

LETÍCIA MÓNICA RAPOSO CABRAL

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DO FLANCO NORTE DO VULCÃO
CENTRAL DO FOGO (SÃO MIGUEL - AÇORES)**



**DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**

2013

LETÍCIA MÓNICA RAPOSO CABRAL

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DO FLANCO NORTE DO VULCÃO
CENTRAL DO FOGO (SÃO MIGUEL – AÇORES)**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À UNIVERSIDADE DOS AÇORES PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM VULCANOLOGIA E RISCOS
GEOLÓGICOS**

ORIENTADOR:

**PROFESSOR DOUTOR JOSÉ VIRGÍLIO DE MATOS FIGUEIRA CRUZ
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**

CO-ORIENTADOR:

**PROFESSOR DOUTOR RUI MOREIRA DA SILVA COUTINHO
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**



**DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**

2013

*Aos meus pais, Manuel e Maria da Paz e
aos meus irmãos, Carolina e Frederico.*

Índice

Lista de Figuras	III
Lista de Tabelas	VII
Agradecimentos.....	VIII
Resumo	X
Abstract	XII
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos do trabalho.....	1
1.2. Metodologia Geral	2
2. Geologia do arquipélago.....	4
2.1. Localização geográfica	4
2.2. Enquadramento geodinâmico	4
2.3. Sismicidade e Vulcanismo	7
3. Caracterização da área de estudo	12
3.1. Localização Geográfica	12
3.2. Enquadramento Geológico	12
3.2.1. Geomorfologia	12
3.2.2. Principais estruturas tectónicas	14
3.2.3. Vulcanoestratigrafia	14
3.3. Uso do Solo.....	15
4. Enquadramento Climático.....	20
5. Hidrogeologia	24
5.1. Hidrogeologia de regiões vulcânicas.....	24
5.2. Hidrogeologia de ilhas vulcânicas.....	25
6. Levantamento Hidrogeológico	31
6.1. Inventário dos pontos de água subterrânea.....	31
6.2. Inventário dos pontos de água superficial.....	39
7. Hidrogeoquímica.....	41
7.1. Metodologia.....	41
7.2. Água Subterrânea.....	45
7.2.1. Parâmetros Físicos.....	47
7.2.2. Parâmetros Químicos	51
7.2.3. Cátions	54
7.2.4. Ânions	59
7.2.5. Discussão de Resultados	65

7.2.6. Índices de Saturação	84
7.3. Água Superficial	88
7.3.1. Parâmetros Físicos.....	90
7.3.2. Parâmetros Químicos	91
7.3.3. Cátions	92
7.3.4. Ânions	93
7.3.5. Discussão de resultados.....	95
7.4. Contaminação por Nitratos	99
8. Considerações Finais	103
9. Bibliografia.....	111
ANEXOS.....	112
ANEXO I - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA	112
ANEXO II - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	112
ANEXO III - ÍNDICES DE SATURAÇÃO RELATIVO ÀS FASES MINERAIS INVESTIGADAS PELO PROGRAMA PHREEQ C	112

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Localização geográfica do Arquipélago dos Açores (Costa, 2006).....	4
Figura 2.2- Plataforma dos Açores (<i>Needham e Francheteau, 1974</i>).	5
Figura 2.3 - Principais estruturas tectónicas da região dos Açores. Legenda: CMA - Crista Média Atlântica; ZFEA - Zona de Fractura Este dos Açores; FG - Falha Gloria; RT - Rift da Terceira. (<i>Pacheco et al., 2011</i>).	6
Figura 2.4 - Carta epicentral dos eventos registados no arquipélago dos Açores entre 1980 e Junho de 2006. (<i>SIVISA, 2006</i>).	7
Figura 2.5 Localização dos principais sismos históricos na região dos Açores (dados de <i>Silveira, 2002; Silva, 2005</i>).	9
Figura 2.6 – Localização das erupções vulcânicas históricas que se tem conhecimento na região da Plataforma dos Açores (<i>Carmo, 2004, modificado de Madeira e Brum da Silveira, 2003</i>).	11
Figura 3.1 – Localização da área de estudo.	12
Figura 3.2 – Unidades geomofológicas principais propostas por <i>Zbyszewski et al. (1958, in Wallenstein (1999))</i> . 1 - Maciço Vulcânico das Sete Cidades; 2 – Região dos Picos; 3 – Maciço Vulcânico da Serra de Água de Pau; 4 – Planalto da Achada das Furnas; 5 – Vulcão das Furnas; 6 – Vulcão da Povoação; 7 – Região da Tronqueira e do Nordeste e 8 - Plataforma Litoral do Norte.	13
Figura 3.3 - Principais estruturas tectónicas da ilha de S. Miguel (<i>Gaspar et al., 1990; Queiroz, 1997; Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000; Carmo, 2004; Carmo et al., 2009</i>). ..	14
Figura 3.4 - Percentagem de ocupação do solo da Região Açores (<i>Cruz et al., 2007</i>).	17
Figura 3.5 – Percentagem de ocupação do solo da ilha de São Miguel (<i>Cruz et al., 2007</i>).	17
Figura 3.6 – Carta de ocupação do solo da ilha de São Miguel. (<i>DROTRH-SRAM, 2007</i>).	18
Figura 3.7 – Excerto da carta de ocupação do solo da ilha de São Miguel para a área de estudo. (<i>Adaptado de DROTRH-SRAM, 2007</i>).	19
Figura 4.1 - Modelo CIELO – expressão espacial da temperatura na ilha de São Miguel (<i>AHA-SRAM, 2011</i>).	22
Figura 4.2 - Modelo CIELO – expressão espacial da humidade relativa na ilha de São Miguel (<i>AHA-SRAM, 2011</i>).	23
Figura 4.3 - Modelo CIELO – expressão espacial da precipitação na ilha de São Miguel (<i>AHA-SRAM, 2011</i>).	23
Figura 5.1 – Delimitação das massas de água subterrânea no arquipélago dos Açores (<i>Cruz et al., 2011</i>).	28

Figura 5.2 - Densidade associada à distribuição dos pontos de água por ilha (AHA-SRAM, 2011).....	29
Figura 5.3 – Distribuição das nascentes e furos no arquipélago dos Açores (Cruz, <i>et al.</i> , 2011).	29
Figura 6.1 – Histograma da frequência de classes de altitude.	33
Figura 6.2 – Localização dos pontos de água subterrânea inventariados e amostrados	34
Figura 6.3 – Distribuição das diferentes litologias por ponto de água. (pp – Depósitos de pedra pomes; L1 – Lapilli pomítico).....	36
Figura 6.4 - Representação dos caudais medidos em cada amostragem por ponto de água.	38
Figura 6.5 – Localização dos pontos de água superficial inventariados e amostrados	40
Figura 7.1 - Cromatograma resultante da análise de uma amostra com os quatro elementos aniônicos analisados.	44
Figura 7.2 – Diagrama de Piper das amostras de águas subterrâneas analisadas na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012.....	46
Figura 7.3 - Diagrama de Schoeller das amostras de águas subterrâneas analisadas na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012.....	47
Figura 7.4 – Temperatura da água subterrânea nas várias amostras recolhidas em janeiro/fevereiro 2012, em função da condutividade elétrica.....	48
Figura 7.5 – Temperatura da água subterrânea nas várias amostras recolhidas em março/abril de 2012, em função da condutividade elétrica.....	49
Figura 7.6 – Histograma com distribuição dos valores de condutividade elétrica (janeiro/fevereiro de 2012).....	50
Figura 7.7 - Histograma com a distribuição dos valores de pH (março/abril de 2012). 52	
Figura 7.8 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em sódio (junho de 2012).....	55
Figura 7.9 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em potássio (junho de 2012).....	56
Figura 7.10 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em cálcio (junho de 2012).....	57
Figura 7.11 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em magnésio (junho de 2012).	58
Figura 7.12 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em cloreto (janeiro/fevereiro de 2012).....	59
Figura 7.13 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em bicarbonato (junho de 2012).	61
Figura 7.14 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em sulfato (junho de 2012).....	63

Figura 7.15 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em sulfato inferiores a 140 mg/L (junho de 2012).	63
Figura 7.16 – Relação entre os valores médios dos principais cátions e a condutividade elétrica, com as respectivas retas de correlação linear. (a) sódio vs. condutividade; b) cálcio vs. condutividade; c) magnésio vs. condutividade; d) potássio vs. condutividade).....	66
Figura 7.17 – Relação entre os valores médios dos principais aniões e a condutividade elétrica, com as respectivas retas de correlação linear. (a) bicarbonato vs. condutividade; b) cloreto vs. condutividade; c) sulfato vs. condutividade; d) fluoreto vs. condutividade; e) nitrato vs. condutividade).	69
Figura 7.18 – Relação entre a condutividade e a temperatura nas águas subterrâneas analisadas (janeiro/fevereiro de 2012).	70
Figura 7.19 – Relação entre a concentração de sílica e a temperatura nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	71
Figura 7.20– Relação entre as concentrações de sódio e de bicarbonato nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	72
Figura 7.21 – Relação entre as concentrações de cálcio e de bicarbonato nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	73
Figura 7.22 – Relação entre as concentrações de magnésio e de bicarbonato nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	74
Figura 7.23 - Relação entre as concentrações de bicarbonato e de sulfato nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	75
Figura 7.24 - Relação entre as concentrações de cloreto e de sulfato nas águas subterrâneas analisadas (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – Fluido geotérmico, <i>in</i> Carvalho <i>et al.</i> , 2006).....	76
Figura 7.25 - Relação entre a condutividade e a razão entre o sulfato e o cloreto nas águas subterrâneas analisadas (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – fluido geotérmico <i>in</i> Carvalho <i>et al.</i> , 2006).....	77
Figura 7.26 - Relação entre as concentrações de sódio e de cloreto nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	77
Figura 7.27 - Relação entre as concentrações de sódio e de cloreto nas águas subterrâneas analisadas. (CL1 – Fluido geotérmico, <i>in</i> Carvalho <i>et al.</i> , 2006; Água do mar: dados de Brown <i>et al.</i> , 2002).	78
Figura 7.28 - Relação entre as concentrações de cálcio e de magnésio nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	79

Figura 7.29 - Relação entre as concentrações de sódio e de magnésio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012). (Água do mar: dados de Brown <i>et al.</i> , 2002).....	80
Figura 7.30 - Relação entre as concentrações de sódio e de potássio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – Fluido geotérmico <i>in</i> Carvalho <i>et al.</i> , 2006; Água do mar: dados de Brown <i>et al.</i> , 2002).....	81
Figura 7.31 - Relação entre as concentrações de sódio e de cálcio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).	82
Figura 7.32 - Relação entre as concentrações de fluoreto e de sódio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – Fluido Geotérmico <i>in</i> Carvalho <i>et al.</i> , 2006).	83
Figura 7.33 – Representação gráfica da variação do log (SI) relativo à calcite em função do pH das águas subterrâneas.	85
Figura 7.34 - Representação gráfica da variação do log (SI) relativo à dolomite em função do pH das águas subterrâneas.	85
Figura 7.35 - Representação gráfica da variação do Log (SI) relativo à calcedónia em função da concentração de sílica das águas subterrâneas.....	86
Figura 7.36 - Representação gráfica da variação do Log (SI) relativo ao quartzo em função da concentração de sílica das águas subterrâneas.....	87
Figura 7.37 - Representação gráfica da variação do Log (SI) relativo à sílica amorfa em função da concentração de sílica das águas subterrâneas.....	87
Figura 7.38 – Modelo conceptual para a química da água no rio da Ribeira Grande (Freire <i>et al.</i> , 2013).	88
Figura 7.39 - Diagrama de Piper das amostras de água superficial analisadas (março/abril de 2012).....	89
Figura 7.40 - Diagrama de Schoeller das amostras de água superficial analisadas (março/abril de 2012).....	90
Figura 7.41 - Relação entre os valores médios da condutividade por ponto de água e a altitude relativa dos pontos de amostragem (ref ^a 58 – ponto de água mais a jusante; ref ^a 50 – ponto de água mais a montante).	95
Figura 7.42 - Relação entre os valores médios dos principais catiões e a altitude relativa dos pontos de amostragem (ref ^a 58 – ponto de água mais a jusante; ref ^a 50 – ponto de água mais a montante). (a) sódio; b) cálcio; c) magnésio; d) potássio).	96
Figura 7.43 - Relação entre os valores médios dos principais aniões e a altitude relativa dos pontos de amostragem (ref ^a 58 – ponto de água mais a jusante; ref ^a 50 – ponto de água mais a montante). (a) bicarbonato; b) cloreto; c) sulfato; d) fluoreto)...	98
Figura 7.44 – Distribuição dos valores médios de nitrato por ponto de água.	102

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais sismos históricos sentidos no arquipélago dos Açores (Coutinho, 2000).....	8
Tabela 2.2 – Erupções históricas nos Açores (Adaptado de Carmo, 2004).....	10
Tabela 3.1 – Nomenclatura e descrição das classes de ocupação do solo (Adaptado de Cruz <i>et al.</i> , 2007; DROTRH-SRAM, 2007).	16
Tabela 5.1 – Distribuição do total dos pontos de água e dos pontos de água captados pelas massas de água da ilha de São Miguel (AHA-SRAM, 2011).	30
Tabela 6.1 – Referência, designação, localização e altitude atribuída aos pontos de água subterrânea inventariados e amostrados. (C.R.G. – Caldeiras da Ribeira Grande; C.M.R.G. – nascentes captadas pela Câmara Municipal da Ribeira Grande).	32
Tabela 6.2 – Caudais medidos nas amostragens realizadas e litologia associadas aos pontos de água subterrânea inventariados (C.R.G. – Caldeiras da Ribeira Grande; C.M.R.G. – Câmara Municipal da Ribeira Grande; pp – depósitos de pedra pomes; 11 – Lapilli pomítico).	35
Tabela 6.3 - Referência, designação e localização atribuída aos pontos de água superficial inventariados e amostrados.	39
Tabela 7.1 – Dados estatísticos referentes aos parâmetros físicos das águas amostradas.....	49
Tabela 7.2 - Dados estatísticos referentes aos parâmetros químicos das águas amostradas.....	53
Tabela 7.3 – Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos catiões principais das águas subterrâneas analisadas (valores em mg/L).	57
Tabela 7.4 - Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos aniões principais das águas subterrâneas analisadas (valores em mg/L).	61
Tabela 7.5 - Dados estatísticos e valores extremos referentes aos parâmetros físicos das águas superficiais amostradas.	91
Tabela 7.6 - Dados estatísticos e valores extremos referentes aos parâmetros químicos das águas superficiais amostradas.....	92
Tabela 7.7 - Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos catiões principais das águas superficiais analisadas (valores em mg/L).	93
Tabela 7.8 - Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos aniões principais das águas superficiais analisadas (valores em mg/L).	94
Tabela 7.9 - Dados estatísticos e valores extremos referentes aos valores de nitrato das águas amostradas.....	100

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação não seria possível sem a colaboração de uma série de pessoas e entidades que desde o primeiro dia se mostraram disponíveis para que a concretização da mesma fosse possível. De uma forma especial quero agradecer:

À Universidade dos Açores, na pessoa do Magnífico Reitor, Professor Doutor Jorge Medeiros e do anterior Reitor, Professor Doutor Avelino de Freitas Meneses, por proporcionarem as condições necessárias à lecionação do Mestrado.

Ao Professor Doutor Nicolau Wallenstein na qualidade de coordenador da VI edição do Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos da Universidade dos Açores, pelo seu empenho, dedicação e disponibilidade mostrada ao longo de todo o mestrado, para que tudo corresse da melhor forma possível.

Ao Professor Doutor José Virgílio Cruz, enquanto orientador científico, pelo incentivo, pela sugestão do tema de tese e pela sua disponibilidade, pelo interesse demonstrado em cada etapa de trabalhos, pelos seus ensinamentos, em particular na área da hidrogeoquímica, pelo acompanhamento constante do trabalho, discussão e sugestões que foi sempre apresentando, pela motivação e apoio a cada dificuldade que surgiu.

Ao Professor Doutor Rui Coutinho pela coorientação científica da presente dissertação, pelo incentivo, pela sua disponibilidade, pela troca de ideias, pela sua colaboração preciosa no contacto com a Câmara Municipal da Ribeira Grande assegurando a possibilidade de realização de todo o trabalho de campo, pelas revisões e por todas as sugestões que apresentou no decorrer do presente trabalho.

À Câmara Municipal da Ribeira Grande, nas pessoas do Vereador Dr. Fernando Sousa e do Eng.º Bruno Rangel, que me facultaram o acesso a todas as nascentes de abastecimento público daquele concelho e aos funcionários do Serviço da Águas que acompanharam e colaboraram nas campanhas de amostragem realizadas.

Ao Rui Mestre, funcionário da Unidade Científica de Hidrogeologia e Geologia Ambiental, que ao longo de todo este percurso se tornou um amigo, que me acompanhou em todos os trabalhos, a quem devo grande parte do trabalho de campo e laboratório realizado, fulcral para obtenção dos resultados que conduziram à redação desta dissertação.

Aos colegas César Andrade, Pedro Freire e Andrea Costa pela colaboração na obtenção de bibliografia, pelo apoio no tratamento dos dados no programa Phreeq C e no programa ArcGis e pelas sugestões apresentadas.

Aos docentes do Departamento de Geociências que lecionaram o curso de mestrado, por tudo o que aprendi e reaprendi, não esquecendo os docentes e os investigadores convidados que em muito contribuíram, enriquecendo a qualidade e a diversidade de conteúdos lecionados.

À colega e amiga Diana Ponte pela sua amizade, pelo apoio e entreaajuda, pela partilha dos momentos bons e menos bons e pelas sugestões apresentadas.

À Joana Fragoso, ao Paulo Lima, à Chiara Bettelli, ao Tiago Carvalho, à Rita Ribeiro e ao João Carvalho pela amizade, compreensão, incentivo e apoio incondicional, especialmente nos momentos mais difíceis.

A toda a minha família, e de um modo muito especial aos meus pais, pela educação e pelos valores que me transmitiram, pelo incentivo e apoio incondicional, em todas as circunstâncias da vida, que contribuíram em grande parte para o que sou hoje, e aos meus irmãos por serem os irmãos e amigos que são.

Resumo

O estudo hidrogeológico do flanco norte do vulcão central do Fogo (São Miguel, Açores) consistiu na caracterização hidrogeoquímica de 46 pontos de água subterrânea, complementada pelo estudo de 12 pontos de água superficial na bacia hidrográfica da Ribeira Grande. Com o propósito de compreender a evolução hidrogeoquímica das águas, realizaram-se três amostragens, entre janeiro e junho de 2012, para registo da variação dos parâmetros físico-químicos das águas e para determinação dos catiões e aniões em solução.

A caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas no que diz respeito à temperatura (12,3°C - 82,3°C) contempla um número significativo de águas termais ortotermais e hipotermais. Os valores da condutividade média determinados em cada amostragem (respetivamente iguais a 330 $\mu\text{S/cm}$, 291 $\mu\text{S/cm}$ e 425 $\mu\text{S/cm}$) indicam a presença de águas pouco mineralizadas. Os valores de pH registados (entre 2 e 7 unidades de pH) indicam a presença de águas neutras e de águas com um carácter ácido muito pronunciado (fumarolas). Quanto à dureza total, de um modo geral são classificadas como águas brandas, apresentando valores de dureza total inferiores a 50 mg CaCO_3/L .

A avaliação do estado de equilíbrio das águas subterrâneas revela a subsaturação destas em calcite, dolomite e sílica amorfa e a sobressaturação em quartzo. No que respeita ao índice de saturação em calcedónia, encontram-se águas subsaturadas e sobressaturadas.

As fácies hidrogeoquímicas predominantes nas águas subterrâneas são cloretadas sódicas, bicarbonatadas sódicas, sendo que se encontram fácies sulfatadas sódicas e águas cuja composição química se apresenta como uma mistura das fácies anteriormente referidas.

Os principais processos hidrogeoquímicos modificadores da composição das águas subterrâneas são a interação água-rocha (em particular a dissolução de silicatos), a absorção de voláteis vulcânicos, a mistura com fluidos hidrotermais e o aquecimento por vapor.

Por sua vez, as águas superficiais apresentam fácies hidrogeoquímicas bicarbonatadas sódicas a cloretadas sódicas, e, um ponto de recolha com fácies sulfatada sódica (ref^a14). A mistura com água subterrânea, enriquecida em

determinados elementos, é a principal justificações para a evolução hidrogeoquímica apresentada pelas águas superficiais estudadas, não obstante a influência dos fatores ambientais, que também se fazem notar.

Os resultados obtidos foram, ainda, relacionados com as classes de uso do solo presentes na área, a fim de se compreender a influência destas no quimismo apresentado pelas águas, mais propriamente nas concentrações das mesmas em nitratos. Considerando os valores médios de nitrato, todas as águas analisadas apresentam valores inferiores aos limites definidos por lei.

Abstract

The hydrogeological study of the northern flank of the central volcano of Fogo (São Miguel, Azores) consisted in the geochemical characterization of 46 groundwater springs, complemented by the study of 12 surface water sampling stations located in the Ribeira Grande watershed. In order to understand the hydrogeochemical evolution of the groundwater, samples were collected in three different occasions, between January and June 2012, to record the variation of physical-chemical parameters and the cations and anions content.

The hydrogeochemical characterization of groundwater with respect to temperature (12.3°C - 82.3°C) offers a significant number of cold to thermal waters. The electrical conductivity average measured in each sample (respectively equal to 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 291 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 425 $\mu\text{S}/\text{cm}$) indicates poorly mineralized waters. Recorded pH values (between 2 and 7 pH units) indicate the presence of neutral waters and waters with a very pronounced acid character (steam-heated pools). As for total hardness, waters are generally classified as soft water, with values of total hardness of less than 50 mg CaCO_3/L .

The evaluation of the equilibrium state of groundwater reveals they are undersaturated in calcite, dolomite, and amorphous silica and oversaturated in quartz. Regarding to the saturation index in chalcedony there are undersaturated and oversaturated waters in the solid phase.

The dominant hydrogeochemical facies in groundwater are Na-Cl, Na- HCO_3 and Na- SO_4 water types, and waters whose chemical composition is presented as a mixture of the aforementioned water types.

The main hydrogeochemical processes modifying the composition of the groundwater is the water-rock interaction (in particular silicate weathering), the absorption of volcanic gases, mixing with hydrothermal fluids and steam heating.

The main water types in rivers are from Na-Cl to Na- HCO_3 , despite a sampling location, which is from the Na- SO_4 category (ref. 14). Mixing with groundwater, enriched in certain dissolved species, is the main justification for hydrogeochemical evolution presented by this water, despite the influence of environmental factors, which also are remarkable.

Results were also related to the land use in the study area in order to understand their influence on surface and groundwater chemistry, more specifically the nitrate concentrations. Considering the mean values of nitrate, all water samples have values below the limits set by law.

1. Introdução

1.1. Objetivos do trabalho

Os objetivos primordiais da presente dissertação consistiram na realização de um inventário de pontos de água superficiais e subterrâneos da vertente norte do vulcão central do Fogo, pretendendo-se caracterizar a área do ponto de vista hidrogeológico e hidrogeoquímico e perspetivar a utilização destas águas no âmbito de monitorização ambiental e vulcanológica.

A presente dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos, sendo que no presente capítulo são descritos os objetivos do trabalho e a metodologia geral utilizada para atingir os objetivos. Nos três capítulos subsequentes faz-se referência à geologia do arquipélago, à caracterização da área de estudo e, ainda, um breve enquadramento climatológico dos Açores.

No sexto e sétimo capítulo é apresentado o inventário dos pontos de água existentes na área de estudo, bem como os respetivos resultados da caracterização hidrogeoquímica realizada. Nestes últimos capítulos é ainda efetuado o tratamento e integração dos dados, de forma a definir os principais processos hidrogeoquímicos (interação água-rocha, variações induzidas pela atividade vulcânica, variações sazonais, poluição introduzida pela atividade antropogénica e outras fontes de poluição) e estabelecer as relações entre as águas superficiais e subterrâneas.

A água assume um papel primordial no quotidiano das sociedades, e na Europa cerca de 65% da água subterrânea é destinada ao consumo humano. No que concerne ao arquipélago dos Açores, cerca de 98% da água consumida é de origem subterrânea (Cruz & Coutinho, 1998) e no caso específico da ilha de São Miguel toda a água consumida é de origem subterrânea.

O enquadramento geológico do arquipélago dos Açores permite a existência de diversas manifestações hidrotermais, sendo que por todo o arquipélago existem nascentes termais, como também campos fumarólicos dispersos, especialmente nas ilhas de S. Miguel, Terceira, Pico, Faial, Graciosa e Flores. A composição inicial das águas subterrâneas será de origem meteórica e a composição final derivará das reações com minerais e gases, bem como da atuação de processos modificadores (Carvalho, 1999).

Em regiões de vulcanismo ativo, como é o caso do arquipélago dos Açores, a ocorrência de sistemas hidrotermais em profundidade afeta, também, a composição química das águas de circulação mais superficial. A contaminação destas por águas termais, vapor e gases, que ascendem de profundidade, é o principal fator de alteração do quimismo das águas. É frequente existirem grandes quantidades de CO₂ e algum H₂S que provocam uma rápida alteração e dissolução das rochas, especialmente a temperaturas elevadas (Carvalho, 1999)

Por aqui se vê a importância que o estudo da hidrogeoquímica apresenta na monitorização do estado qualitativo e quantitativo das águas, não obstante o facto de também assumir elevada relevância na monitorização dos sistemas vulcânicos ativos, uma vez que uma das fontes para se compreender os processos geoquímicos que ocorrem num dado sistema vulcânico, é estudar o quimismo da água e das substâncias nela contidas, pois a composição química da água subterrânea depende da interação água-rocha, ocorrida durante a sua permanência nos aquíferos (Cruz, 1992)

1.2. Metodologia Geral

A metodologia geral da presente dissertação assentou essencialmente em quatro fases, levadas a termo, não necessariamente pela ordem apresentada. Numa primeira fase procedeu-se à recolha e elementos bibliográficos relativos à hidrogeologia da área em estudo, mediante a consulta de acervos históricos e publicações mais recentes.

Numa segunda fase foi efetuado um enquadramento geológico e hidrogeológico dos pontos de água presentes na área, mediante um levantamento de campo de todos os pontos de água subterrânea e dos pontos de água superficial selecionados para o presente estudo. Para tal, procedeu-se à localização pormenorizada dos pontos de água e à caracterização do enquadramento vulcanológico e hidrogeológico dos mesmos.

Em concomitância com a fase anterior e posteriormente procedeu-se à realização de amostragens periódicas trimestrais e análises químicas das águas de superfície e subterrâneas. Para o efeito, no campo procedeu-se ao registo de parâmetros como a temperatura, o pH, e condutividade com recurso a medidores portáteis e à determinação da alcalinidade e o CO₂ livre, através de titulações. Em laboratório, aplicaram-se técnicas de análise de cations por absorção atómica, determinação de

aniões por cromatografia iônica e determinação de elementos traço por ICP-MS. Esta última determinação foi efetuada com recurso a laboratório externos.

Na fase final procedeu-se ao tratamento e integração dos dados de forma a definir e caracterizar os principais processos hidrogeoquímicos, e acessoriamente estabelecer relações entre o escoamento superficial e subterrâneo, como por exemplo, variações induzidas pela atividade vulcânica, poluição antropogénica e variações que possam ser consideradas sazonais.

2. Geologia do arquipélago

2.1. Localização geográfica

O arquipélago dos Açores, localizado em pleno Oceano Atlântico Norte, é composto por 9 ilhas e diversos ilhéus de origem vulcânica, que se distribuem segundo as latitudes 37-40° N e longitudes 25-31°W (Fig. 2.1). Neste arquipélago, as ilhas encontram-se distribuídas por três grupos, em função da sua posição geográfica: o grupo Ocidental composto pelas ilhas de Flores e Corvo; o Grupo Central constituído pelas ilhas Terceira, Graciosa, São Jorge, Pico e Faial, e o grupo Oriental representado pelas ilhas de São Miguel e Santa Maria.

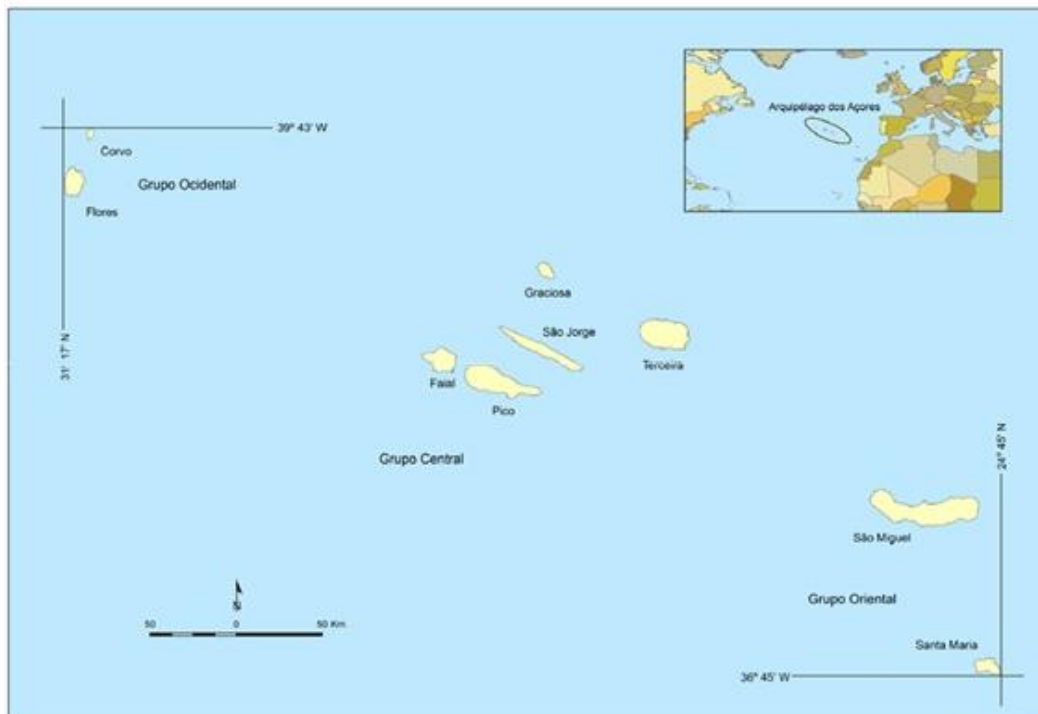


Figura 2.1 - Localização geográfica do Arquipélago dos Açores (Costa, 2006).

2.2. Enquadramento geodinâmico

O arquipélago dos Açores localiza-se numa região complexa do ponto de vista geodinâmico, estando a sua génese associada à abertura do Oceano Atlântico. Encontra-se na zona de confluência de três importantes placas litosféricas: a placa norte americana, placa euroasiática e a placa africana ou núbica, e de um conjunto de

acidentes tectónicos, responsáveis pela atividade sísmica e vulcânica atuante no arquipélago

Geomorfologicamente, o arquipélago encontram-se na designada plataforma dos Açores que corresponde a uma área definida pela batimétrica dos 2000 metros (Needham e Francheteau, 1974), com uma forma aproximadamente triangular (Fig. 2.2). Estende-se segundo uma orientação aproximadamente WNW – ESE, apresentando um conjunto de fossas (depressões), bancos submarinos (cristas imersas) e as próprias ilhas (cristas emersas).

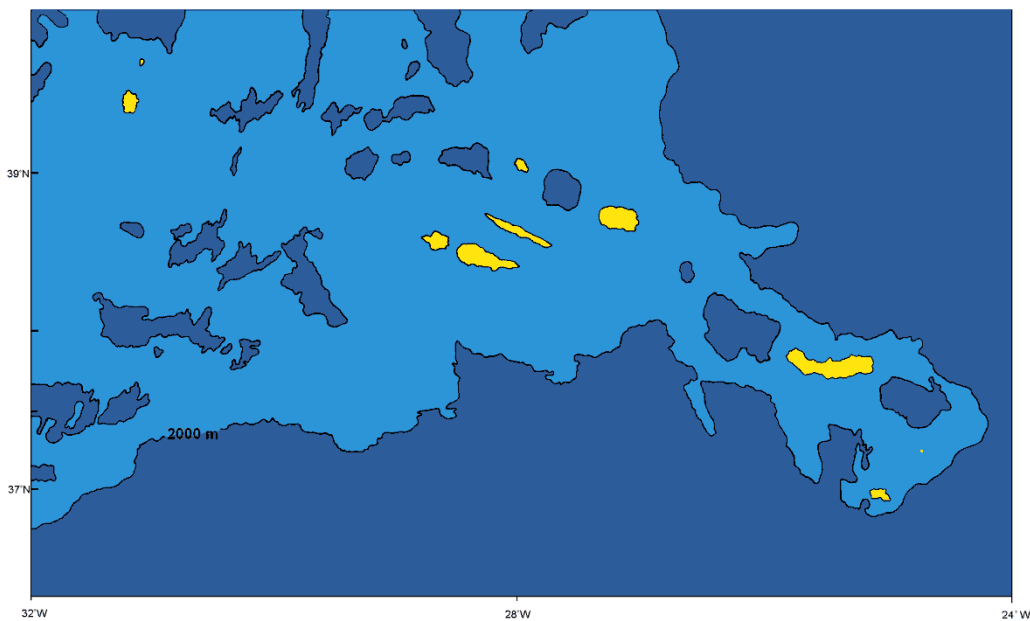


Figura 2.2- Plataforma dos Açores (Needham e Francheteau, 1974).

Sob o ponto de vista geoestrutural a dinâmica regional dos Açores é condicionada pela sua proximidade à junção tripla e pela presença de diversas estruturas tectónicas, sendo que as mais importantes são a Crista Média Atlântica, a Zona de Fractura Este dos Açores e o *Rift* da Terceira (Fig. 2.3).

A Crista Média Atlântica é uma estrutura tectónica com uma componente distensiva pura, sísmicamente ativa, que separa a placa norte americana, a oeste, das placas euroasiática e africana a leste. Segundo Carmo (2004), a Crista Média Atlântica apresenta uma orientação azimutal de 10° a norte da latitude 39°10'N, infletindo para 20° a sul da latitude 38°40'N.

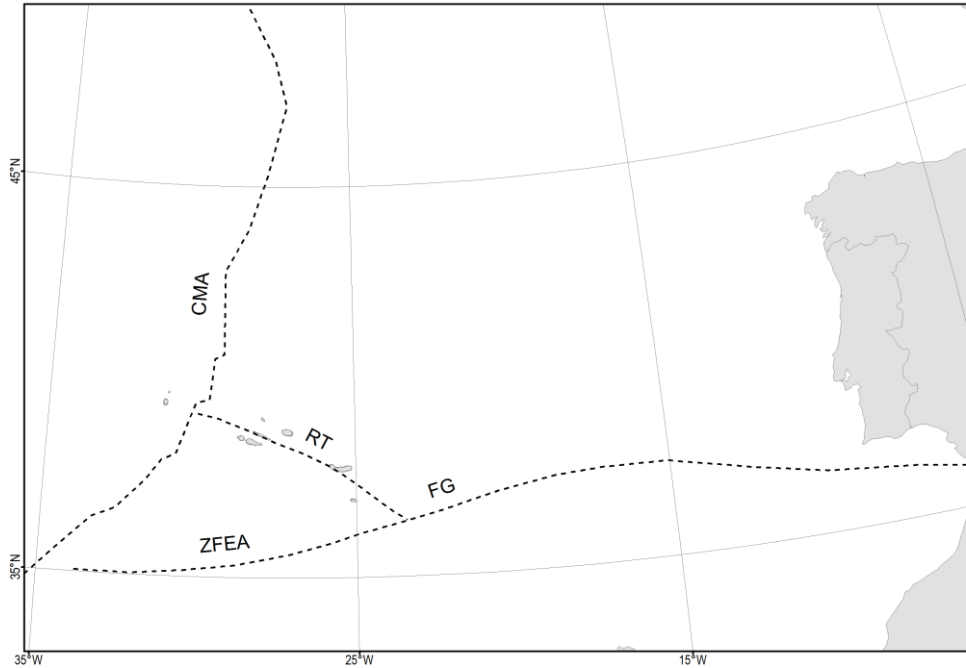


Figura 2.3 - Principais estruturas tectónicas da região dos Açores. Legenda: CMA - Crista Média Atlântica; ZFEA - Zona de Fractura Este dos Açores; FG - Falha Gloria; RT - Rift da Terceira. (Pacheco *et al.*, 2011).

A Zona de Fractura Este dos Açores é um acidente tectónico de direcção aproximada E-W que se estende desde a Crista Média Atlântica até próximo da ilha de Santa Maria, prolongando-se para leste sob a forma de Falha GLORIA. Este acidente tectónico é caracterizado por um desligamento direito, que atualmente se apresenta inativo ou com um grau de atividade muito baixo (Madeira, 1998) e materializa a separação da placa euroasiática da placa africana.

O Rift da Terceira, de orientação geral WNE-ESE estende-se desde a Crista Média Atlântica até ao extremo oeste de Falha GLORIA, estando materializado pelo alinhamento de uma série de elevações e depressões tectónicas, resultantes da componente distensiva e de desligamento que este apresenta. Numa análise morfológica, em resultado da tectónica, de ocidente para oriente é possível a identificação da Bacia Oeste da ilha Graciosa, ilha Graciosa, Bacia Este da ilha Graciosa, ilha Terceira, Fossa Norte do Hirondele, Banco D. João de Castro, Fossa Sul do Hirondele, ilha de São Miguel, Bacia da ilha de São Miguel, ilhéus das Formigas e Fossa das Formigas.

2.3. Sismicidade e Vulcanismo

A região dos Açores é caracterizada por uma intensa atividade sísmica, localizada ao longo dos principais acidentes tectónicos, referidos no subcapítulo anterior, marcada pela ocorrência diária de muitos microssismos (i.e. eventos de magnitude inferior a 3), ocorrendo no entanto eventos de magnitude intermédia, e, ocasionalmente eventos com magnitude superior a 5 na Escala de Richter.

Segundo França *et al.* (2003), em 1980, com a instalação de uma rede sismográfica de alta sensibilidade nos Açores verificou-se a existência de diversas zonas preferencialmente sismogénicas que se evidenciam pela sua elevada sismicidade, com sismos muitas vezes de intensidade superior a grau V, como é o caso da zona a W do Faial, a Fossa Oeste da Graciosa, a Crista Submarina Leste da Terceira, a Fossa Hirondelle, a zona central de S. Miguel, a Fossa da Povoação e a região dos ilhéus das Formigas (Fig. 2.4).

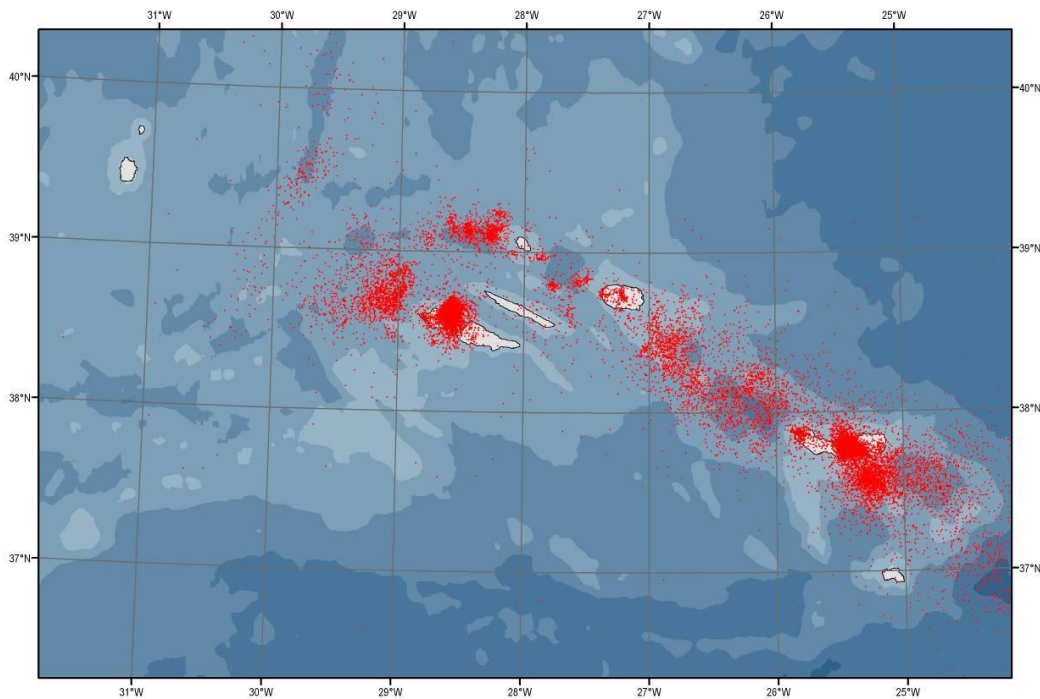


Figura 2.4 - Carta epicentral dos eventos registados no arquipélago dos Açores entre 1980 e Junho de 2006. (SIVISA, 2006).

Esta atividade tem provocado um número significativo de sismos sentidos, alguns com impacte importante, como demonstram as intensidades dos principais sismos sentidos nos Açores após a sua descoberta e povoamento, no séc. XV (tabela 2.1). A partir da

2. Geologia do Arquipélago

tabela 2.1 é possível enumerar um conjunto de 22 eventos, com intensidades superiores a VII na Escala de Mercalli Modificada (MM-56), que tiveram um impacto significativo nas ilhas dos Açores, dos quais 6 afetaram de modo especial a ilha de São Miguel. Na figura 2.6 encontram-se representados os 22 eventos anteriormente referidos, com a sua localização pelo arquipélago. Também é de assinalar a existência de crises sísmicas de natureza vulcano-tectónica associadas a erupções vulcânicas ou à instalação de corpos magmáticos sub-superficiais.

Tabela 2.1 - Principais sismos históricos sentidos no arquipélago dos Açores (Coutinho, 2000).

Data	Intensidade	Ilha mais afetada	Zona mais afetada	Magnitude	Consequências
1522-10-22	X	S. Miguel	Vila Franca do Campo		Cerca de 5000 vítimas mortais; Grandes destruições.
1547-05-17	(?)	Terceira			Algumas mortes
1591-07-26	(?)	S. Miguel	Vila Franca		Grandes destruições
1614-05-24	X-XI (?)	Terceira	Praia da Vitória		Destruição quase total
1730-06-13	IX-X (?)	Graciosa	Luz e Praia		Destruição quase total
1757-07-09	XI	S. Jorge	Calheta		Cerca de 1000 mortes. Grandes destruições
1800-06-24	VII-VIII	Terceira	Vila Nova e S. Sebastião		Grandes destruições
1801-01-26	VIII-IX	Terceira	Cabo da Praia e Fonte Bastardo		Grandes destruições
1837-01-21	IX (?)	Graciosa	Luz e Praia		Destruição quase total
1841-06-15	IX	Terceira	Praia da Vitória		Grandes destruições
1852-04-16	VII	S. Miguel	Santana		Várias vítimas mortais
1926-08-31	X	Faial	Horta		20 vítimas mortais e 200 feridos; grandes destruições
1932-08-05	VIII	S. Miguel	Povoação		Vários feridos; grandes destruições.
1935-04-26	VIII	S. Miguel	Povoação		1 vítima mortal; grandes destruições.
1937-11-21	VII	Stª Maria	Stº Espírito		
1939-05-08	VII	Stª Maria	Stº Espírito	7 Mb	
1952-06-26	VIII	S. Miguel	Ribeira Quente		Grandes destruições.
1958-05-13	IX-X	Faial	Praia do Norte		Grandes destruições
1964-02-21	VIII	S. Jorge	Velas		Grandes destruições.
1973-11-23	VIII	Pico	Stº António		Grandes destruições.
1980-01-01	VII	Terceira	Angra do Heroísmo	7,2 Mb	54 vítimas mortais e 400 feridos; grandes destruições nas Ilhas Terceira, Graciosa e São Jorge.
1998-07-09	VIII	Faial	Ribeirinha	5,8 Md	8 vítimas mortais e mais de uma centena de feridos; grandes destruições no Faial e Pico.

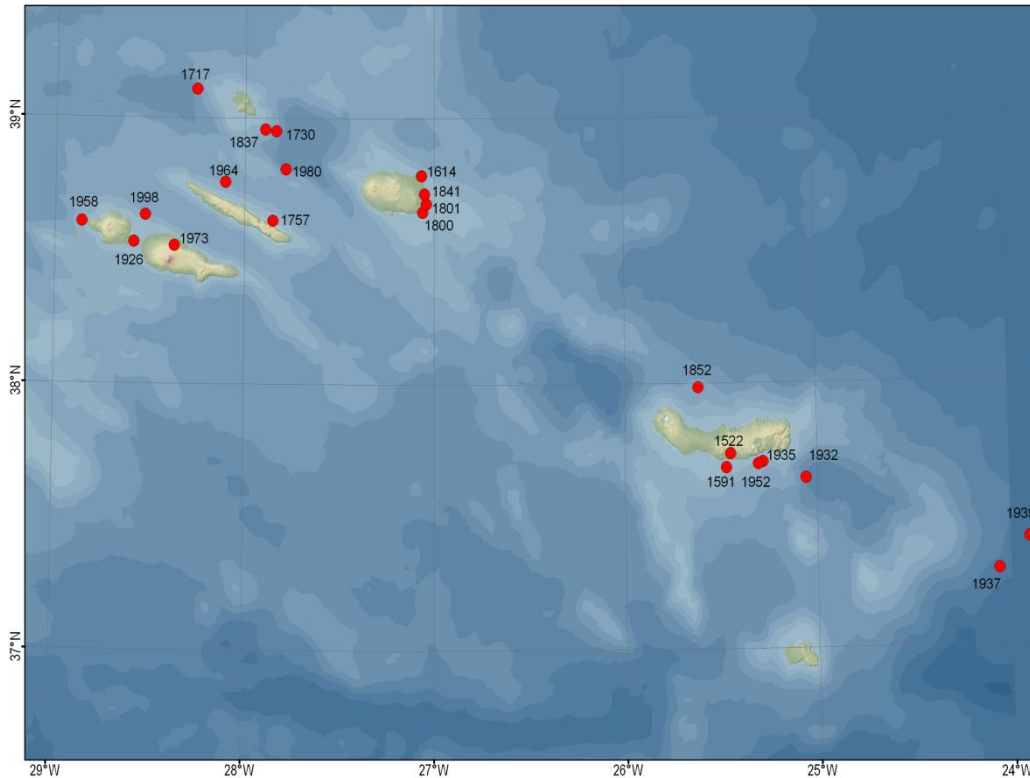


Figura 2.5 Localização dos principais sismos históricos na região dos Açores (dados de Silveira, 2002; Silva, 2005).

Os sismos mais destruidores e de maior magnitude de que há registo na região ocorreram em 1757 (Calheta de S. Jorge) e em 1980 (Grupo Central), tendo ultrapassado os 7 graus na Escala de Richter. No entanto, o sismo responsável pelo maior número de vítimas teve lugar na ilha de S. Miguel, em 1522, com intensidade máxima X na escala de Mercalli Modificada, e destruiu a então capital Vila Franca do Campo (Machado, 1966), causando cerca de 5000 vítimas mortais, para o que contribuíram os volumosos movimentos de vertente desencadeados (Silveira, 2002).

A atividade eruptiva histórica no arquipélago dos Açores inclui pelo menos 26 erupções (Fig. 2.6), entre eventos submarinos, em pontos elevados da Plataforma dos Açores, e subaéreos, nas ilhas de S. Miguel, Terceira, S. Jorge, Pico e Faial, que cobrem um grande leque de estilos eruptivos e magnitudes. A atividade eruptiva, tal como a atividade sísmica, concentram-se também, preferencialmente, ao longo da Crista Media Atlântica e do Rift da Terceira.

Da análise da localização e sequência cronológica das várias erupções históricas observadas no arquipélago (tabela 2.2) denota-se a existência de uma proporção entre as erupções submarinas e litorais, que representam cerca de 50% do total das

2. Geologia do Arquipélago

erupções registadas, sendo este valor provavelmente subestimado, pois nem todas as erupções submarinas se manifestam à superfície do oceano e, mesmo de entre estas, nem todas terão sido observadas.

Tabela 2.2 – Erupções históricas nos Açores (Adaptado de Carmo, 2004).

Ano	Local	Estrutura
1439?	S. Miguel	Pico da Ferraria - Sete Cidades
1439-43	S. Miguel	Pico do Gaspar - Furnas
1562/64	Pico	Pico do Cavaleiro (atuais Cabeços do Fogo)
1563/64	S. Miguel	Lagoa do Fogo, Pico do Sapateiro (atual Pico Queimado)
1580	S. Jorge	Rib ^a do Almeida, Mistério da Queimada, Rib ^a do Nabo
1630	S. Miguel	Lagoa Escura e Lagoa Barrenta - Furnas
1638	no mar	Ao largo da Ponta da Candelária (S. Miguel)
1652	S. Miguel	Picos do Paio (atual Pico do Fogo) e de João Ramos
1672/73	Faial	Cabeço do Rilha Boi (atual Cabeço do Fogo) e Pincarito
1682	no mar	Entre Mosteiros (S. Miguel) e o Banco D. João de Castro
1713	S. Miguel	Pico das Camarinhas
1718	Pico	Lomba de Fogo, Cabeços de Cima e de Baixo, no mar junto a S. João
1720	Pico	Cabeço do Soldão (ou do Fogo)
1720	no mar	Formou uma ilha no Banco D. João de Castro
1761	Terceira	Picos das Caldeirinhas, Mistério Negro
1800	no mar	Fora da Ponta do Topo (S. Jorge)
1808	S. Jorge	Crateras a W do Pico do Pedro, Entre Ribeiras e Areias de Santo Amaro
1811	no mar	Frente à Ponta da Ferraria (S. Miguel), Ilha Sabrina
1867	no mar	Frente à Ponta da Serreta (Terceira)
1902	no mar	Fora da Ponta do Topo (S. Jorge)
1907	no mar	Junto à costa S de S. Miguel
1911	no mar	Banco do Mónaco
1957/58	Faial	Capelinhos, explosão freática na Caldeira
1963	no mar	Fora do Cachorro (Pico)
1964	no mar	A W das Velas (S. Jorge)
1981	no mar	Mar de Prata (SW de S. Miguel)
1998/01	no mar	A WNW da Ponta da Serreta (Terceira)

As erupções históricas subaéreas revelam estilos eruptivos efusivos ou moderadamente explosivos, do tipo havaiano e estromboliano, envolvendo a projeção de escórias e o desenvolvimento de escoadas lávicas basálticas (s.l.), geralmente associados aos sistemas vulcânicos do tipo fissural, e erupções explosivas subplinianas e hidromagmáticas, envolvendo magmas mais evoluídos, de composição

2. Geologia do Arquipélago

traquítica (s.l.) associados aos vulcões centrais (Gaspar *et al.*, 2001; Pacheco *et al.*, 2011).

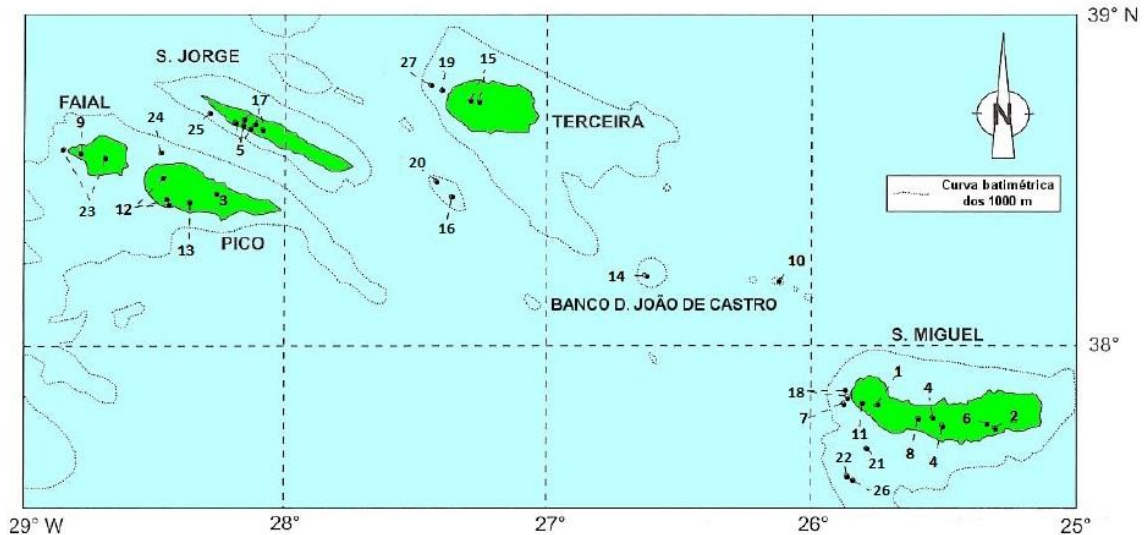


Figura 2.6 – Localização das erupções vulcânicas históricas que se tem conhecimento na região da Plataforma dos Açores (Carmo, 2004, modificado de Madeira e Brum da Silveira, 2003).

As erupções históricas submarinas são de carácter predominantemente hidromagmático, embora com um índice de explosividade consideravelmente menor que as subaéreas, (Chaves, 1960 *in* Gaspar *et al.*, 2001), de entre as quais se destacam a erupção de junho de 1811, a W da ilha de São Miguel, responsável pela construção da efémera ilha Sabrina, a erupção de 1957-58 a NW da ilha do Faial, que, posteriormente passou a ter características subaéreas, originando o Vulcão dos Capelinhos e, mais recentemente, em dezembro de 1998 a erupção submarina da Serreta a cerca de 10 km a NW da ilha Terceira (Gaspar *et al.* 2000).

3. Caracterização da área de estudo

3.1. Localização Geográfica

A ilha de São Miguel é a maior e mais populosa ilha do arquipélago dos Açores e compreende uma área de 747 km² estendendo-se ao longo de cerca de 66 km de comprimento por 16 km de largura.

O vulcão do Fogo, também designado por vulcão da Serra de Agua de Pau ou apenas vulcão de Água de Pau, estende-se por uma área de cerca de 130 km² (Wallenstein, 1999) e localiza-se na zona central da ilha abrangendo os concelhos de Ribeira Grande, Lagoa e Vila Franca do Campo, sendo que este estudo apenas incidiu na região Norte do vulcão, ou seja, apenas no concelho da Ribeira Grande (Fig. 3.1).

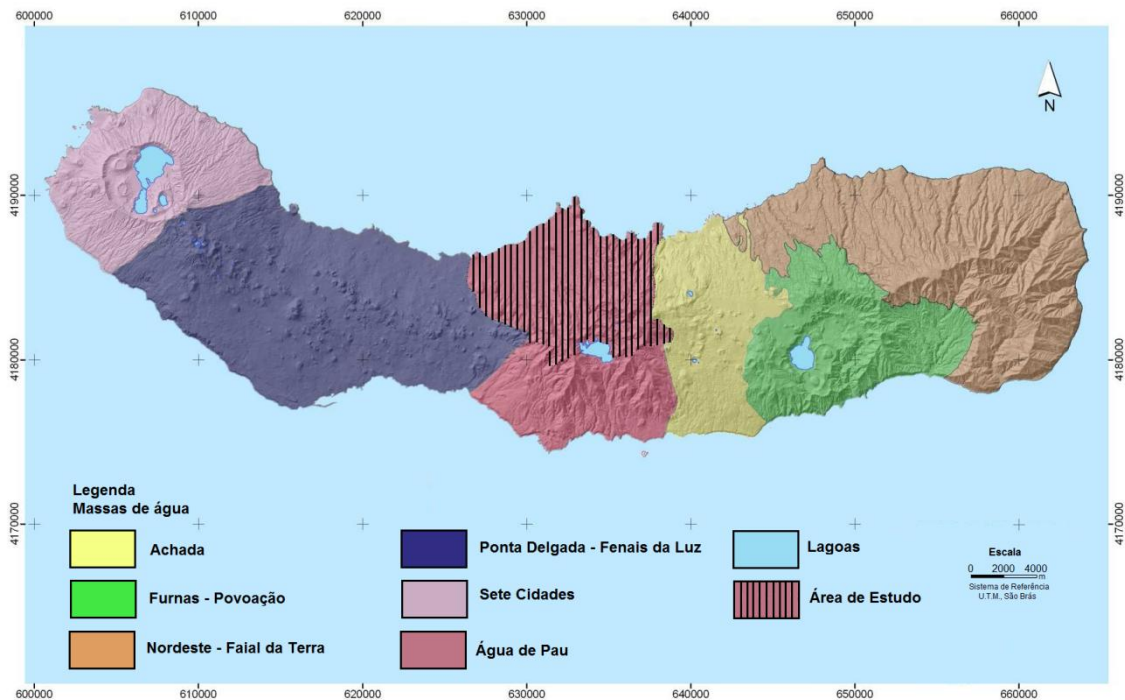


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

3.2. Enquadramento Geológico

3.2.1. Geomorfologia

Segundo Zbyszewski *et al.* (1958, 1959), na ilha de São Miguel individualizam-se oito unidades geomorfológicas principais (Fig. 3.2) que são: o Maciço Vulcânico das Sete

3. Caracterização da área de estudo

Cidades, a Região dos Picos, o Maciço Vulcânico da Serra de Água do Pau, o Planalto da Achada das Furnas, o Vulcão das Furnas, o Vulcão da Povoação, a Região da Tronqueira e do Nordeste e a Plataforma Litoral do Norte.

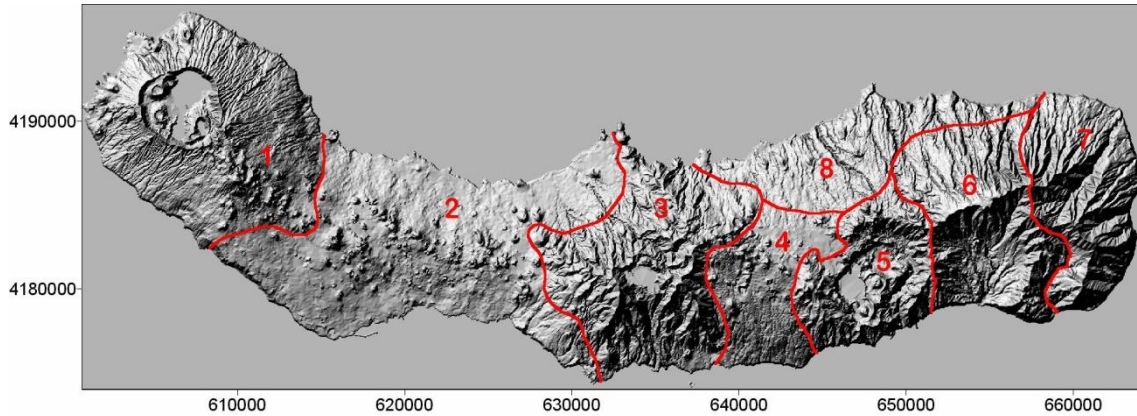


Figura 3.2 – Unidades geomorfológicas principais propostas por Zbyszewski *et al.* (1958, *in* Wallenstein (1999)). 1 - Maciço Vulcânico das Sete Cidades; 2 – Região dos Picos; 3 – Maciço Vulcânico da Serra de Água de Pau; 4 – Planalto da Achada das Furnas; 5 – Vulcão das Furnas; 6 – Vulcão da Povoação; 7 – Região da Tronqueira e do Nordeste e 8 - Plataforma Litoral do Norte.

Geomorfologicamente, a área estudada insere-se no Maciço Vulcânico da Serra de Água de Pau, limitado a oeste pela Região dos Picos e a Leste pelo Planalto da Achada das Furnas e Plataforma Litoral do Norte. A Norte e a Sul o Maciço Vulcânico da Serra de Água de Pau encontra-se limitado pela linha de costa.

Este Maciço compreende o vulcão central do Fogo, cuja caldeira, com cerca de 2,5km por 3km, se encontra ocupada pela Lagoa do Fogo, por um cone pomítico e diversos domos (Wallenstein, 1999). O diâmetro basal médio do vulcão é de cerca de 13km, sendo a cota mais elevada aos 947m, no Pico da Barrosa. As vertentes do vulcão do Fogo são assimétricas e encontram-se altamente erodidas, especialmente no flanco Sul, com uma rede de drenagem bastante encaixada, cuja distribuição e orientação refletem um nítido controlo estrutural.

O controlo estrutural imposto pelo Graben da Ribeira Grande na zona Norte do Maciço Vulcânico da Serra de Água de Pau é ainda materializado na geometria e distribuição dos cones de escórias, cones de pedra-pomes, formas hidrovulcânicas e domos, no maciço (Wallenstein, 1999) Salienta-se ainda a existência de campo geotérmico no flanco Norte do vulcão.

3.2.2. Principais estruturas tectónicas

Toda a ilha de São Miguel, à semelhança do que acontece no restante arquipélago, encontra-se afetada preferencialmente por duas famílias de falhas, uma de direção WNW-ESE e outra de direção NW-SE, materializada pelo Graben dos Mosteiros e da Ribeira Grande. Não obstante, encontram-se ainda acidentes tectónicos de direção N-S, W-E e ainda NE-SW (Fig. 3.3).

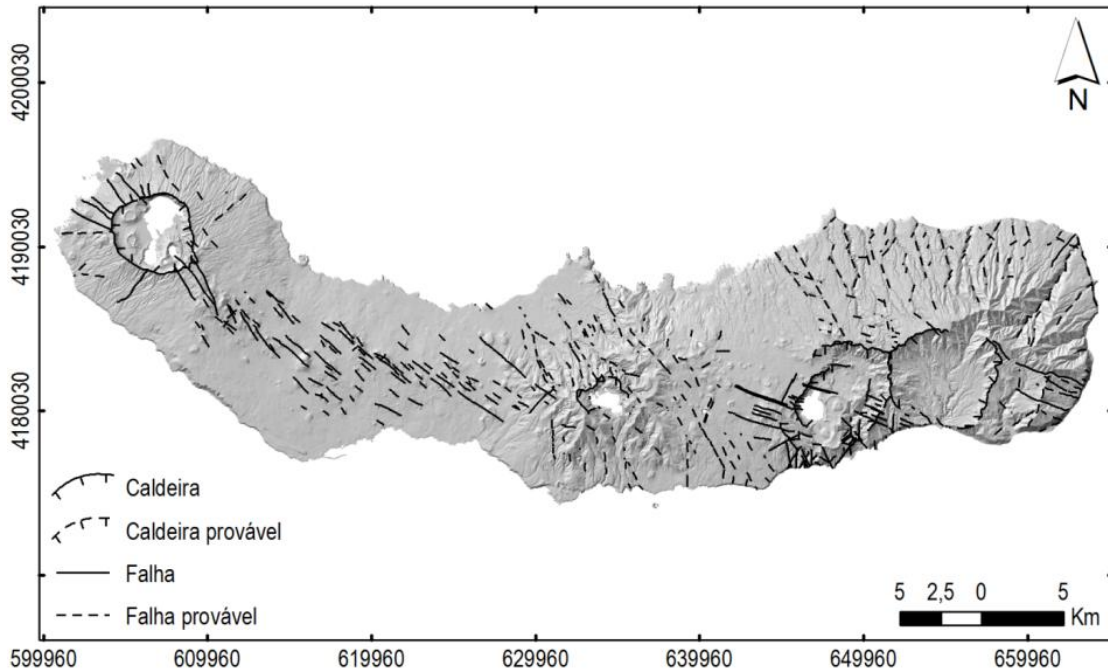


Figura 3.3 - Principais estruturas tectónicas da ilha de S. Miguel (Gaspar *et al.*, 1990; Queiroz, 1997; Wallenstein, 1999; Ferreira, 2000; Carmo, 2004; Carmo *et al.*, 2009).

3.2.3. Vulcanoestratigrafia

Na ilha de São Miguel individualizam-se seis complexos vulcânicos que por ordem decrescente de idade são Complexo Vulcânico do Nordeste, Complexo Vulcânico da Povoação, Complexo Vulcânico das Furnas, Complexo Vulcânico das Sete Cidades, Complexo Vulcânico do Fogo e Complexo Vulcânico dos Picos

O Complexo Vulcânico do Fogo apresenta um aparelho vulcânico central com uma caldeira a topo cujas paredes apresentam cerca de 300m de altura. Nos flancos do vulcão existem cones de escórias, domos traquíticos, *maars* e espessas coberturas de depósitos piroclásticos.

3. Caracterização da área de estudo

Segundo Wallenstein (1999) o Complexo Vulcânico do Fogo pode ser dividido em quatro unidades vulcanoestatigráficas que são o Grupo Inferior, o Grupo Superior, a Formação das Lombadas e a Formação histórica.

O Grupo Inferior compreende todas as unidades de idade superior a 40.000 anos, isto é, os produtos mais antigos que se desenvolveram na base do vulcão.

O Grupo Superior é representado por duas sequências, a Sequência do Flanco Norte e a Sequência do Flanco Sul a primeira é constituída pelas formações do Porto Formoso, da Barrosa, da Coroa da Mata, de Fenais da Luz e da Chã das Gatas, correspondendo essencialmente a depósitos de queda e de fluxo e depósitos epiclásticos. Por sua vez, a Sequência do Flanco Sul esta representada nas formações de Roída da Praia, da Ribeira Chã e do Pisão por depósitos piroclásticos de queda e de fluxo e por *mudflows*.

A Formação das Lombadas apresenta uma sequência de depósitos piroclásticos pomíticos, cones de escórias e escoadas lávicas de idade inferior a 3.000 anos.

A Formação histórica está associada a duas erupções que ocorreram no ano de 1563, com quatro dias de intervalo entre elas. A primeira erupção de estilo explosivo e natureza traquítica terá ocorrido no interior da caldeira e originou depósitos pomíticos e sequências basálticas. A segunda erupção de estilo efusivo e natureza basáltica terá ocorrido no flanco Norte do maciço.

3.3. Uso do Solo

A ocupação do solo pode ser entendida como sendo a forma pela qual determinadas áreas geográficas são utilizadas para satisfazer as necessidades de uma sociedade. Atualmente, e com o desenvolvimento da Região, a tendência de ocupação do solo é de aumento das áreas urbanas, industriais e de atividades agropecuárias, em detrimento dos ecossistemas e dos recursos naturais, incluindo a água e o solo, sendo necessária uma adequada prática de mecanismos de gestão territorial, de forma a manter o equilíbrio entre a satisfação das necessidades humanas e o meio ambiente.

Segundo Cruz *et al.* (2007) o arquipélago dos Açores apresenta uma dinâmica acentuada na ocupação do solo que reflete, por um lado, a necessidade de aumento de áreas urbanas em zonas de maior concentração de população, com fortes

3. Caracterização da área de estudo

pressões no litoral e, por outro, a intensificação da atividade agropecuária, em detrimento das áreas florestais e de vegetação natural.

A Carta de Ocupação do Solo da Região Autónoma dos Açores (Cruz *et al.*, 2007; DROTRH-SRAM, 2007), define nove classes de espaços para o uso do solo, descritos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Nomenclatura e descrição das classes de ocupação do solo (Adaptado de Cruz *et al.*, 2007; DROTRH-SRAM, 2007).

Classes	Descrição
Espaços Urbanos	Cidades, Vilas, Aeroportos, Aeródromos, Rede Viária, Áreas Portuárias
Espaços Industriais	Indústria, Infraestruturas de produção de energia, Infraestruturas de captação, tratamento e abastecimento de água, Infraestruturas de tratamento de resíduos
Espaços Agrícolas	Culturas Arvenses Cereais Culturas Permanentes Chã, Estufas de Ananás, Pomares, Vinha Outras culturas Inhamo, Beterraba, Tabaco
Pastagens	Pastagens permanentes
Espaços Florestais	Criptóméria, Eucalipto, Pinheiro, Acácia, Incenso
Espaços de Vegetação Natural	Vegetação endémica, Matos
Incultos	Barreiros de Santa Maria, Zonas de derrames lávicos recentes, Areeiros do Pico
Áreas Descobertas	Pedreiras, Praias, Rocha-nua
Lagoas	Lagoas

No arquipélago dos Açores as classes de ocupações de solo predominantes são as pastagem e os espaços florestais, com 42,28% e 22,23%, respetivamente, seguindo-se os espaços agrícolas com 14,14%, os espaços de vegetação natural com 12,78 %, e os espaços urbanos com 4,96%, As áreas descobertas, as lagoas, os incultos e os espaços industriais, perfazem os restantes 3,6% de ocupação do solo. (Fig. 3.4).

3. Caracterização da área de estudo

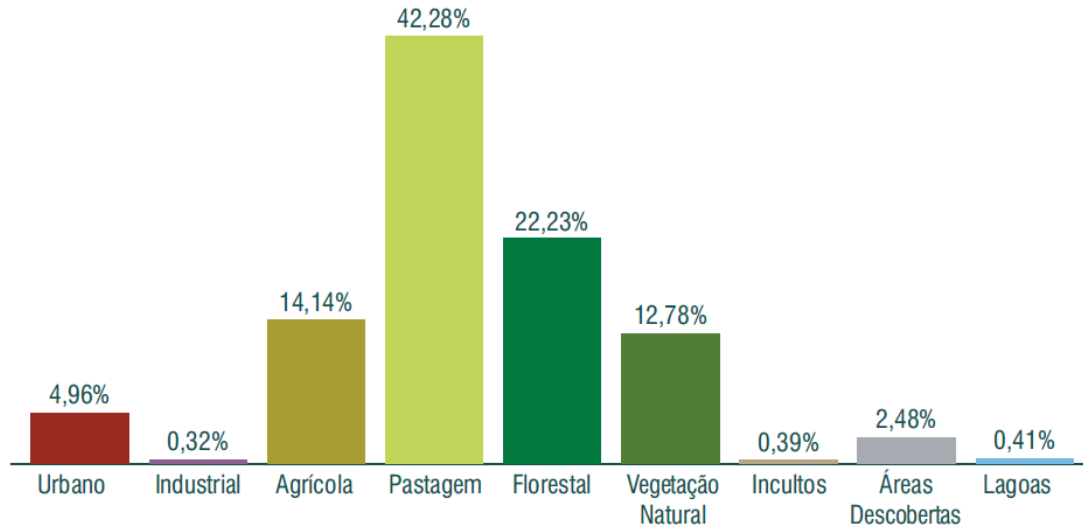


Figura 3.4 - Percentagem de ocupação do solo da Região Açores (Cruz *et al.*, 2007).

Em São Miguel 60,58% da ocupação do solo é constituída por agricultura e pastagem, situando-se acima da média regional (56,42%), enquanto a área ocupada por floresta e vegetação natural, embora atinja os 30,23%, situa-se abaixo do valor médio regional (35,01%). Os espaços urbanos representam 5,55% da ocupação do solo em São Miguel, superior à média regional (4,96%), sendo que as áreas descobertas, as lagoas e os espaços industriais, perfazem os restantes 3,66% de ocupação do solo da ilha. (Fig. 3.5 e Fig. 3.6).

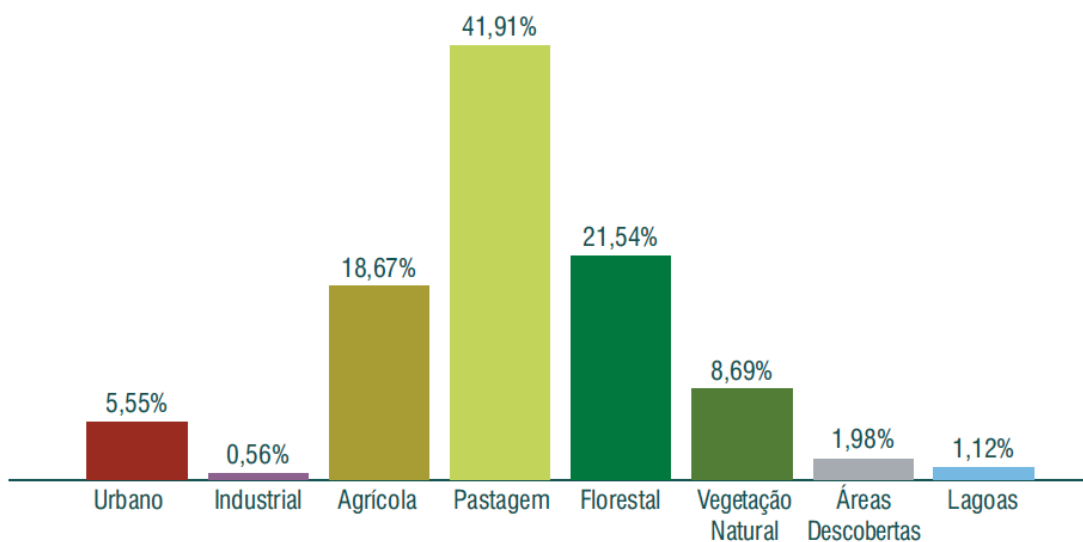


Figura 3.5 – Percentagem de ocupação do solo da ilha de São Miguel (Cruz *et al.*, 2007).

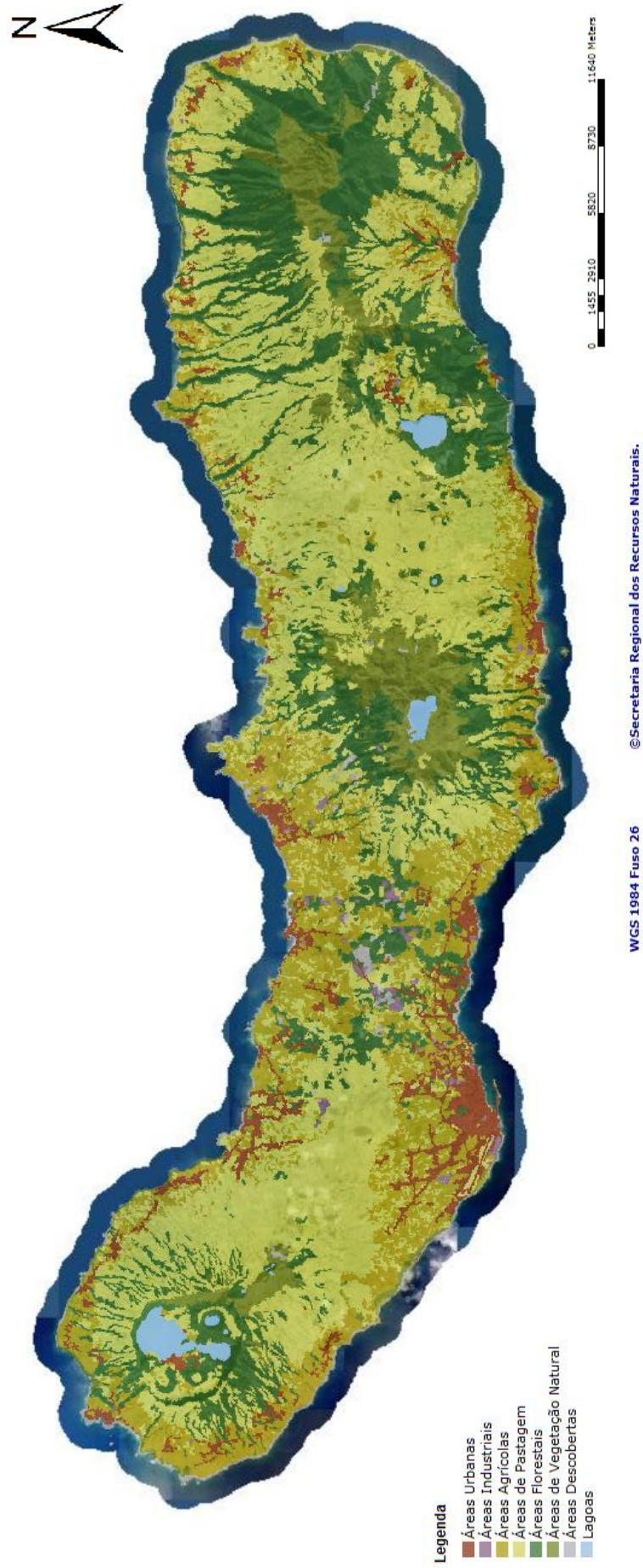


Figura 3.6 – Carta de ocupação do solo da ilha de São Miguel. (DROTRH-SRAM, 2007).

3. Caracterização da área de estudo

Analisando a área de estudo, observa-se que a linha de costa é constituída por áreas descobertas, estas também se encontram, ainda que de forma dispersa, em toda a área de estudo. Na zona litoral encontram-se as áreas urbanas, áreas agrícolas e pastagens, sendo que, as últimas duas também predominam na zona intermédia da área de estudo. Na zona a montante da área, nas imediações da Lagoa do Fogo, predominam as áreas de floresta e vegetação natural. No que respeita às áreas industriais, ainda que se verifique a existência de um parque industrial na área de estudo, estas encontram-se dispersas por todas as zonas. (Fig. 3.7)

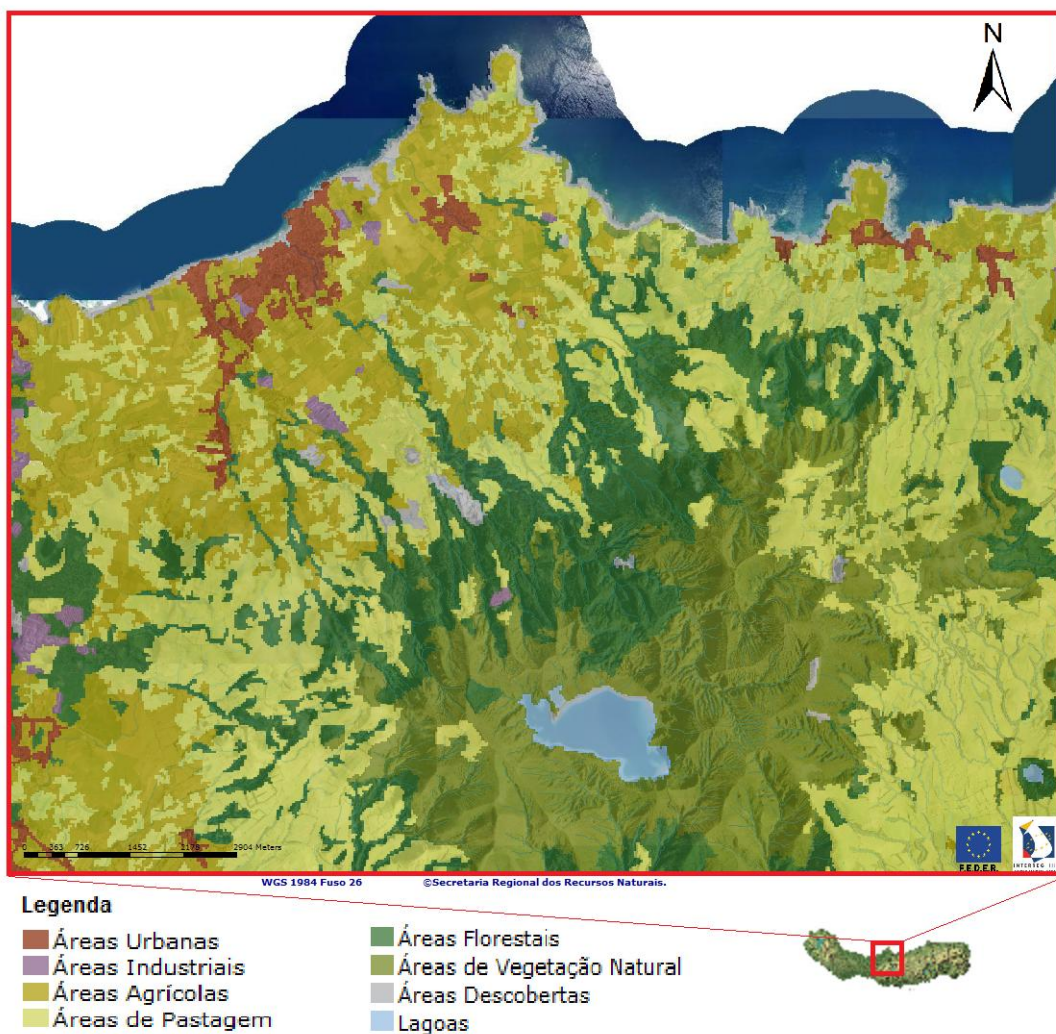


Figura 3.7 – Excerto da carta de ocupação do solo da ilha de São Miguel para a área de estudo. (Adaptado de DROTRH-SRAM, 2007).

4. Enquadramento Climático

À escala global, os mecanismos responsáveis pelo clima e pela sua evolução assentam essencialmente nas relações astronómicas entre o planeta e o sol, bem como entre a atmosfera, as massas de água, as grandes massas de gelo, os continentes, o relevo e os seres vivos (Azevedo & Gonçalves, 2001), sendo que o clima em cada região é resultado do equilíbrio dinâmico entre cada um destes subsistemas.

A localização geográfica do arquipélago dos Açores faz com que nesta região o clima se caracterize por temperaturas amenas, índice de humidade do ar elevado, taxas de insolação pouco elevadas, chuvas regulares e abundantes, regime de ventos vigorosos segundo os padrões de circulação atmosférica na bacia do Atlântico Norte. Embora se verifiquem variações climáticas de um extremo ao outro do arquipélago e se observe uma variação espacial significativa dentro de cada ilha, o clima no litoral pode ser classificado genericamente de *mesotérmico húmido com características oceânicas* (AHA-SRAM, 2011).

Segundo a classificação de Köppen (*in* AHA-SRAM, 2011) o clima nos Açores enquadra-se na categoria de climas temperados quentes, isto é, apresenta Verão e Inverno e a temperatura do mês mais frio é inferior a 18°C e superior a – 3°C, sendo que a temperatura média do mês mais quente não ultrapassa os 22°C.

À escala local o clima é resultado de um conjunto de fatores (AHA-SRAM, 2011):

- A insolação e radiação solar é quantificada com base na quantidade de energia proveniente da radiação solar calculada (metodologia sugerida por Allen *et al.*, 1994 *in* AHA-SRAM, 2011), sendo nos Açores, nos meses de Verão, de cerca de 20 MJ/m²/dia e nos meses de Inverno diminui para cerca de 6 MJ/m²/dia. O índice de insolação é baixo, da ordem dos 35% em média anual, representando cerca de 1600 horas de sol descoberto por ano.
- A pressão atmosférica nos Açores é superior à média planetária devido à sua localização no contexto do campo de pressões à escala da bacia do Atlântico Norte. A variação da pressão atmosférica no arquipélago é reduzida, sendo no entanto superior no grupo oriental quando estes valores são analisados ao nível do mar. Os valores médios mensais mais baixos são de 1018 hPa no Inverno, em fevereiro, e os mais altos são no mês de julho, atingindo 1024 hPa.

No interior das ilhas a pressão atmosférica diminui com o aumento da altitude, segundo o Modelo da atmosfera padrão, diminuindo cerca de 110 hPa aos 1000 metros de altitude.

- No que respeita à temperatura do ar, junto ao litoral a temperatura média anual em todo o arquipélago ronda os 17,5°C. Contudo, verificam-se variações anuais de temperatura que no mês de agosto apresenta um valor médio de 22°C e no mês de fevereiro esta média diminui para cerca de 14,5°C. A temperatura do ar sofre grande influência da altitude, variando em função desta segundo o gradiente adiabático seco, isto é, por cada 100m de altitude há uma diminuição de 0,9°C, até ser atingida a temperatura do ponto de orvalho a uma altitude que se situa em média aos 400m. A partir daí, entra-se no campo do gradiente adiabático húmido onde se observa uma diminuição de 0,6°C a cada 100m de altitude.
- Nos Açores, a humidade do ar é em regra elevada. Os valores médios mensais são próximos dos 80%, todavia, durante 3 a 4 dias do ano registam-se junto ao litoral valores inferiores a 50% e valores superiores a 90% em cerca de 60 dias por ano.
- A precipitação média anual varia entre 775mm na ilha de Santa Maria e os 1700mm na ilha das Flores, sendo que entre os meses de setembro e março verifica-se cerca de 75% do total de precipitação anual.
- Quanto ao regime de ventos, no arquipélago, os ventos predominantes são do quadrante oeste, sendo este resultado de ventos que derivam do bordo superior do Anticiclone dos Açores e de ventos gerados a partir de sistemas depressionários associados à evolução dos Meandros da Frente Polar.

O modelo CIELO (Clima Insular à Escala Local), desenvolvido por Azevedo (1996), tem como objetivo simular o clima local em regiões insulares de pequena dimensão espacial, mas com uma orografia complexa a uma escala que se ajuste com aquela em que se desenvolve a atividade humana, ou em que a variação das condições climáticas tenha impacto significativo sobre o ambiente e os recursos naturais.

De acordo com o modelo de CIELO, a expressão espacial da temperatura, da humidade relativa e da precipitação médias anuais sobre a ilha de São Miguel é apresentada nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, respetivamente.

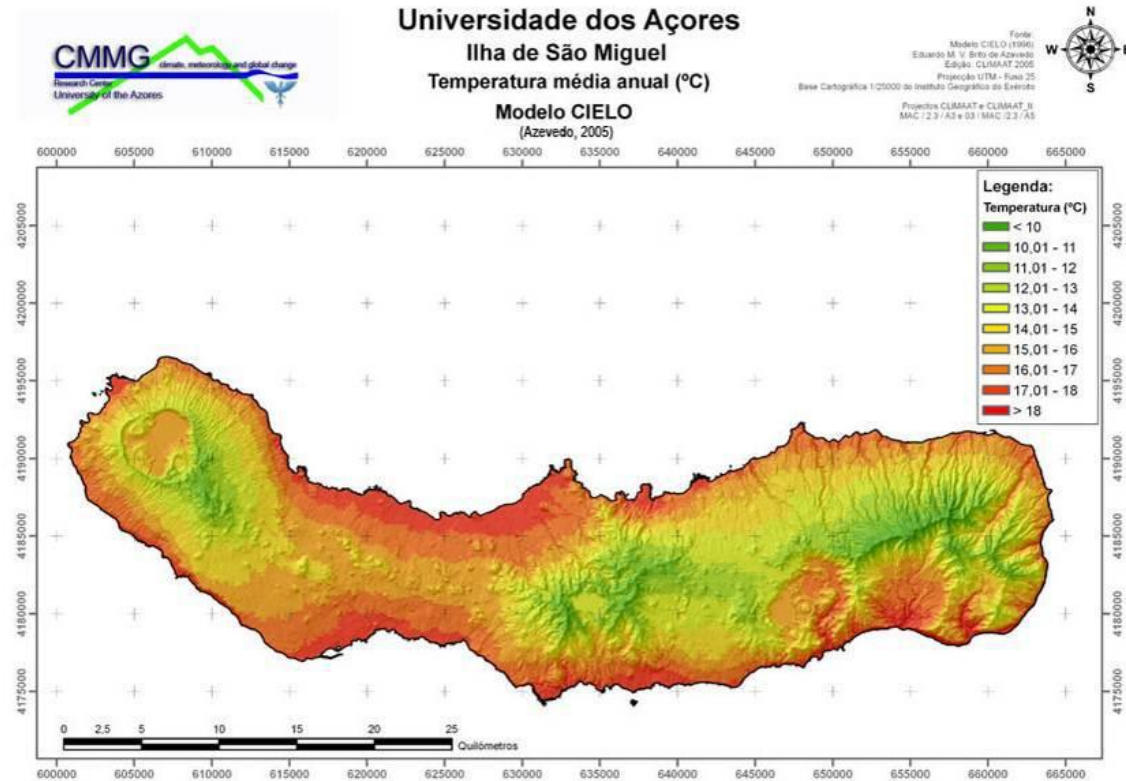


Figura 4.1 - Modelo CIELO – expressão espacial da temperatura na ilha de São Miguel (AHA-SRAM, 2011).

Na ilha de São Miguel as temperaturas médias anuais mais baixas registadas encontram-se na região central da ilha, que corresponde às zonas de maior altitude, pelo contrário, nas zonas litorais, encontram-se as temperaturas mais altas, superiores a 18°C (Fig. 4.1).

No que respeita à humidade relativa média anual, na ilha de São Miguel, as zonas no centro da ilha, a maior altitude apresentam os valores mais elevados, pelo contrário, as zonas litorais são as mais secas, com humidades relativas inferiores a 80% (Fig. 4.2).

A precipitação média anual distribui-se de modo heterogéneo pela ilha de São Miguel, sendo as zonas de maior altitude e de maior relevo as que apresentam valores de precipitação mais elevados (> 3000 mm), enquanto as zonas litorais apresentam valores de precipitação inferiores a 1000 mm (Fig. 4.3).

4. Enquadramento Climático

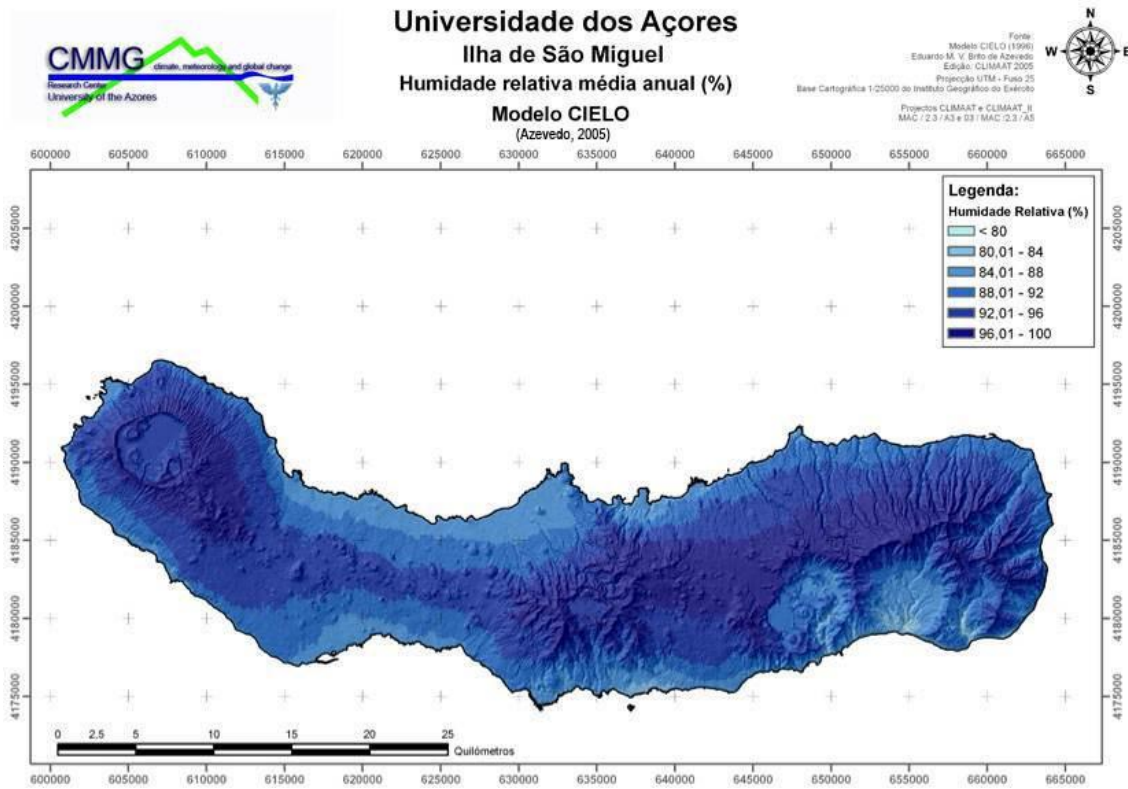


Figura 4.2 - Modelo CIELO – expressão espacial da humidade relativa na ilha de São Miguel (AHA-SRAM, 2011).

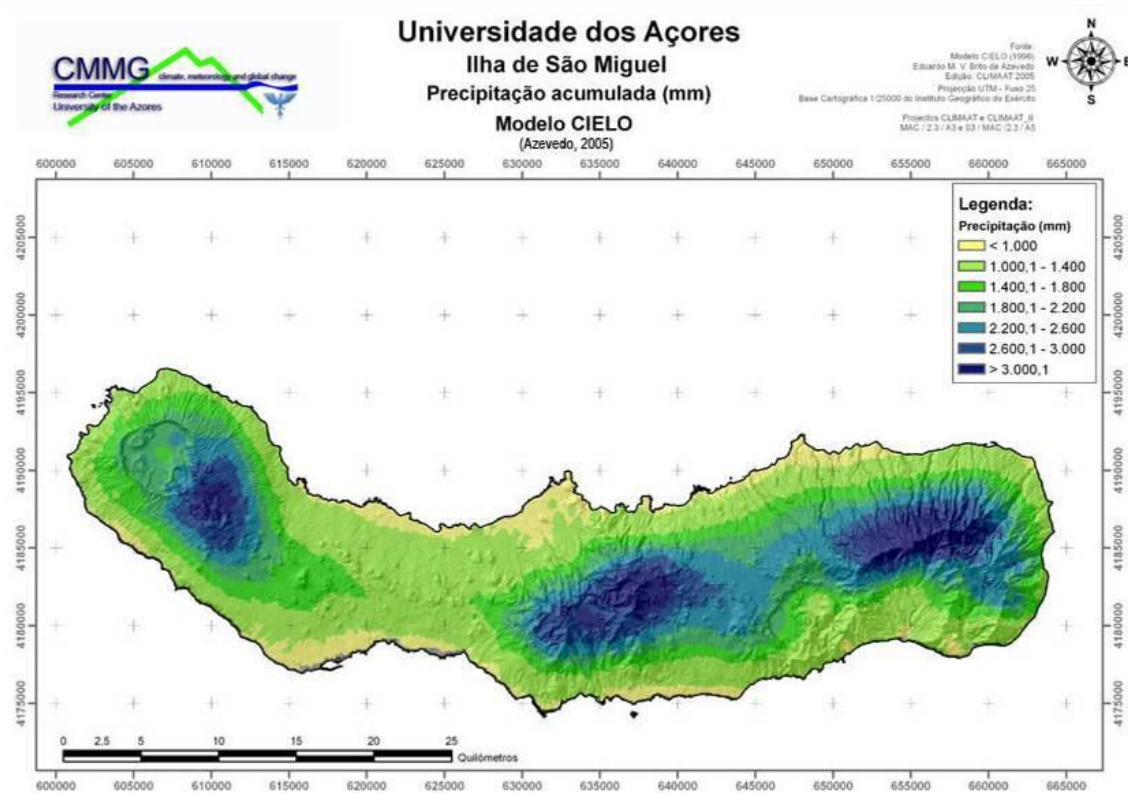


Figura 4.3 - Modelo CIELO – expressão espacial da precipitação na ilha de São Miguel (AHA-SRAM, 2011).

5. Hidrogeologia

5.1. Hidrogeologia de regiões vulcânicas

Existem inúmeras ilhas vulcânicas onde a exploração de águas subterrâneas normalmente apresenta grande importância. Os basaltos *s.l.* são as rochas vulcânicas com maior representatividade, e também as que apresentam propriedades hidrogeológicas mais interessantes.

Os cones vulcânicos são normalmente formados por alternâncias de escoadas lávicas e produtos piroclásticos. Estes produtos piroclásticos por vezes depositam-se a grande distância do centro emissor, no entanto, apenas nas proximidades do vulcão apresentam interesse do ponto de vista hidrogeológico.

No que concerne à hidrogeologia, uma característica importante das formações vulcânicas é a presença frequente de barreiras impermeáveis, ou pouco permeáveis, com disposição quer subparalela ao mergulho da escoada, quer subvertical ao mesmo, levando muitas vezes à compartimentação da formação em unidades hidrogeológicas isoladas (Custodio & Llamas, 1983).

A deposição de piroclastos entre duas escoadas lávicas pode fazer com que estas funcionem como barreiras horizontais. Se tiver ocorrido tempo suficiente entre a instalação de duas escoadas sobrepostas, a meteorização normalmente origina um solo argiloso sobre a escoada inferior o que a separa hidráulicamente da superior. Há ainda a salientar que dentro de uma mesma escoada as zonas de topo e de base são normalmente mais porosas e permeáveis, devido à presença de fraturas, fendas e diáclases, que a zona central, e daí, muitas vezes, esta também poder atuar como barreira, individualizando a zona inferior e superior da mesma escoada.

É frequente, aquando da emissão de escoadas lávicas e/ou de piroclastos, a fossilização ou cobertura de formações aluviais, muito permeáveis, depositadas nos vales preexistentes. Estas formações aluviais servem assim como reservatório da drenagem da estrutura vulcânica que a contem, originando um aquífero semi-confinado.

Outra barreira impermeável pode ser originada por uma falha que ponha em contacto uma zona permeável com uma não permeável. Também existem barreiras constituídas por diques subverticais, típico de muitas regiões vulcânicas como é o caso da ilha de Tenerife nas Canárias ou da ilha Oahu no Havai.

A porosidade, permeabilidade e transmissividade são características intrínsecas dos produtos vulcânicos que vão determinar a hidrogeologia da região em causa. Segundo Custodio & Llamas (1983) em rochas filonianas ou rochas cristalinas são, em resultado do arrefecimento lento, a porosidade é em regra inferior a 5%. Quando o arrefecimento é rápido a porosidade pode atingir valores de 10 a 50% como é o caso de piroclastos. Em caso de arrefecimento muito rápido é impedida a desgaseificação lenta, os gases ficam aprisionados originando texturas vesiculares que por vezes conduzem a porosidades muito elevadas, um bom exemplo são as pedras-pomes que atingem cerca de 87% de porosidade. Com o passar do tempo os processos diagenéticos tendem a diminuir a porosidade dos materiais.

Uma elevada porosidade não é sinónimo de uma permeabilidade importante, quer pelo tamanho reduzido dos poros, quer pela sua dimensão e incoerência. Regra geral, as escoadas basálticas são mais permeáveis enquanto as escoadas traquíticas são menos permeáveis. A permeabilidade depende da idade dos produtos, que em regra é maior nos produtos mais modernos e menor nos produtos mais antigos.

Na exploração de água subterrânea em escoadas lávicas convém ter em atenção a hipótese destas estarem a cobrir aluviões, piroclastos e/ou níveis de escórias recentes, pois podem proporcionar caudais bastante elevados.

Nas formações vulcânicas a permeabilidade é um fator heterogéneo e anisótropo. Custodio & Llamas (1983) com base em estudos de outros autores, concluíram que em material piroclástico a condutividade hidráulica é geralmente inferior a 10^{-2} m/dia, em escoadas basálticas antigas é de 150 m²/dia e em escoadas basálticas mais recentes pode apresentar valores superiores a 1500 m²/dia.

Quanto aos valores de transmissividade apresentam-se mais elevados para escoadas basálticas modernas saturadas na ordem dos 60000 m²/dia, 1000 a 2500 m²/dia para basaltos alterados e fissurados, 100 a 700 m²/dia para tufos e basaltos compactos e para camadas de piroclastos intercalados com aluviões e depósitos lacustres na ordem dos 300 m²/dia (Custodio & Llamas, 1983).

5.2. Hidrogeologia de ilhas vulcânicas

Em ilhas vulcânicas, como é o caso do arquipélago dos Açores, a hidrogeologia assume particular interesse, essencialmente no que concerne a abastecimento de água às populações sendo que cerca de 98% da água consumida é de origem subterrânea (Cruz & Coutinho, 1998). A tectónica e o ambiente geodinâmico são os

principais elementos-chave da gênese das ilhas vulcânicas, que por sua vez vai determinar as condições hidrogeológicas intrínsecas de cada caso

Segundo Cruz (2004) considera-se a existência de dois tipos de ambientes insulares: vulcanismo de arcos insulares, em zonas de subducção de placas litosféricas, originando ilhas andesíticas, e vulcanismo intraplaca geralmente associado à gênese de ilha basálticas oceânicas. De forma geral, as características determinantes da ocorrência e circulação da água subterrânea vão ser resultado da região onde se encontram, e em particular das litologias presentes.

Nas ilhas andesíticas predominam níveis de piroclastos submarinos, surgindo ainda escoadas lávicas e piroclastos, onde as composições das rochas vão desde termos basálticos *s.l.* a traquíticos *s.l.*, resultando geralmente em zonas de baixa permeabilidade. Por sua vez, as ilhas basálticas oceânicas podem apresentar dois casos: (1) ou são compostas por lavas antigas cuja permeabilidade é reduzida, ou, (2) as lavas presentes são recentes e extremamente permeáveis, constituindo importantes reservatórios de água (Cruz, 2004).

No que concerne ao arquipélago dos Açores a situação não é tão linear como anteriormente referido, isso porque, embora sejam ilhas oceânicas, as composições das rochas vão para além dos termos basálticos *s.l.* apresentando termos de natureza mais ácida, essencialmente de natureza traquítica, em alguns centros eruptivos.

Segundo Cruz (1997) os modelos conceptuais de circulação de água em ilhas vulcânicas divergem em alguns aspetos fundamentais, sendo que os primeiros modelos foram efetuados para as ilhas do Havai e das Canárias, e posteriormente adaptados a outras ilhas.

De um modo geral, o modelo havaiano, proposto por Peterson em 1972 (*in* Cruz, 2004) pressupõe a existência de um sistema aquífero basal, caracterizado por um baixo gradiente hidráulico, ligado hidraulicamente a sistemas de altitude limitados por filões ou outros tipos de discontinuidades (Peterson, 1972, 1993; Takasaki & Mink, 1982, 1985; Hunt *et al.*, 1988; Takasaki, 1993; Lau & Mink, 1995, *in* Cruz, 2004). Este modelo considera assim a existência de aquíferos suspensos, aquíferos limitados por filões e aquíferos basais.

O modelo conceptual de circulação de água para as ilhas Canárias é proposto por Custodio (1975, 1978, 1989 *in* Cruz, 2004) e por Custodio & Llamas (1983), pressupõe a existência de um nível de água basal e continuo em toda a ilha, e a existência de alguns aquíferos suspensos em altitude, resultantes das heterogeneidades de baixa

permeabilidade e que são drenados por nascentes ou por descargas localizadas a maiores profundidades (Custodio, 1975). Ecker (1976 *in* Cruz, 2004) propõe um modelo conceptual de circulação de água para a ilha de Tenerife (Canárias) com base nos conceitos de células portadoras de água ou compartimentos de água subterrânea. Este autor defende: (1) a existência de uma zona vadosa superior, uma zona vadosa inferior e uma zona saturada, (2) que a circulação de um compartimento para outro é apenas possibilitada pela existência de fracturas ou níveis de *clincker* e (3) que a acumulação de água num compartimento é condicionada pela existência de uma barreira.

Por meio de uma adaptação do modelo havaiano, Violette *et al.* (1997 *in* Cruz, 2004) propõem um modelo de funcionamento hidráulico para o vulcão Piton de La Fournaise (Reunião). Esta adaptação pressupõe que o aquífero basal se restringe à zona litoral da ilha, e que o funcionamento hidráulico nos aquíferos de altitude ocorre por drenagem de uns aquíferos para outros até que se atinja a recarga do aquífero basal.

Nas ilhas do arquipélago dos Açores, os modelos propostos não divergem muito dos apresentados anteriormente, Mendonça (1992 *in* Cruz, 2004), para as ilhas Terceira e Pico e Cruz *et al.* (1993-1997, *in* Cruz, 2004) para a ilha de Santa Maria, sugerem modelos semelhantes, que têm por princípio a existência de um aquífero lenticular basal e aquíferos suspensos em altitude associados a descontinuidades de permeabilidade reduzida ou nula, o que se aproxima em muito ao modelo havaiano. Posteriormente, para a ilha do Pico, Cruz (1997) e Cruz & Silva (2001), apresentam o mesmo tipo de modelo, mas consideram que o aquífero basal se restringe à zona costeira. Já o modelo conceptual de circulação de água na ilha das Flores, proposto por Azevedo (1998) é muito semelhante ao apresentado para as ilhas Canárias.

Nos Açores estão caracterizados 54 sistemas aquíferos, distribuídos pelas nove ilhas encontrando-se 11 sistemas aquíferos na ilha Terceira, 9 na Graciosa, 8 no Faial, 6 nas ilhas do Pico, São Miguel e Santa Maria, 3 na ilha de São Jorge e Flores e 2 na ilha do Corvo (Fig. 5.1). Estes sistemas foram definidos quando da elaboração do Plano Regional da Água (DROTRH-INAG, 2001) e resultaram da ponderação de parâmetros geológicos, tais como a estratigrafia, a litologia e condicionantes estruturais, e parâmetros hidrodinâmicos e hidrogeoquímicos.

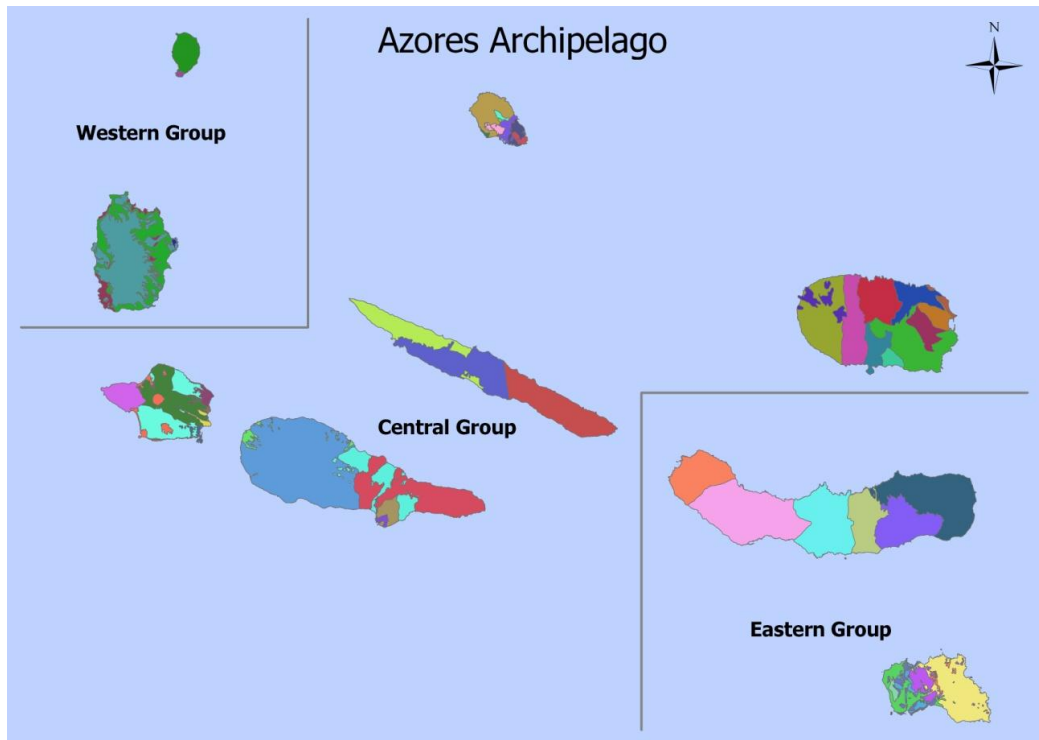


Figura 5.1 – Delimitação das massas de água subterrânea no arquipélago dos Açores (Cruz *et al.*, 2011).

Na medida que um sistema aquífero corresponde a uma unidade que agrega um ou mais aquíferos, com limites em superfície e em profundidade, constituindo uma entidade prática no sentido da investigação e/ou exploração INAG-FCUL (1997), a definição destas unidades é estratégica para a proteção e gestão dos recursos em água subterrânea.

Posteriormente, quando da elaboração do Plano de Gestão de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica 9 (Açores), elaborado de forma a dar resposta às exigências da Lei da Água e da Directiva-Quadro da Água da União Europeia, os sistemas aquíferos foram designados como massas de água subterrânea

A área de estudo alvo deste trabalho pertence à designada Massa de água Água de Pau, que corresponde a um sistema de aquíferos basais e de altitude, constituído por aquíferos predominantemente fissurados. Os aquíferos de altitude, descontínuos ou conectados hidráulicamente aos aquíferos de base, podem ser porosos ou fissurados, e a sua ocorrência depende da existência de níveis de permeabilidade muito reduzida, ou é função de aparelhos vulcânicos secundários sempre que o respetivo volume seja significativo do ponto de vista hidrogeológico (Cruz, 2001; DROTRH-INAG, 2001; AHA-SRAM, 2011).

Os estudos de caracterização dos recursos hídricos regionais efetuados no âmbito da elaboração do Plano Regional da Água permitiram identificar e georeferenciar 1073 pontos de água subterrânea no Açores, nomeadamente 950 nascentes, 40 poços e 83 furos de captação (DROTRH-INAG 2001). Entretanto, os estudos de base que suportaram a realização do Plano de Gestão de Recursos Hídricos da RH9 permitiram a inventariação de 1673 nascentes e 150 furos (Fig. 5.2 e Fig. 5.3).

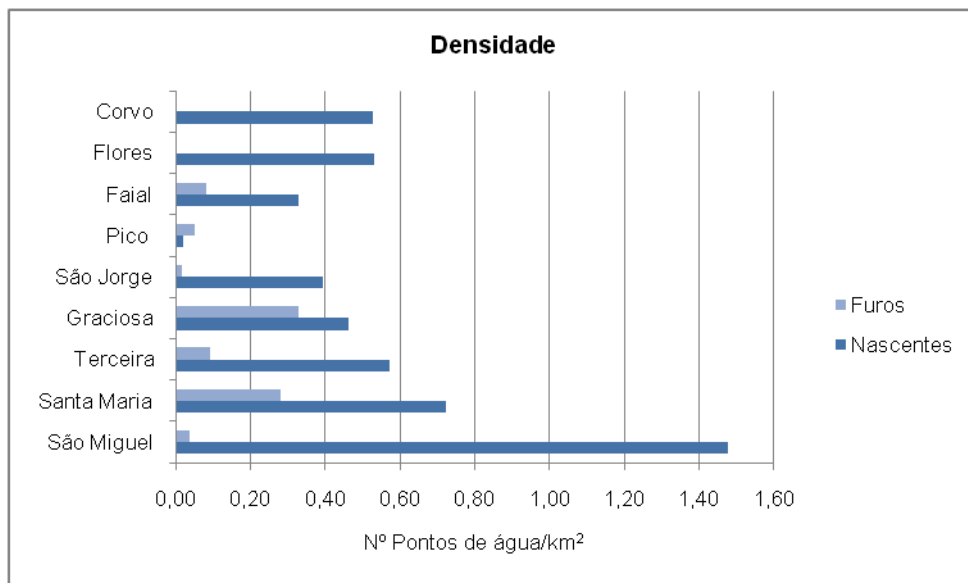


Figura 5.2 - Densidade associada à distribuição dos pontos de água por ilha (AHA-SRAM, 2011).

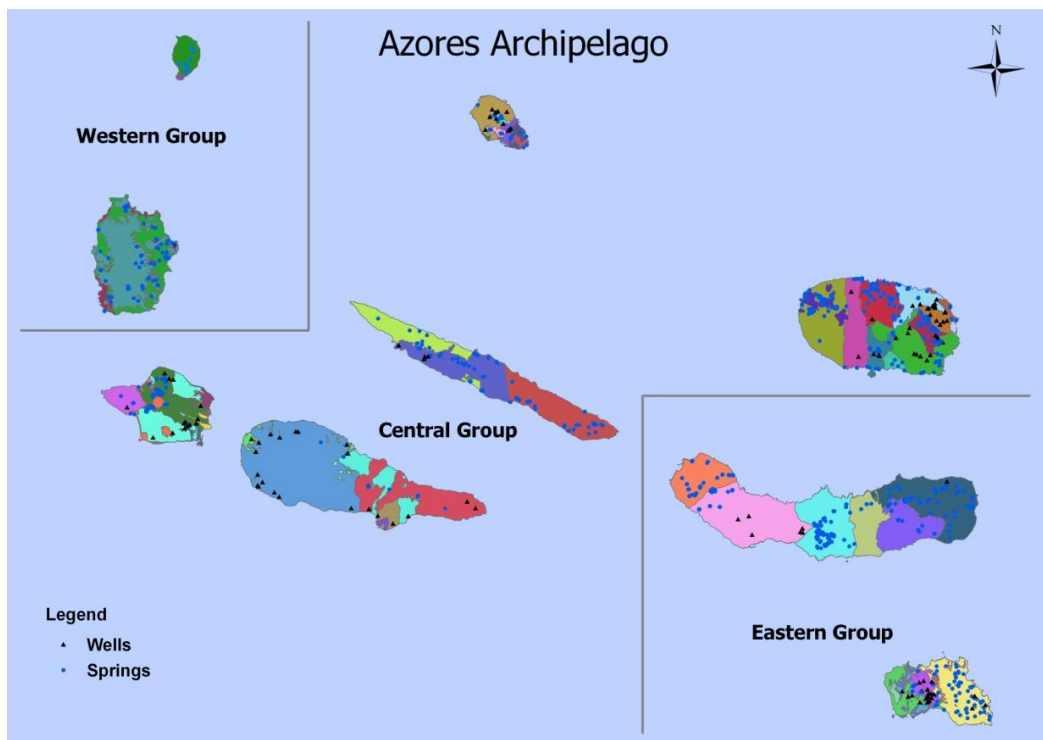


Figura 5.3 – Distribuição das nascentes e furos no arquipélago dos Açores (Cruz, *et al.*, 2011).

Na ilha de São Miguel foram inventariados 1126 pontos de água, dos quais 1100 correspondem a nascentes e 26 a furos. Estes pontos de água encontram-se distribuídos de modo heterogéneo pelas diferentes massas de água de acordo com a tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Distribuição do total dos pontos de água e dos pontos de água captados pelas massas de água da ilha de São Miguel (AHA-SRAM, 2011).

Massa de Água	Nº total de pontos de água		Nº de pontos de água captados	
	Nascentes	Furos	Nascentes	Furos
Sete Cidades	140	0	109	0
Ponta Delgada - Fenais da Luz	206	15	196	6
Água de Pau	286	7	245	0
Achada	23	3	4	0
Furnas – Povoação	283	0	204	0
Nordeste - Faial da Terra	162	1	120	1

Na massa de água Água de Pau, massa de água de incidência do presente trabalho, localizam-se 286 nascentes e 7 furos, dos quais apenas 245 nascentes são captadas. Realça-se que, para o presente trabalho, apenas foram caracterizados os pontos de água mais relevantes do flanco norte do vulcão do Fogo, a que corresponde igualmente o sector norte de massa de água referida.

A bacia hidrográfica da Ribeira Grande, onde estão localizados os pontos de água superficial amostrados, apresenta uma rede hidrográfica que escoar desde o vulcão central do Fogo até à costa Norte da cidade de Ribeira Grande, tem uma área de 18,4 km², uma descarga média estimada em 16,4 × 10⁶ m³/ano, e mais de 50% do uso do solo na área da bacia é ocupado por mato e vegetação natural (Cruz *et al.*, 2010a)

6. Levantamento Hidrogeológico

O levantamento hidrogeológico da área estudada foi efetuado por três fases. Numa primeira fase foi realizada a compilação dos diversos inventários de pontos de água subterrâneos existentes e que englobassem a área de estudo, nomeadamente os relativos aos estudos técnicos de base do Plano Regional da Água (DROTRH-SRAM, 2001) e do Plano de Gestão de Recursos Hídricos da RH9 (AHA-SRAM, 2011), assim como trabalhos de natureza académica (Carvalho, 1999; Costa, 2006; Freire, 2006).

Neste primeiro levantamento constaram apenas as coordenadas geográficas relativas à localização dos pontos de água subterrânea. Numa segunda fase, em campo, procedeu-se à confirmação das coordenadas dos pontos de água com recurso a um equipamento GPS, à identificação das litologias aflorantes em cada ponto, à descrição das captações, bem como ao registo da existência ou não de caudal e, em caso afirmativo, a determinação do valor do mesmo. Numa terceira fase foi efetuado o cruzamento de todos estes dados, com recurso à ferramenta ArcGis, de modo a definir a tipologia de aquífero associada a cada ponto de água ou a conjuntos de pontos de água.

No que concerne aos locais de amostragem de água superficial foram selecionados 12 pontos de água ao longo do curso da ribeira da Ribeira Grande. Esta rede englobou 5 locais de recolha correspondentes a estações hidrométricas que constam do Sistema de Monitorização da Administração Hidrográfica dos Açores (Secretaria Regional dos Recursos Naturais), 5 estações localizadas em posições intermédias entre os pontos anteriormente referidos e 2 outras estações constantes de Freire, *et al.* (2013), que se revelaram de interesse para complementar o estudo das águas subterrâneas.

As localizações dos pontos de água encontram-se listadas no anexo I.

6.1. Inventário dos pontos de água subterrânea

Na tabela 6.1 encontram-se os 46 pontos de água subterrânea alvo do presente trabalho, igualmente representados na figura 6.2.

6. Levantamento Hidrogeológico

Tabela 6.1 – Referência, designação, localização e altitude atribuída aos pontos de água subterrânea inventariados e amostrados. (C.R.G. – Caldeiras da Ribeira Grande; C.M.R.G. – nascentes captadas pela Câmara Municipal da Ribeira Grande).

Ref ^a	Designação	WGS84 Fuso 26S		Altitude (m)
		M	P	
2	Caldeira Pequena C.R.G.	633196	4184453	263
3	Caldeira Grande C.R.G.	633217	4184443	264
4	Fumarola C.R.G.	633221	4184457	266
5	Caldeira Velha Nascente	632123	4182686	392
6	Caldeira Velha Fumarola	632044	4182686	381
7	Ladeira da Velha	635760	4187300	19
8	Ladeira da Velha Férrea	635789	4187294	19
9	Lombadas	635570	4182102	575
10	Lombadas Doce	635599	4182052	576
11	Lombadas Furo II	635431	4182137	606
12	Magarça	632181	4184467	190
13	Pocinha	632957	4184608	241
15	Fajã do Boi I	632123	4180184	783
16	Fajão do Boi II	632122	4180188	783
17	Fajã do Boi III	632148	4180203	786
18	Fajã do Boi IV	632153	4180204	786
19	Bandeirinha	632769	4182588	454
20	Chá Canto	632368	4183095	349
21	Albano Vieira	632704	4183278	363
22	Cachaços	634074	4182402	614
23	Fajã das Traves	631873	4181650	503
24	Cabelos Brancos	631695	4182422	382
25	Mato Miguel	631761	4181839	452
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	630577	4181624	440
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	631009	4181674	432
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	630953	4181694	428
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	630821	4181691	423
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	630595	4181859	350
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	630535	4181949	326
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	630613	4181737	398
33	Pachãs	634115	4183880	392
34	Monte Gordo (Gramas)	634714	4184612	373
35	Pico Rafael	637970	4185506	302
36	Laranjinha	637021	4186050	220
37	Mata Alta (Monte Escuro)	637811	4184378	632
38	Porto Formoso II - Praia	637232	4187284	20
39	Porto Formoso III - conteira	636867	4187001	52
40	Porto Formoso IV - telha	636867	4187007	51

Refª	Designação	WGS84 Fuso 26S		Altitude (m)
		M	P	
41	Porto Formoso V - bica	636868	4186990	53
42	Gramas	633764	4185782	163
43	Caracol 8 (C.M.R.G. 18)	630789	4181653	436
44	Caracol 9 (C.M.R.G. 12)	631026	4181653	438
45	Caracol 10 (C.M.R.G. 11)	630982	4181618	449
46	Caracol 11 (C.M.R.G. 14)	631065	4181588	453
47	Caracol 12 (C.M.R.G. 5)	630583	4181852	355
48	Caracol 13 (C.M.R.G. 1)	630511	4182005	312

Na figura 6.1 encontra-se a distribuição das altitudes dos pontos de água por 5 classes.

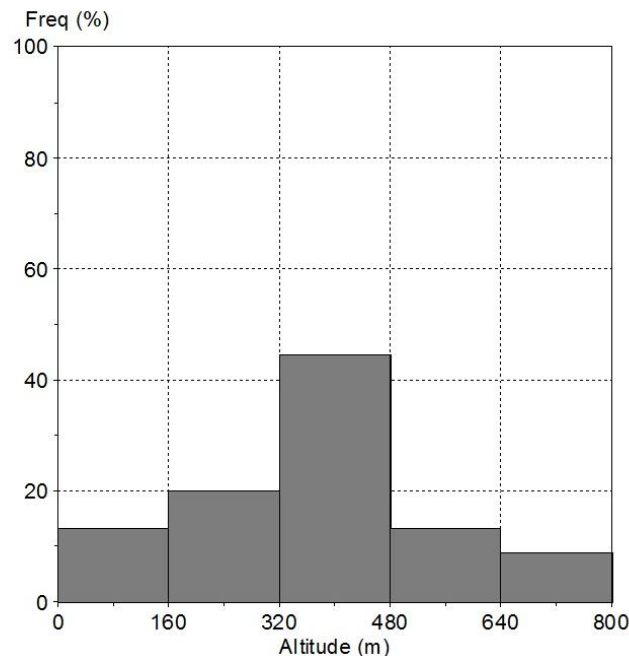


Figura 6.1 – Histograma da frequência de classes de altitude.

Da figura 6.1 é possível observar que há uma distribuição normal em torno do valor médio (381,4 m). Mais de 60% dos pontos de água encontram-se a uma cota superior aos 320 metros, no entanto existem pontos de água desde os 19 metros, junto à linha de costa, até aos 786 metros da altitude na zona circundante à Lagoa do Fogo.

Da figura 6.2 é possível observar que existem pontos de água distribuídos desde a zona litoral até a altitudes relativamente elevadas, como igualmente se depreende do histograma que representa a distribuição da altitude dos pontos de água por classes (Fig. 6.1).

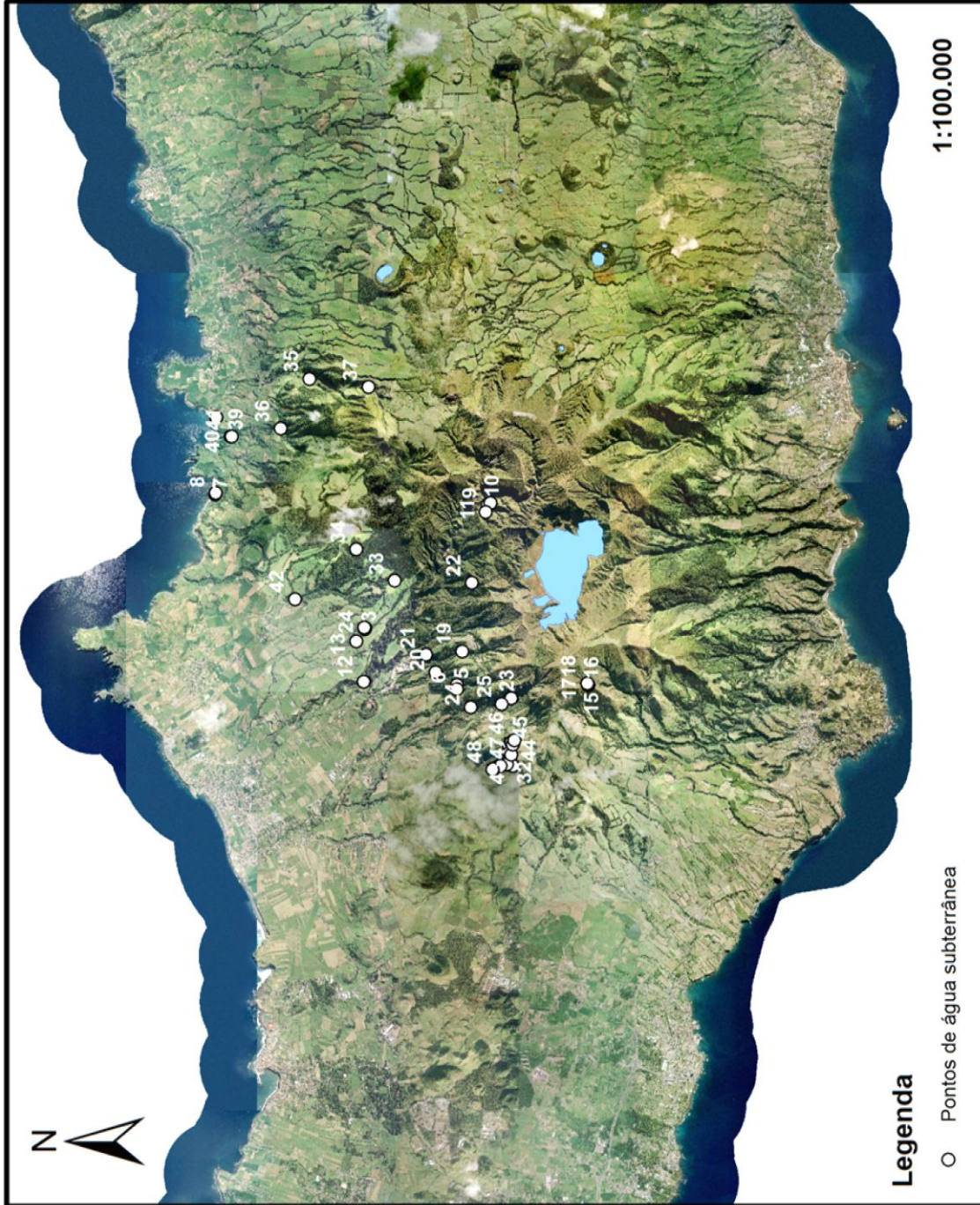


Figura 6.2 – Localização dos pontos de água subterrânea inventariados e amostrados

6. Levantamento Hidrogeológico

Tabela 6.2 – Caudais medidos nas amostragens realizadas e litologia associadas aos pontos de água subterrânea inventariados (C.R.G. – Caldeiras da Ribeira Grande; C.M.R.G. – Câmara Municipal da Ribeira Grande; pp – depósitos de pedra pomes; l1 – Lapilli pomítico).

Refª	Designação	Caudal (L/s)			Litologia
		jan/fev 2012	mar/abr 2012	jun 2012	
2	Caldeira Pequena C.R.G.				
3	Caldeira Grande C.R.G.				
4	Fumarola C.R.G.				
5	Caldeira Velha Nascente				traquito
6	Caldeira Velha Fumarola				
7	Ladeira da Velha				l1 traquito
8	Ladeira da Velha Férrea				l1 traquito
9	Lombadas		0,47	0,77	traquito
10	Lombadas Doce		0,20		pedra pomes
11	Lombadas Furo II		0,91	1,15	traquito
12	Magarça		1,21	1,13	pedra pomes
13	Pocinha		0,03	0,03	traquito
15	Fajã do Boi I	0,31	0,41	0,47	pedra pomes
16	Fajão do Boi II	1,44	1,81		pedra pomes
17	Fajã do Boi III	2,46	5,39	4,45	pedra pomes
18	Fajã do Boi IV	0,13	0,22	0,18	pedra pomes
19	Bandeirinha				traquito
20	Chá Canto				traquito
21	Albano Vieira				traquito
22	Cachaços				pedra pomes
23	Fajã das Traves	5,48	5,40	3,81	pedra pomes
24	Cabelos Brancos	0,99	0,92		traquito
25	Mato Miguel	5,99	7,64	6,25	traquito
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	0,12	0,19		traquito
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	0,54	0,85	0,37	pp l1
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	0,23	0,17	0,13	pp l1
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	0,60			pp l1
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	0,60	1,36	0,74	pp l1
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	0,08	0,18	0,16	traquito
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	0,30	0,53		pp l1
33	Pachãs				pedra pomes
34	Monte Gordo (Gramas)				pedra pomes
35	Pico Rafael				traquito
36	Laranjinha				traquito
37	Mata Alta (Monte Escuro)				traquito
38	Porto Formoso II - Praia				pp e basalto
39	Porto Formoso III - conteira				pedra pomes
40	Porto Formoso IV - telha		0,18	0,22	pedra pomes

6. Levantamento Hidrogeológico

Refª	Designação	Caudal (L/s)			Litologia
		jan/fev 2012	mar/abr 2012	jun 2012	
41	Porto Formoso V - bica		0,41		pedra pomes
42	Gramas		0,54	0,11	pedra pomes
43	Caracol 8 (C.M.R.G. 18)				pp l1
44	Caracol 9 (C.M.R.G. 12)		0,06	0,04	pp l1
45	Caracol 10 (C.M.R.G. 11)				pp l1
46	Caracol 11 (C.M.R.G. 14)				pp l1
47	Caracol 12 (C.M.R.G. 5)				pp l1
48	Caracol 13 (C.M.R.G. 1)		0,69	0,31	traquito

Na tabela 6.2 encontram-se os caudais medidos nas três amostragens, sempre que o ponto de água apresentasse uma descarga passível de aferir, de acordo com a metodologia aplicada, e as litologias associadas.

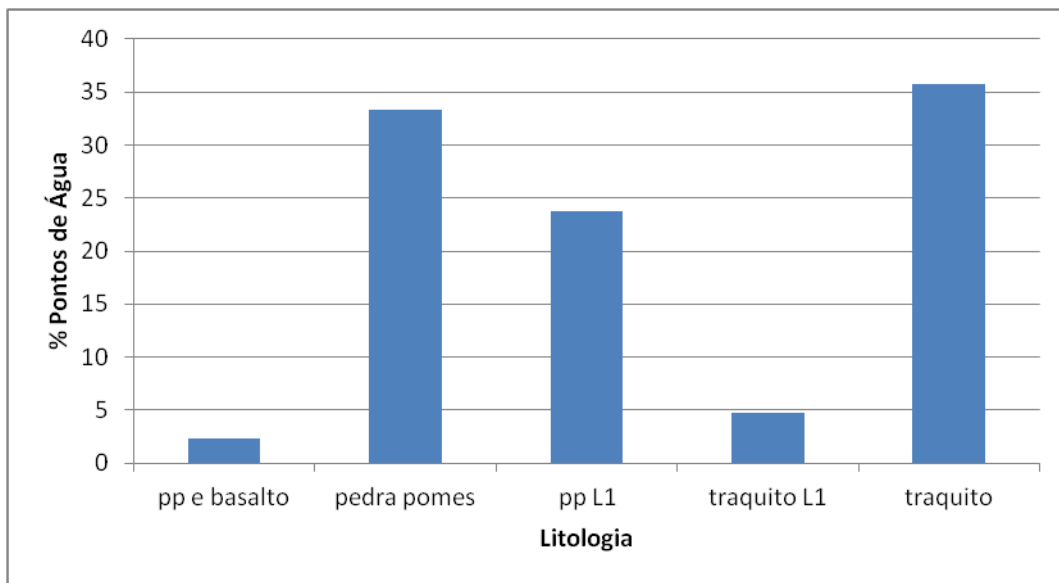


Figura 6.3 – Distribuição das diferentes litologias por ponto de água. (pp – Depósitos de pedra pomes; L1 – Lapilli pomítico).

A figura 6.3 põe em evidência que mais de 95% dos pontos de água apresentam uma litologia composta essencialmente por material de natureza geoquímica mais ácida, como depósitos de pedra pomes, depósitos de pedra pomes com intercalações de lapilli pomítico, traquitos com lapilli pomítico e escoadas lávicas traquíticas.

Os valores de caudal mais elevados, determinados nos pontos de água onde a medição foi possível, foram observados nas amostragens do mês de março/abril de 2012 (Fig. 6.4). Observa-se, ainda, que as nascentes Fajã do Boi III (ref^a17), Fajã das Traves (ref^a23) e Mato Miguel (ref^a25) são as mais produtivas, apresentando caudais significativos. Realça-se que, nas nascentes Bandeirinha (ref^a19) e Chá Canto (ref^a20), não foi possível efetuar a medição do caudal com recurso à metodologia aplicada nos restantes pontos de água, em resultado das condições físicas da captação, embora seja patente, no campo, o valor muito elevado desta variável. Segundo o INSAAR (INAG, 2009), com referência aos dados de 2008, a nascente Bandeirinha apresenta um caudal médio de 16,85 L/s, enquanto a nascente Chá Canto apresenta um caudal médio de 21,31 L/s.

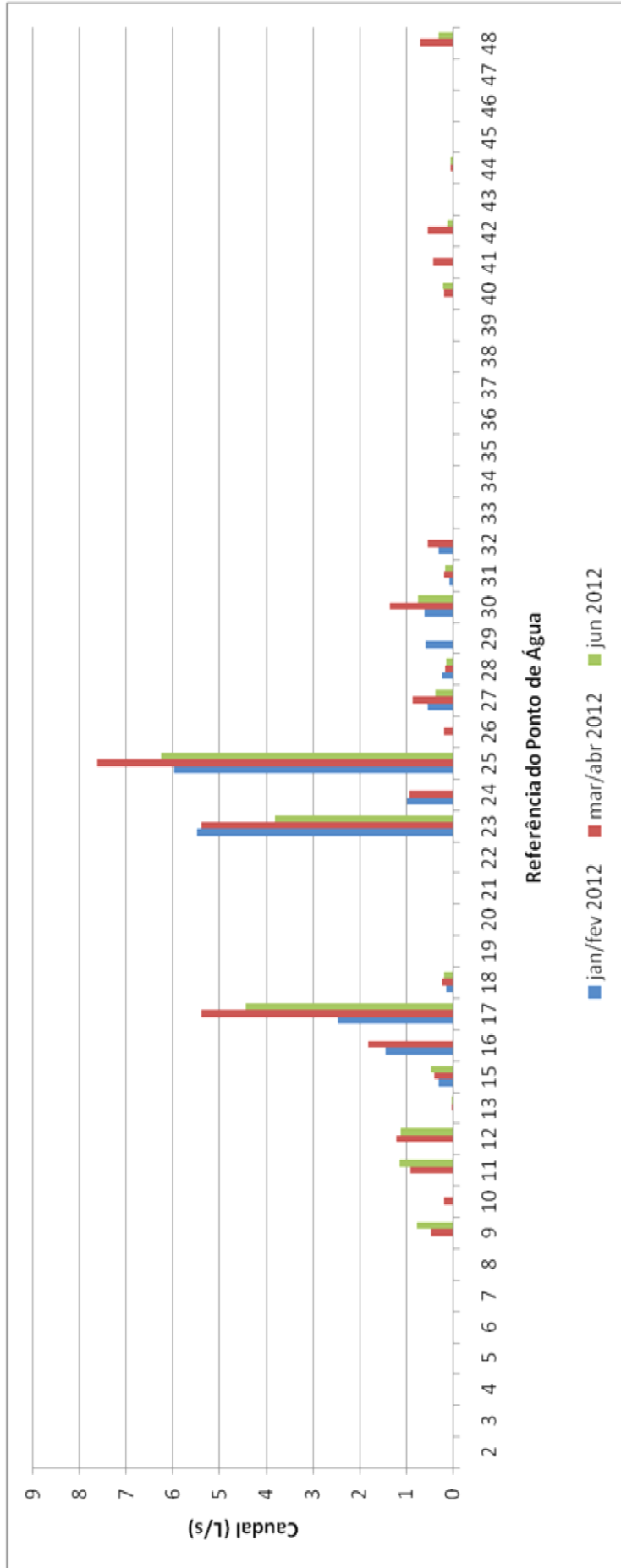


Figura 6.4 - Representação dos caudais medidos em cada amostragem por ponto de água.

6.2. Inventário dos pontos de água superficial

Na tabela 6.3 encontram-se a localização dos 12 pontos de água superficial complementares do presente trabalho.

Tabela 6.3 - Referência, designação e localização atribuída aos pontos de água superficial inventariados e amostrados.

Refª	Designação	Coordenadas WGS84 Fuso 26S	
		M	P
1	Ribeira Pré Caldeiras da Ribeira Grande	633237	4184384
14	Ribeira Pós-Pocinha	632936	4184673
49	RG1 - Ribeira Grande - Lombadas	635682	4182023
50	Ribeira Pré RG0	636065	4182252
51	RG0 - Ribeira do Rosário	635791	4182187
52	Central Geotérmica da Ribeira Grande	632796	4182217
53	Mato do Jorge	633747	4183568
54	RG2 - Salto do Cabrito	632446	4184241
55	RTX - Ribeira do Teixeira ou Pernada	631961	4184114
56	Areiro	631949	4185154
57	Escola Secundária da Ribeira Grande	630399	4186428
58	RG3 - Ribeira Grande Foz	629993	4187290

As localizações dos pontos de água superficial estudados foram representadas com recurso à ferramenta ArcGis (Fig. 6.5) sendo possível observar que as estações de amostragem se encontram distribuídas por diferentes altitudes, a que correspondem usos do solo também diversos (espaços de vegetação natural, espaços florestais, pastagens, espaços agrícolas, espaços urbanos, áreas descobertas, lagoas e espaços industriais).

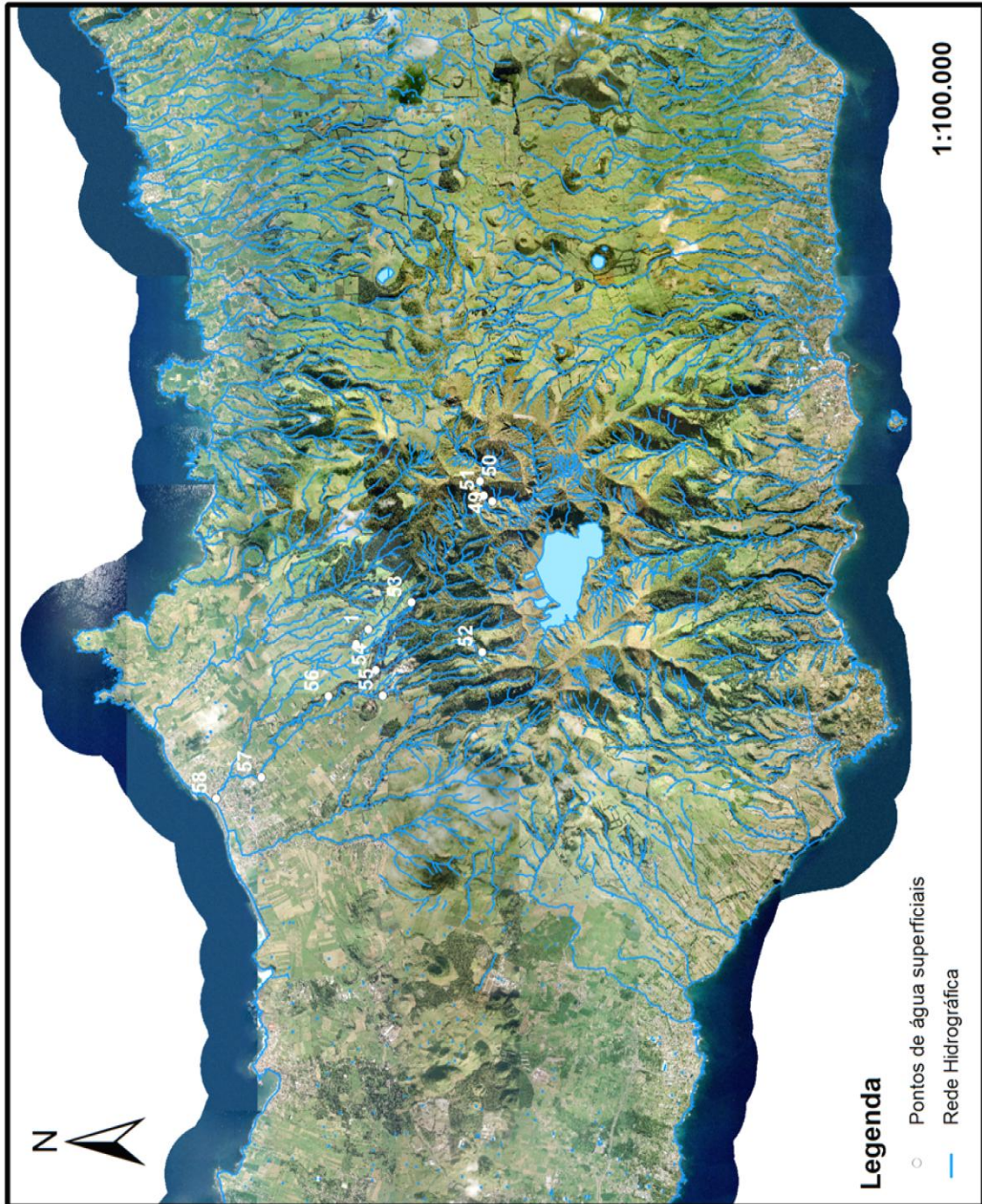


Figura 6.5 – Localização dos pontos de água superficial inventariados e amostrados

7. Hidrogeoquímica

7.1. Metodologia

A caracterização físico-química das águas do flanco norte do vulcão do Fogo baseou-se na recolha e análise de amostras representativas de 46 pontos de água subterrânea, incluindo nascentes de águas minerais, algumas das quais são termais e fumarolas. Realizou-se ainda a colheita e análise de águas superficiais em 12 pontos da rede hidrográfica da área estudada, de forma a complementar a caracterização do quimismo das águas subterrâneas, pelo que não são um dos objetivos primordiais da presente dissertação.

Foram realizadas três campanhas de amostragem de água subterrânea, sendo a primeira em janeiro/fevereiro de 2012, a segunda em março/abril de 2012 e a terceira em junho de 2012. Quanto às águas superficiais, realizaram-se duas campanhas de amostragem, sendo a primeira em fevereiro/março de 2012 e a segunda em abril/maio de 2012. Apesar do reduzido intervalo de tempo entre as colheitas, foi possível compreender a evolução hidrogeoquímica das águas amostradas.

No campo, no decurso da realização das amostragens, determinou-se a temperatura, o pH, a condutividade elétrica, a alcalinidade e o CO₂ livre, informação complementada por medições do caudal da nascente.

O pH, a temperatura e a condutividade foram determinados com um registador portátil WTW 340i.

Efetou-se a medição da temperatura no local de recolha da amostra, com recurso a um termómetro e registaram-se os valores obtidos em cada ponto de água. A medição do CO₂ livre e da alcalinidade foi efetuada por titulação, de acordo com os procedimentos adotados no âmbito da monitorização da qualidade da água levada a cabo pelo CVARG.

A concentração de CO₂ livre foi determinado por titulação com Hidróxido de Sódio (NaOH, concentração 1M/44) até atingir um valor de pH igual a 8,30 (valor acima do qual não existe CO₂), com recurso a uma multibureta para medir o volume de titulante adicionado e ao medidor de pH para verificar quando a amostra atingia o valor de pH referido. Para este fim utilizou-se 100 ml da amostra num gobelet, o qual foi sendo agitado manualmente enquanto se adicionava o titulante. Registou-se o valor de

titulante gasto até atingir o pH pretendido e a concentração de CO₂ livre, expressa em mg/L, foi obtida multiplicando esse valor por 10.

A alcalinidade foi determinada por uma titulação semelhante a anterior, sendo o titulante utilizado H₂SO₄ (0,005 M), adicionado a 100 mL da amostra num gobelet, sendo, novamente agitado a medida que se adicionou o titulante, até esta atingir um valor de pH de 4,45 para águas frias, ou 3,83 o caso de águas quentes. Registou-se o volume de titulante gasto, e a alcalinidade, expressa em mg CaCO₃/L foi obtida multiplicando esse valor por 50.

A medição do caudal (volume de água que passa por unidade de tempo) foi realizada cronometrando o tempo que levou a encher um recipiente com capacidade de 14 litros nas nascentes de maior caudal, ou recipiente de 1 litro nas emergências de caudal mais reduzido. Repetiu-se esse procedimento por 3 vezes por nascente, sendo posteriormente calculado o caudal médio com base nas três medições.

As amostras foram colhidas em recipientes lavados três vezes com a própria água a amostrar, para evitar contaminações externas. A recolha das amostras foi efetuada com duas garrafas de polietileno de 1000 mL preenchidos com água não filtrada, por ponto de recolha. Uma das garrafas foi entregue no INOVA (Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores) para determinação do nitrato, amónio e fosfato, e ainda do nitrito no caso das águas superficiais. Este procedimento só se efetuou no decurso de uma das campanhas de amostragem uma vez que os resultados obtidos foram, em regra, inferiores aos limites de deteção, não se justificando os custos inerentes à manutenção deste procedimento.

A segunda garrafa de 1000 mL foi transportada para o Laboratório de Hidrogeoquímica do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos (Departamento de Geociências) da Universidade dos Açores, onde foi filtrada com recurso a uma bomba de filtragem. Esta última operação, com recurso a filtros de 0,45µm de abertura, visou preencher dois recipientes em polietileno, de volume variável e com um procedimento também diverso, de acordo com o fim pretendido: (1) garrafa de 250 mL acidificada com 2 mL de ácido nítrico a 65% (ultrapuro), para determinação dos catiões e sílica por absorção atómica e, (2) garrafa de 125 mL de água filtrada, mantido no frio, para posterior determinação dos aniões por cromatografia iónica no DIONEX ICS-1000. A adição de ácido nítrico e feita com intuito de se baixar o pH para valores inferiores a 2, de modo a não ocorrem reações que alterem a composição da amostra até a sua análise.

A determinação dos cátions e da sílica foi efetuada com recurso à espectrometria de absorção atômica, num equipamento de marca GBC, modelo 906AA. A espectrometria de absorção atômica baseia-se na absorção de radiação eletromagnética, normalmente nas gamas do visível e ultravioleta, por átomos neutros no estado gasoso.

Segundo esta técnica, a amostra é atomizada numa chama, através da qual passa radiação com comprimento de onda adequado a cada elemento a analisar, emitida a partir de uma lâmpada de cátodo oco, que depois atinge um monocromador e, posteriormente, o detetor.

A amostra é lançada na chama que atinge temperaturas que variam entre 2100°C e 2300°C. Durante a combustão, os átomos livres no estado fundamental absorvem radiação a comprimentos de onda característicos de cada elemento, segundo os padrões de calibração. A redução de energia da radiação no comprimento de onda característico do analítico é uma medida da quantidade desse elemento na amostra.

Esta metodologia pressupõe a elaboração prévia de uma reta de calibração do elemento que se pretende saber o teor, em função da sua absorvância. Para isso preparam-se amostras-padrão com várias concentrações pré-determinadas do elemento a determinar. Procede-se a leitura das absorvâncias de cada um dos padrões, elaborando uma reta de calibração relativa às soluções-padrão. A concentração do elemento pretendido nas amostras em estudo é, posteriormente obtida efetuando uma comparação da respetiva absorvância com os valores constantes da reta de calibração preparada com os padrões.

A análise dos aniões cloreto, fluoreto, nitrato e sulfato foi efetuada por um sistema de cromatografia iónica, num equipamento DIONEX ICS-1000, com *software* Chromeleon®, que realiza a separação e determinação de iões por meio de resinas de troca iónica, o que implica que a deteção dos respetivos sinais no detetor faz-se diferencialmente ao longo do tempo. A separação é baseada na distribuição dos componentes entre duas fases: uma fase estacionária e uma fase móvel. A amostra a analisar é colocada na fase móvel e os elementos desta movem-se com maior ou menor rapidez dependendo da sua afinidade com cada fase.

Antes da análise da amostra, o sistema de cromatografia iónica é calibrado utilizando-se para o efeito soluções-padrão de concentração pré-determinada. Por comparação dos resultados da amostra com os conhecidos dos padrões, os iões são identificados e quantificados. O *software* Chromeleon® produz então um cromatograma para a

amostra a ser analisada (gráfico com os elementos detetados em função do tempo), onde cada pico corresponde à concentração de determinado elemento.

Na figura 7.1 é apresentado o cromatograma resultante da análise de uma amostra analisada no âmbito do presente trabalho, com os quatro picos correspondentes aos elementos em estudo. O primeiro pico aos 2,5 minutos corresponde fluoreto, o segundo ao cloreto (3,47 minutos), o terceiro ao nitrato (5,69 minutos) e o último, correspondente ao sulfato, surge aos 8,05.

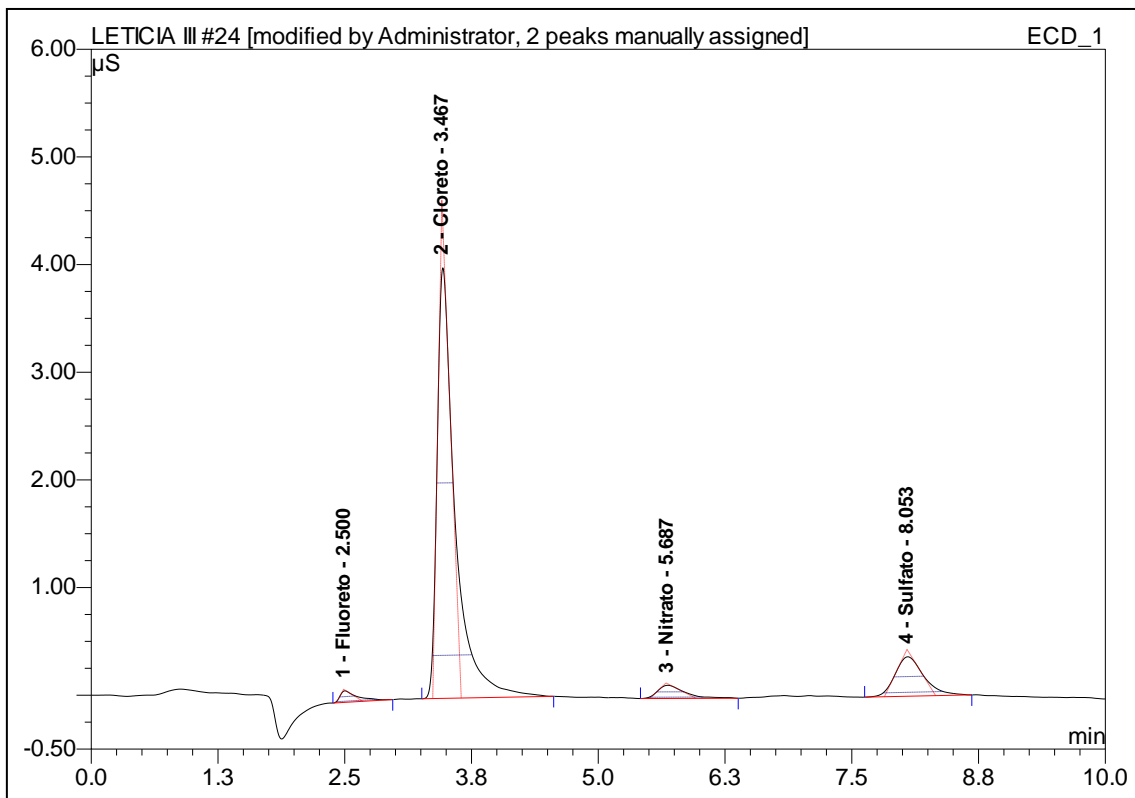


Figura 7.1 - Cromatograma resultante da análise de uma amostra com os quatro elementos aniônicos analisados.

Os resultados das análises físico-químicas realizadas nas três campanhas de amostragem encontram-se discriminados no Anexo II.

7.2. Água Subterrânea

A partir do inventário dos pontos de água apresentado no subcapítulo 6.1 procedeu-se à caracterização das fácies hidrogeoquímicas e à identificação dos principais processos mineralizadores da água subterrânea. Para tal, foram projetados os resultados das análises efetuadas em diagramas de Piper e de Schoeller.

O diagrama de Piper ilustra graficamente o resultado de análises químicas, sendo composto por dois triângulos, um aniónico e outro catiónico, cujos vértices representam os principais catiões e aniões, em percentagem relativa. (Custodio & Llamas, 1983). Este tipo de gráficos possibilita a projeção de um elevado número de pontos de água, evidenciando facilmente os processos de misturas de águas, dissolução e precipitação. A partir do diagrama de Piper é possível classificar e comparar grupos de águas distintos, com base nos iões predominantes, recorrendo ao losângulo no topo (Custodio & Llamas, 1983).

Por sua vez, o diagrama de Schoeller é um gráfico semi-logarítmico, constituído por semirretas verticais igualmente espaçadas. Neste encontra-se representada a concentração dos elementos maiores, em meq/L, cuja ordenação da esquerda para a direita é iniciada com Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e HCO_3^- . É utilizado para representar diferentes tipologias hidrogeoquímicas de águas no mesmo diagrama, quando é necessário, por exemplo, representar num único gráfico amostras bastante concentradas e muito diluídas (Custódio & Llamas, 1983).

As fácies hidrogeoquímicas predominantes no arquipélago dos Açores são correspondem a águas dos tipos cloretada sódica a bicarbonatada sódica (Cruz, 2004). Este tipo de fácies encontra-se associado aos principais processos mineralizadores da água subterrânea nas várias ilhas, nomeadamente influência dos sais marinhos, transportados e depositados por ação da chuva e/ou vento, ou através da mistura com água do mar em furos e poços; dissolução de CO_2 no solo pelas águas infiltradas e hidrólise de minerais silicatados (Cruz & Amaral, 2004). Para além destes processos, as águas minerais do arquipélago apresentam assinaturas geoquímicas que sugerem algum grau de interação entre os processos hidrogeológicos e vulcânicos (Cruz *et al.*, 1999, 2010a).

Na área estudada as fácies hidrogeoquímicas predominantes são cloretadas a bicarbonatadas sódicas, sendo que se encontram fácies sulfatadas sódicas, e ainda, projetadas no centro do triângulo aniónico, águas cuja composição química sugere

uma tendência que denota um enriquecimento em sulfato relativamente à maioria das amostras (Fig. 7.2).

A partir do diagrama de Schoeller (Fig. 7.3) verifica-se que existe uma homogeneidade das amostras analisadas, ainda que existam 2 amostras que apresentam um comportamento diferente, relativamente às restantes, sendo este fato justificado pela sua composição mais rica em sulfatos.

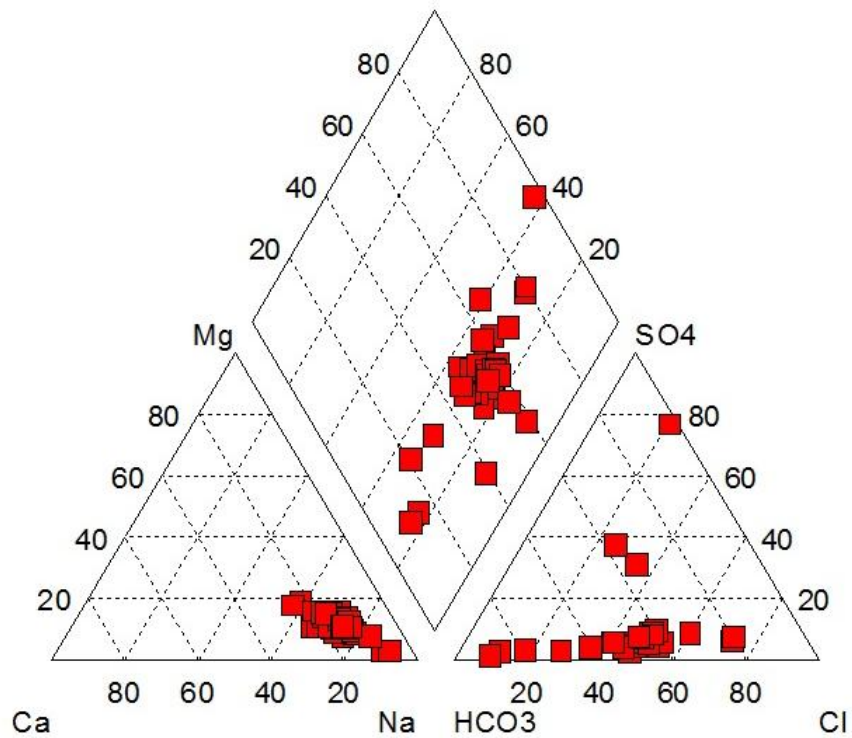


Figura 7.2 – Diagrama de Piper das amostras de águas subterrâneas analisadas na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012.

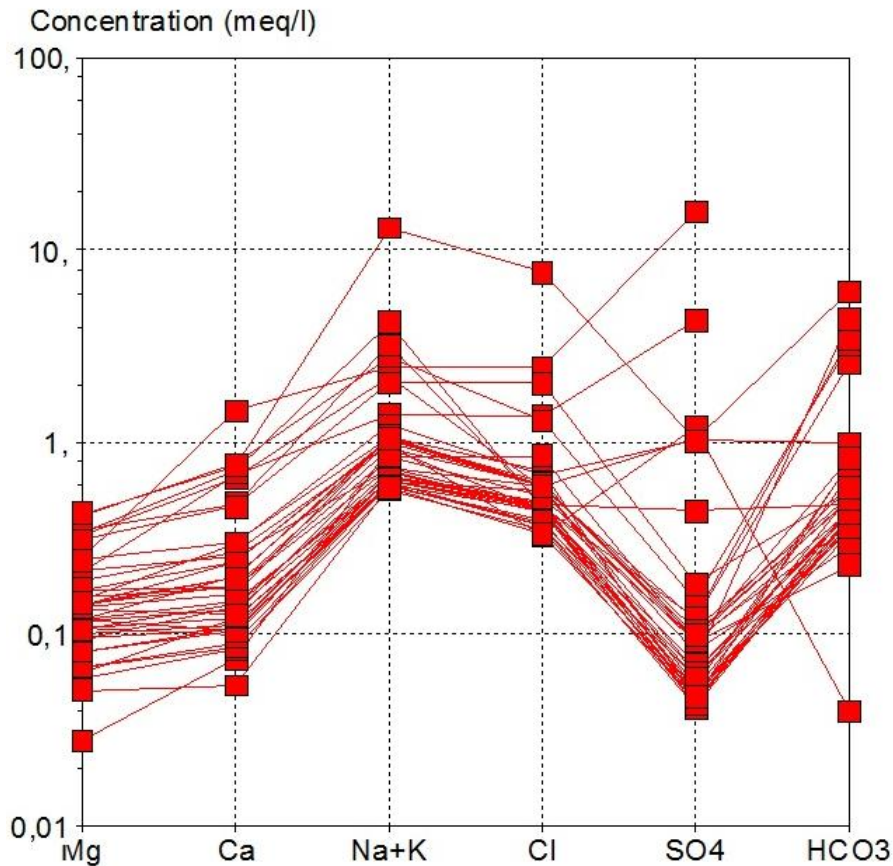


Figura 7.3 - Diagrama de Schoeller das amostras de águas subterrâneas analisadas na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012.

7.2.1. Parâmetros Físicos

7.2.1.1. Temperatura

A temperatura é um parâmetro de elevada importância na caracterização da água subterrânea pois é um indicador do percurso da mesma em profundidade. Este parâmetro pode variar entre os 0°C e os 300°C, sendo o limite máximo associado à temperatura do vapor de água nos sistemas geotérmicos (Costa, 2006).

A temperatura da água é também um indicador do grau de dissolução de minerais, uma vez que o aumento da temperatura promove um aumento da volatilização, desencadeando reações ácido-base que vão promover a dissolução dos constituintes das rochas envolvidas.

Quanto à respectiva temperatura, as águas podem ser classificadas como (Schoeller, 1962, *in* Costa, 2006): (1) termiais, quando a temperatura da água é superior à temperatura média anual do ar acrescida de 4°C, (2) ortotermiais, ou normais, quando

a temperatura da água se encontra no intervalo entre a temperatura média anual do ar e este último valor acrescido de 4°C, (3) hipotermais, ou frias, quando a temperatura da água é inferior à temperatura média anual do ar.

Não existe uma variação significativa dos valores de temperatura da primeira para a segunda amostragem, ambas contemplam um número significativo de águas termais, ortotermais e hipotermais (Fig. 7.4 e 7.5). No entanto, salienta-se que o valor médio da temperatura nas várias amostragens, em sequência respetivamente igual a 20,7°C, 19,6°C e 20,4°C, se enquadra na gama das águas ortotermais (tabela 7.1). Não obstante, os valores do desvio padrão, respetivamente iguais a 14,3°C, 12,5°C e 12,4°C, sublinham a variabilidade existente.

As temperaturas máximas registadas nas três amostragens, respetivamente iguais a 82,3°C, 74,1°C e 71,2°C, correspondem ao mesmo ponto de água, sendo este a fumarola da Caldeira Velha (ref^a6). No que respeita aos valores mínimos registados na primeira amostragem iguais a 12,3°C nas nascentes Fajã do Boi II e III (ref^a16 e 17), na segunda amostragem igual a 12,6°C na nascente Fajã do Boi I (ref^a15) e, 12,8°C na nascente Fajã do Boi IV (ref^a18), contribuindo para tal o facto de serem as nascentes que se encontram a maior altitude.

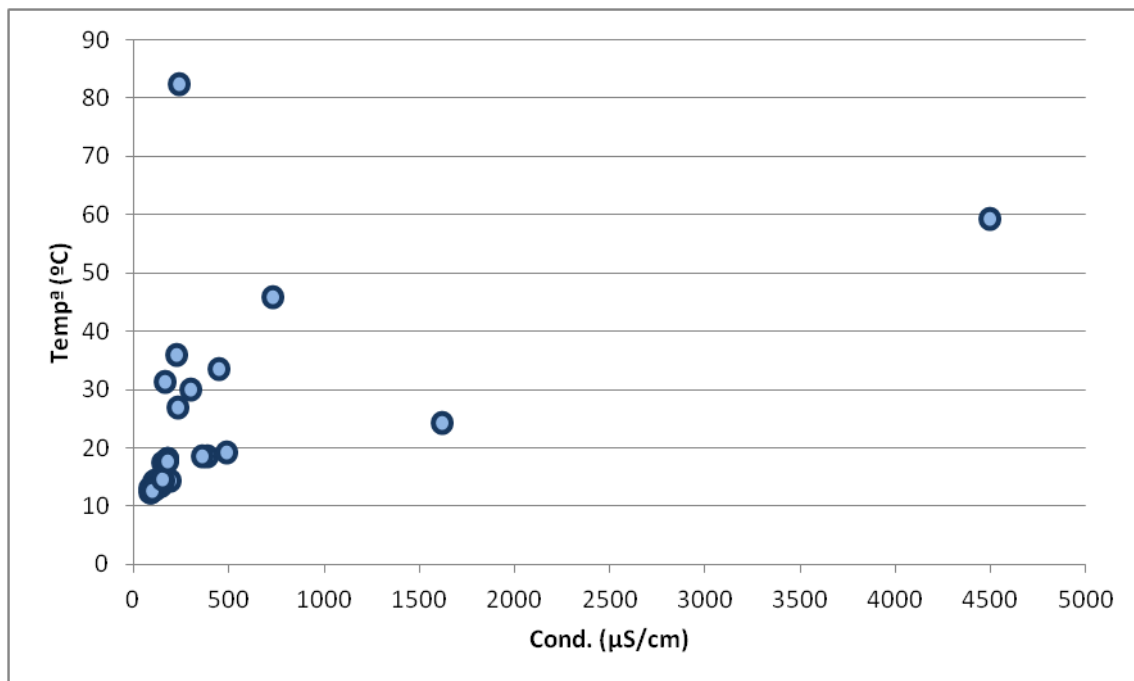


Figura 7.4 – Temperatura da água subterrânea nas várias amostras recolhidas em janeiro/fevereiro 2012, em função da condutividade elétrica das amostras.

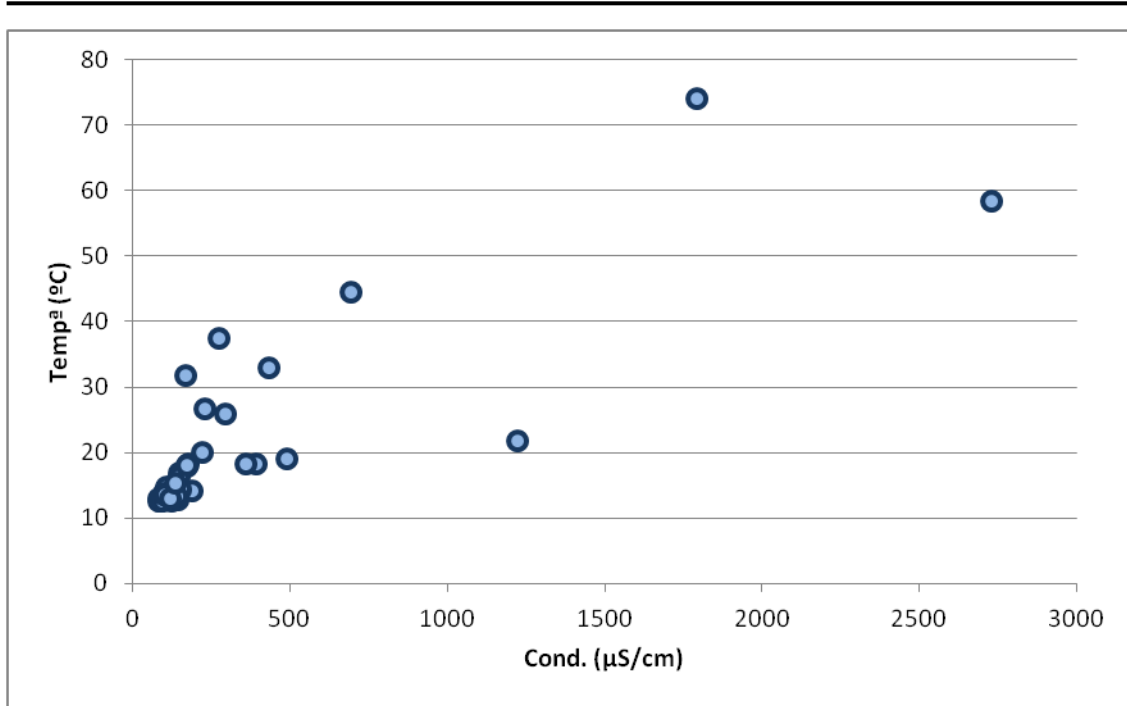


Figura 7.5 – Temperatura da água subterrânea nas várias amostras recolhidas em março/abril de 2012, em função da condutividade elétrica das amostras.

Tabela 7.1 – Dados estatísticos referentes aos parâmetros físicos das águas amostradas.

Parâmetros Físicos	Data	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
Temp. (°C)	jan/fev 2012	39	82,3	12,3	20,7	14,2	14,3
	mar/abr 2012	45	74,1	12,6	19,6	14,2	12,5
	jun 2012	45	71,2	12,8	20,4	14,5	12,4
Condutividade (µS/cm)	jan/fev 2012	39	4490	81	330	144	734
	mar/abr 2012	45	2730	79	291	136	484
	jun 2012	45	6340	82	425	135	1156

7.2.1.2. Condutividade elétrica

A condutividade é um parâmetro físico de alguma importância, pois traduz a capacidade que uma água tem de conduzir corrente elétrica e é diretamente proporcional à mineralização da mesma.

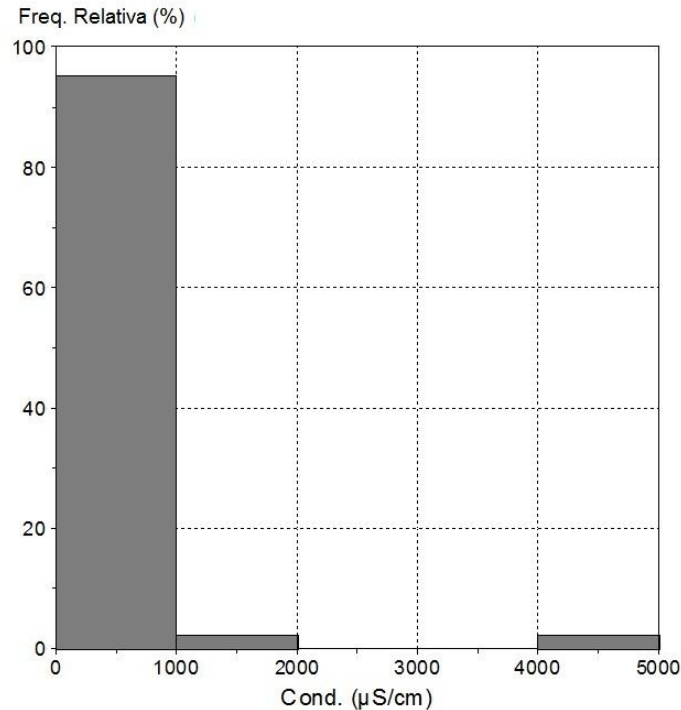


Figura 7.6 – Histograma com distribuição dos valores de condutividade elétrica (janeiro/fevereiro de 2012).

Cerca de 95% das amostras recolhidas no presente estudo apresentam valores de condutividade inferior a 1000 $\mu\text{S/cm}$ (Fig. 7.6). Conjugando estes dados com os valores estatísticos da condutividade, pode-se verificar que o valor médio na primeira amostragem é de 330 $\mu\text{S/cm}$, 291 $\mu\text{S/cm}$ na segunda amostragem e de 425 $\mu\text{S/cm}$ na terceira amostragem, correspondendo a águas pouco mineralizadas (tabela 7.1). No entanto, os valores máximos verificados nas três amostragens, são extremamente elevados, respetivamente 4490 $\mu\text{S/cm}$ e 2730 $\mu\text{S/cm}$ na primeira e segunda amostragem, correspondentes à Fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4), e 6340 $\mu\text{S/cm}$ na terceira amostragem, correspondendo à Fumarola da Caldeira Velha (ref^a6). Estes valores máximos, registados em fumarolas, são resultado do elevado tempo de residência do fluido no reservatório e da elevada temperatura, que promovem a solubilização na interação água-rocha, promovendo a mineralização do fluido.

Outro caso onde os valores de condutividade se encontram nitidamente elevado relativamente ao conjunto das amostras é na nascente Albano Vieira (ref^a21), em que os registos variam entre 1222 $\mu\text{S/cm}$, na amostragem de março/abril de 2012, e 1618 $\mu\text{S/cm}$ na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. Sugere-se que estes valores

sejam resultantes da contaminação por fluidos geotérmicos extremamente mineralizados. No entanto, a tendência registada aponta para a diminuição da condutividade, tendo sido medido um valor igual a 495 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na amostragem de junho de 2012.

Os valores mínimos registados nas três amostragens, em torno dos 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondem a águas pouco mineralizadas, com valores de condutividade inferiores aos registados para a água da chuva naquele local (129 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Antunes, 2008). Este é o caso das nascentes Fajã do Boi I (ref^a15) e Fajã das Traves (ref^a23) Os valores de desvio padrão de 734 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 484 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1156 $\mu\text{S}/\text{cm}$ refletem a elevada dispersão dos dados registados (tabela 7.1).

7.2.2. Parâmetros Químicos

7.2.2.1. pH

O pH é um parâmetro químico que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa em função da sua concentração no ião hidrogénio e depende diretamente da temperatura, diminuindo o seu valor com o aumento da mesma. Assim sendo, soluções aquosas a 25°C são consideradas ácidas quando apresentam valores de pH inferior a 7 unidades, neutras quando o valor de pH é igual a 7 e alcalinas, ou básicas, quando o valor de pH é superior a 7.

A concentração do ião hidrogénio influencia a estabilidade das espécies minerais, intervindo nos equilíbrios químicos, nomeadamente, nas reações ácido-base, nos processos de adsorção, na complexação de metais, em reações de oxidação-redução e na solubilidade e taxa de dissolução da maior parte dos minerais (Langmuir, 1997).

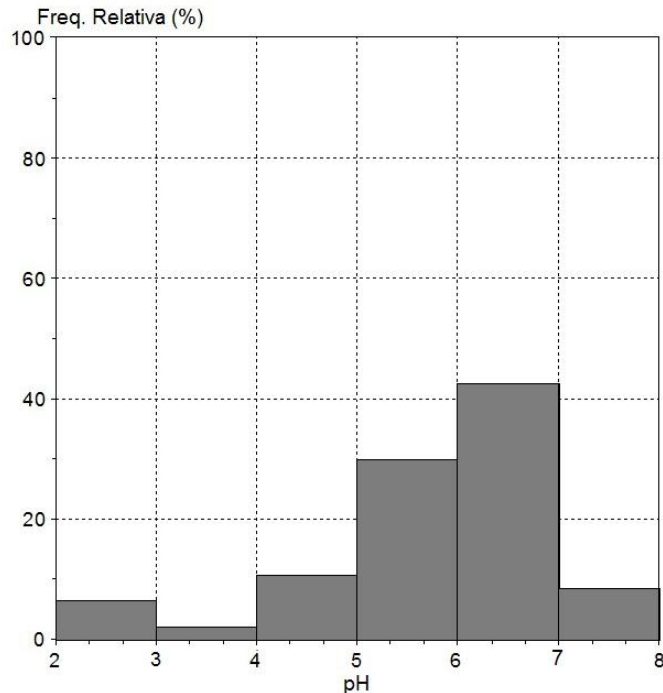


Figura 7.7 - Histograma com a distribuição dos valores de pH (março/abril de 2012).

Os dados estatísticos referentes ao pH encontram-se listados na tabela 7.2. Os valores máximos de pH registados em todas as amostragens encontram-se na neutralidade (respetivamente iguais a 7 unidades de pH, 7,3 e 6,9). Relativamente aos valores mínimos registados nas diversas amostragens, estes são observados na fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4) e são reveladores de um carácter ácido muito pronunciado (respetivamente iguais a 1,8 unidades de pH, 1,9 e 2). Os valores médios de pH são iguais a 5,7 unidades de pH, na primeira e terceira amostragem e 5,8 unidades de pH na segunda amostragem, correspondendo nos três casos a águas ácidas.

Verifica-se que na segunda amostragem, há uma tendência para valores de pH entre as 5 e as 7 unidades de pH. No entanto, não há uma distribuição homogénea dos resultados, existindo uma larga gama de valores, pondo em evidência a diversidade de águas amostradas (Fig. 7.7).

7.2.2.2. Alcalinidade

A alcalinidade de uma solução traduz-se na sua capacidade de neutralizar ácidos, isto é, no caso das águas subterrâneas, a alcalinidade representa a capacidade que a água tem de se manter neutra aquando da introdução de um ácido no sistema.

A alcalinidade determinada para as águas amostradas é designada por alcalinidade TAC (Custodio & Llamas, 1983), e corresponde à capacidade para neutralizar ácidos até um pH de 4,5 ou 3,35, no caso de, respetivamente, se tratar de águas frias ou quentes.

Tabela 7.2 - Dados estatísticos referentes aos parâmetros químicos das águas amostradas.

Parâmetros Químicos	Data	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
pH	jan/fev 2012	39	7,0	1,8	5,7	6,2	1,2
	mar/abr 2012	45	7,3	2,0	5,8	6,0	1,2
	jun 2012	45	6,9	1,9	5,7	6,1	1,2
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	jan/fev 2012	39	306,5	2,0	47,5	22,5	66,4
	mar/abr 2012	45	242,0	14,0	45,3	25,5	53,9
	jun 2012	45	232,5	8,0	41,8	24,0	49,0
Dureza Total (mg CaCO ₃ /L)	jan/fev 2012	39	85,6	5,1	21,3	12,6	18,6
	mar/abr 2012	45	85,7	4,0	18,4	13,3	15,4
	jun 2012	45	87,4	4,6	22,9	16,2	18,4

Das estatísticas apresentadas na tabela 7.2 observa-se que na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 a alcalinidade variou entre 2 mg CaCO₃/L e 306,5 mg CaCO₃/L, com um valor médio de desvio padrão respetivamente iguais a 47,5 e 66,36 mg CaCO₃/L. Na segunda amostragem os resultados variaram entre 14 mg CaCO₃/L e 242 mg CaCO₃/L, com um valor médio e de desvio padrão iguais a 45,2 mg CaCO₃/L e 53,9 mg CaCO₃/L. Por sua vez, na amostragem de junho de 2012, os valores de alcalinidade situaram-se na gama entre 8 mg CaCO₃/L e 232,5 mg CaCO₃/L, com média e desvio padrão respetivamente iguais a 41,8 mg CaCO₃/L e 49 mg CaCO₃/L. Daqui pode concluir-se que não houve grande variação deste parâmetro entre as três amostragens, sendo a variabilidade de valores por amostragem bastante ampla.

7.2.2.3. Dureza Total

A dureza total é uma propriedade química de uma água que quantifica a capacidade de formação de incrustações (maioritariamente de CaCO₃), sendo este facto determinante para que uma água seja considerada apropriada para o consumo humano. Corresponde ao conteúdo em iões metálicos alcalinoterrosos, especialmente ao somatório do teor em cálcio e magnésio.

Segundo a classificação proposta por Custodio & Llamas (1983) as águas com dureza total inferior a 50 mg CaCO₃/L são do tipo brandas, de 50 a 100 mg CaCO₃/L são

pouco duras, de 100 a 200 mg CaCO₃/L são duras e acima de 200 mg CaCO₃/L são muito duras.

Os valores máximos de dureza total calculada são iguais sucessivamente a 85,6 mg CaCO₃/L, 85,7 mg CaCO₃/L e 87,4 mg CaCO₃/L, enquanto os valores mínimos são iguais, respetivamente na primeira, segunda e terceira amostragem a 5,1 mg CaCO₃/L e 4,0 mg CaCO₃/L e 4,6 mg CaCO₃/L (tabela 7.2). Os valores médios das amostragens realizadas são, sucessivamente, 21,3 mg CaCO₃/L, 18,4 mg CaCO₃/L e 22,9 mg CaCO₃/L. Os valores de desvio padrão, 18,6 mg CaCO₃/L, 15,4 mg CaCO₃/L e 18,4 mg CaCO₃/L refletem uma reduzida dispersão dos dados.

De um modo geral, as águas analisadas são classificadas como águas brandas, apresentando valores de dureza total inferiores a 50 mg CaCO₃/L, apenas a fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4), apresentou nas três amostragens valores de dureza total sucessivamente de 85,6 mg CaCO₃/L, 85,7 mg CaCO₃/L e 87,4 mg CaCO₃/L, o que permite classificá-la como ligeiramente dura.

7.2.3. Catiões

Os resultados dos cálculos estatísticos referentes aos teores dos catiões principais determinados nas três amostragens efetuadas encontram-se indicados na tabela 7.3. Nesta tabela encontram-se, ainda, os valores máximos e mínimos de cada recolha.

O sódio é o catião predominante nas águas subterrâneas analisadas. Pela comparação das estatísticas e dos valores extremos obtidos nas várias amostragens não se regista uma variação significativa da concentração média desta espécie.

Os valores máximos registados nas duas primeiras amostragens, iguais a 270,7 mg/L e 273,5 mg/L correspondem ambos à nascente Albano Vieira (ref^a21), sendo que o valor máximo da terceira amostragem (108,3 mg/L) foi observado no Furo II das Lombadas (ref^a11). O valor mínimo de concentração de sódio, determinado nas amostragens sucessivas, foi igual a 10,9 mg/L (nascente da Mata Alta; ref^a37), na primeira recolha, 12,4 mg/L (nascente Caracol11-CMRG 14; ref^a46) na segunda amostragem, e 13,45 mg/L (nascente do Pico Rafael; ref^a35) na última. Os valores de desvio padrão das duas primeiras amostragens, que variam entre 41 mg/L e 42,6 mg/L, refletem a variabilidade de valores analisados, sendo que na última amostragem há um aumento significativo da homogeneidade de valores, visto o valor do desvio padrão decrescer para metade dos registados anteriormente.

A origem de elevados teores de sódio em águas subterrâneas pode estar associada à dissolução de NaCl, dissolução de silicatos (plagioclase), e/ou adição de sódio a partir da água da chuva (Berner & Berner, 1987), podendo excluir-se, face ao enquadramento da área em estudo, o primeiro dos processos modificadores enunciados

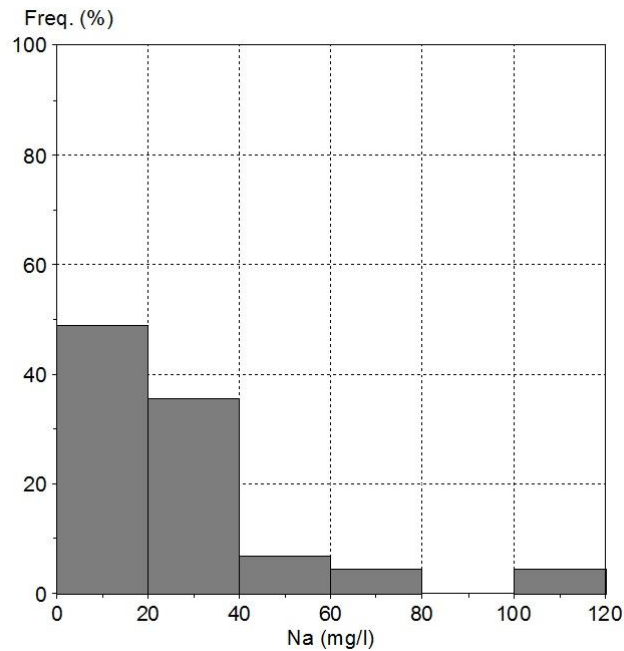


Figura 7.8 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em sódio (junho de 2012).

Mais de 80% dos valores registados nas águas da amostragem de junho de 2012 são inferiores a 40 mg Na/L (Fig. 7.8).

O catião potássio é o segundo com maior representatividade nas águas analisadas. O histograma respeitante à concentração em potássio referente à terceira amostragem, mostra que quase 80% das amostras se enquadram na classe modal, correspondente a valores inferiores a 9 mg K/L (Fig. 7.9).

Da análise dos valores estatísticos verifica-se que o potássio apresenta uma concentração média na ordem dos 8 a 9 mg/L nas três amostragens realizadas (tabela 7.3). Os valores máximos registados na recolha de janeiro/fevereiro de 2012 são iguais a 52,7 mg/L (nascente Albano Vieira, ref^a21) e a 36,1 mg/L (Lombadas Furo II, ref^a11). Na amostragem de março/abril de 2012 registou-se um aumento dos valores de potássio no ponto Lombadas Furo II (ref^a11) para 40,5 mg/L e uma diminuição para

40,2 mg/L na nascente Albano Vieira (ref^a21). Na amostragem de junho de 2012 o valor máximo foi registado no ponto Caldeira Velha Fumarola (ref^a6), água em que não obstante ter atingido concentrações na ordem dos 14mg/L nas duas primeiras amostragens nesta última recolha alcançou 40,4 mg/L. No ponto Lombadas Furo II (ref^a11) registou-se uma concentração de cerca de 38 mg K/L sendo ainda notada uma descida acentuada na nascente Albano Vieira (ref^a21), água em que nesta terceira amostragem se mediu um teor igual a 24,6 mg K/L.

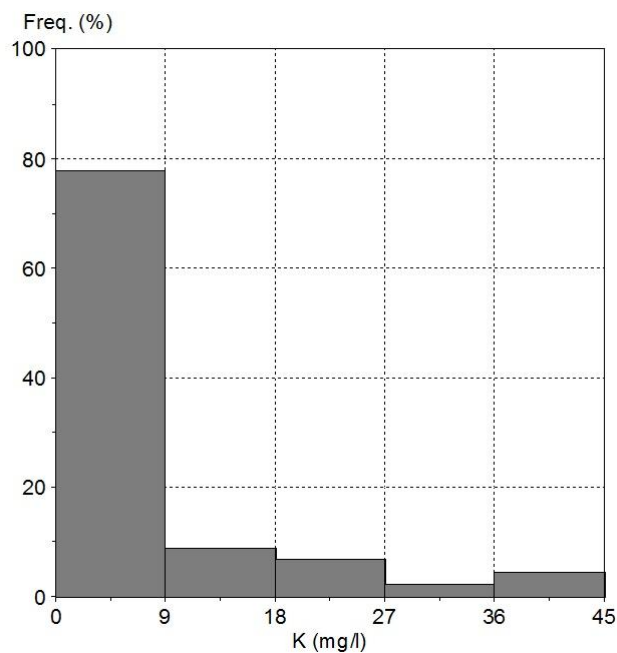


Figura 7.9 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em potássio (junho de 2012).

O enriquecimento em potássio, em água subterrâneas, encontra-se essencialmente associado à dissolução de silicatos, como a biotite e o feldspato potássico, e de aerossóis (Berner & Berner, 1987), sendo de esperar, face às características da área em estudo, que predomine o primeiro dos processos referidos.

Tabela 7.3 – Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos cátions principais das águas subterrâneas analisadas (valores em mg/L).

Catiões	Amostragem	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
Na	jan/fev 2012	39	270,69	10,93	28,09	17,87	42,56
	mar/abr 2012	45	273,50	12,37	29,26	17,77	40,98
	jun 2012	45	108,30	13,45	27,26	20,15	22,10
K	jan/fev 2012	39	52,65	1,82	8,42	4,12	10,35
	mar/abr 2012	45	40,45	2,34	8,79	5,30	8,76
	jun 2012	45	41,43	0,51	8,63	4,36	9,48
Ca	jan/fev 2012	39	29,22	1,09	5,56	3,51	5,66
	mar/abr 2012	45	29,38	0,90	4,61	2,85	4,98
	jun 2012	45	32,13	1,07	5,74	3,20	6,26
Mg	jan/fev 2012	39	5,18	0,34	1,99	1,69	1,22
	mar/abr 2012	45	5,00	0,28	1,67	1,36	0,95
	jun 2012	45	5,05	0,40	2,07	1,81	1,08

Relativamente ao cálcio verifica-se que, no geral os valores de concentração são baixos. O histograma relativo aos resultados da amostragem de junho de 2012 mostra a predominância de valores de cálcio inferiores a 7 mg/L em 80% das amostras analisadas (Fig. 7.10).

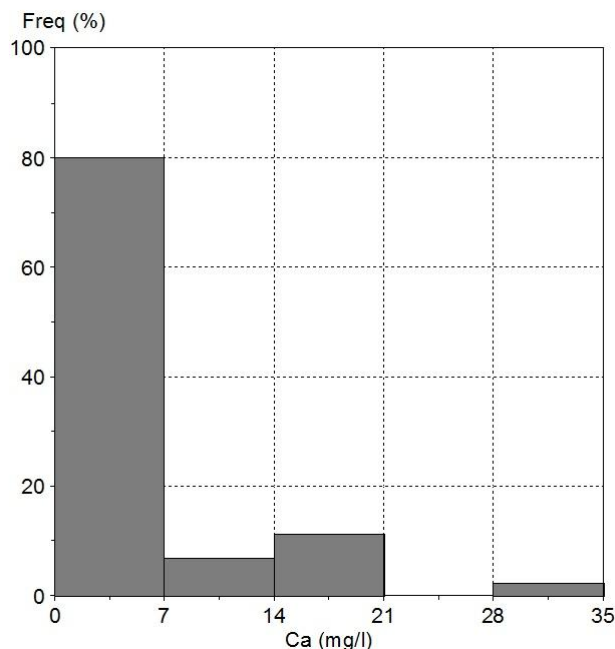


Figura 7.10 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em cálcio (junho de 2012).

Os valores médios deste catião nas várias amostragens levadas a cabo são respetivamente iguais a 5,56 mg/L (janeiro/fevereiro de 2012), 4,61 mg/L (março/abril de 2012) e de 5,74 mg/L (junho de 2012) (tabela 7.3). Os valores máximos e mínimos foram sempre registados nos mesmos pontos de água em todas as amostragens, respetivamente, cerca de 30 mg/L na fumarola da Caldeiras de Ribeira Grande (ref^a4) e cerca de 1 mg/L na nascente Fajã das Traves (ref^a23). Não registaram variações significativas na concentração deste elemento entre as três amostragens.

A concentração do catião cálcio encontra-se, por regra, associado à dissolução de calcite, de plagioclases e de aerossóis (Berner & Berner, 1987). Na área em estudo é expectável que o cálcio tenha uma origem essencialmente atribuível à dissolução de silicatos.

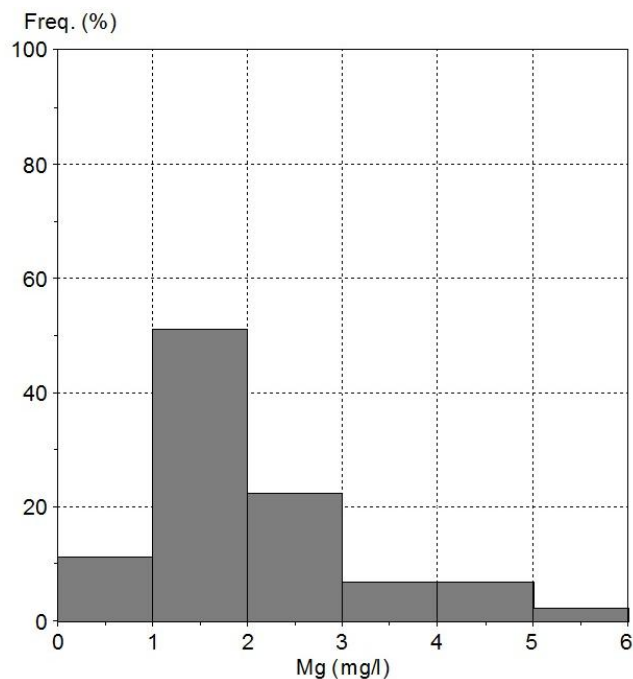


Figura 7.11 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em magnésio (junho de 2012).

No que concerne à concentração das águas analisadas relativamente ao ião magnésio, constata-se que os valores são geralmente reduzidos. O histograma representativo dos resultados obtidos no decurso da amostragem de junho de 2012 evidencia que 50% dos valores registados encontram-se na classe entre 1 e 2 mg Mg/L (Fig. 7.11).

A partir dos valores listados na tabela 7.3 pode constatar-se que o valor médio registado nas três amostragens não sofre uma grande oscilação: na primeira

amostragem é igual a 1,99 mg/L, na segunda recolha é igual a 1,67 mg/L e na última o valor apurado é 2,07 mg/L.

Os teores máximos de magnésio registados nas duas primeiras amostragens, respetivamente 5,18 mg/L e 5,00 mg/L, correspondem à nascente Albano Vieira (ref^a21), sendo na terceira amostragem o valor máximo registado na nascente Ladeira da Velha Férrea (ref^a8). No que respeita aos valores mínimos, 0,34 mg/L na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012, 0,28 mg/L em março/abril de 2012 e 0,40 mg/L em junho de 2012, estes foram sempre registados na nascente Lombadas Doce (ref^a10).

A concentração de magnésio em águas subterrâneas encontra-se normalmente associada à dissolução de silicatos (anfíbolas, piroxenas, biotites e olivinas), à adição a partir de água da chuva e a dissolução de dolomite (Berner & Berner, 1987). Realça-se que, face às características da área em estudo apenas a influência dos primeiros dois mecanismos modificadores referidos é expectável.

7.2.4. Aniões

Os valores extremos e estatísticos dos principais aniões maiores encontrados em solução nas amostragens das águas analisadas encontram-se discriminados na tabela 7.4.

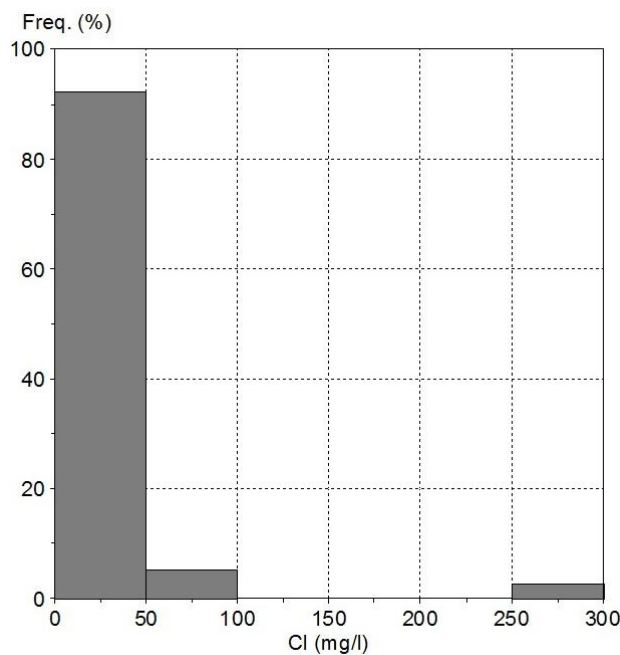


Figura 7.12 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em cloreto (janeiro/fevereiro de 2012).

O histograma relativo à distribuição dos valores da concentração em cloreto na amostragem de janeiro/fevereiro 2012 permite verificar que mais de 90% dos resultados correspondem a teores inferiores a 50 mg/L (Fig. 7.12).

Comparando os resultados obtidos, os valores médios da concentração em cloreto decresceram da primeira para a última amostragem, sendo que os valores calculados são respetivamente iguais a 29,23 mg/L (janeiro/fevereiro de 2012), 25,28 mg/L (março/abril de 2012) e 20,46 mg/L (junho de 2012) (tabela 7.4). Este decréscimo deve-se essencialmente à existência de valores anómalos registados nas duas primeiras amostragens na nascente Albano Vieira (ref^a21), nomeadamente 273,99 mg Cl/L em janeiro/fevereiro de 2012 e 189,91 mg Cl/L em março/abril de 2012. Com a normalização dos valores de cloreto na nascente anteriormente referida, o valor máximo registado na amostragem de junho de 2012 foi igual a 66,15 mg Cl/L, na Fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4).

Esta diminuição da dispersão dos dados é também evidenciada pelos valores do desvio padrão, que passa de 43,10 mg Cl/L na primeira amostragem para 12,25 mg/L na última amostragem (tabela 7.4).

Os valores mínimos registados nas três amostragens foram de cerca de 11 mg Cl/L, não havendo nenhuma variação significativa passível de interpretação.

O enriquecimento das águas subterrâneas em cloreto encontra-se essencialmente associado à dissolução de NaCl e à adição a partir da chuva (Berner & Berner, 1987), sugerindo-se, face às características da área em estudo, que o primeiro destes processos não influencia a evolução geoquímica nos aquíferos. No caso da nascente Albano Vieira (ref^a21), os elevados valores registados, em particular nas primeiras duas amostragens, poderão estar associados à mistura com fluidos hidrotermais, nomeadamente resultantes da exploração geotérmica.

Tabela 7.4 - Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos aniões principais das águas subterrâneas analisadas (valores em mg/L).

Aniões	Data	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
Cl	jan/fev 2012	39	273,99	11,59	29,23	17,48	43,10
	mar/abr 2012	45	189,91	11,36	25,28	17,16	28,26
	jun 2012	45	66,15	10,74	20,46	16,76	12,25
HCO ₃	jan/fev 2012	39	373,93	2,44	58,66	27,45	80,87
	mar/abr 2012	45	295,24	17,08	55,23	31,11	65,79
	jun 2012	45	283,65	9,76	50,96	29,28	59,73
SO ₄	jan/fev 2012	39	765,18	1,99	33,74	3,90	125,21
	mar/abr 2012	45	840,27	1,72	43,00	2,83	156,29
	jun 2012	45	2559,29	1,54	102,34	2,84	446,31

O histograma relativos aos valores da concentração no anião bicarbonato permite verificar que mais de 80% das amostras analisadas na amostragem de junho de 2012 apresentam teores inferiores a 50 mg/L (Fig. 7.13). Assim, a classe modal corresponde à gama de valores entre 0 e 50 mg/L.

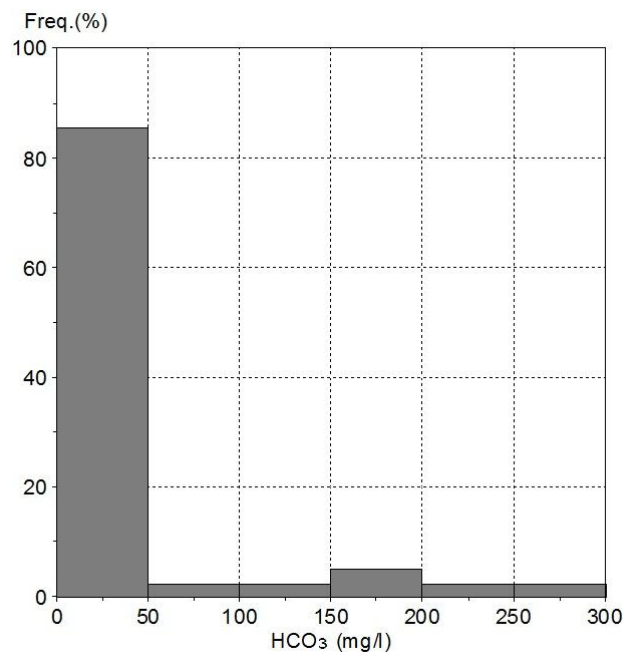


Figura 7.13 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em bicarbonato (junho de 2012).

Os teores máximos de bicarbonato registrados nas duas primeiras amostragens, respectivamente iguais a 373,93 mg/L e 295,24 mg/L, correspondem à nascente Albano Vieira (ref^a21), tendo sido na terceira recolha observado no ponto de água Lombadas Furo II (283,65 mg/L) (ref^a11). No que respeita aos valores mínimos foram iguais a 2,44 mg/L na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 (Caldeira Velha Fumarola, ref^a6), 0,28 mg/L em março/abril de 2012 (nascente Caracol 6- CMRG 2, ref^a31) e 0,40 mg/L em junho de 2012 (nascente Porto Formoso III, ref^a39) (tabela 7.4).

Relativamente aos valores médios da concentração de HCO_3 de cada amostragem, estes foram iguais a 58,66 mg/L em janeiro/fevereiro de 2012, 55,23 mg/L em março/abril de 2012 e 50,96 mg/L em junho de 2012 (tabela 7.4). Quanto ao desvio padrão, este reflete uma tendência à homogeneização dos valores por amostragem, uma vez que passa de cerca de 80 mg HCO_3/L , na primeira amostragem, para cerca de 60 mg HCO_3/L na recolha efetuada em junho de 2012.

O enriquecimento das águas subterrâneas em HCO_3 encontra-se, em regra, associado à dissolução de calcite e dolomite e à dissolução de silicatos (Berner & Berner, 1987). O bicarbonato pode ter a sua origem em processos biogeoquímicos a nível do solo, envolvendo CO_2 , ou, em processos associados a CO_2 de origem vulcânica. A lixiviação de silicatos é o processo preferencial atuante em aquíferos de regiões vulcânicas, contribuindo para a solução com metais alcalinos e alcalino-terrosos, presentes nas rochas geoquimicamente mais ou menos evoluídas, enquanto ocorre a neutralização dos fluidos ácidos e a libertação de HCO_3 (Evans *et al.* 2002). A origem vulcânica do HCO_3 corresponde à absorção de gases vulcânicos enriquecidos em CO_2 , em aquíferos de altitude, o que explica as águas do tipo bicarbonatadas sódicas, resultantes das fases iniciais da interação entre a água meteórica e a rocha e que ocorrem na periferia de campos geotérmicos (Cioni *et al.* 1992; Chiodini *et al.* 1996; Lewicki *et al.* 2000). No caso vertente, pode considerar-se, que os efeitos do primeiro processo não se verificam.

O histograma referente à distribuição da concentração de sulfato nas amostras de junho de 2012 permite constatar que mais de 90% dos valores registrados apresentam teores correspondentes à classe modal, que garga teores entre 0 e 520 mg/L (Fig. 7.14). Contudo, ignorando os dois pontos referentes às fumarolas da Caldeira Velha (ref^a6) e das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4), que apresentam valores muito superiores aos dos restantes pontos de água, podemos observar que a amostragem pode ser considerada bastante homogênea (Fig. 7.15). Com efeito, eliminando os

valores daqueles dois pontos de água, a classe modal relativa à distribuição assim obtidas corresponde ao intervalo entre 0 e 14 mg SO_4/L .

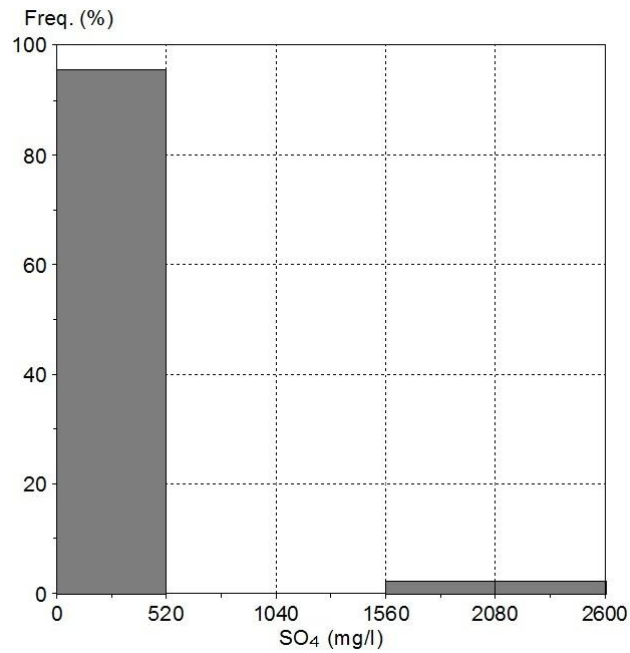


Figura 7.14 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em sulfato (junho de 2012).

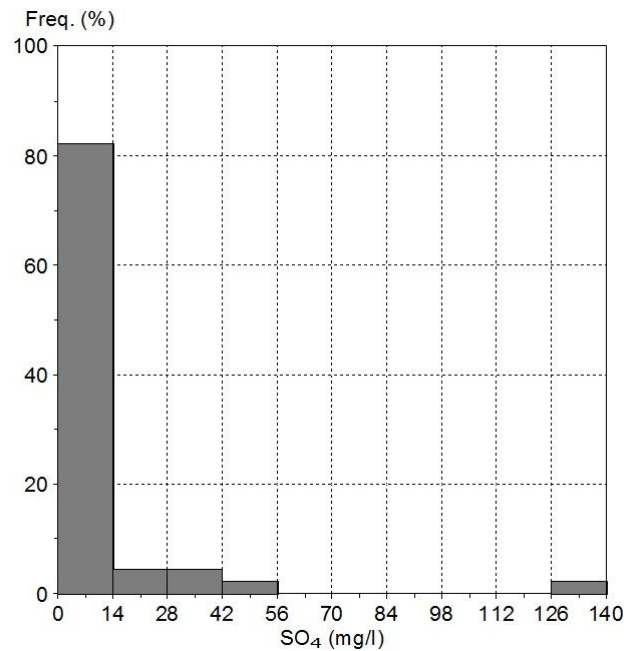


Figura 7.15 - Histograma com a distribuição dos valores de concentração em sulfato inferiores a 140 mg/L (junho de 2012).

Dos dados estatísticos apresentados na tabela 7.4, os valores máximos de concentração em sulfato nas duas primeiras amostragem encontram-se associados ao ponto de água Caldeiras da Ribeira Grande Fumarola (ref⁴), respetivamente iguais a 765,18 mg/L e 840,27mg/L e, na última recolha, ao ponto de água Caldeira Velha Fumarola (2559,29 mg/L). Pode-se constatar que há um aumento dos valores máximos registados da primeira para a última amostragem realizada, que se reflete no aumento dos respetivos valores médios de sulfato, iguais a 33,74 mg/L (janeiro/fevereiro de 2012), 43 mg/L (março/abril de 2012) e 102,34 mg/L (junho de 2012).

O sulfato em águas subterrâneas encontra-se normalmente associado à dissolução de sulfuretos, dissolução de sulfatos (essencialmente gesso e anidrite) e, no caso dos sistemas hidrotermais, associado à oxidação de HS^- e H_2S . A oxidação de espécies de enxofre reduzido em aquíferos aquecidos por vapor explica o conteúdo em SO_4 , assim como os valores de pH muito ácidos observados em amostras de fumarolas ricas em sulfato. A oxidação do H_2S para H_2SO_4 pode explicar o aumento do conteúdo em sulfato dessas águas, o que corresponde a um processo descrito em numerosas áreas vulcânicas, como o Parque Yellowstone (EUA) (Nordstrom *et al.*, 2009) e o vulcão Copahue (Argentina) (Varekamp *et al.*, 2009).

7.2.5. Discussão de Resultados

A projeção dos valores médios da concentração dos principais cátions presentes em solução, relativos às três amostragens efetuadas, em função da condutividade elétrica média da água, que traduz indiretamente a respetiva mineralização, permite evidenciar as principais relações existentes e relacioná-las com os processos hidrogeoquímicos.

O gráfico que relaciona a concentração média em sódio contra a condutividade mostra que a relação linear positiva é fraca ($r=0,289$) (Fig. 7.16a). Contudo, se o coeficiente de correlação linear for calculado sem considerar os valores correspondentes às amostras Fumarola das Caldeira da Ribeira Grande (ref^a4) e Caldeira Velha Fumarola (ref^a6), a relação entre as variáveis torna-se muito significativa ($r= 0,894$), sugerindo que, de facto a concentração em cloreto controla parcialmente a mineralização das águas subterrâneas.

A relação entre a concentração em cálcio e a condutividade elétrica apresenta um coeficiente de correlação linear igual a 0,805 (Fig. 7.16b). Neste caso, as amostras de ref^a4 e ref^a6 não interferem significativamente no cálculo do coeficiente de correlação entre a condutividade e o cálcio, como se verificava no caso anterior, uma vez que, apesar de apresentarem valores bastante superiores de condutividade relativamente às restantes amostras analisadas, a relação obedece ao padrão dos restantes pontos de água ($r=0,894$)

A projeção da concentração em magnésio em função da condutividade da água denota uma relação linear bastante ténue quando se considera o conjunto da amostra ($r=0,292$) (Fig. 7.16c). Contudo, se os valores associados aos pontos de água de ref^a4 e ref^a6 não forem representados, a correlação entre a condutividade e o magnésio torna-se bastante mais significativa ($r=0,757$), o que reflete, assim como para o cálcio, a contribuição desta espécie para a mineralização da água

O coeficiente de correlação linear entre a concentração em potássio e a condutividade elétrica é, ainda que significativo, relativamente baixo quando comparado aos anteriores ($r=0,604$) (Fig. 7.16d). Este valor de correlação linear encontra-se influenciado pelas amostras de ref^a4 e ref^a6, uma vez que sem estas, o coeficiente de correlação linear toma o valor de 0,884, sugerindo neste caso a contribuição deste elemento no contexto dos processos geoquímicos que controlam a evolução das águas subterrâneas estudadas.

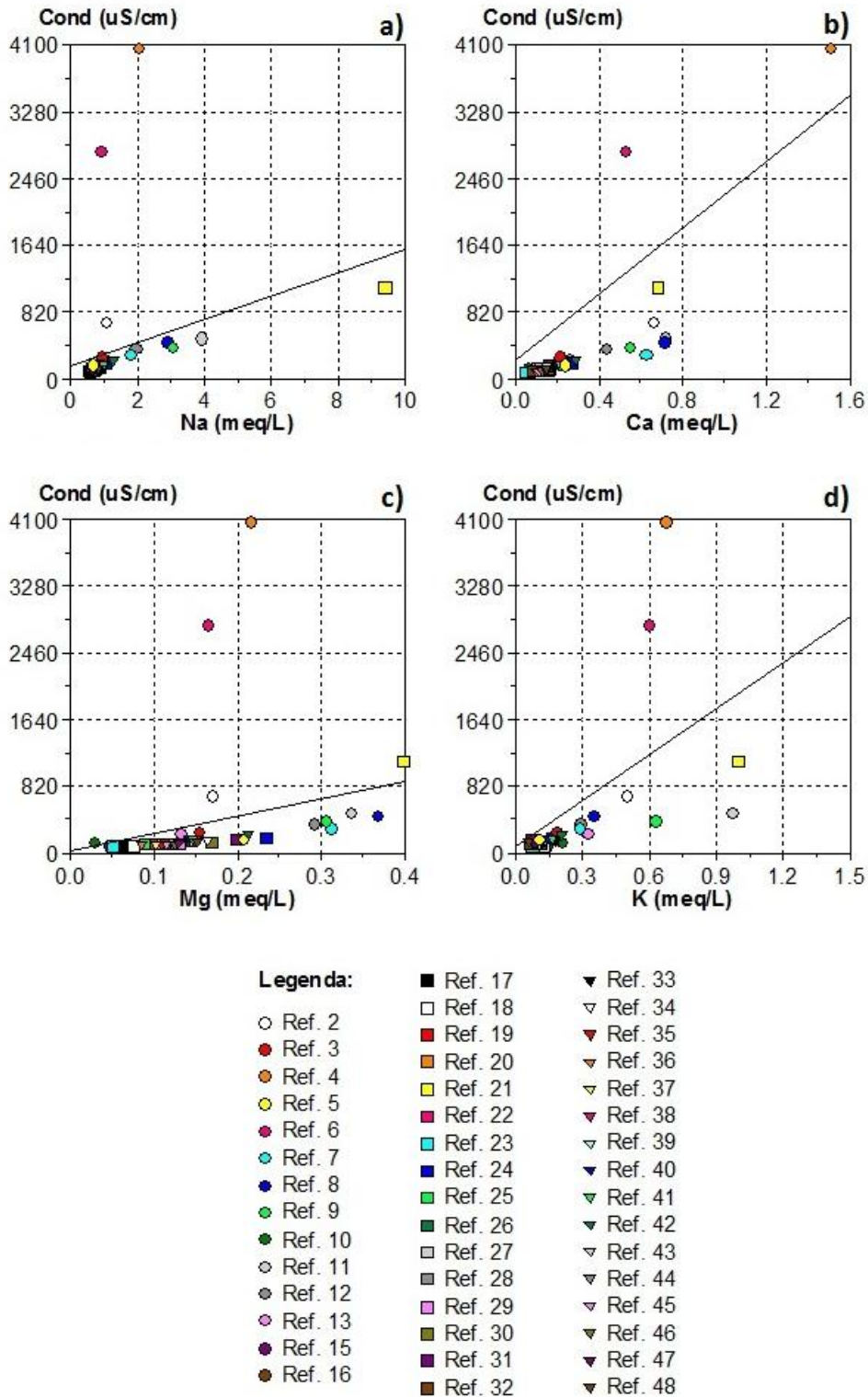


Figura 7.16 – Relação entre os valores médios dos principais catiões e a condutividade elétrica, com as respetivas retas de correlação linear. (a) sódio vs. condutividade; (b) cálcio vs. condutividade; (c) magnésio vs. condutividade; (d) potássio vs. condutividade).

Numa análise geral, é possível observar que, excetuando o caso da fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4) e da fumarola da Caldeira Velha (ref^a6), existe uma relação linear positiva bem marcada entre a concentração nos cátions principais e a mineralização da água, refletida pelos valores elevados de coeficiente de correlação entre as variáveis analisadas. As duas exceções anteriormente referidas devem-se ao facto de estes pontos apresentarem valores extremamente elevados para a condutividade, justificada pela elevada temperatura a que se encontram, o que, para além da influência dos voláteis vulcânicos, vai fazer com haja uma promoção da dissolução e, conseqüentemente, um aumento da mineralização da água.

A relação existente entre os cátions e a condutividade está associada aos processos comuns de entrada deste em solução, através da dissolução de silicatos e no caso do sódio pode também estar associado à adição de sais marinhos.

Na figura 7.17 estão projetados os valores médios dos principais aniões presentes em solução nas três amostragens efetuadas, em função da condutividade elétrica da água, com as respetivas retas de correlação linear.

Numa análise geral, à semelhança do que acontece com os cátions, é possível observar que, excetuando o caso da fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4), e da fumarola da Caldeira Velha (ref^a6), a relação linear positiva entre as variáveis é bem marcada e traduz-se por um elevado coeficiente de correlação entre os aniões e a mineralização dos fluidos.

O coeficiente de correlação linear entre a concentração em bicarbonato e a condutividade é igual a 0,237, sendo que se o mesmo for calculado sem as amostras de ref^a4 e ref^a6, passa a apresentar um valor de 0,874, o que sugere que na maioria das amostras este anião contribui significativamente para a mineralização total da água. Verifica-se um leve aumento da condutividade com o aumento do ião bicarbonato em solução (Fig. 7.17a), o que poderá estar associado à dissolução de silicatos, promovendo uma libertação de HCO_3 para a água, e à diluição de voláteis vulcânicos.

A projeção da concentração em cloretos contra a condutividade elétrica traduz-se num valor de coeficiente de correlação linear igual a 0,456, sendo que se o mesmo for calculado sem as amostras de ref^a4 e ref^a6, passa a apresentar um valor de 0,919, que indicia a influência desta espécie sobre a mineralização da grande maioria das amostras (Fig. 7.17b). Contudo, podem sugerir-se duas tendências distintas (Fig. 7.17b): uma onde a condutividade aumenta, independentemente da concentração em

cloretos, e outra em que há um aumento da condutividade com o aumento do teor neste anião.

O valor elevado de cloretos verificado na amostra da nascente Albano Vieira (ref^a21) indica uma possível mistura com fluido geotérmico.

O coeficiente de correlação linear entre a condutividade e a concentração em sulfato é igual a 0,956, sendo que este valor é, em grande parte, influenciado pela presença das fumarolas. Com efeito, se a concentração em sulfato nas fumarolas não for considerada nos cálculos, o coeficiente de correlação passaria a assumir um valor bastante inferior ($r=0,490$). Verifica-se, então, que o aumento da condutividade, e assim da mineralização das águas subterrâneas, indicia ser independente do sulfato, exceto no caso das fumarolas, onde o aumento do sulfato promove aumento da condutividade (Fig. 7.17c).

O coeficiente de correlação linear entre a condutividade e o fluoreto é igual a 0,868, sendo que se o mesmo for calculado sem a amostra de ref^a6, passa a apresentar um valor ainda mais significativo ($r=0,922$), o que em qualquer caso significa que o enriquecimento neste ião está associado ao aumento da mineralização da água (Fig. 7.17d).

No geral, existe uma elevada correlação entre a condutividade e o fluoreto, com exceção dos pontos Caldeira Velha Fumarola (ref^a6), onde o aumento da condutividade é independente do fluoreto. No extremo máximo da reta de correlação linear encontra-se o ponto representativo da fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4), onde concomitantemente com o aumento da condutividade verifica-se um elevado valor de fluoreto, sugerindo que este possa apresentar uma origem vulcânica (Fig. 7.17d). Com efeito, a concentração em fluoreto em regra encontra-se associado à lixiviação de rochas e a processos vulcânicos, que promovem a libertação daquele elemento para o meio ambiente (Cordeiro *et al.*, 2012)

Da figura 7.17e) observa-se a existência de duas tendências distintas indiciando que a condutividade e os nitratos não são correlacionáveis. Existe uma tendência em que há um aumento dos valores de condutividade mantendo-se os valores de nitratos e outra tendência onde se verifica o aumento dos valores de nitrato sem que ocorra aumento da condutividade, estando muito provavelmente associado à poluição agrícola.

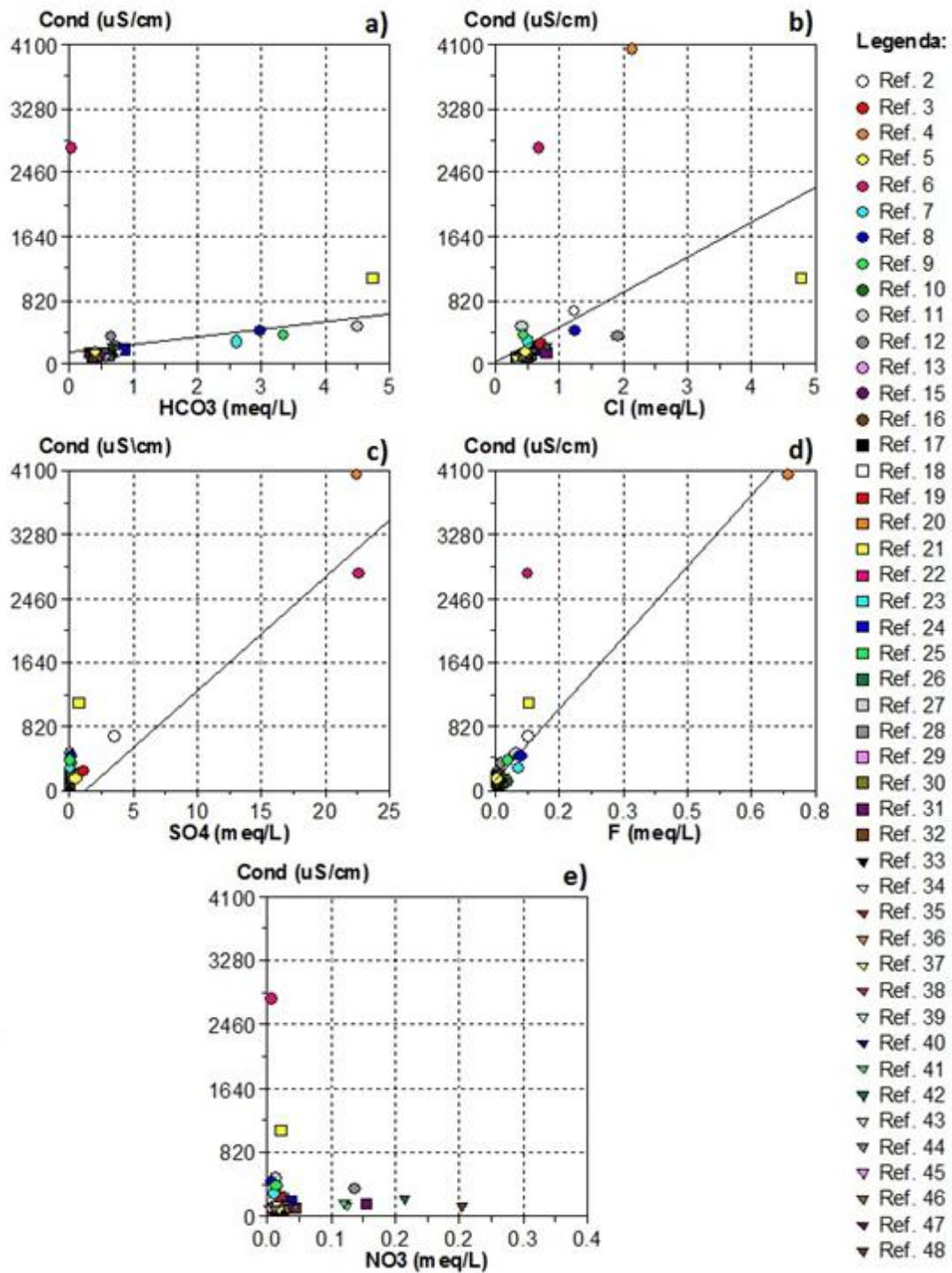


Figura 7.17 – Relação entre os valores médios dos principais aniões e a condutividade elétrica, com as respectivas retas de correlação linear. (a) bicarbonato vs. condutividade; (b) cloreto vs. condutividade; (c) sulfato vs. condutividade; (d) fluoreto vs. condutividade; (e) nitrato vs. condutividade).

A projeção dos valores de condutividade elétrica em função da temperatura das águas analisadas permite distinguir três tendências diversas (Fig. 7.18): a tendência A corresponde a um aumento significativo da temperatura, não associado ao acréscimo da condutividade elétrica, e é materializada, como caso extremo, pela amostra da Caldeira Velha Fumarola (ref^a6). Em B verifica-se a existência de um conjunto de pontos de água que denotam um aumento proporcional entre a temperatura e a condutividade, representado no extremo pelas emergências Ladeira de Velha Férrea (ref^a8) e Caldeira Pequena das Caldeira da Ribeira Grande (ref^a2). Por seu turno, a tendência C pressupõe um aumento significativo da condutividade elétrica, sem que o aumento da temperatura seja importante, e neste caso o exemplo extremo encontra-se representado pelo ponto Fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4). O ponto de água de ref^a21 (nascente Albano Vieira) é também representativo desta última tendência.

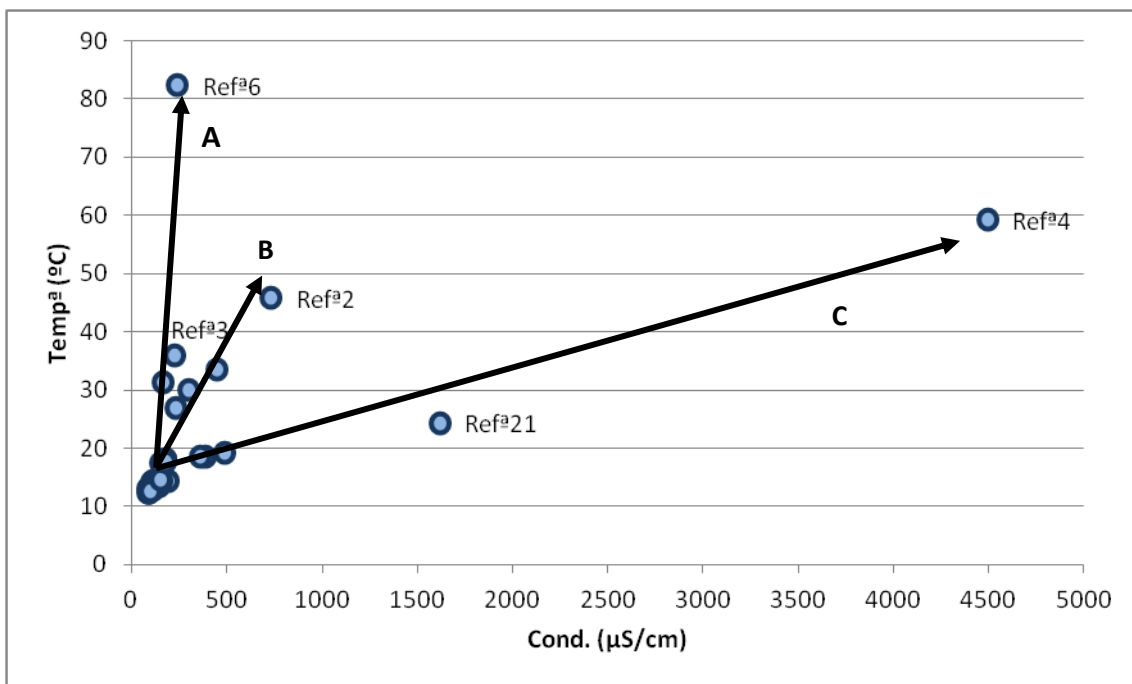


Figura 7.18 – Relação entre a condutividade e a temperatura nas águas subterrâneas analisadas (janeiro/fevereiro de 2012).

O aumento da temperatura promove a dissolução dos minerais constituintes das rochas encaixantes onde a água circula, promovendo concomitantemente um aumento de mineralização da água, que se pode traduzir por um incremento da condutividade elétrica.

A relação da temperatura com o incremento da interação água-rocha também permite explicar a relação linear positiva com a concentração de sílica na água (Fig. 7.19), na medida que esta última resulta essencialmente da dissolução de minerais silicatados. Contudo, não se exclui que a concentração de sílica seja também controlada por processos de precipitação de fases sólidas, e este tema será retomado quando se abordarem os índices de saturação.

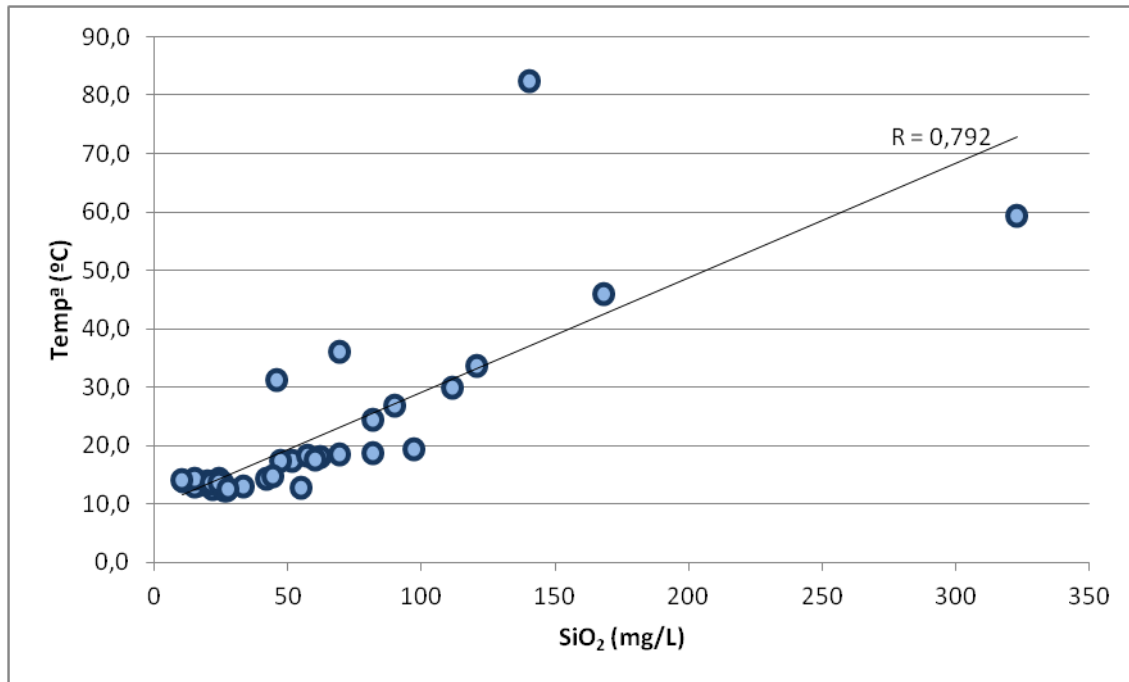


Figura 7.19 – Relação entre a concentração de sílica e a temperatura nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

O coeficiente de correlação linear entre a concentração em sílica e a temperatura quando se consideram todos os valores, é igual a 0,792. No entanto, se o mesmo for calculado sem considerar os valores associados às fumarolas (ref^a4 e 6), passa a apresentar um coeficiente de correlação linear de 0,845, podendo sugerir-se que esta variação resulta do facto de serem estas águas aquelas que apresentam concentrações mais enriquecidas e, acessoriamente, índices de saturação mais elevados face às fases sólidas de sílica.

A projeção dos teores de sódio em função da concentração em bicarbonato indicia uma boa relação linear positiva entre estas espécies em solução, o que se reflete no respetivo coeficiente de correlação ($r=0,869$) (Fig. 7.20). No entanto, pode observar-se

que, excetuando a amostra de ref^a21, todas as restantes apresentam um padrão de tendência representado pela reta A, na figura referida. Tal facto traduz-se pelo facto de, ignorando os valores relativos à amostra de ref^a21, a correlação entre o bicarbonato e o sódio torna-se bastante mais evidente ($r=0,950$).

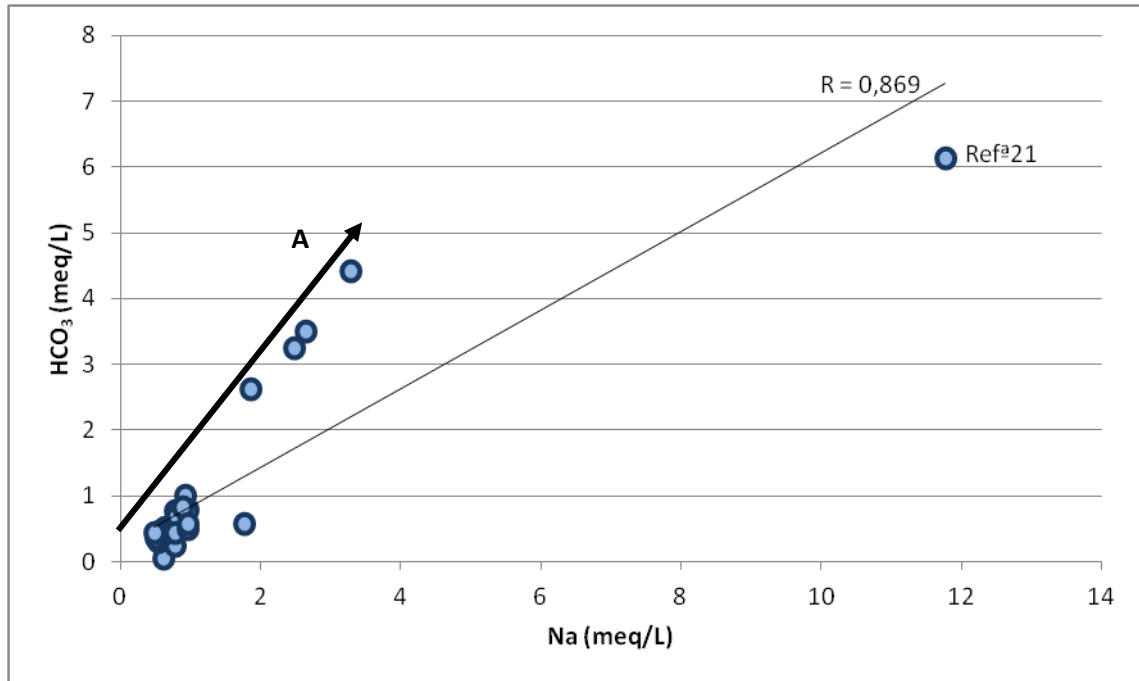


Figura 7.20– Relação entre as concentrações de sódio e de bicarbonato nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

A existência de um elevado coeficiente de correlação entre o bicarbonato e o sódio vem, mais uma vez, colocar em evidência o processo de dissolução de silicatos, que explica o enriquecimento conjunto daquelas espécies e que pode ser favorecido pela solubilização de voláteis vulcânicos ricos em CO_2 . Neste caso há indícios de dissolução de plagioclase, incrementando simultaneamente os teores de bicarbonato e sódio nas águas analisadas.

No entanto, verifica-se que na nascente Albano Vieira (ref^a21) estes valores são bastante superiores aos verificados nas outras amostras, provavelmente associado à mistura com fluidos geotérmicos.

Em termos de composição química, as plagioclases são essencialmente aluminossilicatos de sódio e cálcio, que abrangem uma panóplia de composições químicas entre os termos puros em sódio (Albite – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e em cálcio (Anortite – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Logo, será expectável que, aquando da dissolução da plagioclase para além da libertação de sódio, haja simultaneamente a libertação de cálcio.

O enriquecimento de cálcio em função do teor em bicarbonato pode indiciar os casos em que ambas as variáveis estão associadas, fruto de uma origem comum relacionada com a dissolução de silicatos (Fig. 7.21). Na projeção referida as amostras de ref^a7 (Ladeira da Velha), ref^a8 (Ladeira da Velha Férrea), ref^a9 (Lombadas), ref^a11 (Lombadas Furo II) e ref^a21 (Albano Vieira) dispõem-se segundo uma tendência indicada pela reta A, que evidencia a existência de um processo de dissolução com libertação de cálcio e bicarbonato, mais uma vez remetendo para a dissolução de silicatos, em que o incremento dos valores de bicarbonato pode estar ainda associado à dissolução de CO₂ de origem vulcânica. Na tendência B, representada pelas restantes amostras, verifica-se um incremento significativo dos valores de cálcio, independentemente do bicarbonato, que sugere a eventual ocorrência de processos de troca iónica de metais alcalinos por metais alcalino terrosos.

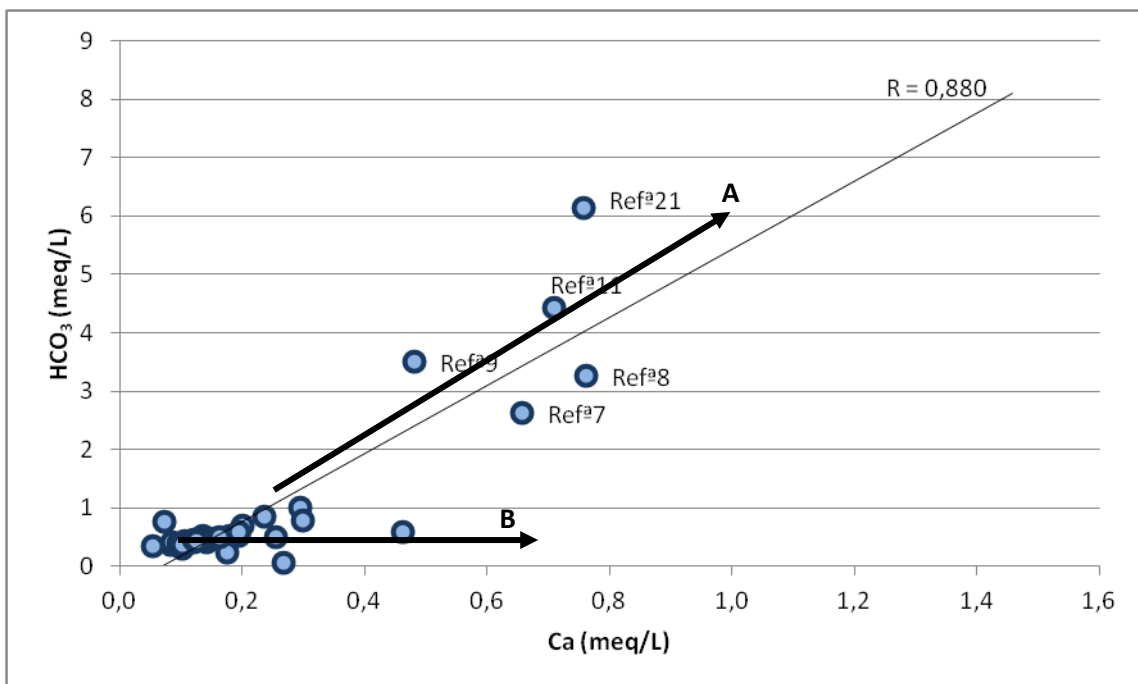


Figura 7.21 – Relação entre as concentrações de cálcio e de bicarbonato nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

O padrão gráfico obtido na projeção entre a concentração em magnésio e o bicarbonato (Fig. 7.22), semelhante à anterior, parece vir de encontro ao explicitado anteriormente. O coeficiente de correlação linear estimado é igual a 0,821, sugerindo a existência de uma relação entre os elementos analisados, onde parece existir um processo de dissolução que põe em solução não só magnésio como também bicarbonato (representado pela seta de tendência B no gráfico), principalmente nas amostras de referência 7, 8, 9, 11 e 21. Neste caso, este incremento poderá estar

associado à dissolução de silicatos (por exemplo olivina, clinopiroxena, biotite), acompanhada por dissolução de CO_2 vulcânico. Outra tendência (reta A no gráfico) corresponde às amostras com teores de HCO_3^- inferiores a 2 meq/L, com um coeficiente de correlação entre as variáveis projetadas muito baixo ($r=0,166$). Neste último caso, o aumento do teor em magnésio não se encontra associado a um aumento do teor em bicarbonato, sugerindo-se que o magnésio terá uma origem associada a aerossóis marinhos, adicionados a partir do vento ou da água da chuva, e a mecanismos de troca iônica.

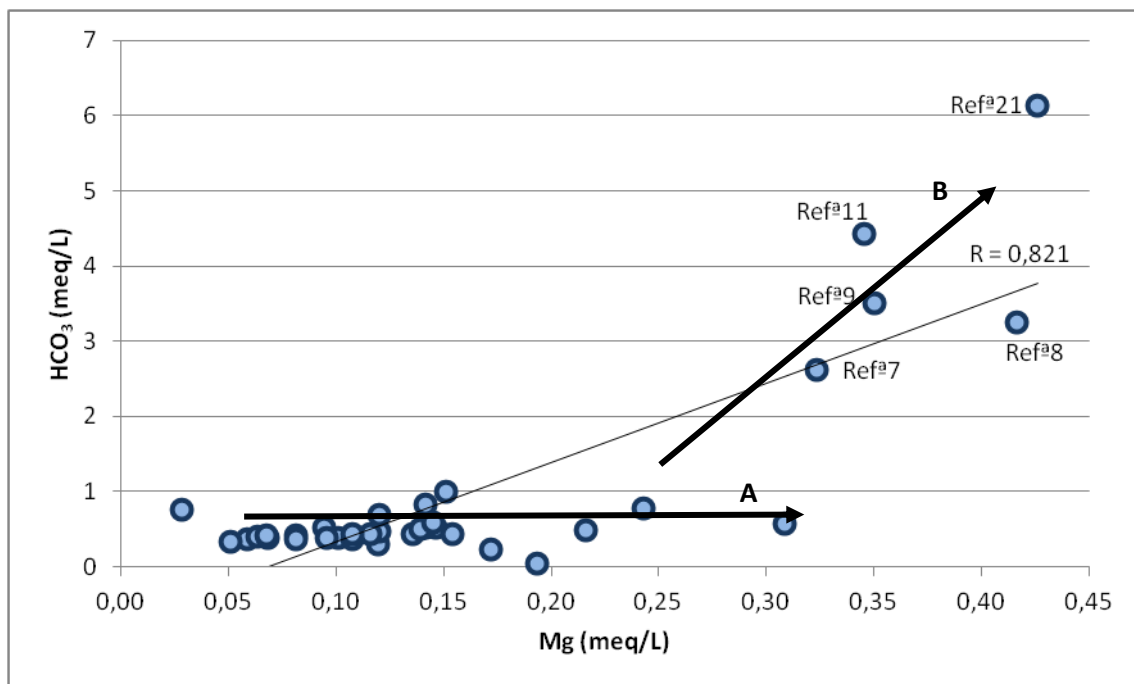


Figura 7.22 – Relação entre as concentrações de magnésio e de bicarbonato nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

A relação entre a concentração em bicarbonato vs. o teor em sulfato patenteia um coeficiente de correlação linear pouco significativo ($r=0,306$), podendo colocar-se em evidência duas tendências distintas e independentes, marcadas com as retas A e B (Fig. 7.23): a tendência A está representada pelas amostras de referência 5, 13 e 6, onde se verifica um aumento acentuado da concentração de sulfato em solução sem que haja aumento do bicarbonato, o que sugere que o SO_4^{2-} apresenta uma origem vulcânica associada a um mecanismo de aquecimento por vapor. Neste último, desencadeado pela oxidação de HS e H_2S nos aquíferos de altitude, verifica-se a diminuição do pH da água e o enriquecimento em sulfato (caso da amostra de refª6 – Caldeira Velha Fumarola).

As amostras de referência 7, 8, 9 e 11 representam a tendência B, onde se observa um aumento do bicarbonato, sem que ocorra aumento da concentração em sulfato na água. Este bicarbonato tem a sua origem na dissolução de silicatos, e dissolução de CO_2 vulcânico, e estas amostras são as mesmas que apresentavam as concentrações mais elevadas em metais alcalino terrosos.

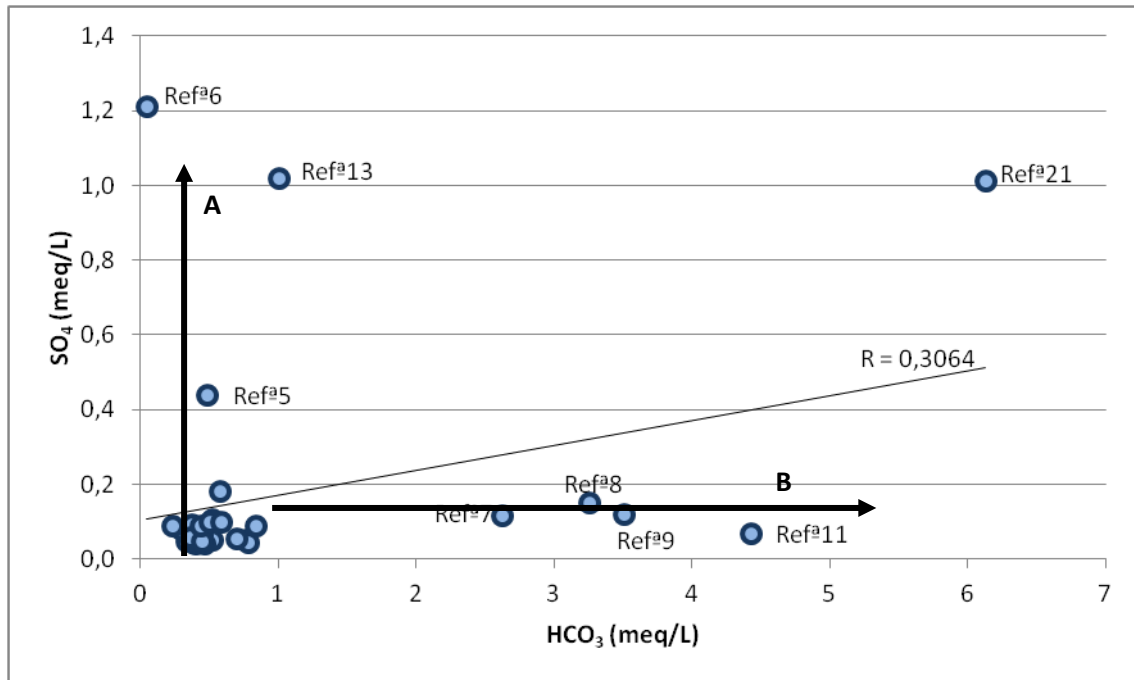


Figura 7.23 - Relação entre as concentrações de bicarbonato e de sulfato nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

A água da nascente Albano Vieira (refª21), não se enquadra em nenhum dos comportamentos anteriormente referidos, onde os elevados valores de sulfato e bicarbonatos sugerem novamente a mistura com fluidos geotérmicos. Esta origem pode ser confirmada quando na projeção da relação entre as concentrações de cloreto e sulfato se representa a linha da composição relativa dos fluidos geotérmicos explorados no campo geotérmico da Ribeira Grande (Fig. 7.24): neste caso, verifica-se que a amostra da nascente Albano Vieira é projetada sobre a reta representativa das águas geotérmicas. A água da Magarça (12) também é projetada sobre a reta da composição relativa dos fluidos geotérmicos, a que corresponde a tendência B no gráfico.

Não se observa uma relação linear quando se considera o conjunto das amostras no gráfico que relaciona o teor de cloreto vs. o de sulfato ($r=0,821$) (Fig. 7.24). A tendência A, materializada pelas amostras de refª2 (Caldeira Pequena das C.R.G) e 4

(Fumarola das C.R.G.), denota um enriquecimento significativo dos valores de sulfato sem que ocorra aumento do cloreto.

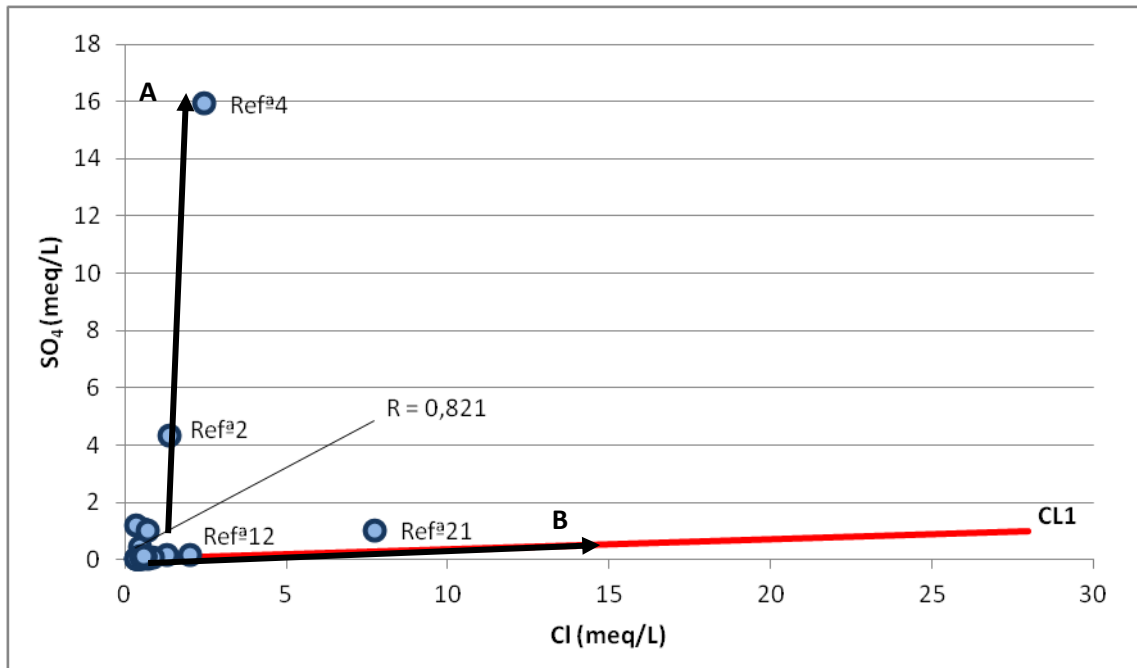


Figura 7.24 - Relação entre as concentrações de cloreto e de sulfato nas águas subterrâneas analisadas (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – Fluido geotérmico, *in* Carvalho *et al.*, 2006).

A origem vulcânica para o sulfato nos pontos de refª5, 13 e 6 também, pode ser deduzida da projeção da razão entre as concentrações entre o sulfato e o cloreto contra a condutividade. Neste gráfico observam-se três tendências distintas (Fig. 7.25): na tendência A, representada pelos pontos de água de refª5, 13, 3, 2 e 6, regista-se um aumento da razão sulfato-cloreto sem que ocorra aumento significativo da condutividade, e neste caso, estamos essencialmente, perante um incremento do sulfato sugerindo que este apresente uma origem vulcânica por aquecimento por vapor. Em B encontram-se essencialmente águas com baixos valores das variáveis em estudo. Em C verifica-se uma tendência para o aumento da condutividade, independentemente da razão estimada, o que sugere corresponder a águas com composições relativas próximas da água do mar, e no caso da nascente Albano Vieira (refª21) de um processo de mistura com fluidos geotérmicos. Salienta-se que a composição destes últimos denota fluidos cloretados sódicos, com composição próxima da água do mar. A amostra de refª4 (Caldeiras da Ribeira Grande Fumarola) é a única em que se regista um aumento simultâneo das variáveis analisadas, sendo que o aumento do sulfato e da condutividade estão associados ao enriquecimento da mineralização da água.

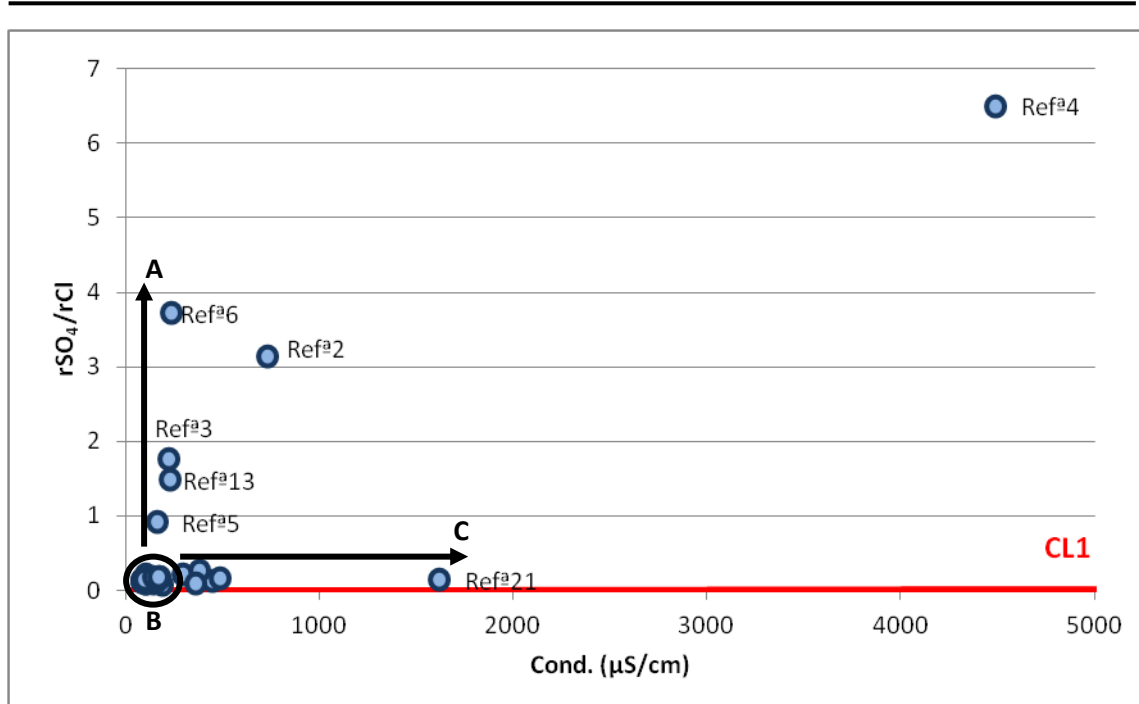


Figura 7.25 - Relação entre a condutividade e a razão entre o sulfato e o cloreto nas águas subterrâneas analisadas (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – fluido geotérmico *in* Carvalho *et al.*, 2006).

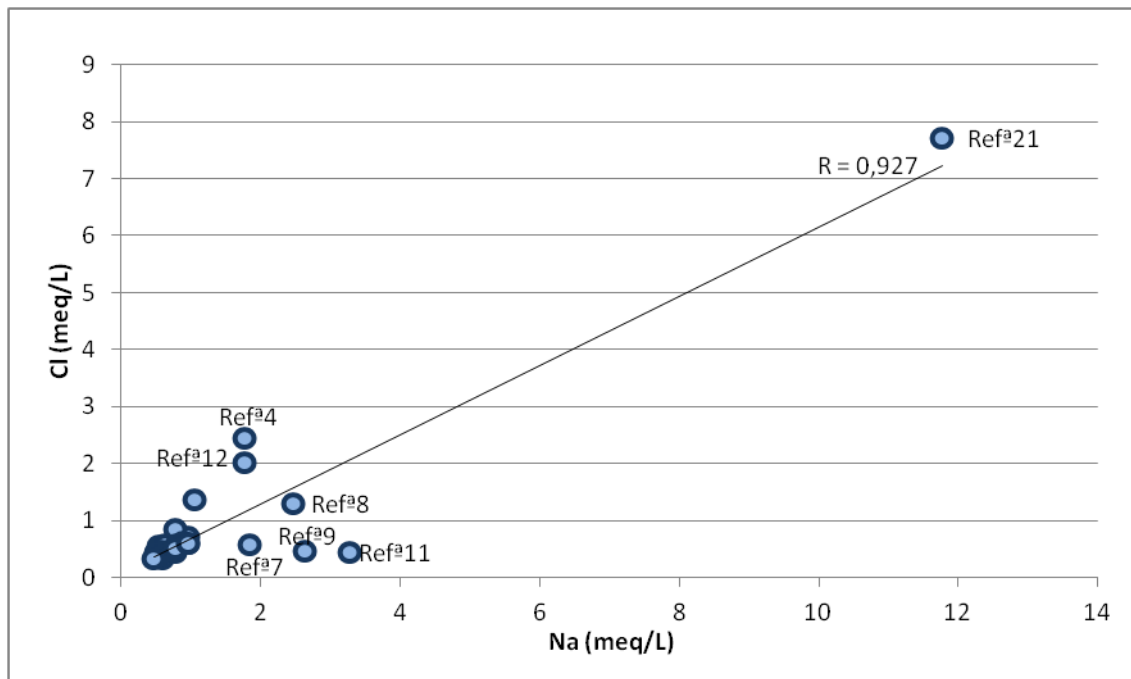


Figura 7.26 - Relação entre as concentrações de sódio e de cloreto nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

A relação linear entre as concentrações em cloreto e em sódio traduz-se por um coeficiente de correlação muito significativo ($r=0,927$), o que sugere a existência de

uma origem comum para estes dois elementos, geralmente associada à dissolução de sais marinhos, quer transportados pelo vento sob a forma de aerossóis, quer depositados pela água da chuva (Fig. 7.26).

No entanto, quando observada a figura 7.27, onde se encontram projetadas as retas representativas da água do mar e do fluido geotérmico CL1 (Carvalho *et al.*, 2006), é notório que principalmente a nascente de ref^a21 apresenta um teor muito próximo da reta representativa da composição relativa do fluido geotérmico, indiciando que o aumento dos valores de cloreto e sódio se devem a uma mistura com um fluido de características semelhantes ao CL1.

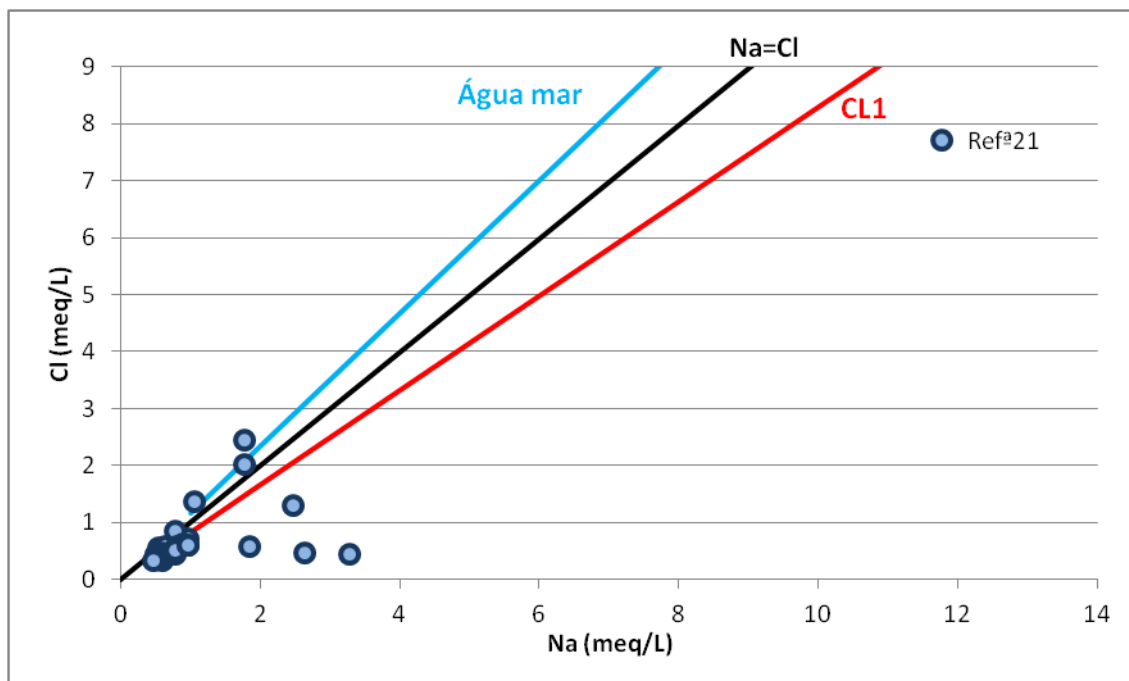


Figura 7.27 - Relação entre as concentrações de sódio e de cloreto nas águas subterrâneas analisadas. (CL1 – Fluido geotérmico, *in* Carvalho *et al.*, 2006; Água do mar: dados de Brown *et al.*, 2002).

No conjunto das amostras analisadas ocorre uma correlação linear significativa entre o cálcio e o magnésio ($r=0,765$) (Fig. 7.28). A projeção dos teores destes elementos mostra a existência de uma tendência bem marcada (reta A no gráfico). Contudo, existe um conjunto de amostras (ref^a2, 4, 7, 8, 11 e 21) que não se enquadram nesta tendência, onde se observa um incremento dos valores de cálcio relativamente aos valores de magnésio, e que na sua maioria correspondem às amostras com teores destas espécies mais elevados.

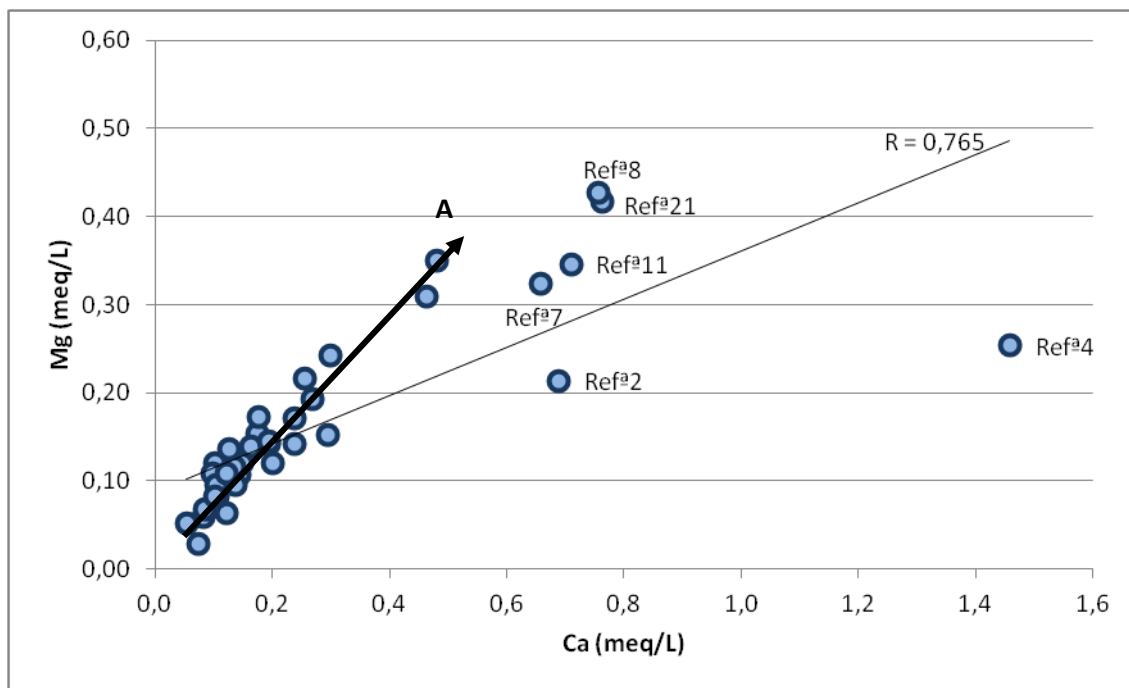


Figura 7.28 - Relação entre as concentrações de cálcio e de magnésio nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

A tendência A indicia a influência de um processo comum que põe em solução os dois elementos. A dissolução de silicatos, e de aerossóis marinhos no caso do magnésio, são, em regra, justificção para um incremento conjunto dos dois elementos, bem como para pôr em solução sódio (Fig. 7.29). Não se excluem também os processos de troca iônica anteriormente referidos.

Apesar de haver correlação linear entre o sódio e o magnésio ($R = 0,679$), este valor torna-se ainda mais evidente se for ignorada a amostra de referência 21 ($r = 0,878$), reforçando a evidência os processos comuns de dissolução anteriormente referidos, com particular ênfase para a dissolução de aerossóis marinhos, como é visível a partir da projeção da reta da água do mar (Fig. 7.29). Mais uma vez, a amostra de refª21 apresenta um comportamento bastante diferente das restantes amostras com elevado enriquecimento em sódio comparativamente ao magnésio, idêntico ao que se observa nos fluídos geotérmicos do furo CL1 (Carvalho *et al.*, 2006).

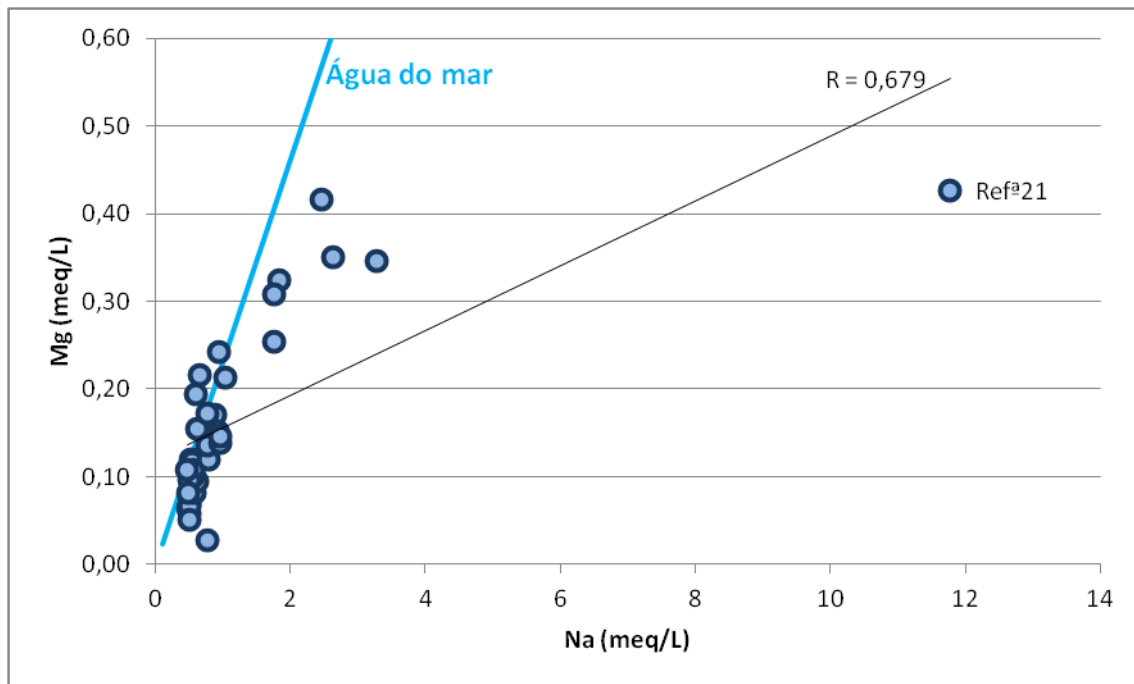


Figura 7.29 - Relação entre as concentrações de sódio e de magnésio nas águas subterrâneas analisadas, com a respectiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012). (Água do mar: dados de Brown *et al.*, 2002).

O coeficiente de correlação linear existente entre o sódio e o potássio ($R=0,869$) põe, mais uma vez em evidência um processo comum de dissolução, reforçado pela existência da tendência A, podendo ser novamente justificado pela dissolução de silicatos (Fig. 7.30). Neste caso não há evidência para a dissolução a partir de aerossóis marinhos uma vez que na água do mar os valores de potássio são significativamente mais baixos do que os observados na tendência A. É ainda possível observar que, novamente, a amostra de refª21 (nascente Albano Vieira) apresenta-se numa situação de tendência para aproximação à reta CL1, sugerindo um forte influência de fluidos geotérmicos na sua composição.

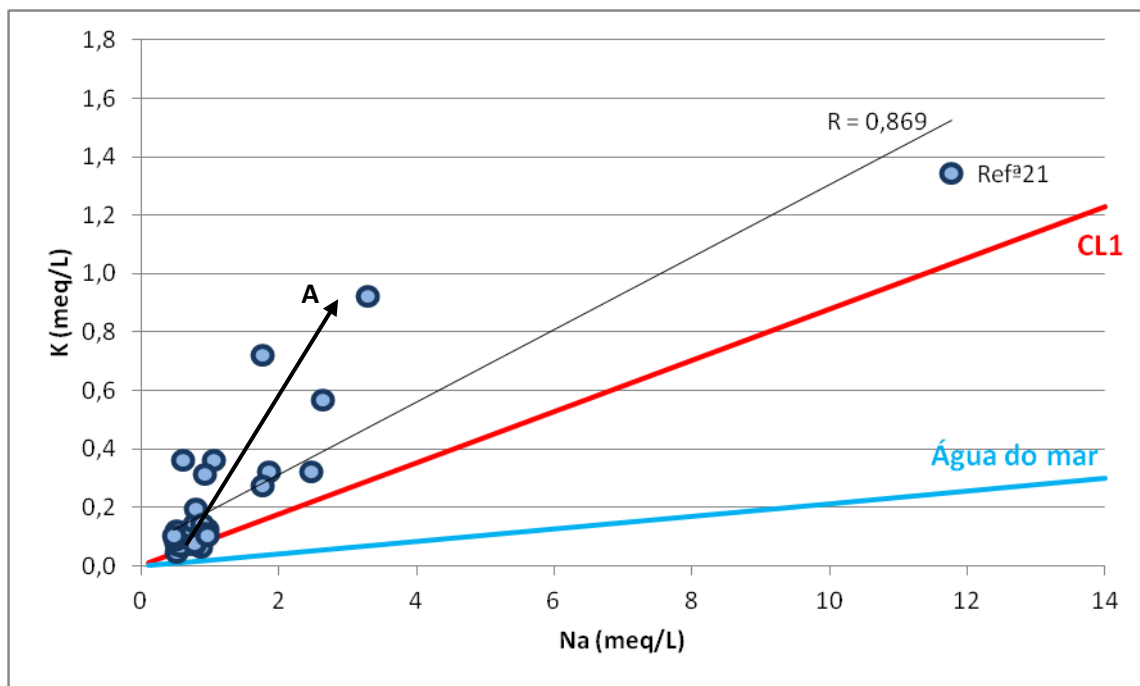


Figura 7.30 - Relação entre as concentrações de sódio e de potássio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – Fluido geotérmico *in* Carvalho *et al.*, 2006; Água do mar: dados de Brown *et al.*, 2002).

No caso da figura 7.31 onde se encontram projetadas as concentrações em cálcio e sódio não se verifica uma correlação linear entre os elementos referidos, para os pontos de água amostrados ($r=0,506$). No entanto, se forem ignorados os valores extremos representados pela Fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (refª4) e pela nascente Albano Vieira (refª21) verifica-se que o coeficiente de correlação aumenta significativamente ($r=0,852$). Sendo assim, parece existir uma origem comum para o incremento dos valores de cálcio e sódio nas amostras que representam a tendência A, como por exemplo, a dissolução de plagioclases.

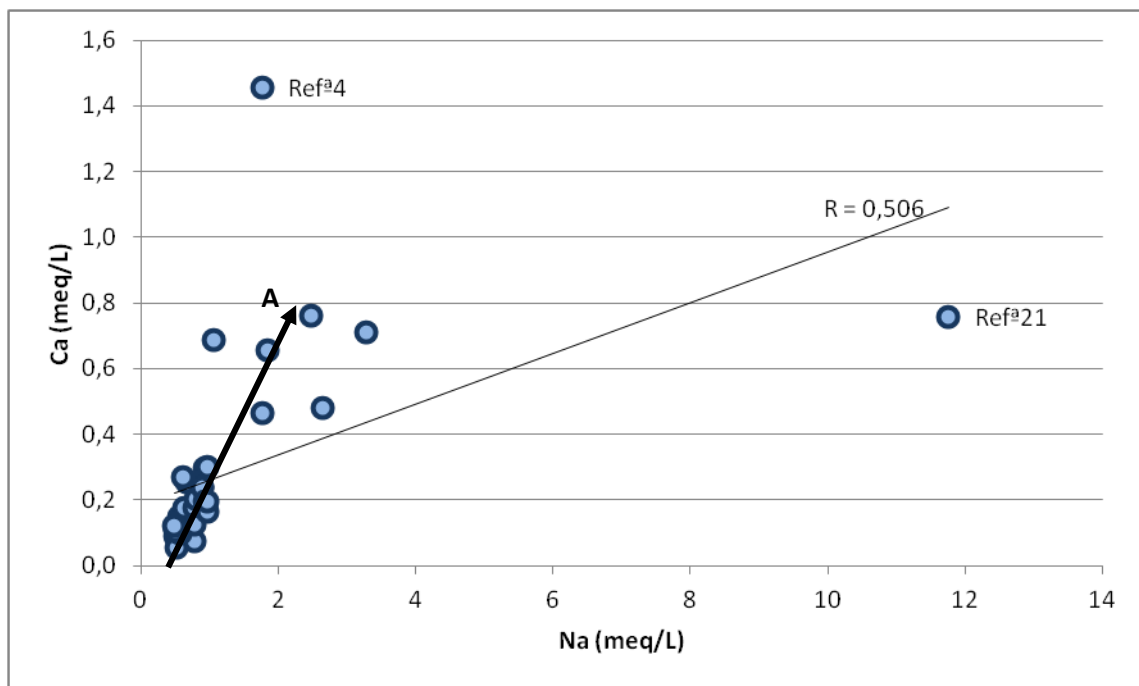


Figura 7.31 - Relação entre as concentrações de sódio e de cálcio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012).

Na figura 7.32 encontram-se representados os valores de fluoreto e de sódio. O coeficiente de correlação linear elevado existente entre o fluoreto e o sódio ($r=0,910$) indica uma correlação melhor com este elemento do que com o anteriormente referido. Neste caso, verifica-se que há uma tendência para o aumento do fluoreto conjuntamente com o sódio. Em estudo recente, Cordeiro *et al.* (2012) concluíram que, o conteúdo em fluoreto nas águas subterrâneas apresenta uma relação positiva mais próxima entre o fluoreto e o sódio, sugerindo a contribuição da lixiviação de silicatos de rochas mais ácidas (depósitos pomíticos), não excluindo, nalguns casos, uma origem vulcânica, como ocorre no caso de algumas nascentes das Furnas.

Na figura 7.32, por sua vez encontram-se representados os valores de fluoreto e de sódio. O coeficiente de correlação linear elevado existente entre o fluoreto e o sódio ($r=0,910$) indica uma correlação melhor com este elemento do que com o anteriormente referido. Neste caso, verifica-se que há uma tendência para o aumento do fluoreto conjuntamente com o sódio.

A relação entre o fluoreto e cálcio e o fluoreto e o sódio foi alvo de estudo, no concelho de Ponta Delgada, neste estudo, Cordeiro *et al.* (2012) concluíram que, se for considerado o conteúdo em fluoreto das águas subterrâneas é possível estabelecer uma relação positiva mais próxima entre o fluoreto e o sódio, nas amostras com

enriquecimento em fluoreto, comparativamente à relação entre o fluoreto e o cálcio, sugerindo a contribuição da lixiviação de silicatos de rochas mais ácidas (depósitos pomíticos) e não um “input” vulcânico como ocorre no caso de algumas nascentes das Furnas.

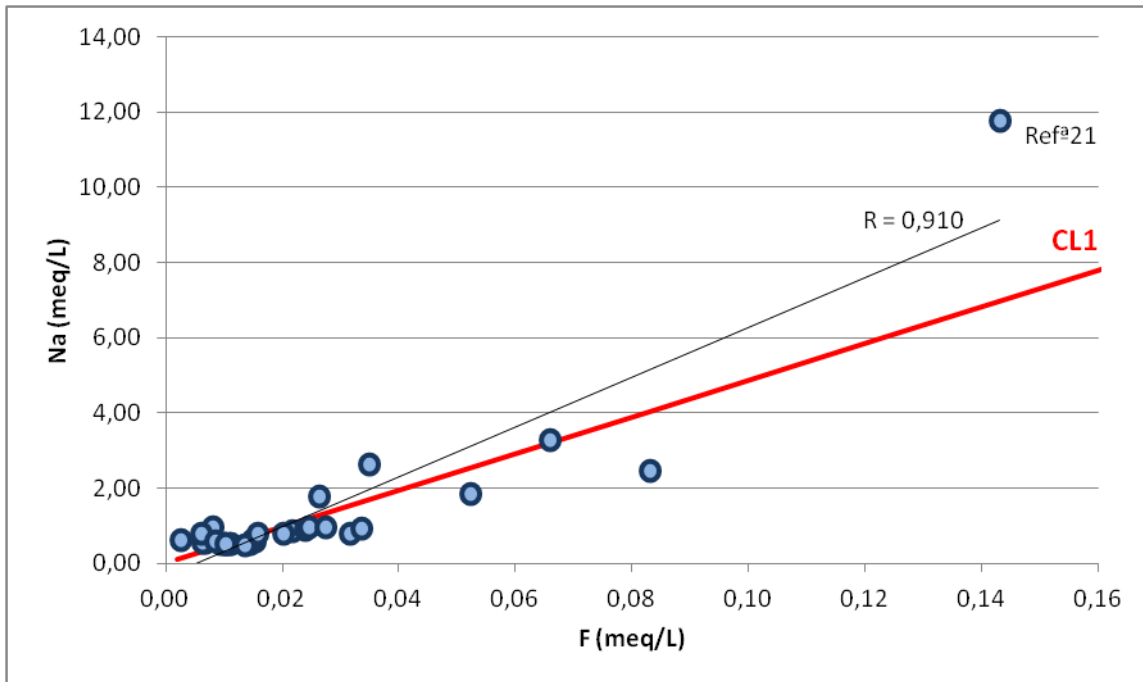


Figura 7.32 - Relação entre as concentrações de fluoreto e de sódio nas águas subterrâneas analisadas, com a respetiva reta de correlação linear (janeiro/fevereiro de 2012). (CL1 – Fluido Geotérmico *in* Carvalho *et al.*, 2006).

7.2.6. Índices de Saturação

As espécies em solução encontradas numa determinada água são resultantes das interações água-rocha, e prendem-se com a evolução mais ou menos célere da composição química das águas subterrâneas ao longo do seu trajeto no meio rochoso, dependendo essencialmente, do tempo de residência média, da natureza, estado de alteração e heterogeneidades espaciais do aquífero, assim como da superfície de contacto água-rocha e do processo de circulação hídrica (Azevedo, 1998).

Em todos os sistemas existentes, o seu propósito é o equilíbrio, sendo que no sistema água-rocha os processos de dissolução e precipitação de fases minerais são os principais a determinar este equilíbrio. No entanto, o equilíbrio de um sistema água-rocha não é muito comum, pelo facto de este ser um sistema dinâmico, que se encontra constantemente a sofrer perturbações e reequilíbrios. Sendo assim, verifica-se frequentemente a ocorrência de águas subsaturadas ou sobressaturadas relativamente a determinados minerais. (Azevedo, 1998; Cruz, 1997).

Para avaliar o estado de equilíbrio de uma água relativamente às fases minerais presentes recorre-se ao cálculo dos índices de saturação (SI) referente às reações de dissolução (Cruz, 1997).

Neste estudo caracterizaram-se os estados de equilíbrio das águas analisadas em relação à calcite, à dolomite, à calcedónia, ao quartzo e à sílica amorfa., para tal foi calculado o logaritmo do índice de saturação, com recurso ao programa Phreeq C (Parkhurst & Appelo, 1999). Os resultados obtidos encontram-se listados no Anexo III.

Todas as amostras analisadas apresentam-se subsaturadas relativamente minerais carbonatados calcite (Fig. 7.33) e dolomite (Fig. 7.34). A dissolução de minerais carbonatados será assim um processo preferencial para repor o equilíbrio nas águas analisadas.

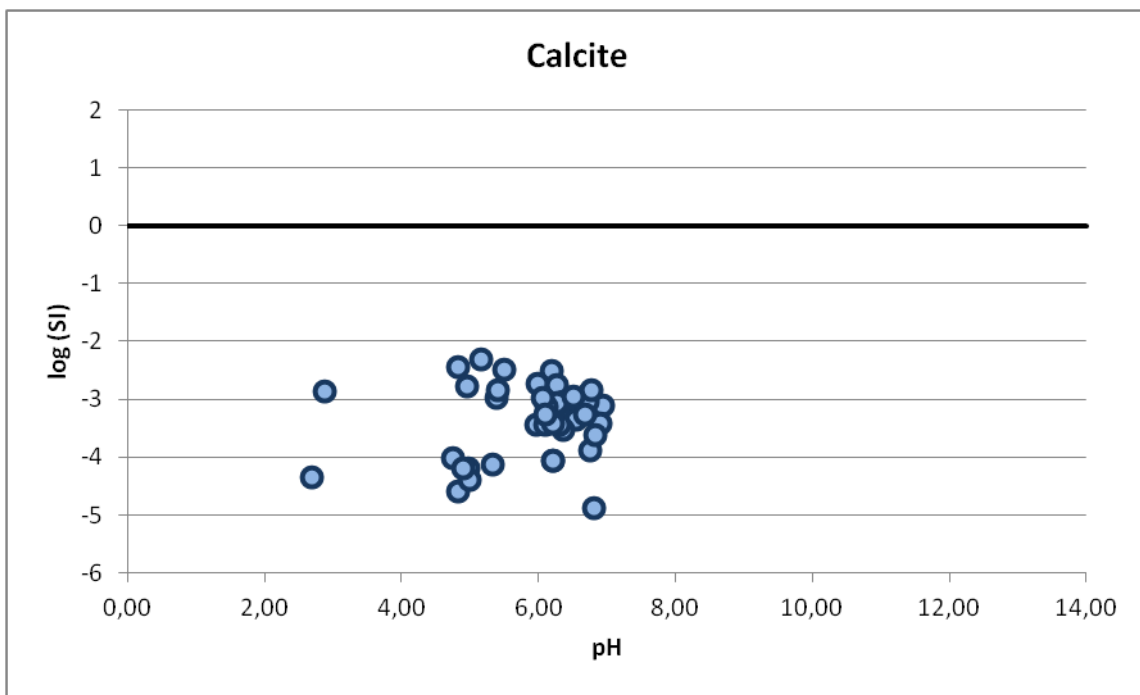


Figura 7.33 – Representação gráfica da variação do log (SI) relativo à calcite em função do pH das águas subterrâneas.

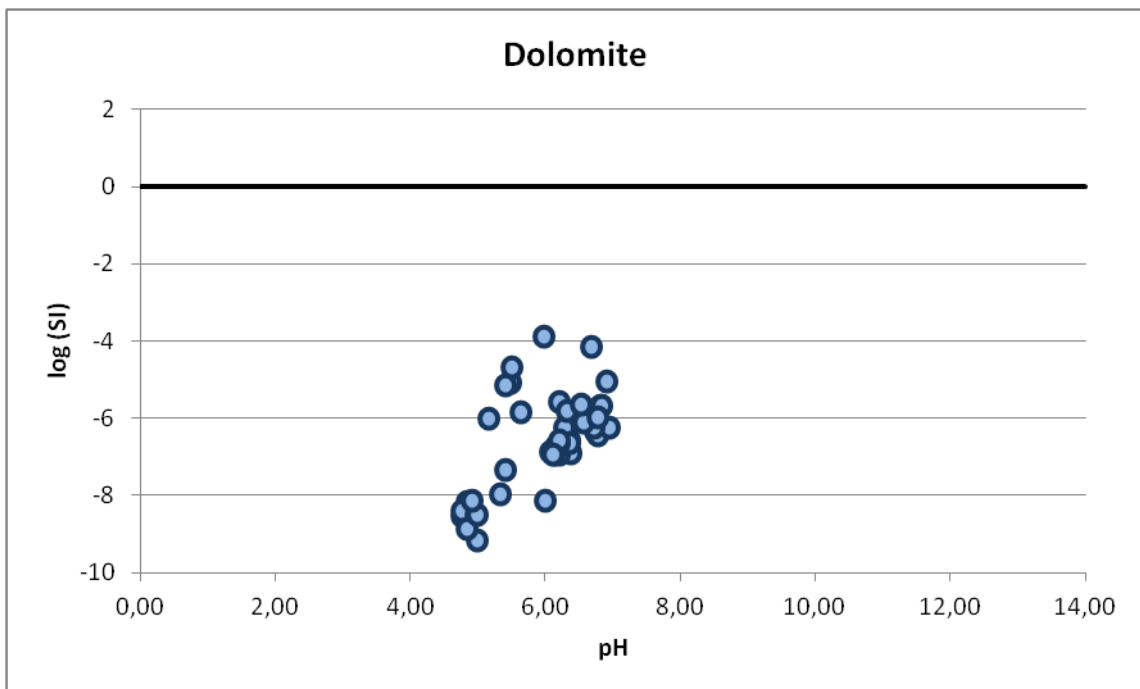


Figura 7.34 - Representação gráfica da variação do log (SI) relativo à dolomite em função do pH das águas subterrâneas.

Relativamente ao índice de saturação em calcedónia existem duas amostras sobressaturadas nesta fase mineral, cujo SI se encontra muito próximo de zero, mais propriamente as nascentes de ref^a5 (Caldeira Velha Nascente) e ref^a27 (Caracol 2 (CMRG13)), o que significa que estas duas águas se encontram próximas do equilíbrio com a calcedónia (Fig. 7.35). Com um índice de saturação inferior a zero encontram-se as amostras ref^a22 (Cachaços), ref^a23 (Fajã das Traves) e ref^a26, 29, 30, 31, 32, 44, 45, 46 e 47 (pertencentes ao grupo de nascentes do Caracol), indicando que todas as amostras anteriormente referidas se encontram subsaturadas em calcedónia, sendo o processo de dissolução prioritário para restabelecer o equilíbrio entre estas águas e a fase mineral analisada. Todas as restantes amostras apresentam-se sobressaturadas em calcedónia, sendo o processo de precipitação essencial para conduzir ao equilíbrio entre estas águas e a calcedónia.

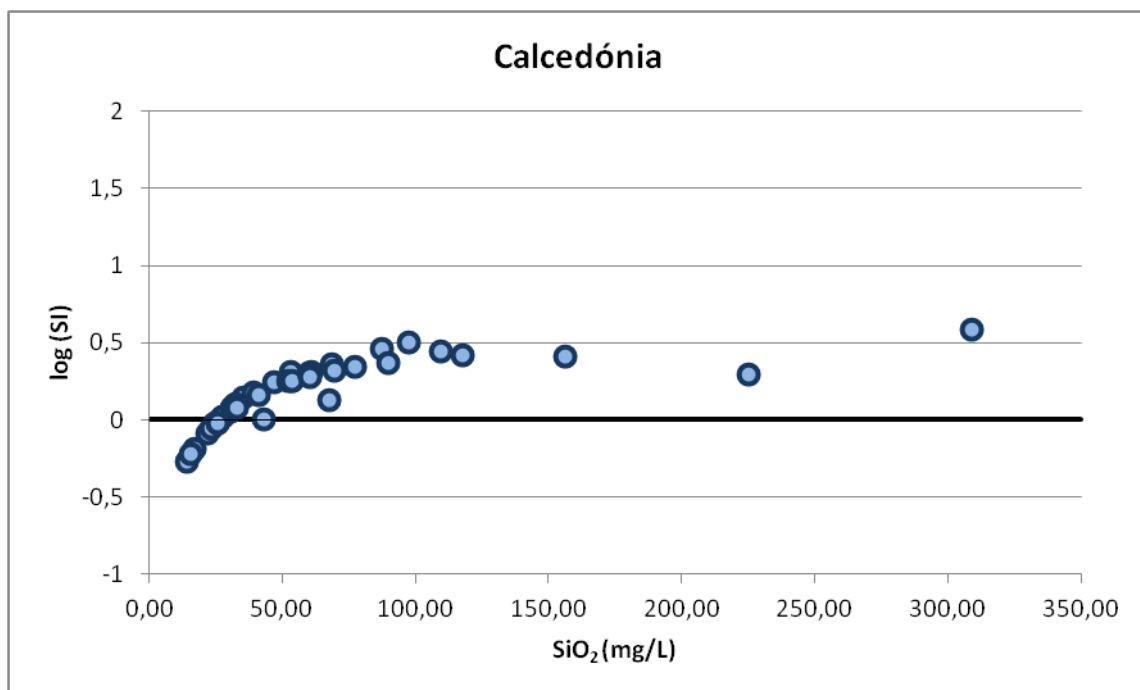


Figura 7.35 - Representação gráfica da variação do Log (SI) relativo à calcedónia em função da concentração de sílica das águas subterrâneas.

Relativamente ao índice de saturação em quartzo, todas as amostras analisadas se encontram sobressaturadas nesta fase mineral, sendo o processo de precipitação preferencial para restabelecer o equilíbrio nestas águas (Fig. 7.36). Por seu turno, todas as amostras analisadas se apresentam subsaturadas em relação à sílica amorfa (Fig. 7.37).

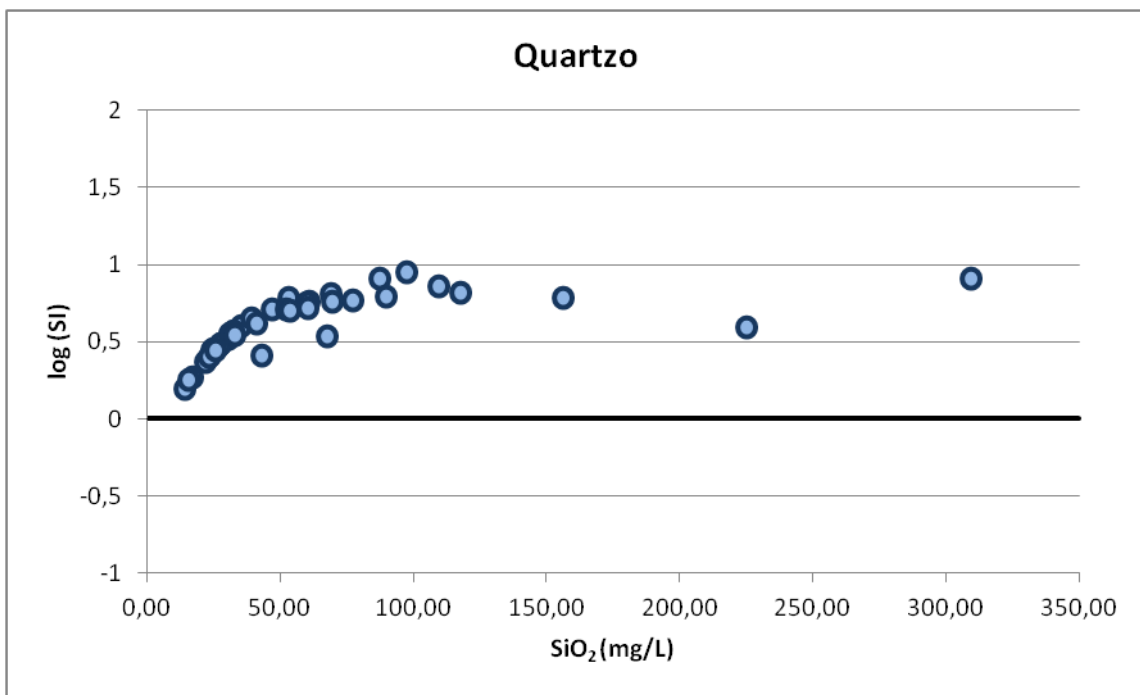


Figura 7.36 - Representação gráfica da variação do Log (SI) relativo ao quartzo em função da concentração de sílica das águas subterrâneas.

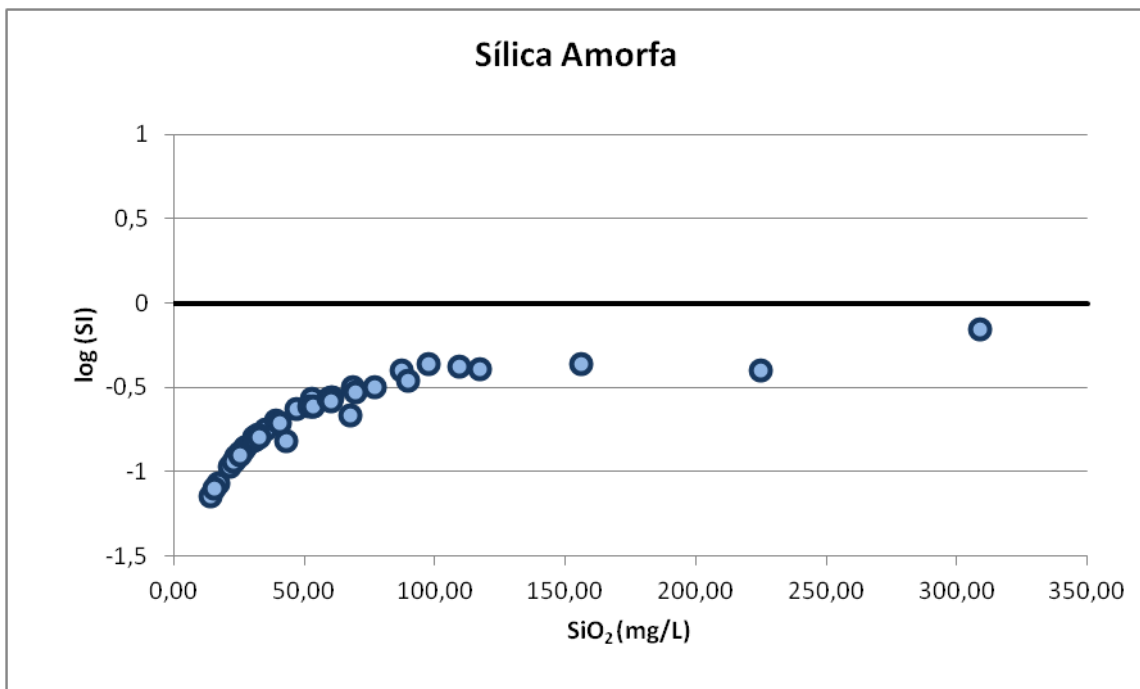


Figura 7.37 - Representação gráfica da variação do Log (SI) relativo à sílica amorfa em função da concentração de sílica das águas subterrâneas.

7.3. Água Superficial

De acordo com o modelo conceptual definido por Freire *et al.* (2013) a hidrogeoquímica das águas superficiais da bacia hidrográfica da Ribeira Grande é fortemente influenciada pela tipologia de uso do solo, podendo ser dividida em três sectores (Fig. 7.38): (1) um sector a montante, onde predominam condições pristinas, com águas enriquecidas em sílica, (2) um sector intermédio, fortemente influenciado pelas áreas de pastagem, com águas enriquecidas em bicarbonato e (3) um sector costeiro, influenciado essencialmente pela área urbana, com águas ricas em cloretos e sulfatos.

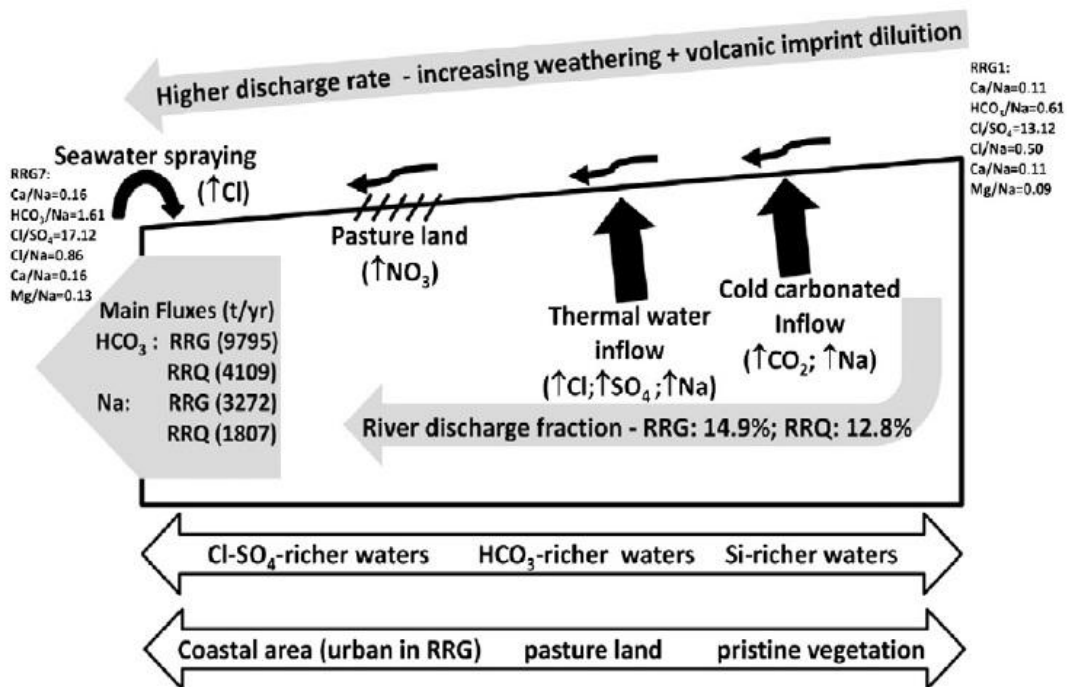


Figura 7.38 – Modelo conceptual para a química da água no rio da Ribeira Grande (Freire *et al.*, 2013).

A descarga de águas gasocarbónicas frias contribui com um enriquecimento em dióxido de carbono e sódio para as águas superficiais, enquanto a descarga de águas termais contribui essencialmente para o enriquecimento em cloretos, sulfatos e sódio. (Freire *et al.*, 2013). O enriquecimento das águas superficiais em nitratos encontra-se associado à poluição agrícola, mais propriamente ao tipo de fertilizantes utilizados, bem como o enriquecimento das águas em cálcio e magnésio (Cruz *et al.*, 2010a).

Na área estudada as fácies hidrogeoquímicas predominantes são dos tipos bicarbonatadas sódicas a cloretadas sódicas, sendo que a amostra de ref^a14 apresenta uma composição relativa mais rica em sulfatos, sendo projetada no campo da fácies sulfatada sódica (Fig. 7.39).

A partir do diagrama de Schoeller verifica-se que existe uma homogeneidade das amostras analisadas, ainda que se verifique, novamente, a existência de uma amostra com uma componente mais rica em sulfato (Fig. 7.40).

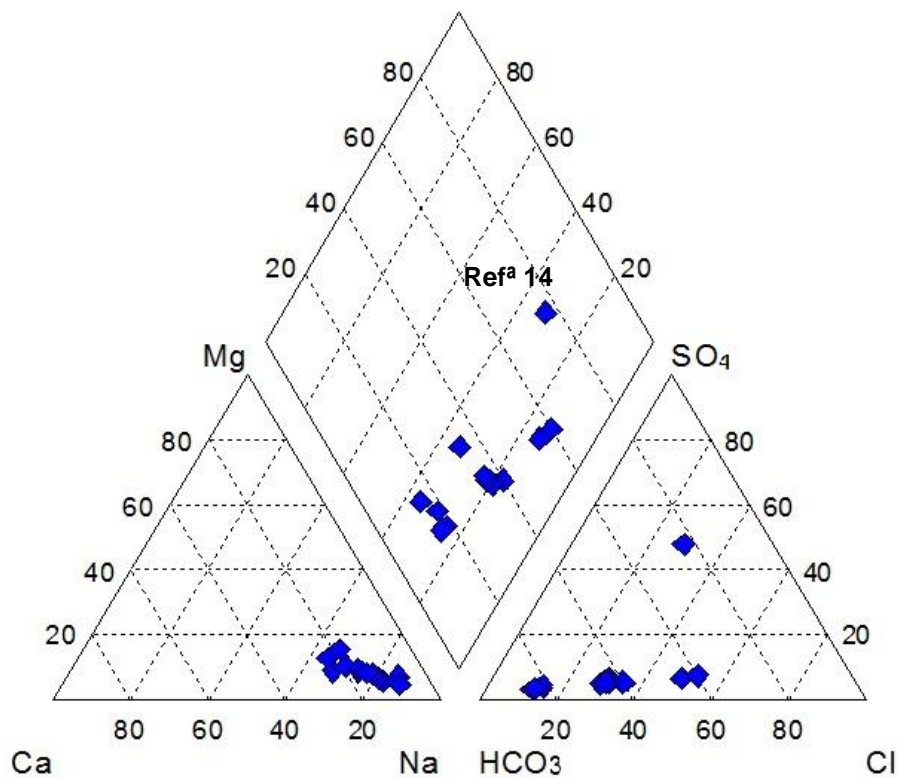


Figura 7.39 - Diagrama de Piper das amostras de água superficial analisadas (março/abril de 2012).

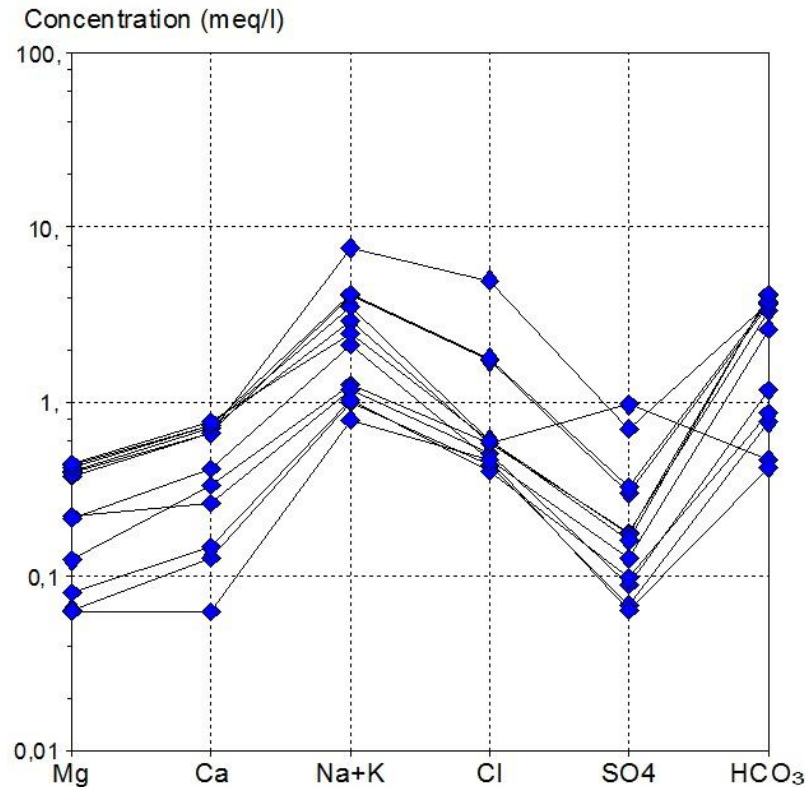


Figura 7.40 - Diagrama de Schoeller das amostras de água superficial analisadas (março/abril de 2012).

7.3.1. Parâmetros Físicos

7.3.1.1. Temperatura

Os resultados dos cálculos estatísticos e valores extremos referentes aos parâmetros físicos determinados nas duas amostragens efetuadas encontram-se indicados na tabela 7.5.

Nas águas superficiais, ao contrário do que acontece com as águas subterrâneas, a temperatura apresentada pela água tem uma grande influência dos factores externos, como sejam a temperatura do ar e a exposição à luz solar, factores estes que sofrem variações, desencadeando flutuações sazonais. Segundo as estatísticas das águas superficiais amostradas a temperatura mínima registada foi de 10,7°C (ref^a52), que corresponde a uma amostra de água efetuada na primeira amostragem (Tabela 7.5). Por sua vez, a temperatura máxima verificada foi igual a 23,3°C (ref^a14 – Ribeira Pós-Pocinha), correspondendo a uma medição efectuada na mesma amostragem (janeiro/fevereiro de 2012).

Tabela 7.5 - Dados estatísticos e valores extremos referentes aos parâmetros físicos das águas superficiais amostradas.

Parâmetros Físicos	Data	Nº de amostras	Max	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
Temp ^a (°C)	jan/fev 2012	12	23,3	10,7	15,0	15,2	3,1
	mar/abr 2012	12	21,9	12,3	16,1	15,8	2,8
Condutividade (µS/cm)	jan/fev 2012	12	847	82	333	302	214
	mar/abr 2012	12	875	90	344	340	225

7.3.1.2. Condutividade elétrica

À semelhança das águas subterrâneas, nas águas superficiais, a condutividade elétrica traduz-se na capacidade que uma água tem de conduzir corrente elétrica e é diretamente proporcional à mineralização da mesma. A condutividade elétrica máxima registou-se no ponto de ref^a55 (Ribeira do Teixeira) em que o valor medido é igual a 847 µS/cm na primeira amostragem e a 875 µS/cm na segunda amostragem. Quanto aos valores mínimos, ambos foram registados no ponto de ref^a52 (Central Geotérmica da Ribeira Grande), correspondendo a 82 µS/cm e a 90 µS/cm, respetivamente na primeira e segunda amostragem.

7.3.2. Parâmetros Químicos

7.3.2.1. pH

Os resultados dos cálculos estatísticos e valores extremos referentes aos parâmetros químicos determinados nas duas amostragens efetuadas encontram-se indicados na tabela 7.6.

A partir dos valores dos parâmetros estatísticos podemos observar que existe uma variabilidade das águas quanto ao pH, que vão desde águas alcalinas a águas ácidas (Tabela 7.6): os valores máximos de pH registados encontram-se em torno de 8 unidades de pH, correspondendo ao ponto de ref^a58 (RG3-Ribeira Grande Foz): Em oposição, os valores mínimos variaram entre 5,9 (ref^a50), na primeira amostragem, e 5,4 na segunda amostragem, no ponto de ref^a14.

Tabela 7.6 - Dados estatísticos e valores extremos referentes aos parâmetros químicos das águas superficiais amostradas.

Parâmetros Químicos	Data	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
pH	jan/fev 2012	12	8,2	5,9	6,7	6,5	0,7
	mar/abr 2012	12	8,4	5,4	6,7	6,9	1,0
Alcalinidade	jan/fev 2012	12	172,00	6,00	98,63	117,75	61,69
	mar/abr 2012	12	209,00	21,00	120,79	149,00	77,14

7.3.2.2. Alcalinidade

Na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 a alcalinidade variou entre 6 mg CaCO₃/L (ref^a14) e 172 mg CaCO₃/L (ref^a57), com valores médios e de desvio padrão respetivamente iguais a 98,63 mg CaCO₃/L e 61,69 mg CaCO₃/L (Tabela 7.6). Na amostragem de março/abril de 2012 a gama de resultados se situou entre 21 mg CaCO₃/L (ref^a52) e 209 mg CaCO₃/L (ref^a53), com uma média igual a 120,79 mg CaCO₃/L e um desvio padrão de 77,14 mg CaCO₃/L (Tabela 7.6).

7.3.3. Catiões

Os resultados dos cálculos estatísticos e valores extremos referentes aos teores dos catiões principais determinados nas duas amostragens efetuadas encontram-se indicados na tabela 7.7.

O sódio é o catião predominante nas águas superficiais analisadas: s valores máximos registados nas duas amostragens, iguais a 133,58 mg/L e a 163,22 mg/L, correspondem ao ponto de ref^a55 (Ribeira do Teixeira). Quanto aos valores mínimos, foram ambos registados do ponto de ref^a52 (Central Geotérmica da Ribeira Grande), e foram iguais a 13,66 mg/L e 16,83 mg/L respetivamente na primeira e segunda amostragem (Tabela 7.7).

Tabela 7.7 - Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos cátions principais das águas superficiais analisadas (valores em mg/L).

Cátions	Data	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
Na	jan/fev 2012	12	133,58	13,66	49,44	42,23	35,43
	mar/abr 2012	12	163,22	16,83	56,09	46,63	43,06
K	jan/fev 2012	12	26,04	2,22	10,72	10,90	6,53
	mar/abr 2012	12	20,86	2,43	9,68	10,38	5,03
Ca	jan/fev 2012	12	12,60	0,87	8,00	9,53	4,01
	mar/abr 2012	12	15,46	1,26	9,40	10,74	5,46
Mg	jan/fev 2012	12	6,16	0,72	3,92	4,93	2,21
	mar/abr 2012	12	5,41	0,77	3,30	3,65	1,91

O potássio apresenta uma concentração média na ordem dos 10 a 11 mg/L nas duas amostragens (Tabela 7.7). Os valores máximos registados na análise de janeiro/fevereiro de 2012 e de março/abril de 2012 foram, respetivamente, iguais a 26,04 mg/L e a 20,86 mg/L, ambos no ponto de ref^a55. Quanto aos valores mínimos, iguais a 2,22 mg/L na primeira amostragem, e a 2,43 mg/L na segunda recolha, foram ambos registados no ponto de ref^a52.

O cálcio na primeira amostragem variou entre 0,87 mg/L e 12,60 mg/L, com uma média de 8,00 mg/L, enquanto na recolha de março/abril de 2012 a gama de concentrações se situou entre 1,26 mg/L e 15,46 mg/L (média = 9,40 mg/L).

No que respeita ao magnésio, os valores máximos registados foram de 6,2 mg/L (ref^a56) na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012, e de 5,4 mg/L (ref^a53) na amostragem de março/abril de 2012 (Tabela 7.7). Quanto aos valores mínimos, foram ambos registados no ponto de ref^a52 e foram iguais a 0,7 mg/L e a 0,8 mg/L na primeira e segunda amostragem, respetivamente.

7.3.4. Aniões

Os valores extremos e estatísticos dos aniões principais encontrados em solução nas amostragens das águas superficiais analisadas encontram-se discriminados na tabela 7.8.

O cloreto regista como valores máximos de concentração 180,74 mg/L, na primeira amostragem, e 176,73 mg/L, na segunda recolha, ambos no ponto de ref^a55 (Tabela 7.8). Quanto aos valores mínimos registados foram iguais a 15,10 mg/L (ref^a50), na primeira recolha e a 14,27 mg/L (ref^a51), na segunda amostragem.

Tabela 7.8 - Valores extremos e algumas estatísticas referentes aos aniões principais das águas superficiais analisadas (valores em mg/L).

Aniões	Data	Nº de amostras	Máx	Min	Média	Mediana	Desvio Padrão
Cl	jan/fev 2012	12	180,74	15,10	38,16	21,26	46,94
	mar/abr 2012	12	176,73	14,27	38,82	20,64	46,67
HCO ₃	jan/fev 2012	12	209,80	7,32	120,33	143,65	75,27
	mar/abr 2012	12	254,98	25,62	147,37	181,78	94,10
SO ₄	jan/fev 2012	12	41,18	3,19	12,12	8,14	12,01
	mar/abr 2012	12	46,44	3,09	13,06	8,09	13,52

Relativamente ao bicarbonato, na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 o valor máximo registado foi de 209,80 mg/L (ref^a57), enquanto o mínimo registado foi igual a 7,32 mg/L (ref^a14), sendo a concentração média desta recolha igual a 120,33 mg HCO₃/L (Tabela 7.8). No que concerne à amostragem de março/abril de 2012, o valor máximo registado foi igual a 254,98 mg/L (ref^a53), mínimo igual a 25,62 mg/L (ref^a52), sendo o valor médio desta amostragem de 147,37 mg HCO₃/L.

No que respeita ao anião sulfato, os valores máximos obtidos em ambas as amostragens foram determinados no ponto de ref^a14, e iguais a 41,18 mg/L e a 46,44 mg/L nas primeira e segunda recolhas respetivamente (Tabela 7.8). O valor mínimo de sulfato na primeira amostragem foi igual a 3,19 mg/L (ref^a50), correspondendo o valor médio desta amostragem a 12,12 mg SO₄/L. Na segunda amostragem, o valor mínimo foi de 3,09 mg/L (ref^a52), sendo a concentração média de sulfato nesta amostragem igual a 13,06 mg SO₄/L.

7.3.5. Discussão de resultados

A partir dos resultados referentes às análises efetuadas sobre amostras de água de superfície constata-se que ocorre um aumento do valor da condutividade elétrica, e assim da mineralização total, na bacia hidrográfica da Ribeira Grande, de montante (ref^a50) para jusante (ref^a58), refletindo um aumento progressivo da mineralização da água (Fig. 7.41). No entanto, a amostra de ref^a55 (Ribeira do Teixeira) não se enquadra no padrão anteriormente referido, apresentando um valor de condutividade média igual a 861 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que poderá ser justificado pela localização do ponto de recolha a jusante do local onde ocorre a descarga da nascente de ref^a21 (Albano Vieira), cujo valor de condutividade se apresenta excessivamente elevado quando comparado aos restantes pontos de água subterrânea analisados (subcapítulo 7.2.1.2).

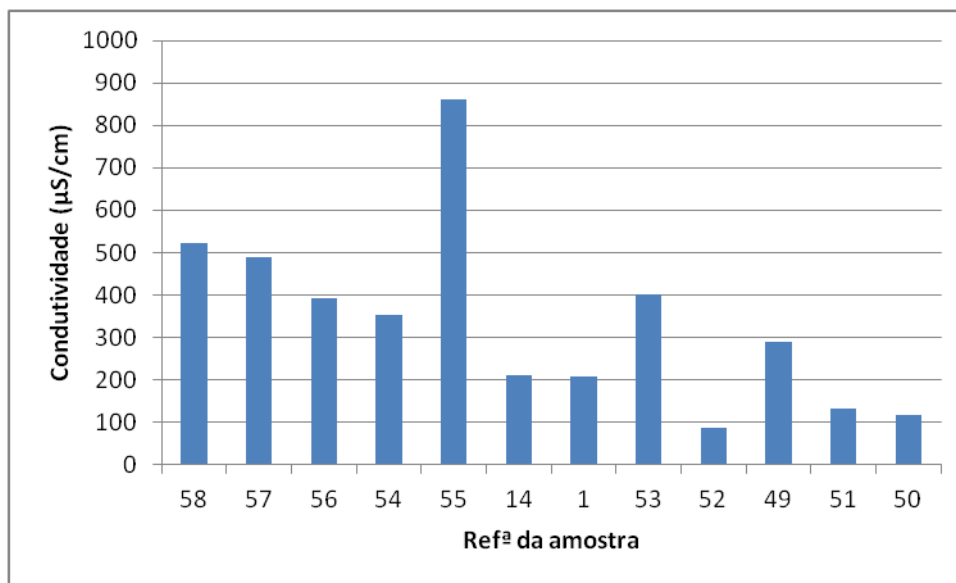


Figura 7.41 - Relação entre os valores médios da condutividade por ponto de água e a altitude relativa dos pontos de amostragem (ref^a58 – ponto de água mais a jusante; ref^a50 – ponto de água mais a montante).

Os catiões e os aniões apresentam, de modo geral, a mesma tendência da condutividade, aumentando a sua concentração nas águas superficiais com a aproximação à foz da bacia (Fig. 7.42 e 7.43).

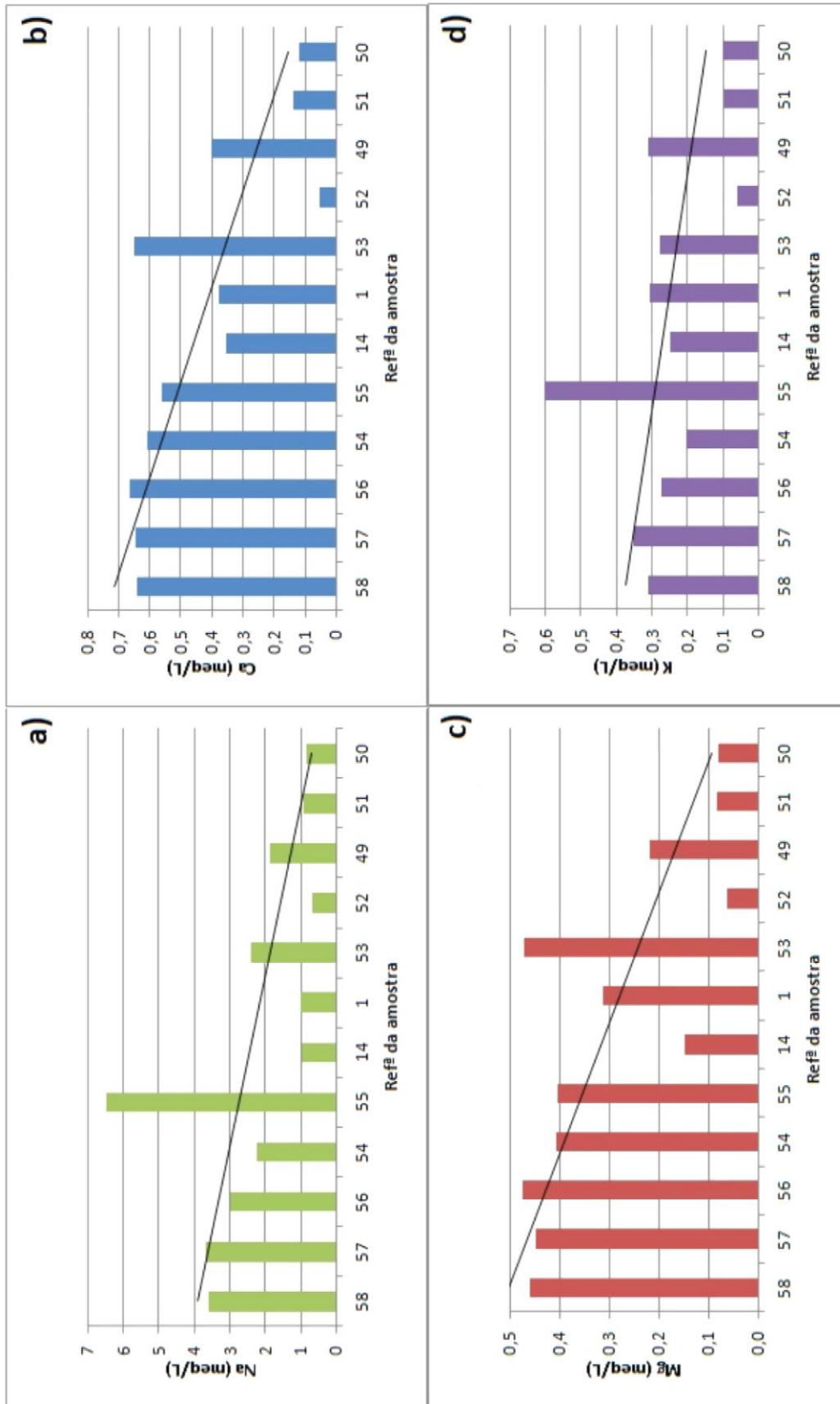


Figura 7.42 - Relação entre os valores médios dos principais cátions e a altitude relativa dos pontos de amostragem (refª58 – ponto de água mais a jusante; refª50 – ponto de água mais a montante). **(a)** sódio; **(b)** cálcio; **(c)** magnésio; **(d)** potássio).

O ponto de água superficial de ref^a55 (Ribeira do Teixeira) apresenta um comportamento diverso relativamente à tendência de enriquecimento dos cátions sódio (Fig. 7.42a) e potássio (Fig. 7.42d) de montante a jusante, o que se traduz por um aumento substancial das respetivas concentrações. Tal sugere que a montante deste ponto de água superficial poderá existir uma fonte externa de sódio e potássio, como por exemplo a descarga a partir de um ponto de água subterrâneo com concentrações elevadas nestes elementos.

Nas figuras 7.42b e 7.42c, onde respetivamente se representam as relações entre os valores médios de concentração em cálcio e magnésio com a altitude relativa dos pontos de amostragem, verifica-se que o ponto de água superficial de ref^a53 (Mato Jorge) apresenta um comportamento diferente do padrão observado para as restantes amostras. O enriquecimento em cálcio e magnésio é, neste caso, bastante superior ao observado nos restantes pontos, o que sugere a ocorrência de mistura com água subterrânea com concentrações elevadas nestes elementos.

Relativamente à variação dos teores em bicarbonato de montante a jusante, salienta-se que o ponto de água superficial de ref^a53 (Mato Jorge) apresenta um comportamento diferente do padrão observado considerando as seguintes recolhas, na medida que apresenta concentrações mais elevadas (Fig. 7.43a). Sugere-se que a montante deste ponto de água superficial poderá existir uma fonte externa de bicarbonato, como por exemplo drenagem a partir de um ponto de água subterrâneo com concentrações elevadas neste elemento. Quando se observa a relação entre os valores médios de fluoreto e a altitude relativa dos pontos de amostragem verifica-se a mesma tendência apresentada pelo bicarbonato (Fig. 7.43d).

No que concerne à relação entre os valores médios do cloreto e a altitude relativa dos pontos de água existe um incremento do cloreto com a aproximação à foz (ref^a58) (Fig. 7.43b). No ponto de ref^a55 (Ribeira do Teixeira) observa-se um valor de cloreto muito superior aos restantes pontos de água, o que sugere a existência de mistura entre a água superficial e um fluido com excesso de cloreto a montante do ponto referido.

Quanto ao sulfato, denota-se a existência de dois pontos de água superficial com elevados valores de sulfato (ref^a14 – Ribeira Pós-Pocinha; ref^a55 – Ribeira do Teixeira), o que poderá ser justificado pela mistura com um fluido enriquecido em sulfato, a montante destes locais de recolha de amostras. Um exemplo corresponde ao caso do ponto de ref^a14, localizado a jusante das Caldeiras da Ribeira Grande onde ocorrem emergências de água subterrânea aquecidas por vapor (Fig. 7.43c).

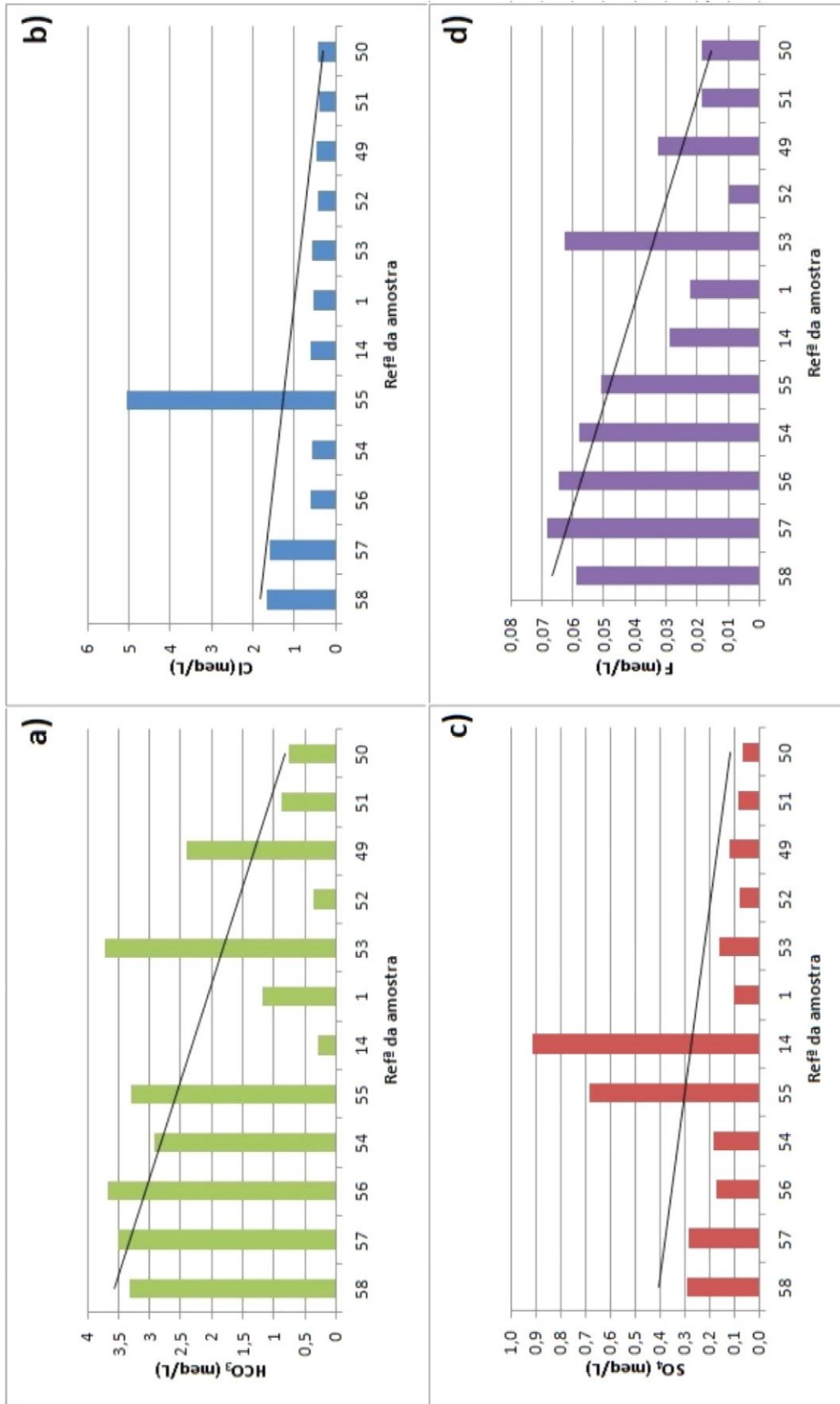


Figura 7.43 - Relação entre os valores médios dos principais ânions e a altitude relativa dos pontos de amostragem (ref#58 – ponto de água mais a jusante; ref#50 – ponto de água mais a montante). **(a)** bicarbonato; **b)** cloreto; **c)** sulfato; **d)** fluoreto).

7.4. Contaminação por Nitratos

A contaminação da água, independentemente do seu tipo, traduz-se na degradação consequente da qualidade da água (Custodio & Llamas, 1983). Pode ter a sua origem na poluição industrial, poluição agrícola, poluição urbana (emissão de águas residuais urbanas e deposição de resíduos domésticos) e/ou na poluição ambiental, como por exemplo a intrusão salina.

Relativamente ao tipo de foco, a contaminação da água pode ser classificada em (Silva, 1984): (1) localizada ou pontual, quando a sua origem se faz num único ponto, como no caso da existência de lixeiras ou explorações pecuárias, ou (2) difusa, com origem dispersa numa área alargada, onde os efeitos se manifestam mais lentamente, como no caso da contaminação agrícola, por exemplo em resultado da aplicação de fertilizantes orgânicos e inorgânicos em pastagens.

Segundo Cruz *et al.* (2010a) outra das pressões sobre o estado químico das massas de água subterrâneas e de superfície no arquipélago dos Açores resulta da ausência de drenagem de águas residuais, onde, por exemplo, na ilha de São Miguel apenas 55% da população era efetivamente coberta por um sistema de drenagem de águas residuais, no ano 2010 (AHA-SRAM, 2011). Tal implica que há descarga de águas residuais urbanas sem tratamento, ou com tratamento inadequado, em cursos de água. O impacto desta questão na Região Autónoma dos Açores é, ainda, realçado pelo facto das zonas urbanas se localizarem perto da foz das ribeiras, na zona litoral (Cruz *et al.* 2010a, 2010b).

A contaminação por atividades agrícolas é uma tipologia de pressão sobre as águas que tem vindo a aumentar à medida que crescem as necessidades de maiores produções. Em virtude do aumento e desenvolvimento das sociedades, aumentam as necessidades alimentares, recorrendo-se às monoculturas e à produção animal de forma massiva, com o abandono as práticas agrícolas tradicionais. A adoção destas novas práticas agrícolas promove a utilização, muitas vezes excessiva, de adubos inorgânicos e pesticidas, em substituição dos fertilizantes orgânicos tradicionais (Cruz, 1992).

Segundo Cruz (1992) a utilização de fertilizantes inorgânicos consumidos na Europa, no período entre 1950 e 1975 passou de 15 para 95,4 milhões de toneladas. Não obstante o aumento do número de países que compõem a união europeia, segundo dados do Eurostat (2011) no ano de 2010 eram consumidos na Europa 76 kg de

fertilizantes inorgânicos por hectare de área agrícola, correspondendo a cerca de 13,1 milhões de toneladas.

A utilização de fertilizantes e pesticidas apresenta um impacto francamente negativo sobre a qualidade da água. O risco de contaminação devido à utilização de fertilizantes inorgânicos, deriva quer de uma ação direta, a partir da lixiviação de iões e elementos tóxicos libertados aquando da sua decomposição no solo, quer de uma ação indireta, em que os elementos tóxicos são libertados no aquífero (Houzin *et al.*, 1986)

No âmbito deste trabalho e tendo em conta os componentes analisados, foi abordada a contaminação por nitratos de origem agrícola, relacionando os valores obtidos com as classes de uso do solo presentes na área (subcapítulo 3.3).

O azoto apresenta-se em solução nas águas sob a forma de três espécies principais, duas aniónicas, o nitrito (NO_2^-) e o nitrato (NO_3^-), e uma catiónica, a amónia (NH_4^+). As espécies aniónicas são estáveis numa ampla gama de condições ambientais, pelo que são facilmente lixiviadas e transportadas em solução, constituindo um maior risco para a qualidade da água subterrânea (Cruz *et al.*, 2011; AHA-SRAM, 2011). Quando comparada às formas aniónicas, a amónia é a espécie menos móvel em solução devido ao facto de ser fortemente absorvida nas superfícies minerais do solo (Hem, 1985 *in* Cruz *et al.*, 2011).

Tabela 7.9 - Dados estatísticos e valores extremos referentes aos valores de nitrato das águas amostradas.

	Data	Máx.	Mín.	Média	Mediana	Desvio Padrão
NO₃ (mg/L)	jan/fev 2012	7,31	0,40	2,09	1,32	2,03
	mar/abr 2012	15,08	0,27	2,57	1,39	2,96
	jun 2012	15,27	0,17	2,45	1,02	3,41

Os teores máximos de nitrato registados nas três amostragens, iguais a 7,31 mg/L na ref^a31 (nascente Caracol 6, CMRG 2), em janeiro/fevereiro de 2012, a 15,08 mg/L na amostragem de março/abril de 2012 e a 15,27 mg/L, estes últimos dois valores foram registados na ref^a48 (nascente Caracol 13, CMRG 1). Ambos os casos correspondem a nascentes que se localizam em pastagens. No que respeita aos valores mínimos foram iguais a 0,40 mg/L na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 (nascente Caracol 3, CMRG 8; ref^a28), a 0,27 mg/L em março/abril de 2012 (ponto Mato do Jorge, ref^a53) e 0,17 mg/L em junho de 2012 (nascente Pico Rafael, ref^a35), em

pontos de água localizados em espaços florestais e espaços de vegetação natural (tabela 7.9).

Relativamente aos valores médios da concentração de nitrato de cada amostragem, estes foram iguais a 2,09 mg/L em janeiro/fevereiro de 2012, a 2,57 mg/L em março/abril de 2012 e a 2,456 mg/L em junho de 2012 (tabela 7.9). Quanto aos valores de desvio padrão, muito próximos dos valores médios, refletem a dispersão dos valores de nitrato registados, sendo estes de 2,03 mg/L, na primeira amostragem, de 2,96 mg/L na segunda amostragem, e de 3,41 mg/L na terceira amostragem.

Segundo o Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de agosto, o valor máximo admissível (VMA) e o valor máximo recomendável (VMR) de nitrato em águas para consumo humano é de 50mg/L e 25 mg/L, ou seja, 0,81 meq/L e 0,40 meq/L, respetivamente.

Considerando os valores médios de nitrato por ponto de água, constata-se que todas as águas analisadas apresentam valores inferiores aos valores máximos recomendável e admissível, definidos na legislação (Fig. 7.44). No entanto, há a realçar a existência de alguns pontos de água com valores de concentração em nitrato mais elevados, localizados na proximidade de pastagens, onde estes valores estarão provavelmente associados à utilização de fertilizantes e resíduos orgânicos.

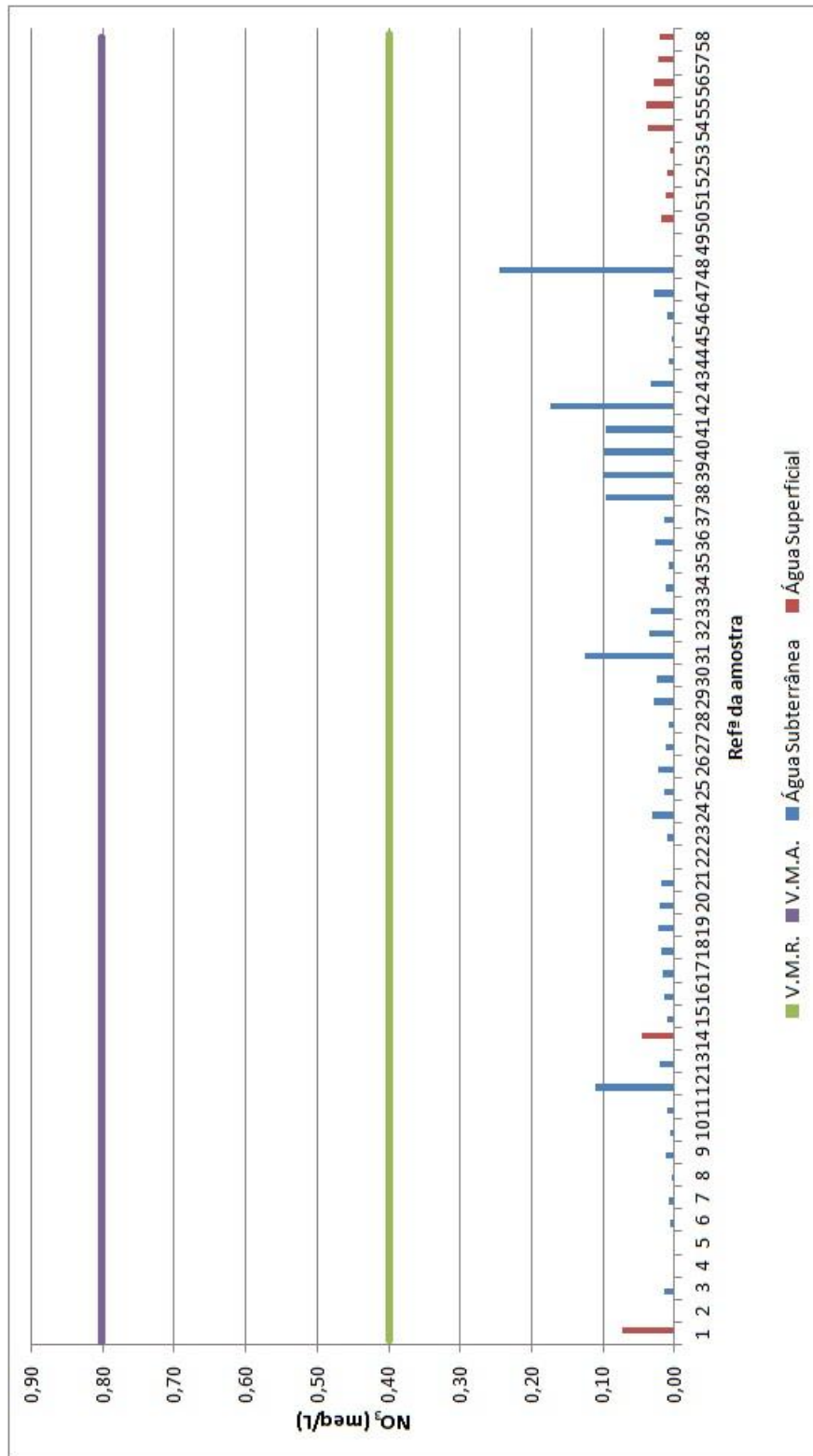


Figura 7.44 – Distribuição dos valores médios de nitrato por ponto de água.

8. Considerações Finais

Sob o ponto de vista geoestrutural os Açores encontram-se na zona de confluência de três importantes placas litosféricas, sendo a dinâmica regional condicionada pela presença de inúmeras estruturas tectónicas, sendo que as mais importantes são a Crista Média Atlântica, a Zona de Fractura Este dos Açores e o *Rift* da Terceira, locais caracterizados como preferenciais para a ocorrência da atividade sísmica e vulcânica.

O vulcão central do Fogo, também designado por vulcão da Serra de Agua de Pau localiza-se na parte central da ilha de São Miguel e a sequência vulcanostratigráfica do flanco norte do mesmo é caracterizado essencialmente pela presença de produtos mais antigos, que se desenvolveram na base do vulcão no Grupo Inferior, depósitos de queda e de fluxo e depósitos epiclásticos no Grupo Superior, depósitos piroclásticos pomíticos, cones de escórias e escoadas lávicas na Formação da Lombadas e depósitos pomíticos e sequências basálticas na Formação histórica.

Em São Miguel, cerca de 60% da ilha é ocupada por agricultura e pastagem, enquanto a área ocupada por floresta e vegetação natural, atinge cerca de 30%. Os espaços urbanos representam cerca de 6% da ocupação do solo em São Miguel, sendo que as áreas descobertas, as lagoas e os espaços industriais, perfazem os restantes 4% de ocupação do solo da ilha. Na área de estudo a linha de costa é constituída por áreas descobertas, ainda que estas também se encontrem dispersas por toda a área de estudo, neste caso, correspondem maioritariamente a pedreiras. Na zona litoral encontram-se as áreas urbanas, áreas agrícolas e pastagens, sendo que, as últimas duas também predominam na zona intermédia da área de estudo. Na zona a montante da área, nas imediações da Lagoa do Fogo, predominam as áreas de floresta e vegetação natural. No que respeita às áreas industriais, ainda que se verifique a existência de um parque industrial na área de estudo, estas encontram-se dispersas por todas as zonas.

O clima nos Açores enquadra-se na categoria de climas temperados quentes, isto é, apresenta Verão e Inverno e a temperatura do mês mais frio é inferior a 18°C e superior a – 3°C, sendo que a temperatura média do mês mais quente não ultrapassa os 22°C. Na ilha de São Miguel, as zonas no centro da ilha, a maior altitude apresentam temperaturas médias anuais mais baixas, valores de humidade elevados e valores de precipitação elevados (> 3000 mm). Por sua vez, nas zonas de litoral

registam-se valores mais elevados de temperatura ($> 18^{\circ}\text{C}$), humidades relativas inferiores a 80% e valores de precipitação inferiores a 1000 mm.

Na massa de água Água de Pau localizam-se 286 nascentes e 7 furos, sendo que, no presente trabalho, foram caracterizados 46 pontos de águas subterrânea e 12 pontos de água superficial na bacia hidrográfica da Ribeira Grande. Estes pontos de água apresentam uma altimetria que vai desde os 19 metros, junto à linha de costa, até aos 786 metros de altitude na zona circundante à Lagoa do Fogo.

No que respeita aos pontos de água subterrânea, mais de 95% apresentam uma litologia composta por material de natureza geoquímica mais ácida (lapilli pomítico, pedra pomes, escoadas traquíticas). O caudal mínimo aferido, 0.03 L/s, correspondeu a uma amostragem de junho de 2012 na nascente da Pocinha (ref^a13). Os valores de caudal mais elevados, determinados nos pontos de água onde a medição foi possível, foram observados nas amostragens do mês de março/abril de 2012. Verificando-se, ainda, que as nascentes Fajã do Boi III (ref^a17), Fajã das Traves (ref^a23) e Mato Miguel (ref^a25) são as mais produtivas, apresentando caudais significativos. Não obstante que, com referência a dados de 2008, do INSAAR (INAG, 2009) as nascentes Bandeirinha (ref^a19) e Chá Canto (ref^a20) apresentam caudais médios de 16,85 L/s e 21,31 L/s, respetivamente.

A caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas do flanco norte do vulcão do Fogo no que diz respeito aos parâmetros físico-químicos mostra que relativamente à temperatura registou-se o valor máximo de $82,3^{\circ}\text{C}$ na Caldeira Velha Fumarola (ref^a6), e mínimo de $12,3^{\circ}\text{C}$ nas nascentes Fajã do Boi II e III (ref^a16 e 17), ambos na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. A condutividade elétrica apresenta como valor máximo 6340 $\mu\text{S}/\text{cm}$, na amostragem de junho de 2012, na Caldeira Velha Fumarola (ref^a6) e como valor mínimo 81 $\mu\text{S}/\text{cm}$, na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012, nas nascentes Fajã do Boi I (ref^a15) e Fajã da Traves (ref^a23). O pH regista um valor máximo de 7,3 unidades de pH, na amostragem de março/abril de 2012, na nascente Cachaços (ref^a22), e um mínimo de 1,8, na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012, na fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4). Os valores da alcalinidade variam entre 2,0 mg CaCO_3/L , no ponto Caldeira Velha Fumarola (ref^a6), e 306,5 mg CaCO_3/L na nascente Albano Vieira (ref^a21), ambos na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. A dureza total varia entre 4,0 mg CaCO_3/L na nascente Lombadas Doce (ref^a10), na amostragem de março/abril de 2012, e 87,4 mg CaCO_3/L na Fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4), na amostragem de junho de 2012.

As fácies hidrogeoquímicas predominantes nas águas subterrâneas são cloretadas sódicas, bicarbonatadas sódicas, sendo que se encontram fácies sulfatadas sódicas e águas cuja composição química apresenta-se como uma mistura das fácies anteriormente referidas.

O catião sódio é o mais abundante nas águas subterrâneas analisadas, apresentando uma concentração média de 28,2 mg/L, com um máximo de 273,5 mg/L, na amostragem de março/abril de 2012, na nascente Albano Vieira (ref^a21) e um mínimo de 10,9 mg/L na nascente Mata Alta (ref^a37), na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. Segue-se o catião potássio com um valor médio de concentração igual a 8,6 mg/L um máximo de 52,63 mg/L na primeira amostragem, na nascente Albano Vieira (ref^a21) e um mínimo de 0,5 mg/L na amostragem de junho de 2012, na nascente Caracol 13 (CMRG 1; ref^a48). O catião cálcio apresenta uma concentração média de 5,3 mg/L, com um máximo de 32,1 mg/L, na amostragem de junho de 2012, na Fumarola das Caldeiras da Ribeira Grande (ref^a4) e um mínimo de 0,9 mg/L na nascente Fajã das Traves (ref^a23), na amostragem de março/abril de 2012. O catião magnésio apresenta um valor médio de concentração igual a 1,9 mg/L, um máximo de 5,2 mg/L na primeira amostragem, na nascente Albano Vieira (ref^a21) e um mínimo de 0,28 mg/L na amostragem de março/abril de 2012, na nascente Lombadas Doce (ref^a10).

Os aniões principais mais abundantes, nas águas subterrâneas, são o sulfato, o bicarbonato e o cloreto. O anião sulfato apresenta uma concentração média de 59,7 mg/L, com um máximo de 2559,2 mg/L, no ponto Caldeira Velha Fumarola (ref^a6) e um mínimo de 1,5 mg/L na nascente Caracol 3 (CMRG 8; ref^a28), ambos na amostragem de junho de 2012. O anião bicarbonato apresenta um valor médio de concentração igual a 55,0 mg/L, um máximo de 373,9 mg/L na nascente Albano Vieira (ref^a21) e um mínimo de 2,4 mg/L no ponto Caldeira Velha Fumarola (ref^a6), ambos na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. O anião cloreto apresenta uma concentração média de 25,0 mg/L, com um máximo de 274,0 mg/L, nascente Albano Vieira (ref^a21), na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 e um mínimo de 10,7 mg/L na nascente Fajã do Boi III (ref^a17), na amostragem de junho de 2012.

No que respeita à concentração das águas em catiões sugere-se que o sódio está associada à dissolução de silicatos (plagioclase), e/ou adição de sódio a partir da água da chuva e, no caso da nascente Albano Vieira, associados à mistura com fluidos hidrotermais; O potássio está associado à dissolução de silicatos e à dissolução de aerossóis; O cálcio encontra-se associado à dissolução de silicatos (plagioclases) e de

aerossóis; O magnésio está associado à dissolução de silicatos e adição a partir de água da chuva.

No que concerne à concentração das águas em aniões sugere-se que o cloreto encontra-se essencialmente associado à adição a partir da chuva, e, no caso da nascente Albano Vieira, associados à mistura com fluidos hidrotermais; O enriquecimento em bicarbonato encontra-se, preferencialmente relacionado com a dissolução de silicatos e com a dissolução de CO₂ de origem vulcânica; O sulfato está, em regra, associado à dissolução de sulfuretos, à dissolução sulfatos, à oxidação de HS⁻ e H₂S e, no caso da nascente Albano Vieira, sugere a mistura com um fluido geotérmicos, altamente enriquecido neste elemento; Os fluoretos estão relacionados com a lixiviação de silicatos e com processos vulcânicos que promovem a libertação de fluoretos para o meio ambiente; No caso do nitrato, este sugere que tem a sua origem associada à poluição agrícola.

O aumento da temperatura promove a dissolução dos minerais constituintes das rochas encaixantes onde a água circula, promovendo concomitantemente um aumento de mineralização da água e aumento da condutividade.

O enriquecimento em sílica aquando do aumento da temperatura pode ser justificado pela circulação da água se fazer essencialmente em materiais geoquimicamente mais ácidos, ricos em sílica.

Elevado grau de correlação entre o bicarbonato e o sódio sugere a dissolução de silicatos (plagioclase) e, no caso da nascente Albano Vieira (ref²¹), associado à mistura com fluídos hidrotermais.

Em suma, os principais processos hidrogeoquímicos modificadores da composição das águas subterrâneas são a interação água-rocha (em particular a dissolução de silicatos), a absorção de voláteis vulcânicos, a mistura com fluidos hidrotermais e o aquecimento por vapor.

A avaliação do estado de equilíbrio das águas da área de estudo foi realizada relativamente à sílica (calcedónia, quartzo e sílica amorfa), aos principais minerais carbonatados (calcite e dolomite) recorrendo ao programa Phreeq C no cálculo do Log SI. Desta avaliação concluiu-se que todas as amostras analisadas apresentam-se subsaturada em calcite, dolomite e sílica. A dissolução de minerais carbonatados e silicatos será assim um processo preferencial para repor o equilíbrio nas águas analisadas. No que respeita à calcedónia existem duas águas sobressaturadas nesta fase mineral, no entanto, estão próximas do equilíbrio com a calcedónia (Caldeira

Velha Nascente (ref^a5) e Caracol 2 (CMRG13; ref^a27)); as amostras Cachaços (ref^a22), Fajã das Traves (ref^a23) e as nascentes pertencentes ao grupo do Caracol (ref^a26, 29 a 32 e 44 a 47) encontram-se subsaturadas em calcedónia, sendo o processo de dissolução prioritário para restabelecer o equilíbrio entre estas águas e a fase mineral analisada. Todas as restantes amostras apresentam-se sobressaturadas em calcedónia, sendo o processo de precipitação essencial para conduzir ao equilíbrio entre estas águas e a calcedónia. No que respeita ao quartzo, todas as amostras analisadas apresentam-se sobressaturadas nesta fase mineral, sendo o processo de precipitação preferencial para restabelecer o equilíbrio nestas águas.

A caracterização hidrogeoquímica das águas superficiais do flanco norte do vulcão do Fogo, no que diz respeito aos parâmetros físico-químicos mostra que, relativamente à temperatura observa-se o valor máximo de 23,3°C na Ribeira Pós-Pocinha (ref^a14) e mínimo de 10,7°C no ponto Central Geotérmica da Ribeira Grande (ref^a52), ambos na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. A condutividade elétrica apresenta como valor máximo 875 µS/cm na amostragem de março/abril de 2012 e com valor mínimo 82 µS/cm, na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012, no ponto Central Geotérmica da Ribeira Grande (ref^a52). O pH regista um valor máximo de 8,4 no ponto RG3 – Ribeira Grande Foz (ref^a58) e um mínimo de 5,4 no ponto Ribeira Pós-Pocinha (ref^a14), ambos na amostragem de março/abril de 2012. Os valores da alcalinidade variam entre 6,0 mg/L, no ponto Mato do Jorge (ref^a53), na amostragem de março/abril de 2012 e 209,0 mg/L no ponto Ribeira Pós-Pocinha (ref^a14) na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012.

Nas águas superficiais estudadas predominam fácies hidrogeoquímicas bicarbonatadas sódicas a cloretadas sódicas, sendo que a amostra de ref^a14 apresenta uma composição mais rica em sulfatos, sendo projetada no campo da fácies sulfatada sódica.

O catião sódio é o mais abundante nas águas superficiais analisadas, apresentando uma concentração máxima de 163,22 mg/L, na amostragem de março/abril de 2012, no ponto Ribeira do Teixeira (ref^a55) e um mínimo de 13,7 mg/L no do ponto Central Geotérmica da Ribeira Grande (ref^a52), na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. Segue-se o catião potássio com um valor máximo de 26,0 mg/L Ribeira do Teixeira (ref^a55) e um mínimo de 2,2 mg/L, ambos na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. O catião cálcio apresenta uma concentração máxima de 15,5 mg/L no ponto Mato do Jorge (ref^a53), na amostragem de março/abril de 2012 e um mínimo de 0,9 mg/L no ponto Central Geotérmica da Ribeira Grande (ref^a52), na amostragem de

janeiro/fevereiro de 2012. O catião magnésio apresenta um valor máximo de 6,2 mg/L no ponto Areeiro (ref^a56), na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012, e um mínimo de 0,7 mg/L no ponto Central Geotérmica da Ribeira Grande (ref^a52), na amostragem de março/abril de 2012.

Os aniões mais abundantes, nas águas superficiais analisadas, são o bicarbonato, o cloreto e o sulfato. O anião bicarbonato apresenta um valor máximo de 255,0 mg/L no ponto Mato do Jorge (ref^a53), na amostragem de março/abril de 2012 e um mínimo de 7,3 mg/L no ponto Ribeira Pós-Pocinha (ref^a14), na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012. O anião cloreto apresenta uma concentração máxima de 180,7 mg/L, no ponto RTX – Ribeira do Teixeira (ref^a55), na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 e um mínimo de 14,3 mg/L no ponto RG0 – Ribeira do Rosário (ref^a51), na amostragem de março/abril de 2012. O anião sulfato apresenta uma concentração máxima de 46,4 mg/L, no ponto Ribeira Pós-Pocinha (ref^a14) e um mínimo de 3,1 mg/L no ponto Central Geotérmica da Ribeira Grande (ref^a52), ambos na amostragem de março/abril de 2012.

Os catiões e os aniões apresentam, de modo geral, a mesma tendência da condutividade elétrica, aumentando a sua concentração nas águas superficiais com a aproximação à foz da bacia hidrográfica da Ribeira Grande.

O ponto de água superficial de ref^a55 (Ribeira do Teixeira) apresenta um comportamento diverso relativamente à tendência de enriquecimento dos catiões sódio e potássio de montante a jusante, o que se traduz por um aumento substancial das respetivas concentrações. Tal sugere que a montante deste ponto de água superficial poderá existir uma fonte externa de sódio e potássio, como por exemplo a descarga a partir de um ponto de água subterrâneo com concentrações elevadas nestes elementos.

O ponto de água superficial de ref^a53 (Mato Jorge) apresenta um comportamento diferente do padrão observado para as restantes amostras. O enriquecimento em cálcio, magnésio, bicarbonato e fluoreto é, neste caso, bastante superior ao observado nos restantes pontos, o que sugere a ocorrência de mistura com água subterrânea com concentrações elevadas nestes elementos.

No ponto Ribeira do Teixeira (ref^a55) observa-se um valor de cloreto muito superior aos restantes pontos de água, tal facto sugere a existência de mistura entre a água superficial e um fluido com excesso de cloreto a montante do ponto referido.

A existência de dois pontos de água superficial com elevados valores de sulfato, nomeadamente, Ribeira Pós-Pocinha (ref^a14) e Ribeira do Teixeira (ref^a55), poderá ser justificada pela mistura com um fluido enriquecido em sulfato, a montante destes locais de recolha de amostras. Um exemplo corresponde ao caso do ponto de ref^a14, localizado a jusante das Caldeiras da Ribeira Grande onde ocorrem emergências de água subterrânea aquecidas por vapor.

Em virtude do aumento e desenvolvimento das sociedades e do aumento das necessidades de maiores produções, a problemática da contaminação das águas tem vindo a aumentar, contribuindo para tal focos de contaminação pontual (p. ex., lixeira ou explorações pecuárias) e focos de contaminação difusa essencialmente, proveniente das atividades agrícolas e a ausência de drenagem de águas residuais.

A utilização de fertilizantes e pesticidas, provenientes da atividade agrícola, apresenta um impacto francamente negativo sobre a qualidade da água, materializando-se sobre a forma de um aumento da concentração em nitratos nas águas.

Na área estudada, os teores máximos de nitrato registados nas três amostragens, iguais a 7,31 mg/L na ref^a31 (nascente Caracol 6, CMRG 2), em janeiro/fevereiro de 2012, a 15,08 mg/L na amostragem de março/abril de 2012 e a 15,27 mg/L, estes últimos dois valores foram registados na ref^a48 (nascente Caracol 13, CMRG 1). Ambos os casos correspondem a nascentes que se localizam em pastagens. No que respeita aos valores mínimos foram iguais a 0,40 mg/L na amostragem de janeiro/fevereiro de 2012 (nascente Caracol 3, CMRG 8; ref^a28), a 0,27 mg/L em março/abril de 2012 (ponto Mato do Jorge, ref^a53) e 0,17 mg/L em junho de 2012 (nascente Pico Rafael, ref^a35), em pontos de água localizados em espaços florestais e espaços de vegetação natural. Relativamente aos valores médios da concentração de nitrato de cada amostragem, estes foram iguais a 2,09 mg/L em janeiro/fevereiro de 2012, a 2,57 mg/L em março/abril de 2012 e a 2,456 mg/L em junho de 2012.

Considerando os valores médios de nitrato por ponto de água, constata-se que todas as águas analisadas apresentam valores inferiores ao valor máximo recomendável (25 mg NO₃/L) e ao valor máximo admissível (50 mg NO₃/L), definidos na legislação. No entanto, há a realçar a existência de alguns pontos de água com valores de concentração em nitrato mais elevados, localizados na proximidade de pastagens, onde estes valores estarão provavelmente associados à utilização de fertilizantes e resíduos orgânicos.

A área estudada sob o ponto de vista hidrogeológico apresenta uma diversidade de águas subterrâneas e superficiais, cuja composição físico-química é fortemente influenciada por processos originados ao nível do subsolo, como sejam, a interação água-rocha, a dissolução de gases vulcânicos, a mistura com fluidos hidrotermais e o aquecimento por vapor, e, por fatores externos, como a influência do clima, a adição de iões a partir da água da chuva, a dissolução de aerossóis e a contaminação por atividade antropogénica.

9. Bibliografia

AHA-SRAM (2011). Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores RH9, Relatório Técnico, Vol. 2, - Caracterização da Situação de Referência e Diagnóstico – PGRHI São Miguel. Administração Hidrográfica dos Açores – Secretaria Regional do Ambiente e do Mar, 676pp.

Antunes, P. (2008). Estudo hidrogeoquímico e vulcanológico de lagos no Arquipélago dos Açores: Aplicações para a mitigação de riscos naturais. Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Hidrogeologia, Universidade dos Açores. 306pp.

Azevedo, E. (1996). Modelação do Clima Insular à escala local. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo, 247pp.

Azevedo, J.M.M. (1998). Geologia e Hidrogeologia da ilha das Flores (Açores - Portugal), Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, Universidade de Coimbra, 403pp.

Azevedo, E. & Gonçalves, D. (2001). A temperatura do ar e a precipitação na ilha Terceira, Açores, desde 1874. Açoreana – Revista de Estudos Açoreanos, Vol. IX, Fasc. III, pp 319-328.

Berner, E.K. & Berner, R.A. (1987). The global water cycle: geochemistry and environment. Prentice Hall, New Jersey, 397pp.

Brown, E.; Colling, A.; Park, D.; Phillips, J.; Rothery, D. & Wright, J. (2002). Seawater: its composition, properties and behaviour. The Open University, Oxford, 168 pp.

Carmo, R. (2004). Geologia estrutural da Região da Povoação – Nordeste (Ilha de São Miguel, Açores). Dissertação de Mestrado, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 121 pp.

Carmo, R., Ferreira, T., Gaspar, J.L. & Madeira, J. (2009). Stress-fields at S. Miguel island (Azores): first approach. Abstract Volume - International Summer School “Field volcanological laboratory: the Nisyros and the adjoining volcanoes, Greece” – a window on the pre-eruptive magma processes, IAV, s/nº, p. 130, Nisyros, Greece.

- Carvalho, M. R. E. (1999). Hidrogeologia do maciço vulcânico de Água de Pau/Fogo (São Miguel – Açores). Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Hidrogeologia, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, 445 pp
- Carvalho, M.R., Forjaz, V.H. &, Almeida, C. (2006). Chemical composition of deep hydrothermal fluids in the Ribeira Grande geothermal field (São Miguel, Azores). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 156, pp. 116–134.
- Chiodini G, Cioni, R., Frullani, A., Guidi, M., Marini, L., Prati, F. & Raco, B. (1996). Fluid geochemistry of Montserrat Island, West Indies. *Bull Volcanol* 58:380-392.
- Cioni, R., Fanelli, G., Guidi, M., Kinyariro, J.K. & Marini, L. (1992). Lake Bogoria hot springs (Kenya): geochemical features and geothermal implications. *J Volcanol Geotherm Res* 50:231-246
- Cordeiro, S., Coutinho, R. & Cruz, J.V. (2012). Fluoride content in drinking water supply in São Miguel volcanic island (Azores, Portugal). *Science of the Total Environment* 432, pp. 23–36.
- Costa, A. (2006). Atlas Hidrogeológico das Águas Minerais dos Açores. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 146 pp.
- Coutinho, R. (2000). Elementos para a monitorização sismovulcânica da Ilha do Faial (Açores): Caracterização hidrogeológica e avaliação de anomalias de Rn associadas a fenómenos de desgaseificação. Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 342 pp.
- Cruz, J.V. (1992). Hidrogeologia da Ilha de Santa Maria. Dissertação de Mestrado em Geologia Económica e Aplicada. Universidade de Lisboa, 239 pp.
- Cruz, J.V., (1997). Estudo Hidrogeológico da Ilha do Pico (Açores – Portugal). Tese de Doutoramento no ramo da Geologia, especialidade de Hidrogeologia, Universidade dos Açores, 433 pp.
- Cruz, J.V., (2001). Recursos Subterrâneos. Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores. Relatório Técnico-Científico 03/DGUA/01, Centro de Geologia Ambiental, DG/UA, Ponta Delgada, 453pp.

Cruz, J.V. (2004). Ensaio sobre a água subterrânea nos Açores. História, ocorrência e qualidade. Ed. Secretaria Regional do Ambiente, Direção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos, 288pp.

Cruz, J.V. & Coutinho, R. (1998). Breve nota sobre a importância dos recursos hídricos subterrâneos no arquipélago dos Açores. *Açoreana*, 8, pp. 591-594.

Cruz, J.V. & Silva, M.O. (2001). Hydrogeologic Framework of the Pico Island (Azores, Portugal). *Hydrogeology Journal*, 9, pp. 177-189.

Cruz, J.V. & Amaral, C. (2004). Major ion chemistry of groundwaters from perched-water bodies at Azores (Portugal) volcanic archipelago. *Applied Geochemistry*, 19, pp. 445-459.

Cruz, J.V., Pereira, R. & Moreira, A., (2007). Carta de Ocupação do Solo na Região Autónoma dos Açores. Ed. Secretaria Regional do Ambiente e do Mar, Direção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos, 56pp.

Cruz, J.V., Pacheco, D., Coutinho, R., Cymbron, R., Mendes, S., Antunes, P., Fontiela, J. & Freire, P. (2010a). Chemical monitoring of river water bodies in an EU outermost region: examples from the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12, pp. 2216-2225.

Cruz, J.V., Pacheco, D., Cymbron, R. e Mendes, S. (2010b). Monitoring of the groundwater chemical status in the Azores archipelago (Portugal) in the context of the EU Water Framework Directive. *Environmental Earth Sciences*, 61:173-186.

Cruz, J.V., Fontiela, J., Cabral, L., Melo, C., Costa, S., Vilaverde, R. & Coutinho, R. (2011). As águas subterrâneas no contexto do Plano de gestão da Região Hidrográfica 9 – Açores (Portugal). *In*: Lambán, L.J., Carceller, T., Valverde, M. e Fernández-Jáuregui, C. (eds.), *Actas (em CD-ROM), Congreso Ibérico sobre Las Aguas Subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI*, Zaragoza, AIH-GE, 8 pp. (ISBN: 978-84-938046-2-6).

Custodio, E. (1975). Hidrogeología de formaciones volcánicas. *Proceedings 3rd UNESCO-ESA-IHA Symposium on Groundwater*, Palermo, pp. 23-69.

Custodio, E. & Llamas, M.R. (1983) - *Hidrología subterránea*. Ed. Omega, 2 vol.Barcelona. 2359 pp.

DROTRH-INAG (2001). Plano Regional da Água. Relatório técnico. Versão para consulta pública. Direção Regional do Ordenamento de Território e Recursos Hídricos – Instituto da Água, Ponta Delgada, 414 pp.

DROTRH-SRAM (2007). Carta de ocupação do solo da Região Autónoma dos Açores. Direção Regional do Ordenamento de Território e Recursos Hídricos - Secretaria Regional da Ambiente e do Mar, Ponta Delgada, 56 pp.

EUROSTAT (2011). Agriculture and fishery statistics, main results – 2009-2010. Pocketbooks Collection, Publication Office of the European Union, 152 pp.

Evans, W.C., Sorey, M.L., Cook, A.C., Kennedy, B.M., Shuster, D.L., Colvard, E.M., White, L.D. & Huebner, M.A. (2002). Tracing and quantifying magmatic carbon discharge in cold groundwaters: lessons learned from Mammoth Mountain, USA. *J Volcanol Geotherm Res* 114:291-312

Ferreira, J.P.L. (2000). Inventariando, monitorizando e gerindo de forma sustentável recursos hídricos subterrâneos. A situação portuguesa, os desafios da União Europeia e a globalização. Teses e programas de Investigação LNEC, LNEC, Lisboa, 429 pp.

França, Z., Cruz, J.V. Nunes, J.C. & Forjaz, V.H. (2003) - Geologia dos Açores: uma perspectiva actual. *Revista Açoreana*, Vol. 10, nº1, 140 pp.

Freire, P. (2006). Águas Minerais da Ilha de São Miguel (Açores): Caracterização hidrogeológica e implicações para a monitorização vulcanológica. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 173 pp.

Freire P., Andrade, C., Coutinho, R. & Cruz, J.V. (2013). Fluvial geochemistry in São Miguel Island (Azores, Portugal): Source and fluxes of inorganic solutes in an active volcanic environment. *Science of the Total Environment* 454-455, pp. 154-169.

Gaspar, J.L., Queiroz, G., Almeida, M.H., França, Z., & Rodrigues, B. (1990). Aplicação de diagramas de discriminação tectonomagmática a rochas do arquipélago dos Açores. Resumos das comunicações. VIII Semana de Geoquímica. Lisboa, 45 pp.

Gaspar, J.L., G. Queiroz, T. Ferreira, R. Coutinho, M.H. Almeida, N. Wallenstein & J. Pacheco (2000). The volcanic eruption of 1998-2000 on the Serreta Submarine Ridge (W Terceira Island, Azores): eruptive model. Atas da “2ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica”, pp. 355-356.

Gaspar, J.L., Queiroz, G. & Ferreira, T. (2001). Actividade sísmica e vulcânica nos Açores. Açoreana – Revista de Estudos Açoreanos, Vol. IX, Fasc. III, pp. 291-298.

Houzin, V., Vávra, J., Fuksa, J., Pekný, V., Vrba, J. & Stibral, J. (1986). Impact of fertilizers and pesticides on groundwater quality, International Contribution to Hydrogeology, 6, pp 89-132.

INAG-FCUL (1997). Definição, caracterização e cartografia dos sistemas aquíferos de Portugal continental. Relatório Instituto da Água – Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 236 pp.

INAG (2009). INSAAR, Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais, dados de 2008.

Langmuir, D. (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall, New Jersey, 600pp.

Lewicki, J., Fischer, T. & Williams, S. (2000). Chemical and isotopic compositions of fluids at Cumbal Volcano, Colombia: evidence for magmatic contribution. Bull Volcanol 62:347-361

Machado, F. (1966). Anomalias das intensidades do terramoto de S. Miguel (Açores) em 1522. Boletim do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências de Lisboa, 10: pp. 109-117.

Madeira, J. (1998). Estudos de neotectónica nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge: uma contribuição para o conhecimento geodinâmico da junção tripla dos Açores. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade em Geodinâmica Interna. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 428pp.

Madeira, J. & Brum da Silveira, A. (2003). Active tectonics and first paleoseismological results in Faial, Pico and S. Jorge islands (Azores, Portugal). Annals of Geophysics, 46(5), pp. 733-761.

Needham, H. & Francheteau, J. (1974). Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36° 48' north. Earth and Planet. Sci. Lett. 22: 29-43.

Nordstrom DK, McCleskey RB, Ball JW, 2009. Sulfur geochemistry of hydrothermal waters in Yellowstone National Park: IV Acid-sulfate waters. App Geochem 24:191-207

Pacheco, J.M., T. Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Coutinho, R., Cruz, J.V., Pimentel, A., Silva, R., Gaspar, J.L., & Goulart, C. (2011). Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores (in press).

Parkhurst D.L. & Appelo C.A.J. (1999). User's guide to Phreeq C (vs 2) — a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report, 99–4259. Denver: USGS.

Queiroz, G. (1997). Vulcão das Sete Cidades (São Miguel, Açores): história eruptiva e avaliação do hazard. Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 226 pp.

Silva, M.O. (1984). Hidrogeologia do Algarve Oriental. Dissertação de Doutoramento em Geologia, FCUL, Lisboa, 377pp.

Silva, M. (2005) - Caracterização da sismicidade histórica dos Açores com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: contribuição para a avaliação do risco sísmico nas ilhas do Grupo Central. Dissertação de mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 146 pp.

Silveira, D. (2002). Caracterização da sismicidade histórica da ilha de São Miguel com base na reinterpretação de dados de macrossísmica: Contribuição para a avaliação do risco sísmico. Dissertação de mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 149 pp.

SIVISA (2006). Carta de sismicidade dos Açores, no período de 1980 a 2006. Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores.

Varekamp JC, Ouimette AP, Herman SW, Flynn KS, Bermudez A, Delpino D, 2009. Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina. *App Geochem* 24: pp.208-220

Wallenstein, N. (1999). Estudo da História recente e do comportamento eruptiva do vulcão do Fogo (São Miguel, Açores). Avaliação Preliminar do Hazard. Dissertação de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 266 pp.

Zbyszewski, G., Almeida, F.M., Ferreira, O.V. & Assunção, C.T. (1958). Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000; notícia explicativa da folha “B” da ilha de São Miguel (Açores). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 37 pp.

Zbyszewski, G., Ferreira, O.V. & Assunção, C.T. (1959). Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000; notícia explicativa da folha "A" da Ilha de São Miguel (Açores). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 22 pp.

ANEXOS

ANEXO I - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA

Refª	Designação	WGS84 Fuso 26S		Altitude
		M	P	(m)
1	Ribeira Pré C.R.G.	633237	4184384	n.d.
2	Caldeira Pequena C.R.G.	633196	4184453	263
3	Caldeira Grande C.R.G.	633217	4184443	264
4	Fumarola C.R.G.	633221	4184457	266
5	Caldeira Velha Nascente	632123	4182686	392
6	Caldeira Velha Fumarola	632044	4182686	381
7	Ladeira da Velha	635760	4187300	19
8	Ladeira da Velha Férrea	635789	4187294	19
9	Lombadas	635570	4182102	575
10	Lombadas Doce	635599	4182052	576
11	Lombadas Furo II	635431	4182137	606
12	Magarça	632181	4184467	190
13	Pocinha	632957	4184608	241
14	Ribeira Pós-Pocinha	632936	4184673	n.d.
15	Fajã do Boi I	632123	4180184	783
16	Fajão do Boi II	632122	4180188	783
17	Fajã do Boi III	632148	4180203	786
18	Fajã do Boi IV	632153	4180204	786
19	Bandeirinha	632769	4182588	454
20	Chá Canto	632368	4183095	349
21	Albano Vieira	632704	4183278	363
22	Cachaços	634074	4182402	614
23	Fajã das Traves	631873	4181650	503
24	Cabelos Brancos	631695	4182422	382
25	Mato Miguel	631761	4181839	452
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	630577	4181624	440
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	631009	4181674	432
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	630953	4181694	428
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	630821	4181691	423
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	630595	4181859	350
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	630535	4181949	326
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	630613	4181737	398
33	Pachãs	634115	4183880	392
34	Monte Gordo (Gramas)	634714	4184612	373
35	Pico Rafael	637970	4185506	302
36	Laranjinha	637021	4186050	220
37	Mata Alta (Monte Escuro)	637811	4184378	632
38	Porto Formoso II (Praia)	637232	4187284	20
39	Porto Formoso III (Conteira)	636867	4187001	52

Refª	Designação	WGS84 Fuso 26S		Altitude (m)
		M	P	
40	Porto Formoso IV (Telha)	636867	4187007	51
41	Porto Formoso V (Bica)	636868	4186990	53
42	Gramas	633764	4185782	163
43	Caracol 8 (C.M.R.G. 18)	630789	4181653	436
44	Caracol 9 (C.M.R.G. 12)	631026	4181653	438
45	Caracol 10 (C.M.R.G. 11)	630982	4181618	449
46	Caracol 11 (C.M.R.G. 14)	631065	4181588	453
47	Caracol 12 (C.M.R.G. 5)	630583	4181852	355
48	Caracol 13 (C.M.R.G. 1)	630511	4182005	312
49	RG1 - Ribeira Grande - Lombadas	635682	4182023	n.d. ⁱ
50	Ribeira Pré RG0	636065	4182252	n.d.
51	RG0 - Ribeira do Rosário	635791	4182187	n.d.
52	Central Geotérmica da Ribeira Grande	632796	4182217	n.d.
53	Mato do Jorge	633747	4183568	n.d.
54	RG2 - Salto do Cabrito	632446	4184241	n.d.
55	RTX - Ribeira do Teixeira ou Pernada	631961	4184114	n.d.
56	Areeiro	631949	4185154	n.d.
57	Escola Secundária da Ribeira Grande	630399	4186428	n.d.
58	RG3 - Ribeira Grande Foz	629993	4187290	n.d.

ⁱ n.d. – não determinado

ANEXO II - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Águas Subterrâneas amostradas em janeiro/fevereiro de 2012																	
Ref ^a	Temp ^a (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO ₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	TDS Calculados (mg/L)	Dureza Total Calculada (mg CaCO ₃ /L)
2	45,8	2,76	729	229,0	n.a.	n.a.	13,79	2,59	24,13	14,13	167,96	n.a.	48,89	n.a.	207,23	707,7	45,1
3	35,9	3,50	223	369,4	n.a.	n.a.	4,80	2,07	20,59	4,97	69,24	n.a.	21,18	0,92	50,40	543,6	20,5
4	59,2	1,77	4490	1171,0	n.a.	n.a.	29,22	3,08	40,52	28,24	322,84	n.a.	87,03	n.a.	765,18	2447,1	85,6
5	31,2	4,73	160	341,0	24,0	29,28	5,12	2,63	15,38	2,84	45,42	n.a.	17,06	n.a.	21,09	451,5	23,6
6	82,3	3,91	237	151,6	2,0	2,44	5,38	2,35	13,86	14,13	140,23	1,98	11,59	n.a.	58,30	399,4	23,1
7	29,9	5,53	295	294,5	131,0	159,82	13,18	3,93	42,53	12,60	111,29	0,99	20,56	0,45	5,70	531,6	49,1
8	33,5	5,61	446	256,5	162,5	198,25	15,28	5,06	56,84	12,68	120,59	1,58	45,96	n.a.	7,32	552,6	58,9
9	18,6	4,97	383	668,3	175,0	213,50	9,66	4,26	60,77	22,31	81,54	0,66	16,33	1,00	5,86	892,0	41,6
10	12,8	6,54	108	9,6	38,0	46,36	1,49	0,34	18,05	5,58	54,97	0,60	15,72	0,49	2,55	110,9	5,1
11	19,2	5,41	487	835,9	221,0	269,62	14,23	4,20	75,52	36,13	97,23	1,25	16,19	0,44	3,40	1114,0	52,8
12	18,4	4,74	358	599,8	28,5	34,77	9,28	3,75	40,56	10,72	69,03	0,50	71,78	6,98	8,74	855,9	38,6
13	26,8	4,65	231	431,3	29,0	61,00	5,93	1,84	21,37	12,28	89,95	n.a.	24,40	2,27	48,98	638,3	22,4
15	12,4	6,69	81	5,6	18,0	21,96	1,69	0,71	11,79	3,97	21,58	0,21	13,11	0,50	2,36	64,3	7,1
16	12,3	6,87	84	3,7	20,0	24,40	2,46	0,77	11,60	4,15	25,79	0,18	12,86	0,77	1,99	68,6	9,3
17	12,3	6,55	84	3,8	19,0	23,18	1,80	0,83	11,63	4,83	26,69	0,19	15,41	0,84	2,13	71,6	7,9
18	12,7	6,30	86	4,1	20,5	25,01	1,73	0,82	11,90	1,82	24,95	0,20	12,38	1,27	2,17	64,6	7,7
19	13,5	6,98	141	5,5	25,5	31,11	3,62	1,78	19,91	2,61	25,72	0,41	21,54	1,54	4,60	94,2	16,4
20	14,2	6,12	105	7,8	21,0	25,62	2,16	0,99	13,71	3,70	23,88	0,29	15,72	1,31	3,09	76,4	9,5
21	24,3	6,15	1618	59,2	306,5	373,93	15,19	5,18	270,69	52,65	81,65	2,72	273,99	1,76	48,64	816,8	59,2
22	13,1	6,42	95	6,0	20,0	24,40	2,89	1,30	13,00	3,63	16,59	0,12	17,48	n.a.	2,35	69,4	12,6
23	13,0	6,20	81	5,8	16,5	20,13	1,09	0,62	11,84	2,86	15,14	0,21	13,97	0,62	2,30	56,2	5,3
24	14,2	6,03	187	16,3	39,0	47,58	6,03	2,95	22,02	4,97	41,61	0,15	25,26	2,18	2,23	138,6	27,2
25	12,9	6,38	111	9,0	26,0	31,72	2,75	1,15	14,28	3,65	33,36	0,28	16,23	0,95	2,49	89,5	11,6
26	13,9	6,71	105	4,1	14,5	17,69	2,06	1,45	12,35	3,22	10,41	n.a.	20,07	1,33	3,90	63,1	11,1
27	13,3	6,48	105	4,9	19,0	23,18	2,24	1,23	13,02	3,55	20,07	0,28	17,46	0,72	2,15	70,7	10,6
28	13,6	5,88	106	6,0	23,0	28,06	2,97	1,46	12,64	3,37	21,29	0,13	15,95	0,40	2,05	73,0	13,4
29	13,6	6,42	107	4,2	22,0	26,84	2,72	1,41	12,68	3,07	20,05	0,12	16,62	1,46	2,85	71,0	12,6
30	13,9	6,99	125	5,6	22,0	26,84	3,51	1,87	14,54	3,85	19,57	0,05	21,03	1,47	3,08	82,5	16,4
31	14,3	6,27	154	5,0	11,5	14,03	3,55	2,09	17,87	2,89	14,74	0,12	30,13	7,31	4,40	102,1	17,5
32	14,1	6,73	102	4,7	18,5	22,57	1,96	1,31	13,27	2,71	10,32	0,16	16,86	2,23	4,57	61,4	10,3
33	17,3	6,58	146	13,5	34,5	42,09	4,05	1,46	18,38	7,70	51,41	0,38	21,01	2,01	2,61	130,5	16,1
34	17,3	5,45	163	149,9	41,5	50,63	4,78	1,72	20,58	5,55	47,31	0,45	22,11	0,95	4,39	266,4	19,0
35	13,7	6,86	98	5,4	19,0	23,18	2,11	1,16	11,78	3,52	21,40	0,20	15,59	n.a.	2,32	68,1	10,0
36	13,5	6,71	97	5,0	18,0	21,96	2,08	0,99	11,47	3,49	24,13	0,27	13,79	0,98	2,88	68,8	9,3
37	12,6	6,58	94	5,4	22,0	26,84	2,45	1,31	10,93	4,12	27,60	0,26	11,89	0,70	2,29	72,4	11,5
38	18,0	4,72	176	372,1	26,0	31,72	3,91	1,72	21,46	4,36	61,89	0,64	21,71	6,26	5,12	500,1	9,8
39	14,6	4,99	144	144,3	21,5	26,23	2,55	1,65	17,87	3,01	44,05	0,30	18,40	6,63	4,40	242,6	6,4
40	18,1	4,84	174	389,0	25,0	30,50	3,28	1,69	22,19	4,25	57,35	0,47	21,59	6,39	4,80	511,2	8,2
41	17,6	5,04	172	306,7	29,0	35,38	3,91	1,77	22,11	4,12	59,98	0,52	21,32	6,22	4,79	432,5	9,8

Águas Subterrâneas amostradas em março/abril de 2012																	
Refª	Tempª (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO ₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	TDS Calculados (mg/L)	Dureza Total Calculada (mg CaCO ₃ /L)
2	44,6	2,87	693	296,7	n.a.	n.a.	11,94	2,08	24,74	14,58	145,84	1,52	47,50	n.a.	162,93	707,8	38,3
3	37,5	3,53	271	235,0	n.a.	n.a.	3,98	1,76	22,05	7,12	69,58	n.a.	29,35	n.a.	58,31	427,2	17,2
4	58,5	2,04	2730	669,3	n.a.	n.a.	29,38	3,01	41,39	24,94	262,79	13,90	72,74	n.a.	840,27	1957,7	85,7
5	31,9	4,73	168	404,9	17,5	21,35	4,49	2,28	15,64	5,30	44,20	0,12	15,80	n.a.	24,74	517,5	20,6
6	74,1	2,34	1794	546,4	n.a.	n.a.	7,18	1,54	16,20	14,37	186,91	n.a.	34,21	n.a.	646,30	1453,1	24,2
7	25,9	5,44	293	302,6	139,0	169,58	12,58	3,56	42,14	12,52	106,07	1,33	16,90	0,61	4,89	527,8	46,0
8	33,0	5,50	433	237,5	140,0	170,80	12,80	3,34	76,80	16,37	110,49	1,04	43,91	n.a.	7,58	484,7	45,7
9	18,3	5,27	389	605,0	161,0	196,42	8,99	2,63	76,53	27,07	91,26	0,65	13,11	0,67	2,31	846,7	33,2
10	12,9	7,12	142	12,0	32,0	39,04	1,16	0,28	20,67	11,49	53,95	0,67	18,46	n.a.	2,28	122,0	4,0
11	19,1	5,44	489	421,7	223,0	272,06	11,88	3,58	86,33	40,45	93,55	0,94	14,44	1,18	2,79	701,7	44,4
12	18,4	4,90	357	619,4	31,0	37,82	8,20	2,99	48,50	11,16	67,37	0,25	66,62	6,52	7,77	853,6	32,8
13	26,8	4,68	229	291,0	33,5	40,87	4,92	1,26	24,14	14,56	85,99	n.a.	22,90	1,23	39,17	485,2	17,5
15	12,6	6,91	85	4,1	19,5	23,79	1,45	0,28	13,73	7,53	38,28	0,18	13,84	0,66	1,82	83,6	4,8
16	12,7	7,09	82	6,0	19,0	23,18	1,34	0,70	14,15	4,54	35,99	0,22	11,70	0,93	1,96	80,0	6,2
17	13,0	6,98	88	6,7	24,0	29,28	1,63	0,72	12,79	4,47	39,52	0,15	11,39	1,19	1,72	83,4	7,0
18	13,0	6,01	87	5,3	21,5	26,23	1,65	0,94	12,65	4,67	36,43	0,20	11,36	1,26	2,83	80,3	8,0
19	13,6	7,27	140	4,9	25,5	31,11	2,74	1,60	19,73	6,07	32,50	0,41	19,79	1,41	4,16	139,4	13,4
20	14,2	6,53	101	8,7	23,5	28,67	2,04	1,07	16,10	3,74	33,00	0,35	14,29	1,49	2,72	87,5	9,5
21	21,9	5,72	1222	54,6	242,0	295,24	8,85	5,00	273,50	40,23	75,48	0,40	189,91	1,36	40,71	483,2	42,6
22	13,0	7,30	97	10,9	21,5	26,23	2,41	1,14	16,52	4,58	29,85	0,20	16,40	n.a.	2,02	89,2	10,7
23	13,1	6,17	79	6,2	18,0	21,96	0,90	0,53	13,48	2,97	30,56	0,17	12,26	0,83	1,80	71,2	4,4
24	14,2	6,05	185	16,5	46,0	56,12	4,99	2,45	26,51	7,51	51,38	0,25	23,84	2,18	1,92	149,8	22,5
25	12,9	6,48	110	14,9	27,5	33,55	2,32	0,84	17,77	5,08	42,41	0,34	14,76	0,87	2,26	105,7	9,2
26	14,1	5,99	104	8,4	44,0	53,68	1,64	1,35	15,55	2,34	17,58	0,23	17,16	1,49	3,61	72,9	9,6
27	13,5	6,30	106	7,2	22,5	27,45	1,85	1,13	16,00	3,77	31,06	0,18	16,35	0,83	1,99	84,7	9,3
28	13,7	6,14	107	8,7	26,5	32,33	2,31	1,28	15,51	3,71	32,10	0,22	15,28	0,63	2,72	87,4	11,0
29	13,9	6,91	109	7,8	22,0	26,84	2,01	1,36	15,65	3,46	22,80	0,24	16,54	1,96	3,39	79,5	10,6
30	12,6	5,69	121	6,8	35,0	42,70	2,98	1,79	16,09	3,48	28,49	0,18	19,28	1,68	2,83	90,7	16,3
31	14,4	6,00	152	5,4	14,0	17,08	2,86	2,23	20,40	2,72	27,01	n.a.	28,25	7,86	3,99	108,0	16,3
32	14,0	6,15	102	4,1	19,0	23,18	1,57	1,13	14,45	2,65	20,38	0,31	21,44	2,13	2,25	74,1	8,6
33	17,0	6,23	145	13,2	36,5	44,53	3,27	1,18	22,10	8,71	47,86	0,51	17,58	2,65	2,34	125,7	13,0
35	14,0	6,84	103	6,1	23,0	28,06	1,69	1,14	15,12	4,96	29,12	0,26	16,35	0,80	2,29	52,6	8,9
36	14,8	6,96	104	5,0	19,0	23,18	1,67	0,80	13,91	5,34	35,67	0,33	14,84	1,94	2,54	49,3	7,5
37	12,7	6,64	94	5,1	25,0	30,50	2,01	1,06	12,72	4,30	31,27	0,29	11,51	1,25	2,02	44,6	9,4
38	17,9	5,46	172	179,8	38,0	46,36	4,22	1,63	23,59	6,56	56,16	0,33	20,51	5,85	4,57	310,5	17,2
39	16,4	5,13	148	277,9	21,5	26,23	2,99	1,67	19,50	5,98	36,66	0,22	20,13	6,34	4,58	381,7	14,3
40	18,3	4,98	173	390,6	34,0	41,48	4,17	1,48	22,56	6,46	57,91	0,27	20,50	6,29	4,74	521,9	16,5
41	18,1	5,00	172	401,0	33,5	40,87	4,14	1,53	23,09	7,34	58,99	0,29	20,76	6,24	4,75	535,1	16,6
42	20,1	4,72	221	501,8	32,0	39,04	5,42	2,31	28,84	9,24	55,53	0,33	28,82	10,36	5,39	658,5	23,0

Águas Subterrâneas amostradas em março/abril de 2012																	
Ref ^a	Temp ^a (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO ₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	TDS Calculados (mg/L)	Dureza Total Calculada (mg CaCO ₃ /L)
43	13,4	6,28	136	5,4	25,5	31,11	2,86	1,25	18,28	5,23	29,25	0,14	15,57	2,29	4,79	89,4	12,3
44	13,7	6,99	98	4,9	19,5	23,79	2,14	1,33	13,21	3,39	20,15	0,19	14,90	0,54	1,97	68,0	10,8
45	13,8	6,08	99	10,2	33,5	40,87	2,04	1,29	13,34	3,31	27,40	0,16	14,30	n.a.	1,88	79,0	10,4
46	13,7	5,82	103	7,6	24,5	29,89	2,43	1,35	12,37	3,65	22,93	0,16	15,53	0,62	1,94	74,3	11,6
47	13,0	6,21	117	5,4	26,0	31,72	2,85	1,58	14,38	3,51	15,64	0,21	18,55	1,80	2,75	73,1	13,6
48	15,4	5,96	135	10,6	16,5	20,13	2,73	1,57	17,83	4,07	30,72	0,15	18,11	15,08	4,20	110,4	13,3

Águas Subterrâneas amostradas em junho de 2012																	
Refª	Tempª (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO ₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	TDS Calculados (mg/L)	Dureza Total Calculada (mg CaCO ₃ /L)
2	47,4	3,00	658	212,5	n.a.	n.a.	13,96	1,53	24,95	30,29	155,35	n.a.	33,58	n.a.	139,87	612,0	41,1
3	39,2	3,59	282	189,6	n.a.	n.a.	3,94	1,82	21,54	9,66	64,29	n.a.	24,68	n.a.	53,93	369,5	17,3
4	60,8	1,97	4960	1395,0	n.a.	n.a.	32,13	1,77	58,96	26,20	341,88	n.a.	66,15	n.a.	1630,93	3553	87,4
5	32,0	4,79	162	319,8	19,5	23,79	4,50	2,64	15,79	4,36	39,68	0,02	15,98	n.a.	24,35	427,1	22,1
6	71,2	1,85	6340	1526,4	n.a.	n.a.	19,21	2,11	32,96	41,43	348,48	1,03	25,30	0,33	2559,29	4556,5	56,6
7	29,1	5,48	292	627,0	122,0	148,84	11,92	3,89	40,32	8,94	111,38	0,88	15,99	n.a.	4,73	849,5	45,7
8	33,3	5,40	449	618,5	145,5	177,51	14,89	5,05	67,45	11,99	121,35	0,91	40,75	0,27	7,04	918,6	57,9
9	18,6	5,25	392	821,0	165,5	201,91	14,43	4,31	74,53	24,29	88,96	0,51	15,08	0,39	2,28	1076,6	53,7
10	13,9	6,57	109	17,3	25,5	31,11	1,19	0,40	21,84	7,62	50,85	0,50	13,14	0,29	2,23	116,7	4,6
11	19,3	5,35	492	968,8	232,5	283,65	17,09	4,47	108,30	38,03	102,17	0,73	13,41	0,26	2,89	1291,0	61,0
12	18,7	4,84	354	299,0	37,5	45,75	8,50	3,94	46,67	12,74	69,92	0,03	65,20	6,89	7,91	538,3	37,4
13	27,8	4,95	229	567,4	26,5	32,33	4,88	1,69	25,51	11,26	93,33	0,06	19,45	0,44	34,59	758,6	19,1
15	14,2	6,69	87	2,5	17,5	21,35	1,55	0,75	15,53	4,51	36,17	0,03	10,94	0,80	1,91	77,7	7,0
16	14,3	6,89	83	2,9	20,5	25,01	1,36	0,68	14,12	3,95	34,98	0,14	10,90	n.a.	1,64	73,4	6,2
17	13,9	6,64	88	4,0	20,5	25,01	1,66	0,81	15,46	4,36	40,09	0,11	10,74	0,93	1,69	83,3	7,5
18	12,8	6,81	87	4,8	19,5	23,75	1,75	1,01	13,54	7,92	35,35	0,08	10,86	1,01	2,08	82,2	8,5
19	13,8	6,48	137	5,9	30,5	37,21	2,95	1,91	20,50	4,03	35,01	0,15	18,66	1,19	3,80	100,9	15,2
20	14,4	5,93	107	8,8	24,0	29,28	2,14	1,25	17,60	4,17	34,11	0,26	14,12	1,03	2,71	90,8	10,5
21	20,9	6,06	495	44,7	162,4	198,25	16,96	4,37	105,46	24,62	51,69	1,55	45,48	0,24	19,65	338,6	60,3
22	13,2	6,72	94	9,6	18,0	21,96	4,01	1,21	14,84	3,77	26,46	0,22	14,49	n.a.	1,85	84,3	15,0
23	13,2	5,60	82	4,7	20,0	24,40	1,07	0,72	13,82	3,11	28,88	0,10	12,37	0,50	1,86	69,3	5,6
24	14,5	6,55	184	10,2	42,5	51,85	5,52	3,19	25,71	6,65	47,90	0,04	22,79	1,33	1,93	140,2	26,9
25	13,5	5,99	111	7,8	27,0	32,94	2,49	1,23	17,24	2,94	41,78	0,22	13,63	0,89	2,29	95,8	11,3
26	14,3	6,81	102	6,1	36,0	43,92	2,07	1,68	16,42	7,21	14,81	0,01	18,34	1,25	2,78	76,2	12,1
27	14,4	6,31	109	6,4	23,0	28,06	2,34	1,69	16,27	3,83	28,82	0,06	16,08	0,54	1,75	84,4	12,8
28	14,4	6,40	107	6,9	24,5	29,89	2,75	1,81	16,10	3,81	29,18	0,05	14,66	n.a.	1,54	84,4	14,3
29	14,2	6,35	112	6,1	19,0	23,18	2,37	2,00	16,67	4,23	28,00	0,00	17,25	1,75	3,28	88,1	14,1
30	14,1	6,14	123	6,9	24,0	29,28	3,20	2,51	16,63	3,47	25,88	0,02	18,49	1,40	2,84	90,6	18,3
31	14,9	6,09	153	9,6	20,5	25,01	3,10	2,93	20,15	2,77	23,85	0,00	26,35	8,16	4,23	110,4	19,8
32	14,1	6,21	102	4,0	19,5	23,79	1,75	1,74	14,47	2,62	20,57	0,09	14,53	2,13	4,38	70,5	11,5
33	17,2	6,12	145	8,0	38,5	46,97	3,65	1,95	20,42	4,34	57,11	0,20	16,76	1,67	2,27	125,2	17,1
34	19,0	5,36	164	167,2	36,5	44,53	4,57	2,25	23,12	4,35	59,59	n.a.	19,34	0,49	29,97	310,9	20,7
35	14,4	6,81	99	5,4	21,5	26,23	2,13	1,70	13,45	3,03	32,80	0,04	15,02	0,17	2,07	81,9	12,3
36	14,0	6,66	100	6,8	21,5	26,23	2,21	1,29	15,66	4,32	35,53	0,10	13,47	1,86	2,51	88,7	10,8
37	13,5	6,36	94	6,3	28,0	34,16	2,54	1,35	15,33	3,97	34,72	0,19	10,94	0,79	2,25	84,1	11,9
38	19,2	4,74	176	565,6	24,0	29,28	4,87	2,12	24,60	5,04	64,71	0,04	19,32	5,81	4,60	706,4	20,9
39	18,0	4,84	147	379,8	8,0	9,76	3,44	1,93	23,01	4,45	42,22	0,03	17,85	5,58	3,86	491,9	16,5
40	19,0	4,67	174	515,0	23,5	28,67	4,73	1,99	23,30	5,53	63,77	0,06	19,05	5,45	4,12	652,4	20,0
41	19,2	4,94	172	490,0	22,5	27,45	4,84	2,01	22,88	7,65	62,47	0,14	18,97	5,46	4,56	628,3	20,3

Águas Subterrâneas amostradas em junho de 2012																	
Ref^a	Temp^a (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	HCO₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO₃ (mg/L)	SO₄ (mg/L)	TDS Calculados (mg/L)	Dureza Total Calculada (mg CaCO₃/L)
42	20,3	5,10	223	308,2	36,0	43,92	6,18	2,85	30,72	6,73	65,20	0,17	28,69	11,03	6,04	478,3	27,1
43	14,0	6,14	135	9,9	21,5	26,23	3,24	1,74	21,01	3,23	33,28	0,11	20,37	1,93	1,82	104,6	15,2
44	14,5	6,37	97	6,1	19,5	23,79	2,43	1,70	14,44	3,39	26,16	0,00	13,68	0,47	1,55	76,8	13,1
45	14,4	6,05	98	13,5	24,5	29,89	2,35	1,50	15,87	3,31	24,01	0,26	14,44	0,23	2,00	83,4	12,0
46	14,5	6,39	103	9,9	23,5	28,67	2,64	1,68	14,52	3,52	27,95	0,02	14,56	n.a.	1,86	83,6	13,5
48	15,4	6,26	133	12,0	20,0	24,40	3,02	2,11	19,20	0,51	35,52	n.a.	18,71	15,27	3,66	117,4	16,2

Águas Superficiais amostradas em janeiro/fevereiro de 2012															
Ref ^a	Temp ^a (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO ₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
1	15,6	5,98	235	44,1	59,0	71,98	9,95	4,87	24,84	14,50	46,97	0,38	21,46	4,18	5,36
14	23,3	5,93	212	7,1	6,0	7,32	7,45	2,07	21,92	8,00	76,98	0,62	23,28	n.a.	41,18
49	15,4	6,10	278	48,6	110,5	134,80	7,79	2,64	43,44	12,76	89,28	0,49	17,27	n.a.	5,63
50	12,4	5,89	116	57,4	39,0	47,60	2,08	1,17	16,71	4,48	50,30	0,24	15,10	1,28	3,19
51	12,1	6,38	130	26,9	45,5	55,50	2,59	1,01	19,73	4,06	52,12	0,33	15,18	0,77	3,57
52	10,7	6,38	82	3,8	15,5	18,90	0,87	0,72	13,66	2,22	33,82	0,11	15,13	0,63	4,28
53	15,4	7,57	385	6,1	163,0	198,90	10,54	6,03	59,52	10,56	79,93	1,11	19,50	0,45	7,85
54	15,4	6,86	326	6,9	125,0	152,50	9,90	4,99	41,01	6,10	73,59	0,77	21,06	3,10	9,05
55	16,4	7,20	847	6,1	143,0	174,50	9,16	5,18	133,58	26,04	69,17	1,10	180,74	1,91	32,06
56	14,9	6,67	389	6,2	164,5	200,70	12,08	6,16	59,76	12,80	79,28	1,16	21,94	2,12	8,42
57	14,7	7,40	478	3,0	172,0	209,80	12,60	6,13	81,08	15,86	78,15	1,22	52,81	1,89	12,40
58	14,1	8,21	520	2,9	140,5	171,40	10,94	6,03	78,05	11,24	77,01	0,74	54,47	1,93	12,50

Águas Superficiais amostradas em março/abril de 2012															
Ref ^a	Temp ^a (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	CO ₂ (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)
1	15,4	5,48	178	43,6	58,5	71,37	5,25	2,70	21,87	9,30	55,05	0,47	18,11	4,91	4,31
14	21,9	5,39	210	15,2	23,5	28,67	6,70	1,51	22,15	11,47	74,76	0,48	20,67	2,81	46,44
49	16,1	5,92	301	58,3	131,0	159,82	8,26	2,67	42,72	11,41	82,84	0,75	16,32	n.a.	6,10
50	12,9	5,75	118	71,7	38,0	46,40	2,60	0,79	21,12	3,36	44,75	0,46	15,50	1,00	3,29
51	13,0	6,36	134	27,3	43,0	52,46	2,94	0,99	21,56	3,55	48,65	0,38	14,27	0,78	4,72
52	12,3	6,83	90	5,2	21,0	25,62	1,26	0,77	16,83	2,43	35,53	0,26	16,42	n.a.	3,09
53	15,6	7,45	418	3,3	209,0	254,98	15,46	5,41	50,53	11,09	76,00	1,27	21,28	0,27	7,76
54	15,6	6,87	379	9,9	167,0	203,74	14,51	4,88	61,23	9,66	65,98	1,44	20,61	1,47	8,59
55	18,0	7,07	875	5,3	186,0	226,92	13,33	4,60	163,22	20,86	58,94	0,84	176,73	2,87	33,72
56	15,9	6,99	397	6,2	202,0	246,40	14,59	5,32	76,73	8,64	76,88	1,30	21,58	1,34	8,41
57	18,0	8,16	499	0,4	179,5	219,00	13,22	4,77	87,31	11,50	70,14	1,37	60,82	1,00	14,74
58	19,0	8,38	526	---	191,0	233,00	14,66	5,15	87,76	12,88	61,10	1,50	63,47	0,56	15,56

**ANEXO III - ÍNDICES DE SATURAÇÃO
RELATIVO ÀS FASES MINERAIS INVESTIGADAS
PELO PROGRAMA PHREEQ C**

Águas subterrâneas amostradas em janeiro/fevereiro de 2012						
Ref^a	Designação	Fase Mineral				Sílica Amorfa
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	
2	Caldeira Pequena C.R.G.	---	0,44	---	0,81	-0,33
3	Caldeira Grande C.R.G.	---	0,16	---	0,56	-0,64
4	Fumarola C.R.G.	---	0,60	---	0,93	-0,14
5	Caldeira. Velha Nascente	-4,26	0,03	-8,40	0,44	-0,79
6	Caldeira Velha Fumarola	-4,87	0,03	-9,77	0,31	-0,64
7	Ladeira da Velha	-2,39	0,43	-4,91	0,85	-0,39
8	Ladeira da Velha Férrea	-2,13	0,43	-4,31	0,83	-0,38
9	Lombadas	-3,14	0,43	-6,37	0,88	-0,43
10	Lombadas Doce	-3,05	0,33	-6,57	0,80	-0,55
11	Lombadas Furo II	-2,44	0,5	-5,14	0,95	-0,36
12	Magarça	-4,13	0,36	-8,40	0,81	-0,50
13	Pocinha	-4,07	0,38	-8,28	0,80	-0,46
15	Fajã do Boi I	-3,16	-0,07	-6,53	0,40	-0,96
16	Fajão do Boi II	-2,77	0,01	-5,89	0,48	-0,88
17	Fajã do Boi III	-3,25	0,02	-6,68	0,49	-0,86
18	Fajã do Boi IV	-3,48	-0,01	-7,11	0,46	-0,89
19	Bandeirinha	-2,39	-0,01	-4,91	0,46	-0,89
20	Chá Canto	-3,53	-0,05	-7,21	0,41	-0,93
21	Albano Vieira	-1,56	0,36	-3,25	0,80	-0,48
22	Cachaços	-3,14	-0,19	-6,46	0,27	-1,08
23	Fajã das Traves	-3,86	-0,23	-7,80	0,24	-1,11
24	Cabelos Brancos	-2,94	0,19	-5,99	0,66	-0,69
25	Mato Miguel	-3,1	0,11	-6,41	0,58	-0,77
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	-3,13	-0,41	-6,22	0,06	-1,28
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	-3,21	-0,11	-6,51	0,35	-0,99
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	-3,60	-0,09	-7,33	0,37	-0,97
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	-3,12	-0,12	-6,35	0,35	-1,00
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	-2,45	-0,13	-4,98	0,33	-1,01
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	-3,44	-0,26	-6,92	0,20	-1,14
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	-3,02	-0,41	-6,03	0,05	-1,29
33	Pachãs	-2,56	0,25	-5,31	0,70	-0,62
34	Monte Gordo (Gramas)	-3,54	0,21	-7,28	0,66	-0,66
35	Pico Rafael	-2,85	-0,09	-5,78	0,37	-0,97
36	Laranjinha	-3,03	-0,04	-6,21	0,43	-0,92
37	Mata Alta (Monte Escuro)	-3,02	0,03	-6,15	0,50	-0,85
38	Porto Formoso II - Praia	-4,53	0,32	-9,17	0,77	-0,55
39	Porto Formoso III - conteira	-4,58	0,21	-9,15	0,67	-0,66
40	Porto Formoso IV - telha	-4,51	0,28	-9,05	0,73	-0,58
41	Porto Formoso V - bica	-4,18	0,31	-8,46	0,76	-0,56

Águas subterrâneas amostradas em março/abril de 2012						
Refª	Designação	Fase Mineral				Sílica Amorfa
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	
2	Caldeira Pequena C.R.G.		0,39		0,77	-0,38
3	Caldeira Grande C.R.G.		0,15		0,54	-0,65
4	Fumarola C.R.G.		0,51		0,85	-0,22
5	Caldeira. Velha Nascente	-4,44	0,01	-8,76	0,42	-0,81
6	Caldeira Velha Fumarola		0,23		0,52	-0,47
7	Ladeira da Velha	-2,53	0,46	-5,26	0,88	-0,38
8	Ladeira da Velha Férrea	-2,39	0,40	-4,92	0,80	-0,42
9	Lombadas	-2,91	0,48	-6,09	0,93	-0,38
10	Lombadas Doce	-2,65	0,32	-5,75	0,79	-0,56
11	Lombadas Furo II	-2,49	0,48	-5,22	0,93	-0,38
12	Magarça	-3,99	0,35	-8,17	0,80	-0,51
13	Pocinha	-4,28	0,36	-8,78	0,78	-0,48
15	Fajã do Boi I	-2,97	0,18	-6,48	0,64	-0,71
16	Fajão do Boi II	-2,83	0,15	-5,78	0,62	-0,74
17	Fajã do Boi III	-2,75	0,18	-5,69	0,65	-0,70
18	Fajã do Boi IV	-3,76	0,15	-7,60	0,62	-0,73
19	Bandeirinha	-2,22	0,09	-4,49	0,56	-0,79
20	Chá Canto	-3,10	0,09	-6,29	0,55	-0,79
21	Albano Vieira	-2,34	0,36	-4,62	0,8	-0,49
22	Cachaços	-2,32	0,06	-4,79	0,53	-0,82
23	Fajã das Traves	-3,94	0,07	-7,93	0,54	-0,81
24	Cabelos Brancos	-2,93	0,28	-5,97	0,75	-0,59
25	Mato Miguel	-3,05	0,22	-6,37	0,68	-0,67
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	-3,48	-0,18	-6,84	0,28	-1,06
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	-3,40	0,07	-6,84	0,54	-0,81
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	-3,39	0,09	-6,86	0,55	-0,79
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	-2,76	-0,07	-5,51	0,40	-0,94
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	-3,64	0,05	-7,33	0,52	-0,84
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	-3,72	+0	-7,35	0,46	-0,88
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	-3,69	-0,12	-7,33	0,35	-0,99
33	Pachãs	-2,98	0,22	-6,16	0,67	-0,65
35	Pico Rafael	-2,89	0,04	-5,75	0,50	-0,84
36	Laranjinha	-2,84	0,12	-5,79	0,58	-0,76
37	Mata Alta (Monte Escuro)	-2,99	0,09	-6,09	0,56	-0,80
38	Porto Formoso II - Praia	-3,61	0,28	-7,39	0,73	-0,59
39	Porto Formoso III - conteira	-4,35	0,11	-8,72	0,57	-0,76
40	Porto Formoso IV - telha	-4,14	0,29	-8,46	0,74	-0,58
41	Porto Formoso V - bica	-4,13	0,30	-8,44	0,75	-0,57
42	Gramas	-4,29	0,25	-8,67	0,69	-0,61

Águas subterrâneas amostradas em março/abril de 2012						
Ref^a	Designação	Fase Mineral				
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	Sílica Amorfa
43	Caracol 8 (C.M.R.G. 18)	-3,19	0,05	-6,56	0,52	-0,83
44	Caracol 9 (C.M.R.G. 12)	-2,71	-0,12	-5,43	0,35	-1,00
45	Caracol 10 (C.M.R.G. 11)	-3,40	0,02	-6,82	0,48	-0,86
46	Caracol 11 (C.M.R.G. 14)	-3,72	-0,06	-7,51	0,40	-0,94
47	Caracol 12 (C.M.R.G. 5)	-3,26	-0,22	-6,59	0,25	-1,10
48	Caracol 13 (C.M.R.G. 1)	-3,70	0,05	-7,42	0,51	-0,83

Águas subterrâneas amostradas em junho de 2012						
Ref ^a	Designação	Fase Mineral				
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	Sílica Amorfa
2	Caldeira Pequena C.R.G.		0,39		0,76	-0,38
3	Caldeira Grande C.R.G.		0,09		0,48	-0,70
4	Fumarola C.R.G.		0,61		0,94	-0,12
5	Caldeira. Velha Nascente	-4,34	0,04	-8,49	0,37	-0,85
6	Caldeira Velha Fumarola		0,53		0,83	-0,18
7	Ladeira da Velha	-2,52	0,44	-5,14	0,86	-0,38
8	Ladeira da Velha Férrica	-2,40	0,43	-4,84	0,84	-0,38
9	Lombadas	-2,71	0,47	-5,68	0,92	-0,39
10	Lombadas Doce	-3,27	0,28	-6,82	0,75	-0,60
11	Lombadas Furo II	-2,41	0,52	-5,12	0,97	-0,34
12	Magarça	-3,95	0,36	-7,98	0,81	-0,50
13	Pocinha	-4,09	0,38	-8,27	0,8	-0,45
15	Fajã do Boi I	-3,18	0,13	-6,48	0,59	-0,75
16	Fajão do Boi II	-2,97	0,11	-6,04	0,58	-0,76
17	Fajã do Boi III	-3,14	0,18	-6,40	0,64	-0,70
18	Fajã do Boi IV	-2,99	0,14	-6,04	0,61	-0,74
19	Bandeirinha	-2,90	0,12	-5,80	0,59	-0,76
20	Chá Canto	-3,67	0,10	-7,38	0,57	-0,77
21	Albano Vieira	-1,83	0,20	-3,96	0,65	-0,65
22	Cachaços	-2,75	0,01	-5,84	0,47	-0,87
23	Fajã das Traves	-4,39	0,05	-8,77	0,51	-0,84
24	Cabelos Brancos	-2,41	0,25	-4,87	0,71	-0,63
25	Mato Miguel	-3,51	0,20	-7,14	0,67	-0,68
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	-2,64	-0,26	-5,17	0,21	-1,14
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	-3,27	0,03	-6,48	0,49	-0,85
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	-3,08	0,04	-6,15	0,50	-0,84
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	-2,50	-0,11	-4,73	0,32	-0,95
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	-3,30	-0,01	-6,50	0,45	-0,89
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	-3,43	-0,06	-6,67	0,40	-0,93
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	-3,57	-0,11	-6,95	0,35	-0,99
33	Pachãs	-3,01	0,29	-6,06	0,75	-0,57
34	Monte Gordo (Gramas)	-3,70	0,29	-7,44	0,74	-0,57
35	Pico Rafael	-2,84	0,09	-5,57	0,55	-0,79
36	Laranjinha	-2,98	0,13	-6,00	0,59	-0,75
37	Mata Alta (Monte Escuro)	-3,11	0,12	-6,32	0,59	-0,76
38	Porto Formoso II - Praia	-4,44	0,32	-8,96	0,77	-0,54
39	Porto Formoso III - conteira	-4,45	0,15	-9,90	0,60	-0,71
40	Porto Formoso IV - telha	-4,53	0,32	-9,16	0,77	-0,54

Águas subterrâneas amostradas em junho de 2012						
Ref^a	Designação	Fase Mineral				
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	Sílica Amorfa
41	Porto Formoso V - bica	-4,27	0,31	-8,65	0,75	-0,55
42	Gramas	-3,81	0,31	-7,67	0,76	-0,54
43	Caracol 8 (C.M.R.G. 18)	-3,34	0,10	-6,76	0,56	-0,78
44	Caracol 9 (C.M.R.G. 12)	-3,26	-0,01	-6,47	0,45	-0,89
45	Caracol 10 (C.M.R.G. 11)	-3,50	-0,05	-6,99	0,41	-0,93
46	Caracol 11 (C.M.R.G. 14)	-3,12	0,01	-6,24	0,48	-0,86
48	Caracol 13 (C.M.R.G. 1)	-3,27	0,11	-6,49	0,57	-0,77

Média das três amostragens						
Refª	Designação	Fase Mineral				
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	Sílica Amorfa
2	Caldeira Pequena C.R.G.		0,41		0,78	-0,36
3	Caldeira Grande C.R.G.		0,13		0,53	-0,67
4	Fumarola C.R.G.		0,58		0,91	-0,16
5	Caldeira. Velha Nascente	-4,34	+0	-8,54	0,41	-0,82
6	Caldeira Velha Fumarola		0,29		0,59	-0,40
7	Ladeira da Velha	-2,49	0,44	-5,11	0,86	-0,38
8	Ladeira da Velha Férrea	-2,31	0,42	-4,69	0,82	-0,39
9	Lombadas	-2,91	0,46	-6,03	0,91	-0,40
10	Lombadas Doce	-2,98	0,31	-6,36	0,78	-0,57
11	Lombadas Furo II	-2,44	0,5	-5,15	0,95	-0,36
12	Magarça	-4,02	0,36	-8,17	0,81	-0,50
13	Pocinha	-4,13	0,37	-8,41	0,79	-0,46
15	Fajã do Boi I	-3,10	0,09	-6,46	0,56	-0,79
16	Fajão do Boi II	-3,03	0,09	-6,26	0,56	-0,79
17	Fajã do Boi III	-3,05	0,14	-6,25	0,60	-0,75
18	Fajã do Boi IV	-3,41	0,1	-6,92	0,57	-0,78
19	Bandeirinha	-2,50	0,07	-5,06	0,54	-0,81
20	Chá Canto	-3,44	0,05	-6,96	0,52	-0,82
21	Albano Vieira	-4,88	0,32	-3,90	0,76	-0,53
22	Cachaços	-2,73	-0,03	-5,69	0,44	-0,91
23	Fajã das Traves	-4,06	-0,02	-8,16	0,45	-0,90
24	Cabelos Brancos	-2,76	0,24	-5,60	0,71	-0,63
25	Mato Miguel	-3,22	0,18	-6,64	0,65	-0,70
26	Caracol 1 (C.M.R.G. 16)	-3,04	-0,27	-6,00	0,19	-1,15
27	Caracol 2 (C.M.R.G. 13)	-3,29	+0	-6,6	0,47	-0,88
28	Caracol 3 (C.M.R.G. 8)	-3,36	0,02	-6,77	0,48	-0,86
29	Caracol 4 (C.M.R.G. 6)	-3,06	-0,05	-6,11	0,41	-0,93
30	Caracol 5 (C.M.R.G. 4)	-3,12	-0,03	-6,25	0,44	-0,91
31	Caracol 6 (C.M.R.G. 2)	-3,52	-0,09	-6,95	0,37	-0,97
32	Caracol 7 (C.M.R.G. 17)	-3,43	-0,19	-6,67	0,27	-1,07
33	Pachãs	-2,85	0,25	-5,83	0,71	-0,61
34	Monte Gordo (Gramas)	-3,61	0,25	-7,34	0,70	-0,61
35	Pico Rafael	-2,85	0,02	-5,68	0,48	-0,86
36	Laranjinha	-2,94	0,08	-5,98	0,54	-0,80
37	Mata Alta (Monte Escuro)	-2,78	0,08	-5,67	0,55	-0,80
38	Porto Formoso II - Praia	-4,19	0,31	-8,50	0,76	-0,56
39	Porto Formoso III - conreira	-4,58	0,16	-9,17	0,62	-0,71
40	Porto Formoso IV - telha	-4,38	0,30	-8,87	0,75	-0,57

Média das três amostragens						
Ref^a	Designação	Fase Mineral				
		Calcite	Calcedónia	Dolomite	Quartzo	Sílica Amorfa
41	Porto Formoso V - bica	-4,19	0,30	-8,51	0,75	-0,56
42	Gramas	-4,05	0,28	-8,16	0,72	-0,58
43	Caracol 8 (C.M.R.G. 18)	-3,26	0,07	-6,65	0,54	-0,81
44	Caracol 9 (C.M.R.G. 12)	-2,98	-0,06	-4,16	0,40	-0,94
45	Caracol 10 (C.M.R.G. 11)	-3,44	-0,02	-6,88	0,45	-0,89
46	Caracol 11 (C.M.R.G. 14)	-3,42	-0,02	-6,86	0,44	-0,90
47	Caracol 12 (C.M.R.G. 5)	-3,26	-0,22	-6,59	0,25	-1,10
48	Caracol 13 (C.M.R.G. 1)	-3,48	0,08	-6,94	0,54	-0,80