2 = 0,47$
- Transmissividade mediana = $2,90 * 1/IMC_{ajustado}$ $R^2 = 0,62$

Apesar da dispersão ser significativa, crê-se que esta aproximação pode ser usada, com o devido controlo de campo e a necessária prudência, a outras áreas do Maciço Antigo. É via que deverá ser explorada com métodos estatísticos mais robustos.

De acordo com a aproximação atrás referida, o inverso do IMC_{bruto} seria praticamente igual à transmissividade mediana da área. Esta aproximação, conforme foi já referido, vem sendo aplicada em vários pólos de pesquisa com resultados satisfatórios, fornecendo aproximações da mesma ordem de magnitude.

O Índice Metros Caudal, na sua forma de IMC_{bruto} , ajuda na avaliação à escala regional das transmissividades. O Índice Metros Caudal na sua forma de $IMC_{ajustado}$, portanto contando com parâmetros económicos da procura, permite caminhar para a avaliação do custo da água à escala regional. Ambas as modalidades correspondem a formas simples, tentativas, de regionalização das produtividades unitárias dos furos.

Das relações estabelecidas para a transmissividade mediana, pode deduzir-se um Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) de $0,92/2,90 = 0,32$, muito próximo do obtido (0,27) para a mesma população de furos, (ver tópico 5 deste capítulo III, a propósito da determinação do caudal de exploração).

O esboço de carta hidrogeológica do Norte e Centro do Maciço Antigo Português (Anexo A - I) corresponde a uma tentativa de disponibilizar, numa escala de pouco pormenor, informação de carácter geral (a disponível) para apoio ao Ordenamento do Território.

As condições de utilização da água subterrânea no Maciço Antigo Português está ligada a domínios do conhecimento hidrogeológico (e outros) que continuam mal resolvidos, nomeadamente (Carvalho 2000 e artigo [11]): (i) a disponibilidade de caudais sustentados no espaço e no tempo à escala local; (ii) a insuficiência de medidas concretas de defesa da qualidade química e bacteriológica dos recursos; (iii) a dificuldade para aplicar a legislação existente no que concerne ao licenciamento de captações (Dec-Lei 45/94 de 22 de Fevereiro) e à definição de Perímetros de Protecção (Dec-Lei 382 /99 de 22 de Setembro) a captações para abastecimento público; e, (iv) a visão tecnocrática de sucessivas gerações de gestores que tendencialmente substimam o papel das águas subterrâneas nos pequenos abastecimentos urbanos.

Conforme foi referido no artigo [11] (Carvalho *et al.* 2003), e pelas razões aduzidas no capítulo I, não são aqui apresentados elementos de natureza hidroquímica. Afonso (1997), Alencão (1998), Marques (1999), Pereira (1999) dentre outros, mostraram que as águas captadas são generalizadamente hipossalinas e que as águas de rochas metassedimentares são ligeiramente mais mineralizadas que as de rochas granitóides. Porém, todas são, geralmente, em situações de não contaminação, adequadas para consumo humano à luz do Dec-Lei 236/98 e para agricultura (Hidroprojecto, ACavaco & Tahal, 1987, 1988, 1989). Portanto, raramente o quimismo é constrangimento à utilização da água subterrânea nesta área do País, embora se conheçam situações pontuais de ultrapassagens dos valores limite para consumo humano, nomeadamente em relação ao arsénio, ao manganês e ao fluoreto.

Calado (2001) e Lima (2001) abordaram questões ligadas ao quimismo das águas minerais (que terão alguma visibilidade no capítulo IV desta dissertação), na óptica do apoio à prospecção e pesquisa de águas minerais.

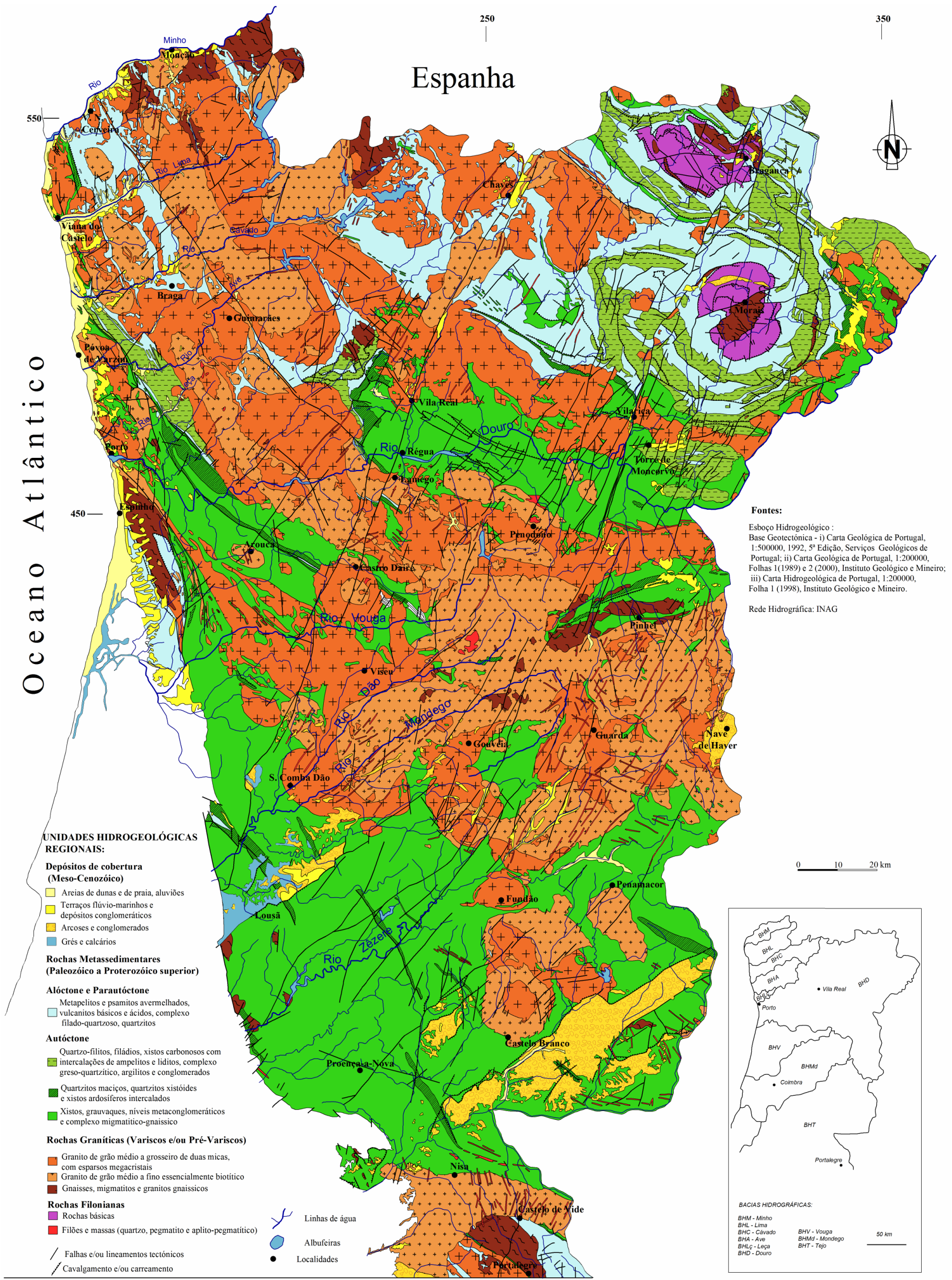


Figura III-6 Esboço de unidades hidrogeológicas do Norte e Centro do Maciço Antigo Português.

Não foi possível, no âmbito das investigações realizadas, definir novos aquíferos para além dos que constam em Almeida *et al.* (2000), nem tampouco associar às grandes estruturas tectónicas comportamentos hidrogeológicos específicos à escala regional. O papel dessas estruturas nas condições hidrogeológicas locais revela-se, essencialmente, à escala métrica ou decamétrica. Informações muito genéricas são fornecidas nas figuras III-6 (Esboço de unidades hidrogeológicas do Norte e Centro do Maciço Antigo) e III-7 (Esboço da carta de desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos em Trás-os-Montes).

Nalgumas situações bem definidas, que correspondem a menos de 5% da área estudada (Aquífero da Veiga de Chaves, Bacia de Sendim, Nave de Haver, Idanha, aluviões dos grandes rios), ocorrem aquíferos ou sistemas aquíferos bem definidos, maioritariamente porosos, nalguns casos costeiros, e em muitas situações em ligação hidráulica com as linhas de água superficiais. A situação mais comum, nas rochas cristalinas do Maciço Antigo, corresponde à ocorrência de sistemas hidrogeológicos descontínuos de dimensões espaciais decamétricas, porventura hectométricas. Estamos, portanto, longe das condições em que será legítima a utilização vinculativa da classificação de aquífero, pois a continuidade espacial do reservatório, e portanto do fluxo, é reduzida.

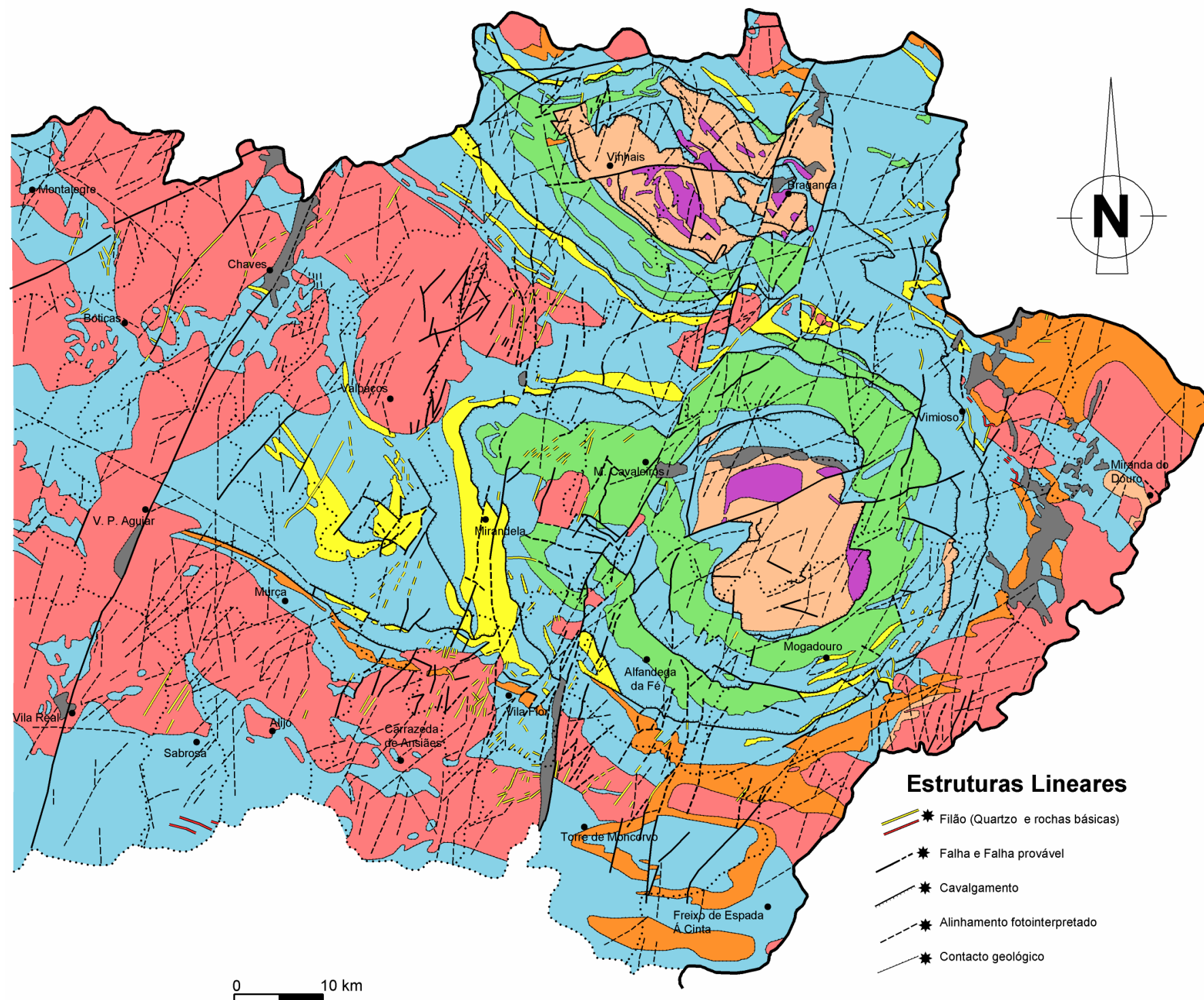
No esboço de unidades hidrogeológicas do Norte e Centro do Maciço Antigo foram consideradas, assim, quatro mega-unidades hidrogeológicas regionais, herdeiras directas das grandes unidades geológicas (Figura III-6 e Anexo A-I): (i) depósitos de cobertura (*s.l.*); (ii) rochas metassedimentares; (iii) rochas granitóides; e, (iv) rochas básicas e ultrabásicas.

A cada unidade hidrogeológica (Anexo A-I) foi atribuída uma hierarquização em termos de tipologia hidrogeológica, produtividade a nível local e regional e custo, conforme se descreve no quadro anexo à carta hidrogeológica a saber: (i) Classificação geográfica; (ii) Ligação hidráulica à rede hidrográfica; (iii) Permeabilidade tipo fissural ou intersticial; (iv) Horizontes de alteração (só para as rochas metassedimentares, granitóides e afins); (v) Tipo de captação mais produtiva; (vi) caudal de exploração por captação isolada; (vii) Risco geológico de insucesso avaliado em termos de Índice Metros Caudal (IMC); e, (viii) Custo da água tratada incluindo as exigências de controlo do Dec-Lei 243/2001 de 5 de Setembro, referido a 2004.

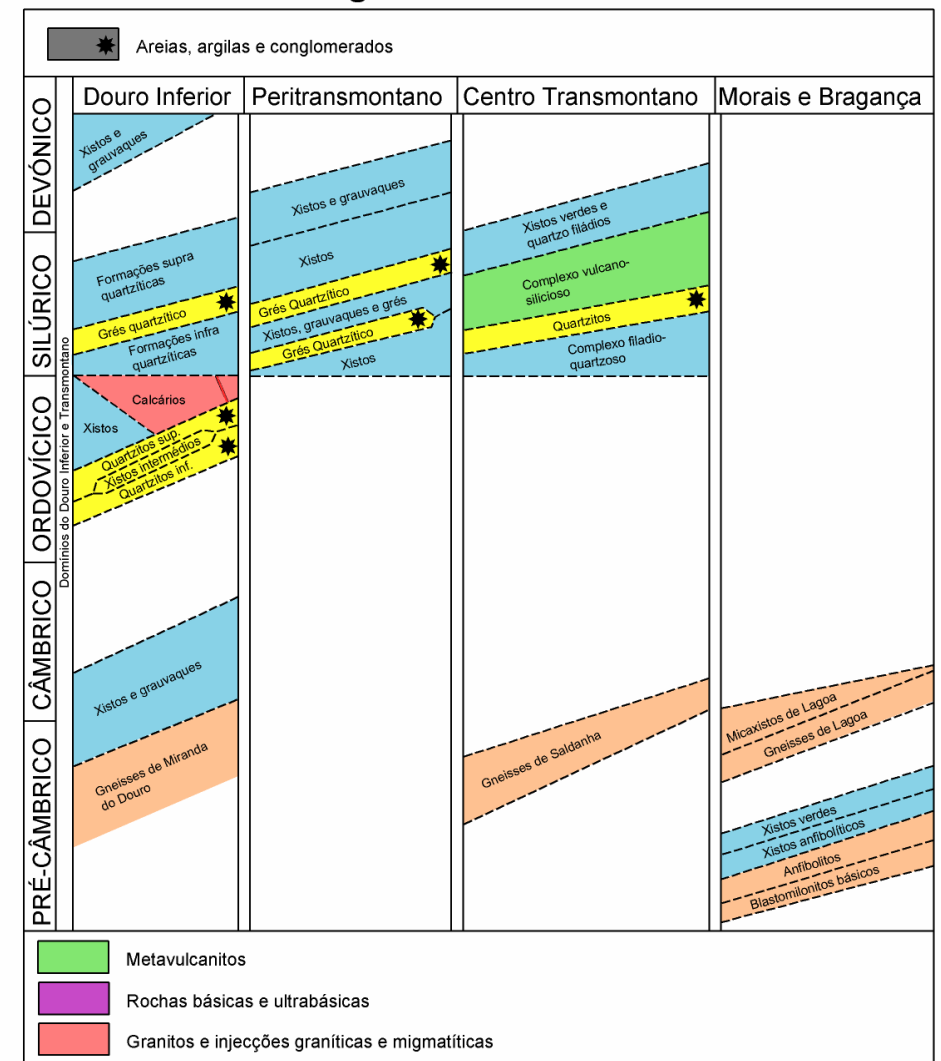
O Esboço da Carta de Desenvolvimento de Recursos Hídricos Subterrâneos de Trás-os-Montes (Figura III-7) é uma tentativa de aproximar os problemas da prospecção e pesquisa naquela região do País, tomando como base a excelente base geotectónica de Ribeiro (1974). Foi elaborada no âmbito dos trabalhos reportados em Hidroprojecto, Acavaco & Tahal 1987, 1988, 1989). O esboço ora apresentado é uma versão adaptada e baseada no referido projecto e a base geológica foi sintetizada de Ribeiro (1974) e, mais recentemente, da folha 2 (Trás-os-Montes) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1/200.000.

Aproveitando o facto de se dispor da informação de cerca de 300 furos em 14 áreas representativas, foi tentado um paralelismo hidrogeológico entre as várias unidades geológicas do autóctone/parautóctone e do alóctone Transmontano (Ribeiro 1974, Ribeiro *et al.* 1990b, Marques *et al.* 1991-92). Foram incluídos, também, os depósitos de cobertura (Oliveira *et al.* 1992, Insua Pereira 1997). Aos oito grupos litológicos considerados foram atribuídos três atributos: (i) o risco geológico de insucesso; (ii) o Índice Metros-Caudal (IMC); e, (iii) o Custo estimado de captação de 1l/s, compreendendo a pesquisa, a captação e o equipamento de bombagem. Optou-se por esta forma pouco vulgar de avaliar custos de água subterrânea pois era a que melhor se adaptava ao objectivo: a de crivo para a outorga de subsídios estatais à captação de água subterrânea para utilização em pequenos regadios. O custo das estruturas captantes está referido a 2004 (Ministério das Finanças 2004).

São indicados os principais factores de favorabilidade para a pesquisa e captação de águas subterrâneas, compatíveis com representação à escala regional: filões, falhas, cavalgamentos/carreamentos, lineamentos tectónicos fotointerpretados e contactos geológicos, tentando seguir os critérios de Strukmeier & Margat (1995). Esta carta não pode ser considerada para utilização indiscriminada, pois os factores de favorabilidade têm de ser controlados à escala local por um especialista em hidrogeologia. No entanto, juntamente com o Esboço de Carta de Aptidão das Águas Subterrâneas Para Pequenos Regadios (figura III-8), foi utilizada durante vários anos na Direcção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes para racionalizar a atribuição de subsídios para a captação de águas subterrâneas.



Unidades Litoestatigráficas



Quadro interpretativo

Risco Geológico	Risco Geológico	Índice Metros/Caudal IMC (m/l/s)*	Custo de captação de água** (€uros)
Grau 1 a 4	Grau 1	< 40	< 4000
Grau 1 a 2	Grau 2	40 - 80	4000 - 6000
Grau 1 a 3	Grau 3	80 - 120	6000 - 8000
Grau 2 a 4	Grau 4	> 120	> 8000
Grau 3 a 4			
Grau 3 a 4			
Grau 3 a 4			

$$*IMC = \frac{\sum \text{metros perfurados em todos os furos aproveitados e não aproveitados}}{\sum \text{caudal (l/s) em furos com caudal de exploração superior a 0,5 l/s}}$$

**Investimento para a captação de 1 l/s (pesquisa e furo equipado)

* Factor de favorabilidade na pesquisa e captação de água subterrânea

Figura III-7 Esboço de Carta de Desenvolvimento de Recursos Hídricos Subterrâneos de Trás-os-Montes.

No esboço de Carta Hidrogeológica do Maciço Antigo do Norte e Centro de Portugal (Anexo A-I), o custo da água para abastecimentos públicos foi apresentado em termos de €/m³ e calculado de acordo com as premissas seguintes: (i) custos de investimento em pesquisa, e captação (foi considerado o valor de € 100 por metro de perfuração acabado, muito acima do valor médio actualmente praticado no mercado Português para captações deste tipo); (ii) montagem do equipamento de bombagem e tratamento da água: correcção de pH e cloragem); (iii) custos de exploração e manutenção (energia para a bombagem, manutenção do sistema de tratamento e manutenção geral); e (iv) assistência técnica, monitorização e controlo analítico para cumprimento dos Dec-Lei 236/98 e 243/2001. As despesas de investimento atenderam a uma vida útil de 30 anos para as captações e de 5 anos para os equipamentos de bombagem e tratamento da água.

Para o risco geológico de insucesso médio, com IMC entre 80 e 120 m/l/s, o custo do m³ da água é de cerca de 0,22 a 0,25 €/m³.

Conforme se referiu no artigo [11] (Carvalho *et al.* 2003) os custos de infraestruturas, de que a pesquisa e captação fazem parte, representam apenas cerca de 17% do valor final calculado. Isto ilustra como é destituída de sentido a opção por serviços e materiais de qualidade medíocre na realização de trabalhos de pesquisa e captação para abastecimentos públicos, como geralmente acontece em Portugal, pois esta opção não acautela a qualidade da obra, a eficácia da mesma, o custo final da água e a conservação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos.

O valor de 0,22 a 0,25 €/m³ é praticamente igual ao indicado por López-Camacho (2000) para Espanha (30 pesetas/m³; ou seja, 0,20 €/m³), utilizando aparentemente critérios semelhantes, mas provavelmente calculado para captações de maior caudal unitário onde os efeitos de escala poderão baixar custos. Seria também interessante comparar os custos calculados com o da água superficial. Consultando Lopes *et al.* (2004) verifica-se que o preço médio unitário de venda da água em Portugal é da ordem de 0,50 a 0,60 €/m³. Não há valores oficiais do custo da água superficial nos actuais sistemas de distribuição em alta, em implementação por todo o território do País. Alguns contactos informais com

técnicos do sector levam a que seja aceitável considerar-se valores da ordem de 0,40 a 0,50 €/m³. Não parece, portanto, haver argumentos económicos que suportem objectivamente a decisão de privilegiar sistematicamente as fontes superficiais em pequenos abastecimentos urbanos.

O desfavorecimento e a desconfiança com que as águas subterrâneas do Maciço Antigo são encaradas para utilização no abastecimento público foram amplamente enumeradas em Carvalho (2000), bem como as vantagens que oferecem. Far-se-á, aqui, breve resumo:

(i) A água subterrânea não necessita, geralmente, de tratamentos complexos, nem químicos nem bacteriológicos;

(ii) As águas subterrâneas captadas localmente apresentam características organolépticas muito apreciadas pelos consumidores;

(iii) Nas zonas montanhosas são possíveis abastecimentos gravíticos;

(iv) O facto de se utilizar uma água própria pode gerar proveitos de índole sociológica e até política: o orgulho de se utilizar uma fonte de abastecimento própria com bom desempenho e de boa qualidade;

(v) As tecnologias de utilização são de manutenção simples e económica;

(vi) A exploração das águas subterrâneas, considerando a manutenção de perímetro de protecção nos termos legais, contribui para o ordenamento do território;

(vii) A utilização dos recursos locais contribui para uma mentalidade de conservação da água;

(viii) A água subterrânea é uma água barata porque tem baixos custos de tratamento e de adução;

(ix) A constância de características físico-químicas, além de facilitar o tratamento para consumo humano, autoriza a sua utilização por pequenas actividades industriais eventualmente associadas.

No entanto a utilização das águas subterrâneas esbarra com algumas dificuldades, nomeadamente:

(i) A água subterrânea é um recurso “escondido” com custos associados à prospecção, pesquisa e captação;

(ii) Nalguns casos a qualidade química pode não ser compatível com as exigências de qualidade impostas pela legislação actual ou futura;

(iii) Os caudais de exploração sustentados são baixos, particularmente em estiagem quando são mais exigentes as solicitações;

(iv) A variação sazonal de caudais pode ser elevada, particularmente nas captações horizontais em que não há soluções construtivas mitigadoras das oscilações naturais da recarga e nas captações verticais exploradas para além das normas de gestão de aquíferos e captações;

(v) A nível dos gestores das redes e dos próprios autarcas, é mais cómodo reduzir os pontos de captação e tratamento e ligar as populações aos grandes sistemas;

(vi) A implementação de perímetros de protecção pode constituir um factor adicional de fricção em torno da utilização de pequenas captações.

O custo das águas subterrâneas para agricultura está apresentado na figura III-8, Esboço de Carta de Aptidão das Águas Subterrâneas para Pequenos Regadios em Trás-os-Montes, na perspectiva da análise do investimento nas obras de pesquisa e captação. Foram consideradas oito categorias com base na geomorfologia e no Índice Metros Caudal_{ajustado} (IMC). Para a categoria mais comum (IMC entre 80 a 120 m/l/s) o custo para construção de uma captação, sistema de bombagem e pequeno reservatório é de cerca de 6.000 a 8.000 euros.

Para além das cartas apresentadas revelarem, numa perspectiva puramente economicista, o papel relevante da água subterrânea confirmado por uma utilização multi-secular, não podem ser esquecidos os valores patrimoniais e ecológicos que a sua utilização protege (López-Camacho 2000).

Menos conhecidas são as vantagens que a utilização da água subterrânea pode oferecer em pequenos regadios, nomeadamente (Carvalho 1991):

(i) a rega de pequenas parcelas é muito mais fácil de manter do que a de grandes parcelas, sobretudo para agricultores não treinados, que podem ser assim sensibilizados mais facilmente;

(ii) o emparcelamento das explorações é desnecessário pois as captações servem directamente pequenos regadios;

(iii) o facto da água poder ser utilizada de imediato nos campos e poderem ser obtidas as primeiras colheitas apenas alguns meses após o início dos trabalhos é incentivador da iniciativa e induz à auto-aprendizagem e à solicitação de apoios;

(iv) em meios de pequenos agricultores, a divulgação mais eficiente da tecnologia e da experiência é a que resulta das demonstrações feitas pelos vizinhos;

(v) a subdivisibilidade quase ilimitada da água subterrânea conduz a uma grande redução dos investimentos durante as fases de construção e de gestão;

(vi) os regadios de pequenas dimensões, com despesas diminutas, são capazes de atingir largos estratos da população agrícola inclusive os agricultores mais pobres; e,

(vii) a rega efectuada inicialmente com água subterrânea constitui uma fase preparatória eficiente para os agricultores adquirirem capacidade económica e técnica para a utilização de eventuais futuros esquemas regionais de rega de maior dimensão.

Certamente, fruto das características acima referidas no Maciço Antigo Português quase toda a pequena agricultura é feita com águas subterrâneas mas: (i) o nível técnico da execução das obras de captação é fraco o que nem sempre favorece a imagem do recurso; e, (ii) o risco de insucesso e a disponibilidade de caudais condicionam muito a oferta.

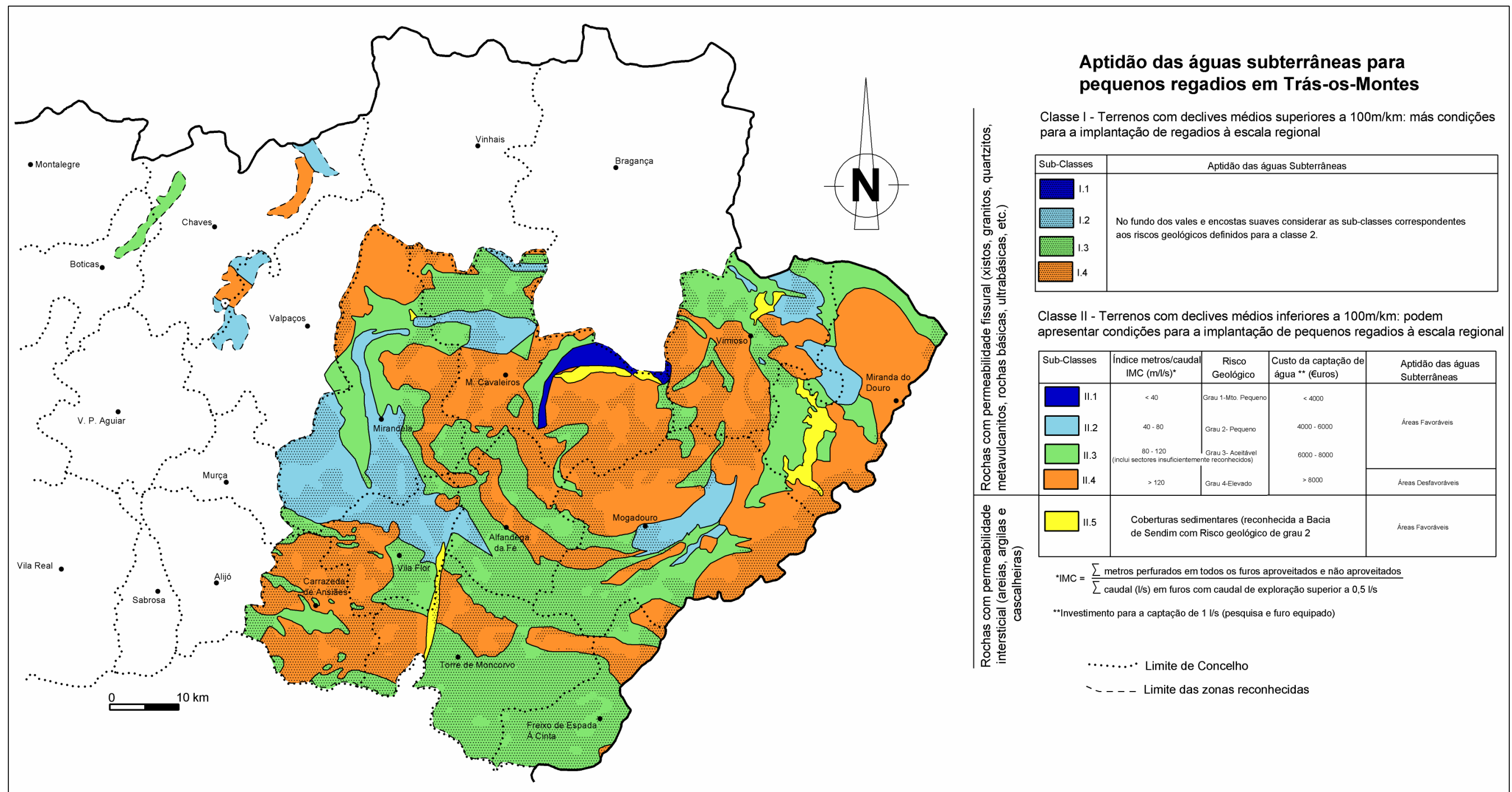


Figura III-8 Esboço de Carta de Aptidão das Águas Subterrâneas para Pequenos Regadios em Trás-os-Montes

7. Artigos Científicos

- [7] Caracterização hidrodinâmica de algumas áreas do Maciço Antigo Português. In: *7º Congresso da Água, APRH*, Lisboa, 2004, edição em Cd-Rom.
- [8] Groundwater exploration in hard rocks for small scale irrigation in Trás-os-Montes, Portugal. In: *Hydrogeology of Hard Rocks*, IAH, Oslo, 1993, Vol. 24 (Part 2), pp. 1021-1030.
- [9] Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: *Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica. Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid, 2000, pp. 163-172.
- [10] Productivity and water cost in fissured-aquifers from the Iberian crystalline basement (Portugal): hydrogeological constraints. In: *Water, mining and environment Book Homage to Professor Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid, 2005, pp. 193-207.
- [11] Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional. In: *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: recursos geológicos e formação. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva. Série Investigação Imprensa da Universidade*, Coimbra, 2003, Vol. 2, pp. 245-264.
- [12] Urban groundwater resources: a case study of Porto City in north-west Portugal. *International Association of Hydrogeologists Special Volume*, Balkema publishing, 2005 (in press).
- [13] Hydrogeology of hard-rocks in the Portuguese Iberian Massif: Porto urban area and Serra da Estrela mountain region. In: *Proceedings The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources - Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, Univ. Minho, Guimarães, LNEC-IAHS, 12 pp. edição em Cd-Rom.

CAPÍTULO IV

ÁGUAS MINERAIS NATURAIS E DE NASCENTE

E RECURSOS GEOTÉRMICOS

*Moisés ordenou aos filhos de Israel que partissem do mar Vermelho
e se dirigissem para o deserto de Sur.
Caminharam durante três dias sem encontrar água.
Chegaram a Mara mas não puderam beber água
porque era muito amarga.
Daí o nome de Mara posto a este lugar.*

ÊXODO 15: 22-23

1. Enquadramento geral da prospecção e da pesquisa de águas minerais naturais

Pouco depois de Ramalho Ortigão (1875) dar à estampa o excelente *“Banhos de Caldas e Águas Minerais”*, D. António da Costa (1936) retratava a utilização e os utilizadores de uma estância termal portuguesa, esboçando um retrato magistral dessa época nestas palavras: *“(…) Apresenta cada uma destas casinholas a configuração de um forno, em cujo centro está a nascente. Elas aí estão por esse terreno fora, sem luz, sem ar, sem espaço, cada uma com um banco só, para todos colocarem o fato; no cimo, telha vã; algumas com meio tecto podre, porque a outra metade já desabou. Visitemos qualquer dos banhos: o da “Meia Lua”, todo esburacado por cima; o banho “Romano”, do tempo dos grandes conquistadores, segundo corre fama; o de “S. Miguel”, o da “Lua Cheia”, o do “Quarto Crescente”, o banho “Moreira”, o banho “Contraforte”, o banho “Quatro Cabeças”, todos diferentes na graduação da temperatura, e portanto riquíssimos, mas irmãos, todos no estado que os torna repugnantes. A água, mandada renovar duas vezes por dia, de facto só se renova uma, de manhã. De tempo a tempo, o guarda de todas aquelas cafuas deixa entrar para cada uma delas um rebanho de gente pobre, pálida, entrevada, fecha-lhe a porta à chave, abre-lha depois e assim se repete a repugnante cena até à noite. As classes elevadas tomam o banho em duas ou três nascentes menos asquerosas, ou nos hotéis, preferindo perder em parte a força do medicamento”. Nas outras termas as práticas seriam semelhantes.*

Quando, cerca de cem anos depois, o signatário desta dissertação iniciou a aventura da prospecção, pesquisa e captação de águas minerais em Portugal Continental, pela mão amiga, e já então experiente, do Professor Eng^o J. A. Simões Cortez, a higiene termal era seguramente mais elaborada que a acima caricaturada, mas o estado das captações era vetusto. À parte as notáveis intervenções em algumas delas do Engenheiro Carlos Freire de Andrade (consultar a magnífica obra de Freire de Andrade 1937), coube ao Geólogo Hertmurt Seifert — com menos de uma dezena de realizações que se podem considerar de modelares, (e.g., Seifert 1963, 1967) — a honra de iniciar a saga da

substituição das captações tradicionais, algumas delas coevas dos romanos, por captações tubulares profundas, vulgo furos.

Nos últimos trinta anos o autor dedicou muita da sua actividade ao problema da prospecção, pesquisa e captação de águas minerais e de nascente e de recursos geotérmicos, particularmente no Maciço Antigo Português. Neste capítulo são apresentados alguns dos resultados desse labor. Essas intervenções são representadas na Figura IV-1 onde também consta a localização dos artigos que são anexados no final deste capítulo.

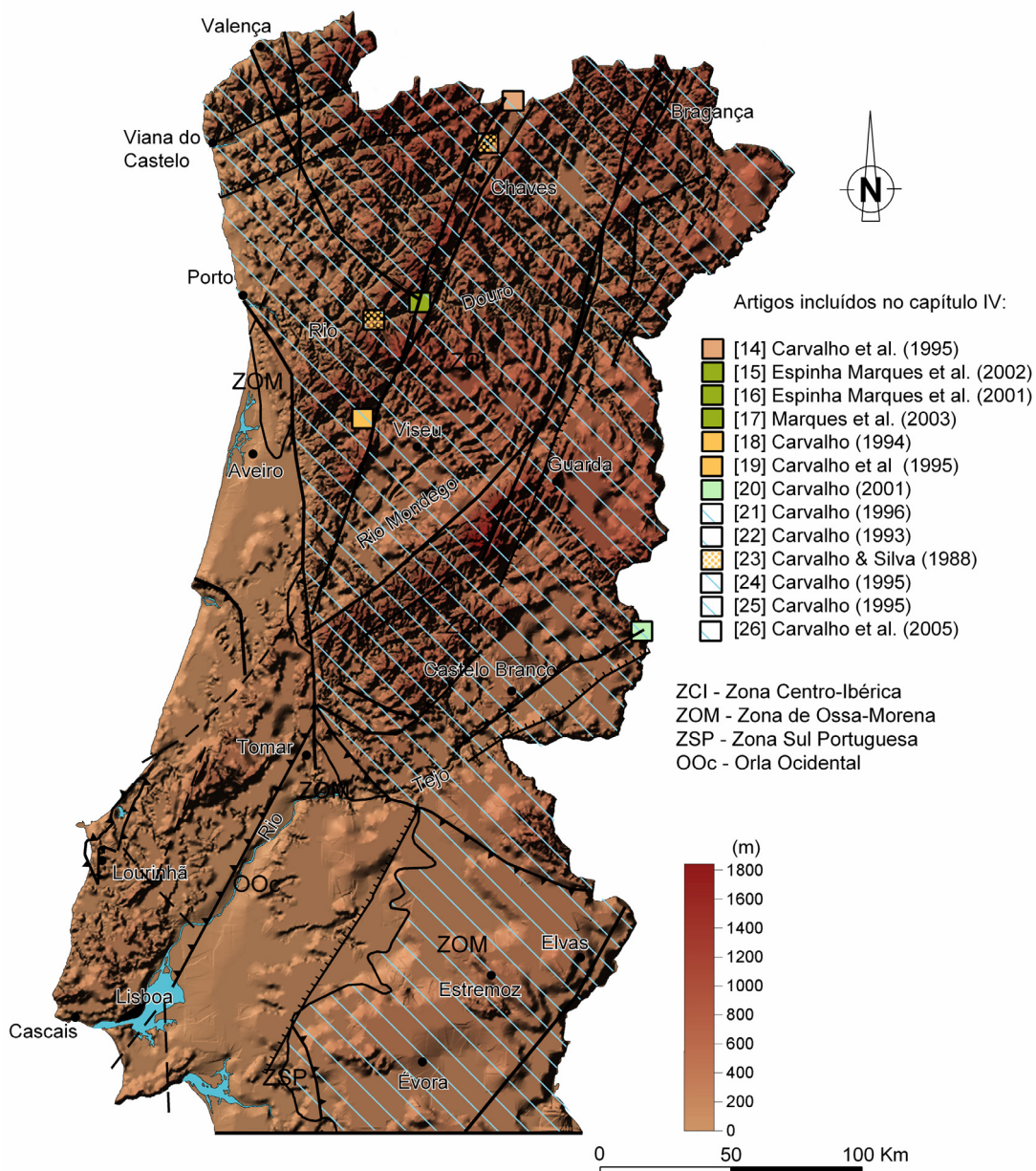


Figura IV-1: Localização dos artigos incluídos no capítulo IV.

As emergências naturais encontram-se, em geral, encaixadas morfológicamente no fundo de vales, situação compreensível à luz dos dispositivos hidrogeológicos que estão na base da respectiva descarga. O aproveitamento das emergências naturais fez-se, quase sempre, mediante captações rudimentares localizadas rigorosamente “por cima” daquelas, opção lógica se atendermos à escassez dos recursos tecnológicos disponíveis no passado e ao desconhecimento dos circuitos hidrominerais e dos mecanismos de emergência correspondentes.

Na grande maioria dos casos, o crescimento anárquico das instalações balneares ou de engarrafamento não foi acompanhado das necessárias medidas de protecção ambiental, garante da pureza bacteriológica e química das águas captadas. Em muitos casos o balneário foi construído ao lado ou sobre as captações. Progressivamente ocorreu a expansão das estruturas logísticas de apoio e o conseqüente crescimento urbanístico. Depressa as captações ficaram afogadas em focos poluidores, activos uns, ameaçadores outros, mas todos perigosos. O crescimento industrial, turístico e agrícola das últimas décadas lançou nova acha na fogueira. Hoje, em certas áreas, o perigo já não é só de ordem bacteriológica. A poluição química espreita e a tranquilidade ambiental característica das estâncias termais do virar do século XIX, tão necessária aos aquistas, está ameaçada.

O desenvolvimento e a protecção dos recursos geológicos — águas minerais e de nascente — esbarrou, frequentemente, com dificuldades de vária ordem, nomeadamente:

- (i) Reduzidas áreas de expansão, ou seja, é limitada a área disponível para execução de trabalhos de prospecção, pesquisa e captação. A explosão urbana tudo afoga e a movimentação de pessoal e meios de prospecção e de pesquisa, é extremamente dificultada;
- (ii) Impossibilidade efectiva de cumprimento no terreno das zonas do perímetro de protecção, ainda que fixado legalmente: apesar do esforço notável dos últimos anos, ocorrem ainda focos pontuais ou difusos, nomeadamente linhas de água poluídas em ligação hidráulica com a zona de descarga do circuito hidromineral e actividades agrícolas penalizantes

para a qualidade do recurso. O saneamento básico é ainda fracamente assistido. O controlo e eliminação destes focos poluidores, ora escapa à alçada dos concessionários da exploração, ora não é por eles inteiramente desejado. Por exemplo, lagos naturais e artificiais ou barragens e açudes que constituem cartaz turístico e por vezes fontes de receita mas, amiúde, estão em ligação hidráulica com as zonas de descarga do circuito hidromineral;

- (iii) O misticismo em torno das águas minerais usadas em balneoterapia: a aura de mistério e de sobrenatural e o reconhecido valor económico do recurso que envolve as águas minerais, intimida os concessionários, receosos de que os trabalhos tendentes à construção de novas captações venham a alterar as propriedades terapêuticas das águas e, porventura, os caudais, quase sempre muito pequenos, das emergências clássicas.

Aos factores descritos há que adicionar componentes do foro hidrogeológico, nomeadamente: (i) ausência de monitorização sistemática relativa à evolução de caudais, quimismo, potabilidade e obras de captação ou beneficiação entretanto levadas a cabo no passado; e, (ii) a dificuldade e delicadeza intrínsecas ao reconhecimento de circuitos hidrominerais com águas de quimismo específico, as mais das vezes com percursos lentos e longos.

Finalmente as próprias carências financeiras dos concessionários (quantas vezes pequenas empresas familiares) dificultam um empenhamento adequado em trabalhos de prospecção, pesquisa e captação.

As águas minerais naturais são usadas nos balneários termais, como se referiu, e também na indústria das águas engarrafadas. São também utilizadas na indústria do embalamento de água as águas de nascente, às quais a tutela, actualmente a Direcção Geral de Geologia e Energia, impõe critérios de exigência próximos dos das águas minerais. Algumas águas minerais naturais apresentam características de temperatura que permitem a sua utilização para usos directos. São paradigmáticas em Portugal as aplicações “industriais” para uso directo na climatização de hotéis em Chaves e São Pedro do Sul, artigos [18] Carvalho (1994), [19] Carvalho *et al.* (1995), [23] Carvalho & Silva (1988), [24] Carvalho

(1995), [25] Carvalho (1995) e [26] Carvalho (2005). Caímos aqui no domínio dos recursos geotérmicos.

É na óptica industrial e económica, e não na perspectiva puramente geológica, que a abordagem ao problema da prospecção e pesquisa é apresentada nesta dissertação. Por isso é seguido o conceito económico de recurso hidromineral que inclui as águas minero-industriais e as águas minerais naturais (Dec-lei 86/90 de 16 de Março), recurso geotérmico (Dec-lei 87/90 de 16 de Março) e água de nascente (Dec-lei 84/90 de 16 de Março), isto é, são incluídas as clássicas águas de circuito hidrogeológico longo e lento e outras que não cumprem exactamente essa condição mas que foram classificadas administrativamente como tal.

2. Recursos hidrominerais e geotérmicos e sua importância sócio-económica

Águas minerais são, na óptica do especialista das águas subterrâneas, as que, por qualquer especificidade físico-química, se distinguem das águas “normais” de uma dada região (Moret 1946, Schoeller 1982, Albu *et al.* 1997, Lamoreaux 2001). São em geral — mas não necessariamente — águas de circulação profunda e/ou de circuito hidrogeológico longo. Os caracteres distintivos mais frequentes são a mineralização e/ou a temperatura elevadas. Assim, na perspectiva enunciada, as águas minerais apresentarão mineralizações totais ou determinadas características específicas (pH, sulfuração, sílica, CO₂, etc.) diferentes dos valores correntes ou temperaturas mais altas que a temperatura média do ar.

White (1957) designou como termiais as águas cuja temperatura excedam em 5°C a temperatura média do ar, opção retomada por Schoeller (1962) embora este último, em vez de 5°C, considere 4°C. Estes critérios, praticamente idênticos, são geralmente seguidos nos E.U.A. (Albu *et al.* 1997). Na Europa (CEC 1988) foi adoptada a solução de considerar termiais as águas de temperatura superior a 20°C, retomando a sistematização do Simpósio de Águas Minerais de Praga de 1968 (Malkovsky & Kacura 1969).

Para o Norte e Centro de Portugal este critério pode ser considerado aceitável pois a temperatura anual média do ar nessas zonas é inferior a 16°C (INM 2005).

A nível da Hidrologia Médica, é corrente chamar-se água termal a qualquer uma — ainda que fria na origem ou mesmo semelhante às águas típicas da região — desde que seja utilizada em balneários termais (Pomerol & Ricour 1992), gerando ainda maior confusão em relação à terminologia sobre este tema.

Para alguns autores (*e.g.*, Klimentov 1983) águas termais seriam as de temperatura superior à do corpo humano, isto é, 37°C. O mesmo autor refere que uma “classificação económica” das águas subterrâneas poderia ser constituída pelas classes seguintes: (1) classes com temperaturas até 20°C, adequadas para consumo humano; (2) águas com temperatura de 20° a 50°C, adequadas para balneologia; (3) águas com temperatura de 50° a 75°C aptas para usos geotérmicos directos e balneologia; (4) águas com temperatura de 75° a 100°C para produção de electricidade e usos geotérmicos directos e (5) águas com temperatura superior a 100°C para a produção de electricidade. Esta classificação segue de perto o famoso diagrama de Lindal (1973) estabelecido para hierarquizar as utilizações geotérmicas.

O critério da composição química levou a que nos países europeus de cultura germânica a água mineral fosse conotada com elevada mineralização. Nos países latinos prevaleceram os aspectos ligados à utilização balneoterápica tendo no passado sido consideradas como minerais (ou melhor minero-medicinais) águas de baixa mineralização. Foi assim que em Portugal, graças às propriedades terapêuticas supostas ou inferidas à luz dos critérios da época, foram consideradas como minerais águas semelhantes às “normais” da região (Calado 1995, 2001).

O termo água termomineral tem sido usada para caracterizar águas minerais quentes (Moret 1946, Castany 1967) e parece aplicável a algumas águas portuguesas de temperatura substancialmente mais alta que a do ar, isto é que cumpram o critério de Schoeller (1962) ou de White (1957).

De acordo com a legislação portuguesa (DGGM 1990) que segue, com subtis diferenças, a regulamentação comunitária, recursos hidrominerais são as águas que têm interesse económico devido às suas características físico-químicas,

estando incluídas nesta categoria as águas minerais naturais e as águas minero-industriais (artigo 3º do Dec-Lei 90/90 de 16 de Março relativo aos recursos geológicos). De acordo com este Dec-Lei uma água mineral natural é bacteriologicamente própria, de circulação profunda, com particularidades físico-químicas estáveis na origem dentro da gama de flutuações naturais, de que resultam propriedades terapêuticas ou simplesmente efeitos favoráveis à saúde. Segundo a mesma legislação, águas minero-industriais são águas naturais subterrâneas que permitem a extracção económica de substâncias nelas contidas.

Algumas águas minerais naturais podem simultaneamente constituir recursos geotérmicos, regulamentados pelos Dec-lei 87/90 e 90/90 de 16 de Março: “recursos geotérmicos são os fluidos e as formações geológicas do subsolo, de temperatura elevada, cujo calor seja susceptível de aproveitamento”.

O Dec.-Lei 156/98 de 06 de Junho veio alterar de forma substancial a definição anterior de água mineral natural no que respeita às que são destinadas a engarrafamento. Água mineral natural passa a ser entendida (artigo 2º) como água de circulação subterrânea, considerada bacteriologicamente própria, com características físico-químicas estáveis na origem, dentro da gama de flutuações naturais, de que podem eventualmente resultar efeitos favoráveis à saúde e que se distingue da água de beber comum: (i) pela sua pureza original; (ii) pela sua natureza, caracterizada pelo teor de substâncias minerais, oligoelementos ou outros constituintes.

Note-se que na definição económica proposta pelos Dec.-Lei 86/90 de 16 de Março e 156/98 de 06 de Junho é enfatizado o facto da água mineral natural ter de estar bacteriologicamente própria na origem e não poder sofrer qualquer tratamento posterior até ao consumidor. Este aspecto foi recentemente revisto pelo Dec.-Lei 72/04 de 25 de Março sendo agora autorizado tratamento com ar enriquecido com ozono, tendo de haver no rótulo menção expressa da intervenção realizada.

Até 1990 em Portugal o conceito de água mineral estava estreitamente ligado ao de água minero-medicinal. Era assim com a primeira legislação Portuguesa de águas minerais (Decreto de 1892 inserido no Diário do Governo n.º 225 de 5 de

Outubro, Decreto 5787-F de 10 de Maio de 1919 e Dec-Lei 15401 inserido no Diário do Governo de 20 de Abril de 1928). Nesta matéria, Portugal seguiu a tradição dos países mediterrânicos que se opõe à dos países do Norte da Europa e dos Estados Unidos da América onde o conceito de água mineral está ligado, essencialmente, a elevadas mineralizações da água. A actual legislação comunitária, conforme foi anteriormente exposto, tenta conciliar as duas tendências.

Quando se aborda esta questão em termos de água engarrafada, uma leitura lógica da definição administrativa, económica, de água mineral natural sugere que a grande característica distintiva deste recurso geológico, em relação às águas “normais” e às águas de nascente, é a ocorrência de “características físico-químicas constantes”, ainda assim “dentro da gama das flutuações naturais”.

De acordo com os Dec.-Lei 84/90 e 90/90 de 16 de Março, entende-se por águas de nascente as *“águas subterrâneas naturais que se não integrem no conceito de recursos hidrominerais, desde que na origem se conservem próprias para beber”*. Ao contrário dos recursos hidrominerais — que pertencem ao domínio público do Estado — as águas de nascente são do domínio privado. As águas de nascente na Europa Comunitária não têm de ser captadas em nascentes: qualquer água subterrânea, extraída não importa por que tipo de captação, pode ser designada por água de nascente, desde que satisfaça aos requisitos supra indicados.

Tendo em conta a evolução da procura, não espanta que existam actualmente em Portugal Continental águas minerais naturais com mineralizações totais variando entre 30 e 3500 mg/l. A própria líder do mercado de águas engarrafadas em Portugal apresenta uma mineralização total de apenas 47 mg/l (DGGM 1992). Nalguns países da Europa (Espanha, Itália, França e mesmo Bélgica) ocorrem, embora com menos incidência, situações em que águas com baixa mineralização são consideradas como minerais naturais (Maureen & Green 1994).

A actividade do engarrafamento e do termalismo constituem hoje em Portugal indústrias em franco crescimento (e.g., Cruz 2002). Segundo informações recolhidas junto da Associação das Termas de Portugal (ATP), esta associação

conta actualmente com 39 associados. Em 2003 foram contabilizados 97 051 termalistas, tendo o volume de negócios do sector atingido 177 milhões de Euros. Este valor refere-se simplesmente aos tratamentos, pelo que os impactos nas economias locais e regionais são mais profundos e muito significativos, particularmente nas pequenas autarquias.

No que se refere às águas engarrafadas, segundo a Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais Naturais e de Nascente (APIAM), em 2004 estiveram em funcionamento 30 oficinas de engarrafamento, das quais 18 de águas minerais naturais e 12 de águas de nascente. O sector apresentou, nesse ano, um volume de negócios superior a 200 milhões de Euros, tendo estado directamente afectos a esta actividade entre 1400 e 1600 trabalhadores, considerando as variações referentes ao trabalho sazonal.

Em Portugal as vendas de águas minerais naturais e de águas de nascente apresentam no último decénio um crescimento de 48,5%, tendo o consumo por habitante passado de 53,2 litros/ano, em 1995, para 79 litros/ano, em 2004. As capitações actuais estão ainda longe do padrão Europeu: em 2002 os maiores consumidores (os italianos) alcançavam 160 l/habitante/ano e em Espanha o consumo era de 107 l/habitante/ano. Tudo indica, por isso, que a produção portuguesa continue a crescer e que este ramo da actividade económica, fundado nos recursos geológicos água mineral natural e água de nascente, continue a induzir solicitações significativas no domínio da prospecção, pesquisa e captação.

A importância dos recursos geotérmicos do Maciço Antigo está reflectida na importância turística e para a saúde pública já referida das Estâncias Termiais e na grandeza do valor da energia utilizada anualmente, 300 TJ/ano, segundo Carvalho *et al.* (2005), artigo [26], inserido neste capítulo IV.

3. Classificação de nascentes, águas e aquíferos hidrominerais

A classificação das nascentes começou, inicialmente, por atender às características geológicas, designadamente a proposta por Bryan (1919), notável por exigir uma conceptualização rigorosa do circuito hidromineral, Meinzer (1923) e Kriz (1973) apoiada na grandeza dos caudais e sua variabilidade sazonal. No entanto, Clarke (1924) entendeu que o quimismo era capaz de revelar todo o

passado da água descarregada numa dada nascente e propôs uma classificação baseada simplesmente na composição química. A partir de Clarke (1924) as águas minerais naturais são habitualmente classificadas de acordo com a respectiva tipologia físico-química e, até, conforme as aplicações terapêuticas no caso da Hidrologia Médica (*e.g.*, Narciso 1947, Contreiras 1951).

A classificação dos aquíferos onde ocorrem águas minerais tende a seguir a classificação das águas neles contidas (Herculano de Carvalho *et al.* 1961, Curto Simões 1993, Calado 1995).

Curto Simões (1993), apoiada na classificação do Instituto de Hidrologia de Lisboa (Herculano de Carvalho *et al.* 1961), propõe as classes seguintes para as águas minerais Portuguesas, baseadas na composição química, a saber:

- (i) Águas hipossalinas, cuja mineralização total é inferior a 200 mg/l;
- (ii) Águas sulfúreas, as que contêm formas reduzidas de enxofre;
- (iii) Águas gasocarbónicas, caracterizadas por terem mais de 500 mg/l de CO₂ livre;
- (iv) Águas cloretadas, cujo ião dominante é o cloreto;
- (v) Águas sulfatadas, cujo ião dominante é o sulfato.

As águas minerais e de nascente mais comuns no Maciço Antigo são as hipossalinas, as sulfúreas e as gasocarbónicas. Nesta dissertação será seguida a classificação de Curto Simões (1993) pois permite uma separação imediata e simples das águas, ao mesmo tempo que reflecte o tipo de circuito hidromineral que lhes está associado, ou seja, geralmente curto nas hipossalinas e longo nas sulfúreas e gasocarbónicas.

Recentemente, Albu *et al.* (1997) propuseram uma classificação de águas minerais baseada na origem da composição química e nos mecanismos de ascensão da água que compreende as categorias seguintes: (i) águas de evolução normal; (ii) águas de origem marinha: intrusivas, congénitas, fósseis e lixiviadas; (iii) águas de formação ou diagenéticas; (iv) águas relacionadas com ocorrências minerais: de sulfuretos, de drenagem de minas e de evaporitos; e, (iv) águas geotérmicas. Quanto aos mecanismos de ascensão os mesmos autores

consideram os grupos seguintes: (i) hidroestratigráficos; (ii) vales em aquíferos confinados (“*confined incisional valleys*”); (iii) de abstracção artificial (furos e poços); e, (iv) estruturas de injeccção (zonas de fractura, diques).

Nos aquíferos hidrominerais, quando se encara a questão da prospecção e pesquisa, podem seguir-se os critérios de classificação aplicados à generalidade dos aquíferos (Carvalho 1993): (i) Textura/estrutura: aquíferos porosos, fissurados e carsificados; (ii) Modo de jazida (pressão hidrostática): aquíferos livres, confinados e semiconfinados; e, (iii) Localização geográfica: aquíferos costeiros e interiores ou continentais. Assim, os aquíferos hidrominerais do Maciço Antigo podem ser entendidos como fissurados, confinados e continentais.

No âmbito desta dissertação que se destina a abordar os problemas de pesquisa e captação, tendo em conta o actual contexto económico português e europeu, foi considerada uma classificação genérica dos aquíferos hidrominerais compreendendo duas categorias:

(i) **Categoria I** - aquíferos de circulação profunda ou com velocidades de circulação lentas que contêm águas claramente distintas das dos aquíferos comuns. Estes aquíferos podem ser estudados, conceptualizados e classificados, como os demais, em termos geológicos, hidrodinâmicos e hidroquímicos, tendo em consideração a respectiva especificidade, particularmente no que concerne ao tempo de residência e à profundidade de circulação; e,

(ii) **Categoria II** – aquíferos hidrominerais “normais”, isto é, de circulação relativamente superficial, aqueles em que a água que neles circula não apresenta nenhuma diferença notável em relação à dos aquíferos comuns.

A Categoria I corresponde primordialmente à circulação de águas sulfúreas e gasocarbónicas e a Categoria II a águas hipossalinas. Podem ser incluídas na Categoria I algumas águas hipossalinas circulando a grandes profundidades em unidades quartzíticas do “Armoricano”, ou outras, desde que apresentem franca termalidade. As águas minerais naturais circulando nos aquíferos da Categoria I são verdadeiramente minerais em sentido geológico.

A classificação aqui proposta de aquíferos aproxima-se da de Bryan (1919) para a generalidade dos casos.

A ascensão das águas minerais em aquíferos de circulação profunda é geralmente atribuída à ocorrência de um ou vários dos factores seguintes: (i) emergência obedecendo aos princípios hidráulicos de Darcy, dominantes em aquíferos hidrominerais da Categoria II; e, (ii) emergência cumulativamente condicionada por uma densidade mais baixa da água, devida à temperatura elevada e/ou à presença de gases dissolvidos, como acontece em muitas das águas de circulação profunda (Categoria I).

Moret (1946) incluiu na designação de termosifão o contexto de ascensão de águas minerais, termais, de circulação profunda. Recentemente, discute-se o papel dos mecanismos de bombagem sísmica na génese de algumas destas águas (e.g., Ribeiro & Moitinho de Almeida 1981, Grillot et al. 1983, Grillot & Drogue 1986, Oliver 1986, Ingebritsen & Manning 1999). De facto, é hoje evidente que muitas emergências naturais de águas minerais naturais de origem profunda se situam em zonas de tectónica activa, associadas a sismicidade elevada.

4. Localização das explorações de água mineral natural e de água de nascente

As principais nascentes minerais do Maciço Antigo localizam-se em nós tectónicos geralmente situados em linhas de depressão geomorfológica (e.g., Choffat 1917, Freire de Andrade 1937, Carvalho 1996, Dias *et al.* 2000, Espinha Marques *et al.* 2001, Carvalho *et al.* 2005), nas proximidades de linhas de água permanentes ou semi-permanentes, conforme se representa na figura IV-2 onde estão indicadas as de temperatura superior a 20°C sobre a rede hidrográfica de 1ª e 2ª ordem. São apresentados apenas os locais situados a Norte do paralelo de Portalegre, em área coincidente aproximadamente com a Zona Centro-Ibérica e a Zona Galiza-Trás-os-Montes, por ser a área onde primordialmente foi realizada a actividade reportada nesta dissertação.

As águas de nascente têm uma distribuição relativamente aleatória, mas tendem a localizar-se em zonas de maior precipitação e nas proximidades dos grandes eixos viários que permitem o escoamento do produto final. As unidades industriais foram implantadas, geralmente, junto a nascentes antigas, carismáticas, mas são conhecidos casos de selecção de locais, com base em

critérios hidrogeológicos, em pontos onde não eram conhecidas descargas naturais significativas (e.g., Caramulo).

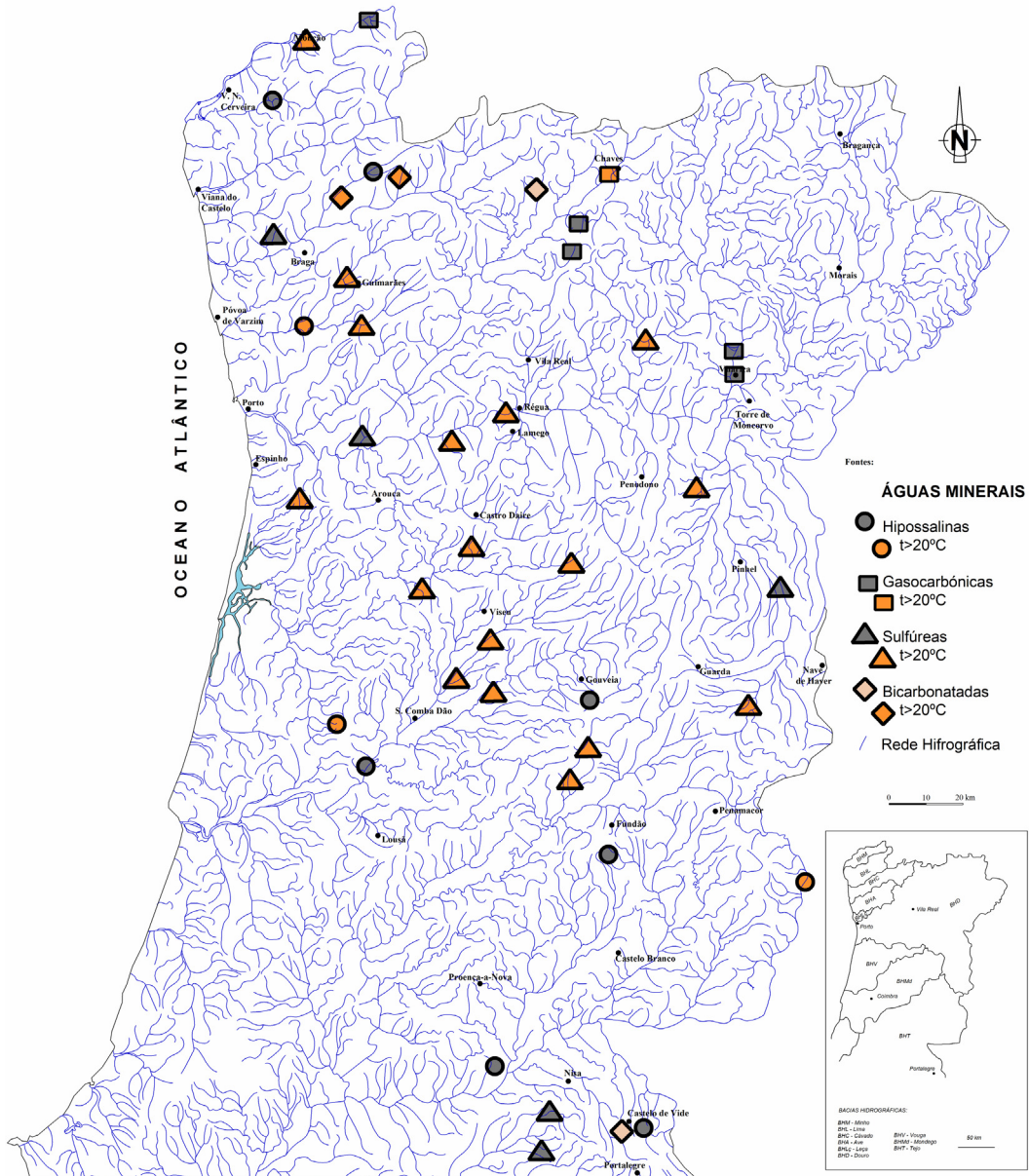


Figura IV-2 Localização das principais ocorrências de água mineral natural na zona Norte e Centro do Maciço Antigo (adaptado de Calado 1995).

Na figura IV-3 são apresentadas as explorações de água mineral natural e de água de nascente em funcionamento no Norte e Centro do Maciço Antigo Português, sobre o fundo geológico e tectónico regional. A mesma informação é disponibilizada, à escala 1/500 000, no esboço hidrogeológico (Anexo A-1).

Muitos dos pólos de águas minerais correspondem a ocorrências de águas termo-minerais que podem ter aplicações geotérmicas para usos directos. Por isso, a partir de 1978 (Aires-Barros 1978), indo de encontro às preocupações do choque energético de 1973, nalgumas termas perspectivaram-se usos directos, outros que não a simples balneoterapia. O local pioneiro foi Chaves (*e.g.*, Carvalho & Silva 1988, artigo [23]), Carvalho & R. Carvalho 2004, onde em 1982 foi realizada uma captação tubular (AC2), afastada das captações usadas em balneoterapia, com o fim específico de aquecer uma piscina. Este empreendimento funciona ainda com pleno sucesso, agora alargado a um hotel.

A ocorrência sistemática de nascentes e captações de água mineral natural nas situações topográficas atrás citadas acarreta que coexistam, quase sempre, dois ou mesmo três tipos de circulação hídrica subterrânea no local, frequentemente em ligação hidráulica entre si e com a linha de água mais próxima, a saber:

- (i) por um lado, a circulação de águas minerais de origem mais ou menos profunda. Trata-se de circulação em terrenos de permeabilidade fissural, a que corresponde menor risco de poluição que nas formações superficiais. A esta circulação podem estar adstritas águas “normais” nas mesmas formações, a menor ou maior profundidade, e interferindo com as minerais;
- (ii) uma circulação de águas “freáticas” ao longo de depósitos detríticos com permeabilidade intersticial dominante mas sem grande capacidade de auto-depuração (aluviões, eluviões, coluviões e rocha decomposta).

Quando se projecta um novo sistema de captação é nesta última componente do sistema hidrogeológico, com vulnerabilidade e risco à poluição elevados, que se torna necessário actuar em primeiro lugar, pois é ela, em geral, o factor da poluição. Impedida essa água “freática” de entrar em contacto directo com o circuito hidromineral, há todas as probabilidades de serem conseguidas captações alternativas às tradicionais, capazes de fornecerem caudais adequados sem problemas de potabilidade. Mas a questão não é tão simples: o circuito hidromineral continuará a contactar na envolvente com essas águas superficiais, e com outras mais profundas circulando no maciço, pelo que há que impor regras

de exploração para que o fluxo e o transporte de massa para a captação se façam dentro de limites adequados.

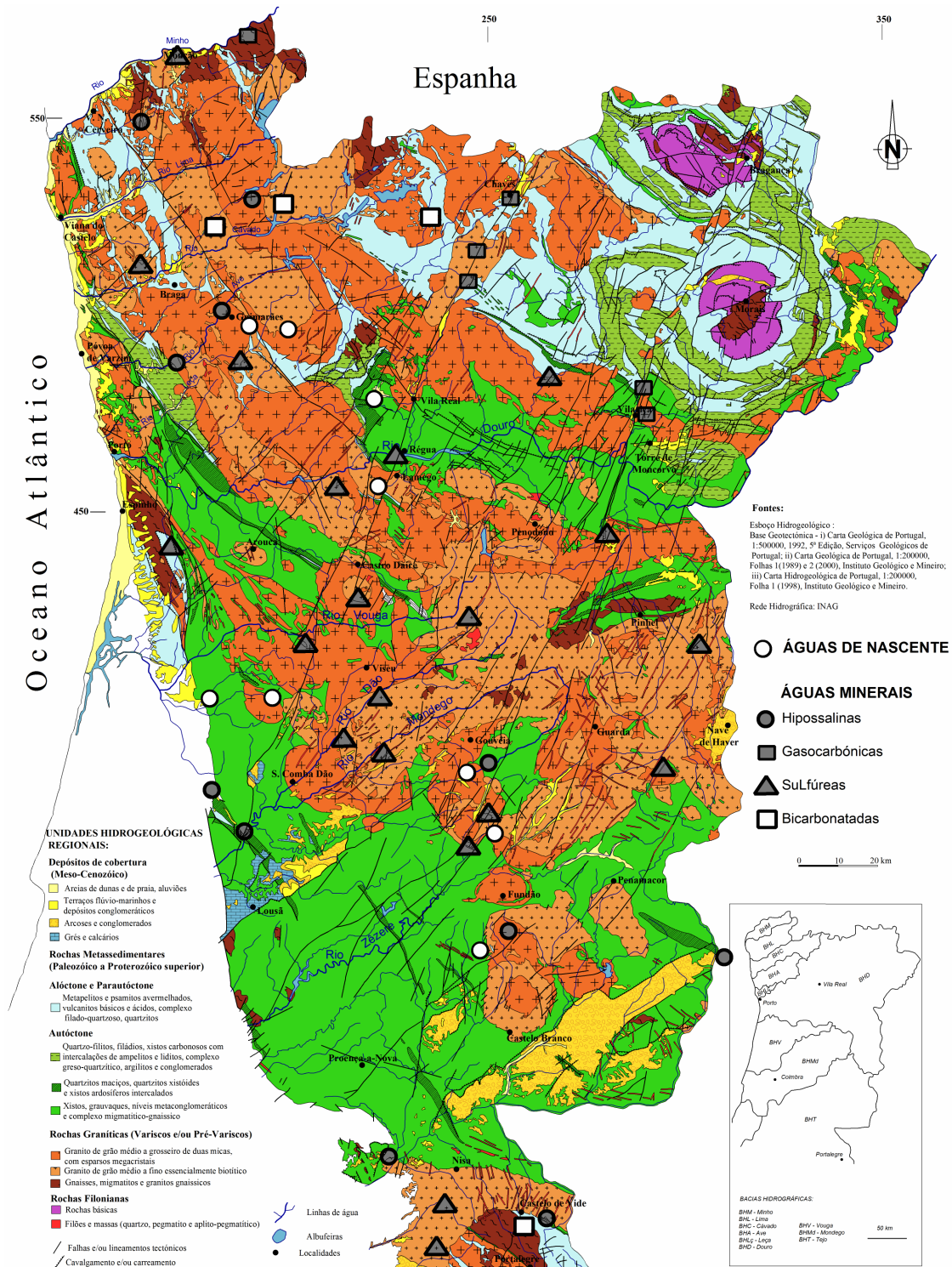


Figura IV-3: Localização das explorações de água mineral natural e de águas de nascente do Norte e Centro do Maciço Antigo Português (adaptado de Calado 1995, Cruz 2002).

Não tendo sido possível, na maioria dos casos, a eliminação completa dos focos poluidores (toda a prática tendente à concretização efectiva de zonas de protecção definidas com maior ou menor rigor técnico esbarra com obstáculos culturais e administrativos), um caminho resta: o do estudo detalhado, no limite do possível, do circuito hidromineral, pelo menos e com muito rigor, nas zonas de descarga, que permita o dimensionamento e construção de novas captações capazes de satisfazer os requisitos de qualidade e quantidade desejáveis.

Um exemplo de gestão condicionada pela piezometria de um sistema aluvial em ligação hidráulica na zona de descarga com um aquífero hidromineral, é apresentado no artigo [20], (Carvalho 2001), incorporado neste capítulo. Neste local (Termas de Monfortinho) foi instalado um sistema de drenagem no aquífero superficial ocorrente nas aluviões do Rio Erges para lhe baixar localmente a carga hidráulica sendo, também, impostas limitações ao rebaixamento máximo praticável nas captações. As águas captadas no sistema de drenagem são aproveitadas para rega.

5. Desenvolvimento de recursos hidrominerais e geotérmicos

5.1 Especificidades

O desenvolvimento dos recursos hidrominerais pretende satisfazer os objectivos seguintes, que podem ser cumulativos: (i) aumentar o caudal disponível; (ii) manter a qualidade química e melhorar ou manter a qualidade microbiológica; e, (iii) manter ou aumentar a temperatura. A título quase anedótico valerá a pena referir que alguns concessionários de águas termais de temperatura elevada, pouco crentes no impacto económico de eventuais aproveitamentos geotérmicos a partir dos seus recursos... ansiavam que se baixasse a temperatura de captação para diminuir trabalhos e investimentos no arrefecimento da água mineral para usos terapêuticos!

Os objectivos concretos atrás referidos devem ser encarados à luz das diferenças que podem ser atribuídas à prática da hidrogeologia de águas minerais naturais e de águas normais. Assim: a prospecção e pesquisa de águas minerais naturais é mais fácil, a nível tático, nas vizinhanças imediatas de pólos conhecidos, pois as armadilhas hidrogeológicas condicionadoras da ascensão e

das zonas de descarga estão melhor expressas e os contrastes com métodos geofísicos, designadamente de resistividade eléctrica, são geralmente bons, particularmente em sistemas hidrogeológicos com águas muito mineralizadas. Esta circunstância sai reforçada pelo facto de ser mostrado nesta dissertação que a transmissividade na zona de descarga dos aquíferos hidrominerais é, nos pólos mais importantes, superior em uma ou duas ordens de magnitude à dos aquíferos fissurados de água normal da zona envolvente. Deste ponto de vista deve realçar-se que os métodos geoelectricos clássicos (e, particularmente, o das resistividades) continuam a ser uma excelente ferramenta de prospecção pois dão informação sobre a estrutura geológica e podem inferir-se algumas pistas sobre a qualidade das águas.

A prospecção estratégica, tal como a que decorre da execução de contratos de prospecção e pesquisa com o Estado, de acordo com o Dec-Lei 90/90 de 16 de Março), tem dificuldades acrescidas ao nível da busca de recursos geológicos que são escassos e raros.

Na prospecção e pesquisa de águas minerais naturais em concessões já existentes, concorrem as dificuldades seguintes: (i) é imperativo obter o mesmo tipo específico de água sem contaminação antrópica ou outra; (ii) é muito frequente as ocorrências tradicionais ficarem situadas em vales onde o aquífero hidromineral está em ligação hidráulica com águas superficiais ou aquíferos “freáticos” contaminados; e, (iii) podem registar-se interferências hidráulicas com águas subterrâneas normais ocorrentes perto da superfície, ou em profundidade. Esta interdependência hidráulica leva a que nos furos de água mineral situados junto aos grandes rios a respectiva piezometria responda rapidamente às oscilações de nível daquelas linhas de água. É o caso das captações SDV1 e SDV2 do Vau de S. Pedro do Sul (Lemos *et al.* 1992, Carvalho *et al.* 1995, artigo [19] deste capítulo IV), Monfortinho (Carvalho 2001, artigo [20]), Monção (Informação pessoal da Eng^a Isabel Nascimento, Directora Técnica de Exploração da Concessão), etc.

As metodologias básicas de prospecção, pesquisa e captação de recursos hidrominerais não diferem substancialmente das referidas no Capítulo II a propósito das águas normais. No entanto deve ser realçado que, dado o valor económico destes recursos geológicos, os meios financeiros para o seu estudo

são geralmente mais importantes e mais facilmente disponibilizados. Por outro lado, são também significativamente maiores as exigências em termos de qualidade e rigor das operações de prospecção, nas obras de pesquisa e captação e a nível da protecção ambiental.

A realização de trabalhos de pesquisa directa em termas e estabelecimentos de engarrafamento de água esbarra com a dificuldade que pode advir dos trabalhos a realizar interferirem nas captações preexistentes. Por isso o ideal é realizar os trabalhos na época baixa (ou em período de encerramento no caso de algumas termas) e apertar a monitorização (níveis, caudais, qualidade química e bacteriológica) sobre as captações.

É importante o projectista de águas subterrâneas assimilar bem o conceito de que a água mineral natural é o “medicamento” usado nas termas, e que na indústria de embalamento de água o recurso captado tem um valor económico muito superior ao da água da torneira ou a usada em actividades agrícolas. Cumulativamente deve ter sempre em mente que, tratando-se de águas naturais, a água tem de estar bacteriologicamente própria na origem, o que pressupõe cuidados higiénico-sanitários significativos em todo o processo de pesquisa e captação.

5.2 Técnicas e tecnologias

As técnicas de prospecção e pesquisa usadas no âmbito deste trabalho correspondem às que foram discutidas no Capítulo II e compreenderam sistematicamente interpretação fotogeológica, cartografias geológica e hidrogeológica a escalas 1/25 000 a 1/5 000 ou mesmo de maior detalhe, se necessário, ou se a informação existente o permitiu (Carvalho 1996, artigo[21]).

Uma constante de todas as intervenções, que interessa referir aqui, foi a opção consistente por inventariação bibliográfica exaustiva a nível dos arquivos dos concessionários e da tutela (actual D.G.G.E.). Esta foi a fórmula encontrada para bem definir as características da água a captar e perceber o contexto da emergência tal como o entenderam os técnicos que no passado se ocuparam do problema, com meios de intervenção muito mais limitados que os actuais, mas

com grande disponibilidade para observar e capacidade de síntese para deixar registos.

Os inventários hidrogeológicos foram sistemáticos e extensivos e realizados sempre com o apoio de pessoas locais, se possível familiares à exploração termal ou à oficina de engarrafamento, para facilitação de contactos e de colecta de informações, por vezes inesperadas, quiçá fantasistas a espaços, mas sempre úteis.

Foram realizados quase sistematicamente levantamentos geoeléctricos, predominantemente com rectângulo de resistividades, com linhas de emissão que alcançaram $AB=1200$ m (e.g., Carvalho 1988, artigo [23], Carvalho 1996, artigo [21]). O objectivo foi tornar coerentes os instrumentos de pesquisa face aos objectivos fixados para a profundidade máxima de investigação que se admitia na ordem dos 150 m.

Com a metodologia indicada, para uma população de 110 furos em locais inseridos na Categoria I (aquíferos de circuito longo e profundo, predominantemente águas sulfúreas), a percentagem de sucesso tomando como produtivos os furos com caudal de exploração superiores a 0,5 l/s foi de 61%. Considerando apenas os 62 furos realizados com o apoio de geofísica a taxa de sucesso subiu para 85% (Carvalho 1996, artigo [21]). Estes resultados mostram que a prospecção e pesquisa de águas minerais de ciclo longo, com esta metodologia, se tornou uma prática quase rotineira em Portugal com taxas de insucesso extremamente baixas, comparativamente com a pesquisa de águas “normais”. Esta constatação contradiz totalmente a afirmação de Calado (2001), referindo-se às águas sulfúreas, de que “*o insucesso na captação de água sulfúrea alcalina é frequente*”. É maior o insucesso na pesquisa de águas “normais” justificado, de resto, pelas razões geoestruturais e hidrodinâmicas apresentadas nesta dissertação.

No início da década de 90 do século passado, com o furo AC1 nas Termas de S. Pedro do Sul, foi iniciado o ciclo das perfurações alcançando ou ultrapassando os 500 m. É o início de uma nova fase que agora forçosamente terá lugar, em que as perfurações serão mais profundas e haverá que buscar pólos afastados do das captações tradicionais. Esta via terá obviamente mais riscos de insucesso que o

ciclo que então terminou baseado em captações até 200/250 m, nas vizinhanças imediatas das captações clássicas.

Para minimizar o risco de insucesso haverá que deitar mão de novas ferramentas de prospecção, com maior penetração e, eventualmente, com melhor resolução: é o caso dos trabalhos recentemente terminados em Monção e Vidago com métodos geofísicos de sísmica de reflexão de alta definição, e de sísmica de refração nos horizontes superiores, associados a tomografias eléctricas de grande penetração.

Após a prospecção chega a vez das sondas de perfuração e de toda a parafernália de apoio. É uma fase extremamente complexa em que se degladiam dois sentimentos caldeados na necessidade de não se ultrapassar o investimento previsto: de um lado a ânsia de melhorar caudais e a qualidade da água e do outro o pavor supersticioso de se poder vir a perder a mítica nascente tradicional. O autor deparou-se e depara-se com essa situação nas partes do mundo onde exerceu essa actividade de pesquisa de recursos hidrominerais e não apenas no Maciço Antigo Português. Há que ser-se claro, explicar os riscos em jogo — que não são irreversíveis, se o processo for bem conduzido tecnicamente — e assumi-los.

As primeiras sondagens mecânicas em termas portuguesas foram realizadas à percussão mecânica e, posteriormente, à rotação diamantada com colheita contínua de testemunho (*e.g.*, Seifert 1967, Seifert & Vicente 1968, Seifert 1969) em locais como Sabroso (Pedras Salgadas) e Caldas de Moledo. O objectivo das sondagens inclinadas, com colheita contínua de testemunho, era o de reconhecer a litologia e a fracturação, e claro, as zonas circuladas. O reconhecimento das zonas circuladas com água mineral (zonas de fracturação, diaclasamento, grau de alteração, etc) e sua atitude (directão e inclinação) com este tipo de perfuração foi tarefa fácil em sistemas com artesianismo positivo. Porém surgiram fortes dificuldades em sistemas hidrominerais com pequena carga hidráulica, em que era posta à prova a credibilidade do método: dispunha-se de amostragem litológica de excelente qualidade, mas a informação sobre caudais e tipologia físico-química da água não permitia a detecção de zonas com diaclasamento activo, isto é, circulado. Para resolver esta dificuldade eram realizados, a

intervalos regulares, ensaios de caudal com bombas de pistão, as únicas que então era possível instalar nos diâmetros de perfuração usados (86 e 76 mm).

Um importante refinamento foi o da instalação de antepoços a profundidades pequenas, compatíveis com a perfuração a “*roller-bit*” em zonas de alterito. Nasceram, desta forma, alguns furos inclinados com técnica mista (rotação com “*roller-bit*” e coroa diamantada) alguns dos quais funcionaram como pesquisa e captação e ainda estão em funcionamento. Nesses antepoços era possível a instalação de bombas centrífugas ou submersíveis o que tornou mais fácil a realização de ensaios de caudal e a detecção das zonas com circulação de água mineral.

O artigo [14] (Carvalho 1995) corresponde a um exemplo típico da utilização conjugada de sondagens inclinadas, carotadas, de pesquisa, e de furos verticais com martelo de fundo de furo, de captação, neste caso de águas gasocarbónicas na megaestrutura Penacova-Régua-Verin. Esta sequência (prospecção geológica, geofísica com o método das resistividades eléctricas, sondagens carotadas inclinadas e furo de captação) foi realizada em inúmeros locais no Maciço Antigo com bastante sucesso pois: (i) algumas das sondagens de pesquisa inclinadas puderam ser aproveitadas como captação; e, (ii) quando se chegava à fase do furo de captação o risco geológico de insucesso era virtualmente nulo.

Houve depois uma fase de transição, com o advento do método de perfuração com martelo de fundo de furo, em que se assistiu a realização de antepoços com esse método seguido da perfuração com carotagem contínua. Nalguns locais, nomeadamente no quartzito “Armoricano”, continuou a preferir-se essa abordagem até recentemente, dadas as dificuldades e o custo de perfuração com martelo de fundo de furo em quartzitos duros e abrasivos.

Em aquíferos da Categoria II foram realizados furos horizontais (com martelo de fundo de furo e à rotação com coroa diamantada) com dispositivos para controlo de caudais para evitar a drenagem total dos sistemas aquíferos captados (e.g. Terras do Bouro – captações Fastio e Gouveia – captações Vida).

Importa enfatizar que em todas estas perfurações foi prática corrente a realização de apertado controlo sobre as características físico-químicas do fluido de circulação no que toca aos parâmetros essenciais da água. O controlo de pH,

condutividade e temperatura é o mínimo exigível sendo, geralmente, suficiente no contexto das águas minerais portuguesas do Maciço Antigo.

A utilização de furos inclinados na pesquisa e captação de águas minerais é prática relativamente comum (e.g., Carlovy Vary, Vylita 1985 e Bath, Kellaway 2001).

O método de perfuração mais praticado actualmente na pesquisa e eventual captação de recursos hidrominerais e geotérmicos no Maciço Antigo é o da percussão pneumática com martelo de fundo de furo, embora nos casos em que se pretendeu atingir grandes profundidades (500 ou 600 m) tenha sido utilizado, a partir do momento em que havia dificuldades de perfuração com este método, ou por opção declarada do projecto, a rotação com coroa diamantada e colheita contínua de testemunho. Têm sido realizados furos verticais e inclinados. Nestes, os sistemas de extracção com bomba submersível têm funcionado sem problemas.

Retomando o que foi referido no capítulo II, este método utiliza a percussão conjugada com uma acção rotativa. A energia utilizada para accionar o trépano é o ar comprimido a alta pressão de 10 a 25 bar. Um martelo pneumático equipado com botões de tungsténio está colocado na base do trem de varas e é accionado pelo ar comprimido. Daí a designação de martelo de fundo de furo, claramente preferível à muito usada rotopercussão.

Entre as vantagens do método contam-se: (i) o avanço rápido e profundidades podendo ultrapassar 250 m, em função do diâmetro e da potência do compressor e da produtividade das camadas; (ii) boa observação da amostragem e das zonas produtivas; e, (iii) fluido de perfuração, o ar, bem adaptado às precauções em relação à qualidade da água, pois não havendo lamas ou outros produtos não há interferência com o recurso.

No entanto, há a registar algumas dificuldades, designadamente: (i) o ar pode perturbar as observações relativas à qualidade do fluido de um determinado nível aquífero por oxidação de elementos ou ocultando as entradas de gases (DNEMT 1995); (ii) avaliação delicada dos caudais dos níveis atravessados, convindo considerar-se que os caudais obtidos na perfuração terão de ser interpretados à luz do Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) ver artigo [7], Carvalho 2004 e

artigo [10], Carvalho 2005, do Capítulo III; (iii) é um procedimento que se adapta mal a terrenos não consolidados, plásticos ou muito fracturados; (iv) existe o risco de formação de “rolhões” de amostragem, necessitando de frequentes limpezas sendo que este fenómeno não existe nem quando o furo está totalmente seco, nem quando a produção do furo é suficientemente importante; (iv) há necessidade de utilização de compressores de grande potência e mesmo de “boosters” quando os caudais são grandes e os níveis de água se localizam perto da superfície; e, (v) a identificação de cada nível produtivo é deficiente pois o fluido recolhido à cabeça integra a água dos vários níveis produtivos. Esta última limitação é minimizada no caso de utilização da técnica de perfuração com martelo de fundo de furo à circulação inversa que, no entanto, tanto quanto se julga saber, não foi ainda usada no Maciço Antigo Português.

O método do martelo de fundo de furo apresenta grande eficácia na detecção de níveis aquíferos se a perfuração for acompanhada com o indispensável controlo hidrogeológico.

O controlo hidrogeológico da perfuração é essencial para se alcançarem os objectivos seguintes: (i) cumprimento das normas técnicas do projecto; (ii) adaptação sistemática do programa de ensaios previstos; e, (iii) rentabilização do investimento em perfurações, limitando a multiplicação das tentativas e optimizando a aquisição de dados e respectiva interpretação.

Hoje este método de perfuração é quase exclusivo, estando em desuso a pesquisa com escavações manuais tão em voga até ao início dos anos 70 do século XX.

As diagrfias diferidas foram realizadas episodicamente em furos com martelo de fundo de furo. Carvalho (1983) apresentou um exemplo de utilização dessas técnicas em furos de captação de águas gasocarbónicas em Vidago (figura IV-5) na megaestrutura Penacova-Régua-Verin, no qual se constata a complexidade de interpretação dessas ferramentas em meios fissurados. A sua utilização pode ser considerada dispensável nos casos correntes em que um controlo hidrogeológico detalhado durante a perfuração permite a detecção das zonas aquíferas, seus caudais e qualidade da água,

5.3 Estratégias de prospecção e pesquisa

Os condicionamentos técnico-económicos levam a que cada vez mais as estruturas de pesquisa tendam a ser também de captação pois há que procurar um compromisso, nem sempre fácil, entre as necessidades da pesquisa e o dimensionamento da captação. Na maioria dos aquíferos hidrominerais portugueses, porque se situam em rochas compactas e fissuradas, o método de perfuração mais utilizado, desde 1974 é, como já foi referido, o da percussão pneumática com martelo de fundo de furo.

Nalguns casos tem-se justificado a realização de sondagens carotadas, quer em furos de pesquisa quer em obras de avaliação-produção (pesquisa e captação) profundas, em condições complexas.

A localização de armadilhas hidrogeológicas circuladas com águas minerais naturais tem sido conseguida com abordagens clássicas, com maior ou menor sobreposição de técnicas de prospecção. Convém enfatizar que o modelo geológico que serve de base à prospecção, pesquisa e captação deve resultar do cruzamento do máximo possível de aproximações metodológicas.

Conforme já foi assinalado, o artigo [14], Carvalho *et al.* 1995 é um exemplo clássico de prospecção, pesquisa e captação, comportando prospecção estratégica com meios fotogeológicos e geológicos, prospecção tática com geofísica, pesquisa com furos inclinados e captação com furos verticais na região de Vilarelho da Raia.

Lemos *et al.* (1992) apresentaram os resultados parciais de um programa de prospecção de recursos geotérmicos que constitui um exemplo representativo do empenhamento da Administração Central na resolução de um problema de subaproveitamento de um recurso de grande interesse local em S. Pedro do Sul. O autor concebeu e coordenou todo o programa de prospecção que desembocou na confirmação do Pólo Geotérmico do Vau, em S. Pedro do Sul, e na construção da captação AC1 das Termas de S. Pedro do Sul (artigo [18], Carvalho 1994 e artigo [19], Carvalho *et al.* 1995). A abordagem estratégica a nível da prospecção, englobou a sobreposição de várias ferramentas (Lemos *et al.* 1992) incluindo gravimetria e radiometria para delimitar os grandes blocos tectónicos da área. A nível tático foram utilizados os métodos da resistividade eléctrica, VLF e radão

no solo. O sucesso foi quase completo: dois furos inclinados de avaliação/produção com comprimentos de 300 m foram produtivos no Vau e um furo de 500 m, nas Termas, permite abastecer o actual projecto geotérmico de S. Pedro do Sul. Porém, cerca de 200 m a Este das Termas, o furo da Várzea foi improdutivo. Este exemplo, documentado nos artigos [18] e [19] mostra como o risco de insucesso sobe vertiginosamente quando se abandona a região envolvente dos pólos termominerais conhecidos.

Outro caso de prospecção estratégica e tática foi coordenado pelo autor desta dissertação e pelo Sr. Dr. António Martins Nunes (da então Vidago Melgaço & Pedras Salgadas) na região de Pedras Salgadas (Antunes da Silva 2004). Neste caso, a nível de prospecção estratégica foram usadas exaustivamente técnicas de inventário hidrogeológico, conjugadas com os instrumentos clássicos da cartografia estrutural e prospecção geoeléctrica. A prospecção estratégica com métodos eléctricos utilizou um dispositivo de malha larga a baixa penetração, a cinco níveis, com afastamento entre leituras de 30 m, com AB até 180 m. Espectacularmente, na região entre Romanas e Sabroso, num local onde os populares se referiam a antigas ocorrências de gás a borbulhar, foi detectada fracturação orientada a NNW (ver figura IV-4).

Seguiu-se, a nível tático, a utilização de rectângulos de resistividade eléctrica com AB de 450 m, que permitiram localizar a principal estrutura circulada e definir a respectiva inclinação, de cerca de 70º para Oeste. Os trabalhos continuaram com a realização de uma sondagem de pesquisa carotada, inclinada, com um antepoço para a realização de ensaios de caudal e finalmente com o furo de captação vertical.

Neste trabalho é de destacar a eficácia do inventário hidrogeológico e a confirmação do potencial hidrogeológico da fracturação orientada a NNW, que como veremos adiante, é a que desempenha o papel mais activo na maioria das zonas de descarga de circuitos hidrominerais da Categoria I (águas de circuitos hidrominerais longos e profundos).

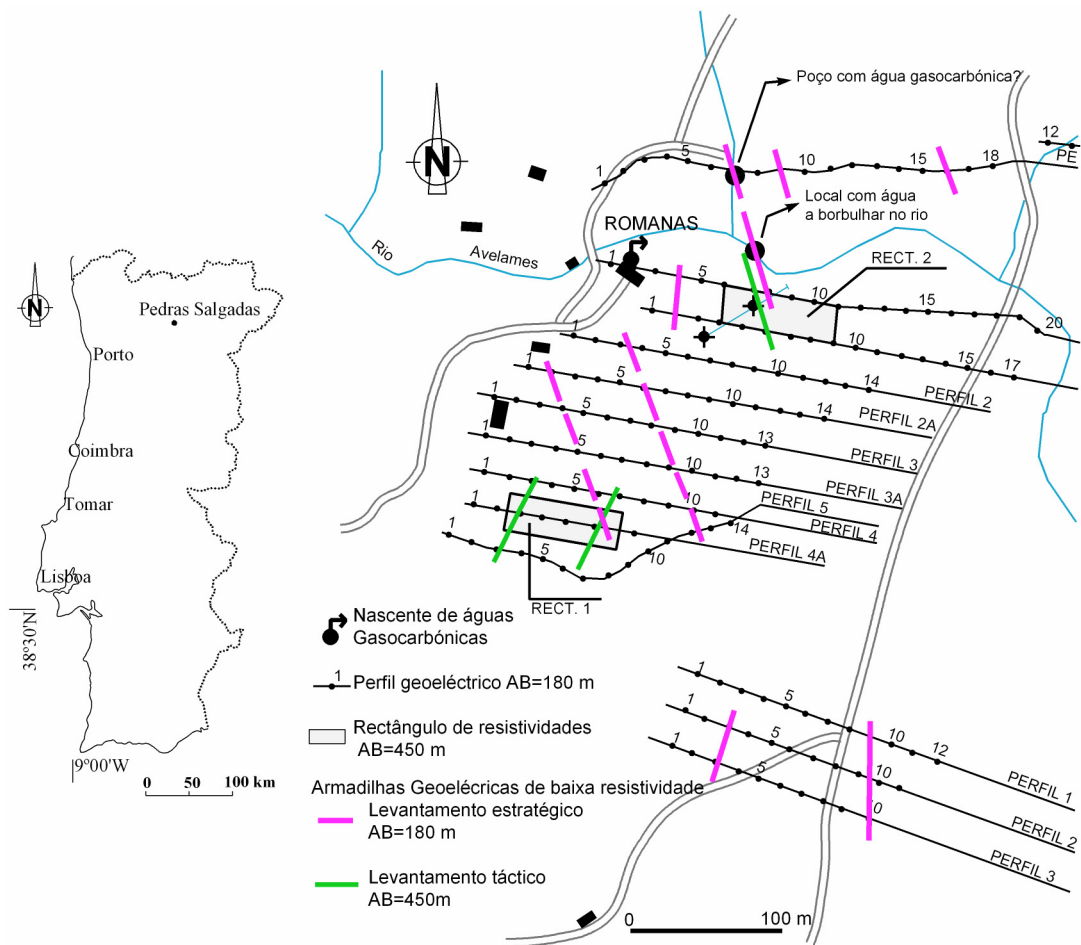


Figura IV-4: Prospecção geofísica estratégica e tática no sector Norte de Pedras Salgadas (adaptado de ACavaco 1992).

A resolução dos rectângulos de resistividade de grande penetração (AB de 1200 m), a nível tático, é ilustrada nos artigos [23] Carvalho & Silva (1988) e [15] Espinha Marques *et al.* (2001).

As estratégias a seguir na prospecção e na pesquisa decorrem da evolução das condicionantes tecnológicas e sociológicas. A este respeito é particularmente importante sublinhar os progressivos aumentos do custo da mão-de-obra e o embaratecimento progressivo das sondagens com percussão pneumática. Desta forma, pode questionar-se, na época actual, a relação óptima de investimento em geofísica e em sondagens mecânicas num dado programa, numa dada área. A geofísica dá inferências, permite formular cenários; as sondagens fornecem dados objectivos sobre as condições geológicas, hidrodinâmicas e hidroquímicas, isto é, sobre a quantidade e qualidade da água. E com alguma competência, em circunstâncias favoráveis, uma sondagem de pesquisa pode ser transformada em

captação. O risco de se avançar sem geofísica num dado projecto é o de uma simplificação excessiva: por isso, e por maioria de razão, as sondagens têm de ser bem projectadas e executadas e o controlo da perfuração exaustivo. Uma decisão deste tipo tem de ser encarada caso a caso.

5.4 O papel das falhas

Tradicionalmente o papel das falhas em meios fissurados é visto como o meio privilegiado para a circulação de águas subterrâneas e, obviamente, também, de recursos hidrominerais. Metodologicamente é assim, mas algumas reservas devem ser colocadas em relação ao seu comportamento hidrogeológico que decorre da sua génese e tipologia, idade, formações interessadas e tipo de água procurado.

A implantação “cega” de sondagens de pesquisa (ou de pesquisa e eventual captação) sobre falhas é questionável. A selecção dos locais deve atender a uma análise cuidada do previsível comportamento hidrogeológico das falhas e sua implicação na quantidade e qualidade da água, às características de vulnerabilidade e risco, às dificuldades de perfuração e até à acessibilidade aos equipamentos, a saber:

(i) As zonas do “traço” de uma estrutura fracturada com a topografia correspondem, também, quase sempre às cotas mais baixas. Assim, as zonas mais fracturadas, mais produtivas, são igualmente as zonas de maior vulnerabilidade e risco à poluição. Em muitas falhas perfeitamente observadas no campo, idoneamente conceptualizadas por modelos tectónicos coerentes, e confirmadas por anomalias vincadas de baixa resistividade, o núcleo é argiloso com “farinha de falha” (*fault-gouge*). A porosidade pode ser elevada; no entanto a função transmissiva é irrelevante e, nessas condições, os caudais de exploração resultam muito pequenos. Esta situação foi claramente comprovada nas sondagens inclinadas com carotagem contínua nas Caldas de Manteigas e em Unhais da Serra em que a falha da Vilariga foi identificada sem ambiguidades, mas não era produtiva, embora condicionasse o fluxo de água termomineral, a Oeste. Carvalho (1983) apresentou um exemplo de alteração profunda (pelo menos até 200 m) em Vidago, na falha Penacova-Régua-Verin, em que o núcleo

foi praticamente improdutivo (furo AC18), verificando-se circulação aproveitável de água gasocarbónica no bordo da estrutura, a Oeste, no furo AC19, em estruturas de direcção NNW (ver figura IV-5). No caso apresentado foram realizadas diagrfias diferidas de potencial espontâneo, vários tipos de resistividade, calibre, salinometria e sónica, entre outras. As diagrfias foram aqui particularmente úteis, pois o grau de alteração do maciço obrigou à utilização (integral no caso do furo AC18) de perfuração à *rotary* com lamas bentoníticas. No caso de só se utilizar perfuração com martelo de fundo de furo, com circulação directa ou inversa, e se o controlo hidrogeológico da furação for adequado, as diagrfias podem ser dispensáveis, como referido anteriormente.

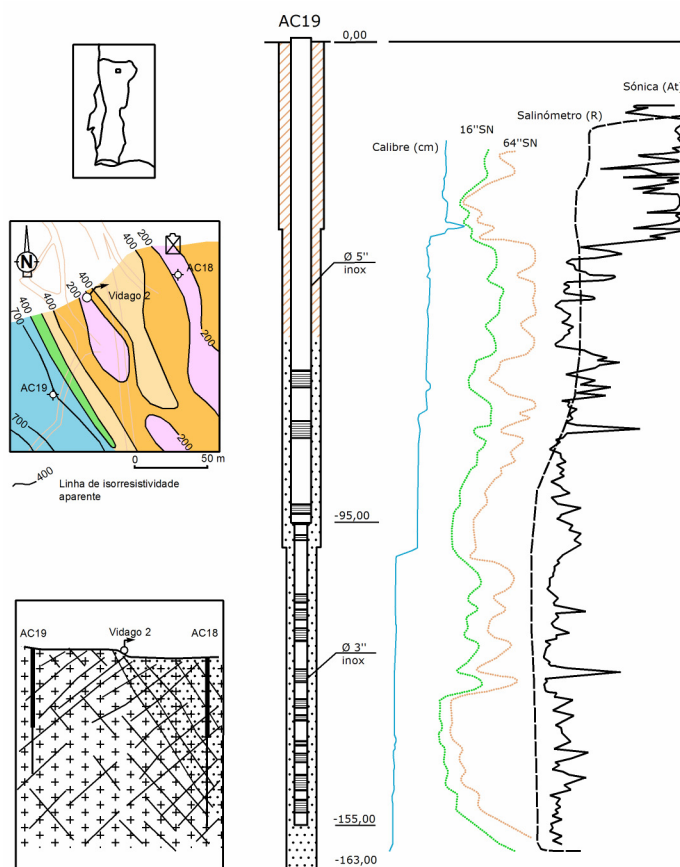


Figura IV-5: Furos de pesquisa de água gasocarbónica na falha Penacova-Régua-Verin, em Vidago (adaptado de Carvalho 1983).

Grillot & Drogue (1986) a propósito das emergências de São Pedro do Sul, Carvalhal e Alcafache, assinalavam que são as fracturas pouco visíveis à pequena escala e cuja orientação é diferente das grandes discontinuidades, que

têm um papel hidráulico principal, dado o seu carácter de abertura e de tectónica recente.

Noutros casos, correspondentes a falhas de compressão e em falhas antigas, sem movimentação recente, a porosidade e permeabilidade são muito baixas porque não há descontinuidades circuladas (veja-se o exemplo de Castelo de Vide no capítulo II).

(ii) Rochas muito fracturadas (muitas vezes fortemente alteradas) induzem grandes dificuldades à perfuração com percussão pneumática com martelo de fundo de furo. Muitas vezes são inevitáveis operações como os entubamentos parciais, as cimentações ou mesmo mudança de método de perfuração. É muito negativo o impacto destes problemas na economia dos projectos. Recentemente ficaram disponíveis no mercado ibérico equipamentos de perfuração de martelo de fundo de furo com circulação inversa que lidam melhor com estas situações adversas do que os equipamentos clássicos de martelo de fundo de furo que operam com circulação directa. Igualmente, e mais de vinte anos depois de terem surgido no mercado mundial as primeiras versões, estão disponíveis entre nós sistemas associados a martelo de fundo de furo que entubam enquanto a perfuração é realizada.

(iii) Uma norma genérica que pode ser retida é a de que a zona captante de uma nova obra de pesquisa e captação de águas minerais em rochas cristalinas deve ser implantada a distância suficiente da nascente tradicional para evitar interferências, sem que o risco de insucesso cresça excessivamente. Consegue-se, assim, diminuir as interferências da nova captação com a primitiva nascente, geralmente muito vulnerável à contaminação. Outra vantagem que se consegue, particularmente se a nova captação for realizada em profundidade, é a do fomento de um *cap-rock* de rocha não fissurada que diminui a vulnerabilidade do sítio. O melhor compromisso para a implantação de uma captação sobre uma estrutura reconhecidamente produtiva do tipo falha (ou filão) obriga a um bom conhecimento da geometria do maciço, eventualmente resultante de furos de pesquisa prévios. Em casos específicos podem mesmo ser necessários furos de prospecção.

5.5 A dessacralização dos modelos

A necessidade de compreensão do funcionamento hidrogeológico dos aquíferos hidrominerais leva ao estabelecimento de modelos conceptuais hidrogeológicos que mais tarde podem ser simulados em modelos matemáticos (analíticos ou numéricos). Os modelos conceptuais hidrogeológicos destinam-se a fundamentar intervenções de desenvolvimento ou conservação nos sistemas hidrominerais com vista ao seu aproveitamento económico. Dada a interdisciplinaridade (e mesmo a transdisciplinaridade) que a gestão dos recursos hidrominerais obriga, os modelos conceptuais tanto podem ser globais, tentando caracterizar no espaço e no tempo todo o circuito hidráulico, como parcelares cobrindo actividades, sectores ou domínios da ciência avulsos.

O avanço das ciências da computação permitiu o desenvolvimento acelerado dos modelos matemáticos que hoje estão acessíveis, gratuitamente, ou a preços modestos, a todos os investigadores e profissionais. Desta banalização ao insucesso vai um pequeno passo: não é possível construir modelos matemáticos credíveis e úteis sem que haja domínio dos modelos conceptuais hidrogeológicos que lhes servem de base. É normal, que para explicar um determinado fenómeno ou situação, os investigadores e os profissionais procurem interpretar os dados disponíveis para que, no final, o puzzle dê certo. Infelizmente nem sempre é assim. A incerteza é grande, o risco geológico subsiste sempre, e muitas vezes há que recomeçar construindo cenários alternativos de intervenção sobre hipóteses diferentes.

No caso dos recursos hidrominerais o maior esforço, entre nós, tem sido feito no domínio da detecção das zonas de circulação, particularmente nas zonas de descarga.

Um exemplo representativo é o da prospecção de água gasocarbónica em Melgaço. Durante algum tempo pensou-se que um filão pegmatítico (Acciaioli 1952/1953) existente nas proximidades de uma das emergências clássicas seria a armadilha hidrogeológica responsável pela ascensão do fluido hidromineral. Com base nesse modelo, apoiado por fotointerpretação, foram realizados 5 furos de

pesquisa com martelo de fundo de furo que não cortaram circulação hidromineral (ver figura IV-6).

Anos mais tarde foi decidido retomar o problema numa perspectiva mais ampla correspondente à metodologia que a equipa do autor desta dissertação vinha implementando (ACavaco 1997, Antunes da Silva 2002). Foi detectada com métodos geoelectricos (rectângulos de resistividade, cruzados, com AB=1 200m) uma estrutura de baixa resistividade passando pelas emergências Fonte Principal e Fonte Nova, orientada a ENE, aproximadamente a direcção da falha do Rio Minho. Dois furos verticais de pesquisa e eventual captação realizados com martelo de fundo de furo (AC1 e AC2) foram então realizados até à profundidade máxima de 184 m (ACavaco 1998). Atendeu-se à suposta inclinação da falha para Norte, com base na posição da anomalia relativamente à localização das emergências, de modo à estrutura principal ser alcançada abaixo dos 80 m. Os caudais de furação alcançaram 27,5 l/s. Lima (2001) determinou nesses furos, então a operar ao caudal de exploração de cerca de 1,1 l/s, transmissividades (T) de cerca de 40 m²/dia e coeficientes de armazenamento (S) de 4*10⁻⁵. Estes valores devem ser confrontados com os de Carvalho (1993), artigo [22], para outras águas gasocarbónicas portuguesas com os quais têm óbvias semelhanças. Note-se como os caudais de exploração são extremamente baixos comparados com os de furação. Neste caso, teremos Coeficientes de Redução de Caudal (CRC) de cerca de 1/25, isto é, 0,04, na linha do apresentado no tópico 8 deste capítulo. Caudais como os obtidos na fase de perfuração, embora permitidos hidraulicamente, não podem ser praticados em regime de exploração normal, pois destroem a estrutura bifásica (água-CO₂) da água mineral natural gasocarbónica.

Será importante referir que, por exemplo, os resultados dos modelos de fracturação — vitais para a concepção de esquemas de intervenção com geofísica e depois com sondagens — de escolas diferentes sobre as mesmas zonas de investigação, nem sempre convergem. Este facto apoia uma conclusão que se reputa de fundamental: a nível da prospecção e pesquisa local, táctica, a sorte final dos projectos joga-se, geralmente, à escala métrica ou decamétrica.

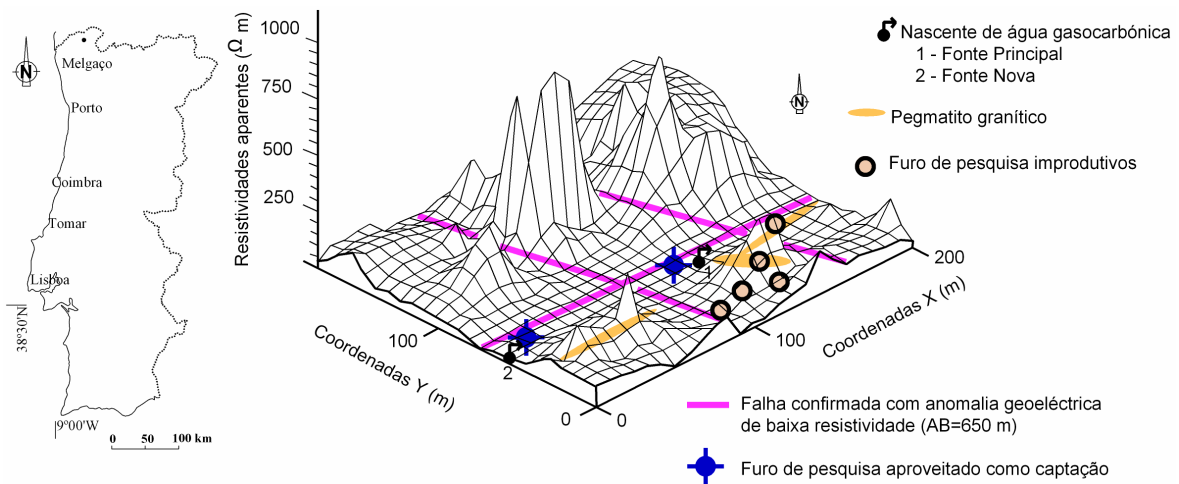


Fig. IV-6: Pesquisa de água gasocarbónica na área de Melgaço.

Não basta um modelo geológico-estrutural, obtido muitas vezes por simples fotointerpretação, para se considerar resolvido um problema de identificação de locais para execução de sondagens de pesquisa e captação. Poderiam mesmo aqui ser apresentados exemplos ilustrando que a utilização cega de estudos estruturais não conduziu a resultados positivos. A hidrogeologia de rochas cristalinas não é apenas um exercício de geologia estrutural, embora não possa viver sem o apoio consistente dos especialistas desta disciplina.

A concepção do modelo tectónico corresponde ao início de uma grande aventura. Um traço a cheio num mapa pode, com alguma sorte, corresponder a uma falha ou outra estrutura planar com uma função hidrogeológica, mas é fundamental compreender o funcionamento hidráulico dessa estrutura. A ligeireza dos que vêm nas falhas em rochas fissuradas eternos factores de favorabilidade à circulação de água, deve ser ponderada (Carvalho 1983, Carvalho 1979, artigo [1] do capítulo II; Carvalho & Chaminé, 2004, artigo [5] do capítulo II).

Uma falha tanto pode funcionar hidráulicamente como dreno ou como barreira. Prever num determinado contexto, se a falha tem um papel de condutor ou de barreira hidrogeológica (ou não tem relevância hidráulica), não é, geralmente, um problema simples mas um desafio que deve ser encarado com determinação. Uma forma de minimizar riscos é a realização de sondagens inclinadas, carotadas ou com martelo de fundo de furo, projectadas, se possível, para alcançar estruturas hidrogeológicas múltiplas.

Nos últimos anos (*e.g.*, Haven *et al.* 1985, Marques 1999, Marques *et al.* 2003 artigo [17], Espinha Marques 2001, Espinha Marques *et al.* 2001, artigo [16], Lima 2001) tem sido tentada a definição de zonas de recarga com recurso à utilização de modelos de isótopos ambientais. Trata-se de ferramenta extremamente útil para a definição de cenários de conceptualização de modelos globais de circulação, à escala do circuito hidrogeológico completo. Nestes modelos haverá que incorporar prováveis zonas de recarga e descarga e características geométricas, hidroquímicas e hidrodinâmicas do reservatório

O funcionamento dos circuitos hidrominerais, particularmente os da Categoria I, é complexo, correspondendo muitas vezes a circuitos longos, com elevados tempos de residência da água que poderão alcançar milhares de anos (Espinha Marques *et al.* 2003, Marques *et al.* 2003). Existe claramente o risco dos modelos matemáticos serem redutores da realidade, devendo ser utilizados na óptica da ferramenta nova que complementa os instrumentos tradicionais. Na decisão final de implantação da prospecção geofísica e de sondagens de pesquisa e captação, o controlo geológico estrutural à escala do afloramento é notoriamente mais relevante.

6. Alguns aspectos geológicos e hidrodinâmicos das zonas de descarga

No decurso do presente capítulo serão analisados alguns resultados das investigações realizadas tendo em conta a formulação de futuros modelos conceptuais hidrogeológicos, particularmente no que se refere às águas da Categoria I, águas de ciclo longo. Em relação aos restantes tipos, águas minerais da Categoria II, e águas de nascente, a questão parece resolvida pois enquadra-se no domínio dos aquíferos “normais”.

Em relação ao domínio da fracturação responsável pela ocorrência das águas da Categoria I, é já um lugar comum dizer-se que estão associadas aos grandes eixos tectónicos (*e.g.*, Choffat 1907, 1917, Freire de Andrade 1937, Acciaiuoli 1952/1953, Ribeiro & Moitinho de Almeida 1981). No entanto, como tem sido enfatizado neste trabalho, a questão mais importante é que atendendo a que as novas captações têm de ser implantadas com uma precisão métrica, importa

conhecer quais são, caso a caso, as estruturas locais, efectivamente responsáveis pela ascensão dos fluidos hidrominerais e geotérmicos.

No âmbito das intervenções do autor apresentadas nesta dissertação, foram realizados levantamentos geoelectricos, com dispositivos do tipo rectângulo de resistividades com penetrações apreciáveis (com AB até 1200 m) em 21 locais, conforme se mostra no quadro IV-1. Com estes levantamentos foi obtido um controlo significativo sobre as estruturas circuladas com água mineral constituídas por anomalias com contrastes de resistividade eléctrica (resistividade da rocha encaixante/resistividade no núcleo da anomalia) da ordem de 6. Apresentam espessuras horizontais até 20 m e um comprimento entre um mínimo de 10 m até 180 m. Podem ser, por isso, consideradas manifestações de armadilhas hidrogeológicas constituídas por falhas e fracturas com conectividade adequada, no seu núcleo, ou nos bordos.

Verifica-se que a principal direcção de fracturação, responsável confirmada por mais de 40% das emergências de água no universo analisado, é a NNW-SSE. A direcção NNE-SSW (eventualmente relacionada com o campo de tensões da orogenia alpina) corresponde a mais de 20% das situações e a restante população distribui-se pelas direcções N-S, NW-SE, E-W, WSE e WSW. Cada situação deve ser vista caso a caso, mas parece confirmar-se que a direcção da fracturação regional nem sempre é a mais importante a nível das condições de emergência à escala local. Evidências da direcção NNW-SSE devem ser sempre procuradas. As direcções próximas de E-W parecem ter papel potenciador, estando geralmente, presentes, à luz de interpretação fotogeológica.

Em todos os casos, e para além dos factos apresentados nos artigos apresentados no final deste capítulo, verifica-se que se conseguiu aumentar os caudais das emergências tradicionais. Os valores dos caudais primitivos (caudais espontâneos de Calado 2001) foram obtidos em Acciaiuolli (1952/1953) e arquivos TARH Lda e os caudais de exploração em Carvalho (2005), artigo [26]. O acréscimo relativo de caudal é maior nas situações em que os caudais iniciais são mais pequenos, conforme se pode ver na figura IV-7 em que se comparam os caudais antes e depois da realização de furos em pólos de águas sulfúreas. Assim, para caudais até 1 l/s, os caudais de exploração chegaram até 8 l/s. Para

caudais superiores a 2 l/s, os acréscimos foram moderados. O modelo de distribuição tende para seguir uma lei logarítmica.

Quadro IV-1: Principais direcções de fracturação em algumas águas minerais portuguesas confirmadas com prospecção geoelectrica.

Designação	Tipo	Litologia	Direcções de fracturação confirmadas
Aguas de Bem Saude	GC	Q+ Xisto	N-S
Chaves	GC	Xisto +Q	NNW e NNE
Corga do Vergueiral	GC	Granitos	NW
Melgaço	GC	Granitos	ENE
Pedras Salgadas	GC	Granitos	NNW
Vidago	GC	Granitos	NNW
Vilarelho da Raia	GC	Granitos	E-W
Carvalhelhos	S	Granitos	NNW
Alcafache	S	Granitos	NW
Caldas da Cavaca	S	Granitos	NNW e NNE
Caldas da Saúde	S	Granitos	NNW
Caldas das Taipas	S	Granitos	NNW
Cró	S	Granitos	N-S
Entre os Rios	S	Granitos	N-S
Fonte Santa (Almeida)	S	Granitos	NNE
Longroiva	S	Granitos	NNW
Manteigas	S	Granitos	WNW
Moledo	S	Corneanas	NNE
S, Pedro do Sul (Termas)	S	Granitos	NNW
S. Pedro do Sul (Vau)	S	Granitos	NNE
Touca	S	Granitos	NNE
Unhais	S	Granitos	NNE
Vizela	S	Granitos	NNW
Monção	S / GC?	Granitos	NNW

GC- Gasocarbónica

S - Sulfúrea

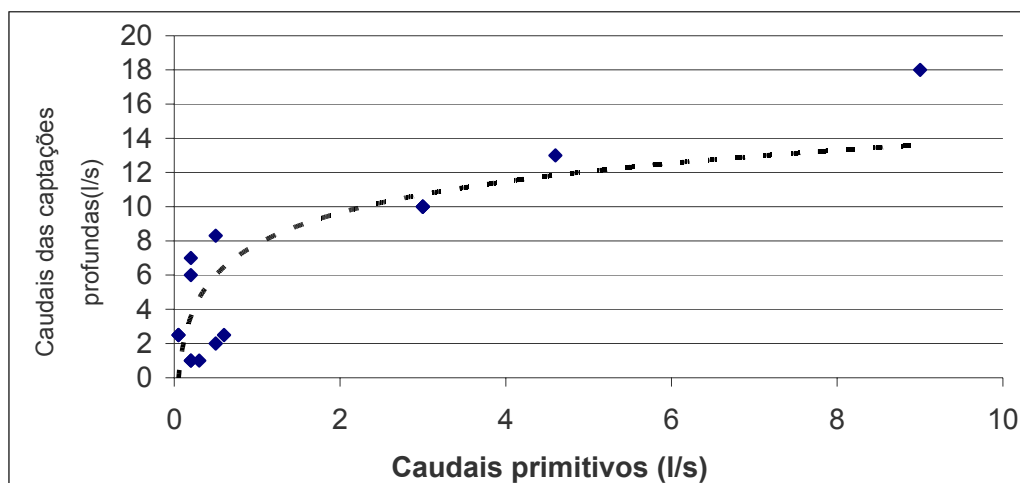


Figura IV-7: Caudais antes e depois de intervenções em águas sulfúreas Portuguesas.

Os caudais de exploração em cada pólo são variáveis entre 0,5 l/s e 12 l/s, podendo alcançar 18 l/s no pólo de S. Pedro do Sul (Ferreira Gomes *et al.* 2001). A mediana dos caudais dos furos é de 1,5 l/s para todas as litologias e tipos de água de ciclo longo (Categoria I). Se considerarmos uma distribuição por litologias, verifica-se que a distribuição é a indicada no quadro IV-2.

Quadro IV-2: Distribuição da mediana dos caudais de exploração (l/s) por furo e por litologia no Maciço Antigo.

Litologia	Águas minerais da Categoria I (i)	Águas normais, artigo [10] (ii)	Relação (i)/(ii)
Granitóides	1	0,02	50
Rochas Metassedimentares	4	0,50	8
Quartzitos	6	0,74	8

Confirma-se, assim, que as águas minerais da Categoria I estão localizadas sobre zonas de circulação preferencial, situação particularmente evidenciada

quando se considera apenas as águas situadas em granitos, que, aliás, constituem a litologia maioritária.

Os ensaios de caudal e os resultados da monitorização em campos hidrominerais portugueses mostram que o caudal de exploração a prazo não é controlado pela transmissividade ao longo das fracturas principais, mas por fracturação menor associada àquelas. Carvalho (1993) demonstrou que a relação entre as duas transmissividades atinge valores até 36 para 1 com mediana de 5 para 1. A transmissividade menor, de segunda ordem, corresponde à “transmissividade de comportamento” de Martínez & Lopez (1984).

Os ganhos de caudal instantâneo obtidos pela colocação de captações sobre as fracturas principais não tem correspondência nos caudais de exploração a prazo (*long-term well capacity*). Assim, é muitas vezes preferível localizar as pesquisas, nas proximidades da falha principal, mas em estruturas secundárias. A implantação em relação à falha (Carvalho 2000) terá de ser deduzida do modelo conceptual de fluxo no aquífero e das condições logísticas (acessos, disponibilidade de água, etc). Merece destaque a comparação das medianas das transmissividades nas zonas de descarga de águas da Categoria I (águas de ciclo longo) com as transmissividades definidas no Maciço Antigo, em águas não minerais, conforme se mostra no quadro IV-3.

Quadro IV-3. Transmissividades de águas minerais e não minerais por litologia

Litologia	Águas minerais da Categoria I		Águas normais, artigo [10]	Relação (i)/(iii)
	T(m ² /dia) (i)	T'(m ² /dia) (ii)	(T) (iii)	
Granitóides	43	9	1,7	25,3
Rochas Metassedimentares	60	60	3,1	19,3
Quartzitos	15	8	4	4,8

Nota: T: transmissividade; T': “transmissividade de comportamento” (Martínez & Lopez 1984).

O quadro IV-3 mostra que as águas minerais ocorrem em zonas muito mais transmissivas que as águas normais, por isso mais fracturadas ou com maior conectividade hidráulica. Essa evidência é clara, quer considerando, para as águas minerais, a transmissividade principal, quer a “transmissividade de comportamento”. Se se considerasse os valores mais elevados correspondentes aos locais mais transmissivos, Monção, Chaves, S. Pedro do Sul, Monfortinho (artigos [20] Carvalho 2001 e [21] Carvalho 1996) então as águas minerais e as águas normais difeririam em duas ordens de magnitude.

Os coeficientes de armazenamento (S) determinados para profundidades até 200 m são da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} , mostrando um confinamento semelhante aos aquíferos normais (ver artigos [21] Carvalho 1996 e [22] Carvalho 1993 deste capítulo e artigo [7] Carvalho *et al.* 2004, do Capítulo III).

Em muitos locais verifica-se forte artesianismo positivo (*e.g.* Moledo, Manteigas, etc). Essa questão prende-se com a localização das zonas de recarga mas certamente também com a temperatura e com o teor em gases das águas. Não abordamos essa questão no âmbito deste trabalho, mas é tema que merece aprofundamento para a compreensão, numa perspectiva sistémica, dos modelos conceptuais.

De acordo com o exposto neste tópico, e conforme se mostrou nos artigos [21] Carvalho (1996) e [22] Carvalho (1993), a confirmação de que as águas minerais de ciclo longo (Categoria I) estão em zonas mais fracturadas, correspondentes aos grandes eixos tectónicos, é dada pelas evidências seguintes: (i) Enquadramento geomorfológico e estrutural; (ii) Grandes anomalias geoelectricas; (iii) Caudais claramente acima dos normais nos ambientes geológicos de rochas cristalinas; (iv) Transmissividades mais altas que a dos aquíferos normais; e, (v) Temperatura (correlacionada positivamente com a transmissividade) conforme o artigo [22] Carvalho 1993), que favorece uma ascensão mais rápida da água

Não está no âmbito desta dissertação a análise regional da distribuição das nascentes no contexto da geologia fundamental. Essa tarefa foi feita exhaustivamente por Calado (2001) para as águas sulfúreas e ainda por Lima

(2001) para algumas emergências do Minho. Contudo, no decorrer das intervenções pontuais efectuadas, foram registadas algumas circunstâncias que merecem ser aqui registadas, a saber:

(i) Existe uma clara apetência para as nascentes hidrominerais mais importantes de ciclo longo (Categoria I) se situarem intra-maçiços graníticos, para Oeste dos acidentes principais de direcção NNE (ver figura IV-III); e,

(ii) Considerando os locais situados intra-maçiços graníticos, para distâncias até cerca de 1000 m do contacto às rochas metassedimentares, parece haver alguma dependência dos caudais em relação à distância, conforme se mostra na figura IV-8.

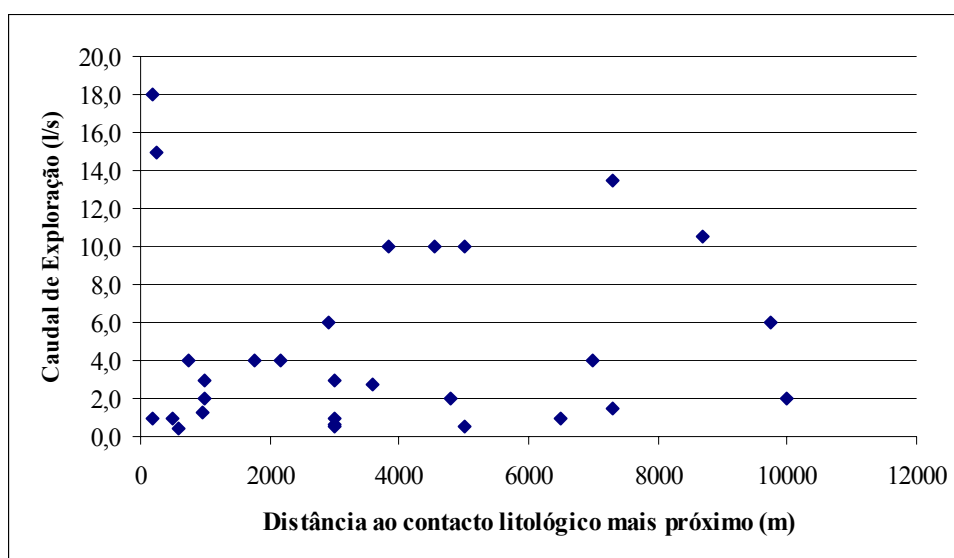


Figura IV-8: Caudais de exploração de águas minerais da Categoria I em rochas graníticas em função da distância aos contactos com rochas metassedimentares.

A partir dessa distância a distribuição parece aleatória. Pode admitir-se que alguns contactos, do tipo rochas metassedimentares/granitóides, possam constituir factor de favorabilidade para a ascensão dos fluidos hidrominerais e geotérmicos.

Outra questão prende-se com os modelos conceptuais que têm sido apontados para estes aquíferos, baseados em modelação de isotópos ambientais (e.g., Haven et al 1985, Marques 1999, Lima 2001). De acordo com estes autores

a recarga seria realizada em altitude e a circulação e a descarga far-se-iam praticamente sem misturas com águas superficiais. Uma tendência evidente é a de que os caudais dos pólos hidrominerais de ciclo longo (Categoria I), onde os caudais (e as transmissividades) são mais elevados, correspondem aos que se situam nas proximidades das linhas de água de 1ª ordem, conforme se mostra na figura IV-9.

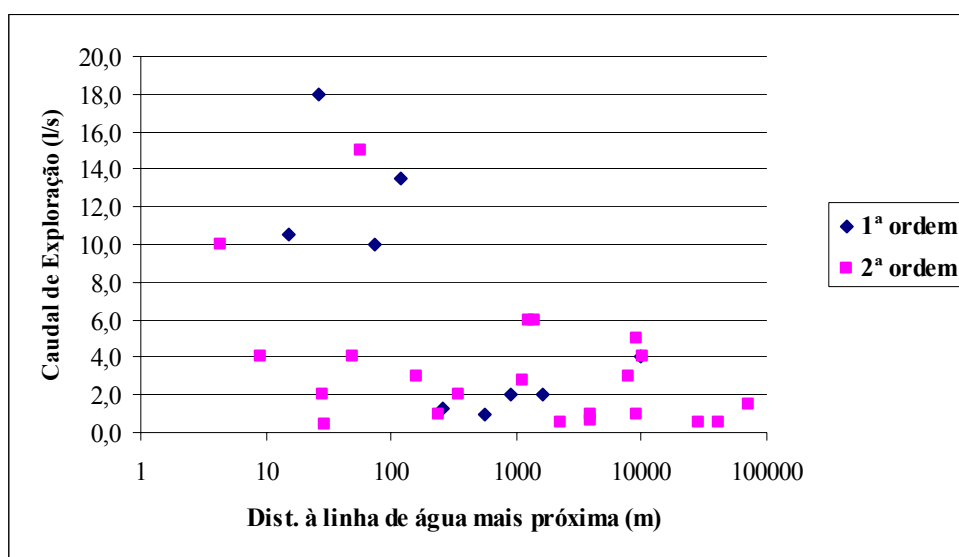


Figura IV-9: Relação entre caudais de exploração de águas minerais da Categoria I e distância às linhas de água.

A mesma tendência em relação aos caudais de exploração parece verificar-se, ainda, embora menos nítida, para as linhas de água de 2ª ordem. Estamos perante a consequência de haver mais água disponível para a recarga nas imediações das linhas de água? Trata-se de coincidência resultante do facto dos grandes rios estarem geralmente associados à fracturação que proporcionou a respectiva instalação e, igualmente, a das nascentes de água mineral? Esta questão está por enquanto sem resposta, enquanto não for tentada a modelação dos sistemas hidrominerais numa óptica integrada.

7. Recursos geotérmicos

7.1 Generalidades

Em Portugal, após o primeiro choque petrolífero de 1973, tem-se falado dos recursos geotérmicos do País. No entanto, a respectiva utilização continua em estado embrionário, à excepção do Arquipélago dos Açores onde o aproveitamento dos recursos de alta entalpia, para a produção de electricidade tem importância à escala regional (Carvalho *et al.* 2005). O autor desta dissertação teve a honra de ser o relator do Grupo Temático de Geotermia, do Fórum das Energias Renováveis em Portugal, organizado em 2001/2002 pela ADENE – Agência para a Energia. Do trabalho de todos os grupos temáticos, coordenados pelo Doutor Hélder Gonçalves, resultou a edição de um relatório síntese (Anon. 2001) e do volume final (H. Gonçalves *et al.*, 2002) que inclui o material coligido e aponta as medidas que, na óptica dos membros do Fórum, devem ser lançadas para dinamizar o sector da Energias Renováveis em Portugal. Algumas das ideias já veiculadas nos artigos [18], Carvalho (1994); [19], Carvalho (1995); [24], Carvalho (1995); [25]; Carvalho (1995), [26], (Carvalho 2005), entre outras, são seguidamente sintetizadas.

A geotermia poderá ser encarada como o conjunto das ciências e técnicas que estudam e exploram o calor terrestre. A energia geotérmica tem origem no interior da Terra, verificando-se que, em termos médios, a temperatura aumenta, em profundidade, em cerca de 33°C por km. Porém, devido à heterogeneidade da crosta terrestre, existem zonas anómalas do ponto de vista do gradiente geotérmico. O aproveitamento económico deste calor pode ser realizado na produção de energia eléctrica, para aquecimento do ambiente, de águas e em vários processos industriais.

A utilização ideal da energia geotérmica é em cascata, a temperaturas progressivamente mais baixas, até cerca dos 20°C. Este esquema de utilização foi desenvolvido por Lindal (1973), na sequência do primeiro choque petrolífero, e está representado no chamado Diagrama de Lindal (Figura IV-10).

A balneoterapia, com longa tradição em Portugal, permanece como a utilização mais conhecida desta forma de energia. Mais modernamente a geotermia tem alargado os seus domínios com a utilização de bombas de calor,

no caso das utilizações directas, e com a utilização de centrais de ciclos binários, no caso da produção de energia eléctrica.

As tendências actuais da geotermia à escala mundial, numa perspectiva industrial, são seguidamente resumidas.

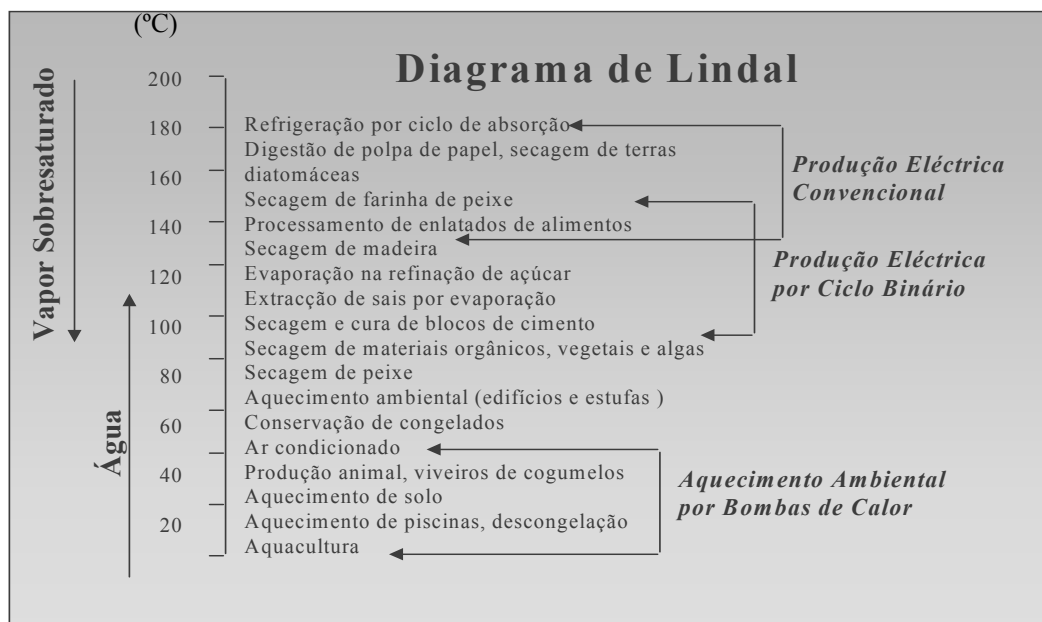


Figura IV-10: Utilizações da energia geotérmica (adaptado de Lindal, 1973).

7.2 A Geotermia

Numa perspectiva industrial é usual considerarem-se as categorias seguintes, tendo em conta o recurso e as diversas formas de utilização: (i) geotermia de alta entalpia, para a produção de electricidade; (ii) geotermia de baixa entalpia para usos directos; (iii) geotermia de muito baixa temperatura com bombas de calor geotérmicas (BCG), designada por *nova geotermia*; e, (iv) a dita *geotermia do futuro*, baseada em variações em torno do conceito de “rocha quente e seca” (HDR)

Geotermia de alta entalpia

A geotermia de alta entalpia é a aplicação geotérmica com mais visibilidade e, porventura, mais importante em termos económicos. Trata-se da produção de electricidade a partir do vapor de água de origem geotérmica, em centrais com turbinas a vapor e unidade de condensação, assim como a partir do vapor e da

água em centrais binárias. Os primeiros ensaios para produção de energia eléctrica remontam a 1904 e foram realizados em Larderello (Itália).

Não há condições geológicas que permitam perspectivar esta forma de exploração no Maciço Antigo e referir-se-á, apenas, que as condições existentes no Arquipélago dos Açores têm permitido alguma actividade nessa Região Autónoma, aliás em crescendo (Carvalho *et al.* 2005).

Geotermia de baixa entalpia

Os aproveitamentos geotérmicos de baixa entalpia para usos directos são muito antigos e conhecidos, sendo particularmente difundida a sua aplicação em balneoterapia. Esta forma de geotermia utiliza directamente o calor da Terra presente nos fluidos, em diversas aplicações tais como: como aquecimento de casas, de piscinas, de estufas e outras numerosas aplicações industriais, que são tipificadas no Diagrama de Lindal. Estas aplicações são mais difíceis de quantificar termicamente, excepto quando se trata de grandes redes de calor como é o caso, por exemplo, de algumas explorações na bacia de Paris (França) e em Ferrara (Itália).

Os principais países onde esta tecnologia é mais desenvolvida são os Estados Unidos da América, a China e a Islândia. A potência instalada na Europa atinge cerca de 6 GWt, permitindo a produção anual de 22 TWht em vinte e oito países (Carvalho & R. Carvalho 2004).

Em Portugal funcionou de 1992 a 2002 o projecto geotérmico do Hospital da Força Aérea no Lumiar, em Lisboa, (Carvalho 1998), com a potência de 0,6 MWt, obtida a partir de um furo com 1500 m de profundidade (temperatura de 50°C à cabeça da captação). Outros projectos menos voluntaristas estão em funcionamento no Maciço Antigo (Portugal Norte e Central) nas termas de Chaves (76 °C), e de S. Pedro do Sul (68 °C), entre outros, ver quadro IV-4.

A Nova Geotermia

A nova geotermia refere-se a uma tecnologia que aproveita a energia geotérmica contida nos aquíferos — hidrogeologia energética — ou em formações geológicas superficiais, recorrendo a bombas de calor. Estes dispositivos

permitem o desenvolvimento de sistemas de aquecimento e climatização a partir de aquíferos ou do solo a temperaturas normais. Actualmente é corrente a utilização de bombas de calor reversíveis, correntemente designadas por Bombas de Calor Geotérmicas (BCG, ou 'Geothermal Heat Pumps' – GHP), em Países como os Estados Unidos da América, Canadá, Suíça, Suécia, Alemanha e França.

A capacidade de produção instalada à escala mundial é de 6,6 GWt, sendo a produzida da ordem de 6,5 TWht (Lund 2001). Citando apenas dois exemplos desta tecnologia, na Suíça existe, em média, uma BCG por cada 2km² e nos Estados Unidos da América cerca de 50 mil novas instalações são realizadas cada ano (Rybach 1991). A capacidade instalada na Europa, em vinte e dois países, é de cerca de 1,5 GWt, sendo a energia produzida da ordem de 2,8 TWht. Em Portugal desconhecemos aplicações consistentes desta tecnologia, salvo no Lar de Idosos do Instituto Social das Forças Armadas em Oeiras (Área Metropolitana de Lisboa). No entanto, Carvalho & Duque (1982) referiram-na há mais de vinte anos, quando começava, então, a ser difundida na Europa.

Conhecem-se no mundo algumas pequenas aplicações no armazenamento de calor e frio em aquíferos com bombas de calor reversíveis. Esta tecnologia poderá desenvolver-se a grande escala, eventualmente associada a unidades de incineração de resíduos urbanos, salvaguardadas as questões ambientais, ou em conjunto com a energia solar.

A Geotermia do Futuro

A geotermia do futuro desenvolve-se a partir de vários modelos conceptuais que receberam inicialmente a designação genérica de '*Hot Dry Rock*' (HDR). O objectivo era a extracção de calor de rochas cristalinas a profundidades elevadas (4 a 5 km), sendo para isso criado um sistema de permutação artificial por fracturação hidráulica.

Os primeiros projectos mostraram que eram encontrados geofluidos, mesmo a profundidades muito elevadas. Tornou-se, então, claro que a geotectónica e as condições naturais existentes jogavam um papel mais importante do que o inicialmente suposto, passando a ser tidas em conta no dimensionamento dos

actuais projectos. Não há, assim, um único conceito, mas vários, adaptados às condições próprias de cada região. É o caso do ‘Hot Wet Rock’ (HWR), do ‘Hot Fractured Rock’ (HFR) e do ‘Enhanced Geothermal Systems’ (EGS) (Tenzer 2001).

Projectos no âmbito desta tecnologia foram ou estão a ser realizados nos Estados Unidos da América (em Los Alamos), Reino Unido, França, Japão, Alemanha e Austrália. Um importante projecto está em curso (projecto Europeu HDR, actualmente HFR), desde 1987, em Soultz-sous-Forêts na Alsácia, no ‘*graben*’ do Reno. Em 2001, começou a ser construída uma estação piloto com três furos de 5000 m, sendo um de injeção e dois de produção, esperando finalmente demonstrar-se a viabilidade técnico-económica para a produção de electricidade. Pode ainda configurar-se a longo, ou muito longo prazo, a utilização dos campos de geopressão e do acesso directo ao magma.

7.3 Recursos Geotérmicos no Maciço Antigo Português

Sínteses recentes dos recursos geotérmicos portugueses, numa perspectiva científica e técnica, estão disponíveis, entre outros, em: Aires-Barros & Marques (2000), Costa & Cruz (2000), Carvalho & Carvalho (2004) e Carvalho *et al.* (2005), artigo [26]. Descreve-se aqui a situação actual portuguesa no Maciço Antigo.

Nascentes Termiais

No Continente existem numerosas nascentes termiais ($T > 20^{\circ}\text{C}$) situadas em faixas tectonizadas, quer do Maciço Antigo, quer das faixas sedimentares ocidental e do Algarve. As que estão situadas no Maciço Antigo e suportam estabelecimentos termiais estão indicadas na Figura IV-2.

Alguns estudos de viabilidade, promovidos pelo Programa Thermie (Acção OPET 94/95-G16) em meados dos anos 90, do século XX, mostraram que o desenvolvimento de recursos geotérmicos de baixa entalpia nas nascentes termiais portuguesas é técnica e economicamente possível. Há locais, no Norte e Centro de Portugal, de alto potencial geotérmico como Aregos, (Figura IV-2), Chaves, Manteigas, Monção, S. Pedro do Sul e Vizela, entre outros. A maior

limitação ao sucesso desses potenciais empreendimentos é a da pequena procura térmica geralmente existente (Carvalho 1995, artigo [24] e Carvalho *et al.* 2005, artigo [26]).

Em IGM (1998) são identificados 52 locais com temperaturas superiores a 20°C. A temperatura mais elevada é medida em Chaves (76°C), havendo 17 nascentes com temperaturas superiores a 35°C. Nos últimos 30 anos tem sido realizado grande esforço de prospecção, pesquisa e captação nestes pólos (Carvalho 1995). Muitos destes pontos, onde já existem utilizações balneoterápicas, podem comportar pequenos a médios projectos de aplicação directa em cascata. É o caso de Monção, Vizela, Manteigas (entre outros) e Chaves e S. Pedro Sul onde estão em funcionamento, há vários anos, aplicações em aquecimento de hotéis, piscinas (Figura IV-2) e estufas.

O potencial total destes recursos de nascentes no Maciço Antigo, tomando como base Carvalho *et al.* (2005), é de cerca de 21 MWt e a energia actualmente utilizada é da ordem de 310 TJ/ano. Esta economia energética efectiva, fazendo a equivalência à electricidade, corresponde a 7,5 milhões de euros, bem demonstrativa do papel do termalismo nas economias locais. Carvalho (1995) e Carvalho *et al.* (2005) fazem notar que a oferta de recurso geotérmico é muito superior à procura. O actual factor de capacidade [tabela III, pp. 7] de Carvalho *et al.* (2005) artigo [26], varia entre 0,1 e 0,9 com mediana de 0,5. Isto confirma que a oferta é amplamente superior à procura, à excepção de dois pólos, Chaves e S. Pedro do Sul (termas), onde a procura pode vir a exceder a oferta e, por isso, se justifica realizar trabalhos adicionais de desenvolvimento do recurso.

Foram considerados os caudais constantes em Plano de Exploração (Costa & Cruz 2000) e as temperaturas são as existentes nos furos realizados. Conforme já foi assinalado por Calado (2001), nem sempre as novas captações permitiram aumentar a temperatura, o que se compreende dada a coexistência no mesmo furo de fluxos diferenciados que é difícil distinguir e separar, ainda que com diagrfias. Foi o caso do Vau (S. Pedro do Sul), artigo [19], Carvalho *et al.* (1995) onde foram registadas, em profundidade, temperaturas de 78°C e 80 °C, embora o fluido captado tivesse no final uma temperatura de 67°C. Abaixamento da temperatura em relação à captação primitiva, em novos furos de captação, foi, por exemplo, verificado em Bath (Kellaway 2001).

Não foi feita qualquer avaliação em torno das designadas temperaturas no reservatório (e.g., Aires Barros 1979, Moitinho Almeida 1979, 1982) pois corresponderiam a cenários especulativos, considerando a utilização em usos directos.

No quadro IV-4 é apresentada uma síntese dos Projectos Geotérmicos Portugueses no Maciço Antigo Português. Não foram incluídos os locais onde é feita apenas utilização balneoterápica. Pode buscar-se informação adicional actualizada desse tipo em Carvalho *et al.* (2005), artigo [26] deste capítulo.

Aplicações de Bombas de Calor Geotérmicas (BCG) em aquíferos à temperatura normal

No Maciço Antigo o potencial destas aplicações é enorme mas não são conhecidas aplicações concretas por desconhecimento do público e dos instaladores e falta de incentivos semelhantes aos que são prodigalizados a outras energias renováveis. É possível que a breve trecho possam surgir aplicações a partir dos efluentes das termas. Facilmente se conclui que a dinamização da utilização desse recurso energético não é apenas questão de disponibilidade do recurso, mas sim um problema de mercado, de marketing e de educação ambiental.

Aplicações do tipo Rocha Quente e Seca

Enquanto as formas de geotermia referidas neste documento como geotermia tradicional e geotermia nova podem ser aplicadas de forma relativamente rotineira pela indústria, pois os grandes problemas científicos e tecnológicos que as suportam estão resolvidos, a geotermia do futuro impõe a aplicação de técnicas e conceitos ainda não dominados. De acordo com os progressos conseguidos nos programas já realizados e, particularmente, no Projecto Europeu de Soultz-sous-Forêt, poderá especular-se que realizações industriais de algum vulto, poderão surgir num horizonte de 10 a 15 anos.

Como foi anteriormente referido, a geotermia do futuro desenvolver-se-á em torno das variantes do conceito alargado do HDR, o 'Hot Wet Rock' (HWR), o 'Hot Fractured Rock' (HFR) e o dos 'Enhanced Geothermal Systems' (EGS). Os dados

de base existentes sobre a geologia, hidrogeologia e geotermia do Maciço Antigo levam a supor que faria sentido iniciar estudos preliminares tendentes à realização de um projecto deste tipo em Portugal. De um empreendimento desta natureza adviriam conhecimentos aprofundados para a gestão dos campos hidrominerais e geotérmicos existentes, que permitiriam, pelo menos, melhorar a sua gestão.

8. Gestão de Recursos hidrominerais e geotérmicos e de águas de nascente

Na gestão de recursos hidrominerais há que atender, conforme foi referido anteriormente, a aspectos estritamente técnicos e outros de gestão institucional e até financeira como é o caso do acompanhamento de contratos de prospecção e pesquisa de água mineral natural. Importa reter aqui, sobretudo, o problema da gestão técnica.

Quadro IV-4: Projectos geotérmicos no Maciço Antigo Português onde existem utilizações para além das balneoterápicas.

Designação	Utilização	Potência instalada (MW _t)	Observações
Termas de Chaves (76 °C)	Produção de água quente sanitária, climatização e estufas	3,3	Em exploração As estufas foram abandonadas
Termas de S. Pedro do Sul (68 °C) (Pólo das Termas)	Produção de água quente sanitária, climatização e estufas	4,0	Em exploração
S. Pedro do Sul/Vouzela (Pólo do Vau) (66°C)	Estufas de frutos tropicais	4,0	Em exploração
Caldas de Manteigas (48°C)	Produção de água quente sanitária e climatização e aquecimento de piscinas	1,0	Concluído o estudo de viabilidade
Termas de Alcafache (51°C)	Produção de água quente sanitária e climatização	0,8	
Caldas de Monção (50°C)	Produção de água quente sanitária, climatização e aquecimento de piscinas	1,0	Concluído o estudo de viabilidade. Está em curso o furo geotérmico.
Caldas de Vizela (62°C)	Aquecimento de um hotel, piscinas (ar e ambiente) e água quente sanitária	1	Pequeno projecto piloto num hotel
Termas do Carlão (29°C)	Estufas	0,02	Abandonado pelo concessionário

A gestão técnica é, na sua essência, um problema de engenharia dos recursos hídricos — e particularmente, de aquíferos e captações — de um recurso geológico com um valor económico muito acrescido em relação às águas normais. Na indústria de águas minerais e de nascente — termalismo e engarrafamento — a tolerância em relação a desvios à qualidade química e microbiológica é muito pequena, daí ser natural a exigência de grandes cuidados,

superiores aos exigidos para águas comuns, em relação às questões de qualidade e constância de composição.

A sustentabilidade quantitativa e qualitativa da exploração de recursos hidrominerais, geotérmicos e de águas de nascente, está dependente do estabelecimento correcto do caudal de exploração das captações e dos limites impostos pelas condições de recarga (muito difíceis de estabelecer em aquíferos da Categoria I). Em todos eles julga-se recomendável praticar a *gestão adaptativa* preconizada por Maimone (2004), isto é, explorar os sistemas hidrogeológicos de forma controlada até ao limite da influência nos ecossistemas (ver capítulo III). Considerando o alto nível qualitativo que deve ser posto ao serviço do desenvolvimento e exploração de águas minerais naturais, é indispensável que sejam escrupulosamente cumpridas as regras gerais de gestão de aquíferos e captações já referidas no capítulo III.

Os recursos renováveis de águas minerais naturais da Categoria I e de fluidos geotérmicos são de avaliação muito mais complexa que os de águas normais, dado corresponderem, com frequência, a circuitos hidrogeológicos muito lentos. A avaliação dos recursos de aquíferos de água mineral natural ou de nascente de evolução normal (Categoria II), que pode ser função das metodologias e das estratégias de exploração — é realizada tentativamente a partir das metodologias clássicas para determinação de recursos renováveis (Hamill & Bell 1986, Custodio & Llamas 1983). Como já foi referido no artigo [9] do capítulo III (Carvalho *et al.* 2000), alguns dos métodos tradicionais foram aplicados, de forma sistemática, a numerosos pólos de captação de águas engarrafadas portuguesas da Categoria II, tendo sido determinados coeficientes de infiltração de 14% a 17%, embora se recomende na prática a utilização do valor de 10%, que pode ainda ser inferior se se considerarem cenários de seca. Estes valores servem para balizar a grandeza dos caudais de exploração por captação unitária.

8.1 O caudal de exploração de captações de água mineral natural e de nascente

A fixação do caudal de exploração, em captações de água para utilização em estabelecimentos balneoterápicos e em oficinas de água engarrafada, é um

problema vital para essas indústrias pois da regularidade dos caudais e da qualidade da água captada está dependente a eficácia de todo o processo produtivo, a satisfação dos clientes e a rentabilidade do negócio.

Em águas minerais naturais e águas de nascente, a água chega ao consumidor sem tratamentos que lhe alterem as propriedades físico-químicas e a pureza bacteriológica ocorrentes na origem. Nestes casos, a fixação do caudal de exploração não depende apenas de aspectos hidrodinâmicos, pois às preocupações de eficácia da captação associam-se as da qualidade. Então, a conceptualização do aquífero captado, incluindo a análise das relações com outros aquíferos ou corpos de água superficiais, é de importância vital para o sucesso duma operação de captação de águas deste tipo.

O processo decisional que conduz a esta fixação é complexo e incorpora aspectos ligados à construção das captações, às condições de recarga, ao contexto ambiental de vulnerabilidade e risco e obriga a uma conveniente gestão das expectativas: em rigor, só ao fim de um ou dois anos hidrológicos de exploração é que se torna possível confirmar a bondade da decisão assumida.

Modelos conceptuais hidrogeológicos, transmissividades e caudais de exploração

Um modelo conceptual hidrogeológico de um aquífero hidromineral deve incluir as condições de recarga, a estrutura do reservatório geológico (litologia, tipo de permeabilidade, estruturas hidrogeológicas que condicionam a circulação e sua distribuição no espaço e modelo geotectónico), a tipologia da água e a avaliação das condições de descarga naturais. O modelo conceptual deve ser dinâmico, isto é, estará em contínua adaptação à evolução do conhecimento hidrogeológico da área e às exigências da procura. A avaliação das condições de recarga, interface com as técnicas hidrológicas e hidrogeológicas, é indispensável para a salvaguarda da sustentabilidade dos caudais a captar.

O zonamento vertical do grau de alteração e de fracturação nas rochas cristalinas portuguesas — ígneas e metassedimentares no sentido de AGI (1962), de Rice (1963) e de Wright (1992) — é variável dado que as litologias ocorrentes, as condições climáticas e o contexto geotectónico são muito diversas. Trata-se de

questão muito importante ao nível da hidrogeologia prática (*e.g.*, Carvalho 1979, Machado Lima *et al.* 1985, Carvalho & Chaminé 2004). A experiência mundial tem mostrado que a distribuição de caudais com a profundidade atinge um máximo na base da zona alterada, a profundidades variáveis (*e.g.*, Larsson 1984, Hidroprojecto, ACavaco & Tahal, 1987, 1989, Wright & Burgess 1992, Lloyd, 1999). O zonamento em profundidade é influenciado por condicionalismos típicos do local, pelo que se torna necessário caracterizar o maciço rochoso que apresenta em geral três zonas (Carvalho & Chaminé 2004), conforme se mostrou no Capítulo II: zona alterada superficial, zona intermédia sã e fracturada e zona inferior sem fracturação significativa.

As singularidades geológicas ocorrentes localmente determinarão condições para a circulação e armazenamento de águas subterrâneas. O comportamento hidrodinâmico da circulação hídrica subterrânea é tendencialmente do tipo não confinado na zona superior passando a semi-confinado e confinado nas zonas intermédia e inferior.

A experiência portuguesa tem mostrado que geralmente, para águas da Categoria II, isto é, de ciclo curto, não se justifica a pesquisa abaixo dos 200 m (Carvalho 2003, artigo [11]). Conforme se mostrou no capítulo II os caudais de exploração medianos registados no Norte de Portugal (Carvalho *et al.* 2004, artigo [7]; Carvalho *et al.* 2005, artigo [10]), são para as principais litologias (*e.g.*, Larsson 1984, Wright & Burgess 1992, Gonzalez-Yelamos *et al.* 1992, Lloyd 1999, Singhal & Gupta 1999, Robins & Misstear 2000, Stober & Bucher 2000), a saber: (i) rochas metassedimentares, excluindo quartzitos: 0,50 l/s; (ii) rochas quartzíticas: 0,70 l/s e, (iii) rochas graníticas: 0,02 l/s. Caudais desta ordem de grandeza, nestes tipos de rochas, são registados no Sul de Portugal (ERHSA 2003) e, noutras partes do mundo, para furos com profundidades entre 60 e 120 m.

Os modelos conceptuais hidrogeológicos de águas minerais naturais da Categoria I incluem, frequentemente, circuitos hidrogeológicos longos e profundos, estando os locais de emergência associados a singularidades geológicas, particularmente falhas e fracturas muito penetrativas. Nesses casos, os caudais de exploração podem alcançar valores mais elevados, até 12,l/s. Nas águas sulfúreas Portuguesas, muito usadas em termalismo médico, o caudal

mediano é de 1.7,l/s, sendo de 1,0 l/s nas águas gasocarbónicas (arquivo TARH, Lda).

O parâmetro hidrodinâmico que mais condiciona a circulação de água nas formações e na entrada para as captações é a transmissividade e, um pouco menos, o coeficiente de armazenamento (Theis 1935, Fetter 2001, Krásny 1993, 1999, 2002). Por esta razão existe a preocupação sistemática de avaliação da transmissividade a par com a do caudal de exploração, o parâmetro que verdadeiramente interessa ao utilizador. Na maioria dos casos, os parâmetros hidrodinâmicos são obtidos através da utilização da aproximação ao modelo contínuo equivalente (CFCFF 1996, Bitzer *et al.* 2001).

A aproximação contínua tem sido suficiente, ao nível da caracterização geral, para apoio aos projectos correntes de captação de água mineral e de nascente em rochas cristalinas. No Maciço Antigo Português tem sido utilizado sistematicamente (Carvalho 1996) o modelo de Theis (1935), a aproximação de Cooper-Jacob (1946) e o método da recuperação de Theis (Driscoll, 1986), para o cálculo da transmissividade (T), pois: (i) é possível obter bons ajustes para períodos de bombagem relativamente prolongados (6 horas); e, (ii) o método da recuperação de Theis é facilmente realizável em furos de baixa tecnologia no final de um ensaio com “*air-lift*” ou mesmo simplesmente com “*air-flow*”.

O valor das transmissividades nas zonas de descarga varia com a tipologia dos aquíferos e das águas. Para águas de circuito curto (Categoria II) no Maciço Antigo Português (Carvalho *et al.* 2004, artigo [7]; Carvalho *et al.* 2005, artigo [10]), ocorrem valores medianos de 1,7 a 4 m²/dia consoante a litologia, correspondendo os valores mais altos às rochas metassedimentares quartzíticas.

Em águas minerais de circuito longo (Categoria I), em zonas de fracturação profunda, os dados de Carvalho (1993) resultam num valor mediano de 43 m²/dia, isto é, há uma diferença de uma a duas ordens de magnitude (Krásny, 1993).

O coeficiente de armazenamento nas captações de águas minerais de circuitos hidrogeológicos longos (Carvalho 1993, artigo [8]) tem um valor mediano de 3*10⁻⁴, denotando, por isso, confinamento apreciável.

Nas formações cristalinas pode generalizar-se o funcionamento hidráulico seguinte (Lloyd 1999): (i) um subsistema livre, instalado nos alteritos, com

transmissividade baixa e coeficiente de armazenamento apreciável; e, (ii) um subsistema semi-confinado, instalado a maior profundidade, com transmissividade alta e pequeno coeficiente de armazenamento. A superfície livre do subsistema superficial é próxima da superfície piezométrica do aquífero profundo, podendo ser mais alta ou mais baixa consoante a altitude relativa das zonas de recarga.

A bombagem do sistema profundo pode provocar uma influência espacial importante, deprimindo a piezometria e induzindo a drenância da água do subsistema superior para o inferior. O conjunto comporta-se como um sistema semi-confinado, como foi verificado nalguns locais de captação de água de nascente no Noroeste de Portugal com zonas produtivas até pelo menos 300 m de profundidade (e.g., regiões de Guimarães e de Fafe; *cf.* Higuera-Gil *et al.* 2001, Carvalho & Chaminé 2004). Por isso, em termos de projecto de captação, não há vantagem em colocar os tubos-ralo no subsistema superior, em níveis com pequena transmissividade. A colocação de tubos-ralo apenas no subsistema inferior, com adequado maciço artificial de seixo, assegurará que a água entrará, mais tarde ou mais cedo, por drenância vertical, para o subsistema inferior e melhorará o funcionamento da captação para tempos de bombagem prolongados. Além disso, esta solução aumenta o rebaixamento disponível em condições técnicas adequadas e impede a ocorrência de tubos-ralo a descoberto, situação que deve ser considerada aberrante pois induz instabilidade química e microbiológica da água captada.

A fixação do caudal de exploração

Na pesquisa e captação em rochas cristalinas, realizada geralmente com percussão pneumática com martelo de fundo de furo, com circulação directa, pode falar-se em pelo menos cinco tipos de observações de caudal a saber: (i) os caudais de perfuração que são os caudais instantâneos obtidos durante a perfuração e que geralmente são medidos sempre que há indicações de aumento de caudal, e de forma periódica quando se faz a limpeza do furo; (ii) o caudal determinado no fim da perfuração — que nem sempre é o caudal máximo de perfuração com o furo em ‘*open-hole*’ — para tentar avaliar a produtividade final do conjunto das camadas atravessadas; (iii) o caudal medido durante e após o desenvolvimento pós entubamento e completamento do furo; (iv) o caudal (ou

caudais) do ensaio de caudal; e finalmente, (v) o caudal de exploração, o *'long-term well capacity'* e *'long-term discharge capacity'* dos autores anglo-saxónicos.

O caudal de exploração de um dado furo, conforme Carvalho (2005) (ver capítulo III), é o volume de água por unidade de tempo que pode ser extraído de forma sustentável, tendo em conta o dimensionamento da obra, as características da procura e a correcta gestão do aquífero e do meio envolvente.

O cumprimento das normas de projecto, e a inevitabilidade do aparecimento de perdas de carga adicionais resultantes do completamento do furo, conduz a que o caudal de exploração seja, regra geral, substancialmente mais baixo que os registados durante a perfuração, no desenvolvimento e nos ensaios de caudal finais.

O caudal de exploração é condicionado por constrangimentos técnicos, económicos e mesmo institucionais pois o caudal de exploração é fixado pelos órgãos de tutela, actualmente as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regionais para águas para consumo humano e a Direcção Geral de Geologia e Energia (águas minerais naturais e de nascente). O caudal de exploração de uma captação de água subterrânea não é, por isso, o caudal máximo extraível em termos operacionais, mas antes o que as condições hidrogeológicas, a obra, o enquadramento ambiental e as interacções com outros aquíferos ou corpos de água superficiais ou as imposições legais permitem.

A determinação do caudal de exploração em furos de captação de águas minerais naturais (particularmente da Categoria I, ciclo longo) e de nascente devem atender às achegas adicionais seguintes:

(i) Deve haver ensaios de caudal escalonados e de longa duração. A duração do ensaio pode alcançar vários meses. O próprio Dec- Lei 86/90 de 16 de Março, artigo 16, ao exigir a apresentação de 12 análises químicas e bacteriológicas com periodicidade mensal para que uma água seja considerada água mineral natural, implica a necessidade de um controlo temporal muito alargado;

(ii) Devem ser mantidos níveis dinâmicos estabilizados e o fluxo laminar na captação. Esta condição é particularmente importante em águas gasocarbónicas para que não se verifique uma rápida degradação da qualidade físico-química da água;

(iii) A influência dos caudais e dos rebaixamentos na temperatura, quimismo e qualidade bacteriológica da água deve ser controlada;

(iv) A superfície piezométrica do aquífero hidromineral deve ser mantida acima da superfície livre de aquíferos “freáticos” (ou da superfície potenciométrica de outros aquíferos) de forma a diminuir riscos de interferência na qualidade química e microbiológica da água mineral natural. Esta condição, porventura considerada excessiva, poderá ser mitigada caso se prove, com controlo analítico adequado, que as condições hidráulicas subterrâneas locais permitem soluções menos penalizantes para as extracções.

O artigo [20], Carvalho (2001), apresenta um exemplo de aplicação desta estratégia no sistema de captação da concessão hidromineral de Monfortinho.

A operação das captações deve prever a colocação da bomba vários metros abaixo do nível dinâmico. Esta condição é particularmente importante para aquíferos de águas gaso-carbónicas para diminuir o risco de cavitação dos equipamentos e bombagem. Deve ser evitada a bombagem intermitente ainda que para isso seja necessário instalar capacidade de armazenamento suplementar à superfície. Deve ser também monitorada sistematicamente a qualidade da água, os caudais e os níveis estático e dinâmico. De igual forma devem ser controlados corpos de água superficial, lóticos ou lênticos, interferentes com o circuito hidromineral. Assim, as captações, mesmo as abandonadas, devem ser inspeccionadas regularmente para verificar o comportamento hidrodinâmico e prevenir riscos de contaminação. Devem existir procedimentos de rotina para fazer face a qualquer emergência. Uma norma básica, por exemplo, é a da existência de, pelo menos, uma captação de reserva.

O cumprimento sistemático destas normas leva a uma diminuição drástica de ocorrências negativas ligadas com a qualidade e quantidade da água captada e sua constância no tempo, afinal princípios básicos inerentes à condição de água mineral natural e, em parte, às águas de nascente.

Conforme foi anteriormente expresso, resulta claro que a fixação do caudal de exploração de uma captação de água subterrânea não corresponde à simples determinação do caudal crítico com um ensaio escalonado. Este caudal crítico poderá ser o valor máximo aceitável em termos puramente hidrodinâmicos.

Corresponderá ao caudal de exploração se não houver sobreposição de outras limitações, nomeadamente as que decorrem da posição do topo superior dos tubos-ralo (que condiciona o limite do rebaixamento máximo disponível) e da análise da estabilidade do quimismo e da microbiologia da água da captação.

O caudal de exploração de uma captação de água mineral natural ou água de nascente é o caudal possível de extrair tendo em conta constrangimentos técnicos, económicos e institucionais. Não corresponde, por isso, ao caudal máximo captável de uma obra ou aquífero hidromineral mas antes ao que as condições hidrogeológicas, o dimensionamento da captação, o enquadramento ambiental e as interacções com outros aquíferos ou águas superficiais permitem de forma que a água cumpra com os requisitos legais. Um dos mais importantes é de que estas águas têm de estar bacteriológicamente puras na origem. Finalmente, como já foi referido, para ser efectivo o caudal de exploração é consagrado, legalmente, no Plano de Exploração, aprovado pelo órgão da tutela, actualmente a Direcção Geral de Geologia e Energia.

Um critério para fixar o caudal de exploração em rochas cristalinas (Carvalho 2000, Bisson & Lehr 2004, Carvalho *et al.* 2004, 2005) é o da extrapolação da curva de rebaixamento a caudal constante, pela aproximação de Cooper-Jacob (1946) até seis meses de bombagem, considerando que não há recarga, de forma a garantir que não serão alcançados os limites de rebaixamento impostos pelo dimensionamento da obra. A extrapolação sugerida envolve riscos se não se conhecer o modelo conceptual do sistema, o que é geralmente o caso, sendo frequentes os efeitos de escala, principalmente barreiras negativas que afectam os rebaixamentos a médio e longo prazo. Esta aproximação é particularmente adaptada para aquíferos hidrominerais da Categoria II (águas de ciclo curto, minerais naturais ou de nascente).

Após a construção da obra, uma antecipação do caudal de exploração, antes da realização do ensaio de caudal, pode ser obtida a partir dos ensaios de limpeza e desenvolvimento com “air flow”. No final, pode fazer-se uma extracção colocando as varas de injeção do ar acima da primeira zona produtiva captada. Após a paragem, é possível controlar níveis até à recuperação completa. Com estes valores, a partir da transmissividade obtida pelo método da recuperação de Theis (Driscoll 1986), da posição do pé das varas e da estimativa do nível

dinâmico obtido a partir da recuperação, pode ser avaliado com algum rigor o caudal específico. De seguida, uma estimativa do caudal de exploração é possível pois o rebaixamento disponível é conhecido.

Um coeficiente de segurança, que dependerá da experiência do projectista em regiões análogas, deve ser aplicado a este caudal de exploração preliminar assim avaliado, tendo em conta que a bombagem realizada com compressor terá sido de curta duração. É normal diminuir de 30% o rebaixamento disponível, para ter em conta efeitos de anos hidrológicos particularmente secos.

A única forma segura de fixar o caudal de exploração é a do seu ajuste de acordo com a monitorização sistemática de extracções, níveis e qualidade. Nestes casos, os ensaios de caudal chegam a durar um ano hidrológico e o controlo mantém-se sistematicamente durante a operação. Mesmo para usos menos exigentes, Talbo (1983) propõe que a duração do ensaio deve ser no mínimo um décimo do tempo total de funcionamento anual. Esta forma de gestão (designada de “passo-a-passo” por Carvalho 1996) corresponde nas captações ao que Maimone (2004) designou de *gestão adaptativa dos aquíferos*.

Carvalho *et al.* (2004) propuseram a designação de Coeficiente de Redução de Caudal (CRC) para a relação entre o Caudal de Exploração (Q_{expl}) e o Caudal Máximo de Perfuração ($Q_{maxPerf}$). Posteriormente, Carvalho *et al.* (2005), considerando duas populações distintas de furos de água normal na Zona Centro-Ibérica do Maciço Antigo Português, num total de 280 furos, chegaram a CRC de 0.27, com dispersão relativamente alta (R^2 de 0.5). Portanto, na Zona Centro-Ibérica, considerando um CRC de 0.27 os caudais de exploração serão da ordem de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ do caudal máximo de perfuração (figura IV-11).

Em zonas de gradientes hidráulicos altos, de pequenas áreas de contribuição para a obra de captação e em furos com rebaixamentos disponíveis diminutos (zonas captantes próximas da superfície) o CRC tende a ser muito baixo. É mais elevado em áreas aplanadas com fracturação ou fissuração bem distribuídas, e captações com grande rebaixamento disponível. As considerações atrás apresentadas têm pleno cabimento no caso que aqui importa que é o das águas minerais naturais da Categoria II e de nascente de ciclo hidrogeológico curto do Maciço Antigo Português.

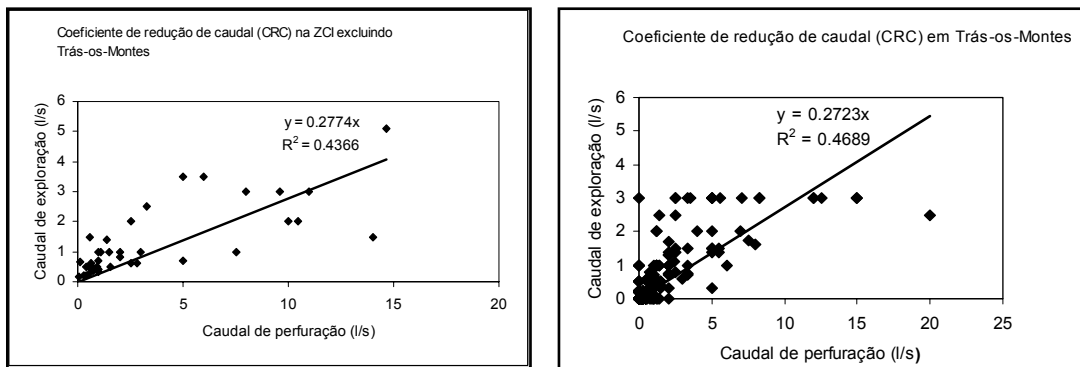


Figura IV-11: Coeficiente de redução de caudal (CRC) em águas de ciclo curto na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Antigo Português (adaptado de Carvalho et al. 2004, artigo [7] do Capítulo III).

A fixação do caudal de exploração em captações e aquíferos de ciclo longo

As águas minerais naturais de ciclo longo, lento e profundo (Categoria I) usadas para balneoterapia e engarrafamento têm, em geral, uma particularidade: ocorrem em pólos singulares de que é incipiente o conhecimento concreto sobre o modelo conceptual global havendo apenas algum controlo sobre os mecanismos de descarga e das captações naturais ou artificiais existentes. No caso do Maciço Antigo Português correspondem primordialmente águas a águas gasocarbónicas e sulfúreas (Calado 1995, 2001), com tempos de residência no reservatório de centenas ou milhares de anos (Marques 1999).

A aplicação, ao nível da captação, dos critérios anteriormente referidos conduz a coeficientes de redução de caudal (CRC) de cerca de 0.14 nas águas sulfúreas e menos de 0.1 nas gasocarbónicas, conforme se representa na figura IV-12. Nas gasocarbónicas não foi incluído o caso de Chaves que deve ser considerado excepcional, tendo em conta a litologia e a elevada temperatura da água. Todas as gasocarbónicas consideradas na fig IV-12 são frias. As correlações são fracas e as dispersões são grandes pois não estão envolvidos apenas aspectos hidrodinâmicos, isto é, os caudais de exploração estão muito condicionados por restrições ligadas à constância do quimismo (é bom lembrar que na Categoria I estamos perante sistemas bifásicos água-gás) e aos constrangimentos de qualidade química e bacteriológica.

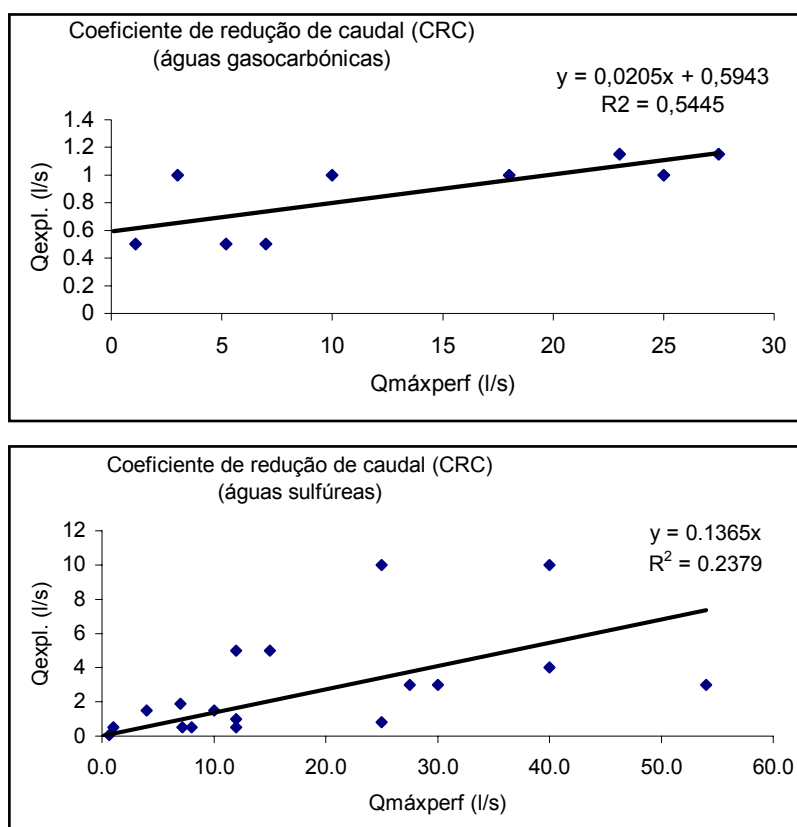


Figura IV-12: Coeficiente de redução de caudal (CRC) vs. caudal máximo de perfuração, para as águas gasocarbónicas e águas sulfúreas.

O conhecimento dos recursos renováveis de um aquífero hidromineral pode ser encarado de forma semelhante aos de um aquífero normal. Correspondem aos volumes anuais que podem ser extraídos sem induções de efeitos ambientais negativos, ou degradação da respectiva qualidade. O caudal de exploração das captações da Categoria I — por estarem muito concentradas num único pólo — parece muito condicionado pelo conhecimento dos recursos, pois a extracção não pode senão ser feita próximo da zona de descarga. No caso de águas sulfúreas e gasocarbónicas, com tempos de residência de centenas (ou milhares) de anos, pode mesmo questionar-se a sustentabilidade do recurso para extracções superiores às das descargas naturais dos sistemas hidrogeológicos. É esta a leitura que pode ser feita dos critérios apresentados por (Albu *et al.* 1996), que pelo facto de serem menos conhecidos se referem aqui com um pouco mais de

detalhe, ou seja, o método das extracções escalonadas crescentes, o método das produtividades e o método gasohidrodinâmico.

Método das extracções escalonadas crescentes

É considerado aplicável em sistemas de extensão limitada, com poucos pontos de investigação, para os quais o comportamento do sistema é razoavelmente inferido. O sistema é testado no conjunto, simultaneamente, em todas as possíveis captações ou grupos de captações. São mantidas extracções contínuas durante um período de vários dias, em escalões crescentes, cada um com a mesma duração. O ensaio termina quando a influência nas emergências naturais é observada. Os recursos disponíveis correspondem ao caudal total obtido sem induzir influências adversas nas captações clássicas, mantendo, assim, as condições naturais de escoamento. Valeria a pena meditar, com base neste método, e numa perspectiva de longo prazo, na sustentabilidade de muitos dos sistemas de captação instalados, a partir dos anos 70 do século passado, em pólos hidrominerais portugueses, em aquíferos de ciclo longo do Maciço Antigo, em que claramente estão a ser extraídos maiores caudais do que os disponibilizados pelas emergências primitivas.

Método das produtividades

Este método é considerado útil para aquíferos extensos, relativamente uniformes, onde os dados recolhidos são representativos de largos volumes e onde não se conhece o comportamento do sistema no seu conjunto. Com base na conceptualização hidrogeológica e, particularmente, hidrodinâmica do aquífero hidromineral, são definidos blocos dentro dos quais se admite uma certa homogeneidade de características. Esses blocos são caracterizados pela produtividade por unidade de volume de aquífero Q_{yi}/V_i que é a razão entre o caudal de exploração (“caudal óptimo” no original) Q_{yi} e o volume V_i do bloco de aquífero correspondente a cada captação i para a qual a extracção está a ser considerada. O caudal de exploração é determinado a partir de ensaios de caudal em regime de equilíbrio ou quasi-equilíbrio, considerando, também, as relações das extracções com as características físico-químicas dentro dos limites qualitativos requeridos pelas utilizações que são dadas à água. São, assim, tidos

em conta os recursos renováveis. O volume de cada bloco é determinado por aproximações geométricas ao modelo hidrogeológico. Os recursos totais Q_y do sistema hidromineral vêm dados pela equação seguinte:

$$Q_y = V(\sum Q_{yi} / \sum V_i), \text{ em que } i \text{ varia de } 1 \text{ a } n.$$

Este método, pode ser usado, conforme o grau de conhecimento do sistema hidromineral, para a determinação de recursos medidos ou inferidos.

Método gasohidrodinâmico

Este método pode ser usado para águas minerais bifásicas (líquido e gás) em que o gás, geralmente dióxido de carbono, tem um movimento vertical e a água pode mover-se lateralmente na horizontal. É particularmente útil, portanto, na determinação de recursos de águas com alto teor de gases, como são as águas gaso-carbónicas. A dificuldade é que esta técnica exige uma completa caracterização dos reservatórios hidrominerais a saber: (i) Fluxo horizontal no aquífero — condutividade hidráulica horizontal, gradiente hidráulico e secção de escoamento; e (ii) Fluxo vertical de águas gasocarbónicas — relação entre a densidade do líquido e a densidade do fluido bifásico e a área horizontal de descarga.

Não se conhecem aplicações destas técnicas em Portugal e cremos estar aqui uma via por que valia a pena caminhar, juntamente com a criação de modelos conceptuais transpostos para modelos numéricos de fluxo e transporte de massa e calor que procurasse reproduzir os modelos conceptuais já elaborados, por exemplo, por Espinha Marques *et al.* (2003) e por Marques *et al.* (2003) e outros.

8.2 O Plano de Exploração das concessões hidrominerais e geotérmicas

O Plano de Exploração, tal como previsto no artigo 26º do Dec-Lei 86/90, deve conter “a memória descritiva sobre as características do recurso e a descrição pormenorizada dos processos de exploração e a indicação dos caudais”. Trata-se, portanto, do documento que exige um conhecimento adequado sobre o recurso de forma a justificar as metodologias de exploração propostas. Não pode,

por isso, ser elaborado sem que o Director Técnico tenha ideias claras sobre a disponibilidade do recurso hidromineral e suas metodologias de desenvolvimento e protecção.

O Plano de Exploração, o “plano de lavra” das concessões hidrominerais e geotérmicas, é figura consagrada na legislação portuguesa. Para as águas de nascente está prevista a fórmula de “sistema de captação” que na prática merece da tutela o mesmo grau de exigência. O Plano de Exploração pressupõe que se conheçam os recursos renováveis dos sistemas aquíferos interessados, tecto máximo das extracções a realizar. A recarga dos aquíferos hidrominerais pode ser encarada de forma semelhante à dos aquíferos “normais”, particularmente no que concerne aos da Categoria II.

A extracção, ainda que temporária, da globalidade dos recursos médios infiltrados, poderia induzir, em reservatórios com pequena função capacitiva, sobre-explorações temporárias, com todo o cortejo conhecido de efeitos ambientais negativos e alterações na própria qualidade físico-química da água.

Mesmo para águas “normais” este não é um tema simples. Os modelos matemáticos, obviamente, vieram trazer um novo fôlego à questão, ao permitir a realização de simulações que é necessário calibrar e validar adequadamente. Para obviar a surpresas resultantes da margem de incerteza no cálculo dos recursos renováveis, é normal considerar um coeficiente de segurança de 20 a 30% ao estabelecer o limite máximo de exploração de um determinado aquífero. O tema foi discutido em Carvalho *et al.* (2000), artigo [9] do capítulo III.

Quanto às águas minerais de origem profunda ou de circuito hidráulico longo, as dificuldades para determinação dos recursos são maiores pois em muitos casos é grande a indefinição sobre o modelo conceptual. As áreas de recarga são generalizadamente desconhecidas bem como o tempo de residência das águas. No limite, no caso português, para águas sulfúreas e gasocarbónicas, com tempos de residência de centenas (ou milhares) de anos, pode mesmo questionar-se a sustentabilidade do recurso para extracções superiores às das descargas naturais dos sistemas hidrogeológicos.

Carvalho & Silva (1988), artigo [23] deste capítulo, consideraram o conceito de recurso na acepção de Fetter (2001): volume de água naturalmente ocorrente que

pode ser extraído dum aquífero ou sistema aquífero atendendo a condicionalismos económicos e legais, sem alteração das qualidades intrínsecas da água ou indução de danos ambientais. Com base nesse conceito foi proposta por aqueles autores, para avaliação dos recursos geotérmicos de Trás-os-Montes, uma adaptação da metodologia de McKelvey, modificada por Varet (1982), fundamentada em resultados de ensaios de caudal. Considera-se relevante voltar a referir aqui esta proposta pois ela foi formulada em termos hidrogeológicos puros, considerando-se que é a disponibilidade de fluido hidromineral que efectivamente condiciona a quantidade de calor disponível nestes sistemas hidrominerais.

Foram adoptadas as seguintes categorias, que estendemos, agora, à generalidade dos recursos hidrominerais:

Recurso provado: a parte do recurso económico identificado por sondagens e por medidas directas do reservatório podendo ser explorado economicamente. De forma cautelar julgamos recomendável a utilização de um sub-domínio desta categoria que definimos como **recurso disponível:** parte do recurso provado cuja exploração é compatível e limitada pelo dimensionamento das captações existentes e por critérios de defesa ambiental. Corresponde ao caudal de exploração das captações, que é condicionado pelo dimensionamento das colunas de revestimento e ainda por critérios de defesa da qualidade química e microbiológica da água.

Recurso provável: a parte do recurso económico identificado por extrapolação geológica, geofísica e geoquímica de dados de sondagens. Consideramos nesta categoria os caudais totais que foram bombados, em ensaios de longa duração.

Recurso possível: a parte do recurso económico identificado por critérios geológicos e hidrogeológicos.

Com este critério foi feita a avaliação dos recursos geotérmicos do Maciço Antigo, ver artigo [24], Carvalho (1995). Foi verificado que os recursos disponíveis actualmente são altamente suficientes em cada pólo para suportar o nível de procura perspectivável, à excepção de Chaves e do pólo das Termas de S. Pedro do Sul, isto é, não considerando o Vau.

Em Portugal, a prática tem consagrado uma aproximação *step-by-step*, por avanços sucessivos, na qual o recurso disponível, tal como foi atrás definido, tem sido, passo a passo, ano a ano, aumentado em muitos locais. Trata-se, no fundo, de uma interpretação não sistemática, mas consistente, do método das extracções escalonadas crescentes de Albu *et al.* 1996.

Cabe aqui referir que a metodologia praticada, graças à monitoração qualitativa que tem sido imposta, vem apresentando resultados positivos. No entanto, nalgumas concessões de recursos de circuito hidrológico longo, poderemos legitimamente questionarmo-nos se os limites de exploração não ultrapassam já os critérios decorrentes da aplicação do método das extracções escalonadas crescentes. Se assim for, isto é, se as influências nas captações tradicionais forem irreversíveis e a sustentabilidade do recurso for posta em causa para as extracções praticadas, há que decidir estratégias de exploração de longo prazo. Neste domínio valerá a pena insistir na imprescindibilidade da monitoração sistemática das características físico-químicas do recurso e da evolução hidrodinâmica do reservatório, que aliás, tem sido prática corrente nos últimos anos.

Não será exigível aos concessionários que o investimento neste ramo do conhecimento avance muito para além do que as perspectivas de valorização económica das concessões permitem. Poderá, também, dizer-se que não foi a falta de conhecimento hidrogeológico a impedir, na generalidade dos casos, o desenvolvimento económico das concessões. De resto, pensamos que tem sido adequada a estratégia de avanços sucessivos, porventura não decidida *a priori*, mas eficaz, que tem sido levada a cabo na generalidade das concessões portuguesas.

Será legítimo dizer-se que, neste domínio, sob a tutela da Direcção Geral de Geologia e Minas primeiro, mais tarde do Instituto Geológico e Mineiro, e agora da Direcção Geral de Geologia e Energia, o trabalho realizado (e financiado pelos concessionários) nas concessões hidrominerais portuguesas pode ser considerado de notável. No entanto, o crescimento sustentável do nosso património hidromineral exige que se avance no conhecimento hidrogeológico das concessões, para além da gestão dos recursos disponíveis (na acepção acima proposta).

8.3 Área de Concessão e Perímetro de Protecção

De acordo com artigo 22º do Dec-Lei 86/90 de 16 de Março, a demarcação da área de concessão *“deverá ter a forma que permita o melhor aproveitamento do recurso, não excedendo a área razoável para esse fim”*. Desta forma é pacífico que a área de concessão deverá corresponder à zona terminal do circuito hidromineral onde for possível o seu aproveitamento. Muitas das concessões foram demarcadas no início do século XX. A evolução do conhecimento hidrogeológico mostra que muitas delas tem uma dimensão desajustada que haverá que adaptar paulatinamente. De facto não faz sentido manter servidões administrativas baseadas em pressupostos desactualizados.

Conforme estipula o n.º 1 do artigo 27º do Dec-Lei 86/90 de 16 de Março, o perímetro de protecção e as respectivas zonas, previstas no n.º 4 do artigo 12º do mesmo Dec-Lei, são fixados por portaria dos membros do Governo competentes, sob proposta do concessionário. Está também prevista a eventual constituição de um perímetro de protecção para água de nascente no n.º 4c) do artigo 12 do Dec-Lei 90/90.

No referido n.º 4 do artigo 12º do Dec-Lei 90/90 de 16 de Março, refere-se que *“nos casos de exploração de recursos hidrominerais, será fixado, com fundamento em estudo hidrogeológico, um perímetro de protecção para garantir a disponibilidade e características da água, bem como condições para uma boa exploração”*. Finalmente o n.º 1 do artigo 28º do Dec-lei 86/90 de 16 de Março refere que *“nas zonas imediata e intermédia do perímetro de protecção só o concessionário poderá proceder a trabalhos de prospecção e pesquisa, mediante prévia autorização do Ministro, devendo o respectivo requerimento ser entregue na Direcção-Geral, instruído com a necessária fundamentação técnica”*.

Na fixação do perímetro de protecção terá de atender-se às limitações que são impostas pela manutenção da composição físico-química e da qualidade microbiológica da água, à tipologia dos reservatórios geológicos, às variações temporais e espaciais do regime hidrológico e ao conhecimento do circuito hidromineral.

A actividade de proposta de definição de perímetros de protecção é, sem dúvida, cumulativamente, com a da elaboração do plano de exploração, a que mais dificuldade coloca ao Director Técnico de Exploração pela delicadeza e consequências das opções tomadas.

Os constrangimentos administrativos à utilização da terra ditados pela fixação de perímetros de protecção diminuem claramente o valor da propriedade, por isso não pode ser aceite uma definição destes perímetros com recurso a critérios tecnicamente pouco defensáveis no terreno, cientificamente incorrectos, ou fixados, na prática, quase aleatoriamente, de tal forma que podem empolar as tensões locais.

As metodologias utilizáveis são numerosas e podem ser, por exemplo, consultadas em Anon (1994) e Geta *et al.* (1996). Não nos deteremos na questão técnica que nos afastaria excessivamente do domínio desta dissertação, preferindo referir que o estabelecimento de perímetros de protecção pressupõe a consideração das questões seguintes (Custodio 1994):

- Como estabelecê-los tecnicamente sabendo que a forma dos perímetros depende: (i) do aquífero e seu estado; (ii) do caudal a extrair por meios mecânicos ou aproveitando, simplesmente, a pressão do aquífero; (iii) do efeito de outras captações; (iv) das interacções com outros aquíferos, eventualmente de outros domínios hídricos; e (v) das interacções com águas superficiais.
- Como aplicá-los no terreno e chegar a acordo com a população, proprietários, municípios e outros corpos administrativos e avaliar eventuais indemnizações.
- Como fazer respeitar os perímetros fixados para que sejam um instrumento eficaz no ordenamento do território.

O mundo real da definição dos perímetros de protecção em Portugal corresponde a centenas de milhar de furos (IAH 2005) sem qualquer projecto ou com projecto inadequado, com condições de construção deploráveis. Existem milhares e milhares de captações de que não se conhece qualquer dado. Este panorama decorre do clima em que a hidrogeologia, e a engenharia dos recursos

hídricos em geral, foi praticada a nível local com a displicência dos decisores e dos cidadãos.

Daí dever pensar-se que a fixação dos perímetros de protecção, para além de ter de atender a uma leitura correcta da lei, terá de ser executada com o maior rigor técnico possível, adaptada às condições sociais objectivas locais. As águas minerais naturais e as águas de nascente ocorrem frequentemente em áreas ecologicamente protegidas, nalguns casos em zonas da Reserva Ecológica Nacional (REN). Mobilizam, geralmente, caudais muito pequenos, abaixo das estimativas mais prudentes dos recursos estimados dos aquíferos. Nalguns desses aquíferos hidrominerais (ou outras zonas eventualmente existentes, disponíveis para a prospecção e com potencial para o fim em vista), será de encarar a possibilidade de criação de reservas naturais hidrogeológicas que viabilizem para o futuro a utilização controlada desses aquíferos.

Eles poderiam constituir reservas estratégicas de água de valor económico acrescentado, por via da elevada qualidade química e pureza microbiológica, para utilização nas indústrias do engarrafamento ou do termalismo.

O mercado nacional da água engarrafada, geralmente água subterrânea, tem condições para continuar em expansão. A qualidade ambiental ainda ocorrente nalgumas áreas do País permite, neste momento, perspectivar a sustentabilidade da indústria do termalismo e do embalamento de água, o que se pode revelar do maior valor ecológico e económico.

8.4 O papel do Director Técnico de Exploração

Sendo os recursos hidrominerais e os recursos geotérmicos bens dominiais, o Estado concessionaria a respectiva exploração a entidades privadas por períodos que, no actual quadro legislativo, alcançam noventa anos. É neste contexto que surge a figura do Director Técnico de Exploração, técnico responsável por todas as operações de exploração, gestão e protecção da concessão. Esta figura, de inegável importância no contexto legislativo actual, foi institucionalizada pelo Dec-Lei 86/90 e 87/90 de 16 de Março, mas já antes vinha a ser reclamada por autores como Cortez (1978, 1981). A figura de Director Técnico não está prevista no Dec-Lei 84/90 de 16 de Março referente às águas de nascente, mas vários

detentores de licenças de exploração destes recursos trabalham com consultores hidrogeológicos permanentes reconhecendo a sua importância na gestão deste recurso.

O desenvolvimento e a gestão dos recursos hidrominerais englobam numerosas actividades de carácter geológico, hidrogeológico, de controlo ambiental e ordenamento do território que são supervisionadas, a nível da concessão, pelo Director Técnico. Para além da actividade de gestão técnica corrente e prospectiva, o Director Técnico estabelece a ligação entre o concessionário e o Instituto Geológico e Mineiro e outros organismos públicos e privados. Entre as actividades que é necessário desenvolver contam-se a avaliação dos recursos hidrominerais, o eventual ajustamento da área de concessão, a condução da prospecção e pesquisa, a definição dos caudais de exploração, a elaboração do plano de exploração que é função dos caudais existentes, a proposta de definição do perímetro de protecção e a colaboração na negociação de contratos de prospecção e pesquisa de recursos adicionais de água mineral.

Para exercer cabalmente a sua função a nível da gestão técnico-económica o Director Técnico deve:

- (i) Conhecer o modelo conceptual do sistema hidromineral (zonas de recarga, mecanismos de circulação e descarga), interacções com outros aquíferos ou corpos de água superficial, recursos qualitativos e quantitativos e a vulnerabilidade e riscos de contaminação e poluição. O conhecimento do modelo conceptual deve ser exaustivo mas em termos práticos é limitado por dificuldades técnicas e económicas;
- (ii) Definir as estratégias e políticas de desenvolvimento, que, num dado estágio da exploração, são julgadas suficientes para o aproveitamento racional e económico do recurso;
- (iii) Avaliar os recursos da concessão ou do aquífero hidromineral e propor a fixação do caudal de exploração das captações. A maioria das concessões foi fixada em épocas nas quais o conhecimento sobre o modelo conceptual do recurso era incipiente. Por isso, algumas áreas são desajustadas e apenas nalgumas há sobreposição espacial completa entre recurso hidromineral e

concessão. Outras, de concessionários distintos, partilham o mesmo aquífero hidromineral. Deve ser incluída, também, a problemática da captação de água industrial para apoio às utilizações da água mineral, que, por vezes, em zonas com recursos renováveis pequenos e irregulares, constitui um problema complexo.

(iv) Impor metodologias e práticas de monitorização qualitativa e quantitativa; e,

(v) Estabelecer programas sistemáticos de desenvolvimento, de contingência e de protecção das captações e dos recursos, considerando os riscos naturais e antrópicos.

Um dos problemas mais sensíveis que o Director Técnico de Exploração encontra no exercício das suas funções em Portugal, é o de saber antecipar os problemas, mantendo elevados padrões de conhecimento técnico sobre a concessão, interessando simultaneamente os concessionários nessa actividade preventiva. Neste domínio, o papel do Director Técnico é insubstituível a avaliar a relação eficácia/custos de investimento e na selecção das técnicas e operadores mais adequados a cada caso.

Capítulo IV - Águas minerais e recursos geotérmicos

- [14] Vilarelho da Raia: um exemplo de prospecção e captação de água mineral gaso-carbónica no Maciço Hespérico. In: IV Congresso Nacional de Geologia, Porto. *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Univ. Porto, 1995, Vol. 4, pp 439-444.
- [15] Tectónica regional do sector de Caldas do Moledo-Granjão-Cidadelhe (Falha de Penacova-Régua-Verín, Norte de Portugal): implicações no controlo das emergências hidrominerais. *Comunicações Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 2001, Vol. 88, pp. 203-212.
- [16] The newly described 'Poço Quente' thermal spring (Granjão-Caldas do Moledo sector, N Portugal): hydrogeological and tectonic implications. *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 2001, Vol. 15 (1/2), pp. 49-64.
- [17] Geothermal fluids circulation at Caldas do Moledo area, Northern Portugal: geochemical and isotopic signatures. *Geofluids*, 2003, Vol. 3 (3), pp. 189-201.
- [18] Geothermal resources exploration in the hercynian basement, S. Pedro do Sul, Portugal. In: Geothermics'94 in Europe. *Document BRGM*, Orleans, 1994, Vol. 20, pp. 85-88.
- [19] O campo geotérmico de S. Pedro do Sul: situação actual e perspectivas. *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Univ. Porto, 1995, Vol. 4, pp. 857-862.
- [20] A Hidrogeologia das águas minerais naturais de Monfortinho. *Geonovas, Rev. Assoc. Portg. Geólogos*, Lisboa, 2001, Vol. 15, pp. 61-70.
- [21] Mineral water exploration and exploitation at the portuguese Hercynian Massif. *Environmental Geology*, 1996, Vol. 27, pp. 252-258.
- [22] Mineral and thermal water resources development in the portuguese Hercynian Massif. In: *Hydrogeology of Hard Rocks*, IAH, Oslo, 1993, Vol. 24 (Part 2), pp. 548-561.
- [23] Pólos geotérmicos de Trás-os-Montes: recursos e metodologias de desenvolvimento. *Anais da UTAD*, Vila Real, 1988, Vol. 2, pp 23-45.
- [24] Low temperature geothermal reservoirs in the Portuguese Hercynian Massif. *World Geothermal Congress*, Florence, 1995, Vol. 2, pp. 1343-1348.
- [25] Recursos geotérmicos de Portugal continental: da utopia à realidade. In: *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Univ. Porto, 1995, Vol. 4, pp 851-856.
- [26] Portugal country geothermal update. World Geothermal Congress. Antalya, Turkey, 2005, (Cd-Rom Edition).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Caminhante: não há caminho, o caminho faz-se ao caminhar...

António Machado

1. Generalidades

Os modelos preditivos de evolução dos recursos hídricos para os próximos cinquenta anos na Europa Ocidental, na perspectiva da “mudança global”, são quase unânimes em considerar que entraremos em período de escassez de recursos hídricos em Portugal (Santos *et al.* 2001). A seca de 2005 veio mais uma vez mostrar inexoravelmente as debilidades das nossas infraestruturas de gestão deste recurso vital.

A forma como se tem processado o ordenamento do território em Portugal — e tudo indica que não é previsível a alteração dessa tendência — não deixa margem para dúvidas que a população tenderá a concentrar-se cada vez mais nas grandes cidades e nos principais núcleos regionais. Os padrões de consumo continuarão a aumentar, pois os cidadãos exigirão ainda mais e melhor água, nas cidades e nos campos.

Os recursos hídricos das bacias hidrográficas do Norte da Península Ibérica serão, cada vez mais, um alvo apetecido para as necessidades crescentes e para a escassez que se perspectiva a Sul. Então, a utilização dos recursos hídricos terá cada vez mais de ser pensada em termos de um cenário de conservação da quantidade e qualidade. O custo da água no consumidor será mais elevado. Provavelmente alargar-se-á a utilização de redes duplas com águas de tipologias físico-químicas e bacteriológicas diferenciadas, de acordo com as utilizações.

A distribuição dos recursos e dos consumos exige que seja realizado o uso conjunto de todos os recursos hídricos, incluindo as águas subterrâneas, mesmo as do Maciço Antigo, apesar dos baixos caudais disponibilizáveis. Este uso conjunto manifesta-se no seguinte princípio básico: em períodos de excedentes hídricos, enquanto os aquíferos são alimentados naturalmente, devem usar-se águas superficiais; as águas subterrâneas, se disponíveis, serão consumidas, complementarmente em estiagem, quando as reservas superficiais chegam ao fim, ou apresentam má qualidade. O uso conjunto pode ter aplicação concreta, por exemplo, nas concentrações urbanas onde começa a ser encarado o uso das águas subterrâneas na rega de espaços verdes, em colaboração com a água dos efluentes das estações de tratamento de águas residuais.

A Directiva-Quadro da Água da União Europeia (Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho 2000/60/CE de 22 de Dezembro) consagra a água subterrânea como património de muito valor, com elevadas garantias de qualidade, se for adequadamente gerido. Em Portugal, no discurso oficial e na linha da referida Directiva-Quadro e da Lei nº 58/2005 de 29 de Dezembro (Lei da Água), a água subterrânea surge como recurso estratégico mas não é claro como se configura a sua utilização em termos práticos: se abandono progressivo, como parece ter sido o caso, se utilização controlada, como se impõe. O futuro da água subterrânea em Portugal vai depender claramente dos critérios de qualidade que os decisores e técnicos das Administrações de Regiões Hidrográficas (ARH), recentemente criadas pela já referida Lei 58/2005 de 22 de Dezembro, impuserem no terreno e do empenhamento da sociedade em geral na salvaguarda dos recursos hídricos.

É de esperar que os recursos geológicos, águas minerais naturais e águas de nascente, matéria-prima na indústria de embalamento de água, vejam a sua procura acrescida, atendendo à imagem de pureza original que transmitem ao consumidor e ao peso cada vez maior de hábitos urbanos no dia a dia dos cidadãos. O termalismo, baseado nas águas minerais naturais com vocação terapêutica, tenderá, igualmente, a aumentar a procura, ao mesmo tempo que alguns pequenos empreendimentos geotérmicos, o que incrementará a pressão sobre os aquíferos hidrominerais.

2. Problemas e desafios

Existe, há vários anos, um clima de descrédito em torno das águas subterrâneas, particularmente nas do Maciço Antigo. Este sentimento é muitas vezes resultado da inadequação do recurso em satisfazer as exigências da procura mas também da incapacidade dos actores do mundo das águas subterrâneas em fazer ouvir a sua voz junto dos decisores e poderes públicos.

Nem sempre é a modéstia das disponibilidades dos recursos, isto é, da oferta, a justificação para a subalternização das águas subterrâneas: há, também, o defraudar de muitas expectativas não cumpridas, isto é, a ausência objectiva de sustentabilidade de recursos incorrectamente avaliados. Nestes casos,

obviamente, não foram tidos em conta critérios coerentes de avaliação de caudais a longo prazo, incluindo secas. Isto é, nem sempre se fez “bem feito”.

A falência da capacidade de avaliação dos caudais de exploração sustentados em captações de água subterrânea (e nos aquíferos em que aquelas estão instaladas) atingiu aspectos dramáticos em 2005. Na maioria dos casos a resposta a este acontecimento que se repete amiúde, desta vez mais agravado, foi a habitual: fazer mais furos, nos locais do costume e pôr a funcionar outros que haviam sido considerados sem utilidade, porque substituídos por mega-sistemas abastecidos por águas superficiais. As simplificações que têm sido postas em prática sob pressões dos empreiteiros e do argumento falacioso, às vezes usado, que *“a hidrogeologia das rochas cristalinas é diferente”* tem constituído um verdadeiro desastre: para os recursos, para os utilizadores e para a imagem dos profissionais do sector.

No actual contexto, em que de forma generalizada o mercado não sente a necessidade de projectos de pesquisa e captação, nem acompanhamento técnico das obras, impõe-se repensar esta actividade, tentando impor verdadeiros critérios de qualidade e a creditação efectiva dos consultores e empreiteiros que intervêm no dia a dia deste ciclo produtivo. As boas práticas não são necessariamente menos interessantes economicamente que muitas das soluções que o dia a dia, infelizmente, está a consagrar. Há que ter em conta o custo final da água, a sustentabilidade do recurso, os valores ambientais e a necessidade de articulação entre águas subterrâneas e superficiais.

Os problemas que se colocam nos próximos anos, com reflexo nas águas subterrâneas do Maciço Antigo do Norte de Portugal, levam a que alguns desafios tenham de ser vencidos, nomeadamente:

- (i) Há necessidade de consciencializar os cidadãos para o uso da água, em todas as suas formas para que participem activamente no processo decisório e que se constituam em factores de mudança. Urge promover a educação ambiental dos cidadãos no sentido da abdicação de alguns hábitos, direitos e privilégios para que haja água potável para todos, numa perspectiva de sustentabilidade. A protecção das origens de água não se compadece com a apropriação antrópica das margens das albufeiras e dos

perímetros de protecção às captações para abastecimento público. Não poderá continuar a actual proliferação anárquica de “captações” para abastecimento rural e urbano, público e privado, sem controlo de qualidade, sem regulamentação, ao arrepio do mais elementar dever dos cidadãos que é o de deixar para usufruto das gerações futuras a água limpa que herdámos dos nossos avós. Impõe-se, assim, uma nova cultura da água, baseada na defesa dos valores ecológicos e não numa simples óptica do lucro, ou mesmo do uso consumptivo para satisfação das necessidades humanas. Por isso é urgente um novo paradigma na gestão dos recursos hídricos, não mais centrada na satisfação utilitarista das necessidades humanas, mas baseada na manutenção dos ecossistemas.

- (ii) Uma política de abastecimento de água potável baseada em grandes captações de águas superficiais e um dédalo de redes de adução chegando a todos os pontos do território, como a que nos parece ser proposta para o futuro, fornece água cara e não encoraja o desenvolvimento dos recursos hídricos locais, superficiais e subterrâneos. O modelo actual foi a fórmula fácil e confortável de resolver o problema dos níveis de atendimento. Porém, é possível manter pequenos e médios abastecimentos locais em funcionamento com água de boa qualidade, química e bacteriológica, desde que na sua gestão se interessem as comunidades locais e se avalie correctamente o potencial dos aquíferos numa perspectiva de exploração de longo prazo, em cenário de seca.
- (iii) A agricultura portuguesa, para acompanhar as medidas da Política Agrícola Comum (PAC), caminhou para esquemas de utilização intensiva do solo obrigando a grande disponibilização de água. Parece fazer sentido, nos modelos alternativos de desenvolvimento que terão de surgir, a aplicação das águas subterrâneas em escala moderada, no pequeno regadio, como foi feito no passado, em parte herança do nosso contacto com as tecnologias do mundo islâmico (Al-Hassan & Hill 1991).

3. Conclusões

A prospecção e a pesquisa de água subterrânea no Maciço Antigo do Norte e Centro de Portugal estão condicionadas por uma envolvente social e cultural, que importará referir, antes de serem apresentadas as conclusões a nível hidrogeológico resultantes das matérias aportadas e discutidas nesta dissertação. De facto, foi já anteriormente assinalado que o problema do desenvolvimento de recursos hídricos subterrâneos não é simplesmente uma questão técnica, assumindo contornos muito mais vastos que entram pelo domínio da Engenharia, da Economia, da Sociologia e do Ordenamento do Território (Linsley *et al.* 1992, Biswas 1996).

Existem na sociedade portuguesa conhecimento técnico-científico considerável e tecnologias actualizadas com os quais teria sido possível o desenvolvimento sustentável deste recurso. Para tanto bastaria consciência cívica, bom senso, utilizar os meios existentes e adoptar modelos de controlo e gestão há anos em vigor, com sucesso, noutros países.

A verdade é que o Estado e a sociedade civil se demitiram completamente das suas responsabilidades e hoje assiste-se à utilização incontrolada dos recursos de águas subterrâneas do País, que não apenas do Maciço Antigo, quer por parte de particulares, quer de autarquias. É particularmente deprimente a proliferação de captações abandonadas, realizadas em períodos de seca, repetindo-se o ciclo infernal, a intervalos mais ou menos regulares, sem que se retirem ilações das experiências anteriores. Os custos económicos, ambientais e sociais, associados a estas intervenções emocionais, são desproporcionados.

A prática da prospecção e da pesquisa, salvo louváveis excepções, nomeadamente no que concerne à actividade das termas e águas engarrafadas, é geralmente realizada a nível técnico baixo, considerando como único critério o custo imediatista de aquisição de serviços, sem que haja especificações exigentes que considerem o custo final da água ao longo do período de vida da captação.

O volume principal da informação tratada nesta dissertação resulta de trabalhos realizados no mundo empresarial, na prática hidrogeológica corrente. Decorrem da reflexão sobre os estudos e trabalhos aqui incluídos as conclusões seguintes:

(i) Não havendo bases de dados dos muitos milhares de obras de captação existentes, a análise da heterogeneidade à escala regional e local, não permite senão o estabelecimento de unidades hidrolíticas baseadas na cartografia disponível. Estas grandes unidades hidrogeológicas regionais servem para o planeamento do território, mas têm que ser usadas com prudência e com apoio técnico especializado, para a prospecção e pesquisa de água subterrânea à escala local.

(ii) Geralmente as unidades metassedimentares apresentam caudais de exploração sustentados, em captações do tipo furo vertical, mais elevados que os das rochas granitóides. Os caudais de exploração medianos em furos verticais, considerando os improdutivos, são respectivamente de 0,74 l/s nos metassedimentos quartzíticos; 0,5 l/s nas rochas metassedimentares e 0,02 l/s nos granitóides. As transmissividades medianas são de cerca de 4,0 m²/dia nos metassedimentos quartzíticos; 3,1 m²/dia nas rochas metassedimentares e 1,7 m²/dia nos granitóides. Esses caudais e transmissividades são semelhantes aos registados noutras regiões do Mundo, em rochas deste tipo. Os caudais de exploração variam, na mesma zona, com o tipo de obra (furos verticais, furos horizontais, poços, etc) e dependem da correcta conceptualização dos aquíferos e conseqüente projecto de captação.

(iii) Os recursos hídricos subterrâneos do Maciço Antigo do Norte e Centro de Portugal apresentam uma distribuição espacial e temporal muito irregular, que resulta da geologia, da geomorfologia e do clima. Os condicionalismos hidrogeológicos reflectem-se na incerteza da avaliação dos recursos subterrâneos renováveis. Estes foram estimados entre 3% da precipitação total (considerando cenários conservativos de luta contra seca) a 17% em zonas mais pluviosas e integrando todo o escoamento sub-aéreo, ainda que de curta duração. Foi proposta a utilização de um coeficiente infiltração generalizado de 10%. A recarga diminui para Sul e para Este, acompanhando a diminuição da precipitação e o acréscimo da temperatura.

(iv) A “capacidade de ingestão” dos aquíferos ocorrentes nas zonas estudadas é geralmente muito inferior à água disponível para a recarga. Em períodos de seca

prolongada verificam-se quebras brutais de produção resultantes das metodologias de exploração usadas e da baixa função capacitiva destas rochas.

(v) A utilização do designado Índice Metros Caudal (IMC), proposto pelo autor desta dissertação em 1993, permite avaliar custos da água, incluindo o risco geológico de insucesso, e a transmissividade mediana. O IMC corresponde à razão, numa dada área, entre o total de metros perfurados e o caudal total obtido. Foi definido, considerando intervenções em áreas de alguns km², que o inverso do IMC é aproximadamente igual à transmissividade mediana (ver detalhes no capítulo III). Considera-se que no actual estado das investigações as relações encontradas não são mais do que caminhos que precisarão de ser validados com critérios estatísticos mais robustos que os utilizados, mas admite-se que correspondam a uma via interessante, a custos baixos, para a regionalização da transmissividade e do caudal de exploração (*long-term well capacity*). A regionalização, nos simples moldes propostos, pode, inclusivamente cruzar barreiras litológicas, incorporando no resultado final os factores de favorabilidade concorrentes no caudal.

(vi) Foram determinadas relações empíricas para a avaliação da transmissividade (T) em função do caudal específico (Q_{esp}), e do tempo de bombagem (t) em furos de captação, tendo-se chegado a

$$T=0,72*Q_{esp}, \text{ para } t=6\text{horas; e,}$$

$$T=(0,1579L_n t + 0,5382)Q_{esp}.$$

Consideram-se estas relações adaptadas às condições e ao *modus operandi* português podendo revestir muita utilidade na avaliação de parâmetros hidrodinâmicos, em zonas de dados hidrogeológicos escassos. Uma das utilizações desta aproximação será, entre outras, nos problemas de definição dos perímetros de protecção de captações para abastecimento público.

(vii) A avaliação do caudal de exploração (*long-term well capacity*) de captações, usando critérios estritos de análise hidrodinâmica, promove a adequada gestão técnica e sociológica das necessidades e das expectativas. Para isso é necessário que a construção das captações siga as regras da arte, designadamente em termos de adaptação das obras ao modelo conceptual

hidrogeológico de cada local, e à realização e interpretação de ensaios de caudal.

(viii) A utilização sistemática da geofísica não parece aumentar decisivamente o valor absoluto dos caudais captados, mas diminui a taxa de insucesso. Ficou inequivocamente demonstrado o seu papel ímpar na elaboração de modelos conceptuais hidrogeológicos, ferramenta essencial para a prospecção e a pesquisa hidrogeológicas.

(ix) Em relação às águas minerais de ciclo longo (designadas nesta dissertação da Categoria I), e aos recursos geotérmicos, pode ter-se a visão de um domínio de intervenção “maduro” para a utilização de técnicas de prospecção e pesquisa mais sofisticadas que nas águas “normais”. Três razões concorrem para esse facto, a saber: (i) as exigências do órgão da tutela; (ii) a natureza peculiar dos recursos e dos circuitos hidrogeológicos que lhe estão associados; e, (iii) a própria natureza do mercado onde, aliás, operam grandes grupos internacionais e nacionais que dão o justo valor às investigações hidrogeológicas, ainda que numa óptica aplicada.

(x) No domínio da prospecção e pesquisa destes recursos geológicos (águas minerais e recursos geotérmicos) assiste-se a uma fase de viragem. Conforme foi realçado no capítulo IV, está a terminar o ciclo da prospecção táctica iniciado nos anos 70, do século passado, em que as captações foram realizadas junto aos pólos tradicionais e a profundidades moderadas, não ultrapassando geralmente 150 a 200 m de profundidade. O novo ciclo inclui a prospecção táctica a grande profundidade e a prospecção estratégica a distâncias consideráveis dos pólos actuais. O novo ciclo das captações na gama dos 400-600 m de profundidade, iniciado em S. Pedro do Sul em 1997, teve reflexos na Longroiva e Carvalhal e está agora na infância, pois os modelos conceptuais estabelecidos para alguns locais, incluindo estudos isotópicos e modelação geotermométrica, sugerem circulação a muitas centenas de metros.

(xi) As profundidades a alcançar nesta nova fase terão que ser ponderadas caso a caso pois, a par da legítima vontade da investigação científica, terá de atender-se às valias técnico-económicas dos resultados obtidos (mais água e mais temperatura) numa perspectiva industrial. A realização de furos a grande

profundidade nos pólos actuais apresenta algumas vantagens que militam em prol da sua realização, a saber: (i) risco de insucesso quantitativo relativamente baixo, apesar de serem previsíveis interferências nas captações mais superficiais; (ii) probabilidade significativa de aumento da temperatura da água; e, (ii) proximidade às estruturas de utilização actuais. Contudo, podem ocorrer alterações no quimismo típico das águas, baixos caudais ou mesmo temperaturas mais baixas, se as armadilhas hidrogeológicas produtivas não forem suficientemente importantes para serem detectadas, a partir da superfície, com meios indirectos de prospecção eficazes. Estas circunstâncias podem também ocorrer no caso de dimensionamento inadequado das captações. Neste caso justifica-se amplamente o recurso a técnicas de investigação geofísica a maior profundidade para diminuir o risco de insucesso. Será o caso da sísmica reflexão de alta definição, por exemplo.

(xii) A prospecção estratégica de fluidos hidrominerais e geotérmicos no Maciço Antigo pode corresponder a um grande desafio concreto para a hidrogeologia portuguesa e parece justificada, numa perspectiva de desenvolvimento regional, para crescimento dos actuais pólos, e eventualmente para a criação de outros, em áreas ecologicamente bem protegidas. Exigiria o envolvimento de tecnologia mais sofisticada no âmbito do paradigma das “*megabacias hidrogeológicas*” (Bisson & Lehr 2004). Poderia justificar-se, ainda, no âmbito de uma intervenção à escala ibérica incluindo a preparação de projectos do tipo ‘*Hot Wet Rock*’ (HWR), ‘*Hot Fractured Rock*’ (HFR) ou ‘*Enhanced Geothermal Systems*’ (EGS) (Tenzer 2001).

(xiii) Em relação às águas de nascente e águas minerais naturais de ciclo curto, classificadas nesta dissertação da Categoria II, é de esperar que algumas das tendências de desenvolvimento hidrogeológico atrás referidas se venham a manifestar no futuro, dadas as fragilidades de captação manifestadas nalguns pólos. Contudo, poderá recomendar-se alguma prudência, pois: (i) as transmissividades são geralmente baixas, embora seja conhecida fracturação profunda nalgumas áreas; e, (ii) são de prever variações no quimismo das águas, nomeadamente aumento nos teores de certos iões menores e vestigiários, que podem dificultar o aproveitamento económico na indústria.

4. Linhas metodológicas de investigação a promover

No âmbito desta dissertação, apesar dos avanços reportados, muito ficou por fazer. Parece legítimo, para além dos caminhos genéricos atrás enunciados, continuar o trabalho realizado com actividades de investigação adicionais que contribuiriam para o avanço do conhecimento hidrogeológico do Maciço Antigo do Centro e Norte de Portugal, para a eficácia da prospecção e pesquisa de água subterrânea e para o bem-estar das suas gentes, particularmente:

(i) Tentar melhorar o conhecimento sobre o comportamento hidrogeológico das estruturas geológicas à mega-escala e ao nível do afloramento. Os milhares de quilómetros de estruturas rodoviárias e ferroviárias construídas e a construir podem constituir um laboratório de campo precioso, bem como os relatórios da construção, se estiverem disponíveis e, reportarem, como devem, os locais de emergência de água. Por isso, os organismos e instituições do Estado que gerem essas obras deveriam ser estimulados a trocar informação com Universidades e Institutos de Investigação com competências em hidrogeologia aplicada, para essa informação ser extrapolada para além dos limites da geotecnia.

(ii) Na regionalização de dados tentar prosseguir os caminhos esboçados nesta dissertação, agora com apoio geoestatístico adequado, para confirmar ou infirmar as conclusões e particularizar pormenores nas áreas estudadas e alargá-las a outras.

(iii) Desenvolver e divulgar metodologias conjugadas de prospecção e pesquisa, adaptadas às rochas cristalinas, utilizando tecnologias de baixo custo disponíveis localmente.

(iv) Desenvolver meios expeditos para determinação local da transmissividade e do coeficiente de armazenamento em furos de pesquisa e captação para posterior avaliação do caudal de exploração sustentável (*long-term well capacity*).

(v) Utilizar na definição dos caudais de exploração sustentáveis (*long-term well capacity*), “novas” técnicas como a da derivada da transmissividade (Horne 1997) e mesmo modelos numéricos, em locais onde houver controlo adequado do modelo conceptual.

(vi) Acompanhar os progressos da aplicabilidade em rochas cristalinas, localizadas em zonas aplanadas, de furos de pesquisa e captação horizontais, sua operação e manutenção (Doesburg 2005).

(vii) Desenvolver metodologias de definição de perímetros de protecção recorrendo a aproximações inovadoras que tenham em conta a especificidade dos meios fissurados (*e.g.*, Carneiro 2004, 2005) e atendam à pressão e ao crescimento urbanístico à volta das estâncias termais.

(viii) Promover a aplicação de técnicas de interpretação de ensaios de caudal em águas minerais de ciclo longo (fluidos bifásicos água-gás) e o conhecimento dos efeitos da variação da densidade, no fluxo da água subterrânea (Simmons 2005). Esta linha é de particular interesse para as águas termominerais e águas minerais gasocarbónicas, mas pode ter aplicação a águas “normais”.

(ix) Em relação às águas minerais naturais de ciclo longo, promover a elaboração de modelos conceptuais integrados, incorporando a modelação isotópica, o fluxo e o transporte de massa e de calor, tentando simular o funcionamento global dos sistemas. Tentar-se-á, por esta via sistémica, perceber se a recarga nalgumas concessões hidrominerais e geotérmicas se faz apenas em altitude ou pode ter contribuição significativa das grandes linhas de água superficiais, considerando mecanismos de descarga outros que o simples escoamento gravítico.

(x) Acompanhar os progressos da teledeteccção e da fotogeologia, bem como da hidrogeologia extraterrestre (Hoffman 2005, Backer *et al.* 2005), que porventura ajudarão a resolver problemas de prospecção de água na “velha Terra”.

5. Uma nota reflexiva final

A água é “o problema” deste Século, e quiçá do Milénio, na “era da sede” que se aproxima. Pensar globalmente e agir localmente é a ideia força da defesa dos valores hidrogeológicos e ambientais aqui evocada. Sem água não há Humanidade. Adaptar este pensamento à prospecção e pesquisa de águas subterrâneas, e à sua conservação, deve ser a palavra de ordem. Esta perspectiva enquadra-se num dos temas cruciais de investigação do Plano Hidrológico Internacional promovido pela UNESCO, para o novo Milénio “Água e

Sociedade” (Aureli 2002). Será dedicada especial atenção à “Hidrologia das áreas montanhosas” e à “Hidrologia aplicada a áreas urbanas”, enfatizando o seu papel e impacto na recarga e circulação de águas superficiais e subterrâneas.

São necessárias medidas específicas para desenvolver e proteger as origens de água, particularmente a potável, mas urge também mobilizar a Sociedade, com acções concretas de terreno, para a utilização controlada das águas subterrâneas nomeadamente: (i) programas de extensão hidrogeológica e de formação técnica destinados aos decisores e utilizadores locais; (ii) programas destinados a construir abastecimentos modelo que se possam constituir em pólos disseminadores de práticas adequadas de exploração; e, (iii) programas de formação de técnicos à escala regional e local.

É indispensável, em nome do futuro, proteger os recursos hídricos subterrâneos, mas as acções a desencadear têm de começar no campo e pela formação dos seus actores. Contra os propagandeados méritos dos “efeitos de escala” atribuídos aos grandes sistemas de distribuição de água, é necessário contrapor o “*small is beautiful*” claramente associado às águas subterrâneas das rochas cristalinas. Desta forma, os caminhos indicados nesta dissertação inserem-se num novo paradigma da investigação e prática hidrogeológicas, preconizado por Smith & Marin (2005) orientado para as pessoas e contemplando os problemas sociais e ambientais.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Academia das Ciências de Lisboa (2001). *Dicionário da língua portuguesa contemporânea*. Vol. II. Editorial Verbo. 3809 pp.
- ACavaco – Sondagens e Fundações ACavaco Lda. (1978). Programa de pesquisa e eventual captação de água a realizar em Castelo de Vide. Tarefa 1 - Reconhecimento geral da zona e plano de pesquisa. Arquivo Unicer-Águas. Relatório inédito.
- ACavaco – Sondagens e Fundações ACavaco Lda. (1992). Prospecção geofísica em Sabroso e Romanas. Relatório Final. Vol 1. Arquivo Unicer-Águas. Relatório inédito.
- ACavaco – Sondagens e Fundações ACavaco Lda. (1997). Estudo geoelectrico em Melgaço. Obra 2885. Relatório final. Ref F.97022. *Arquivos*. Lisboa. Relatório inédito.
- ACavaco – Sondagens e Fundações ACavaco Lda. (1998). Execução de dois furos de pesquisa e eventual captação de água mineral em Melgaço. Obra nº 2904. Relatório Final Ref. 98014. *Arquivos*. Lisboa. Relatório inédito.
- Acciaiuoli L.M.C. (1952/53). *Le Portugal hydromineral*. Direction Générale des Mines et des Services Géologiques. 2 vol. Lisbonne. (I vol., 1952, 284 pp.; II Vol., 1953, 574 pp.).
- Afonso M.J. (1997). *Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 150 pp. + Vol. de Anexos. (Tese de Mestrado).
- Afonso M.J. (2003). Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal) *Cadernos Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, 28: 173-192.
- Afonso M.J., Chaminé H.I., Carvalho J.M., Marques J.M., Gomes A., Araújo M.A., Fonseca P.E., Teixeira J., Marques da Silva M.A. & Rocha F.T. (2005a). Urban groundwater resources: a case study of Porto City in north-west Portugal. Ken Howard (ed.), *Matthias Eiswirth Memorial Volume, International Association of Hydrogeologists Special Volume*. Balkema publishing (*in press*).
- Afonso M.J., Chaminé H.I., Gomes A., Teixeira J., Araújo M.A.; Fonseca P.E., Carvalho J.M., Marques J.M., Marques da Silva M.A. & Rocha F.T. (2004).

Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente*, Santiago de Compostela, 4: 20-32.

Afonso M.J., Espinha Marques J., Marques J.M., Carreira P., Carvalho J.M., Marques da Silva M., Samper J., Veiga B.P., Borges F.S., Rocha F.T., Fonseca P.E., Gomes A., Araújo M.A., Vieira G.T., Mora C., Teixeira J., Almeida P.G., Gonçalves J.A. & Chaminé H.I. (2005b). Hydrogeology of hard-rocks in the Portuguese Iberian Massif: Porto urban area and Serra da Estrela mountain region. In: Lopo Ferreira J.P. & Vieira J. (eds). *Proceedings The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources - Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, Univ. Minho, Guimarães, LNEC-IAHS (Cd-Rom edition).

AGI - American Geological Institute (1962). *Dictionary of geological terms*. American Geological Institute. Dolphin Books. 548 pp.

Aires-Barros L. & Marques J.M. (2000). Portugal country update. *Proceedings, World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*, pp. 39-44.

Aires-Barros L. (1971). *Alteração e alterabilidade de rochas ígneas*. Instituto Nacional de Investigação Científica, LNEC, Lisboa. 57 pp.

Aires-Barros L. (1978). Aproveitamentos geotérmicos. Considerações gerais. A exploração das altas e entalpias no território português. *Boletim de Minas. Direcção Geral de Geologia e Minas*. Lisboa, 15 (3/4): 143-155.

Aires-Barros L. (1979). Termometria geoquímica. Princípios gerais, aplicações geotérmicas a casos portugueses. *Com. Serv. Geol. Portugal*. Lisboa, 64: 103-132.

Aires-Barros L. (1991). *Alteração e alterabilidade de rochas*. Instituto Nacional de Investigação Científica, LNEC, Lisboa. 384 pp.

Albu M., Banks D. & Nash H. (1997). *Mineral and thermal groundwater resources*. Chapman & Hall. 447 pp.

- Alencão A.M.P. (1998). *Os recursos hídricos na Bacia hidrográfica do Rio Pinhão*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 331 pp. (Tese de doutoramento).
- Alencão A.M.P. (2004). Estimativa da recarga de aquíferos em Maciços fracturados pela análise de recessão de caudais de base das emergências naturais (Vila Real, Norte de Portugal). *APRH, Recursos Hídricos*, 25 (3): 77-84.
- Alencão A.M.P., Pacheco F.A.L. & Portugal Ferreira M. (2000). A bacia hidrográfica do rio Corgo (NE de Portugal). Escoamento subterrâneo e parâmetros influentes. In: Samper J., Leitão T., Fernández L. & Ribeiro L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones*. A Coruña. AIH-Grupo Español & APRH. ITGE, Madrid. pp.173-181.
- Al-Hassan A.Y. & Hill D.R. (1991). *Sciences et techniques en Islan. Une histoire illustrée*. Edifra/Unesco. 300 pp.
- Almeida A. & Almeida J. (1970). *Inventário hidrológico de Portugal*. Instituto de Hidrologia de Lisboa. 639 pp.
- Almeida C., Mendonça J.L., Duarte R.S., Quina A.P. & Neves J.R. (2000). Glossário de termos hidrogeológicos.
<http://snirh.inag.pt/hidrobiblioteca/site/biblionet.php> (consulta em 11-08-2004).
- Almeida C., Mendonça J.L., Jesus M.R. & Gomes A.J. (2000). *Sistemas aquíferos de Portugal Continental*. Instituto da Água/Centro de Geologia da Universidade de Lisboa. Lisboa, 3 Vol.
- Almeida O.T. (1998). Sobre a evolução da experiência no Portugal do século XVI : na pista do conceito de "Experiência a Madre das Cousas". *Actas do Quinto Congresso da Associação Internacional de Lusitanistas*. Oxford-Coimbra. pp. 1617-1625.
- Almeida P.G., Espinha Marques J., Fonseca P.E, Sodrê Borges F., Samper J., Carvalho J.M. Aires-Barros L., Cavaleiro V., Gomes A., Rocha F.T., Teixeira

- J., Afonso M.J. & Chaminé H.I. (2004). Utilização de sistemas de informação geográfica em estudos de rede de fracturação: aplicação à área de influência da falha da Vilarça (maciço da Serra da Estrela, Portugal central). In: Cardoso C. & Ribeiro Sousa L., coords., *Actas Prospecção e Caracterização de Maciços e Materiais Geotécnicos, 9º Congresso Nacional de Geotecnia*, Aveiro, Sociedade Portuguesa de Geotecnia/Universidade de Aveiro, 1: 339-348.
- Alte da Veiga N.M.S. (1999). *Recherche hydrogéologique par méthodes géophysiques en terrains granitiques*. Universidade de Lausanne. 311 pp. (Tese de doutoramento).
- Anon. (2001). *Forum energias renováveis em Portugal*. Relatório Síntese. ADENE/INETI. 32 pp.
- Antunes da Silva M. (2002). *Pesquisa e captação de água mineral em Melgaço*. In: Prospecção pesquisa e captação de águas minerais naturais recursos geotérmicos e águas de nascente, D.G.G.M., Lisboa. pp. 35-42.
- Antunes da Silva, M., 2004. Prospecção, pesquisa e captação de águas minerais na concessão hidromineral de Pedras Salgadas. 7º Congresso da Água. APRH. LNEC. Edição em Cd-rom.
- Assaad F.A., LaMoreaux P.E., Hughes T.H., Wangfang Z. & Jordan H. (2004). *Field methods for geologists and hydrogeologists*. Springer-Verlag. 420 pp.
- Astier J.L. (1971). *Géophysique appliqué à l'hydrogéologie*. Masson et Compagnie. 277 pp.
- Atkinson T.T. & Davidson R.M. (2002). In: Hiscock K.M., Rivet M.O. & Davidson R.M. (eds). Sustainable groundwater development. *Special Publications Geological Society London*, 193: 15-40.
- Atobrah K. (1985). On the relationships of flow in crystalline rock aquifers, a solution to the fracture problem. *International Association of Hydrogeologists Memoires*, 17 (Part 2): 612-621.
- Aureli A. (2002). What's ahead in UNESCO's International Hydrological Programme (IHP VI 2002-2007)?. *Hydrogeology Journal*, 10: 349-350.

- AWWA – American Water Works Association (1997). Standard for water wells. AWWA A100-97. 88 pp.
- AWWA– American Water Works Association (1958). Standard for deep wells. AWWA. New York. 51 pp.
- Backer R.V., Dohm J.M., Fairén A.G., Ferré T.P., Ferris J.F., Miyamoto H. & Schulze-MaKuch D. (2005). Extraterrestrial hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13: 51-68.
- Banks D., Rohr-Thorp E., & Skarphagen H. (1993). Groundwater resources in hard rock: experiences from the Hvaler Study, Southeastern Norway. In: Sheila & David Banks, eds, *International Association of Hydrogeologists Memoires*, Oslo, 24 (Part 1): 39-51.
- Baptista J. (1998). *Estudo neotectónico da zona de falha Penacova–Régua-Verin*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 280 pp. (Tese de doutoramento).
- Baptista J., Cabral J. & Ribeiro A. (1998). Seismotectonics of Chaves and Moledo mineral springs in Penacova-Régua-Verin Fault Zone. In: Azerêdo, A. C., coord., *Actas do V Congresso Nacional de Geologia. Comun. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 84 (1): D69–D72.
- Bar-Joseph J. (1985) Groundwater exploration in metamorphic rocks, Koolan and Cockatoo islands, Western Australia. *International Association of Hydrogeologists Memoires*, Tucson. 27 (Part 2): 807-807.
- Barros R.F. (1960). Nota sobre a geologia da região de Manteigas (Serra da Estrela). *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Lisboa*, 8, 2: 115-125.
- Begonha A. (2001). Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto. *Colecção monografias, FEUP Edições*, Porto, 2: 1-445.
- Bel F. & Zeryouhi I. (1982). Cent cinquante kilometres forés dans les roches fracturées du Maroc. Historique et résultats de dix années de prospection d'eau souterraine. In: Les Milieux Discontinus en Hydrogéologie. *Documents du B.R.G.M.*, 45: 63-65.

- Belitz K. (2001). Groundwater is alive and well-it just keeps shifting. *GroundWater*, 39(4): 481-481.
- Betz H.-D. (1997). Neue Ergebnisse der Rutengangerforschung. *Wetter-Boden-Mensch Zeitschrift für Geobiologie*, 5: 55-59.
- Betz H.-D., König H.L., Kulzer R., Trischler R. & Wagner, J. (1996). Dowsing reviewed: the effect persists. *Naturwissenschaften*, 83: 272-275.
- Bisson R. A. & Leher J.H. (2004). *Modern Groundwater exploration. Discovering new water resources in consolidated rocks using innovative hydrogeologic concepts, exploration, drilling, aquifer testing and management methods*. Wiley Interscience. 309 pp.
- Biswas A. (1991). Water for sustainable development in the 21st. Century. *Water Resources Development (December 1991)*: 219-224.
- Biswas A. (1996). *Water resources: Environmental planning, management and development*. McGraw Hill. 737 pp.
- Bitzer K., Travé A. & Carmona J.M. (2001). Fluid flow processes at basin scale. *Acta Geologica Hispanica*, Barcelona, 36 (1/2): 1-20.
- Brassington R. (1988). *Field hydrogeology*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Chichester, New York. 248 pp.
- Bredehoeft J.D. (2002). The water budget myth revisited: why hydrogeologists model. *Ground Water*, 40 (4): 340-345.
- Bredehoeft J.D. (2005). The conceptualization model problem: surprise. *Hydrogeology Journal*, 13 (1): 37-46.
- Brion M. & Lachaud J.C. (1982). Rôle de la géophysique par méthode électrique à la prospection des eaux souterraines en milieu fissuré. In : Les Milieux Discontinus en Hydrogéologie. *Documents du B.R.G.M.*, 45: 173-182.
- Brooks R.R. (1983). *Biological methods of prospecting for minerals*. John Wiley, New York, 322 pp.

- Brum Ferreira A. (1978). Planaltos e montanhas do Norte da Beira: estudo de geomorfologia. *Memórias do Centro Estudos de Geográficos*, Lisboa, 4: 1-374.
- Brum Ferreira A. (1980). Surfaces d'aplanissement et tectonique récente dans le Nord de la Beira (Portugal). *Revue Géologie Dynamique & Géographie Physique*, 22 (1): 51-62.
- Brum Ferreira D. (1981). Carte géomorphologique du Portugal. *Memórias do Centro Estudos de Geográficos*, Lisboa, 6: 1-54.
- Brum Ferreira A. (1991). Neotectonics in northern Portugal: a geomorphological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 82: 73-85.
- Bryan K. (1919). Classification of springs. *Journal of Geology*, 27: 552-561.
- Burgéap (1978). L'équipement des villages en puits et forages en fonction des conditions hydrogéologiques dans les états ACP d'Afrique. Commission des Communautés Européennes. Direction Générale du Développement. Paris. 177 pp.
- Burke J.A. & Moench M.H. (2000). Groundwater and Society: resources, tensions and Opportunities. In: Themes in groundwater management for the twenty-first century. ISET. United Nations Publication. 170 pp.
- Cabral J. & Ribeiro A. (1988). *Carta neotectónica de Portugal Continental, escala 1/100000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Cabral J. & Ribeiro A. (1989). *Nota explicativa da carta neotectónica de Portugal, escala 1/1000000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 10 pp.
- Cabral J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 31: 1-256.
- Calado C.M.A. (1991). *Atlas do Ambiente: Carta de Nascentes Minerais, escala 1/1000000*. Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, Direcção-Geral de Recursos Naturais. Lisboa.

- Calado C.M.A. (1995). *Notícia Explicativa da Carta de Nascentes Minerais do Atlas do Ambiente*. Direcção Geral do Ambiente e Recursos Naturais. Lisboa. 44 pp.
- Calado C.M.A. (2001). *A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico: quadro hidrogeológico e quimiogénese*. Universidade de Lisboa. 462 pp. (Tese de doutoramento).
- Calado C.M.A. (2003). Neotectónica e fluidos quentes de origem profunda no maciço Hespérico. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, Nº Esp. V (CD-Rom): D14-D17.
- Cameron J. (1959). Structure and origin of some Uranium-bearing veins in Portugal. Junta de Energia Nuclear (JEN). Technical paper, 22: 1-57.
- Cameron J. (1960). The ore controls of some Uranium vein deposits in Portugal. Junta de Energia Nuclear (JEN). Technical paper, 26: 1-63.
- Canto Machado M.J. (1988). O quimismo das águas sulfúreas portuguesas. *Estudos Notas e Trabalhos Serv. Fom. Min.*, Porto, 30: 37-51.
- Carn A. (1990). *Mise en valeur des ressources en eau du socle Breton*. Departement du Morbihan. BRGM Bretagne, Rennes. 33 pp.+anexos (Relatório inédito R31724BRE 4S/90).
- Carneiro J. (2004). Probabilistic delineation of ground water protection zones in fractured rock aquifers In: Krásný J., Hrkal Z. & Bruthans J., eds., Proceedings International Conference on Groundwater in fractured rocks, Prague. *IHP-VI, Series on Groundwater*, 7: 323-324.
- Carneiro J. (2005). *A study on new approaches for delineating groundwater protection zones in fractured rock aquifers*. University College, London. PhD Thesis. 311pp. (tese de doutoramento).
- Carvalho J.M. & Carvalho M.R. (2004). Recursos geotérmicos e seu aproveitamento em Portugal. *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 29: 97-118.
- Carvalho J.M. & Chaminé H.I. (2004). O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões

- de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 16 (in press).
- Carvalho J.M. & Costa L. (2002). Geotermia. In: Gonçalves H., Joyce A. & Silva L. (eds.). *Forum energias renováveis em Portugal: uma contribuição para os objectivos de política energética e ambiental*. Agência para a Energia / Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (ADENE/INETI). pp. 138-161.
- Carvalho J.M. & Duque J. (1982). Aquecimento por bomba de calor. *Revista Portuguesa do Frio*, Lisboa, pp. 33-40.
- Carvalho J.M. & Guedes J. (1978). Pesquisa de Águas Subterrâneas nas Aluviões do Lima. *Congresso da Ordem dos Engenheiros*, Porto, Tema 3, Comunicação 3.
- Carvalho J.M. & Mendonça J.L. (1980). Desenvolvimento e Protecção de Recursos Hidrominerais em Portugal. *Jornadas do Termalismo Português, Monfortinho*, ANIAM, Lisboa, pp. 311-324.
- Carvalho J.M. & Silva L. F. (1988). Pólos geotérmicos de Trás-os-Montes: recursos e metodologias de desenvolvimento. *Anais da UTAD, Vila Real*, 2: 23-45.
- Carvalho J.M. (1965). *A prospecção popular da água*. Instituto Mendes Correia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 27 pp. (Trabalho manuscrito inédito).
- Carvalho J.M. (1973). O Dimensionamento de captações de águas subterrâneas. *Memórias do Instituto de Investigação Científica de Moçambique*, Lourenço Marques, 9 (Série B): 145-176.
- Carvalho J.M. (1979). Contribuição para a prospecção e pesquisa hidrogeológica no Maciço Hespérico Português. *Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa*, 16: 305-326.
- Carvalho J.M. (1983). Captações profundas e protecção de águas minero-medicinais. *III Simposio de Hidrogeologia y Recursos Hidráulicos*, Asociación de Geólogos Españoles, Madrid, 9: 375-385.

- Carvalho J.M. (1984). A metodologia de prospecção e pesquisa de águas subterrâneas em formações cristalinas e cristalofilinas portuguesas. *Volume d'Homage au Géologue G. Zbyszewski, Éditions Recherche sur les Civilisations, Paris*. pp. 137-153.
- Carvalho J.M. (1988). Perspectives, prospectives et développements technologiques. *GigaStock - IIIèmes Journées Internationales de Géothermie Appliquée, Versailles, Relatório da Sessão 9, 3: 1011-1016*.
- Carvalho J.M. (1991). Sistemas de captação de água em rochas cristalinas. *1º Congresso da Água. A.P.R.H., 3: 111-131*.
- Carvalho, J.M. (1993a). Mineral and thermal water resources development in the Portuguese Hercynian Massif. Hydrogeology of Hard Rocks. *International Association of Hydrogeologists, IAH, Oslo, 24 (1): 548-561*.
- Carvalho J.M. (1993b). Ground water exploration in hard rocks for small scale irrigation in Trás-os-Montes, Portugal. Hydrogeology of Hard Rocks. *International Association of Hydrogeologists, IAH, Oslo, 24 (1): 1021-1030*.
- Carvalho J.M. (1993c). Recursos hidrotermais. O ponto de vista do Geólogo. *Anais da Universidade de Évora, 3: 91-98*.
- Carvalho J.M. (1994). Geothermal resources exploration in the Hercynian basement, S. Pedro do Sul, Portugal. *Geothermics' 94 in Europe. Document BRGM, Orleans, (20): 85-88*.
- Carvalho J.M. (1995a). Low temperature geothermal reservoirs in the Portuguese Hercynian Massif. *World Geothermal Congress, Florence. 2: 1343-1348*.
- Carvalho J.M. (1995b). Desenvolvimento de recursos hidrominerais no Maciço Hespérico. IV Congresso Nacional de Geologia. Resumos Alargados, *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Porto, 4: 445-450*.
- Carvalho J.M. (1995c). Recursos geotérmicos de Portugal continental: da utopia à realidade. IV Congresso Nacional de Geologia. Resumos Alargados, *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Porto, 4: 851-856*.

- Carvalho J.M. (1996a). Mineral water exploration and exploitation at the Portuguese Hercynian Massif, *Environmental Geology*, 27: 252-258.
- Carvalho J.M. (1996b). Portuguese geothermal operations: a review. *European Geologist, European Federation of Geologists Magazine*, 3-4: 21-26.
- Carvalho J.M. (1999). Águas subterrâneas e ordenamento do território. *Geonovas, Revista da Associação Portuguesa de Geólogos*, Porto, 13: 5-9.
- Carvalho J.M. (2000). Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: Samper J., Leitão T., Fernández L. & Ribeiro L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica'. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones*. A Coruña. AIH-Grupo Español & APRH. ITGE, Madrid. pp.163-172.
- Carvalho J.M. (2001a). As águas subterrâneas no abastecimento de núcleos urbanos no Norte de Portugal. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Ano XXI, 4 (1): 4-18.
- Carvalho J.M. (2001b). Perímetros de protecção a captações de águas subterrâneas para abastecimento público. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Ano XXI, 4 (2): 48-52.
- Carvalho J.M. (2002a). Captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas. *Tecnologia da Água*. Elsevier, Barcelona. Edição I, pp. 65-74.
- Carvalho J.M. (2002b). Desenvolvimento e gestão de recursos hidrominerais. In: Costa, L. (eds.). *Prospecção, pesquisa e captação de águas minerais naturais, recursos geotérmicos e águas de nascente*. Instituto Geológico e Mineiro. pp. 17-34.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I. & Plasencia N. (2003). Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do Norte de Portugal: implicações para o desenvolvimento regional. In: Portugal Ferreira M. (coord.), *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: recursos geológicos e formação*. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva, *Imprensa da Universidade, Série Investigação*, Coimbra. 2: 245-264.

- Carvalho J.M., Chaminé H.I., Afonso M.J., Espinha Marques J., Medeiros A., Garcia S., Gomes A., Teixeira J. & Fonseca P.E. (2005). Productivity and water cost in fissured-aquifers from the Iberian crystalline basement (Portugal): hydrogeological constraints. In: López-Geta J.A., Pulido Bosch A. & Baquero Úbeda J.C. (eds.). *Water, mining and environment Book Homage to Professor Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid, pp. 193-207.
- Carvalho J.M., Chaminé H.I., Afonso M.J., Espinha Marques J., Teixeira J., Cerqueira A., Coelho A., Gomes A. & Fonseca P.E. (2005). Prospecção hidrogeológica da área do sistema hidromineral das Caldas da Cavaca (Aguiar da Beira, Portugal Central): implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. In: F. Fernández Rubio (ed.), *Proceedings del I Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios*, Madrid, 13 pp. (in press)
- Carvalho J.M., Espinha Marques J., Afonso M.J., Chaminé H.I. (2005). O caudal de exploração em captações de água mineral natural e de nascente em rochas cristalinas do maciço antigo português. In: F. Fernández Rubio (ed.), *Proceedings del I Foro Ibérico sobre Aguas Envasadas y Balnearios*, Madrid, 12 pp. (in press)
- Carvalho J.M., Medeiros A.L. & Teixeira E. (1995). O campo Geotérmico de S. Pedro do Sul. Situação actual e perspectivas. IV Congresso Nacional de Geologia. Resumos Alargados, *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Porto, 4: 857-862.
- Carvalho J.M., Medeiros A.L.C. & Garcia S. (2004). Caracterização Hidrodinâmica da algumas áreas do Maciço Antigo Português. 7^o Congresso da Água, APRH. Edição em Cd-rom. Lisboa. pp. 1-16.
- Carvalho J.M., Monteiro da Silva J.M., Bicudo da Ponte C.A. & Cabeças R.M. (2005). Portugal country geothermal update. *World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, (Cd-Rom Edition).
- Carvalho J.M., Plasencia N., Chaminé H.I., Rodrigues B.C., Dias A.G. & Silva M.A. (2000). Recursos hídricos subterrâneos em formações cristalinas do Norte de Portugal. In: Samper J., Leitão T., Fernández L. & Ribeiro L. (eds.). *Jornadas Hispano-Lusas sobre 'Las Aguas Subterráneas en el Noroeste de*

- la Península Ibérica'. Textos de las Jornadas, Mesa Redonda y Comunicaciones.* A Coruña. AIH-Grupo Español & APRH. ITGE, Madrid. pp. 163-171.
- Carvalho J.M., Vieira da Silva M.A., Rodrigues B.C., Dias A.G. & Cabeleira M.M. (1995). Um Exemplo de prospecção e captação de água mineral gaso-carbónica no Maciço Hespérico. IV Congresso Nacional de Geologia. Resumos Alargados, *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico*, Porto, 4: 439-444.
- Castany G. & Berkloff E. (1970). Evaluation rapide des ressources en eaux d'une région. In: Simposio Internacional sobre Aguas Subterrâneas de Palermo. AIH, *Ente de Desarrollo Agrícola*, Palermo. pp. 462-682.
- Castany G. (1967). *Traité Pratique des Eaux Souterraines*. Dunod. 661 pp.
- Castany G. (1968). *Prospection et exploitation des eaux souterraines*. Dunod. Paris. 717 pp.
- Castany G. (1982). *Principes et Méthodes de l'Hydrogeologie*. Dunod Université. 238 pp.
- CEC (1988). Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. Comission of the European Communities. DGXII. Bruxelas. 74pp.+110 mapas.
- CFCFF—Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (1996). *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Research Council, National Academy Press. 568 pp.
- Chaminé H.I. (2000). *Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho–Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas*. Universidade do Porto. 497 pp, 2 anexos, 3 mapas. (Tese de doutoramento).
- Chaminé H.I., Carvalho J.M. & Fonseca P.E. (1999). O ramo oeste do carreamento de S. João-de-Ver: estudos de cartografia estrutural e de hidrogeologia no sector de Santiago de Riba-Ul-Oliveira de Azeméis (faixa metamórfica de Espinho–Albergaria-a-Velha, NW de Portugal). *GEOlogos, Rev. Dep. Geologia Univ. Porto*, 5: 57-65.

- Chaminé H.I., Gama Pereira L.C., Fonseca P.E., Noronha F. & Lemos de Sousa M.J. (2003). Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Coimbra–Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 28: 37-78.
- Chaminé H.I., Fonseca P.E., Carvalho J.M., Azevedo M., Gomes A., Teixeira J. (2004). Geometria, cinemática e dinâmica diapírica da morfoestrutura do Vimeiro (Torres Vedras, Portugal Central): implicações para um modelo hidrogeológico. *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 29: 9-30.
- Choffat P. (1907). Notice sur la carte hypsometrique du Portugal. *Comun. Serv. Geol. Portg*, 7: 1-23.
- Choffat P. (1917). La ligne de dépressions Régua–Verín et ses sources carbonatées. Remarques et considérations. *Comun. Serv. Geol. Portg*, 12: 35-69.
- CIEH (1984). Carte de potentialité des reSSources en eau souterraine de l’Afrique Occidentale et Centrale, échelle 1/5 000 000. Comité Inter africain d’Etudes Hydrauliques. Ouagoudugu. BRGM+ Geohydraulique.
- Clark F.W. (1924). *The data of geochemistry*. Chapter VI: mineral wells and springs, pp.181-217.
- Clark L. (1988). *The Field Guide to Water Wells and Boreholes*, The Geological Society of London. Handbook series. Open University Press. 154 pp.
- Coke C.J.M. (2000). Evolução geodinâmica do ramo Sul da Serra do Marão: um caso de deformação progressiva em orógenos transpressivos. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. 330 pp. (Tese de doutoramento).
- Compton R.R. (1985). *Geology in the field*. John Wiley & Sons, New York. 398 pp.
- Conde L.E.N. & Santarém Andrade R. (1976). Exemplos de aplicação geológica de imagens de teledetecção de Portugal. In: *Documento 18 do Seminário sobre detecção remota e sua aplicação ao estudo dos recursos naturais e às actividades do Homem*, Lisboa. 7 pp.

- Conde L.E.N. (1983). *Mapa de fracturas de Portugal (Memória Descritiva)*. EDP. 118 pp., 4 mapas à escala 1/500000. (Relatório inédito).
- Contreiras A. (1951). *Manual hidrológico de Portugal*. Edição da Empresa Nacional de Publicidade, Lisboa. 73 pp.
- Cooper H.H.J.R. & Jacob C.E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions American Geophysical Union*, 27: 526-34.
- Cortez J.A.S. (1978). Prospecção e pesquisa de águas minerais. Alguns exemplos de aplicação em Portugal. Jornadas do Termalismo Português. *Associação dos Industriais de Águas Minero-Medicinais e de Mesa*. pp. 63-71.
- Cortez J.A.S. (1981a). A direcção técnica dos aquíferos minerais. Jornadas do Termalismo Português. *Associação dos Industriais de Águas Minero-Medicinais e de Mesa*. pp. 143-144.
- Cortez J.A.S. (1981b). Um factor limitativo do crescimento das estâncias termais. *Associação dos Industriais de Águas Minero-Medicinais e de Mesa*. pp. 145-146.
- Costa A. (1936). No Minho. (In Expresso de 22 de Janeiro de 1983).
- Costa L.R. & Cruz J.A. (2000). Geotermia de baixa entalpia em Portugal, situação presente e perspectivas de evolução. *Boletim de Minas*, Lisboa, 37 (2): 83-89.
- Costa Pereira M.R. (1990). *Critérios para Selecção de Locais favoráveis à Ocorrência de Águas Subterrâneas em Rochas cristalinas na região de Trás-os-Montes Oriental*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 81 pp. (Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica).
- Cruz J. (2002). Reconhecimento e Prospecção Hidrogeológica. In: Prospecção pesquisa e captação de águas minerais naturais, recursos geotérmicos e águas de nascente. Comunicações apresentadas nas II Sessões Técnicas integradas nas comemorações dos 150 anos da criação da 1ª Comissão Geológica de Portugal, pp. 5-8.

- Cruz J.F.A. (2002). Engarraamento de águas minerais naturais e de nascente e termalismo em 2001. *Boletim de Minas*, Lisboa, 39 (2): 87-108.
- Curto Simões M.M. (1993). Águas Minerais Portuguesas: da sua caracterização físico-química ao esboço de uma classificação. *Boletim de Minas*. DGGM, 30: 13-26.
- Custódio E. & Gurgui A. (1989). *Groundwater economics*. Elsevier. 625 pp.
- Custódio E. & Llamas M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega, 2 vol., Barcelona. 2359 pp.
- Custódio E. (1994). Consideraciones sobre las áreas de protección de captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Seminário de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas: experiências em países europeus. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 7 pp.
- Custódio E. (2002). Aquifer overexploitation: what does it mean. *Hydrogeology Journal*, 10: 254-277.
- Custódio E. (2005). Intensive use of groundwater and sustainability, *GroundWater*, 43, 3: 291-291.
- Damáso A. (2003). *Ao encontro de Espinosa: as emoções sociais e a neurologia do sentir*. Publicações Europa-América. 379 pp.
- Darcy H. (1856). *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris. 674 pp.
- Daveau S. [coord.] (1985). Mapas climáticos de Portugal. Nevoeiro e nebulosidade. Contrastes térmicos. *Mem. Centr. Estud. Geogr.*, Lisboa, 7: 1-72.
- Davis S. N. & Wiest R. J. M. (1966). *Hydrogeology*. John Wiley & Sons. New York. 463 pp.
- Davis S.N. & Turk L.J. (1964). Optimum depth of wells in crystalline rocks. *GroundWater*, 2, 2: 6-11.
- Desmond M. & Pedretti C. (2000). *The Codex Leicester – Notebook of a genius*. Powerhouse Museum Publishing, Sidney. 168 pp.

- DGGM – Direcção Geral de Geologia e Minas (1990). *Recursos Geológicos*. Legislação. Lisboa. 326 pp.
- DGSB – Direcção Geral do Saneamento Básico (1952). Caderno de Encargos-Tipo para a execução de sondagens de pesquisa e captação de águas em regime de empreitada ou tarefa aprovado por despacho de S. Ex^a o Sub-Secretário de Estado das Obras Públicas de 1 de Março de 1952., Direcção Geral do Saneamento Básico. Lisboa, 17 pp. (Edição policopiada).
- Dias R. (1994). Regimes de deformação no autóctone da Zona Centro-Ibérica: importância para a compreensão do Arco Ibero-Armoricano. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 278 pp. (Tese de doutoramento).
- Dias G., Noronha F. & Ferreira N. (2000). Introduction. In: Dias G., Noronha F. & Ferreira N. (eds.), Variscan plutonism in the Central Iberian Zone, Northern Portugal, *Eurogranites'2000 Field Meeting Guide Book*, UM/FCUP/IGM. pp. 7-26.
- Dias J.M.M., Figueiredo F.P.O., Morais M.J.F., Portugal Ferreira M.R. & Senos Matias M.J. (2000). Upgrading of discharge rates using geophysical and structural analysis: Sangemil spa (central Portugal). In: *Proceedings, 6th Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Bochum, Germany, P-HY01, 4 pp.
- Diop S. & Rekacewicz P. (2003). *Atlas Mondial de l'eau. Une pénurie annoncée*. Autrement. 63 pp.
- DNEMT - Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales (1995). Le suivi du forage d'eau minérale. Approche methodologique. Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales (DNEMT). BRGM. Note technique n^o 3. 17 pp.
- Doesburg J. (2005). Operating and maintaining horizontal wells. *Water Well Journal*, Vol 59 (12): 40-42.
- Domenico P.A. & Schwartz F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons. 824 pp.
- Driscoll F.G. (1986). *Groundwater and Wells*. Johnson Division. 1089 pp.

- Drogue C., LeLong F., Marsily G. & Pointet T. (1987). Réflexions sur quelques problèmes liés à la quantification de la ressource en eau exploitable en aquifères fissurés. *Hydrogeologie*, 3: 185-194.
- Ellis A.J. (1917). The divining rod; a history of water witching. United States Geological Survey, Government Printing Office, Washington, D. C Water-Supply Paper, 416: 1-59.
- Enright J.T. (1995). Water dowsing: The Scheunen experiments. *Naturwissenschaften*, 82: 360-369.
- Enright J.T. (1996). Dowsers lost in a barn. *Naturwissenschaften*, 83: 275-277.
- Enright J.T. (2004). Testing dowsing. The failure of the Munich experiments. (<http://csicop.org/si/9901/dowsing.html>, em 11-08-2004).
- ERHSA (2003). Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo. Comissão de Coordenação Regional do Alentejo. Edição em Cd-rom.
- Espinha Marques J. (2001). *Estudo de sistemas hidrominerais: o caso de Caldas do Moledo*. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 143 pp., 5 anexos. (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica).
- Espinha Marques J., Chaminé H.I., Carvalho J.M. & Borges F.S. (2001a). Tectónica regional do sector de Caldas do Moledo–Granjão–Cidadelhe (Falha de Penacova–Régua–Verín, N de Portugal): implicações no controlo das emergências hidrominerais. *Comun. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 88: 203-212.
- Espinha Marques J., Marques J.M., Chaminé H.I., Graça R.C., Carvalho J.M., Aires-Barros L. & Borges F.S. (2001b). The newly described ‘Poço Quente’ thermal spring (Granjão–Caldas do Moledo sector, N Portugal): hydrogeological and tectonic implications. *Geociências, Aveiro*, 15: 19-35.
- Espinha Marques J., Carvalho J. M. & Borges F. S. (2004). Estudo do sistema hidromineral de Caldas da Cavaca. Centro de Geologia da Universidade do Porto. 49 pp (relatório inédito).
- Farías P., Gallastegui G., Gonzalez-Lodeiro F., Marquínez J., Martín Parra L. M., Martínez Catálan J.R., Pablo Macia J.G. & Rodríguez Fernández L.R.

- (1987). Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafía y estructura de Galicia Central. *Mem. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto*, 1: 411-431.
- Feitosa F.A.C. & Manuel Filho J. (2000). *Hidrogeologia. Conceitos e Aplicações*. CPRM/REFO. Fortaleza. 391 pp.
- Ferreira Gomes L.M., Afonso de Albuquerque F.J. & Fresco H. (2001). Protection areas of the S. Pedro do Sul spa, Portugal. *Engineering Geology*, 60: 341-349.
- Ferreira N., Iglésias M., Noronha F., Pereira E., Ribeiro A. & Ribeiro M.L. (1987). Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Bea F., Carnicero A., Gonzalo J.C., López Plaza M. & Rodríguez Alonso M.D. (eds.), *Geología de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico (Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola)*. Editorial Rueda, Madrid, pp. 37-51.
- Ferreiro M.B.V. & Bartolomé F.A. (1996). *Vocabulari d'hidrologia subterrània*. Fundació Centro Internacional de Hidrologia Subterrànea. 129 pp.
- Ferrer M. & González de Vallejo L. [eds.] (1999). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Publicaciones ITGE, Madrid. 81 pp, 41 fotografías.
- Fetter C.W. (2001). *Applied hydrogeology*. Fourth Edition, New Jersey, College Publishing Company. 598 pp.
- Fitts C.R. (2002). *Groundwater Science*. Academic Press. 450 pp.
- Freire de Andrade C. (1937). *Os vales submarinos portugueses e o diastrofismo das Berlengas e da Estremadura*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 236 pp.
- Gama Pereira L.C. (1987). Tipologia e evolução da sutura entre a Zona Centro Ibérica e a Zona Ossa Morena no sector entre Alvaiázere e Figueiró dos Vinhos (Portugal Central), 331 pp. Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. (Tese de doutoramento).
- Gama Pereira L. C. (1998). A faixa de cisalhamento Porto–Tomar, no sector entre o Espinhal e Alvaiázere (Portugal Central). In: Chaminé H.I., Dias

- A.G., Ribeiro M.A. & Borges F.S. (Coords), 4ª Conferência Anual GGET'98. *Geólogos*, Rev. Dep. Geol. Univ. Porto, 2: 23-27.
- GeoAmbiente (1991). *Estudo Hidrogeológico da Concessão de Água Mineral Natural de Alardo*. Arquivo da Empresa das Águas do Alardo, Lda.
- GeoAmbiente (1992). *Relatório Final do Estudo Hidrogeológico da Concessão de Água Mineral Natural de Alardo (Castelo Novo-Fundão)*. Arquivo da Empresa das Águas do Alardo, Lda.
- Geoprisma (1994). Estudo hidrogeológico e geofísico realizado nos terrenos da Etanor. Arquivo Etanor-Penha. 15 pp. (Relatório Inédito).
- Geosurveys (2000). *Estudo de prospecção geoelectrica para caracterização litológica e estrutural (Silvares de S. Martinho, Fafe)*. Relatório N° 30, GeoSurveys, Consultores em Geofísica, Lda., Arquivo Etanor-Penha. Lisboa. 28 pp. (Relatório inédito).
- Geosurveys (2003). Estudo de prospecção geoelectrica para caracterização litológica e definição de localização para captação de água. Arquivo Etanor-Penha. (Relatório Inédito).
- Geta J.A.L., Navarrete C.M., Merino L.M., Martinez P.N. & Rodriguez-Caro J.B. (1996). *Guia para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales*. ITGE. 104 pp.
- Gil M.H., Alvaréz F.M. & Carvalho J.M. (2000). Aplicación de las calicatas de bloques para la captación de aguas en una zona granítica. In: Medina A., Carrera J. & Vives L. (eds.), *Las caras del agua subterránea*, ITGE, 2, pp. 815-819.
- Girão A.A. (1960). *Geografia de Portugal*. 3ª Edição. Portucalense Editora, Porto. 510 pp.
- Gomes A. & Chaminé H.I. (2005). Cartografia geológica e geomorfológica para a caracterização de riscos naturais à escala do planeamento regional: aplicação ao concelho de Castelo de Paiva (NW de Portugal). *Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente*, Univ. de Santiago de Compostela (*in press*).

- Gonçalves F. (1971). Subsídios para o conhecimento geológico do Nordeste Alentejano. *Memórias Serv. Geol. Portg.*, Lisboa, 18, 62 pp.
- Gonçalves F. & Carvalhosa A. (1994). O Proterozóico da Zona de Ossa Morena no Alentejo. Síntese e actualização de conhecimentos. *Memórias Academia Ciências de Lisboa*, Classe de Ciências, 34: 141-173.
- Gonçalves H., Joyce A., & Silva L. Eds (2002). *Uma contribuição para os objectivos de política energética e ambiental*. ADENE/INETI. Lisboa. 211 pp.
- Gonçalves Henriques A. (1985). *Avaliação dos Recursos Hídricos de Portugal Continental. Contribuição para o ordenamento do território*. Instituto de Estudos para o Desenvolvimento, Caderno 9, Lisboa, 151 pp.
- González de Vallejo L.I., Ferrer M., Ortuño L. & Oteo C. [coords.] (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- Gonzalez-Yelamos J., Herraiez I. & Villarroya F. (1992). *Importancia social de las aguas subterráneas en materiales de baja permeabilidad: rocas metamórficas y plutónicas en la vertiente meridional de la Sierra de Guadarrama (provincias de Madrid y Guadalajara)*. Comunicaciones del V Simposio de Hidrogeología, Vol. XV, Asociación Española de Hidrología Subterránea (Grupo de Trabajo de Hidrogeología), Alicante, España, pp. 163-176.
- Green, M. & Green T. (1994). *The good water guide*. The world's best bottled waters. Rosendale Press. 200 pp.
- Grillot J.C. & Drogue C. (1986). Hydrothermalisme et tectonique cassante dans les granites hercyniens du Nord-Ouest Portugal. *Bull. Soc. Géol. France* (8), t.II, 4: 653-660.
- Grillot J.C., Bousquet J.C., Philip H. & Dazy J. (1983). Hydrothermalisme carbogazeux, radioactivité et sismotectonique actuelle : exemple du Languedoc-Roussillon (France). *Hydrogeologie et Géologie de l'Ingénieur*. BRGM (4): 133-320.
- GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes.

- Quarterly Journal of Engineering Geology*, Geological Society, 28 (3): 207-242.
- Gunter W.D. & Bachu S. (2001). Geological Storage of Carbon Dioxide of Sedimentary Basins. Conference Proceedings – Climate Change 2. Canadian Technology Development Conference. 15 pp.
- Gustafson G. & Krasny J. (1993). Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. Hydrogeology of Hard Rocks. *International Association of Hydrogeologists, IAH*, Oslo, 24 (1): 3-20.
- Gustafson G. & Krasny J. (1994). Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Applied Hydrogeology*, Hannover, 2: 64-75.
- Hamill L. & Bell F.G. (1986). *Groundwater Resource Development*. Butterworths. 344 pp.
- Handy M.R., Mulch A., Rosenau M. & Rosenberg C.L. (2001). The role of fault zones and melts as agents of weakening, hardening and differentiation of the continental crust: a synthesis. In: Holdsworth R.E., Strachan R.A., Magloughlin J.F. & Knipe R.J. (eds), The nature and tectonic significance of fault zone weakening. *Geol Soc. London Spec. Pub.*, 186: 305-332.
- Harlan R.L., Kolm K.E. & Gutentag E.D. (1989). *Water Well Design and Construction. Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier. 205 pp.
- Haven H.L., Boer H.A., Hopstaken C.F.A.M. & Vriend S.P. (1985). Geochemical studies in the drainage basin of the Rio Vouga (Portugal). General hydrogeochemistry from its origin to the Ria de Aveiro. *Chemical Geology*, 51: 225-238.
- Herculano de Carvalho A., Almeida J.D. & Reis E.M. (1961). *Guia de Análise Química das águas (potáveis, minerais e para a indústria)*. Associação dos Estudantes do IST, Lisboa. 162 pp.
- Hidroprojecto, ACavaco & TAHAL (1987). *Estudo de Viabilidade de Rega do Vale de Chaves e Seus Vales Secundários*. Direcção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes. Arquivo ACavaco. (Relatório inédito).
- Hidroprojecto, ACavaco & TAHAL (1988). *Estudo de Viabilidade de Rega do Vale de Chaves e Seus Vales Secundários. Apêndice I.3.4 - Modelação*

- Numérica do Sistema Hidrogeológico do Vale de Chaves*. Direcção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes. Arquivo ACavaco. (Relatório inédito).
- Hidroprojecto, ACavaco & TAHAL (1989). *Estudo de Viabilidade de Rega do Vale de Chaves e Seus Vales Secundários e Prospecção de Águas Subterrâneas em algumas zonas de Trás-os-Montes*. Memória Geral. Direcção Regional de Agricultura de Trás-os-Montes. Arquivo ACavaco. (Relatório inédito).
- Hidrorumo (1997). Empreendimento de Venda Nova II – Reforço de Potência de Venda Nova – Projecto Base. Vol I: 6-9.
- Hidrorumo (2000). *Plano de Bacia Hidrográfica*. Hidrorumo – Projecto e Gestão, SA (Grupo EDP). [Relatórios inéditos de recursos hídricos subterrâneos e de caracterização do meio biofísico, no âmbito dos Planos de Bacia Hidrográfica dos Rios Lima, Cávado, Ave, Leça e Douro, para o INAG].
- Higueras-Gil M., Merchán Alvarez F. & Carvalho J.M. (2001). *Aplicación de las calicatas de bloques para la captación de aguas minerales en una zona granítica*. In: Medina A., Carrera J. & Vives L. (eds.), *Las caras del agua subterránea*. IGME, 2: 815-819.
- Hiscock K.M., Rivet M.O. & Davison R.M. (ed.) (2002). *Sustainable Groundwater Development*. Geological Society. London. Special Publication, 193. 352 pp.
- Hoffman J. (2005). The future of satellite remote sensing in hydrogeology, *Journal of Hydrogeology*, 13: 247-250.
- Horne R.N. (1997). *Modern well test analysis: a computer-aided approach*. Published by Petroway, Palo Alto, CA. 306 pp.
- IA – Instituto do Ambiente (1974). *Atlas do Ambiente, Carta 1.2 - Temperatura média diária do ar, versão digital*. (<http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp>).
- IA – Instituto do Ambiente (1974). *Atlas do Ambiente, Carta 1.4.1 – Precipitação anual média, versão digital*. (<http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp>).

- IAEG – International Association Engineering Geology (1981a). Recommended symbols for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24: 227-234.
- IAEG – International Association Engineering Geology (1981b). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG*, 24: 235-274.
- IAEG – International Association Engineering Geology (2005). Special purpose mapping for waste disposal sites. *Bulletin IAEG*, 64: 1-54.
- IAH – International Association of Hydrogeologists (2005). News and Information issue D20. 12 pp.
- IGM - Instituto Geológico e Mineiro (1998). *Recursos geotérmicos em Portugal Continental: baixa entalpia*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 23 pp.
- IM – Instituto de Meteorologia (2005). Perfil climático. (http://web.meteo.pt/resources/im/pdfs/clim_ac_00_00.pdf em 22/08/2005).
- INAG – Instituto da Água (1997). *Definição, caracterização e cartografia dos Sistemas aquíferos de Portugal continental*. Direcção dos serviços de Recursos Hídricos. Divisão de Recursos Subterrâneos. 236 pp.
- Ingebritsen S.E. & Manning C.E. (1999). Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust. *Geology*, 27, 12: 1107-1110.
- Ingebritsen S.E. & Sanford W.E. (1998). *Groundwater in geologic processes*. Cambridge University Press, New York, 341 pp.
- Insua Pereira, D. (1997). *Sedimentologia e Estratigrafia do Cenozóico de Trás-os-Montes oriental (NE Portugal)*. Universidade do Minho, 341 pp. (Tese de doutoramento).
- ISRM – International Society of Rock Mechanics (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15, 6: 319-368.
- ISRM – International Society of Rock Mechanics (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.

- JEN—Junta de Energia Nuclear (1968). A província uranífera do Centro de Portugal: suas características estruturais, tectónicas e metalogénicas. 131 pp, 1 mapa (Carta Geotectónica, região das Beiras-Portugal, escala 1/250 000).
- Jenkins D.N. & Prentice J.K. (1982). Theory for aquifer test analysis in fractured rocks under linear (non radial) flow conditions. *GroundWater*, 20 (1): 12-21.
- Julivert M., Fontboté J.M., Ribeiro A. & Conde L.E.N. (1974). *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares, Escala 1:1000.000*. Memoria Explicativa, 113 pp. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Kellaway G.A. (2001). Environmental factors and the development of Bath Spa, England. In: Lamoreaux P.E. & Tanner J.T. (eds.). *Spring and Bottled Waters of the World*. Springer, pp. 242-255.
- Kendy E. (2003). The false promise of sustainable pumping rates. *GroundWater*, 41, 1: 2-4.
- Kessler H. (1965). Water Balance Investigations in Karstic Regions in Hungary. Simposio de Rochas Fracturadas. Duvro-nik, AIHC, UNESCO, Vol 1, pp. 91-105.
- Kingdom Drilling (2004). Entrapment Process of Oil and Gas. (<http://www.kingdomdrilling.co.uk/diggin.htm>, em 19-08-2004). 10 pp.
- Klimentov P.P. (1983). *General Hydrogeology*. MIR Publishers. Moscovo. 240 pp.
- Krásny J. (1993). Classification of Transmissivity: magnitude and variation. *Groundwater*, 31 (2): 230-236.
- Krásny J. (1999). Hard-rock hydrogeology in the Czech Republic. *Hydrogeologie*, 2: 25-38.
- Krásny J. (2002). *Understanding hydrogeological environments as a prerequisite for predicting technogenic changes in groundwater systems*. In: Howard K.W.F. & Israfirov R.G., (eds), *Current Problems of Hydrogeology in Urban Areas, Urban Agglomerates and Industrial Centres*. Kluwer Academic Publishers. pp. 381-398.

- Kriz H. (1973). Processing of results of observations of spring discharge. *Groundwater*, 11(5): 3-14.
- Laimé M. (2003). *Le dossier de l'eau. Penurie, Pollution, Corruption*. Seuil. 402 pp.
- LaMoreaux P.E. (2001). Famous Springs and Bottled waters. In: Lamoreaux P.E. & Tanner J.T. (eds.). *Spring and Bottled Waters of the World*. Springer, pp.135-141.
- Langguth H.R. (1984). *List of therms of Hydrogeology, geochemistry and geothermals of Mineral and Thermal Waters*. International Contributions to Hydrogeology, Vol 3. Heise. 91 pp.
- Larsson I. (1984). *Groundwater in hard rocks. Studies and reports in hydrology*. Unesco, Paris, 33: 1-228.
- Lauga R. (1990). *Pratique du Forage d'Eau*. Seesam Édition, Paris. 558 pp.
- Lee C.H. (1915). The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type. *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 78: 148-151.
- Legrand H.E. (1954). *Geology and groundwater in the Statesville Area. North Caroline*. Division of Mineral Resources Bulletin, Dep. of Conservation and Development, 68 pp.
- Legrand H.E. (1967). *Groundwater of the Piedmont and Blue Ridge Provinces of the Southeastern States*. U. S. Geological Survey. Circular 538, 11 pp.
- Leinz V. & Mendes J.C. (1963). *Vocabulário Geológico*. Iniciação Científica Vol. 26. Companhia Editora Nacional. São Paulo. 200 pp.
- Lello Universal (1980). *Dicionário Enciclopédico*. Vol. segundo. Porto. 1228 pp.
- Lemos L. S., Moreira A.D., Nolasco M.C., Pires M.R. & Sousa P.Q. (1992). Contribuição para a investigação do campo geotérmico de S. Pedro do Sul. *Estudos Notas e Trabalhos, DGGM*, 34: 107-138.
- Lima A.S. (2001). *Hidrogeologia de Terrenos Graníticos. Minho-Portugal*. Universidade do Minho, Braga. 451 pp. (Tese de doutoramento).

- Lindal B. (1973). Industrial and other applications of Geothermal Energy. In: Armstead H.C.H. (ed.), *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris. 146 pp.
- Linsley R.K., Franzini J.B., Freyberg D.L. & Tchobanoglous G. (1992). *Water Resources Engineering*. McGraw-Hill. 843 pp.
- Lloyd J.W. (1999). Water resources of hard-rock aquifers in arid and semi-arid zones. *Studies and Reports in Hydrology*, Unesco, Paris, 58: 1-284.
- Logan J. (1964). Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. *Groundwater*, 2: 35-37.
- Lohman S.W. (1972). *Groundwater hydraulics*. US Geol Survey. Washington. Proof paper 708.
- Lopes Alves J.M.M. (1998). Empreendimento de Venda Nova II. Reforço de potência do Aproveitamento hidroeléctrico de Venda Nova. *APRH. Recursos Hídricos*, 19:17-24.
- Lopes L., Paiva C., Paulino E., Pinto F., Campos H.M., Nemésio J., Salgado Zenha J.H., Pires J.M., Sá P., Moura J.S. & Lopes S. (2004). *Abastecimento de Água em Portugal – O mercado e os preços*. Comissão especializada de legislação e Economia. APDA. Lisboa. 113 pp.
- López-Camacho B. (2000). Valoración de las aguas subterráneas en los abastecimientos urbanos. In: Fernández Rubio R., Fernández Sánchez J.A., López Camacho B. & Lopez Geta J.A. (eds.), *Jornadas Técnicas Sobre Aguas Subterráneas y Abastecimiento Urbano*. Club del Agua Subterránea, ITGE, Madrid, pp. 281-296.
- Lotze F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta Geotekt Forsch, 6: 78-92.
- Ludwig D., Hilborn R. & Walters C. (1993). Uncertainty, resource exploitation and conservation: lessons from history. *Science*, 260: 17-18.
- Lund J.W. (2001). Geothermal Heat Pumps-an Overview. *GeoHeatCenter Bulletin*, 22(1): 1-2.
- Lvovich M.I. (1979). *World water resources and their future*. Washington D. C. American Geophysical Union. 415 pp.

- Maccurdy E. (1955). *The notebooks of Leonardo da Vinci*, arranged and rendered in English. George Braziller. 80 pp.
- Machado Lima J.F., Carvalho J.M. & Guedes J. (1985). Captação de água em formações graníticas da área do Porto. *Bol. Soc. Geol. Portugal*, Lisboa, 24: 305-312.
- Maia R. & Vlachos E. (2001). *Implementing Transboundary River conventions with emphasis on the Portuguese-Spanish case: challenges and opportunities*. Faculty of Engineering Porto University and Colorado State University. Luso American Development Foundation. 506 pp.
- Maimone M. (2004). Defining and managing sustainable yield. *Groundwater*, 42(6): 809-814.
- Malkovsky M. & Kacura G. (eds) (1969). Report on the 23rd session of the Internacional Geological Congress, Czechoslovaquia, 1968. Proceedings of Symposium II. Academia. Prague.
- Marques F.O., Ribeiro A. & Pereira E. (1991-92). Tectonic evolution of the deep crust: Variscan reactivation by extension and thrusting of Precambrian basement in the Bragança and Morais massifs (Trás-os- Montes, NE Portugal). *Geodinam. Acta*, 5, 1/2: 131-151.
- Marques J.M. (1999). *Geoquímica dos fluidos e da interacção água-rocha: os casos das águas mineralizadas quentes e frias de Chaves, Vilarelho da Raia, Vidago e Pedras Salgadas*. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 276 pp. (Tese de doutoramento).
- Marques J.M., Espinha Marques J., Carreira P.M., Graça R.C., Aires-Barros L., Carvalho J.M., Chaminé H.I. & Borges F.S. (2003). Geothermal fluids circulation at Caldas do Moledo area, Northern Portugal: geochemical and isotopic signatures. *Geofluids*, 3 (3): 189-201.
- Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press. 440 pp.
- Martinez M.V. & Lopez A.I. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. ITGE. 426 pp.
- Martins Carvalho P.S. (1969). Prospecção de água em formações cristalinas e cristalofilinas. *Bol. Minas*, 6, 1: 3-10.

- Martins Ferreira J. (2001). A ATISO no Contexto da captação de Água Subterrânea. In prospecção pesquisa e captação de águas minerais naturais, recursos geotérmicos e águas de nascente. Comunicações apresentadas nas II Sessões Técnicas integradas nas comemorações dos 150 anos da criação da 1ª Comissão Geológica de Portugal, pp. 9-10.
- Mazurek M. (2000). Geological and hydraulic properties of water-conducting features in crystalline rocks. In: Stober, I. & Bucher, K. (eds.) Hydrogeology of crystalline rocks. *Water Science and Technology Library*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston. 34: 3-26.
- McClay K.R. (1987). *The mapping of geological structures*. The Geological Field Guide Series, John Wiley & Sons, Chicester, New York, 161 pp.
- Meinzer O.E. (1923). *Outline of groundwater hydrology with definitions*. USGS Water-Supply paper 494. 69 pp.
- Mendes J.C. & Bettencourt M.L. (1980). Contribuição para o estudo do balanço climatológico de água no solo e classificação climática de Portugal Continental. In: O Clima de Portugal. *Inst. Nac. Met. Geof.*, Lisboa, 24: 1-289.
- Mendonça D., Chaves J.A.B., Carvalho J.M. & Mendonça J.J.L. (1982). As águas subterrâneas da Bacia Terciária do Tejo e o abastecimento de água a Lisboa: Alguns exemplos de trabalhos de pesquisa e captação. In: Anais do Simpósio "A Bacia Hidrográfica Portuguesa do Rio Tejo - Perspectivas para o seu Desenvolvimento e para a Gestão dos seus Recursos Hídricos", APRH, 31 pp.
- Mendonça J.J.L. (1985). *Prospecção, pesquisa e captação de água em formações aluvionares*. Univ. Nova de Lisboa. 244 pp. (Tese de Mestrado).
- Mendonça J.J.L., Almeida C.C. & Marques da Silva M. (1999). Produtividade de captações e características hidrogeológicas dos sistemas aquíferos descontínuos do Maciço Hespérico na Área da Bacia Hidrográfica do rio Mondego. Seminário sobre Águas Subterrâneas. APRH, 11 pp.
- Merrits D., De Wet A. & Menking K. (1998). *Environmental Geology. An Earth Science Approach*. W. H. Freeman and Company. 452 pp.

- Meyrer de Stadelhofen C. (1991). *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. TEC & DOC. Lavoisier. 183 pp.
- Michel G. (1975). Groundwater extraction in fissured rocks in northern-Westphalia (Federal Republic of Germany). *Mémoires of the International Association of Hydrogeologists*. Réunion de Porto Alegre, X: 103-108.
- Michel J.P. & Fairbrige R.W. (1980). *Dictionary of Earth Science*. Masson Publishing USA. 411 pp.
- Ministério das Finanças (2004). Portaria nº 376/2004. Diário da República - 1ª Série-B, nº 88 de 14 de Abril 2004.
- MMA – Ministério del Medio Ambiente (1998). *Libro blanco del Agua en España*. Madrid. 864 pp.
- Moitinho Almeida F. (1979). Termómetros hidrogeotérmicos aplicados a águas de Portugal. Resumos das comunicações do 1º Encontro de Geociências da FCUL.
- Moitinho Almeida F. (1982). Novos dados geotermométricos sobre águas de Chaves e S. Pedro do Sul, Com. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 68, 2: 179-190.
- Moitinho de Almeida F. & Zbyszewesky G. (1947). Contribuição para o conhecimento dos terrenos quaternários da região de Estarreja: grupo do Amoníaco Português. Com. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 28: 13-105.
- Moitinho de Almeida F. & Zbyszewesky G. (1947). Contribuição para o conhecimento dos terrenos quaternários da região de Estarreja: grupo da foz do Rio Antuã. Com. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 29: 5-120.
- Moitinho de Almeida F. (1970). Carta Hidrogeológica de Portugal. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Escala 1/1 000 000. Lisboa.
- Montenegro de Andrade M., Noronha F., Rocha A. & Lima J. (1986). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. Folha 9- B (Guimarães)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Moore J. E. (2002). *Field Hydrogeology. A guide for site investigations and report preparation*. Lewis Publishers. 195 pp.

- Moret L. (1946). *Les sources thermominérales*. Masson. 146 pp.
- Morin E. (2002). *Reformar o pensamento*. Instituto Piaget. 137 pp.
- Murck B. & Skinner B. (1999). *Geology today, understanding our planet*. John Wiley & Sons. 527 pp.
- Narciso A. (1947). Clínica hidrológica e organização termal. In: Actas–Alocuções–Comunicações, *1º Congresso Luso-Espanhol de Hidrologia*. Ministério da Economia, Lisboa. pp. 353-393.
- Nelson A. & Nelson K.D. (1967). *Dictionary of Applied geology, Mining & Civil Engineering*. George Newnes Limited. London. 421 pp.
- NGWA – National Ground Water Works Association. (1998). *Manual of water well construction practices*. NGWA. Dossier policopiado.
- Noronha F. & Ribeiro M.L. (1983). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/50.000. Notícia explicativa da folha 6-A, Montalegre*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 30 pp.
- Nunes de Sousa M. (1966). Aplicação do método de resistividade eléctrica na localização de furos de sonda para obtenção de águas subterrâneas nas rochas cristalinas do distrito de Moçâmedes (Angola). *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas de Angola*, 14: 41-48.
- Oliveira A.S. (1995). *Hidrogeologia da região de Pedras Salgadas*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 229 pp. (PAPCC).
- Oliveira J.T. (1988). *Contribuição para o conhecimento da evolução tectono-estratigráfica da Zona Sul portuguesa em Portugal*. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 88 pp. e 12 publicações anexas. (Tese de Doutoramento).
- Oliveira J.T., Pereira E., Ramalho M., Antunes M.T. & Monteiro J.H. [Coords] (1992). *Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000, 5ª edição, 2 Folhas*. Serviços Geológicos Portugal, Lisboa.
- Oliver J. (1986). Fluids expelled tectonically from orogenic belts: their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. *Geology*, 14: 99-102.
- Pacheco F.A.L. (2000). *Hidrogeologia em maciços de rochas cristalinas (Morais-Chacim-Macedo de Cavaleiros): contribuição para a gestão*

- integrada dos recursos hídricos da região*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 395 pp. (Tese de Doutoramento).
- Pacheco Pereira D. (1505?). *Esmeraldo de Situ Orbis*. Edição de 1892 comemorativa da descoberta da América.
- Palissy H.B. (1580). *Discours admirables de l'art de terre, de son utilite, des esmaux et du feu*. Paris.
- Paradela P.L. (1959). *Prospecção geofísica de águas subterrâneas*. Ministério das Obras Públicas. Direcção Geral dos Serviços de Urbanização. Centro de Estudos de Urbanismo. 37 pp.
- Paradela P.L. (1960). *Pesquisas e captações de águas subterrâneas e outros aspectos dos abastecimentos de águas nalguns países europeus*. Ministério das Obras Públicas. Direcção Geral dos Serviços de Urbanização. Centro de Estudos de Urbanismo. 246 pp.
- Paradela P.L. (1962). *O método geoelectrico de resistividade na prospecção de águas subterrâneas*. Ministério das Obras Públicas. Direcção Geral dos Serviços de Urbanização. Centro de Estudos de Urbanismo. 34 pp+anexos.
- Paradela P.L. (1975). *Recursos Hídricos Subterrâneos. Atlas do Ambiente de Portugal*. Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa.
- Pedrosa M.Y. (1999). *Notícia explicativa da Carta Hidrogeológica de Portugal, à escala 1/200 000*. Folha 1. Inst. Geol. Min., Lisboa. 70 pp.
- Pedrosa M.Y. [coord.] (1998). *Carta Hidrogeológica de Portugal*. Folha 1, escala 1/200 000. Inst. Geol. Min., Lisboa.
- Peinador Fernandes A., Correia Perdigão J., Figueiredo de Carvalho H. & Martins Peres A. (1973). *Carta geológica de Portugal, escala 1/50 000. Notícia explicativa da folha 28-D, Castelo de Vide*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 44 pp.
- Pereira E., Ribeiro A., Carvalho G.S., Noronha F., Ferreira N. & Monteiro J.H. [coords.] (1989). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/200000*, Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

- Pereira M.R. & Almeida C. (1994). Captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas. Factores que influenciam a produtividade. Comunicações do II Congresso nacional da Água, II: 95-106.
- Pereira M.R. (1992). Importância dos filonetes de quartzo na pesquisa de água subterrânea em rochas cristalinas. *Geolís*, Lisboa, 6 (1/2): 46-52.
- Pereira M.R. (1999). *Hidrogeologia das rochas fracturadas da Terra Quente Transmontana*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 299 pp. (Tese de doutoramento).
- Perrault P. (1674). *De l'origine des fontaines*. Pierre Le Petit, Imprimeur & Libraire, Paris, 353 pp.
- Picard L. (1953) Esquisse de la géologie des eaux souterraines dans les régions arides. Colloque d'Ankara sur l'hydrologie de la zone aride. Unesco. pp. 171-183.
- Pinto de Jesus A. (2001). *Génese e evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): um modelo*. Universidade do Porto. Vol. Texto: 272 pp., Vol. Atlas: 71 pp. (Tese de doutoramento).
- Plote H. (1986). *Sondage de Reconnaissance Hydrogeologique. Méthode du Marteau Fond-de-Trou. Exécution et surveillance*. Manuel et Methodes n° 12. BRGM, Orléans, 150 pp.
- Pomerol C. & Ricour J. (1992). *Terroirs et Thermalisme de France*. Éditions du BRGM. 288 pp.
- Portugal Ferreira M.R., Carvalho J.M. & Mendonça J.L. (1984). Águas Minerais na Zona Centro Ibérica (Sector de Portugal): Metodologia, Tipologias. In: *1º Congreso Español de Geología, AEG*, Madrid, 4: 317-330.
- Ramalho Ortigão J.D. (1875). *Banhos de Caldas e Águas Minerais*. Clássica Editora. 287 pp.
- Ramsay J.G. & Huber M.I. (1987). *The techniques of modern structural geology. Vol 2: Folds and Fractures*. Academic Press Limited, London. 700 pp.

- Ratinho S. (1999). Ensaio de caudal num aquífero granítico do Centro de Portugal. Universidade de Évora. 166 pp. (Trabalho de fim de curso da Licenciatura em Engenharia dos Recursos Hídricos).
- Ribeiro A. & Moitinho de Almeida F. (1981). Geotermia de baixa entalpia em Portugal continental. *Geonovas*, Associação Portuguesa de Geólogos, Lisboa, 2: 60-71.
- Ribeiro A. (1974). Contribution à l'étude tectonique de Trás-os-Montes Oriental. *Mem. Serv. Geol. Portg.*, 24. 168 pp.
- Ribeiro A. (1984). Néotectonique du Portugal. In: Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro, Centro de Estudos Geográficos. Lisboa. Vol.1, pp.173-182.
- Ribeiro A., Antunes M.T., Ferreira M.P., Rocha R.B., Soares A.F., Zbyszewski G., Almeida F.M., Carvalho D. & Monteiro J.H. (1979). *Introduction à la géologie générale du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 114 pp.
- Ribeiro A., Conde L. & Monteiro J. (1972). *Carta tectónica de Portugal, escala 1/1000000*. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa.
- Ribeiro A., Cramez C. & Rebelo J.A. (1964). Sur la structure de Trás-os-Montes (Nord-Est du Portugal). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 258: 263-265.
- Ribeiro A., Pereira E. & Dias R. (1990). Structure of Centro-Iberian allocthon in the Northwest of the Iberian Peninsula. In: Dallmeyer R.D. & Martínez-García E. (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. pp. 220-236.
- Ribeiro A., Quesada C. & Dallmeyer R.D. (1990). Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: Dallmeyer R.D. & Martínez-García E. (eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg. pp. 397-410.
- Ribeiro M.L. (1993). Granitos do ocidente ibérico: contribuição para a sua interpretação geodinâmica. *Cuad. Labor. Xeol. Laxe*, A Coruña, 18: 7-25.
- Ribeiro O. (1940). Problemas morfológicos do Maciço Hespérico Português. *Las Ciências*, Madrid, 6, 2: 315-336.

- Ribeiro O. (1949). Le Portugal Central. In: Livret-guide de l'excursion C. Union Géographique Internationale. *XVI Congr. internat. Géogr.*, Lisbonne. 180 pp.
- Ribeiro O. (1954). Estrutura e relevo da Serra da Estrela. *Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat.*, Tomo Homenaje E. Hernández-Pacheco, Madrid. pp. 549-566.
- Ribeiro O. (1970). Genèse et diversité des montagnes portugaises. *Argumenta Geographica*, Festschrift Carl Troll, *Colloquium Geographicum*, Bonn, 12: 214-224. (artigo reproduzido em: Orlando Ribeiro, 1990. Opúsculos Geográficos, III Volume (Aspectos da Natureza), Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, pp. 115-127).
- Ribeiro O. & Lautensach H. (1987). *Geografia de Portugal. I. A posição geográfica e o Território*. Edições João Sá da Costa, Lisboa. 334 pp.
- Ribeiro O., Lautensach H. & Daveau S. (1994). *Geografia de Portugal: O ritmo climático e a paisagem*. Volume 1. Edições João Sá da Costa, Lisboa. 623 pp.
- Ricci M. & Petri S. (1965). *Princípios de Aerofotogrametria e interpretação geológica*. Companhia Editora Nacional. 226 pp.
- Rice C.M. (1963). *Dictionary of Geological Terms*. Princeton Department of Geology. 465 pp.
- Robins N.S. & Missteart B.D.R. (2000). Groundwater in the Celtic Regions. In: Robins N.S. & Missteart B.D.R. (eds.), *Studies in hard-rocks and quaternary hydrogeology. Geological Society Special Publication*, London, 182: 5-17.
- Rocard Y. (1962). *Le signal du sourcier*. Dunod. Paris. 136 pp.
- Rocard Y. (1981). *Les sourciers*. Que sais je ?. PUF. Paris. 126 pp.
- Rocard Y. (1983). *Le Pendule Explorateur*. ERG. Maurecourt. 220 pp.
- Rocard Y. (1989). *La Science et les Sourciers*. Dunod. Paris. 268 pp.
- Rowles R. (1991). *Drilling for water: a practical manual*. Paul & Co Pub. Consortium. 180 pp.
- Rybach L. (2001). Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and Worldwide. In: Popovsky & Sanner (Eds.), *International Summer*

- School on Direct Application of Geothermal Energy of IGA, Skopje, Macedonia. pp. 11-126.
- Sahuquillo A. (2002). *Desarrollos científicos y nuevas técnicas en hidrogeología. Presente y futuro de las aguas subterráneas en la Provincia de Jaen*. IGME. Madrid. 11pp.
- Sanders L.L. (1998). *A manual of field hydrogeology*. Prentice Hall. 381 pp.
- Santarém Andrade R. (1983). Interpretação fotogeológica da região centro de Portugal: estruturas circulares e fracturas com base em imagens do satélite Landsat 2. *Estud. Notas Trab. Serv. Fom. Min.*, Porto, 25 (3/4): 227-245.
- Santos F.D., Forbes K. & Moita R. (eds). (2001). *Mudança climática em Portugal, cenários, impactes e medidas de adaptação-SIAM*. Sumário Executivo e Conclusões. Gradiva.
- Schoeller H. (1962). *Les eaux souterraines*. Masson & cie, Paris. 642 pp.
- Schoeller H. (1982). Sur les eaux thermominérales et leur origine. In: Romariz, C. (ed.), *3ª Semana de Hidrogeologia*, Universidade de Lisboa. pp. 37-43.
- Seaton W.J. & Burbey T.J. (2005). Influence of ancient thrust fault on the hydrogeology of the Blue Ridge Province. *Groundwater*, 43 (3): 301-313.
- Seifert H. (1969). Caldas de Moledo. *Bol. Minas*, Lisboa, 6,1: 66-68.
- Seifert H. & Vicente A. (1968). Caldas de Moledo. *Bol. Minas*, Lisboa, 5, 3: 226-227.
- Seifert H. (1963). *Sobre a hidrologia e génese das águas do Vimeiro*. Gabinete de Estudos Geológicos e Hidrogeológicos, GEO-HIDROL Lda, Lisboa. 18 pp. (Relatório inédito).
- Seifert H. (1967). *Consequências da construção da barragem de Carrapatelo sobre as nascentes termais e projecto de novas captações*. Gabinete de Estudos Geológicos e Hidrogeológicos, Lda., Lisboa. 13 pp. (Relatório inédito).
- Senior D.A.G. & Ashurst P. R. (1998). *Technology of Bottled Water*. Sheffield Academic Press. 293 pp.

- Sequeira Braga M.A., Lopes Nunes J., Paquet H. & Millot G. (1989). Éssai sur les arènes de l'Europe atlantique. Zonalité climatique. Place de l'arénisation parmi les grands systèmes mondiaux d'altération météorique. *C. R. Académie Sciences de Paris*, 309 (série II): 1955-1962.
- Serafino J.F.C. (1960). Morfologia estrutural da região de entre Nelas e Vila Franca da Beira. *Mem. Not.*, Coimbra, 49: 41-62.
- Serralheiro R., Bettencourt A., Fernandes J.P.A., Carvalho J.M. & Pinto P. (1997). *Recursos Hídricos do Alentejo. Perspectivas de Utilização Duradoura*. Anais da Universidade de Évora. 205 pp.
- Sharp Jr J.M. (1993). Fractured aquifers/reservoirs: approaches, problems and opportunities. In: Sheila & David Banks (Eds.). *IAH Memoires, XXIV, Part 1: 23-38*.
- Sidle R.C. & Onda Y. (2004). Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological Processes*, 18: 597–602.
- Simmons C.T. (2005). Variable density groundwater flow: from current challenges to future possibilities. *Hydrogeology Journal*, 13: 116-119.
- Singhal B.B.S. & Gupta R.P. (1999). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Kluwer Academic Publishers. 400 pp.
- Sironneau J. (1998). La guerre de l'eau aura-t-elle lieu? Ménaces et enjeux de l'hydropolitique". In: Margat, J. & Tiercelin, J. *L'eau en question*. Romillat. pp. 245-295.
- Skinner D. & Heinson G. (2004). A comparison of electrical and electromagnetic methods for the detection of hydraulic pathways in a fractured rock aquifer, Clare Valley, South Australia. *Hydrogeology Journal*, 12: 576-590.
- Skorepa J. & Vrba J. (1985). Hydrogeological Investigations of Crystalline Rocks of the Bohemian Massif. *Memoires of the International Association of Hidrogeologists*. Tucson. Voll XXVII, Part 2: 773-780.

- Smith S.E. & Marin L.E. (2005). Water and the rural poor in Latin American: the case of Tiamacazapa, Guerrero, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 13: 346-349.
- Soares de Andrade A. (1983). *Contribution a l'analyse de la suture Hercynienne de Beja (Portugal), perspectives métallogéniques*. INPL, Université de Nancy. 137 pp. (Tese de Doutoramento).
- Stober I. & Bucher K. (2000). Hydrogeology of cristalline rocks. *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, 34: 1-284.
- Stone W. (1999). *Hydrogeology in practice. A guide to characterizing ground-water systems*. Prentice Hall. 248 pp.
- Struckmeier W.F., Margat J. (1995). Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. *International Association of Hydrogeologists*, Hannover, 17: 1-177.
- Summers W.K. (1972). Specific capacities of wells in crystalline rocks. *Groundwater*, 10 (6): 37-47.
- Talbo H. (1983). *L'eau souterraine dans les formations anciennes de Bretagne. État des connaissances*. BRGM, Rennes, 111 pp. (Report inédit 83SGN296BRE).
- TARH – Terra, Ambiente & Recursos Hídricos, Lda (2001). *Outeirinho–Turismo e Indústria, Lda (Água de S. Martinho e de Serras de Fafe). Estudo hidrogeológico do 'Terreno Novo' (S. Martinho de Silvaes, Fafe)*. Relatório Final. 16 pp., 2 anexos. (Relatório inédito).
- Teixeira C. & Gonçalves F. (1980). *Introdução à Geologia de Portugal*. Instituto Nacional de Investigação Científica. 475 pp.
- Teles Vieira G. (2004). *Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela: ambientes frios do Plistocénico Superior e dinâmica actual*. Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa. 724 pp. e 1 mapa (Tese de Doutoramento).

- Tenzer H. (2001). Development of Hot Dry Rock technology. In: Popovsky & Sanner, Eds., International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy of IGA, Skopje, Macedonia. pp. 259-279.
- Theis C.V. (1935). The lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground water storage. *Transactions of the American Geophysical Union*, 16: 519-524.
- Thiem G. (1906). *Hydrologische Methoden*. Gebhardt. Leipzig. 56 pp.
- Todd D.K. & Mays L.W. (2005). *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons. New York. 636 pp.
- Tolman C.F. (1937). *Groundwater*. McGraw Hill Book Company, Inc., New York, 593 pp.
- Torres J.L.P. (2000). Técnicas convencionales de geofísica de superficie aplicadas en hidrogeología. In: Olmo Alarcón, M. & López Geta J.A. (eds.). Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología. ITGE, pp. 21-32.
- Travassos N.F.E.T. (2003). *Inventário Nacional das captações dos Sistemas de Abastecimento Público de Água no Âmbito da Segurança e Protecção Civil*. Universidade de Évora. 79 pp. + Anexos. (Trabalho de fim de Curso em Engenharia dos Recursos Hídricos).
- Unesco (1970). *International legend for hydrogeological maps*. 101 pp.
- Unesco (1972). International geological map of Europe and the Mediterranean region, scale 1/1500000. Explanatory notes.
- UOP Johnson División (1969). *Água subterrânea e poços tubulares*. Organização Pan Americana da saúde e Faculdade de Engenharia da Universidade Federal do Panamá. 394 pp.
- Varet J. (1982). *Geothermie basse energie. Usage direct de la chaleur*. Masson. 201 pp.
- Vieira G., Mora C. & Gouveia M.M. (2004). Oblique rainfall and contemporary geomorphological dynamics (Serra da Estrela, Portugal). *Hydrological Processes*, 18: 807-824.

- Vylita B. (1985). New tapping boreholes in Carlsbad. In: Romijn E., Groba E., Luttig G., Fiedler K., Laugier R., Lohnert E. & Garagunis C. (eds.), *Geothermics, thermal-mineral waters and hydrogeology*, Theophrastus Publications, Athens, pp. 205-218.
- Wagner H., Betz H.B. & König H.L. (1990). Schlußbericht 01 KB8602, Bundesministerium für Forschung und Technologie.
- War Department (1944). Ground water supply for Military Operations. War Department Technical manual TM 5-296. 88 pp.
- White D.E. (1957). Magmatic, connate and metamorphic waters. *Bull. Geol. Society of America*. New haven, 68(12): 1659-1682.
- Wright E.P. & Burgess W.G. (1992). The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Geological Society Special Publication*, London, 66: 1-264.
- Wright G.R. (2000). QSC graphs: an aid to classification of data-poor aquifers in Ireland, in N.S. Robins and B.D.R. Missear. *Groundwater in the Celtic Regions: studies in hard-rock and quaternary hydrogeology*. *Geological Society Special Publication*, 182: 169-177.
- Yin G.U. & Brook G.A. (1992). The topographic approach to locating high-yield wells in crystalline rocks: does it work? *Groundwater*, 30 (1): 96-102.
- Zêzere J.L., Trigo R.M. & Trigo I.F. (2005). Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 331-344.