

## OCORRÊNCIA DISCRETA DE ÁGUAS FÉRREAS EM FRAIÃO-BRAGA, NW DE PORTUGAL: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Alberto S. LIMA <sup>(1)</sup>; Jorge V. PAMPLONA <sup>(1)</sup>; Carlos S. ALVES <sup>(1)</sup>; Manuel O. SILVA <sup>(2)</sup>

### RESUMO

Na pesquisa da água da antiga nascente das águas férreas, referida historicamente pela sua importância medicinal, foi desenvolvido um estudo hidrogeológico na zona de Fraião (Braga-NW de Portugal). Os resultados obtidos sugerem um modelo hidrogeológico conceptual para a ocorrência das águas férreas nesta área que pode sintetizar-se do seguinte modo: no decurso da alteração dos minerais ferromagnesianos das rochas da região de Fraião-Braga - granitos biotíticos encaixados num metassedimento silúrico, parcialmente recobertos por depósitos aluvionares de pouca possança - liberta-se ferro que entra na circulação subterrânea; as condições de Eh-pH determinam a estabilidade do  $Fe^{3+}$ , formando compostos muito pouco solúveis que se acumulam no depósito de cobertura e, em condições favoráveis, são reduzidos pela matéria orgânica a  $Fe^{2+}$ , muito mais solúvel, aumentando a concentração de ferro nas águas subterrâneas. A ocorrência de águas férreas no sector estudado é discreta, estando relacionada com a existência de microambientes redutores.

**Palavras-chave:** águas férreas; ambientes sedimentares; oxidação-redução; processos hidrobiogeoquímicos.

---

(1) Assistente, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, 4709 Braga Codex

(2) Professor Catedrático, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1700 Lisboa

# 1 - INTRODUÇÃO

Na freguesia de Fraião, na zona conhecida por Vale de Lamações, concelho e distrito de Braga, existia uma fonte de águas férreas (figura 1) edificada em estilo barroco, conhecida pelo menos desde 1773 pela sua aplicação terapêutica em síndromes de carência de ferro. A água era captada numa mina com cerca de 1 metro de comprimento e, de acordo com PEREIRA-CALDAS (1851), a produtividade da emergência era muito baixa. Ainda segundo o mesmo autor, o teor em ferro era de 13.5 mg/l, correspondente a 22.0% da mineralização catiónica.

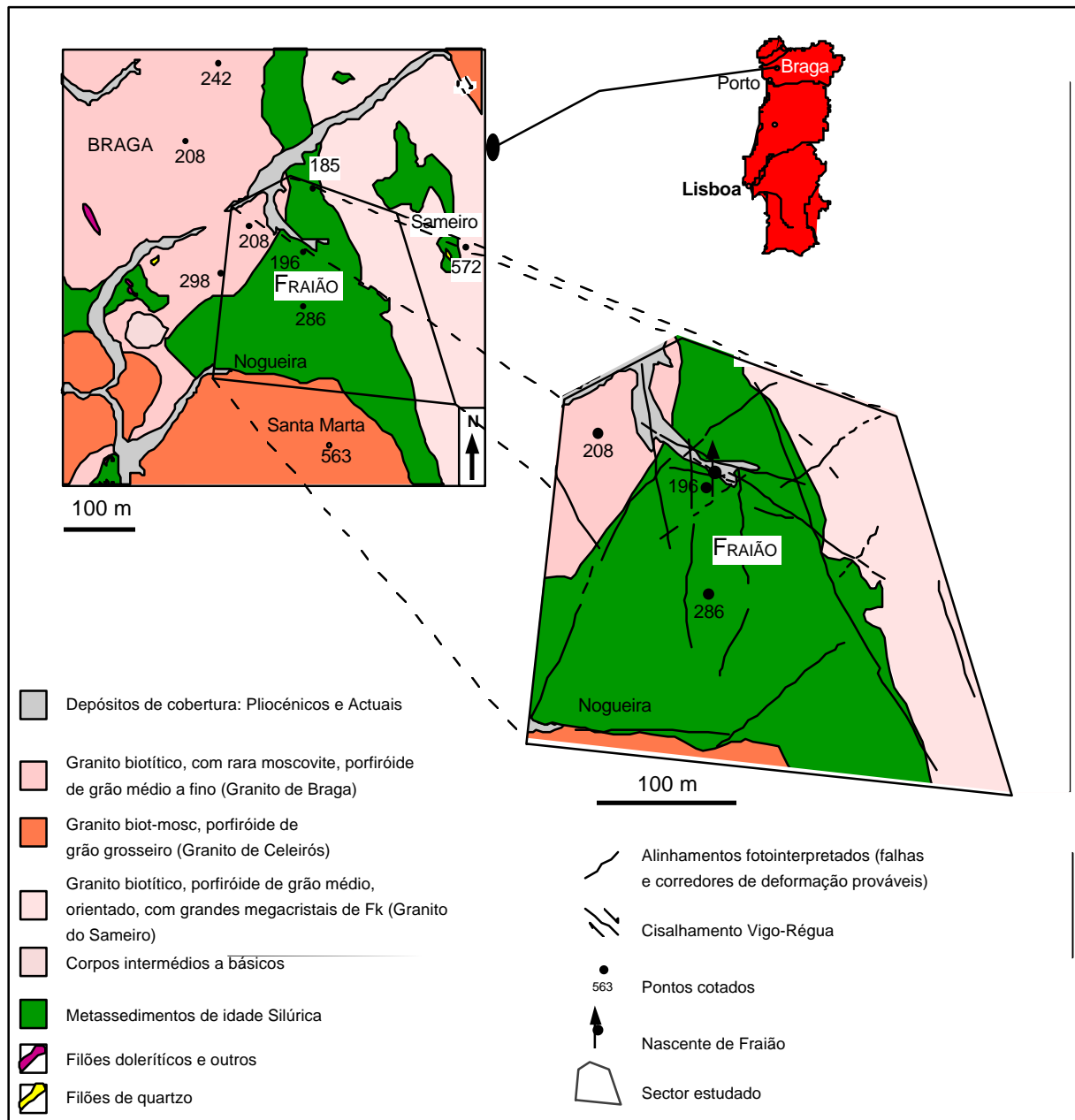


Figura 1 - Esboço geológico à escala 1/ 50 000 (adaptado de TEIXEIRA e MEDEIROS, 1973; FERREIRA *et al.*, 1993). Acrescentaram-se os alinhamentos foto-interpretados.

É feita menção a esta nascente e à sua natureza férrea em várias outras publicações (TORRES *et al.* (1930-31); ALMEIDA, coord. (1970); TEIXEIRA e MEDEIROS (1973); ALMEIDA e ALMEIDA (1988)), verificando-se, contudo, que a bibliografia posterior a PEREIRA-CALDAS (1851) se serve dos resultados obtidos por este, não havendo referência a quaisquer novos dados analíticos. Para além da análise físico-química citada, os únicos dados disponíveis são de carácter regional (HEITOR, 1993) e apresentam valores mínimos de ferro inferiores a 0.01 mg/l e valores máximos de 0.29 mg/l.

Não existem referências de caracterização hidrogeoquímica específica do sector em estudo. Os poucos trabalhos conhecidos desenvolveram-se em áreas mais extensas que incluem este sector. Assim, segundo LIMA e SILVA (1995a) as águas da região apresentam mineralizações muito baixas, com valores de condutividade eléctrica que variam entre 31 e 454  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , típicas de circulações pouco profundas. A mineralização das águas é essencialmente controlada pelos iões sódio, cloreto e nitrato. São águas agressivas, mostrando-se subsaturadas em relação a todas as espécies minerais com excepção dos polimorfos de sílica para os quais se encontram em equilíbrio ou mesmo sobressaturadas. Tipologicamente enquadram-se, predominantemente, nas fácies cloretada sódica e cloretada cálcica (LIMA e SILVA, 1995b).

Do ponto de vista hidrodinâmico estamos na presença de meios de dupla porosidade e, dada a proximidade ao acidente Vigo-Régua e a contactos, normalmente por falha, entre diferentes litologias, a zona apresenta uma grande densidade de fracturação.

A construção de uma superfície comercial na zona levou à remoção da fonte. Como tal foi solicitado um estudo hidrogeológico com vista à prospecção da "água férrea".

## **2 - METODOLOGIA**

A metodologia adoptada neste estudo pode ser sintetizada da seguinte forma:

- interpretação fotogeológica (escala 1/25 000);
- levantamento geológico (litológico-estrutural);
- estudos mineralógicos por difracção de raios X (DRX)
- medição *in situ* de alguns parâmetros físico-químicos (temperatura, condutividade eléctrica, pH e potencial redox) em diversos pontos de água ;
- análises físico-químicas de águas;
- levantamento geológico complementar e recolha de amostras de água a partir da execução de 3 valas e 2 sondagens.

## **3 - GEOLOGIA**

O sector estudado é constituído por depósitos aluvionares de pouca possança sobrejacentes a um "bed-rock" de corneanas pelíticas e quartzo-feldspáticas, que podem ser enquadradas na fácies das corneanas hornblêndicas, nas zonas de andaluzite-cordierite e da biotite (TEIXEIRA e MEDEIROS, 1973). Contactando com o metassedimento afloram diferentes litofácies ígneas, predominantemente graníticas (granito de Braga, granito do Sameiro, granito de Celeirós), controladas estruturalmente pelo acidente polifásico de Vigo-Régua, e corpos gabro-granodioríticos. Ocorrem também filões de quartzo e outros de composição intermédia a básica (figura 1).

O depósito aluvionar evidencia uma espessura irregular, podendo atingir os 3 metros. Este possui estrutura heterogénea com granulometria que varia desde a argila (em pequenos leitos e bolsadas) até ao bloco. Os elementos grosseiros são constituídos por quartzo, corneana e granito, e são, na sua maioria, angulosos. Os óxidos e hidróxidos de ferro formam pátinas sobre os elementos grosseiros e constituem também níveis ferruginosos. O metassedimento silúrico apresenta uma espessura de alteração na ordem dos 7 metros. Em determinados locais foi possível identificar interdigitações do granito de Braga no metassedimento.

O estudo estrutural permitiu detectar algumas direcções de fracturação preferenciais, relacionadas com a tectónica hercínica e pós-hercínica (N-S a NNW-SSE, WNW-ESE e NE-SW), e evidências de Neotectónica (falhas com direcção NE-SW e ENE-WSW) (figura1). Não foi possível correlacionar as diferentes direcções de fracturação com qualquer circulação preferencial de água subterrânea ferruginosa. Na parte SW da área de estudo observou-se um contacto por falha entre o metassedimento/depósito aluvionar e o Granito de Braga. Tanto este contacto como outras falhas observadas no terreno veiculavam água sem que esta apresentasse teores elevados de ferro em solução, não obstante a intensa cromatização ferruginosa observada na argila de falha e nas litologias adjacentes.

## **4 - HIDROGEOLOGIA**

### **4.1 - Balanço hídrico ao nível do solo**

Para a compreensão do modelo hidrogeológico conceptual preconizado para o sector é importante comparar as normais climatológicas correspondentes a uma série de vários anos (1961-90) e os dados do ano hidrológico no qual se desenvolveu o trabalho (1995-96). Importa salientar que os estudos de campo se iniciaram em Maio de 1996, praticamente no final do período húmido, onde o aquífero terá atingido a máxima recarga.

Efectuados os balanços hídricos ao nível do solo (capacidade de campo = 100 mm pela metodologia sequencial de Thornthwaite e Mather (LENCASTRE e FRANCO, 1992) para as duas situações antes descritas (figuras 2 e 3), verifica-se que a precipitação (P) total em 1995-96 corresponde a 123% da normal climatológica deste parâmetro, que se traduz num valor de *superavit* (1300 mm), que é 44% superior ao da série considerada (900 mm). De notar ainda o pico pluviométrico registado em Maio de 1996.

Dada a metodologia utilizada (Thornthwaite) no cálculo da evapotranspiração potencial (ETP), que normalmente conduz a valores inferiores às medições directas (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983; LENCASTRE e FRANCO, 1992), admite-se que a evapotranspiração real (ETR) seja superior ao valor apresentado, pelo que o escoamento superficial e a infiltração seriam menores. O valor desta última, aparentemente elevado, justifica-se pelo facto da área de influência da estação climatológica a partir da qual se obtiveram os dados corresponder, do ponto de vista geomorfológico, a um vale de fundo aplanado.

A infiltração eficaz estima-se em 870 mm, considerando um coeficiente de escoamento superficial de 0.33 (LIMA, 1994) durante o período em que ocorre *superavit* hídrico. No entanto, dado que o nível freático atinge frequentemente a superfície topográfica, devido à fraca capacidade de armazenamento do aquífero, a infiltração eficaz será substancialmente mais baixa e o escoamento superficial mais elevado.

Os aspectos particulares do ano hidrológico em que foi desenvolvido o trabalho têm repercussões a nível hidrodinâmico e hidrogeológico, nomeadamente: (i) no aumento do caudal das emergências, (ii) no aumento da velocidade de escoamento, (iii) na diminuição do tempo de contacto água-rocha e (iv) na diluição das águas do aquífero.

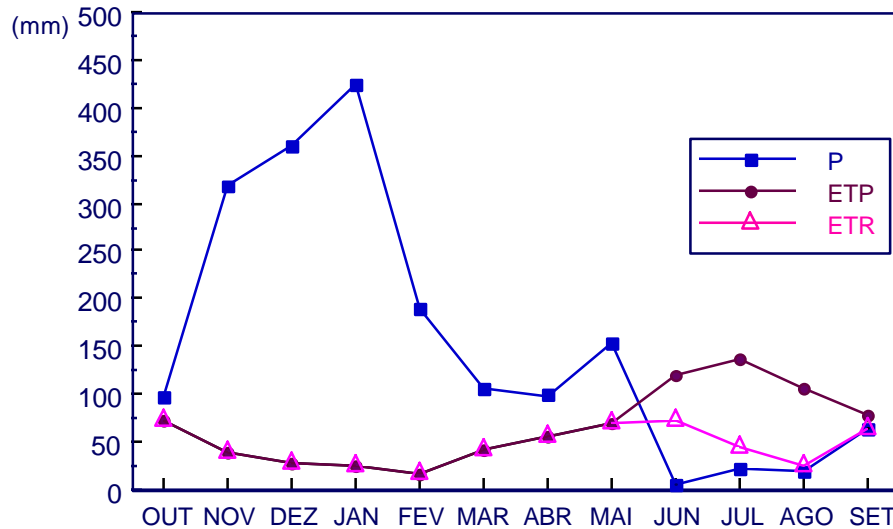


Figura 2 - Balanço hidrológico sequencial mensal na área de influência da estação climatológica de Braga para o ano hidrológico 1995-96.

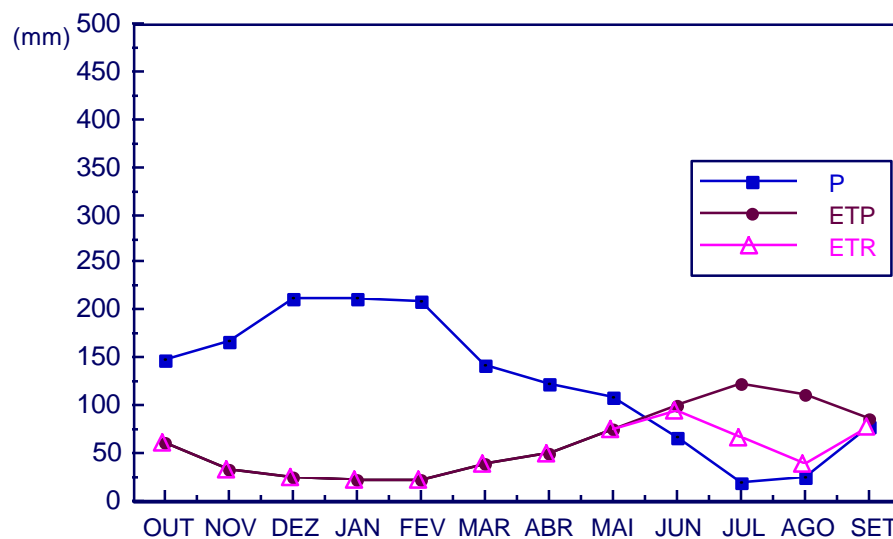


Figura 3 - Balanço hidrológico sequencial mensal na área de influência da estação climatológica de Braga para a série 1961-90.

#### 4.2 - Hidrodinâmica

Tratando-se essencialmente de uma zona de descarga, são numerosas as nascentes que ocorrem nesta zona com produtividades elevadas que variam entre 130 m<sup>3</sup>/dia (LIMA, 1994) e

320 m<sup>3</sup>/dia (LOPES NUNES *et al.*, 1996) e coeficientes de esgotamento típicos de circulações em meios fracturados, com valores da ordem de grandeza de 10<sup>-3</sup>. Existe também uma quantidade apreciável de poços e furos a aproveitar os recursos hídricos subterrâneos. No que respeita à nascente das águas férreas, não se dispõe de dados actuais pelas razões já expostas, apenas existindo a informação qualitativa de PEREIRA-CALDAS (1851) de que o caudal era muito pequeno.

### 4.3 - Hidrogeoquímica

Na figura 4 apresentam-se a localização dos pontos de água analisados, os valores nos diferentes parâmetros medidos *in situ* (condutividade eléctrica, temperatura, pH e Eh) e, ainda, os teores de ferro. No quadro 1 descrevem-se as condições de colheita de cada uma das amostras.

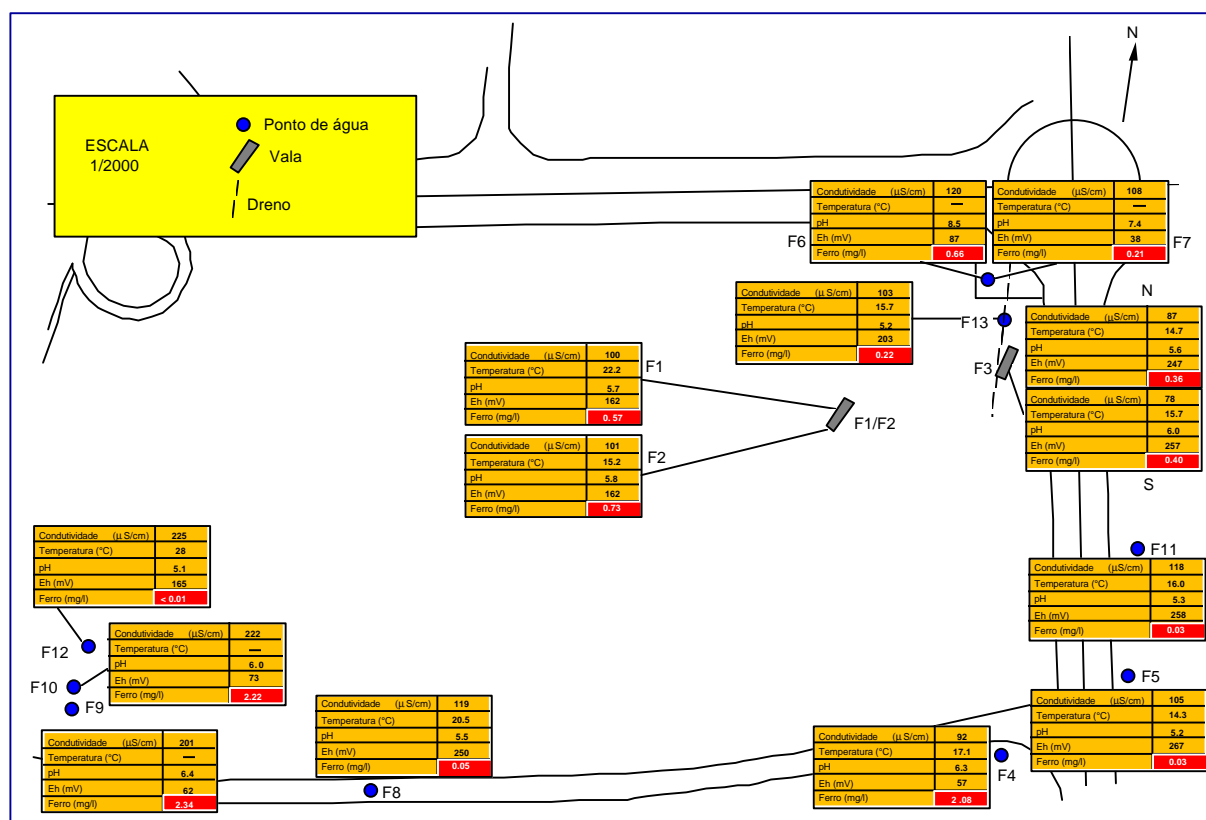


Figura 4 - Localização à escala 1/2000 dos pontos de água onde se efectuaram colheitas de amostras de água.

A distribuição dos valores dos parâmetros medidos no campo (figura 4), particularmente os relativos à condutividade eléctrica, sugere a existência de dois sectores: (i) o sector W (pontos F9, F10 e F12) com valores de condutividade à volta 200 µS/cm e (ii) o sector E com valores deste parâmetro inferiores a 120 µS/cm. É provável que a fracturação regional (figura 1) funcione como barreira hidrogeológica implicando a existência de dois circuitos subterrâneos distintos, até por que as fácies graníticas a E e a W do encaixante são diferentes. No entanto, a distribuição dos outros parâmetros é aleatória, mesmo no que respeita aos teores em ferro. Desta forma, a ocorrência férrea não parece estar relacionada com as diferenças litológicas.

**Quadro 1**  
Descrição das amostras

REFª DA AMOSTRA	DESCRIÇÃO
F1	Amostra colhida numa vala com direcção N35°E, com uma profundidade de cerca de 4 metros. Nível freático a aproximadamente 2 metros da superfície, coincidindo com o topo do depósito. A amostra foi colhida após estabilização do nível freático na vala.
F2	Amostra colhida na frente SW da mesma vala de F1, após extracção da água existente na mesma.
F3	Na vala com orientação N23°E foram colhidas as amostras F3(N) e F3(S) nas frentes norte e sul, respectivamente. Esta vala tinha cerca de 7 metros de comprimento e uma profundidade de 3,60 metros.
F4	Esta amostra foi retirada de um tubo de cerâmica, inserido cerca de 1 metro no solo na direcção SE, por onde gotejava água. Ao longo do tubo e no local de queda da água era visível uma cromatização avermelhada resultante da precipitação/deposição de óxidos e/ou hidróxidos de ferro.
F5	Amostra colhida à boca de uma mina situada no limite SE da carta 1/2 000 (figura 4).
F6 F7	Amostras provenientes duma sondagem de pesquisa de água subterrânea, uma colhida à profundidade de 46 metros (F6) e outra a 49 metros (F7).
F8	A amostra foi tomada numa emergência associada a falhas NW-SE.
F9 F10	Amostras colhidas em emergências cujo substrato, predominantemente argilo-húmico, evidenciava fendas de retracção e precipitações ferruginosas (pontuações).
F11	Amostra colhida numa nascente junto a uma linha de água com orientação média WSW-ENE.
F12	Amostra colhida nas imediações do local de F9 e F10 após desaterro de cerca de 2 metros que pôs em evidência o contacto por falha entre o conjunto depósito/metassedimento e o granito.
F13	Amostra colhida num dreno no qual se observavam precipitações/sedimentações ferruginosas.

Os valores de Eh registados nas amostras F6 e F7, colhidas durante a execução de uma sondagem, são anómalos e resultam da interferência dos produtos utilizados na perfuração (óleos). Por esta razão, estes dados não foram considerados nas interpretações feitas. O teor mais baixo em ferro da amostra F7 (0.21 mg/l), colhida a maior profundidade relativamente a F6 (0.66 mg/l), deve-se, provavelmente, à mistura de água mais superficial (associada ao depósito: água mais ferruginosa) com água mais profunda (associada à interface metassedimento alterado/bed-rock: água menos ferruginosa).

As amostras F4, F9 e F10 apresentam teores elevados de ferro. As emergências onde foram colhidas estas amostras apresentam duas características em comum: (i) caudal muito reduzido e (ii) ocorrência em meios argilo-húmicos.

O conjunto das amostras F5, F8, F11 e F12 apresentam valores de ferro muito mais baixos, semelhantes aos encontrados em águas exteriores à área coberta pela carta da figura 4.

As amostras colhidas em valas (F1, F2 e F3) apresentam concentrações em ferro relativamente elevadas. No entanto, é provável que, pelo menos em parte, tais concentrações sejam a consequência da acidificação das amostras, que tornou solúvel o ferro coloidal.

O estudo por DRX do precipitado avermelhado da amostra F13 mostrou a presença de bandas de reflexão muito abertas com máximos a 2.5 Å e 1.5 Å, que seriam justificadas pela presença de proto-ferrihidrite, composto de ferro de cristalinidade muito baixa (segundo os estudos de Chuckrov referidos em BROWN, 1984).

No diagrama da figura 5 estão projectados os valores de ferro em função dos valores de potencial redox relativos a quatro tipo de amostras: a) amostras de água de nascentes com caudal reduzido; b) amostras de água colhidas em valas que atingiram o nível freático; c) amostra de água colhida em dreno; d) amostras de água de nascentes com caudal moderado. Verifica-se uma dependência estocástica importante entre aqueles dois parâmetros. Este aspecto permitiu utilizar o potencial redox como parâmetro indicador na prospecção de água férrea.

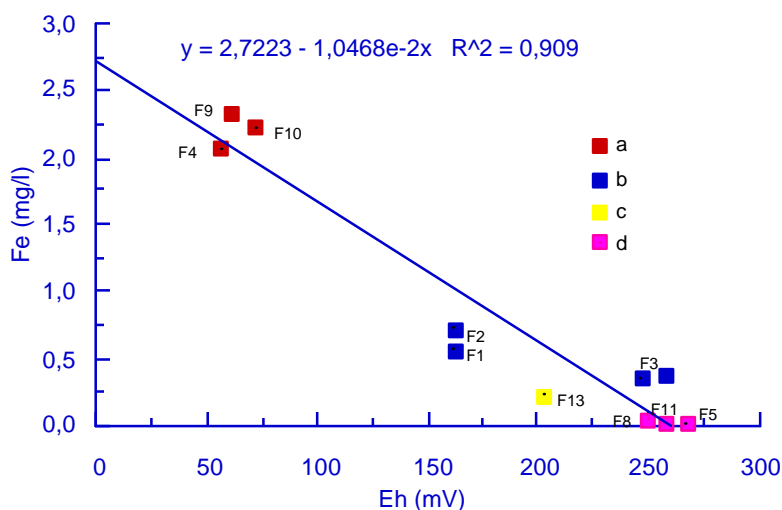


Figura 5 - Diagrama de dispersão Eh vs Fe.

No diagrama Eh-pH da figura 6 estão projectados os pontos representativos das amostras estudadas para o sistema Fe-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, a 25 °C, assumindo pK<sub>sp</sub>=37.1 para o Fe(OH)<sub>3</sub> amorfo; bicarbonato = 10<sup>-2.7</sup> mol/Kg. Os limites de estabilidade entre as espécies aquosas e sólidas estão definidos para uma concentração de ferro total dissolvido = 10<sup>-5</sup> mol/Kg (adaptado de LANGMUIR, 1997). Verifica-se que os pontos se situam no domínio de estabilidade do Fe<sup>2+</sup>, para uma concentração de ferro total dissolvido da ordem de 10<sup>-5</sup>. As amostras F3 encontram-se muito próximas do limite Fe<sup>2+</sup>/Fe(OH)<sub>3</sub>, o que está de acordo com as condições de colheita das amostras (quadro 1).



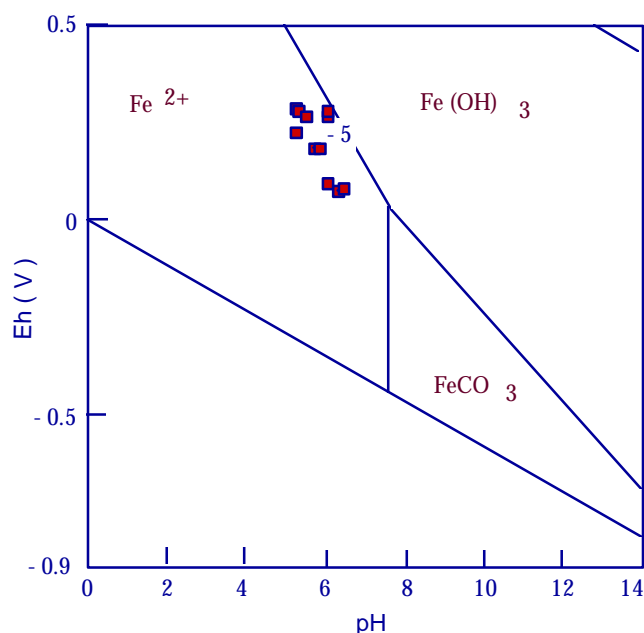


Figura 6 - Diagrama Eh-pH para o sistema Fe-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O.

No quadro 2 estão compilados os resultados analíticos de amostras de água colhidas em pontos seleccionados e os dados de PEREIRA-CALDAS (1851) tratados por TORRES *et al.*, (1930-31).

### Quadro 2

Resultados analíticos das amostras de água analisadas (**F<sub>n</sub>**) e de TORRES *et al.*, 1930-31 (**FT**); (valores em mg/l; oxi- oxidabilidade em meio ácido).

	Ca	Mg	Na	K	Fe	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	SiO <sub>2</sub>	Oxi
<b>F5</b>	3,96	2,82	10,1	1,30	0,03	12,2	3,2	9,5	8,92	1,2
<b>F6</b>	7,02	3,51	12,2	3,10	0,66	34,2	8,1	8,2	18,31	5,6
<b>F7</b>	3,39	3,28	11,8	2,42	0,21	20,7	5,1	5,2	17,07	4,0
<b>F8</b>	3,92	3,74	14,0	2,87	0,05	8,5	8,5	8,3	9,09	6,8
<b>F9</b>	6,93	6,88	19,7	3,05	2,34	9,8	10,1	25,2	13,13	7,2
<b>F10</b>	11,8	8,61	17,0	5,56	2,22	11,0	11,0	23,3	6,27	6,9
<b>F11</b>	5,65	2,49	10,0	1,87	0,03	12,2	3,5	12,2	9,28	1,2
<b>F13</b>	3,92	2,90	10,2	2,20	0,22	7,3	5,6	4,0	9,75	0
<b>FT</b>	2,7	-	35,8	-	13,5	14,5	6,3	55,2	21,0	-

A análise do quadro 2 mostra que as amostras F9 e F10 apresentam concentrações dos diferentes parâmetros analisados elevadas relativamente às restantes amostras, exceptuando os resultados de FT. A mineralização daquelas águas está, como se disse, provavelmente associada a um circuito subterrâneo diferente do das restantes. Os dados disponíveis e as observações de campo sugerem que a aquisição de uma parte importante desta mineralização poderá ser antropogénica. Outro aspecto a realçar é o facto dos valores de oxidabilidade serem relativamente elevados, particularmente nas amostras F8, F9 e F10.

Relativamente aos dados de TORRES *et al.* (1930-31) é oportuno tecer algumas considerações dado que estes resultados são, em alguns parâmetros, muito diferentes dos das amostras agora estudadas. Apesar de hipossalina esta água apresenta uma mineralização apreciável no contexto regional das águas de circulação epidérmica (LIMA,1994), uma vez que possui um resíduo seco de 179 mg/l (PEREIRA-CALDAS, 1851; TORRES *et al.*, 1930-31). Os principais mineralizadores são, nos catiões, o sódio (70.7%) e o ferro (22.0%); nos aniões o cloreto (70.7%) e o bicarbonato (21.9%). As concentrações em que estes iões ocorrem estão desfasadas no contexto das restantes amostras. Assim, face às actuais características do aquífero estudado, parece de difícil explicação alguns destes valores, nomeadamente os relativos ao ferro. Quanto à sílica, parece-nos que o valor de 21.0 mg/l indicado em TORRES *et al.* (1930-31) está sobreavaliado. De facto PEREIRA-CALDAS (1851), refere um teor de ácido silícico de 21.0 mg/l que, expresso em mg/l de SiO<sub>2</sub>, seria de 13.1 mg/l. No entanto, o autor usa a fórmula SiO<sub>3</sub>, o que, recalculado para, SiO<sub>2</sub> daria como resultado 16.6 mg/l. As perdas de dosagem indicadas em PEREIRA-CALDAS (1851) representam 16.8%, pelo que se admite que alguma(s) espécie(s) não tenha(m) sido doseada(s). Note-se ainda que, a partir dos dados de sílica recalculados, a percentagem de perdas estará compreendida entre 19.2% e 21.2%. O valor de temperatura medido na altura (20.5 °C) é ligeiramente inferior ao valor da temperatura do ar (22.7 °C) registado na hora da colheita. Aquele valor poderá indicar que se trata de uma circulação profunda (como é admitido em PEREIRA-CALDAS, 1851). No entanto, admite-se que o facto da temperatura ser relativamente elevada, terá a ver com as características da emergência (profundidade e caudal reduzidos) e com a arquitectura da fonte, a qual apresenta uma estrutura em vão quadrangular de pedra com 5.385mx3.845mx2.141m, tendo na parede sul, local onde ocorre a emergência, uma pequena mina de pouca amplitude (PEREIRA-CALDAS, 1851). Esta última é responsável pela criação de um microclima favorável ao aquecimento da água e, eventualmente, a um incremento da concentração global da solução.

## 5 - MODELO HIDROGEOLÓGICO

A figura 7 representa de uma forma muito esquemática e simplificada um modelo do funcionamento hidrogeológico do sector estudado. Neste modelo salientam-se os mecanismos responsáveis pela ocorrência aleatória de águas férreas. Os estudos realizados mostraram que nesta área podem ocorrer águas com características físico-químicas distintas: (i) águas com teores elevados de ferro e (ii) águas com concentrações muito baixas de ferro.

Como referido no item relativo à Geologia, os níveis ferruginosos observados, assim como as pátinas que recobrem os clastos do depósito, resultam da oxidação e precipitação do ferro. Este terá tido origem na alteração supergénica dos minerais ferromagnesianos constituintes das rochas da região. Os níveis antes referidos ocorrem preferencialmente em determinados pontos do depósito, coincidentes com a zona central do leito de deposição.

A oxidação do ferro ferroso (Fe<sup>2+</sup>) a ferro férrico (Fe<sup>3+</sup>) conduz à formação de óxidos e/ou hidróxidos de ferro (muito pouco solúveis nas condições de pH-Eh existentes) que acabam por precipitar (precipitados ocres).

Durante a infiltração, as águas subterrâneas sofrem modificações físico-químicas assinaláveis. Tais modificações ocorrem fundamentalmente na zona não saturada, ao nível da camada de solo vegetal. De todos os processos decorrentes, importa salientar a decomposição

da matéria orgânica, com consumo de oxigénio e formação de compostos de carbono, azoto e enxofre inorgânicos. A diminuição da concentração de oxigénio na água modifica a sua capacidade oxidante, baixando o valor do potencial redox. A existência de níveis argilo-húmicos em zonas mais profundas, faz diminuir ainda mais o potencial redox, por consumo total do oxigénio, como resultado da oxidação da matéria orgânica. A fracção remanescente desta funciona, então, como dador de electrões reduzindo os óxidos/hidróxidos de ferro a  $Fe^{2+}$ , que fica em solução. Como consequência da acção destes agentes e mecanismos ocorrem águas com teores elevados de ferro. Estas reacções são catalizadas biologicamente por certos microrganismos do solo tais como: *Bacillus circulans*, *B. megaterium*, *B. mesentericus*, *Aerobacter aerogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas liquefaciens*, *Escherichia coli* (KRUMBEIN, 1983) e *Shewenella putrefaciens* (BROCK *et al.*,1994). Exemplos de acção de mecanismos semelhantes foram descritos por JENNE (1977), CHAMP *et al.* (1979), LOVLEY e PHILIPS (1987), CHAPELLE e LOVLEY (1992), SIGG *et al.* (1994), MILLER e DONAHUE (1995), KOSTKA *et al.* (1996).

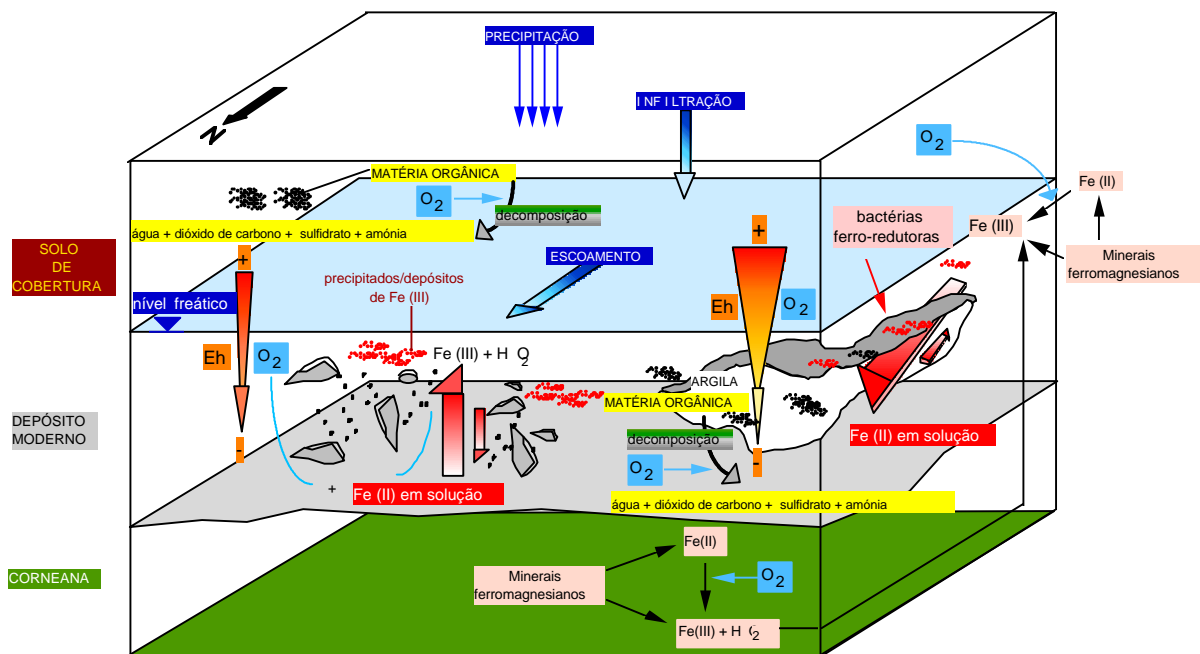


Figura 7 - Representação esquemática do funcionamento hidrogeológico do sector estudado.

## 6 - CONCLUSÕES

O ano hidrológico 1995/1996 pode ser considerado muito húmido, em particular até ao final do mês de Janeiro. Este facto tem repercussões a nível do regime hidrológico, podendo provocar alterações hidrodinâmicas significativas, as quais se irão reflectir no aspecto hidrogeológico, quer por diluição da água do aquífero, quer por mistura de águas.

Os teores de ferro dissolvido, não sendo muito elevados, mostram-se anómalos, fundamentalmente no sub-sector NE da carta da figura 4, onde as águas circulam no depósito com maiores concentrações ferruginosas.

A ocorrência de águas férreas é discreta e está relacionada com condições específicas tais como: ambiente redutor, circulação lenta e caudal reduzido.

## BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, A.; ALMEIDA, J. - *Inventário hidrológico de Portugal. 4º volume (Minho)*. Instituto de Hidrologia de Lisboa, 1988.
- ALMEIDA, F. M., coord. - *Carta das Nascentes Minerais de Portugal*. Escala: 1/1 000 000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1970.
- BROCK, T.D.; MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. - *Biology of Microorganisms*, 7<sup>th</sup> edition, New Jersey, Prentice Hall, 1994.
- BROWN, G. - "Associated Minerals.", in *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, editado por G.W. Brindley e G Brown, London, 1984, pp. 361-410.
- CHAMP, D.C.; GULENS, J.; JACKSON, R.E. - "Oxidation-reduction sequences in ground-water systems". *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 1979, pp. 1466-1472.
- CHAPELLE, F.H.; LOVLEY, D.R. - "Competitive Exclusion of Sulfate Reduction by Fe(III)-Reducing Bacteria: A Mechanism for Producing Discrete Zones of High-Iron Ground Water". *Groundwater*, **30**, 1, 1992, pp. 29-36.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. - *Hidrologia subterranea*. Barcelona, Ed. Omega, 2 tomos, 1983.
- FERREIRA, N.; DIAS, G.; LETERRIER, J.; LOPES NUNES, J. E. - "Rochas ígneas hercínicas da região de Braga-Vieira do Minho (NW de Portugal): cartografia geológica, tipologia granítica e petrogénese", in *Actas da IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa*, Porto, 1993.
- HEITOR, A. M. F. - "Caracterização Físico-Químico e Bacteriológica de Águas de Origem Subterrânea da Bacia do Cávado". *Recursos Hídricos*, **14**, 2-3, 1993, pp. 21-27.
- JENNE, E.E. - "Trace elements sorption by sediments and soil sites and process", in *Symposium on molybdenum in the environment*. editado por Chappel e Peterson, New York, Marcel Dekker, 1977, pp. 425-453.
- KOSTKA, J.E.; STUCKI, J.W.; NEALSON, K.H.; WU, J. - "Reduction of structural Fe(III) in smectite by a pure culture of *Shewanella Putrefaciens* strain MR-1". *Clays and Clay Minerals*, **44**, 4, 1996, pp. 522-529.
- KRUMBEIN, W.E. - *Microbial Geochemistry*. Oxford, Blackwell Scientific Publication, 1983.
- LANGMUIR, D. - *Aqueous environmental geochemistry*. New Jersey, Prentice-Hall, 1997.
- LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. - *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 1992.
- LIMA, A. S.; SILVA, M. O. - "Estudo hidrogeológico dos granitóides da região de Braga (NW de Portugal)". In *Memórias nº4, IV Congresso Nacional de Geologia. Resumos alargados*., editado por Sodrê Borges e M. Marques, 1995a, pp. 461-466.
- LIMA, A. S.; SILVA, M. O. - "Características físico-químicas e aspectos de degradação da qualidade das águas subterrâneas da região de Braga (NW de Portugal)", in *Resumos, 1º Congresso Ibérico sobre Contaminação e Toxicologia Ambiental*, 1995b, p. C-2.
- LIMA, A. - *Hidrogeologia de Regiões Graníticas (Braga - NW de Portugal)*. Tese de Mestrado. Universidade do Minho, 1994.
- LOPES NUNES, J. E.; LIMA, A. S.; PAMPLONA, J. V. - "Águas subterrâneas da Casa de Saúde do Bom Jesus. Estudo Preliminar." Relatório inédito, 1996.

- LOVLEY, D.R; PHILIPS, E.J.P. - "Competitive mechanisms for inhibition of sulfate reduction and methane production in the zone of ferric iron reduction in sediments". *Appl. Environ. Micro.*, **54**, 1987, pp. 2636-2641.
- MILLER, R.W.; DONAHUE, R.L. - *Soils in our environment*. Prentice-Hall Inc., 1995.
- PEREIRA-CALDAS, J.J. - *Ensaio analytico das Águas Férreas de Santiago de Fraião nos subúrbios de Braga..* Braga, 1851.
- SIGG, L.; STUMM, W.; BEHRA, P. - *Chimie des milieux aquatiques - chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement..* 2<sup>e</sup> édition, Paris, Masson, 1994.
- TEIXEIRA, C.; MEDEIROS, A. C. - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. *Notícia explicativa da folha 5-D (Braga)*. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 1973.
- TORRES, A.; NARCISO, A.; LUZES, O. - *Le Portugal Hydrologique et Climatique*. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos e Instituto de Hidrologia e Climatologia de Lisboa, 1930-31.