

PAULO CUSTÓDIO PIRES ANTUNES

**LAGOS VULCÂNICOS DOS AÇORES: CARACTERIZAÇÃO
GEOQUÍMICA E MONITORIZAÇÃO VULCANOLÓGICA**

DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2003

PAULO CUSTÓDIO PIRES ANTUNES

**LAGOS VULCÂNICOS DOS AÇORES: CARACTERIZAÇÃO
GEOQUÍMICA E MONITORIZAÇÃO VULCANOLÓGICA**

**TESE REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO EM VULCANOLOGIA E RISCOS
GEOLÓGICOS, DE ACORDO COM O DISPOSTO NO ARTIGO 14º DO
REGULAMENTO DO MESTRADO EM VULCANOLOGIA E RISCOS
GEOLÓGICOS, PUBLICADO EM DIÁRIO DA REPÚBLICA, II SÉRIE, N.º 189, DE
17 DE AGOSTO DE 2000.**

**ORIENTADOR:
PROFESSOR DOUTOR JOSÉ VIRGÍLIO CRUZ
UNIVERSIDADE DOS AÇORES**

...podemos olhar para os Lagos Vulcânicos como janelas abertas para um melhor conhecimento dos procedimentos que comandam a ascensão dos fluidos magmáticos até à superfície e como reagem com o meio dentro do próprio edifício vulcânico.

Rice (2000)

À Susana

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vii
AGRADECIMENTOS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Lagos Vulcânicos	1
1.2 – Catástrofes Associadas ao Vulcanismo Hidromagmático	8
1.3 – Monitorização	17
1.4 – Objectivos e Estrutura da Dissertação	18
2 – LAGOS VULCÂNICOS DOS AÇORES	20
2.1 – Sua Distribuição	20
2.2 – Caracterização dos Lagos	20
3 – HIDROGEOQUÍMICA	25
3.1 - Considerações Gerais	25
3.1.1 – Metodologia de Amostragem e Análise	26
3.2 – Caracterização Hidrogeoquímica dos Lagos	28
3.2.1 – Parâmetros Físicos	28
3.2.1.1 – Temperatura	28
3.2.1.2 – Condutividade Eléctrica	29
3.2.2 – Parâmetros Químicos	31
3.2.2.1 – pH	31
3.2.2.2 – CO ₂	32
3.2.2.3 – Catiões	34
3.2.2.4 – Aniões	40
3.2.2.5 – SiO ₂	45

3.3 – Caracterização da Amostragens	47
3.4 – Análise Grupal	62
3.5 – Perfis	65
4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5 – BIBLIOGRAFIA	91
ANEXOS	I
ANEXO I	I
ANEXO II	III
ANEXO III	VI
ANEXO IV	VIII
ANEXO V	X
ANEXO VI	XII
ANEXO VII	XIV

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Lagoa de Santiago (São Miguel).	2
Figura 2 Lagoa das Sete Cidades (São Miguel).	3
Figura 3 Localização das erupções vulcânicas que ocorreram em lagos vulcânicos durante o período histórico.	5
Figura 4 Localização dos pontos de amostragem realizados nas ilhas de São Miguel e Terceira.	21
Figura 5 Distribuição da classe modal relativamente à altitude, à área, à profundidade máxima e à classificação geológica.	23
Figura 6 Histograma relativo à distribuição dos valores de temperatura.	29
Figura 7 Histograma relativo à distribuição dos valores de condutividade.	30
Figura 8 Histograma relativo à distribuição dos valores de pH.	32
Figura 9 Histograma relativo à distribuição dos valores de dióxido de carbono livre.	34
Figura 10 Histograma relativo à distribuição dos valores de dióxido de carbono total.	34
Figura 11 Histograma relativo à distribuição dos valores do ião cálcio.	38
Figura 12 Histograma relativo à distribuição dos valores do ião magnésio.	38
Figura 13 Histograma relativo à distribuição dos valores do ião sódio.	39
Figura 14 Histograma relativo à distribuição dos valores do ião potássio.	40
Figura 15 Histograma relativo à distribuição do ião cloreto.	42

Figura 16	
Histograma relativo à distribuição dos valores do ião bicarbonato.	43
Figura 17	
Histograma relativo à distribuição dos valores do ião sulfato.	45
Figura 18	
Histograma relativo à distribuição dos valores da sílica.	46
Figura 19	
Representação da composição química por meio de um diagrama de Piper.	51
Figura 20	
Relação entre a altitude e a temperatura dos lagos.	51
Figura 21	
Distribuição dos lagos dos Açores, tendo em conta o ião cloreto e a mineralogia.	52
Figura 22	
Distribuição dos lagos dos Açores, tendo em conta os iões sódio e cloreto na amostragem de Verão.	53
Figura 23	
Distribuição dos lagos dos Açores relacionando os iões Na^+ e K^+ com o HCO_3^- .	54
Figura 24	
Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando (A): o Na^+ com o Cl^- e (B): o $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ com o HCO_3^- na segunda amostragem.	54
Figura 25	
Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando os SDT com o ião bicarbonato na amostragem de Verão.	55
Figura 26	
Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando o CO_2 livre e total com o HCO_3^- na amostragem de Verão.	56
Figura 27	
Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando (A): CO_2 total com o HCO_3^- e (B): o CO_2 livre com o HCO_3^- para os lagos da ilha de São Miguel.	57
Figura 28	
Distribuição dos lagos de São Miguel, relacionando o As com o HCO_3^- na amostragem de Verão.	58

Figura 29 Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando os iões Na ⁺ e K ⁺ com a sílica na amostragem de Verão.	59
Figura 30 Distribuição dos lagos de São Miguel relacionando o ferro com a sílica na amostragem de Verão.	60
Figura 31 Distribuição dos lagos de São Miguel relacionando os iões Na ⁺ e K ⁺ com a SiO ₂ na amostragem de Inverno.	61
Figura 32 Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando o ião Mg ²⁺ com a SiO ₂ na amostragem de Verão.	61
Figura 33 Dendograma da análise grupal modo-R.	63
Figura 34 Dendograma da análise grupal modo-Q.	64
Figura 35 Resultados do perfil efectuado na lagoa das Empadadas (Norte).	67
Figura 36 Resultados do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Norte).	70
Figura 37 Resultados do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Sul).	71
Figura 38 Resultados do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Sul).	72
Figura 39 Resultado do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Sul).	73
Figura 40 Resultado do perfil efectuado na lagoa de Santiago.	74
Figura 41 Resultado do perfil efectuado na lagoa de Santiago.	75
Figura 42 Resultados do perfil efectuado na lagoa do Fogo (Sul).	76
Figura 43 Resultados do perfil efectuado na lagoa do Fogo (Sul).	77

Figura 44	
Resultados do perfil efectuado na lagoa do Congro.	78
Figura 45	
Resultados do perfil efectuado na lagoa do Congro.	79
Figura 46	
Resultados do perfil efectuado na lagoa do Congro.	80
Figura 47	
Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Sul).	80
Figura 48	
Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Sul).	81
Figura 49	
Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Oeste).	82
Figura 50	
Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Oeste).	83
Figura 51	
Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Norte).	84
Figura 52	
Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Norte).	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Erupções vulcânicas históricas ocorridas em lagos vulcânicos.	6
Tabela 2 Mortes provocadas por eventos associados a erupções vulcânicas.	10
Tabela 3 Número se mortes provocadas por <i>lahars</i> primários.	11
Tabela 4 Localização dos lagos em estudo e suas características físicas.	22
Tabela 5 Estudo estatístico dos parâmetros físicos, temperatura e condutividade eléctrica das águas dos lagos.	28
Tabela 6 Estudo estatístico dos parâmetros químicos, pH e CO ₂ livre e total das águas dos lagos.	31
Tabela 7 Estudo estatístico dos catiões, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ e K ⁺ das águas dos lagos.	36
Tabela 8 Estudo estatístico dos aniões, Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ e SO ₄ ⁻ das águas dos lagos.	40
Tabela 9 Estudo estatístico do dióxido de sílica das águas dos lagos.	46
Tabela 10 Resultados da amostragem de Verão.	48
Tabela 11 Resultados da amostragem de Inverno.	49

RESUMO

A contribuição da hidrogeoquímica dos lagos vulcânicos para a vigilância vulcânica é uma área de estudo muito recente quando comparada a outras técnicas que têm o mesmo objectivo. Com efeito, o estudo destas massas de água, quando em contacto com fluidos de origem magmática, permite um melhor conhecimento destes sistemas vulcânicos. Esta área de estudo é mais um meio que se coloca à disposição da vigilância vulcânica.

O interesse no estudo destes reservatórios naturais onde ocorre, por vezes, a condensação de gases vulcânicos ou a mistura com águas termais onde poderá existir a acumulação de fluidos extremamente acidificados, ganhou uma maior atenção após a libertação de CO₂ nos lagos Monoun (1984) e, principalmente, no lago Nyos (1986), nos Camarões. Em resultado, o número de contribuições científicas relativo à problemática dos lagos vulcânicos tem aumentado sustentadamente.

Os registos históricos nos Açores, nomeadamente na ilha de São Miguel, relatam erupções vulcânicas ocorridas no interior de lagos vulcânicos, bem como mudanças nestes sistemas lacustres relacionadas com este evento, os quais chegaram a secar durante as crises vulcânicas. No entanto, os estudos hidrogeoquímicos nos lagos vulcânicos do Arquipélago dos Açores são muito esporádicos. De forma a colmatar esta lacuna de informação foi planeado um levantamento hidrogeoquímico de uma amostra representativa de lagos vulcânicos dos Açores, visando, para além da caracterização das águas, contribuir para a construção de uma base de dados essencial para a monitorização vulcanológica.

Em virtude do tempo disponível para a elaboração deste estudo e dos meios logísticos disponíveis, optou-se por fazer uma sistematização das principais lagoas da ilha de São Miguel e da ilha Terceira. Assim, foi possível a recolha de dados pioneiros inexistentes até então. Os elementos físicos e químicos analisados foram: o pH, a temperatura, a condutividade eléctrica, os sólidos totais (STD), o CO₂ livre e total, o Na⁺, o K⁺, o Mg²⁺, o Ca²⁺, o HCO₃⁻, o Cl⁻, o SO₄²⁻, e a SiO₂. Também foram enviadas para o *Activation Laboratories Ltd* (Canadá) amostras de águas de diversas lagoas para a determinação dos elementos maiores, menores e em traço. Os dados de geoquímica publicados, sobretudo os que se encontram disseminados

no âmbito de outros estudos não directamente relacionados com a temática do presente trabalho, foram compilados para a presente investigação.

Os resultados das análises efectuadas permitiram identificar aumentos de concentração significativos, nomeadamente do dióxido de carbono total, no fundo dos lagos. Além da contribuição do CO₂ livre a partir da degradação da matéria orgânica, há a possibilidade de parte deste aumento de concentração se dever à contaminação das águas dos lagos por fluidos de origem magmática. Os dados que sugerem esta contaminação vulcânica foram registados em lagos localizados nos três complexos vulcânicos (Sete Cidades, Fogo e Furnas) da ilha de São Miguel.

Relativamente às lagoas da ilha Terceira, os resultados denotam a influência de contaminação de sais marinhos, excepção feita à lagoa do Algar do Carvão que apresenta valores em sílica elevados em relação aos restantes lagos do Arquipélago dos Açores. Este resultado permite extrapolar a possível existência de descargas de águas hidrotermais neste sistema.

De todos os lagos do Arquipélago dos Açores, o da Furna do Enxofre (ilha Graciosa) apresenta concentrações muito elevadas nos diferentes parâmetros analisados em relação aos demais lagos estudados, um resultado que se interpreta como resultante da contaminação vulcânica.

ABSTRACT

The contribution of volcanic lakes hydrogeochemistry in volcanic surveillance is a very recent area of study when compared with other techniques applied in volcanic monitoring. The waters study when in contact with volcanic fluids allow a better view of these systems.

Studies on volcanic lakes, where can occur volcanic gases condensation or thermal seepage, have called the attention after the sudden CO₂ releasing in Monoun lake (1984) and, most important, in Nyos lake (1986) on Cameroon mainland. After that, scientific contributions on this subject have increase steadily.

In Azores, namely in San Miguel island, volcanic eruptions have been located in volcanic lakes, induced transformations in these systems. Nevertheless, hydrogeochemistry studies in these places on Azores Archipelago are very rare, because studies made in lakes were mainly direct the entrophication problems.

It was planned to do systematic survey of the most important lakes in San Miguel and Terceira islands, because the limited time and logistic mains. Because of existence gap information on Azorean volcanic lakes, it was plan a representative hydrogeochemical analyze of Azorean Lakes to characterized these waters and contribute with new data for a future base line for volcanic activity surveillance. Although, the physical and chemical elements analyzed ware: pH, temperature, electrical conductivity, total dissolved solids (TDS), total and dissolved CO₂, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, and SiO₂. It was send also to Activation Laboratoiris *Ltd* (Canada), samples of waters lakes to analysed major, minor and trace elements.

With the analytical results was possible to identify significant increase in concentration on different elements, especially total CO₂ in the hypolimnion lake. Beside the contribution of organic matter degradation in CO₂ increase there are the possibility of part this increase been related with thermal waters seepage and volatile discharges in theme lakes (Sete Cidades, Fogo and Furnas complex).

In Terceira, data collect in volcanic lakes chemistry suggest a marine contribution, except in the cave of Algar do Carvão lake, where SiO₂ results suggest hydrothermal discharge in this system.

The Furna do Enxofre lake data are in a sharply contrast to the distinguish others volcanic lakes suggesting to be related with a volcanic contribution dominated by volatile release.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Lagos vulcânicos

Os lagos são massas de água aprisionadas em zonas deprimidas do relevo e a sua génese poderá ocorrer de variados modos, destacando-se três tipos principais (Wetzel, 1993): (1) lagos de origem tectónica, (2) de origem glaciária e (3) aqueles que serão objecto de estudo na presente tese, os lagos vulcânicos. A importância do estudo dos lagos vulcânicos reside em vários factores, aos quais não é alheio o facto destas massas de água poderem interagir directamente com sistemas magmáticos, oferecendo grandes possibilidades no estudo da predição de eventos vulcânicos (Christenson, 2000; Delmelle *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2000; Varekamp, 2002).

O volume de água doce existente nos lagos vulcânicos representa apenas 0,009% de toda a água doce existente na Terra. Por sua vez, toda a massa de água doce existente na Terra, quando comparada com o volume de água armazenado nos oceanos, representa, proporcionalmente, uma pequena fracção, isto é, cerca de 2,39%, aproximadamente $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Wetzel, 1993; Pasternack e Varekamp, 1997; Delmelle e Bernard, 2000).

Os lagos de água doce mais profundos existentes à superfície da Terra apresentam uma origem vulcano-tectónica, exemplificada pelo lago Baikal, situado na Sibéria, o qual corresponde à massa de água de superfície com maior área e profundidade do mundo (Wetzel, 1993). No entanto, se a fracção de água doce distribuída pelos lagos vulcânicos é muito efémera em relação ao total que existe na Terra, a percentagem de vulcões que possuem lagos vulcânicos já é mais significativa, uma vez que, do número de vulcões holocénicos identificados no catálogo dos vulcões activos do mundo, 16% apresentam lagos vulcânicos (Delmelle e Bernard, 2000). Estes lagos estão presentes em muitos dos vulcões existentes em todo o mundo, situando-se os mesmos em maior percentagem nas regiões que possuem arcos vulcânicos (Rowe *et al.*, 1992; Simkin e Siebert, 1994 *in* Pasternack e Varekamp, 1997; Delmelle e Bernard, 2000).

A génese destas bacias poderá ocorrer de diversas formas. De um modo geral, as depressões e cavidades formam-se à medida que os materiais vulcânicos

são ejetados e geram um vazio, podendo também o magma libertado, uma vez arrefecido, formar depressões. Também o colapso dos tectos dos tubos lávicos quando arrefecidos, poderão, mais tarde, vir a aprisionar água se estas depressões não possuírem sumidouros. No entanto, é mais frequente a génese de lagos formados em depressões criadas pela ejeção violenta de magma originando crateras de explosão, como por exemplo os *maars* e as caldeiras (Timms, 1992; Wetzell, 1993). Segundo os mesmos autores, as crateras de origem explosiva designadas como *maars* são, regra geral, depressões que possuem pequenas áreas, com um diâmetro inferior a 2 km (Fig.1). Apesar deste tipo de crateras apresentar um pequeno diâmetro, não invalida que possuam grandes profundidades (mais de 100 metros). As caldeiras, formadas pelo abatimento do tecto de uma câmara magmática parcialmente vazia, são, geralmente, de maiores dimensões que os *maars* (diâmetro igual ou superior a 5 km), possuindo, normalmente, uma topografia aplanada como resultado da subsidência que a originou (Fig. 2). No entanto, o fundo destas bacias quando impermeabilizadas, não contém apenas água doce proveniente da escorrência superficial, nomeadamente água meteórica que é drenada pelas vertentes da bacia fechada e alimenta o interior destes edifícios vulcânicos. Muitos dos lagos vulcânicos do mundo possuem águas aquecidas muito mineralizadas e com elevadas concentrações de ácidos, tais como o ácido sulfúrico e o ácido clorídrico, os quais representam as águas naturais mais mineralizadas e acidificadas que existem à superfície da Terra (Delmelle e Bernard, 2000).



Fig. 1 – Lagoa de Santiago (São Miguel), localizada num *maar* (s. l.).

As diferentes características dos lagos vulcânicos poderão reflectir a influência directa sobre as propriedades físicas e químicas das águas dos lagos, dos gases e dos líquidos libertados pelas câmaras magmáticas em profundidade. Deste modo, pode considerar-se que as características de alguns lagos vulcânicos podem reflectir fenómenos com origem nos magmas situados em profundidade. Assim sendo, podemos olhar para os lagos vulcânicos como janelas abertas que nos permite obter um melhor conhecimento dos procedimentos que comandam a ascensão dos fluidos magmáticos até à superfície e da forma como reagem com o meio dentro do próprio edifício vulcânico (Rice, 2000).



Fig. 2 – Lagoa das Sete Cidades (São Miguel), localizada numa caldeira de colapso.

Das 7900 erupções que se registaram na Terra desde 8000 A.C., cerca de 610 localizaram-se em lagos vulcânicos ou no meio marinho (Simkin e Siebert, 1994 *in* Mastin e Witter, 2000). Quando o magma entra em contacto com estas massas de água durante uma erupção vulcânica, provoca usualmente grandes explosões hidrovulcânicas, queda de *lapilli* ou cinzas, *base surges*, *lahars*, inundações, tsunamis ou relâmpagos durante a fase convectiva da coluna de cinzas, os quais não são produzidos na ausência destas massas de água externas. É de salientar que a presença de água não implica a ocorrência obrigatória dos fenómenos atrás referidos. Como exemplo desta última situação, as erupções que ocorreram na presença de água, em Soufriere, na ilha de São Vicente (1971-72), não produziram

nenhum daqueles fenómenos. No entanto, a erupção que ocorreu no ano de 1979, no mesmo local, deu origem a violentas explosões associadas a *base surges* (Mastin e Witter, 2000).

Segundo Sparks *et al.* (1997) e Zhang (2000), é a interacção do magma com a água, quer subterrânea, quer de lagos ou do mar, que origina um vulcanismo muito explosivo. Os magmas são considerados uma grande fonte de energia térmica devido à grande capacidade de gerar calor, rondando os 700-1250°C. Um quilograma de magma contém 1.6×10^6 J de energia e a água à temperatura de 0°C, quando aquecida a 1000°C para um volume constante, gera uma pressão de 500 MPa. Assim, o magma ao ascender, quando entra em contacto com a água perto da superfície, gera uma rápida conversão da água em vapor, contribuindo para um aumento de pressão no sistema, aumento esse que dá origem a explosões de grande intensidade. As condições em que ocorre esta actividade explosiva gerada pela interacção magma-água são complexas e não estão totalmente compreendidas.

Este tipo de erupção vulcânica proporciona desafios problemáticos, tanto aos cientistas como às entidades oficiais responsáveis pela gestão destas crises, uma vez que ambos trabalham no sentido de se tentarem antecipar às situações de perigo resultantes deste tipo de eventos.

Das 530 erupções em que houve interacção magma-água registadas por Mastin e Witter (2000), cerca de 52% ocorreram em lagos vulcânicos, tendo as restantes ocorrido no mar. Este tipo de erupções está concentrado em certas áreas geográficas como se pode observar na Fig. 3. Também é de salientar que, apesar de se terem registado numerosos eventos em lagos vulcânicos, estes ocorreram em poucos vulcões no mundo, como se pode verificar na Tabela 1. É de salientar ainda que, após uma destas erupções, há sempre a possibilidade de se formarem novos lagos vulcânicos. No entanto, devido ao estabelecimento de povoações na proximidade dos vulcões, estes representam um grande perigo, principalmente quando se encontram em períodos de actividade.

No que diz respeito ao arquipélago dos Açores, a génese dos lagos está associada à actividade vulcano-tectónica. Existem registos de erupções que ocorreram em lagos vulcânicos ou nas suas proximidades.

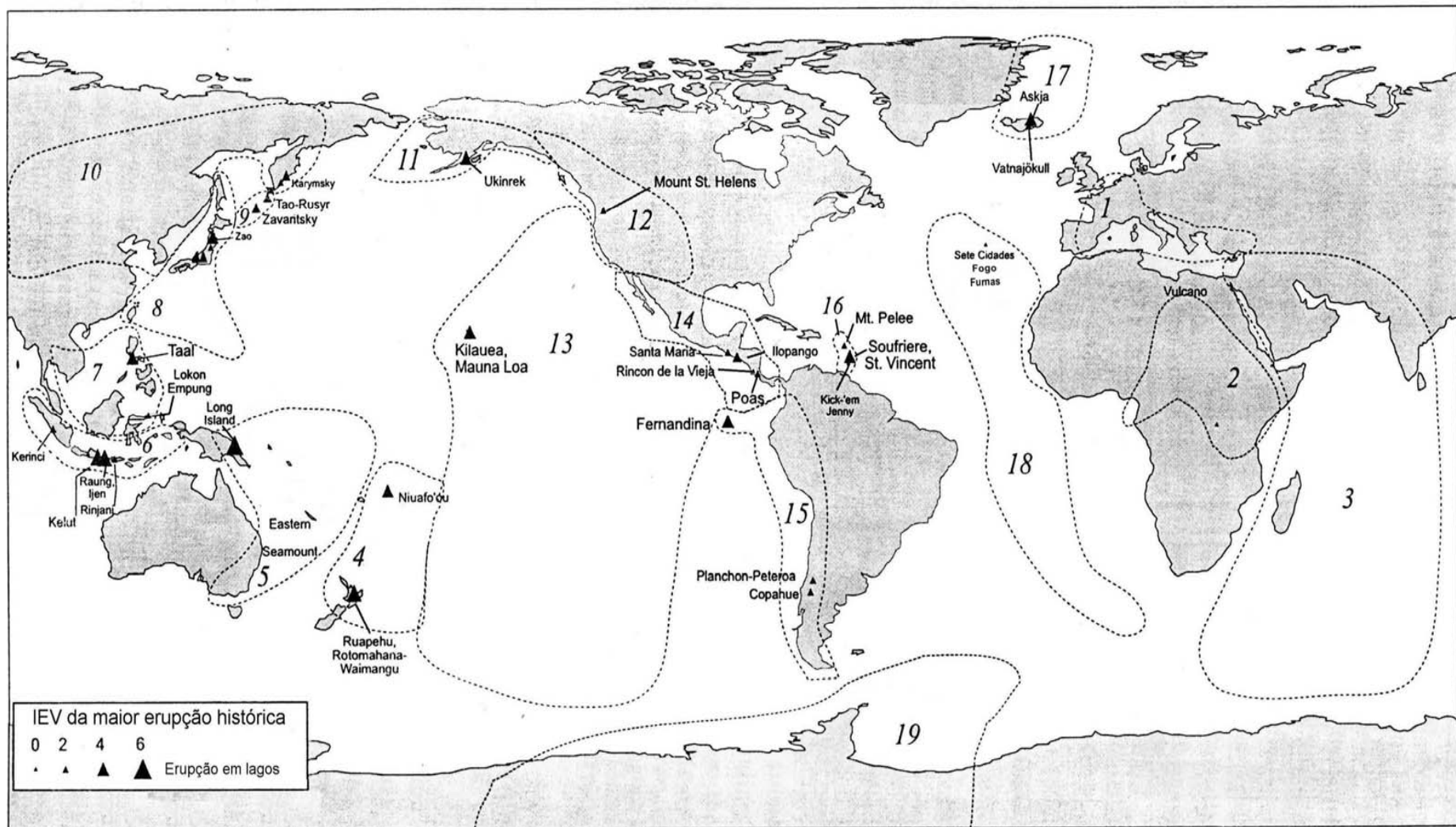


Fig. 3 – Localização das erupções vulcânicas que ocorreram em lagos vulcânicos durante o período histórico. As áreas numeradas e delimitadas pelo tracejado são as que constam do *catálogo dos vulcões activos no mundo*. A dimensão de cada símbolo utilizado é proporcional à da maior erupção medida pelo Índice de Explosividade Vulcânica (IEV) de Newhall e Self (1982. Modificado de Mastin e Witter (2000). As eventuais erupções das Sete Cidades, do Fogo e das Furnas não apresentam correspondência simbólica com o IEV.

Tabela 1 – Erupções vulcânicas históricas ocorridas em lagos vulcânicos (adaptado de Mastin e Witter, 2000).

Designação do Vulcão	Região ou País	Ano	Número de Eventos
Nyamuragira	Zaire	1920	1
Tarawera	Nova Zelândia	1886	1
Ruapehu	Nova Zelândia	1889 - 1996	50
Niufou	Tonga-SW	1814 - 1985	3
Long Island	Papua Nova Guiné	1660 - 1993	8
Rabaul	Papua Nova Guiné	1940	1
Kerinci	Sumatra	1937	1
Kaba	Sumatra	1833	1
Dempo	Sumatra	1905 - 1939	6
Anak Krakatau	Indonésia	1931 - 1959	16
Dieng	Java	1986	1
Kelut	Java	1586 - 1990	21
Tenger Caldera	Java	1842	1
Raung	Java	1593 - 1838	6
Ijen	Java	1796 - 1993	6
Rinjani	Lesser Sunda Is	1944 - 1994	2
Lokon-Empung	Sulawesi-Indonésia	1969 - 1986	2
Mahawu	Sulawesi-Indonésia	1977	1
Tongkoko	Sulawesi-Indonésia	1801	1
Taal	Luzon-Filipinas	1716 - 1965	9
Pinatubo	Luzon-Filipinas	1992	1
Kirishima	Kyushu-Japão	1716 - 1959	3
Aso	Kyushu-Japão	864 - 1992	47
Haku-San	Honshu-Japão	1579	1
Kusatsu-Shirane	Honshu-Japão	1882	6
Zao	Honshu-Japão	1831 - 1940	9
Towada	Honshu-Japão	1050	1
Tao-Rusvr	Ilhas Curilas	1952	1
Ebeko	Ilhas Curilas	1967 - 1987	2
Zavaritzki	Ilhas Curilas	1957	1
Gorely	Kamchatka	1984	1
Karymsky	Kamchatka	1996	1
Ukinrek	Alasca (USA)	1977	1
Mount St. Helens	USA	1980	1
Kilauea	Havai	1790	1
Santa Maria	Guatemala	1903	1
San Salvador	El Salvador	1917	1
Ilopango	El Salvador	1879	1
Rincon de la Vieja	Costa Rica	1983 - 1995	10
Paos	Costa Rica	1828 - 1992	37
Fernandina	Galapagos	1968	1
Planchon-Peteroa	Chile	1991	1
Copahue	Chile	1992	1
Pelee	Índias-W	1902	1
Soufrière St. Vincent	Índias-W	1812 - 1979	6
Grimsvötn	Islândia-NE	1983 - 1996	2
Askja	Islândia-NE	1875 - 1926	2

Estes fenómenos foram unicamente alvo de descrições empíricas elaboradas por habitantes destas ilhas, portadores de um espírito mais observador e atento aos fenómenos naturais, os quais ultrapassavam a possibilidade de serem compreendidos pelo homem comum, sendo, por isso, remetidos para a esfera do divino.

Um destes relatos é o do Padre José Pereira Bayão, quando descrevia a erupção ocorrida na ilha de São Miguel, no ano de 1563:

(...) A causa deste tremor era que estava um pico muito grande e alto que se chamava o pico da lagoinha, que tomou este nome por causa de haver no corôa deste pico uma alagoa pequena, e na fralda deste pico está outra alagoa muito grande; a terra della seria de quatro moios em sementeira. (...) Tinha mais este pico, da banda d'onde nasce o sol, uns lameiros pequenos os quaes continuamente lançavam fumo, e se achava enxofre. Tinha este pico na fralda em redondo, uma legoa e meia, segundo o parecer de todos, por onde estava este lameiro, que lançava estes fumos se alevantou o fogo no centro deste pico, que se presume que deste lameiro se acendeu, porque em todas as ilhas aonde estão estes fogos todos estão em lameiros d'agua; e com a grande fortaleza e poder do fogo fazia tremer a terra como ariba digo pelo fogo não poder sair de baixo do pico de que se pode tomar exemplo de um castello minado a que se põe o fogo. (...) estando todo o povo da ilha nos campos com grandes medos foi visto muito alto no ar toda a ilha coberta de fogo o qual estava em grandes nuvens muito negras e dellas saiam grandes faiscas de fogo que acendiam sobre a cidade, villas, e logares, isto com grandes trovoadas, gemidos da terra, e estrondos e grandes terramotos, o que tudo saia do dito pico da Lagoinha (...) a qual ribeira era de lodo e pedras, e por o gado que lavava ir buscar agua, foi levado muito delle ao mar...

in Arquivo dos Açores (Vol. I)

Gaspar Fructuoso, referindo-se ao mesmo evento, vinte dias após o início da erupção, afirmava:

(...) Chegando à altura de um monte, viram aquela concavidade que ao parecer teria em roda uma légua e meia, e, da boca ao fundo dela, um tiro de espingarda, que dantes era no mesmo lugar um pico mui alto e em cima dele uma grande

alagoa (...) que todo o ano tinha água (...) Como a gente teve lugar de ver a cousa mais de perto e ousaram descer abaixo, acharam que na sobredita água e em todo o baixo e caldeira havia tão grande fedor de enxofre e rosaltar, que enjoava e desatinava as pessoas. E aconteceu irem ali ter alguns cães, em companhia da gente, e estando breve espaço morriam.

in *Livro IV das Saudades da Terra* (Vol. III)

Uma outra erupção em lagos vulcânicos na ilha de S. Miguel, ocorreu em 1630, no Vale das Furnas, como nos descreve o Padre Manoel da Purificação:

(...) sentiram logo um cruel e tão horrível estrondo, que parecia dissolver-se a machina do mundo, e pelo qual se sahiram da cella, e viram ir pelos ares um grande monte d`aquella serra, que estava entre as duas alagoas, das quaes ambas sahiam duas nuvens de fogo, e foi N. Senhor servido que aquelle monte assim arrancado do seu lugar, para que não os sepultasse debaixo de si, cahisse para a parte do mar aonde sepultou a outros que ali se achavam. E vendo-se em tal confusão e aperto, com o medo maior das nuves de fogo que sahiam das alagoas... O lugar do Fayal com as enchentes de agoa que todo arrazou está sem esperança de se poder habitar como dantes; estes dois lugares (...) experimentaram o brigar e força deste diluvio e incendio tão espantoso e que tanto tempo durou (...) Morreram neste diluvio 195 pessoas...

in *Arquivo dos Açores* (Vol. II)

1.2 – Catástrofes Associadas ao Vulcanismo Hidromagmático

O interesse por esta área de estudo não se limita apenas aos factores atrás referidos, uma vez que uma possível crise vulcânica associada a um destes ambientes muito particulares poderá relacionar-se com outras catástrofes naturais, nomeadamente quando estas massas de água são libertadas, formando grandes e destrutivos *lahars*.

Segundo Crandel (1971 *in* Blong, 1984), o termo *lahar* é aplicado, de um modo geral, a “uma corrente de lama contendo material rochoso de dimensão muito

reduzida que poderá atingir a dimensão de blocos, em que o material é de origem predominantemente vulcânica” formando depósitos resultantes da “deslocação rápida da massa constituída por este material rochoso mobilizado pela água e que teve origem nos taludes dos vulcões”. A quantidade de água necessária para a mobilização de cinzas vulcânicas e a formação de um *lahar* poderá ser inferior a 30%. Esta corrente de lama avança no terreno e ocupa as zonas mais depressionárias de um vale, aumentando o seu volume sólido com diferentes espécies e tamanho de partículas que se vão agregando à medida que o *lahar* avança no terreno. Este evento poderá percorrer grandes distâncias a elevadas velocidades, ocupar vastas áreas e formar depósitos espessos (Tazieff, 1965 *in* Blong, 1984).

Neall (1976 *in* Blong, 1984) refere-se a *lahars*, mas usa outro termo – *jökulhlaups* – com a particularidade desta designação se aplicar em concreto ao fluxo de água originado pela ruptura ou rebentamento dos lagos subglaciares. A maioria dos *jökulhlaups* tem ocorrido nos vulcões da Islândia e dos Andes.

Padang (1951 *in* Blong, 1984) e Hadipusumo (1965 *in* Blong, 1984), verificaram que 45 dos 56 *lahars* que ocorreram em 16 diferentes vulcões na Indonésia estavam associados a vulcões que possuíam lagos no interior das suas crateras. Os vulcões que têm dado origem a um grande número de *lahars* primários têm sido, precisamente, os vulcões situados na Indonésia, nomeadamente o vulcão Kelut com 28 eventos deste tipo bem como o vulcão Cotopaxi, no Equador, com 25 *lahars*. O vulcão Kelut no ano de 1919, durante uma erupção vulcânica localizada no fundo deste lago, provocou um *lahar* que foi responsável pela morte de 5110 pessoas. Mais tarde, no ano de 1966, o mesmo vulcão foi responsável por outro *lahar*, o qual vitimou 210 pessoas (Blong, 1984).

Dados do Instituto de Vulcanologia Smithsonian referem que no período compreendido entre 1600-1982 as mortes provocadas por *lahars*, entre todas as vítimas fatais atribuídas aos riscos vulcânicos, rondam os 6%. No entanto, restringindo este estudo estatístico ao período compreendido entre 1900-1982, a percentagem de mortes causadas por este tipo de ocorrências sobe para os 12% (Tabela 2).

A perda de milhares de vidas humanas, bem como a destruição de infraestruturas está bem marcada quando se analisam as estatísticas do número de vítimas associado a cada erupção (Tabela 3; Delmelle e Bernard, 2000). As

erupções vulcânicas e os sismos são muitas vezes considerados como os precursores deste tipo de fenómenos. No entanto, as explicações para o colapso total ou parcial de um edifício vulcânico, contendo um lago no seu interior, poderão não ser assim tão lineares.

Tabela 2 – Mortes provocadas por eventos associados a erupções vulcânicas (Blong, 1984).

Evento	Total de mortes ente 1600-1982	Total de mortes entre 1900-1982
Escoada lávica	985 (0.4%)	85 (0.2%)
Queda de cinza e projecteis balísticos	10953 (4.6%)	3019 (5.8%)
Escoadas piroclásticas e <i>debris</i> avalanches	54995 (23.0%)	36787 (70.4%)
<i>Lahars e jökulhlaups</i>	14746 (6.2%)	6438 (12.3%)
Actividade sísmica	89 (0.04%)	32 (0.06%)
Tsunamis	44356 (18.6%)	407 (0.8%)
Efeitos atmosféricos	63 (0.03%)	3 (0.01%)
Gases e chuvas ácidas	185 (0.08%)	183 (0.4%)
Doenças, fome, etc.	95313 (39.9%)	3163 (6.1%)
Causas desconhecidas	17182 (7.2%)	2133 (4.1%)
Total	238867 (100%)	52250 (100%)

Segundo Lopez e Williams (1993 *in* Kempter e Rowe, 2000), estudos efectuados em alguns vulcões que possuem sistemas geotérmicos demonstraram que a circulação dos fluidos hidrotermais junto ao topo dos vulcões poderá aumentar o risco de catástrofes relacionadas com o desmantelamento do edifício vulcânico. A interacção dos gases magmáticos com a água meteórica de um lago vulcânico poderá resultar na formação de fluidos muito ácidos com capacidade de induzir alterações hidrotermais e provocar a dissolução das rochas. Assim, estas alterações poderão levar ao aparecimento de zonas de fraqueza e provocar instabilidade gravitacional. A coexistência destas zonas de fraqueza com tremores de terra provocados tanto por sismos como por tremor vulcânico poderá ser o precursor do colapso dos edifícios vulcânicos, permitindo a formação de *lahars* (Kempter e Rowe, 2000).

Um outro risco associado aos lagos vulcânicos está relacionado com a libertação súbita de grandes volumes de dióxido de carbono. Apesar da manifestação deste tipo de fenómeno ser mais rara, ele representa sempre grande

perigosidade para as populações estabelecidas em redor destes edifícios vulcânicos. Exemplos desta ocorrência são os casos que tiveram lugar em África, nomeadamente nos Camarões, com a desgaseificação de CO₂ dos lagos Monoun (1984) e Nyos (1986) e que, face ao número elevado de vítimas, despertou a atenção da comunidade científica e das entidades oficiais para este fenómeno muito particular (Barberi *et al.*, 1989; Pouchet *et al.*, 1990; Martini *et al.*, 1994; Delmelle e Bernard, 2000).

Tabela 3 – Números de mortes provocadas por *lahars* primários (Blong, 1984).

Erupção	Mortes provocadas por lahars	Total de mortes
Vesúvio, 1631	1750	3500
White Island, 1914	11	11
Ruapehu, 1953	151	151
Galunggung, 1822	3600	4011
Kelut, 1919	5110	5110
Kelut, 1966	210	210
Semeru, 1976	40	40
Agung, 1963	200	1184
Awu, 1966	10	39
Mayon, 1766	46	46
Mayon, 1814	720	1200
Mayon, 1968	3	3
Sakura-jima, 1914	25	62
Sakura-jima, 1974	8	8
Asama, 1783	550	1151
Tokachi, 1926	144	144
Usu, 1977-1978	3	3
Mauna Loa, 1868	31	77
Fuego, 1963	7	7
Irazú, 1963	30	30
Ruiz, 1845	700	700
Cotopaxi, 1845	1000	1000
Villarrica, 1964	25	25
Villarrica, 1971	15	15
Mt Pelée, 1902	25	25
Öraefajökull, 1727	3	3

A maioria dos componentes gasosos emitidos pelos vulcões são tóxicos (SO₂, H₂S, HCl, HF, CO, COS, etc.), mas o dióxido de carbono, igualmente um gás tóxico, é o que apresenta maior perigosidade uma vez que não tende a misturar-se com o ar, é inodoro e invisível e, quando ocorre numa concentração à volta dos 30%, é fatal, embora o perigo da desgasificação de CO₂ possa ser limitado pela sua diluição na atmosfera. Este gás tem a característica de ser uma vez e meia mais denso que o ar e, por isso, quando libertado, tende a percorrer as zonas deprimidas do terreno. Quanto maior for a concentração de gás, maior será a distância que a nuvem consegue atingir. No entanto, a sua libertação poderá aumentar a acumulação de CO₂ quando as condições em que se dá a erupção, a topografia, a geologia e as condições meteorológicas favorecem a sua concentração (Allard *et al.*, 1989; Varekamp e Thomas, 1998).

Pensa-se que para ocorrer este tipo de fenómeno, com acumulação e libertação de grandes quantidades de CO₂, os lagos deverão ser profundos, possuir fontes hidrotermais de baixa temperatura no fundo e apresentar uma clara estratificação de densidade originada pela temperatura. Esta situação permitirá a retenção de gás no fundo do lago devido às águas do fundo e da superfície não se misturarem (Sigurdsson *et al.* 1987; Allard *et al.*, 1989; Sabroux *et al.*, 1990; Kusakabe *et al.*, 2000; Kling *et al.*, 2001). No entanto, a desgasificação súbita de CO₂ revela-se um fenómeno raro, complexo, mal compreendido e de difícil estudo (Kling *et al.* 1989; Ronde *et al.*, 2002).

Este tipo de manifestação é referenciado por Allard *et al.* (1989), em 20 de Fevereiro de 1979, no Complexo vulcânico de Dieng, em Java (Indonésia), a propósito da ocorrência de uma erupção freática na qual morreram 142 pessoas devido à libertação súbita de dióxido de carbono. No entanto, a erupção ocorrida no lago Nyos foi a mais estudada até ao momento.

Na noite de 21 de Agosto de 1986, uma massa tóxica de dióxido de carbono libertada pelo lago Nyos asfixiou 1742 pessoas e um número indeterminado de animais, sem que alguém se tivesse apercebido do que tinha acontecido. Esta nuvem com CO₂ concentrado teve origem no sector norte do lago Nyos, por volta das 20h30, e deve ter atingido a aldeia Nyos antes da meia-noite. Os vulcanólogos que ocorreram ao local desde logo formularam diferentes hipóteses acerca do sucedido, constituindo-se dois grupos com explicações distintas: uns, defendiam que

o ocorrido não era uma verdadeira erupção, enquanto que os outros afirmavam tratar-se, de facto, de uma erupção (Kanari, 1989; Scarth, 1999).

Aquela massa de dióxido de carbono misturada com água foi ejectada do fundo do lago, no flanco meridional, com uma velocidade à volta dos 100 km/h. Este volume de dióxido de carbono ao escapar disseminou-se à volta do lago, perdendo grande quantidade de água à medida que progredia no terreno. Possivelmente, foi libertado nesta erupção cerca de 1 Km³ de dióxido de carbono puro (Scarth, 1999). Pensa-se que esta massa libertada teria uma espessura de 40 metros e desceu a encosta a uma velocidade de 20 a 50 Km/h por acção da gravidade. Quando perdeu a água, tornou-se invisível e mortal, tendo percorrido uma distância total de 23 Km. Praticamente não houve nenhum aviso prévio para esta ocorrência. Um curandeiro local informou que no dia 19 do corrente mês a erva ao redor do vulcão tinha ficado vermelha e algumas pessoas testemunharam que no dia 21 de Agosto às 16 horas ouviram um gorgolejar vindo do lado do lago e as suas águas estavam a fumegar ligeiramente. Por volta das 20 horas alguns habitantes da aldeia Cha, situada a 6 km do lago, ouviram alguns ruídos e sentiram um tremor de terra; entre as 21h30 e as 22h00 ouviram mais dois ou três ruídos semelhantes a detonações.

Segundo o testemunho de um habitante local, a água começou a jorrar à superfície do lago por volta das 20h30, formando uma nuvem cheia de vapor que ascendeu do lago e se espalhou ao longo das paredes do vulcão. Por volta das 22 horas, a nuvem de vapor envolveu a casa da testemunha, situada a 120 metros do lago, conforme o seu testemunho: “Quando me pus a pé (...) a minha cabeça doeu”. Quando a testemunha se dirigiu a outra casa viu um filho a sair para a rua e a cair. Deitou o filho na cama e convidou o vizinho, que se encontrava muito confuso, para se abrigar na sua casa. Nenhum dos dois perdeu completamente a consciência. No entanto, só por volta da 1 hora da manhã é que a nuvem de gás desapareceu.

Uma outra testemunha que vivia mais acima da aldeia Nyos, a 250 metros abaixo da margem SE do lago, relatou que tinha vivido uma experiência muito semelhante à anteriormente referida, narrando algo de muito semelhante em relação ao ocorrido à superfície do lago. Acrescentou que a água de início tinha ficado vermelha e que quando a nuvem de vapor começou a subir, a água do lago tinha ficado branca. Esta testemunha, juntamente com um seu vizinho, observaram a nuvem a libertar-se do lado sudoeste da margem do lago. Este sobrevivente foi a casa buscar um candeeiro de petróleo e entrou na nuvem, o que nos permite

concluir que a extremidade da nuvem deveria ter ar suficiente para permitir a respiração e manter o candeeiro aceso. Na manhã seguinte, a mesma testemunha relatou ao seu vizinho que o vapor da nuvem tinha queimado a sua pele e que tinha havido uma tragédia, pois um dos seus três filhos e todo o seu gado tinham morrido. Todos os sobreviventes estavam muito confusos com o sucedido. Cerca de 600 pessoas da aldeia Nyos tinham morrido e apenas 6 sobreviveram. O mesmo se tinha passado na vizinha aldeia de Kam.

A maioria dos seus habitantes devem ter sido apanhados desprevenidos e muitos morreram nas suas camas. Os que ainda estavam acordados não devem ter-se apercebido do que estava a acontecer. Os sobreviventes relatam que ouviram os pássaros a bater as asas e vento forte a fustigar as árvores. Alguns afirmaram sentir um cheiro a ovos podres ou a pólvora que se assume como resultante dos gases associados a este evento (respectivamente sulfureto de hidrogénio e dióxido de enxofre).

O CO₂ deve ter permanecido tempo suficiente para matar muitos dos que perderam a consciência nas aldeias de Nyos e Kam, juntamente com os animais. A aldeia de Nyos situa-se a 900 metros a Norte do lago Nyos, entre dois rios. Parte do CO₂ seguiu para NW em direcção à aldeia de Cha, onde 58 pessoas morreram e 130 sobreviveram. Nesta aldeia, esta nuvem mortífera seguiu para Norte dentro do vale do rio Mbum onde foi eventualmente diluído pelo vento vindo de Sul, mas a concentração de gás ainda foi suficientemente forte para matar algumas pessoas perto da povoação de Koskin, situada a 23 km de distância do lago Nyos. Uma outra fracção desta nuvem deslocou-se para NE, acompanhando o vale do rio Kumbi e atingindo uma distância acima dos 15 km a partir do lago, na povoação de Subum. De uma população de 800 pessoas, metade morreram. No total esta nuvem de CO₂ cobriu 34,6 km² antes de ter sido diluída e foi estimado que 1742 pessoas e 6000 animais domésticos foram asfixiados. Na sexta-feira seguinte ainda se verificava que algum gás se ocultava nas maiores depressões existentes na aldeia de Cha.

Entretanto o lago Nyos tinha outro aspecto. Um piloto de helicóptero habituado a observar o lago, afirmava que no dia 22 o lago tinha mudado de cor, para um tom laranja-claro. Uns dias mais tarde, uma equipa de investigadores italianos, registaram uma temperatura de 30°C a uma profundidade de 2 metros, ao contrário da temperatura normal do mês de Agosto que era de 23°C. A temperatura do lago só voltou à normalidade a partir de 15 de Setembro. Houve mais emissões

de gás nas últimas duas semanas de Dezembro de 1986 e a meados de Janeiro de 1987, mas em muito menor escala.

Apesar de se pensar que toda esta tragédia ocorreu sem qualquer precedente, sabe-se que a 16 de Outubro de 1977 se verificou uma erupção do mesmo género, mas a comunidade científica internacional nunca tomou conhecimento desta ocorrência, a qual matou muitas pessoas que estavam a observar o que se passava no lago.

O lago Monoum, situado a 100 km para Noroeste do lago Nyo, também registou uma erupção do mesmo tipo no dia 15 de Agosto de 1984, durante a qual morreram 34 pessoas. Uma equipa de investigadores americanos concluiu que o CO₂ foi diluído durante um largo período de tempo nas camadas mais profundas do lago, devido à pressão da água. A hipótese que propuseram para que tal situação ocorresse terá estado relacionada com o desaparecimento súbito da estratificação da água provocada por um desmoronamento de terra, um tremor de terra ou mesmo por pluviosidade anormal (Scarth, 1999). Para Sigurdsson (1987), a difusão de CO₂ neste lago deveu-se ao desmoronamento de parte do edifício vulcânico que ocorreu no interior do lago e promoveu, em larga escala, a mistura da água. Como consequência desta *reviravolta* da água do lago, o CO₂ libertou-se das camadas mais profundas. Assim, quando as camadas de água mais profundas atingiram a superfície do lago e como aí a pressão é muito menor, o gás mais facilmente se libertou. Esta equipa colocou a hipótese de que o mesmo poderá ter acontecido no lago Nyo em Agosto de 1986.

O testemunho de quem presenciou o evento tem grande importância para a comunidade científica, para que se percebam e se possam explicar estas ocorrências. No entanto, os cientistas chegaram ao local passados alguns dias ou semanas, o que serve de base para que alguns defendam que os sobreviventes já não teriam uma ideia clara das ocorrências. Para além do facto de algumas testemunhas já terem modelado o que se teria passado, a língua também poderia ser uma barreira para a comunicação entre os cientistas e a população local, uma vez que existem na região à volta de 30 dialectos diferentes.

Muitos dos sobreviventes também afirmaram que sentiram o cheiro a ovos podres e a pólvora. Estes gases são muitas vezes libertados nas erupções vulcânicas e não são expelidos aquando da mistura de estratos da água do lago. Para aqueles que suportam a hipótese da mistura de estratos da água do lago, as

pessoas só se aperceberam destes cheiros quando estavam a ficar inconscientes, o que constitui o resultado de uma “alucinação olfactiva”. No entanto, os que são contrários a esta hipótese afirmam que não existe este tipo de alucinação na literatura médica (Scarth, 1999).

Como muitas pessoas foram internadas, há quem defenda que o questionário médico e os comentários das primeiras pessoas que ocorreram ao local tenham levado a que alguns alterassem a percepção que inicialmente tiveram do ocorrido. No entanto, de todos os sintomas que as vítimas sofreram, as queimaduras de pele são, para alguns cientistas, o resultado de uma verdadeira erupção, uma vez que a mistura de águas do lago nunca poderia provocar uma nuvem de gás que provocasse queimaduras. Com efeito, para que isto tivesse ocorrido, só um fenómeno que pudesse provocar um aumento da temperatura, como uma erupção, serve como explicação plausível. Apesar do passar do tempo, a polémica existente quanto à explicação deste fenómeno ainda persiste (Scarth, 1999).

Rice (2000) apresenta uma outra explicação para o ocorrido em Agosto de 1986 no lago Nyos, suportando a teoria da não erupção. Este autor define o sucedido como *rollover* um termo usado na engenharia para descrever a rápida e precipitada desestabilização de uma estratificação aparentemente estável num fluido, provocando a auto-mistura e a homogeneização. Quando existe uma estratificação estável, isso significa que os fluidos mais densos estão subjacentes aos fluidos menos densos. Na observação deste *rollover*, ele acontece com violenta exsolução dos voláteis dissolvidos, isto é, a desgasificação com alguma ignição ou sinal de relâmpagos, choques ou explosões em condutas. A precipitação e a súbita e completa mistura entre as camadas mais profundas com as camadas mais superficiais são causadas pelo desequilíbrio entre a camada mais superficial e a mais profunda antes de ocorrer novo equilíbrio entre a temperatura e a composição química das águas.

Este fenómeno, para ocorrer, necessita que a camada subjacente, mais densa, seja aquecida ou mais aquecida do que as camadas superiores, isto é, deve haver um fluxo quente, neste caso, hidrotermal, no sistema. Assim, ou há a saída sob pressão de maiores temperaturas nas camadas mais profundas, mas não necessariamente na mais profunda, ou há um arrefecimento das camadas mais superficiais, mas não necessariamente da mais superficial. Assim, os fluidos neste sistema ganham invariavelmente um fluxo convectivo. Se as camadas mais

profundas do sistema possuírem voláteis poderá ocorrer uma exsolução muito rápida, isto é, de forma explosiva, com a perda de calor ao atingir as camadas mais superficiais. Este movimento circular acelera o fenómeno constante de *rollover* que liberta o gás promovendo a perda de densidade. Segundo o autor, este fenómeno de *rollover* não é restrito às experiências industriais, podendo também ocorrer nos lagos e, por isso mesmo, ter sido a causa do desastre no lago Nyos.

Kling (1989), defende que a ocorrência desta catástrofe está relacionada com a perda de estabilidade da água do lago mais susceptível de acontecer no mês de Agosto. Um aspecto intrigante acerca da libertação desta nuvem de CO₂ do lago Nyos e também do lago Monoun em 1984, neste caso em menor quantidade, é que ambas as ocorrências aconteceram no mês de Agosto e separadas no tempo por dois anos. Pensa-se que houve uma tendência durante aquele período de tempo para que a temperatura do ar diminuísse nesta região dos Camarões. Assim, julga-se que a estratificação existente no lago tenha enfraquecido a ponto de ter sido a responsável por este evento.

1.3 - Monitorização

Os lagos vulcânicos que se situam nos edifícios vulcânicos activos são sistemas activos dotados igualmente de uma dinâmica particular. Estes interagem com material de origem magmática, sendo reservatórios naturais onde ocorre a condensação natural dos gases vulcânicos, de fluidos hidrotermais e, por vezes, onde existe a acumulação de fluidos extremamente acidificados. Assim, as mudanças no fluxo de calor e as taxas de desgaseificação que poderão ocorrer no interior destas massas de água correspondem a uma variação na composição química e física das propriedades das águas dos lagos. O estudo dos lagos vulcânicos permite um melhor conhecimento acerca destas propriedades físicas e químicas associadas às erupções magmáticas e, principalmente, acerca das modificações a nível térmico e químico que poderão preceder uma erupção vulcânica (Delmelle e Bernard, 2000; Ohba, 2000).

Há todo um interesse no acompanhamento destas variações nestes lagos devido ao potencial de perigosidade que representam para as populações que habitam as áreas localizadas ao redor destes edifícios vulcânicos. Assim, as

mudanças que estes fenómenos de origem magmática poderão induzir nas características físico-químicas dos lagos servem, geralmente, de linha de base para a monitorização dos mesmos. A hidrogeoquímica relacionada com a actividade vulcânica de um lago poderá ser uma ferramenta de extrema importância para monitorizar a actividade vulcânica, quando combinadas com outras técnicas aplicadas no estudo do vulcanismo. Uma vez que os lagos vulcânicos também poderão ser a fonte de possíveis *hazards* (*lahars*, poluição atmosférica, difusão de gases tóxicos, etc.) relacionados directamente com erupções que poderão ocorrer dentro dos lagos vulcânicos, a sua monitorização revela-se fundamental (Takano e Watanuki, 1990; Pasternack e Varekamp, 1994; Martínez *et al.*, 2000).

Apesar de só recentemente se ter prestado uma maior atenção ao estudo dos lagos vulcânicos, existem vários estudos em muitos vulcões espalhados por uma vasta área geográfica no mundo. Muitos destes estudos estão compilados numa edição especial do *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Vol. 97, 2000), encontrando-se parte deles relacionados com a monitorização executada em lagos vulcânicos situados em vulcões activos. No entanto, nos Açores, o estudo hidrogeoquímico de lagos e as suas relações com o ambiente vulcânico têm sido muito raros, com excepção das contribuições de Martini *et al.*, 1994; Cruz *et al.*, 2002; Cruz *et al.*, 2003a; Cruz *et al.*, 2003b. Assim, torna-se premente o estudo destes lagos, nomeadamente na construção de uma linha de base para as características endógenas de cada lago.

1.4 – Objectivos e Estrutura da Dissertação

No presente trabalho, procedeu-se a uma sistematização das características físicas e químicas dos principais lagos vulcânicos da ilha de São Miguel e da ilha Terceira. Acerca dos principais lagos das restantes ilhas do Arquipélago dos Açores, fez-se uma compilação dos dados geoquímicos que se encontram publicados. Deste modo, determinou-se a sua variação espacial, temporal e em profundidade com o intuito desta caracterização hidrogeoquímica poder ser utilizada num eventual esquema de monitorização vulcanológica.

Quanto à estrutura da presente dissertação, no primeiro capítulo, encontra-se uma breve síntese dos lagos vulcânicos no mundo, no que diz respeito à sua

localização e características gerais, à descrição de algumas catástrofes mais susceptíveis de ocorrer aquando de uma erupção vulcânica, à possibilidade de monitorização das erupções vulcânicas a partir destas massas de água e, por último, apresentamos os objectivos do presente trabalho, assim como a sua estrutura.

No segundo capítulo, encontra-se uma breve caracterização dos lagos vulcânicos dos Açores.

Tendo em conta os objectivos essenciais deste estudo, no terceiro capítulo, procedeu-se à análise hidrogeoquímica dos principais lagos vulcânicos do Arquipélago dos Açores, com particular ênfase no que diz respeito à amostragem de Verão.

Seguidamente, no quarto capítulo, tecem-se algumas considerações finais respeitantes à temática em estudo.

Por último, no quinto capítulo, encontram-se todas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação

No encerramento deste trabalho, apresentam-se sete anexos respeitantes aos perfis enunciados no terceiro capítulo, utilizados na discussão dos perfis executados nalguns lagos.

2 – LAGOS VULCÂNICOS DOS AÇORES

2.1 – Sua Distribuição

O levantamento dos sistemas lacustres no Arquipélago dos Açores está documentado no recente estudo elaborado pela DROTRH-INAG (2001), relativamente ao Plano Regional da Água.

Segundo esta fonte, existem 88 lagos distribuídos pelas ilhas de São Miguel, Terceira, Pico, Flores e Corvo. Calcula-se que para o volume total de água contido nos lagos dos Açores 93% deste volume se situa na ilha de São Miguel. As lagoas existentes na ilha das Flores contribuem com 5% do volume total de águas das lagoas e os restantes 2% correspondem aos vários lagos situados nas ilhas da Terceira, Pico e Corvo.

Ao longo da nossa investigação, confrontamo-nos com diferentes estudos onde é divergente o número de lagos existentes nas diferentes ilhas, devido aos critérios discrepantes utilizados na classificação dos mesmos. No entanto, é evidente que a ilha que possui maior número de lagos, os quais apresentam água durante todo o ano, é a ilha de São Miguel, sendo também esta ilha aquela que exhibe lagoas com maior volume de água (Porteiro, 2000).

2.2 – Características dos Lagos

Nas ilhas de São Miguel e Terceira, onde se realizaram as diversas amostragens de água, foram escolhidos 25 pontos de amostragem nos diferentes lagos estudados (Fig. 4). As características destes lagos vulcânicos encontram-se sumariadas na Tabela 4, onde é referenciada a respectiva designação da massa de água, a ilha onde se situa, a sua altitude, a área, a profundidade máxima, o volume e a classificação geológica.

Os lagos vulcânicos estão situados entre os 333 e os 836 metros de altitude (média = 625.4m; mediana = 636.5m; Fig. 5A). A altitude mínima corresponde à lagoa das Sete Cidades na ilha de São Miguel e a cota máxima à lagoa Negra, na ilha Terceira. Como se verifica na Tabela 4, os lagos de maior área, Fogo (5.1 km²),

Furnas (12.5 km²) e Sete Cidades (18.4 km²), apresentam todos a mesma gênese, isto é, estão situados em caldeiras de colapso e no seu conjunto a um valor médio de 12.0 km², sendo a sua mediana igual a 12.5 km². No entanto, a maioria dos lagos possuem áreas substancialmente mais pequenas (média = 1.9 km²; mediana = 0,1 km²), o que se denota pela classe modal observada no respectivo histograma (0-3.1 Km²; Fig. 5.B).

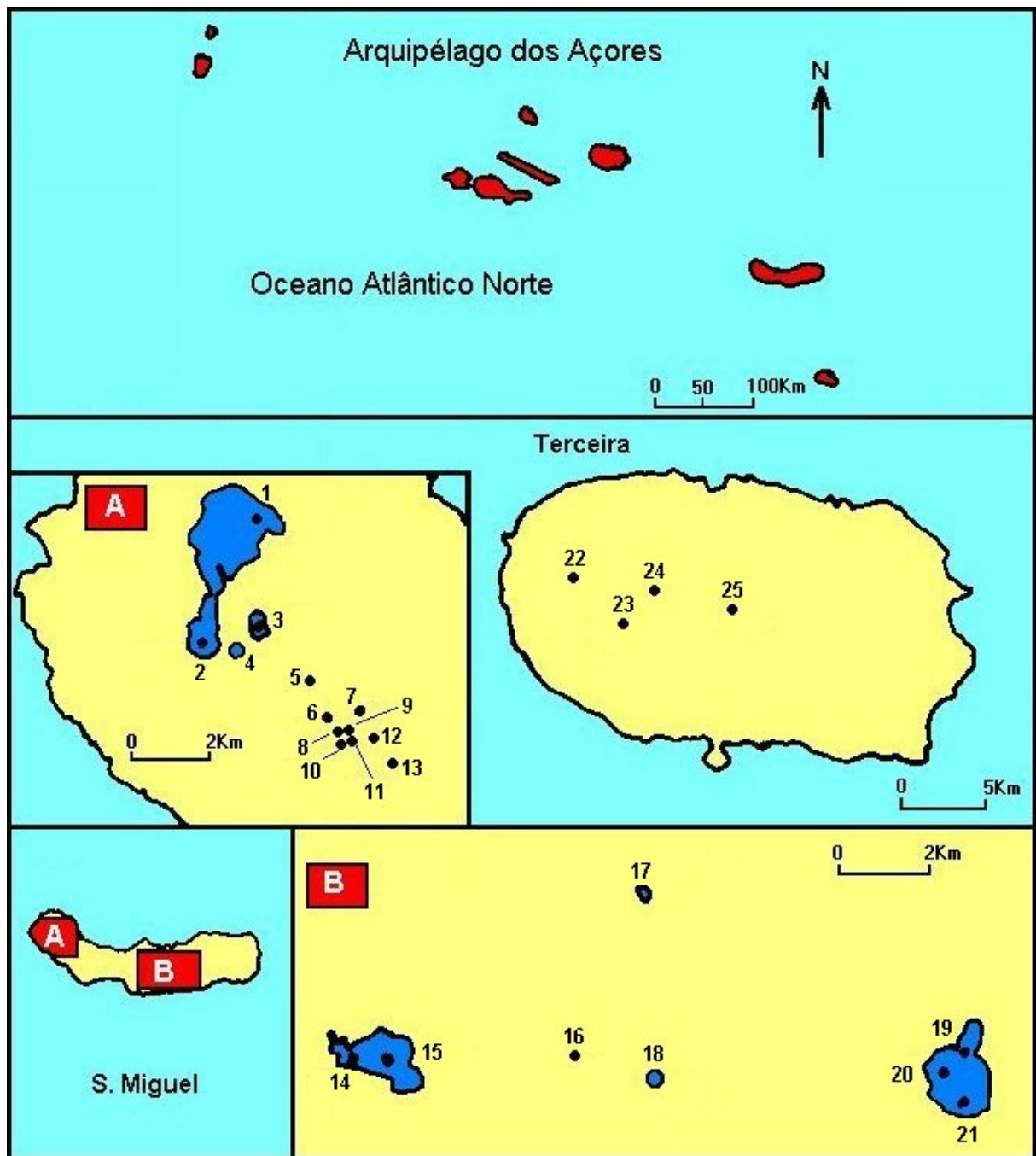


Fig. 4 – Localização dos pontos de amostragem realizados nas ilhas de São Miguel e Terceira.

Tabela 4 – Localização dos lagos em estudo e suas características físicas. CE – cone de escórias; CC – cratera de colapso; M – maar (s. l.); CPP – cone de pedra pomes; d – depressão indiferenciada; icv – interior de concavidade vulcânica. a – HP (1986); b – Ogawa (1989); c – Porteiro (2000); d - Azevedo (1998); e – Dias (1986); f – SEE/OGVA (não publicado). Todos os outros resultados foram calculados por Constância *et al.* (1997) ou determinados no decurso do presente trabalho.

Ilha/Lagoa	Altitude (m)	Área da lagoa (Km²)	Profundidade máxima (m)	Volume (10³m³)	Classificação geológica
São Miguel					
Achada	561	-	-	11.5	CE
Areeiro	630	1×10 ⁻²	2.7	-	CE
Cald. Grande	720	1×10 ⁻²	2.5	11.5 ^c	CE
Canário	758	16×10 ⁻²	3.0	18.8 ^c	M
Carvão	710	44×10 ⁻²	2.0	10.6 ^c	d
Congro	487	24×10 ⁻²	18.0	280.8 ^c	M
Éguas	807	4×10 ⁻²	0.8	3.9 ^c	CE
Empadadas N)	778	9×10 ⁻²	5.3	37.0 ^c	CE
Empadadas(S)	783	7×10 ⁻²	3.0	4.9 ^c	CE
Fogo	634	5.06	24.0	18040.8 ^c	CC
Furnas	429	12.45	12	9212.5 ^c	CC
Pau-pique	700	-	4.5	-	CE
Peixe	662	6×10 ⁻²	1.5	2.4 ^c	CE
Rasa (S. C.)	545	27×10 ⁻²	4.0	754.1 ^c	M
Rasa (S. D.)	825	15×10 ⁻²	0.8	12.2 ^c	d
São Brás	639	33×10 ⁻²	2.3	56.2 ^c	CPP
Santiago	355	0.24	29.0	-	CPP
S. Cidades	333	18.36	22.0	47760.5 ^c	CC
Terceira					
A. do Carvão	502	8.9×10 ^{-4f}	15.0 ^f	-	icv
Falca	500	2.2×10 ⁻³	3.0	6.6 ^c	d
Negra	836	4×10 ⁻³	4.0	12.0	d
Negro	564	11×10 ⁻²	3.0	11.3	d

A profundidade máxima dos lagos varia entre os 0,8 metros, que se verifica na lagoa das Éguas, e os 29 metros atingidos na lagoa de Santiago (média e mediana iguais a 14m) (Tabela 4). Os lagos com maior profundidade são aqueles que estão localizados em caldeiras de colapso, que por sua vez correspondem aos

que possuem maior área superficial (Fogo, Furnas e Sete Cidades). Geralmente, os lagos inseridos em estruturas de origem hidromagmática (maars, *s. l.*) apresentam, as maiores profundidades, apesar de possuírem áreas superficiais relativamente reduzidas (Timms, 1992; Wetzel, 1993; Delmelle e Bernard, 2000). Este é o caso dos lagos estudados no presente trabalho, sendo a lagoa de Santiago aquela que possui maior profundidade entre todas as massas de água estudadas (Fig. 5C). Estes lagos, com dimensão e profundidades consideráveis, estão presentes em número reduzido. Mais de 67% dos lagos vulcânicos estudados possuem profundidades inferiores a 5 metros (Fig. 5C). Assim se compreende que a maioria dos lagos possua pequenos volumes de água (média = $4236 \times 10^3 \text{ m}^3$). De entre todos os lagos dos Açores, a lagoa das Sete Cidades é o lago que apresenta maior volume de água ($47760.5 \times 10^3 \text{ m}^3$), enquanto que a lagoa do Peixe é a que possui menor volume de água: ($2.4 \times 10^3 \text{ m}^3$).

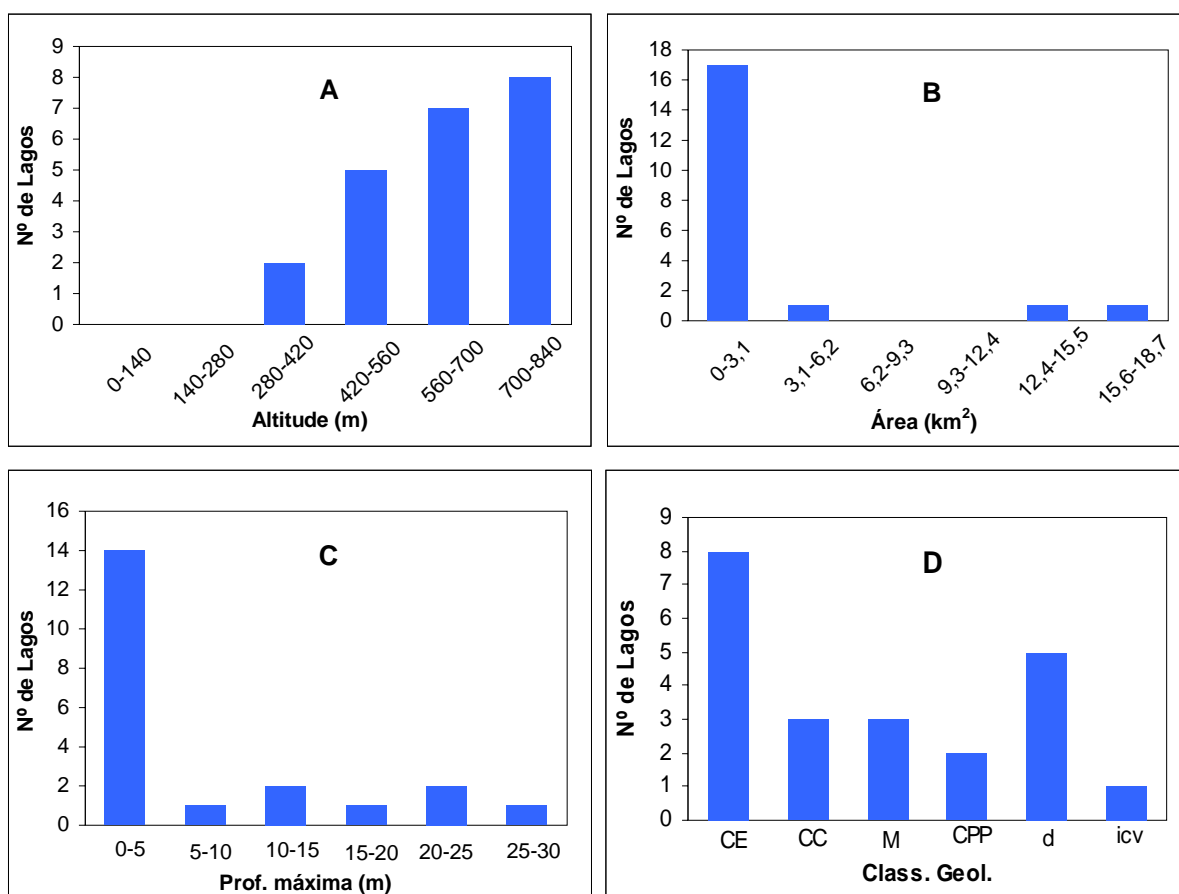


Fig. 5 – Distribuição da classe modal relativamente à altitude, à área, à profundidade máxima e à classificação geológica. CE – cone de escórias; CC – cratera de colapso; M – maar (*s. l.*); CPP – cone de pedra pomes; d – depressão indiferenciada; icv – interior de concavidade vulcânica.

A maioria dos lagos da Tabela 4, (72.7%), estão situados no interior de cones de explosão. Em cones de escória localizam-se 36.4%, em *maars* (s. l.) 13.6% e, igualmente, 13.6% destes lagos situam-se em caldeiras de colapso que correspondem aos lagos de maior área superficial e de profundidade considerável. No entanto, não significa que correspondam forçosamente aos de maior profundidade.

Os lagos associados a depressões topográficas de origem indeferenciada têm uma representação mais reduzida (22.7%), enquanto que 4.5% dos lagos se situam no interior de grutas vulcânicas.

Verifica-se assim que 72.7% das massas de água estudadas estão relacionados com crateras ou caldeiras, o que é coincidente com o que se observa em relação aos lagos vulcânicos no mundo. De acordo com Delmelle e Bernard (2000) e Varekamp e Kreulen (2000) a presença de lagos localizados em estruturas originadas por escoadas lávicas é menos frequente.

3 – HIDROGEOQUÍMICA

3.1 – Considerações Gerais

Existindo um número significativo de lagos vulcânicos na ilha de São Miguel, todos eles foram alvo de caracterização hidrogeoquímica, à excepção de pequenos lagoeiros com áreas e profundidades muito reduzidas que se situam em locais não muito distantes de outros pontos de amostragem.

O estudo das características físicas e químicas destas águas baseou-se na amostragem e posterior análise de um ou mais pontos em cada lagoa, consoante a sua área e profundidade, tendo sido executados perfis em grande número dos pontos de amostragem. Esta metodologia permitiu caracterizar os lagos em profundidade, fornecendo dados pioneiros relativamente à variação dos parâmetros estudados na coluna de água, principalmente nos lagos de maior profundidade.

O mesmo estudo foi efectuado nas lagoas da ilha Terceira e no Algar do Carvão, efectuando-se a recolha de águas superficiais e imediata análise na determinação do pH, temperatura, CO₂ livre e alcalinidade. As restantes determinações foram realizadas no laboratório.

Efectuaram-se duas campanhas de amostragem, uma no período do Verão (no mês de Julho de 2002) e a segunda e última no período de Inverno (no mês de Janeiro de 2003). No total, foram recolhidas e analisadas cerca de 380 amostras de água. Assim, foi possível efectuar uma primeira caracterização das propriedades físicas e químicas das águas das lagoas, que até então era inexistente.

Com efeito, as análises efectuadas nas lagoas, até ao presente momento, foram muito esporádicas e realizadas apenas nas lagoas de maior dimensão e com objectivos completamente divergentes dos propostos no presente trabalho. A maioria destes trabalhos relativos aos lagos dos Açores visa o estudo da eutrofização. Uma síntese destes trabalhos pode ser encontrada em Gonçalves (1997) e Porteiro (2000).

3.1.1 – Metodologia de Amostragem e Análise

A metodologia empregue na determinação dos parâmetros físicos e químicos, tanto no campo como no laboratório, foi a seguinte:

- pH, temperatura e condutividade registados no momento da amostragem com registadores portáteis digitais, WTW 340i.
- CO₂ livre determinado no próprio dia logo após a chegada ao laboratório, por titulação com NaOH até atingir pH igual a 8.30.
- Alcalinidade também determinada no próprio dia, logo após a chegada ao laboratório, por titulação com H₂SO₄ até atingir pH igual a 4.45.
- Cálcio, Magnésio, Potássio, Sódio e Sílica determinados através do método de espectrometria de absorção atómica, utilizando um aparelho com a referência GBC 906AA.
- Cloreto, Fluoreto e Sulfato determinados por cromatografia iónica, tendo sido utilizado um equipamento com a referência DIONEX DX – 100.
- Cloreto obtido por titulação com nitrato de prata através do método de Mohr.
- Sulfato registado por titulação com perclorato de Bário.
- Bicarbonato determinado por cálculo a partir do valor da alcalinidade.

As análises laboratoriais efectuadas após as duas amostragens realizadas no âmbito da presente dissertação decorreram no Laboratório de Hidrogeoquímica do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores. Os resultados das análises efectuadas aos catiões e aniões, através da absorção atómica e cromatografia iónica, foram respectivamente comparados com outros dados obtidos através de métodos analíticos diversos, como as titulações atrás mencionadas.

Foram seleccionadas 35 amostras da primeira amostragem e enviadas para o *Activation Laboratories, Ltd.* (Canadá), onde foram analisados os elementos maiores, menores e em traço por espectrometria de massa com fonte iónica de plasma (ICP/MS).

A recolha de amostras superficiais efectuou-se com garrafas de polietileno de 1000 ml e 250 ml sem ter sido efectuado qualquer tipo de tratamento no campo. As amostragens de profundidade foram efectuadas com recurso a uma garrafa amostradora da marca SEBA com um volume de 1000 ml, sendo por sua vez transferido o seu volume para as garrafas de polietileno. Os perfis foram executados mediante a utilização de um barco pneumático de 4 metros de comprimento, com excepção dos perfis realizados nas lagoas das Sete Cidades, Fogo e Furnas, nas quais foi disponibilizado o barco da Direcção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos (Secretaria Regional do Ambiente).

As garrafas com volume de 250 ml foram conservadas no frio imediatamente após a recolha da amostra, para posterior análise à chegada ao laboratório do teor em CO₂ dissolvido e da alcalinidade. Uma fracção das amostras transportadas em garrafas com volume de 1000 ml foi filtrada a 0.45 µm para as determinações por cromatografia iónica, e outra, também filtrada, foi acidificada com 1 ml de ácido nítrico ultrapuro para as análises por absorção atómica. Parte daquele conteúdo foi do mesmo modo filtrado a 0.1 µm, acidificado com ácido nítrico ultrapuro e acondicionado em frascos de polietileno de 50 ml de volume para serem submetidas a análise por ICP-MS, no Canadá. O volume remanescente foi utilizado para a determinação de cloretos e ião sulfato por titulação.

Os resultados obtidos através dos diferentes métodos analíticos foram submetidos a um programa informático de tratamento gráfico AQUACHEM v.3.7 (waterloo hydrogeologic, 1998-1999), e um programa de especiação e cálculo do estado de equilíbrio água-rocha HIDSPEC (Carvalho, 1989). Este último programa recorre a uma base de dados actualizada e determina a especiação de 68 espécies dissolvidas (iões, pares de iões e complexos constituintes das espécies em solução na água) e o estado de equilíbrio em relação a 55 minerais. Para além destes valores, utilizou-se uma base de dados referente ao quimismo dos lagos vulcânicos dos Açores, compilados a partir de trabalhos já publicados no âmbito das actividades do Laboratório de Hidrogeoquímica da Universidade dos Açores ou por outros autores relativamente aos lagos da ilha do Corvo (Cruz *et al.*, 2002), da ilha do Pico

(Cruz *et al.*, 1997 e 2002), da ilha da Graciosa (Cruz *e tal.*, 2002) e da ilha das Flores (Azevedo, 1998).

3.2 – Caracterização Hidrogeoquímica dos Lagos

3.2.1 – Parâmetros Físicos

3.2.1.1 – Temperatura

O resultado estatístico dos parâmetros físicos utilizados na caracterização hidrogeoquímica das águas dos lagos está presente na Tabela 5.

Tabela 5 – Estudo estatístico dos parâmetros físicos, temperatura e condutividade eléctrica das águas dos lagos. A letra **V** corresponde aos valores das amostragens realizadas de Verão e a letra **I** às de Inverno.

		Nº Amostras	Min.	Máx.	Média	Mediana	D. Padrão	C. Variação %
T (°C)	V	183	11,9	24,6	18,1	18,1	2,6	14,5
	I	187	5,1	15,1	12,4	13,1	2,1	16,7
Cond. (µS/cm)	V	183	26,0	623,0	98,6	106,0	54,4	55,2
	I	187	35,0	143,0	93,7	103,0	34,6	36,9

A temperatura da água dos lagos é fundamental para o equilíbrio daqueles sistemas, na medida em que tem uma acção directa nas reacções químicas que ocorrem nas águas, assim como na solubilidade dos gases e dos minerais. Esta característica é dinâmica, podendo alterar-se sazonalmente, durante o tempo geológico ou devido à influência de manifestações vulcânicas (Wetzel, 1993).

Na análise efectuada durante o Inverno, registou-se a menor temperatura na lagoa de São Brás (5.1°C), enquanto que na estação mais quente a temperatura máxima registada foi de 24.6°C, na lagoa do Caldeirão. No entanto, a amplitude térmica de Verão foi de 12.7°C e de Inverno de 10°C.

O valor médio da temperatura no Verão foi de 18.1°C e no Inverno foi de 12.4°C, sendo estes valores inferiores aos da temperatura ambiente, os quais permitem classificar as águas dos lagos como frias (Delmelle e Bernard, 2000). Os valores da mediana estão muito próximos dos valores médios, enquanto que o

desvio padrão máximo se regista na amostragem de Verão. Como se pode constatar, este valor de 2.6°C é pouco significativo. Relativamente ao coeficiente de variação, pode-se verificar que, nas duas amostragens efectuadas, os valores mais dispersos estão situados relativamente perto das medidas de tendência central.

Das 57 amostras presentes na Tabela 10, 47 serviram de base para o estudo do padrão modal de cada parâmetro físico e químico, incluindo os elementos maiores. Não foram utilizadas a totalidade das amostragens devido a algumas estarem incompletas.

A classe modal referente às temperaturas (Fig. 6) apresenta uma classe modal que corresponde ao intervalo de temperaturas (17.1-18.7°C), o qual engloba a média e a mediana calculada na Tabela 5.

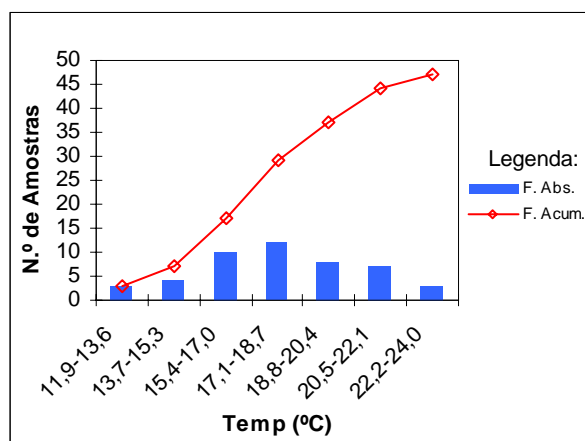


Fig. 6 - Histograma relativo à distribuição dos valores de temperatura.

3.2.1.2 – Condutividade Eléctrica

Outro parâmetro físico em estudo foi a condutividade eléctrica, a qual mede a capacidade da água conduzir corrente eléctrica, uma propriedade resultante do conteúdo em espécies iónicas dissolvidas. A vantagem de utilizar este método quantitativo reside no facto do valor analisado ser directamente proporcional à mineralização total da água, tornando-se numa ferramenta eficaz e de aplicação fácil na medição deste parâmetro (Cruz, 1997).

Analisando a Tabela 5, verifica-se que os valores da condutividade registados nos lagos variam entre os 26 e 623 $\mu\text{S}/\text{cm}$, os quais indicam que os lagos estudados

possuem uma grande amplitude de valores e correspondem genericamente a águas pouco mineralizadas, como o demonstram os valores da média e da mediana (98.6 e 106.0 $\mu\text{S/cm}$ de Verão; 93.7 e 103 $\mu\text{S/cm}$ de Inverno). À semelhança do parâmetro analisado anteriormente, também a condutividade observada no Inverno foi a que registou menor amplitude de valores, demonstrando serem os resultados mais baixos amostrados.

A condutividade média mais elevada (98.6 $\mu\text{S/cm}$) registou-se no Verão, apesar da média de Inverno ser muito próxima deste valor (93.7 $\mu\text{S/cm}$). O desvio padrão e o coeficiente de variação apresentam resultados muito semelhantes com índices relativamente elevados, verificando-se a existência de valores que se afastam da média.

A distribuição da frequência absoluta da condutividade revela um padrão modal assimétrico, no qual os valores estão representados, na sua maioria, nos intervalos de menor valor da condutividade (Fig. 7). Como se observa no gráfico da figura abaixo indicada, os lagos possuem baixos valores de condutividade e estão praticamente todos representados nos intervalos de valores mais baixos, inferiores a 196 $\mu\text{S/cm}$.

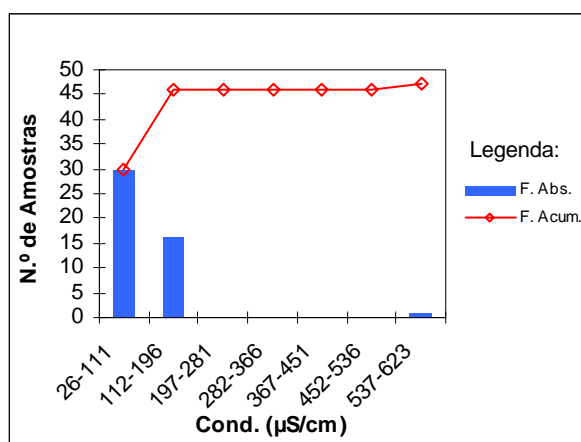


Fig. 7 - Histograma relativo à distribuição dos valores de condutividade.

Da classe modal (26-111 $\mu\text{S/cm}$) fazem parte todas as amostragens de superfície efectuadas nos lagos situados nos cones de escória, à excepção da lagoa do Peixe (Ref. 22) e do lago do Algar do Carvão (Ref. 55). As amostragens efectuadas nos lagos localizados em cratera de colapso (Ref. 10-15 e 34-36) e maars (s. l.) (Ref. 17-18) estão incluídas na seguinte classe modal 112-196 $\mu\text{S/cm}$.

3.2.2 – Parâmetros Químicos

3.2.2.1 – pH

O pH tem uma grande importância na caracterização hidrogeoquímica devido a uma possível diminuta variação deste parâmetro nas águas dos lagos poder corresponder a diferentes taxas de lixiviação dos minerais, complexação de metais, oxidação-redução, equilíbrio ácido-base e adsorção (Langmuir, 1997; Cruz *et al.*, 1999).

Este parâmetro fornece uma medida de concentração do hidrogênio H^+ , uma vez que o pH é igual ao logaritmo negativo daquela ($pH = -\log [H^+]$).

O pH dos lagos variou entre 4.91 e 9.78, valores que correspondem à amostragem efectuada no Verão, possuindo esta última também maior amplitude de valores, como demonstra a Tabela 6. Estes resultados denotam que as águas dos lagos possuem propriedades que variam entre águas ácidas e alcalinas. A amplitude dos resultados da amostragem de Inverno foi inferior à de Verão, o que demonstra que as águas neste período variam entre valores mais próximos da neutralidade e que, no entanto, atingem um valor máximo não muito inferior ao de Verão, possuindo também um carácter marcadamente alcalino. Apesar da amostragem de Verão possuir o maior coeficiente de variação (13%), pode-se considerar este resultado como baixo, atendendo a que os valores não são muito dispersos dos de tendência central. Os resultados da média e mediana correspondem a valores de águas alcalinas.

Tabela 6 – Estudo estatístico dos parâmetros químicos pH e CO_2 livre e total das águas dos lagos. A letra **V** corresponde aos valores das amostragens realizadas de Verão e a letra **I** às de Inverno.

		Nº Amostras	Min.	Máx.	Média	Mediana	D. Padrão	C. Variação %
pH	V	184	4,9	9,8	7,2	7,0	0,9	12,7
	I	187	6,8	9,0	7,6	7,6	0,4	5,7
CO_2l (mg/L)	V	154	0,9	27,8	5,6	4,1	5,0	90,0
	I	187	1,6	28,4	4,7	3,8	2,6	56,5
CO_2t (mg/L)	V	155	2,7	64,4	22,7	21,8	15,4	67,4
	I	187	3,4	61,0	22,1	23,0	12,1	54,7

A projecção do histograma relativo ao pH demonstra um padrão com alguma simetria, onde os dois intervalos de valores à volta da neutralidade (6.24-6.65 e 6.66-7.07) são os mais significativos, correspondendo às classes modais (Fig. 8). As classes de pH mais elevado são as menos representadas.

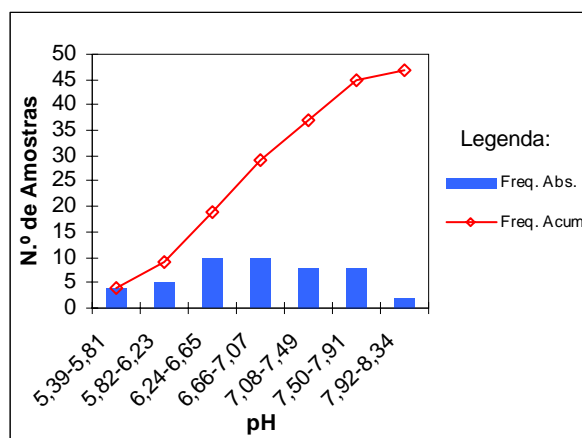


Fig.8 – Histograma relativo à distribuição dos valores de pH.

Os valores que fazem parte das classes modais correspondem, essencialmente, às amostragens executadas a meio da coluna de água e no fundo dos lagos localizados em caldeiras de colapso e maars (s. l.).

3.2.2.2 – CO₂

A concentração de CO₂ na água dos lagos poderá depender de vários factores mais ou menos complexos, tais como os factores biológicos, designadamente a fotossíntese e a respiração, ou de factores de natureza vulcânica. O dióxido de carbono é muito solúvel na água, cerca de 200 vezes mais que o oxigénio, o qual obedece às leis normais da solubilidade de gases para as condições de temperatura e pressão verificadas nos lagos (Wetzel, 1993).

O CO₂ poderá contribuir para o aumento da concentração de outras espécies nas águas dos lagos quando este reage e se transforma em ácido carbónico. Este ácido fraco provoca a lixiviação do material rochoso, libertando catiões metálicos alcalinos e alcalino-terrosos. A solução rica em CO₂ preenche os poros do material sedimentar nos lagos, reagindo com este (Kusakabe *et al.*, 1989). Por outro lado, a

decomposição de matéria orgânica também origina a entrada de CO₂. Devido à conjugação de diferentes processos, o dióxido de carbono poderá acumular-se nas águas mais profundas dos lagos (*hipolimnion*), enquanto que o *epilimnion*, normalmente, possui menor concentração de CO₂ devido à sua libertação para a atmosfera e à sua fixação em resultado da fotossíntese (Aguilera *et al.*, 2000; Berner e Berner, 1996).

Salienta-se que o CO₂ poderá ser a principal fonte de acidificação das águas dos lagos (Varekamp *et al.*, 2000). No entanto, as rochas dos lagos vulcânicos actuam como tampão o que provoca a neutralização das águas mais ácidas através da interacção água-rocha e, conseqüentemente, a entrada em solução de catiões (Aguilera, 2000).

Ao analisar-se o estudo estatístico referente ao dióxido de carbono livre apresentado na Tabela 6, é de salientar o elevado coeficiente de variação relativamente à amostragem de Verão (90.0%). Apesar do mesmo coeficiente na estação fria apresentar um valor mais baixo (56%), podemos depreender que existem muitos valores que se afastam da tendência central nas duas amostragens. No entanto, o desvio padrão apresenta-se baixo para as mesmas análises. Podemos deduzir, a partir da média e mediana, que a maioria dos lagos amostrados possuem baixa concentração relativamente a este parâmetro, mesmo considerando o valor máximo analisado.

Relativamente à distribuição de frequências absolutas de dióxido de carbono livre, o gráfico da Fig. 9 revela uma classe modal constituída pelos menores valores (0.8-26.3 mg/L). Não fazem parte desta classe modal as amostras referenciadas com os números 9 e 51. A restante distribuição das amostras dos lagos é praticamente insignificante (4%) o que revela a baixa concentração de dióxido de carbono nos lagos.

Relativamente ao CO₂ total, verifica-se a existência de lagos que possuem valores que se afastam da média, nomeadamente a amostragem efectuada de Verão, onde se encontra o maior desvio padrão.

O dióxido de carbono total das águas dos lagos amostradas demonstra a mesma tendência do gráfico do dióxido de carbono livre. Assim, as frequências absolutas do dióxido de carbono total apresentam um padrão assimétrico que também é representado pela classe de valores mais baixa, situada entre os 2.5-54.3 mg/L, e que representa 94% do total de amostragens (Fig. 10).

A classe modal não engloba os valores correspondentes às amostragens de maior profundidade da lagoa das Furnas (Ref. 6 e 9) e Furna do Enxofre (Ref. 51).

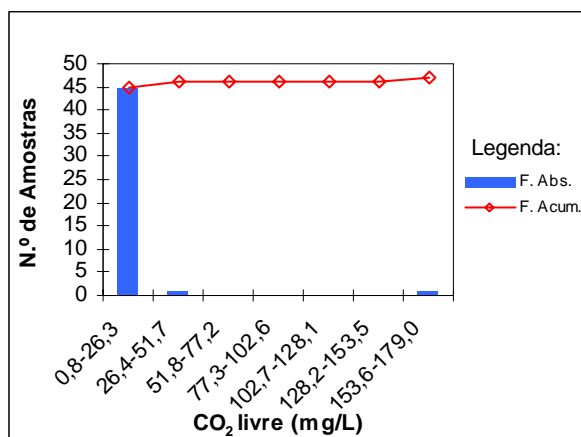


Fig. 9 – Histograma relativo à distribuição dos valores de dióxido de carbono livre (amostragem de Verão).

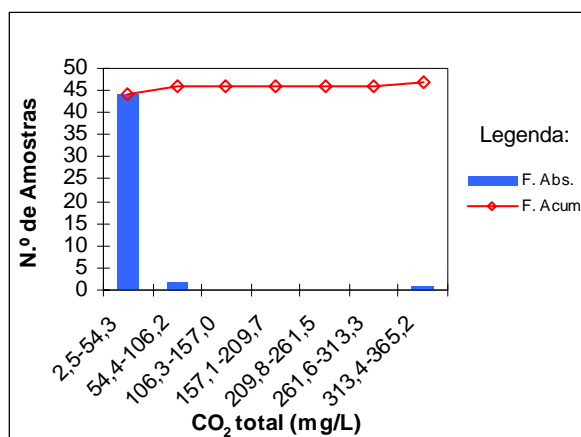


Fig. 10 – Histograma relativo à distribuição dos valores de dióxido de carbono total (amostragem de Verão).

3.2.2.3 – Catiões

Os catiões principais Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ são de grande importância para a monitorização vulcanológica, pois são os mais susceptíveis de alterar a sua concentração em resultado de uma crise vulcânica (Chistenson, 2000).

A dinâmica temporal e espacial destes elementos nas águas dos lagos é marcada por diversos factores que induzem um comportamento que permite classificar estes iões como conservadores ou dinâmicos. Os iões considerados

conservadores sofrem variações de concentração relativamente pequenas devido à utilização biótica ou a modificações ambientais provocadas pelos seres vivos. Exemplos destes iões são o Na^+ , o K^+ e o Mg^{2+} . Relativamente aos catiões considerados dinâmicos, temos o caso do Ca^{2+} , cuja concentração pode ser fortemente influenciada e modificada pelo metabolismo dos organismos residentes nos lagos. Destes quatro elementos, o cálcio é aquele que poderá apresentar maiores variações espaciais como sazonais (Wetzel, 1993).

Nos lagos temperados de águas brandas e isentas da influência de material de natureza magmática a concentração do Ca^{2+} mantém-se muito abaixo dos níveis de saturação, existindo variações sazonais muito pequenas em relação à profundidade. No entanto, em lagos de águas duras há uma dinâmica sazonal bem acentuada. Durante os períodos de circulação da Primavera e do Outono existe uma estratificação bem marcada que se repete anualmente com pequenas variações (Wetzel, 1993).

Durante os meses de Maio a Setembro e durante o período de estratificação de Inverno há um decréscimo acentuado do Ca^{2+} com a precipitação de CaCO_3 . Esta diminuição deve-se à diluição pela chuva e ao aumento da fotossíntese fitoplanctónica e da flora litoral, condições que provocam a redução das concentrações de Ca^{2+} no *epilimnion*. A variação deste elemento contrasta com o comportamento dos outros elementos maiores Mg^{2+} , Na^+ e K^+ e do anião Cl^- que se mantêm relativamente constantes (Wetzel, 1993).

Os resultados estatísticos referentes ao ião Ca^{2+} encontram-se patentes na Tabela 7. Numa primeira abordagem a estes dados, salienta-se de imediato o elevado valor do coeficiente de variação, principalmente na amostragem de Verão (138.2%). A mediana apresenta um resultado inferior ao da média e o desvio padrão é muito baixo, quando se consideram os valores em causa. O elevado valor do coeficiente de variação relativo ao Ca^{2+} deve-se ao valor máximo de Ca^{2+} registado na Furna do Enxofre (Graciosa) e que se afasta de todos os outros.

Os dados de Inverno referem-se unicamente aos lagos de S. Miguel. Assim, podemos observar um coeficiente de variação inferior a metade do registado de Verão, bem como um desvio padrão muito baixo, sinónimo dos valores registados rondarem a média, enquanto que a pequena amplitude dos resultados analisados contribui para o mesmo valor da média e mediana (1.2 mg/L).

Tabela 7 – Estudo estatístico dos cátions, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ nas águas dos lagos. A letra **V** corresponde aos valores das amostragens realizadas de Verão e a letra **I** às de Inverno.

		Nº Amostras	Min.	Máx.	Média	Mediana	D. Padrão	C. Variação %
Ca_2^+ (mg/L)	V	184	0,2	29,5	1,6	1,3	2,3	138,2
	I	103	0,3	2,5	1,2	1,2	0,7	54,3
Mg^{2+} (mg/L)	V	185	0,2	37,7	1,6	1,2	2,7	168,9
	I	103	0,6	2,2	1,3	1,2	0,5	43,0
Na^+ (mg/L)	V	185	2,7	47,3	13,6	14,0	6,3	46,4
	I	103	3,2	23,5	13,6	15,6	6,5	47,9
K^+ (mg/L)	V	185	0,2	19,0	4,5	2,6	4,2	93,2
	I	103	0,5	9,6	3,6	2,5	2,7	76,1

O ião magnésio é um elemento muito mais solúvel na água do que o cálcio. Por isso, nunca há precipitação de quantidades significativas de Mg^{2+} . Só se verifica precipitação de magnésio em quantidades significativas apenas a valores de pH muito elevados (superior a 10) na maioria das condições naturais. Devido às características de solubilidade deste parâmetro e ao facto deste ser necessário aos organismos em pequenas quantidades, as concentrações deste elemento são relativamente constantes, apresentando pequenas flutuações (Wetzel, 1993).

Este ião é um bom elemento para ser aplicado na monitorização vulcânica por não se precipitar combinado com qualquer outra espécie nos lagos vulcânicos (Hurst *et al.*, 1991 e Giggenbach e Glover, 1975).

No entanto, este ião não faz parte das emanações gasosas vulcânicas, mas resulta directamente do contacto entre a água e as rochas. Apesar disso, a sua concentração poderá variar e depender indirectamente da influência de fenómenos vulcânicos (Giggenbach e Glover 1975; Sigurdsson, 1977 in Hurst *et al.*, 1991 e Varekamp, 2002). A adição deste ião às águas dos lagos vulcânicos é sinal de que a água contacta com a rocha a temperaturas e profundidades consideráveis (Hurst *et al.*, 1991).

Relativamente aos resultados estatísticos do parâmetro magnésio que se encontram patentes na Tabela 7, é notória a grande coincidência de valores entre esta espécie e o elemento cálcio. A interpretação efectuada para o ião cálcio é a mesma que se faz para o ião magnésio na amostragem de Verão. O valor muito elevado do coeficiente de variação também se deve ao valor máximo (37.7 mg/L)

obtido na Furna do Enxofre (Graciosa). Constata-se que as medidas de tendência central, a média com um valor de 1.61 mg/L e a mediana com um valor inferior de 1.23 mg/L, indicam que a amplitude de valores é pequena.

Na amostragem de Inverno, constata-se que as medidas de tendência central são muito semelhantes à amostragem de Verão, sendo a média referente ao Inverno ligeiramente inferior à média registada de Verão. Devido à menor amplitude entre o valor máximo e mínimo registado nesta última amostragem, verifica-se um menor coeficiente de variação.

Este catião é responsável pela solubilidade de numerosos sais nas águas naturais. Como a sua concentração é muito estável, apresenta variações sazonais muito pequenas.

As classes modais evidenciadas nos histogramas relativos ao ião cálcio (Fig. 11) e magnésio (Fig. 12) englobam a maioria dos resultados no intervalo mínimo de valores (98%), com excepção dos valores referentes à Furna do Enxofre (Ref. 51).

Os lagos localizados em regiões marítimas recebem frequentemente entradas significativas de sódio, possuindo outros valores devido à influência de sais marinhos (Wetzel, 1993).

Os dados estatísticos relativos ao sódio, presentes na Tabela 7, apresentam uma média praticamente igual nas duas amostragens efectuadas. No entanto, a mediana é ligeiramente superior na amostragem de Inverno. Os dados referentes à amostragem da estação fria dizem respeito unicamente aos lagos situados na ilha de S. Miguel. Ao ser analisado o valor mínimo, máximo e a média desta campanha, facilmente se percebe que os lagos sofreram um enriquecimento deste elemento na estação invernal. O valor da mediana reforça esta análise, uma vez que o valor máximo é superior ao registado durante o Verão. O desvio padrão demonstra que os valores que se afastam da média são superiores na amostragem de Inverno, corroborando a análise já efectuada.

O coeficiente de variação para as duas amostragens manifesta-se ligeiramente alto, pois existem valores que se diferenciam dos de tendência central, dispersão esta que se manifesta ligeiramente maior na estação fria.

A sua concentração também é muito estável nas águas naturais e possui uma distribuição constante nas águas dos lagos com variações sazonais muito pequenas (Wetzel, 1993).

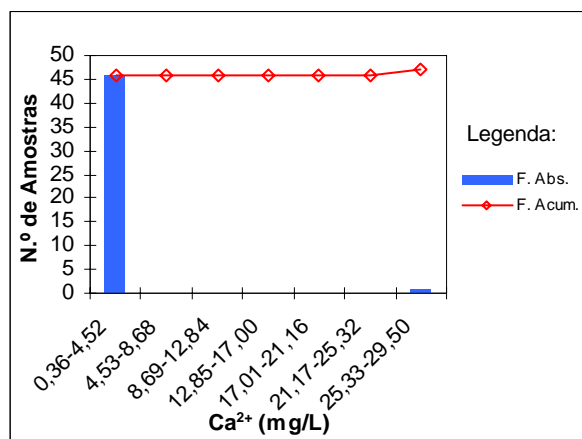


Fig. 11 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião cálcio.

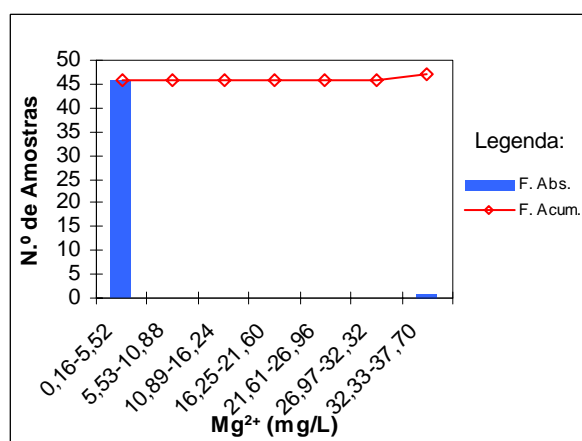


Fig. 12 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião magnésio.

O ião sódio apresenta, na Fig. 13, uma assimetria relativamente às frequências absolutas, daí a existência de uma cauda no sentido dos valores mais elevados.

A classe modal é constituída pelos valores analisados mais baixos 2.68-9.05 mg/L e engloba os lagos de menor superfície e de menor profundidade (55%), bem como a lagoa do Fogo, na medida em que a totalidade das amostragens aí executadas estão incluídas neste intervalo.

À semelhança da análise estatística feita até então para o catião potássio, também se procedeu à contabilização de todos os valores referentes aos lagos dos Açores para a amostragem de Verão, ao passo que para a estação fria só se tiveram em conta os resultados da amostragem efectuada aos lagos de S. Miguel (Tabela 7). Deste modo, verifica-se que o valor máximo registado diz respeito à lagoa da Furna

do Enxofre (19.0 mg/L), resultado este muito superior aos registados nos outros lagos como se pode aferir pela média (4.5 mg/L) e, principalmente, pela mediana (2.6 mg/L). Na amostragem de Inverno o valor máximo é significativamente inferior ao da amostragem de Verão, bem como a média (3.6 mg/L), o desvio padrão (4.2 mg/L) e o coeficiente de variação (93%) são inferiores aos de Verão. Assim, a mediana aproxima-se mais do valor da média na amostragem de Inverno, devido à menor amplitude de resultados observados nesta época o que é também traduzido no menor desvio padrão.

Os resultados de Verão denotam uma maior dispersão de valores em relação aos valores de tendência central, o que se traduz pelo elevado coeficiente de variação registado principalmente no período de Verão.

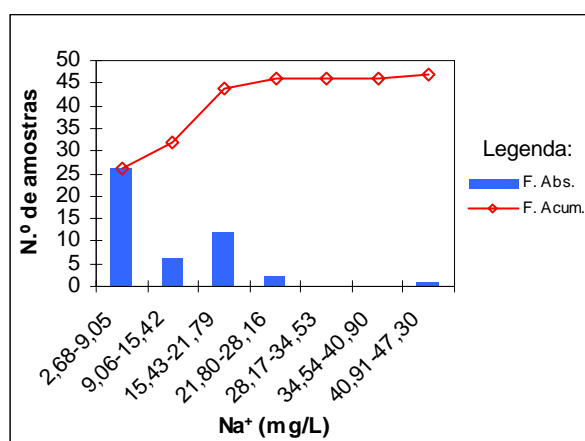


Fig. 13 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião sódio.

A projecção do histograma relativo ao ião potássio (Fig. 14) demonstra a distribuição de frequências absolutas com um padrão com algumas semelhanças ao do ião potássio, em que a classe modal (0.20-2.89 mg/L) engloba 64% dos valores. A cauda da distribuição dos valores é menos representativa e também se projecta no sentido dos valores mais elevados.

Os lagos que constituem esta classe modal, no geral, são os mesmos que constituem a classe modal do ião sódio. No entanto, as amostras da zona Sul da lagoa das Sete Cidades e da lagoa de Santiago fazem parte desta classe.

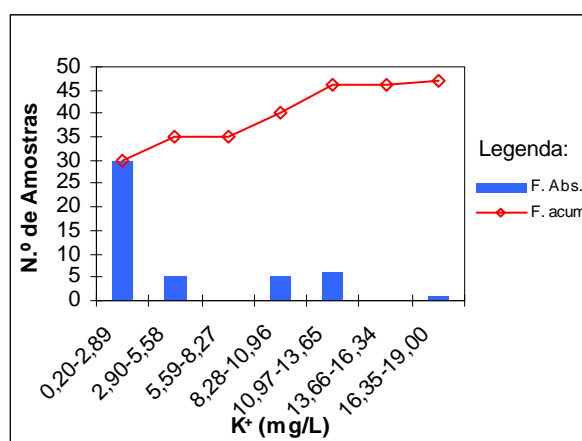


Fig. 14 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião potássio.

3.2.2.4 – Aniões

O resultado do estudo estatístico relativo aos principais aniões estudados encontra-se discriminado na Tabela 8.

Tabela 8 – Estudo estatístico dos aniões Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} nas águas dos lagos. A letra V corresponde aos valores das amostragens realizadas de Verão e a letra I às de Inverno.

		Nº Amostras	Min.	Máx.	Média	Mediana	D. Padrão	C. Variação %
Cl^- (mg/L)	V	185	5,2	71,4	15,2	15,6	4,8	31,4
	I	103	8,2	18,8	14,5	14,9	2,9	20,1
HCO_3^- (mg/L)	V	184	1,2	258,0	25,1	23,2	23,8	94,7
	I	187	1,2	45,8	24,1	24,4	14,5	60,3
SO_4^{2-} (mg/L)	V	185	1,1	37,6	4,0	3,6	2,7	66,9
	I	103	2,3	5,8	3,7	3,8	0,7	20,0

Os aniões Cl^- e SO_4^{2-} , à semelhança dos catiões já descritos, também são de grande importância para a monitorização vulcanológica por serem os mais susceptíveis de alterarem a sua concentração, na ocorrência de uma crise vulcânica (Chistenson, 2000). O anião HCO_3^- também possui igual importância pelas mesmas razões que os aniões acima mencionados. No entanto, a sua variação é indirecta, visto estar dependente da variação do dióxido de carbono.

O Cl^- normalmente não é dominante nos sistemas de lagos abertos. No entanto, à semelhança do ião Na^+ , os lagos das regiões marítimas recebem frequentemente entradas significativas deste elemento, devido ao acarreio de sais marinhos pela precipitação (Wetzel, 1993).

O ião cloreto é um componente menor dos gases vulcânicos, ocorrendo sob a forma de HCl a níveis de 0.1-1.0 vol. % (Gerlach, 1983 *in* Poorter *et al.*, 1989; Hurst, 1991). Mas, o enriquecimento em cloreto pela absorção das emanações vulcânicas está bem ilustrado pela composição química de muitos lagos vulcânicos no mundo. Quando estes lagos possuem águas ácidas, promovem a interacção água-rocha, a qual resulta na dissolução de muito material, sendo o ião Cl^- um desses elementos lixiviados (Poorter *et al.*, 1989).

Como já foi referido anteriormente para o Mg^{2+} , o ião cloreto é um bom elemento para ser aplicado na monitorização vulcânica uma vez que não se precipita combinado com qualquer outra espécie na água dos lagos (Hurst, 1991 e Giggenbach e Glover, 1975).

Nos resultados estatísticos referentes ao anião Cl^- , presentes na Tabela 8, salienta-se o facto de a média (14.5 mg/L) e a mediana (14.9 mg/L) na amostragem de Inverno apresentarem valores muito semelhantes. O desvio padrão, ao apresentar um valor relativamente baixo (2.9), demonstra que os valores tendem a seguir uma tendência central. O valor de 20% do coeficiente de variação confirma que na amostragem de Inverno existe um número não muito elevado de resultados que se dispersam daqueles de tendência central.

O coeficiente de variação da amostragem de Verão apresenta um valor mais elevado em relação aos valores da estação mais fria, em virtude do maior número de amostras analisadas contribuir com valores que aumentam muito a amplitude entre os valores mínimo e máximo registados. Salienta-se o resultado máximo (71.4 mg/L), muito acima do resultado da média (15.2 mg/L) e mediana (15.6 mg/L), o qual contribui em muito para o afastamento dos valores em relação àqueles de tendência central. Apesar disso, constata-se que o resultado do desvio padrão, pouco superior ao registado de Inverno, demonstra que o número de resultados que se afasta da média e mediana é pouco significativo. O valor máximo de 71.4 mg/L registado na Furna do Enxofre (Verão) contribui muito para os valores de tendência central, assim como para o desvio padrão e o coeficiente de variação serem superiores aos amostrados no Inverno.

Relativamente à distribuição das frequências absolutas do ião cloreto (Fig. 15), este mostra um padrão unimodal, com a classe dos valores mais importantes a corresponder às concentrações entre os 14.66-24.11 (mg/L).

Fazem parte desta classe as amostragens pertencentes aos maiores lagos dos Açores, com excepção da lagoa do Fogo. Os lagos situados em cones de escórias estão presentes em pequeno número, sendo a lagoa do Peixe e Algar do Carvão uma destas excepções.

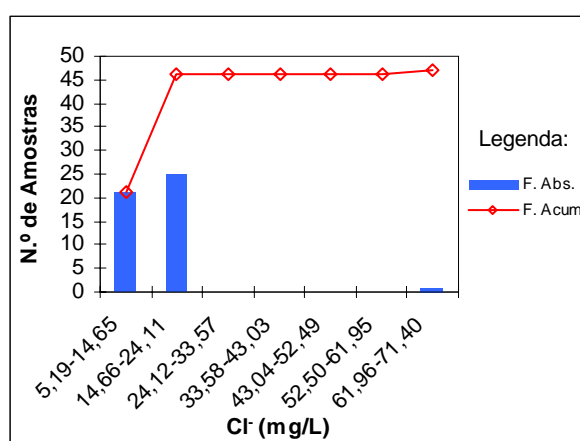


Fig. 15 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião cloreto.

O anião bicarbonato depende da ocorrência do carbono inorgânico nos sistemas de água doce. Muitos lagos apresentam um equilíbrio entre o CO₂ da água dos lagos e o CO₂ atmosférico, variando este consoante a localização geográfica e com o enriquecimento potencial proveniente da poluição industrial. Quando o dióxido de carbono atmosférico se dissolve na água que contém bicarbonato (primeiramente associado com o ião cálcio), a cinética da dissolução do carbono inorgânico nas águas doces com pH inferior a 8.5 segue de muito perto as previsões feitas com base na química das soluções puras diluídas.

O CO₂ é muito solúvel e algum dele sofre hidratação na água para dar ácido carbónico:



O H₂CO₃ é um ácido fraco que se dissocia rapidamente originando bicarbonato (Wetzel, 1993; Marini *et al.*, 2003).



Se o enriquecimento em CO_2 for resultante da influência vulcânica, irá observar-se um aumento de H_2CO_3 que, por sua vez, resultará no aumento do anião bicarbonato. A libertação de CO_2 a partir da degradação da matéria orgânica também conduz aos mesmos resultados.

Os valores da Tabela 8 relacionados com este anião, indicam a constância dos valores mínimos nas duas amostragens executadas. A discrepância observada relativamente ao valor máximo observado (258.03 mg/L) vem no seguimento das discussões já efectuadas até ao momento. Verifica-se uma grande amplitude de valores na época de Verão, grandemente influenciada por este valor máximo referente ao lago da Furna do Enxofre (Graciosa). Os coeficientes de variação apresentam-se elevados, principalmente o da época quente (94.7%), o que significa que, para esta espécie, há um maior número de resultados mais afastados das medidas de tendência central. Apesar do resultado destas duas medidas ser muito próximo na amostragem de Inverno, na de Verão regista-se a maior amplitude de valores (1.2-258.0 mg/L), também devido ao maior número de lagos amostrados. Nesta época, a média também está mais afastada da mediana. Naturalmente, os valores que se afastam mais da média são os registados no Verão como comprova o desvio padrão (23.8 mg/L).

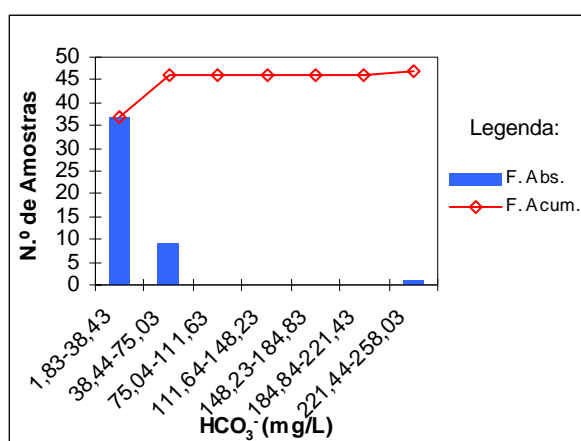


Fig. 16 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião bicarbonato.

O gráfico relativo à distribuição das frequências absolutas do anião bicarbonato (Fig.16) revela um padrão unimodal com uma classe modal que

corresponde ao menor intervalo de concentração deste ião (1.83-38.43 mg/L). A distribuição dos valores no gráfico forma uma cauda muito pouco expressiva onde estão representadas 21% das amostras. São as amostras dos lagos das Furnas, da Furna do Enxofre e do Algar do Carvão que constituem a referida cauda.

O anião SO_4^{2-} pertence a um grupo de compostos de enxofre, designados por politionatos, sendo os oxianiões de enxofre divalentes e com ligações relativamente estáveis.

Tanto o SO_4^{2-} como o H_2S são gases comuns nas emanações magmáticas, sulfataras e fumarolas. Por isso, é natural a presença destes aniões tanto em zonas vulcânicas como em fontes geotérmicas. Assim, é natural encontrar o SO_4^{2-} em locais onde os gases H_2S e SO_4^{2-} reagem em ambientes gasosos (Takano e Watanuki, 1990; Kusakabe *et al.*, 2000b).

A acidificação dos lagos vulcânicos é devida, em parte, à absorção do H_2S e, subsequentemente, à oxidação das formas reduzidas de enxofre do ácido sulfúrico. Estudos efectuados em lagos vulcânicos indicam que a variação da concentração deste ião pode preceder a uma crise vulcânica (Poorter *et al.*, 1989; Takano *et al.*, 2000). No entanto, o sulfato (SO_4^{2-}) poderá variar nos lagos de água doce por ser muito afectado pela actividade fotossintética microbial (Wetzel, 1993).

Relativamente ao SO_4^{2-} , como se pode observar na Tabela 8, a amostragem de Inverno apresenta um desvio padrão baixo (0.7 mg/L), sinónimo de que os resultados amostrados se afastam pouco da média (3.7 mg/L). As medidas de tendência central apresentam valores muito próximos um do outro, os quais, relacionados com o coeficiente de variação, apresentam uma dispersão mínima de resultados. Como se pode observar pelos valores mínimo (2.3 mg/L) e máximo (5.8 mg/L), a amplitude de resultados é pequena. Assim, conclui-se que na estação mais fria os lagos vulcânicos de S. Miguel apresentam valores relativamente homogéneos.

Quanto ao coeficiente de variação dos resultados de Verão, este apresenta um valor relativamente elevado (66.9%), o qual contrasta com o valor do desvio padrão baixo (2.7 mg/L). Os valores registados nos lagos fora da ilha de S. Miguel, nomeadamente os relativos à Furna do Enxofre, que apresentam o valor máximo observado (37.6 mg/L), muito contribuem tanto para a amplitude verificada entre os valores mínimo e máximo, como para o restante conjunto de parâmetros estatísticos. As medidas de tendência central apresentam resultados próximos um do outro, mas

com maior amplitude em relação à amostragem de Inverno. Assim, se compreende que os resultados mais dispersos relativamente aos que manifestam uma tendência central estão presentes em menor número.

O padrão modal evidenciado no histograma relativo ao anião SO_4^{2-} (Fig. 17) é muito semelhante ao obtido no caso dos iões cálcio e magnésio. Assim, a classe modal (1.09-6.31 mg/L) também engloba a maioria dos resultados de valores (98%), com excepção dos valores referentes à Furna do Enxofre (Ref. 31-33).

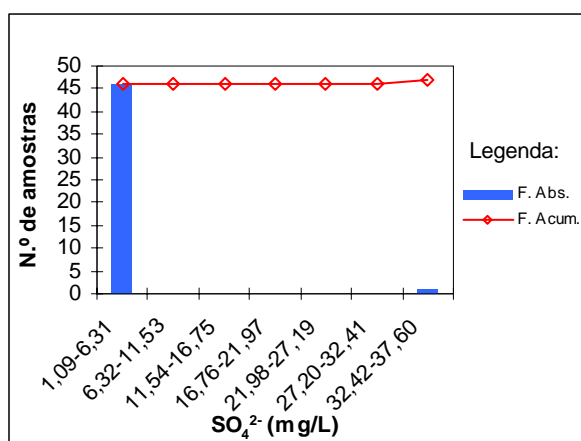


Fig. 17 – Histograma relativo à distribuição dos valores do ião sulfato.

3.2.2.5 – SiO_2

A concentração deste constituinte é relativamente elevada nas águas dos lagos, um factor que se atribui à interacção água-rocha, bem como à descarga de águas hidrotermais em profundidade (Varekamp *et al.*, 2000; Cruz *et al.*, 2003d). A sua variação resulta não só da lixiviação que se processa entre a água e a rocha nos lagos ou nas águas subterrâneas, mas também pela assimilação das diatomáceas (algas) nas águas dos lagos nas zonas de menor profundidade (Wetzel, 1993; Cioni *et al.*, 2003).

Da análise feita à Tabela 9 quanto a este parâmetro, deduz-se imediatamente o elevado valor referente ao coeficiente de variação das duas amostragens, resultado da grande amplitude de valores quanto ao conteúdo mínimo e máximo deste parâmetro, principalmente na amostragem de Verão. Os lagos da Furna do Enxofre e do Algar do Carvão, apresentaram valores de 74,90 mg/L e 73,63 mg/L,

respectivamente, os quais se encontram muito longe quer da média quer da mediana.

Tabela 9 – Estudo estatístico do dióxido de sílica das águas dos lagos. A letra **V** corresponde aos valores das amostragens realizadas de Verão e a letra **I**, às de Inverno.

		Nº Amostras	Min.	Máx.	Média	Mediana	D. Padrão	C. Variação %
SiO ₂ (mg/L)	V	106	0,1	74,9	7,6	4,4	10,6	139,4
	I	63	0,2	11,6	4,4	3,0	3,6	82,2

Relativamente à distribuição de frequências absolutas e acumuladas da SiO₂ (Fig. 18), a classe modal também corresponde ao intervalo de valores mais reduzido (0,28-10,94 mg), representando 77% das amostras.

Os lagos que fazem parte da classe modal são os mesmos que fazem parte da mesma classe do ião bicarbonato, com excepção das amostras com a referência 5 e 18 que correspondem às lagoas das Furnas e do Congro.

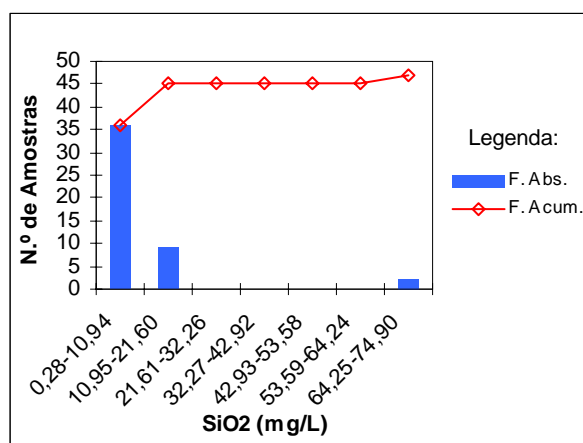


Fig. 18 – Histograma relativo à distribuição dos valores da SiO₂.

3.3 – Caracterização das Amostragens

Os parâmetros físicos e químicos analisados nas águas dos lagos dos Açores encontram-se discriminados nas Tabelas 10 e 11. A Tabela 10 diz respeito à amostragem de Verão, na qual figuram alguns resultados dos elementos em traço (Fe, Al e As) dos lagos de São Miguel e Graciosa. A Tabela 11 pertence à segunda amostragem, realizada no Inverno.

Para cada ponto amostrado onde foram realizados perfis encontram-se apenas indicados os valores correspondentes às recolhas analisadas à superfície, a meio da coluna de água e no ponto de maior profundidade. Para os restantes lagos, apenas foram feitas recolhas de superfície.

Na generalidade dos lagos, os elementos químicos dissolvidos apresentam uma distribuição relativamente homogênea para cada um deles. Verifica-se que os diferentes elementos químicos manifestam uma certa ordem de grandeza. Os cátions decrescem na seguinte ordem: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ e os aniões: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$.

Analisando o diagrama de Piper (Fig. 19), depreende-se que as águas dos lagos estudadas são, na sua maioria, do tipo cloretadas sódicas, com alguns lagos a revelarem uma tendência bicarbonatada sódica. A água da Furna do Enxofre, com a referência 51 na Tabela 10, demonstra uma tipologia diferente de todas as outras águas. Esta, manifesta mais uma característica bicarbonatada magnésiana, que deverá corresponder à lixiviação provocada pelas condições naturais que existem no local. É neste lago que a maioria dos constituintes químicos analisados registam os maiores valores, nomeadamente os parâmetros CO_2 livre, CO_2 total, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} . Dos elementos em traço, a Furna do Enxofre apresentou o maior valor apenas para o Fe. A lagoa Empadada (Norte) apresentou o maior valor para o Al e a lagoa das Furnas apresentou o maior valor para o As, na amostra de fundo do perfil a maior profundidade (Oeste).

Tabela 10 – Resultados da amostragem de Verão (n. d. – não determinados). Dados do Pico de Cruz (1997) e Cruz *et al.* (2002); do Corvo e da Graciosa de Cruz *et al.* (2002); das Flores de Azevedo, (1998).

Ref	Nome	Ilha	pH	T (°C)	Cond (S/cm)	TDSc (mg/L)	CO ₂ livre (mg/L)	CO ₂ total (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	ERB (%)	Fe (µg/L)	Al (µg/L)	As (µg/L)
1	Furnas (Sul)-S	Smg	8,34	21,50	140,00	62,00	1,50	34,94	18,50	11,40	2,19	2,84	15,62	4,81	46,36	11,56	4,32	n. d.	n. d.	n. d.
2	Furnas (Sul)-M	Smg	8,28	21,20	140,00	61,60	1,90	36,66	17,80	11,50	2,18	2,65	16,33	4,81	48,19	11,56	1,07	47	32	0,66
3	Furnas (Sul)-F	Smg	7,28	20,30	143,00	63,60	12,20	48,28	18,50	12,20	2,31	2,69	16,33	4,81	50,02	13,70	2,14	n. d.	n. d.	n. d.
4	Furnas (Oeste)-S	Smg	7,63	21,20	139,00	61,10	3,40	38,16	18,70	10,10	2,23	2,51	16,33	5,19	48,19	11,34	0,80	39	24	0,66
5	Furnas (Oeste)-M	Smg	7,53	21,00	140,00	60,80	4,50	38,82	18,40	10,20	2,28	2,48	16,33	4,81	47,58	9,84	1,18	n. d.	n. d.	n. d.
6	Furnas (Oeste)-F	Smg	6,56	19,20	152,00	64,80	23,40	62,12	17,80	11,60	2,49	3,43	16,33	5,00	53,68	13,05	0,08	241	71	1,78
7	Furnas (Norte)-S	Smg	7,12	21,10	139,00	61,60	5,40	39,72	17,60	10,20	2,31	3,07	16,33	4,71	47,58	13,48	1,15	n. d.	n. d.	n. d.
8	Furnas (Norte)-M	Smg	6,99	20,10	140,00	63,80	12,90	48,10	18,00	12,10	2,31	3,15	15,98	4,81	48,80	12,84	3,71	n. d.	n. d.	n. d.
9	Furnas (Norte)-F	Smg	6,51	18,90	152,00	61,00	27,80	64,32	17,90	10,45	2,08	2,98	15,98	5,48	50,63	14,34	-1,05	74	27	0,66
10	Fogo (Sul)-S	Smg	7,26	18,10	49,00	27,30	1,30	5,70	8,20	1,93	0,69	0,59	11,72	4,13	6,10	2,42	-2,41	44	59	0,28
11	Fogo (Sul)-M	Smg	6,95	17,70	47,00	26,20	1,60	6,44	7,40	1,65	0,75	0,37	12,07	3,94	6,71	2,35	-9,03	16	62	0,26
12	Fogo (Sul)-F	Smg	5,93	13,20	47,00	25,40	10,50	14,90	5,70	1,81	0,90	0,62	11,72	4,13	6,10	2,78	-12,81	17	33	0,26
13	Fogo (Norte)-S	Smg	6,42	18,10	47,00	26,30	1,40	5,80	6,50	1,75	0,84	0,48	12,43	4,04	6,10	2,46	-11,95	69	75	0,32
14	Fogo (Norte)-M	Smg	6,67	18,10	47,00	24,10	1,40	5,80	5,40	1,72	0,75	0,40	12,07	3,84	6,10	4,28	-18,15	n. d.	n. d.	n. d.
15	Fogo (Norte)-F	Smg	6,83	17,90	48,00	24,90	1,60	6,00	5,90	1,72	0,75	0,36	12,43	3,56	6,10	6,85	-15,96	69	138	0,24
16	Congro-S	Smg	9,42	22,90	122,00	51,40	---	---	12,00	8,90	2,16	2,07	15,98	5,00	29,28	1,04	-0,20	12	53	0,16
17	Congro-M	Smg	7,06	16,00	107,00	51,20	9,50	28,86	11,20	9,40	2,24	2,19	15,27	5,67	26,84	1,17	1,61	19	17	0,14
18	Congro-F	Smg	6,56	14,40	117,00	55,00	16,40	43,68	11,60	12,60	2,11	2,55	15,27	4,80	37,82	13,91	-1,01	n. d.	n. d.	n. d.
19	Areeiro-S	Smg	6,65	24,00	45,00	25,00	1,40	3,16	5,40	0,94	0,97	0,48	12,78	3,51	2,44	0,36	-13,26	n. d.	37	0,05
20	São Brás-S	Smg	5,48	23,60	62,00	23,80	1,70	3,46	5,40	1,23	0,95	0,52	11,36	3,27	2,44	0,35	-7,27	n. d.	30	0,21
21	São Brás-F	Smg	5,70	22,30	43,00	24,90	2,60	4,36	5,40	1,33	0,97	0,54	12,07	3,65	2,44	1,04	-9,71	n. d.	n. d.	n. d.
22	Peixe-S	Smg	7,45	18,70	187,00	48,00	6,40	21,80	8,70	3,09	2,59	3,61	17,04	3,17	21,35	1,04	-2,63	239	82	0,27
23	Carvão-S	Smg	7,69	15,70	105,00	35,90	4,40	14,96	8,30	1,72	1,73	1,97	13,85	2,93	14,64	6,70	-3,44	136	19	0,09
24	Caldeirão Grande-S	Smg	6,83	15,70	98,00	35,60	1,02	7,62	9,00	1,51	1,44	1,65	14,56	3,84	9,15	4,62	-0,76	185	45	0,09
25	Pau Pique-S	Smg	7,56	16,60	51,00	29,10	1,20	2,96	6,40	0,97	1,26	0,61	13,49	3,94	2,44	0,60	-6,94	36	70	0,11
26	Éguas-S	Smg	6,88	16,30	66,00	36,80	2,40	4,16	8,30	2,31	1,41	0,90	17,04	4,42	2,44	0,28	-2,65	26	69	0,07
27	Empadadas(Norte)-S	Smg	7,62	19,10	43,00	27,50	1,60	4,24	6,10	0,95	1,14	0,80	13,49	1,39	3,66	3,27	-5,16	89	201	0,25
28	Empadadas(Norte)-F	Smg	6,24	16,70	47,00	29,80	7,60	11,56	6,70	1,04	1,25	0,86	12,43	2,02	5,49	1,28	-1,94	n. d.	n. d.	n. d.
29	Empadadas(Sul)-S	Smg	7,40	18,10	63,00	36,70	2,20	7,04	8,30	1,07	1,49	1,26	14,91	2,93	6,71	0,86	-1,52	37	28	n. d.
30	Empadadas(Sul)-F	Smg	7,00	18,00	62,00	33,80	2,30	7,58	8,00	1,06	1,55	1,27	14,91	3,51	7,32	3,42	-4,04	n. d.	n. d.	n. d.
31	Rasa1-S	Smg	7,34	17,80	50,00	27,50	11,30	13,06	7,10	0,88	1,09	0,58	12,78	3,94	2,44	0,67	-3,49	11	14	0,08
32	Canário-S	Smg	6,31	19,20	45,00	27,20	2,00	3,76	6,50	0,79	1,11	0,59	13,14	2,60	2,44	0,75	-4,62	27	49	0,13
33	Canário-F	Smg	6,40	19,10	46,00	26,80	1,50	3,26	7,00	0,79	0,96	0,48	13,14	3,56	2,44	n. d.	-6,26	n. d.	n. d.	n. d.
34	Sete Cidades(Norte)-S	Smg	7,69	20,60	110,00	45,10	2,70	19,42	14,30	3,29	1,58	1,25	16,97	3,67	23,18	0,28	-3,65	n. d.	16	0,35
35	Sete Cidades(Norte)-M	Smg	7,14	19,10	99,00	43,50	3,80	20,08	14,10	3,03	1,42	1,19	16,49	3,62	22,57	0,33	-4,20	n. d.	14	0,32
36	Sete Cidades(Norte)-F	Smg	6,66	15,00	99,00	42,90	7,80	24,08	14,80	3,24	1,40	0,82	16,10	3,35	22,57	0,46	-2,28	n. d.	14	0,31
37	Sete Cidades(Sul)-S	Smg	9,21	21,10	125,00	52,00	---	---	20,60	2,90	1,14	1,87	17,18	3,72	32,94	1,93	-0,47	n. d.	23	0,9
38	Sete Cidades(Sul)-M	Smg	7,47	16,50	122,00	50,50	5,70	29,90	20,60	2,63	1,22	1,64	16,50	3,31	33,55	2,02	-0,04	n. d.	9	0,96
39	Sete Cidades(Sul)-F	Smg	6,59	14,50	127,00	49,50	14,00	39,08	20,30	2,56	1,24	1,92	15,41	2,73	34,77	0,32	1,21	11	8	0,56
40	Santiago-S	Smg	9,01	19,70	123,00	46,20	---	---	20,30	2,51	0,98	1,14	14,68	3,29	32,33	0,40	0,30	29	68	0,8
41	Santiago-M	Smg	7,70	14,50	121,00	48,70	4,60	29,68	22,00	2,57	1,06	1,23	14,70	3,52	34,77	3,33	1,70	6	15	0,93
42	Santiago-F	Smg	6,59	13,40	121,00	48,00	8,70	33,34	20,20	2,53	1,00	1,34	17,04	3,75	34,16	1,48	-1,18	72	25	1,08
43	Rasa2-S	Smg	6,12	n. d.	n. d.	25,80	1,80	2,68	7,50	0,95	0,81	0,51	12,43	2,36	1,22	2,27	2,65	282	159	0,6
44	Caiado-S	Pico	6,62	17,70	26,00	17,30	7,50	8,82	2,69	0,20	0,62	0,44	10,11	1,41	1,83	0,86	-27,69	n. d.	n. d.	n. d.
45	Capitão-S	Pico	6,02	16,00	31,00	22,90	4,20	7,72	4,52	0,41	1,11	0,77	9,56	1,67	4,88	2,00	-6,60	n. d.	n. d.	n. d.
46	Paul-S	Pico	5,79	17,00	28,00	11,00	21,20	22,74	2,68	0,28	0,43	0,38	5,19	1,09	2,13	1,54	-6,78	n. d.	n. d.	n. d.
47	Peixinho-S	Pico	6,98	17,70	33,00	20,30	9,40	13,36	3,99	0,68	0,81	1,04	9,38	2,35	5,49	5,60	-13,20	n. d.	n. d.	n. d.
48	Rosada-S	Pico	6,17	17,50	27,00	17,20	0,82	2,58	3,45	0,47	0,65	0,57	8,19	1,39	2,44	0,32	-10,30	n. d.	n. d.	n. d.
49	Caldeirão E-S	Corvo	6,83	23,00	82,00	45,20	n. d.	n. d.	12,40	0,26	1,48	0,20	25,21	4,42	3,05	0,05	-11,45	n. d.	n. d.	n. d.
50	Caldeirão W-S	Corvo	7,06	24,60	78,70	39,20	n. d.	n. d.	10,50	0,22	1,41	0,20	21,30	4,71	2,80	0,05	-11,73	n. d.	n. d.	n. d.
51	Enxofre-S	Gra	6,07	16,10	623,00	356,20	179,00	365,12	47,30	19,00	37,70	29,50	71,40	37,60	258,03	74,90	-0,64	590	17	0,22
52	Lomba-S	Flores	6,40	12,50	40,00	31,70	n. d.	n. d.	7,20	0,50	1,10	1,40	12,80	1,10	7,60	n. d.	-2,23	n. d.	n. d.	n. d.
53	Rasa-S	Flores	5,60	12,50	73,00	36,10	n. d.	n. d.	9,60	0,50	1,70	1,40	16,00	1,60	13,20	n. d.	-4,54	n. d.	n. d.	n. d.
54	Negro-S	Ter	5,88	20,00	76,00	45,60	7,00	9,20	11,60	1,46	1,69	1,22	22,01	4,61	3,05	0,64	-1,66	n. d.	n. d.	n. d.
55	A. Carvão-S	Ter	7,80	11,90	146,00	51,30	2,60	33,40	27,10	2,91	0,16	0,72	18,46	1,25	42,70	73,62	2,18	n. d.	n. d.	n. d.
56	Falca-S	Ter	5,39	20,00	75,00	36,90	4,70	7,34	8,00	0,75	1,44	1,10	18,11	6,05	3,66	4,71	-12,63	n. d.	n. d.	n. d.
57	Negra St. B.-S	Ter	4,91	19,70	74,00	36,60	3,30	5,50	8,30	0,51	1,48	0,79	19,17	3,27	3,05	n. d.	-10,35	n. d.	n. d.	n. d.

Tabela 11 – Resultados da amostragem de Inverno (n. d. – não determinados).

Ref	Nome	Ilha	pH	T (°C)	Cond (µS/cm)	CO ₂ l (mg/L)	CO ₂ t (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	ERB (%)
1	Furnas (Sul)-S	Smg	7,5	13,7	129,0	8,6	39,4	19,2	9,6	2,2	2,1	16,0	42,7	4,1	9,0	n. d.
2	Furnas (Sul)-M	Smg	7,6	13,6	129,0	8,0	39,7	18,0	9,2	2,0	2,1	14,2	43,9	4,3	9,8	n. d.
3	Furnas (Sul)-F	Smg	7,5	13,5	130,0	9,6	41,3	17,6	8,9	2,0	2,1	14,9	43,9	4,4	7,5	n. d.
4	Furnas (Oeste)-S	Smg	7,4	13,7	129,0	7,4	39,1	19,1	9,4	1,9	2,1	14,9	43,9	4,5	6,6	n. d.
5	Furnas (Oeste)-M	Smg	7,6	13,6	129,0	6,4	38,5	17,3	7,6	2,0	2,2	14,9	44,5	4,6	9,4	n. d.
6	Furnas (Oeste)-F	Smg	7,6	13,6	129,0	8,4	41,0	16,1	7,7	1,9	2,3	14,9	45,1	4,5	11,6	n. d.
7	Furnas (Norte)-S	Smg	7,7	13,8	129,0	6,7	39,3	16,3	7,8	1,9	2,2	14,9	45,1	4,5	10,1	n. d.
8	Furnas (Norte)-M	Smg	7,8	13,8	129,0	6,2	38,8	17,9	7,8	1,8	2,2	14,9	45,1	4,6	9,6	n. d.
9	Furnas (Norte)-F	Smg	7,3	13,6	130,0	28,4	61,0	18,4	7,9	1,9	2,3	15,3	45,1	4,4	10,3	n. d.
10	Fogo (Sul)-S	Smg	8,5	5,6	47,0	4,8	9,6	6,4	1,5	0,6	0,4	11,4	6,7	2,8	0,9	n. d.
11	Fogo (Sul)-M	Smg	7,1	7,2	46,0	2,7	7,1	7,1	1,4	0,7	0,4	11,4	6,1	2,8	n. d.	n. d.
12	Fogo (Sul)-F	Smg	6,8	12,4	45,0	3,4	7,8	7,3	1,5	0,7	0,4	11,4	6,1	3,0	n. d.	n. d.
13	Fogo (Norte)-S	Smg	6,8	12,8	45,0	3,7	8,1	6,7	1,5	0,6	0,4	11,4	6,1	2,8	n. d.	n. d.
14	Fogo (Norte)-M	Smg	6,8	12,6	46,0	3,2	7,6	6,7	1,5	0,6	0,3	11,4	6,1	2,8	1,9	n. d.
15	Fogo (Norte)-F	Smg	6,8	12,3	46,0	3,8	8,2	7,8	1,6	0,7	0,4	11,4	6,1	2,8	2,4	n. d.
16	Congro-S	Smg	8,6	14,4	102,0	4,0	31,3	9,6	7,1	2,2	1,7	14,9	37,8	4,6	2,1	n. d.
17	Congro-M	Smg	7,8	13,1	103,0	4,8	22,4	10,9	7,0	2,1	1,7	14,9	24,4	4,5	2,4	n. d.
18	Congro-F	Smg	7,4	13,1	103,0	5,9	23,5	10,1	6,7	2,0	1,8	15,3	24,4	4,8	1,6	n. d.
19	Areeiro-S	Smg	8,6	15,1	36,0	4,0	4,9	4,7	0,7	0,7	0,4	9,9	1,2	2,4	0,4	n. d.
20	São Brás-S	Smg	8,5	5,1	37,0	1,6	3,4	4,3	0,9	0,7	0,5	10,7	2,4	3,1	0,9	n. d.
21	São Brás-F	Smg	7,5	8,5	36,0	2,2	3,5	5,2	1,0	0,7	0,5	10,3	1,8	2,9	1,7	n. d.
22	Peixe-S	Smg	7,8	13,2	143,0	4,0	18,1	6,3	2,1	2,0	2,5	11,7	19,5	3,1	6,4	-7,3
23	Carvão-S	Smg	9,0	12,5	63,0	3,1	6,6	3,2	0,5	0,8	0,6	8,2	4,9	2,9	2,8	-20,8
24	Caldeirão Grande-S	Smg	8,4	13,7	79,0	2,5	5,6	4,8	0,6	0,8	0,7	8,9	4,3	2,8	3,6	-7,7
25	Pau Pique-S	Smg	8,4	10,3	43,0	3,0	4,3	4,7	0,9	0,9	0,4	11,4	1,8	3,2	n. d.	-13,2
26	Éguas-S	Smg	8,1	11,8	37,0	3,8	4,7	3,7	1,1	0,6	0,3	9,9	1,2	2,6	n. d.	-16,4
27	Empadadas(Norte)-S	Smg	8,2	8,6	41,0	3,6	5,8	5,4	0,6	0,8	0,7	9,9	3,1	2,5	3,6	-7,7
28	Empadadas(Norte)-F	Smg	6,8	9,1	37,0	4,3	6,9	4,3	0,8	0,8	0,6	9,9	3,7	2,3	1,9	-12,5
29	Empadadas(Sul)-S	Smg	8,5	10,0	51,0	3,4	8,2	5,0	0,8	1,0	1,2	11,7	6,7	2,6	3,4	-12,7
30	Empadadas(Sul)-F	Smg	7,4	9,3	51,0	3,4	9,1	5,0	0,8	1,1	1,2	12,1	7,9	2,6	5,4	-15,3
31	Rasa1-S	Smg	8,3	9,8	35,0	2,2	4,4	6,7	0,7	0,6	0,5	9,9	3,1	3,4	n. d.	-2,6
32	Canário-S	Smg	9,0	12,1	42,0	4,2	5,5	6,2	0,8	0,7	0,4	11,7	1,8	3,5	n. d.	n. d.
34	Sete Cidades(Norte)-S	Smg	8,5	14,0	98,0	3,8	19,6	15,0	2,9	1,4	1,3	17,4	22,0	3,5	0,4	-1,0
35	Sete Cidades(Norte)-M	Smg	7,5	13,9	98,0	4,3	20,1	16,4	3,6	1,6	1,2	17,0	22,0	3,8	n. d.	4,1
36	Sete Cidades(Norte)-F	Smg	7,5	13,8	98,0	4,8	20,6	15,6	3,2	1,6	1,2	17,0	22,0	3,8	1,5	1,5
37	Sete Cidades(Sul)-S	Smg	8,3	13,7	126,0	5,8	27,8	21,4	2,5	1,3	1,7	18,8	30,5	3,6	n. d.	3,5
38	Sete Cidades(Sul)-M	Smg	7,6	13,5	122,0	5,6	29,4	21,9	2,7	1,3	1,9	18,5	32,9	3,8	n. d.	3,7
39	Sete Cidades(Sul)-F	Smg	7,5	13,5	124,0	5,8	30,0	22,3	2,8	1,3	1,9	18,5	33,6	3,8	n. d.	3,9
40	Santiago-S	Smg	8,4	12,9	117,0	2,4	26,2	20,6	2,7	1,0	1,2	17,8	32,9	4,1	1,3	-1,1
41	Santiago-M	Smg	7,8	12,8	117,0	2,7	26,5	21,4	2,4	0,9	1,1	17,0	32,9	4,1	n. d.	0,7
42	Santiago-F	Smg	7,8	12,9	117,0	3,3	27,5	20,9	2,4	0,9	1,2	16,7	33,6	4,0	n. d.	0,0
43	Rasa2-S	Smg	8,7	13,1	42,0	3,8	4,7	6,1	0,8	0,6	0,4	12,1	1,2	3,1	n. d.	-8,8

As águas em estudo, como já foi referido, são predominantemente frias, tendo a temperatura variado entre os 11.9°C e 24.6°C na amostragem de Verão. Na estação fria, o valor máximo de temperatura registado nos lagos foi de 15.1°C (lagoa do Areeiro) e a temperatura mínima registou-se na lagoa de São Brás na recolha efectuada à superfície do lago (5.1°C). Relacionando a altitude a que se encontram os lagos com a sua temperatura, verifica-se, na amostragem de Verão, que a temperatura dos lagos da ilha de São Miguel é maior consoante a menor cota a que se encontram (Fig. 20A). As lagoas do Areeiro, Congro e São Brás são as únicas que se desviam desta tendência. No entanto, a relação entre estes parâmetros não se verifica na amostragem efectuada na época mais fria (Fig. 20B).

O pH das águas dos lagos apresenta um intervalo de valores considerável, principalmente no Verão. Os lagos que possuem maior área e profundidade são aqueles que, de uma maneira geral, apresentam os maiores valores de pH à superfície (lagoa das Furnas, do Congro, das Sete Cidades e de Santiago). Este facto, deve-se aos processos biológicos relacionados, de alguma forma, com a eutrofização que se verifica nalguns deles. Este fenómeno poderá residir no facto dos seres vivos serem intermediários em diversas reacções e, à medida que estas águas se tornam mais produtivas biologicamente, o pH sofre alterações rápidas devido ao metabolismo numa base diária (variações de pH desde um valor baixo como 6 até um valor elevado como 10, ou mais, em 24 horas), podendo estar relacionado com a fixação do carbono e com a assimilação do bicarbonato (Wetzel, 1993). A lagoa das Sete Cidades, na zona Sul, apresenta o maior valor registado para este parâmetro físico. No entanto, este valor diminui em profundidade à semelhança dos outros lagos. O menor valor de pH observado também se verificou na amostragem de Verão. A lagoa Negra em Santa Bárbara (Terceira) registou um valor de 4,91, o que nos leva a constatar que possui características ácidas.

A Furna do Enxofre, na ilha Graciosa, apresenta um valor máximo de condutividade completamente discordante de todos os lagos estudados. À excepção deste registo, a condutividade dos lagos varia entre os 26 e 187 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores estes que permitem avaliar os baixos níveis de mineralização apresentados pelos lagos estudados. Quando se comparam as duas amostragens, verifica-se que os valores da condutividade apresentam, de uma maneira geral, valores mais baixos na amostragem de Inverno.

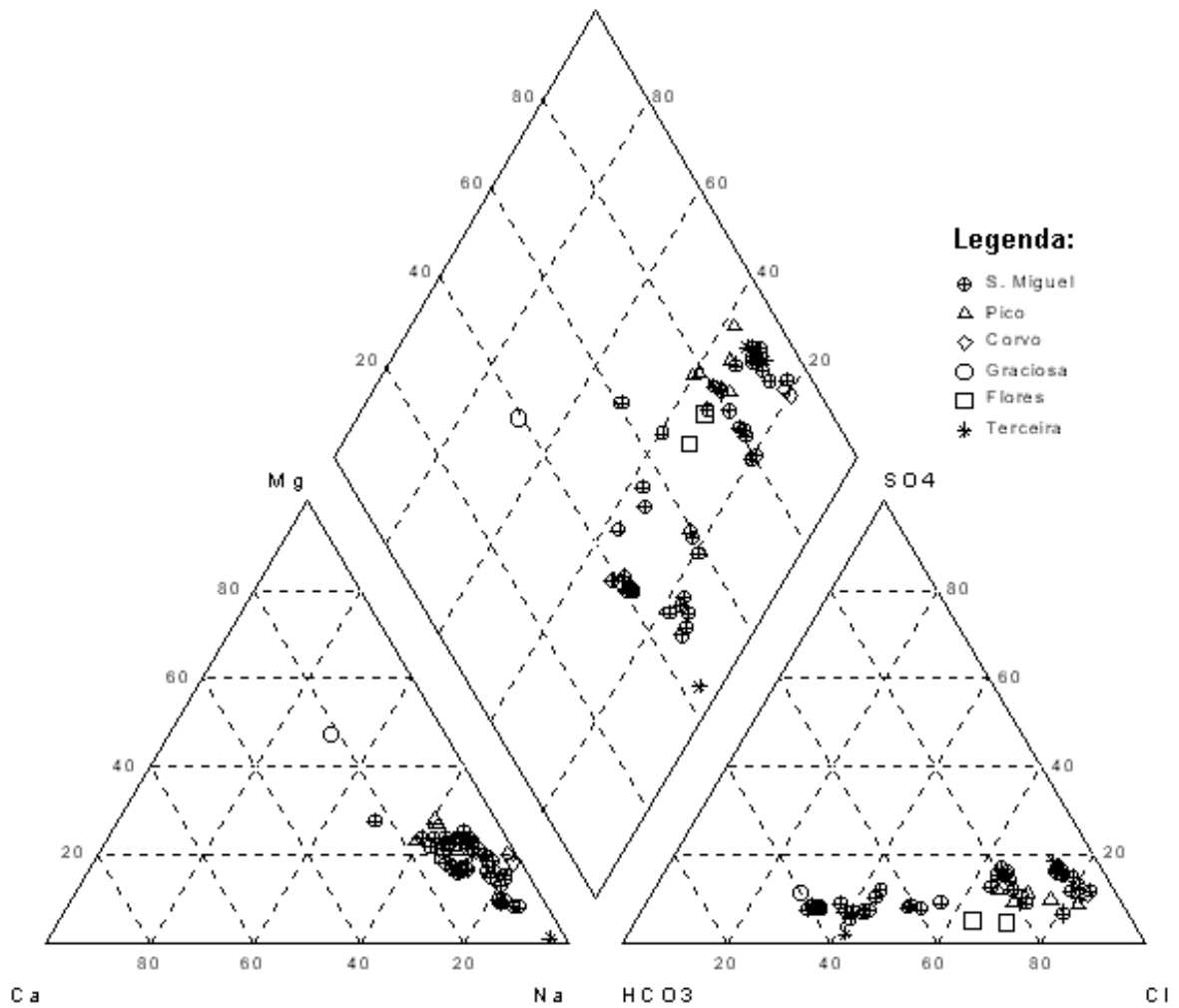


Fig. 19 – Representação da composição química por meio de um diagrama de Piper.

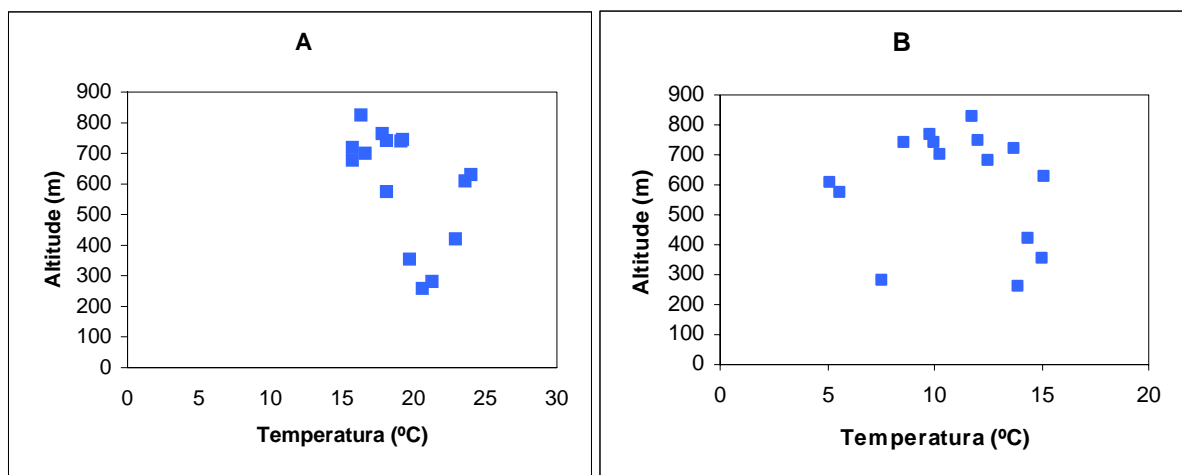


Fig. 20 – Relação entre a altitude e a temperatura. A temperatura diz respeito aos valores de superfície. A – valores da amostragem de Verão; B – valores da amostragem de Inverno.

Os valores dos sólidos dissolvidos totais (SDT) calculados para as águas dos lagos em estudo indicam, à semelhança da condutividade, que as águas são pouco mineralizadas. Estes valores variam entre os 11 e 64.8 (mg/L), excluindo o valor máximo que foi registado na Furna do Enxofre (Graciosa) e que diverge completamente dos restantes (356.2 mg/L; Fig. 21B). Do cruzamento dos parâmetros Cl^- vs. SDT verifica-se que os lagos apresentam duas tendências (Fig. 21A e 21B). Num grupo de lagos, observa-se que o aumento dos SDT é acompanhado pelo enriquecimento do ião cloreto. É o caso dos lagos referenciados na Tabela 10 com os números 10-15, 20-33, 40-50, 52-54 e 56-57. Daqui se depreende que estas águas sofrem grande influência de sais marinhos com origem nos fenómenos atmosféricos. Projectando os iões sódio e cloreto (Fig. 22A e 22B), verifica-se que os mesmos lagos se posicionam muito perto da recta que caracteriza a água do mar, com excepção da lagoa de Santiago (Ref. 40-42) que se desvia desta tendência. No outro grupo, constituído pelas amostras da lagoa das Furnas (1-9), do Congro (Ref. 16-18), das Sete Cidades (Ref. 34-39), do Algar do Carvão e da Furna do Enxofre manifesta-se um aumento da concentração de SDT independente do aumento do ião cloreto. Apesar destes lagos estarem sujeitos às mesmas influências atmosféricas que os restantes, é notório na Figura 22A e 22B que estes lagos, juntamente com a lagoa de Santiago, sofrem um enriquecimento em sódio independente do cloreto.

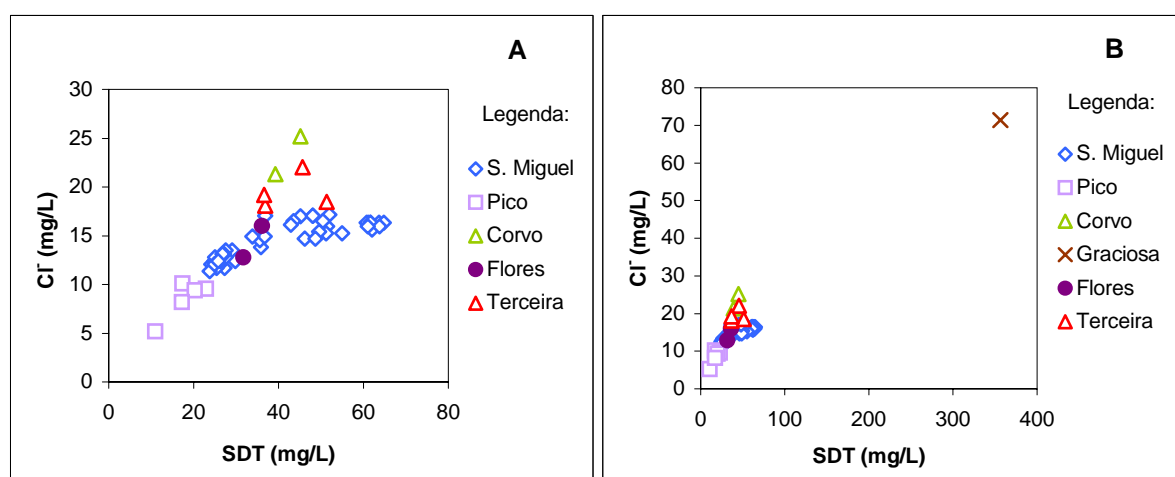


Fig. 21 – Distribuição dos lagos dos Açores, tendo em conta o ião cloreto e a mineralogia, sem a presença da Graciosa (A) e com a presença da Graciosa (B).

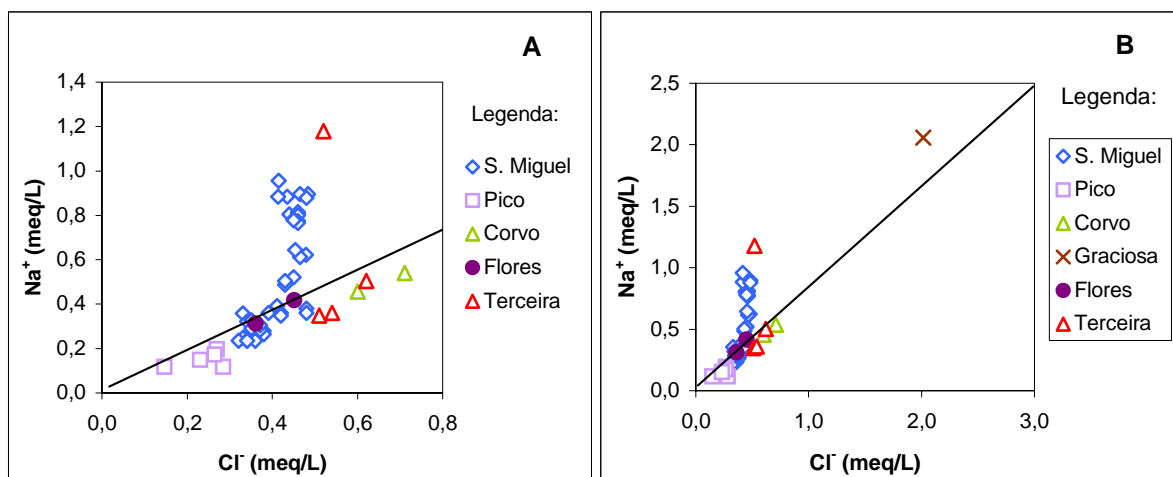


Fig.22 – Distribuição dos lagos dos Açores, tendo em conta os iões sódio e cloreto na amostragem de Verão, sem a presença da Graciosa (A) e com a presença da Graciosa (B). Dados da água do mar de Cruz (1997).

Quando se relacionam os catiões sódio e potássio com o anião bicarbonato, observa-se que as amostras dos lagos se distribuem segundo duas tendências (Fig. 23). O grupo de lagos que se encontra próximo da origem demonstra uma tendência no enriquecimento destes metais alcalinos independentemente da variação da concentração do HCO_3^- , tal como o grupo de lagos anteriormente referido que manifestava a influência directa dos fenómenos de contaminação marinha (Fig. 23A e 23B). Neste grupo de lagos há um aumento da concentração dos catiões sódio e potássio, independentemente do ião carbonato. Os restantes lagos, os mesmos que se afastavam da recta que caracteriza a composição relativa da água do mar, demonstram uma relação entre o HCO_3^- e os catiões sódio e potássio, uma vez que o aumento da concentração destes catiões é acompanhado pelo enriquecimento em ião bicarbonato. Esta relação pode apontar no sentido da ocorrência dos seguintes processos: (1) uma interacção água-rocha nestes sistemas aquosos e (2) uma contribuição vulcânica por descarga de fluidos hidrotermais no fundo e margens da lagoa.

Na amostragem efectuada de Inverno nos lagos vulcânicos da ilha de São Miguel os resultados obtidos demonstram algumas semelhanças aos resultados verificados na estação quente (Fig. 24), assim como a existência de dois grupos de lagos.

Depreende-se que nestes lagos a variação sazonal dos metais alcalinos estudados é insignificante. Estes resultados estão em consonância com os registados por Wetzel (1993), uma vez que o autor refere que a distribuição espacial

e temporal do sódio e do potássio nos lagos é uniforme e apresenta variações sazonais muito pequenas.

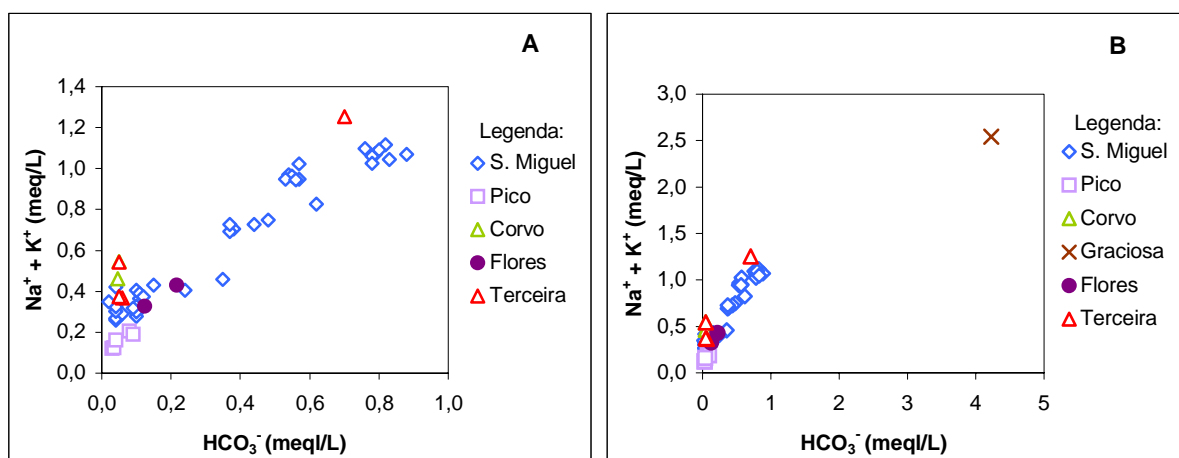


Fig. 23 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando os iões sódio e potássio com o bicarbonato sem a amostra da Furna do Enxofre (A) e com a amostra da Furna do Enxofre (B).

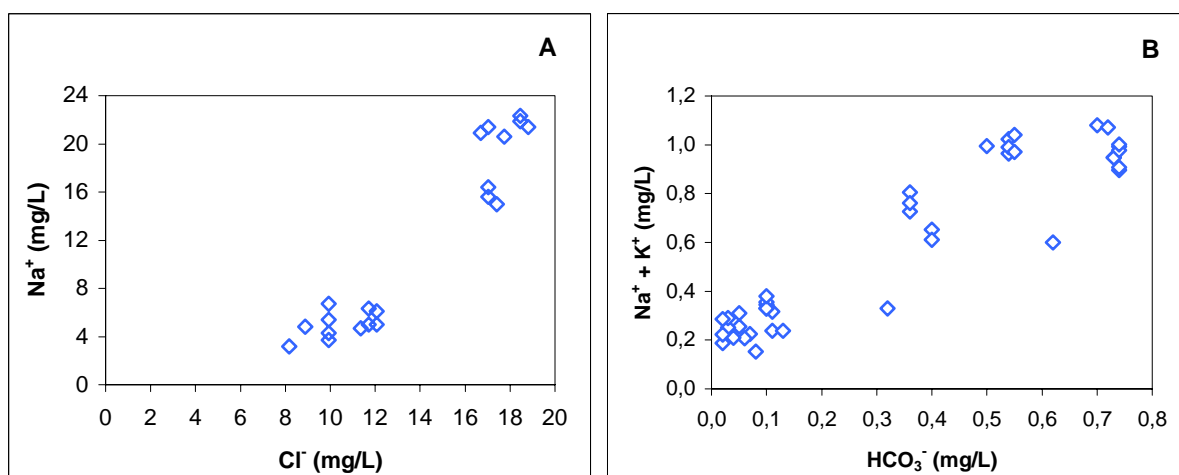


Fig. 24 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando (A): o Na^+ com o Cl^- e (B): o $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ com o HCO_3^- na segunda amostragem (lagos da ilha de São Miguel).

Da relação entre os sólidos dissolvidos totais e o ião bicarbonato (Fig.25A e 25B), é evidente a existência de uma afinidade no aumento da concentração do HCO_3^- com o aumento da mineralização nas lagoas das Furnas, do Congro, das Sete Cidades e de Santiago, bem como dos lagos das grutas lávicas (Algar do Carvão e a Furna do Enxofre). Neste caso, é de admitir que o ião bicarbonato, assim

como o CO_2 , tanto poderá ter origem no material orgânico, como poderá apresentar uma origem a partir da contaminação vulcânica.

As concentrações de CO_2 livre e total registam valores muito elevados no lago da Furna do Enxofre (Tabela 10), comparativamente com os restantes lagos à semelhança dos parâmetros já referidos, isto é, dos SDT, do Na^+ , do K^+ , do Cl^- e do HCO_3^- . Quando se cruza o CO_2 livre e total com o ião bicarbonato (Fig. 26A, 26B, 26C e 26D), é perceptível na distribuição dos lagos a tendência dos mesmos se disporem segundo duas direcções individualizadas (Fig. 26). No entanto, do cruzamento do CO_2 livre com o bicarbonato (Fig. 26A), verifica-se uma terceira direcção em que as amostras manifestam um enriquecimento em HCO_3^- independentemente do CO_2 livre. Uma destas direcções engloba as amostras com as referências 10-15, 19-33, 43-48, 54, 56 e 57, posicionando-se nos gráficos A e C próximas da origem e do eixo das ordenadas. Este conjunto de lagos é o mesmo que está representado na Fig. 23, onde se manifesta uma independência dos iões metálicos alcalinos em relação ao ião bicarbonato. O CO_2 total nestes lagos é essencialmente controlado pelo CO_2 livre, interpretando-se este aumento de dióxido de carbono como sendo independente da concentração do bicarbonato, resultante essencialmente de processos orgânicos.

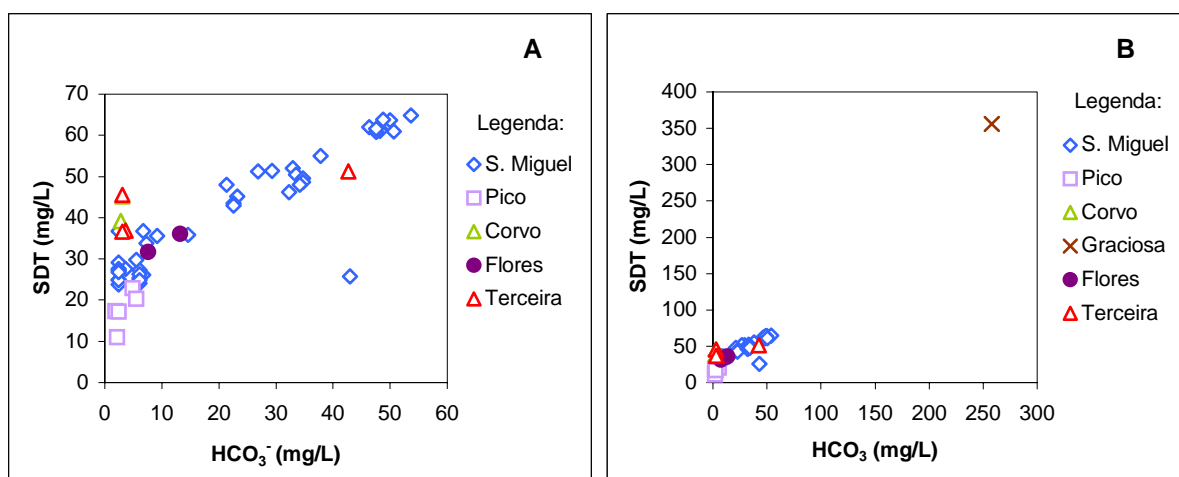


Fig. 25 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando os SDT com o ião bicarbonato na amostragem de Verão, sem a amostra da Furna do Enxofre (A) e com a amostra da Furna do Enxofre (B).

Um outro conjunto de lagos constituído pelas lagoas das Sete Cidades, Congro, Furnas, Santiago, Peixe e Carvão, na ilha de S. Miguel, pela lagoa do Algar do Carvão na ilha Terceira e na ilha Graciosa pela Furna do Enxofre, manifesta uma

relação entre o CO_2 total e o HCO_3^- (Fig. 26C). Nestes lagos, o CO_2 total é essencialmente controlado pelo bicarbonato sugerindo-se que o enriquecimento de dióxido de carbono tem uma origem inorgânica, nomeadamente a descarga de fluidos hidrotermais. Neste sentido, é perfeitamente admissível que o aumento deste composto químico possa dever-se à contaminação magmática. Esta poderá igualmente dever-se à entrada em solução de voláteis, nomeadamente o CO_2 , sendo a neutralização de acidez da água promovida pela interacção água-rocha o que acarreta enriquecimento em bicarbonato. Estes mecanismos de contaminação magmática são mais evidentes na Figura 26A, quando se observa a existência de uma terceira direcção constituída pelas amostras com a referencia 1-5, 7 e 8, pertencentes à lagoa das Furnas, das amostras 34, 35 e 38 da lagoa das Sete Cidades, das amostras 41 e 42 da lagoa de Santiago e da amostra 55 da lagoa do Algar do Carvão.

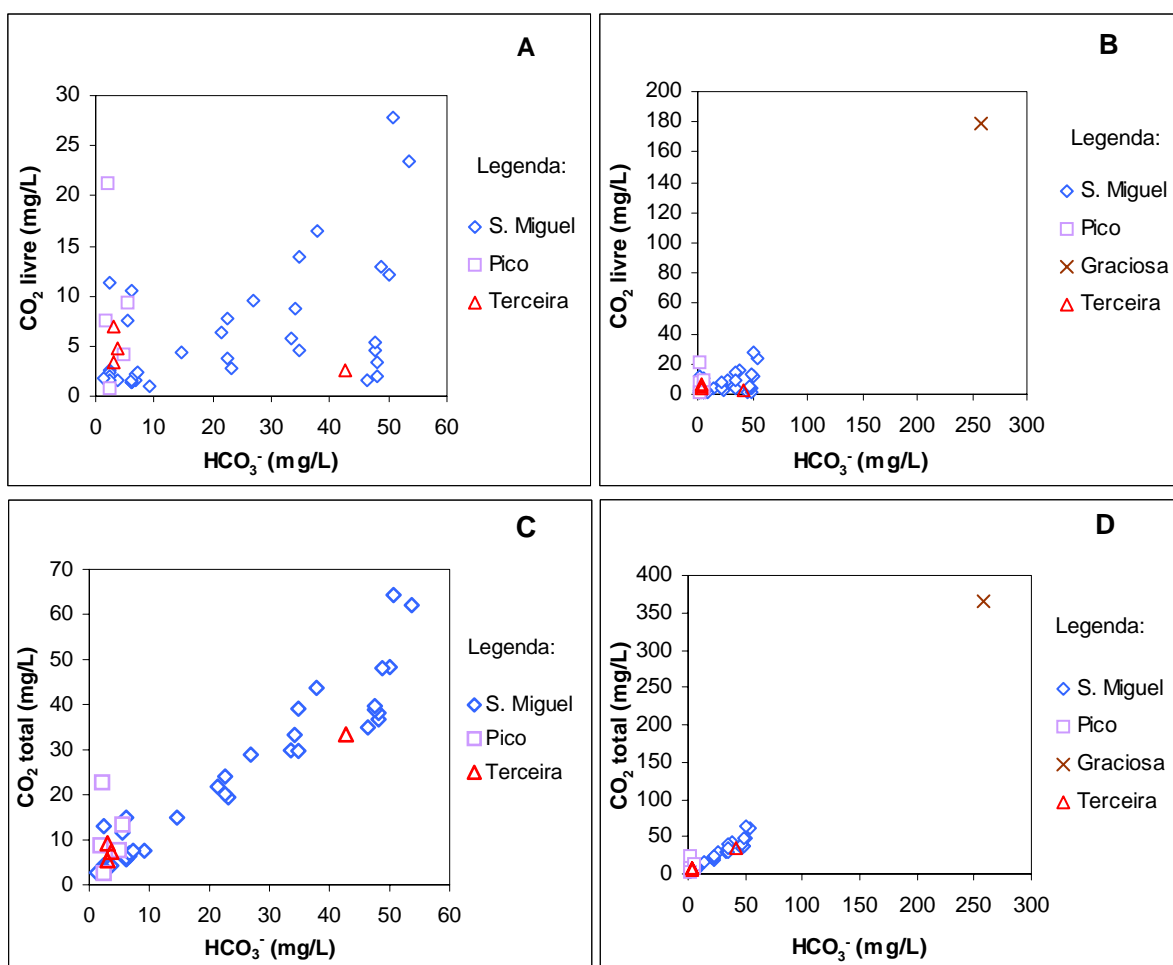


Fig. 26 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando o CO_2 livre e total, com o HCO_3^- na amostragem de Verão, sem a amostra da Furna do Enxofre (A e C) e com a amostra da Furna do Enxofre (B e D).

Salienta-se o facto das lagoas do Corvo e das Flores não estarem representadas na Figura 27 devido à inexistência de dados relativos aos valores de dióxido de carbono livre.

Ao confrontarem-se os resultados obtidos na amostragem de Inverno (Fig. 27A e 27B) com os de Verão, verifica-se que a concentração do dióxido de carbono total nos meses mais frios é controlada pelo teor do ião bicarbonato.

No entanto, o mesmo já não se passa com a concentração de CO_2 livre que varia ligeiramente e apresenta valores inferiores para alguns lagos na ilha de São Miguel (Fig. 27B). Este facto deve-se, possivelmente, à mistura do CO_2 livre ao longo da coluna de água, em consequência da ausência de estratificação de origem térmica no período de Inverno das águas, a qual contribui para a libertação de dióxido de carbono livre.

As contribuições de natureza vulcânica, por descargas de fluidos hidrotermais ou por emanações gasosas que possam existir no fundo dos lagos, podem ser deduzidas através do cruzamento dos parâmetros químicos As vs. HCO_3^- (Fig. 28).

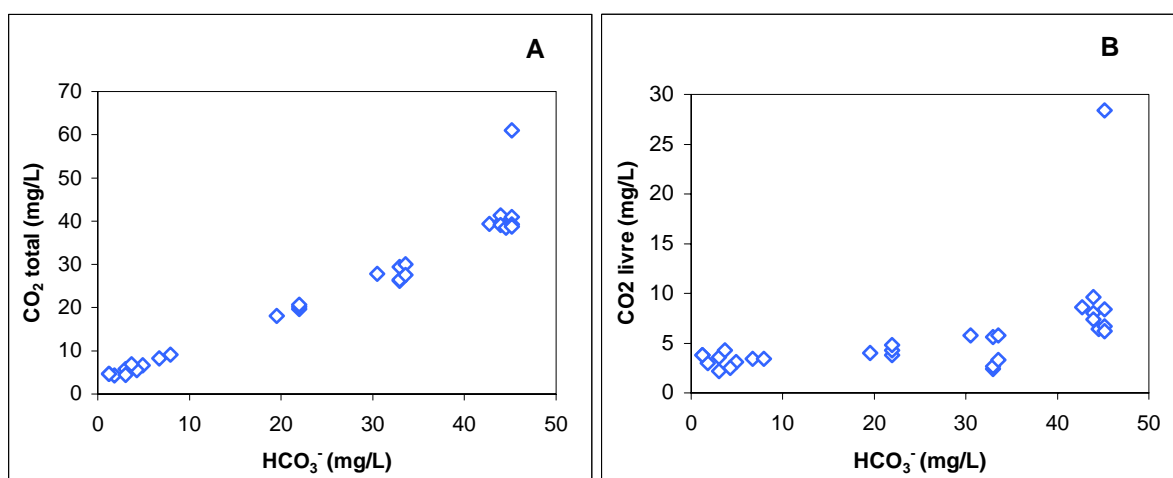


Fig. 27 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando (A): o CO_2 total com o HCO_3^- e (B): o CO_2 livre com o HCO_3^- para os lagos da ilha de São Miguel (amostragem de Inverno).

O elemento As foi analisado apenas para alguns lagos de São Miguel e para o lago da Furna do Enxofre. Estes lagos da ilha de São Miguel estão referenciados na Tabela 10 com a seguinte numeração: 2, 4, 6, 9-13, 15-17, 19, 20, 22-27, 31, 32 e 34-43, enquanto que o lago da Graciosa está referenciado com o número 51.

Na Figura 28A, destaca-se de imediato a posição ocupada pelo lago da Furna do Enxofre (Graciosa). O grande enriquecimento da concentração do ião

bicarbonato face à baixa concentração de As sugere uma contaminação de dióxido de carbono na água do lago através da absorção de gases vulcânicos.

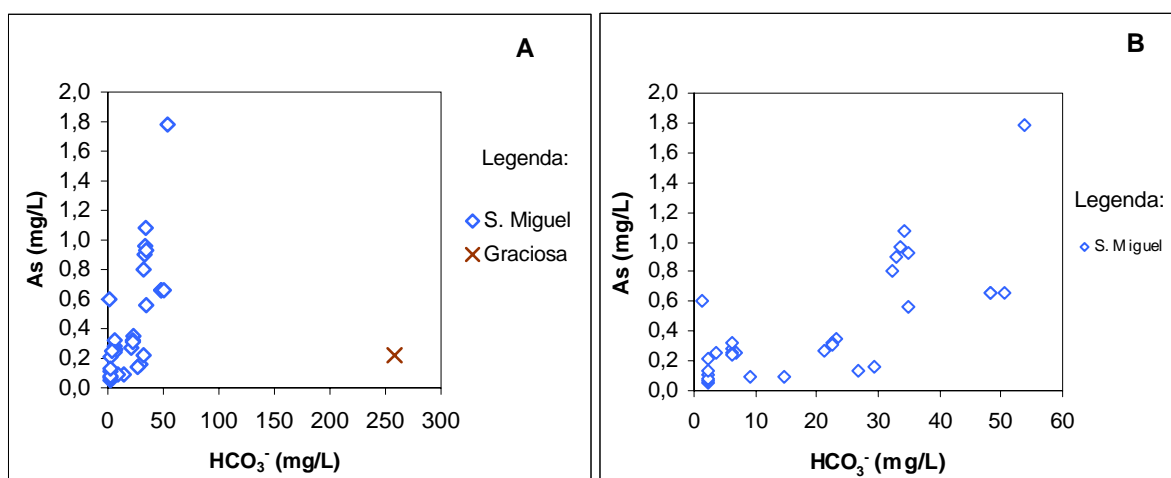


Fig. 28 – Distribuição dos lagos de São Miguel, relacionando o As com o HCO_3^- na amostragem de Verão, sem o lago da Graciosa (B) e com a presença do mesmo (A).

Os lagos com maior concentração de As e que simultaneamente denotam um aumento da concentração do HCO_3^- (Fig. 28B) sugerem uma contribuição de CO_2 com origem nas águas hidrotermais que poderão ser descarregadas no fundo dos lagos. Estes lagos são os que estão presentes na Tabela 10 com os números 4, 6, 22, 23, 34-43. Os lagos com a referência 2, 9, 16 e 17 tendem a afastar-se ligeiramente desta tendência.

O resultado da amostra com a referência 6 da Tabela 10 é o que possui maior concentração de CO_2 livre e total e de As, identificado na Figura 28 (A e C). Este ponto fica próximo do campo hidrotermal que se situa junto à lagoa das Furnas, sendo perfeitamente aceitável uma contaminação da água do lago a partir destas fontes hidrotermais.

Ainda no que diz respeito à lagoa da Furna do Enxofre (Graciosa), é de realçar os dados de Ferreira *et al.* (1993) referentes ao campo fumarólico que existe naquele local, onde o dióxido de carbono é o principal componente com cerca de 94 a 99% do total dos gases emitidos.

Na Figura 30A, verifica-se que os lagos situados no interior de grutas vulcânicas manifestam maiores concentrações de sílica.

Para o primeiro grupo de lagoas, referidos anteriormente (Ref. 4, 6, 22, 34-43), incluindo os lagos das grutas vulcânicas, há a possibilidade do enriquecimento destes elementos se dever à lixiviação existente no meio. No entanto, a sílica também poderá ter origem a partir da contaminação de águas hidrotermais. Realça-se, contudo, que a concentração de SiO_2 é fortemente influenciada, como referido anteriormente, pela actividade biológica, nomeadamente pela fixação do fitoplâncton (Wetel, 1993).

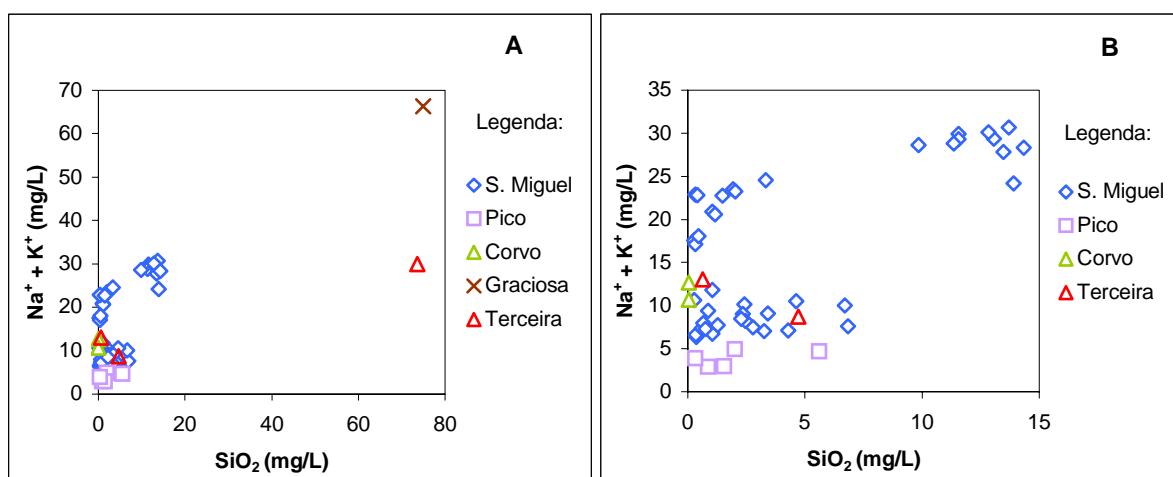


Fig. 29 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando os iões Na^+ e K^+ com a sílica na amostragem de Verão, com a amostra da Furna do Enxofre e do Algar do Carvão (A) e sem a amostra da Furna do Enxofre e do Algar do Carvão (B).

Exceptuando o lago da Graciosa e o lago do Algar do Carvão, verifica-se que a maioria dos lagos apresenta uma baixa concentração em sílica que, em especial nos lagos onde a estratificação é mais acentuada, se pode explicar desde logo pela actividade biológica como referido anteriormente (Fig. 29A e B). No entanto, as amostragens dos lagos das Furnas e Congro mostram teores de SiO_2 e de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ mais elevados possivelmente derivados da contaminação vulcânica bem como da interacção água-rocha. Os restantes lagos manifestam um enriquecimento num dos parâmetros independente do outro.

A relação entre os parâmetros químicos SiO_2 vs. Fe (Fig.30) permite questionar se a sílica terá origem a partir da lixiviação das rochas ou a partir de fontes hidrotermais. Novamente, realça-se que, à semelhança da SiO_2 , o teor em Fe também pode ser modelado por processos biológicos (Wetel, 1993).

No que diz respeito à figura 30A e B, é notória a relação que existe entre os dois parâmetros analisados para as amostragens referenciadas na Tabela 10 com

os números 6, 10, 13, 23, 27 e 42. Apesar dos outros lagos não apresentarem uma relação tão evidente entre o ferro e a sílica, não se exclui a possibilidade de existirem outros lagos na ilha de São Miguel em que a origem do SiO_2 possa ser explicada pela lixiviação das rochas.

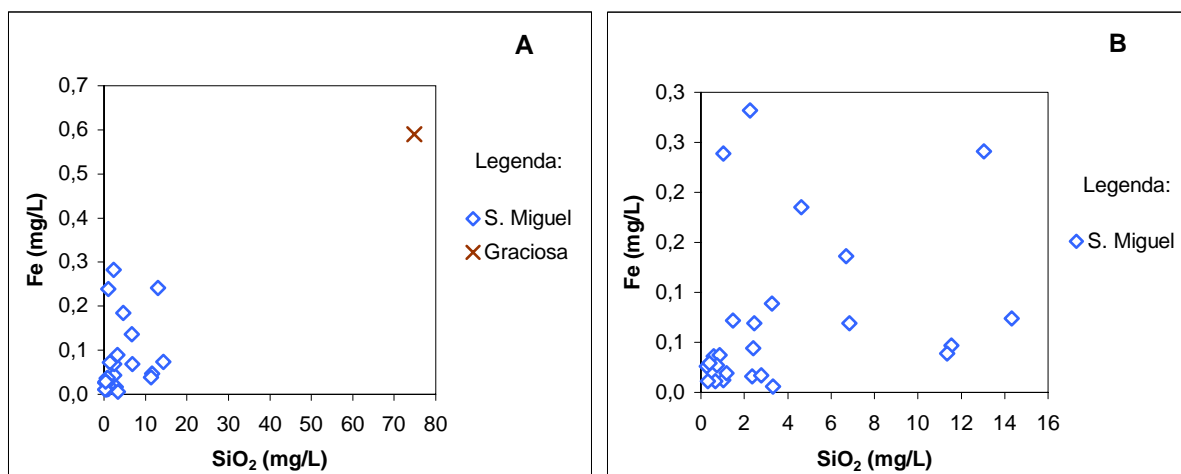


Fig. 30 – Distribuição dos lagos de São Miguel relacionando o ferro com a sílica na amostragem de Verão, sem o lago da Graciosa (A) e com a presença do mesmo.

Na amostragem efectuada na lagoa das Furnas (Ref. 2, 4 e 9) e Santiago (Ref. 41), as amostras apresentam um enriquecimento em SiO_2 que não apresenta correspondência no elemento ferro. No entanto, a amostra com a referência 6 também pertence à lagoa das Furnas. Assim, é de admitir que neste lago a sílica possa ter origem a partir de duas proveniências: uma, a partir da lixiviação e outra, como os dados da Figura 29 evidenciam, pelas descargas hidrotermais.

Na Figura 31, onde se relaciona o teor em metais alcalinos e a SiO_2 na amostragem de Inverno para todos os lagos da ilha de São Miguel presentes na Tabela 11, é notório que os resultados obtidos nesta amostragem são muito semelhantes aos de Verão. Estes valores indicam que a concentração dos parâmetros em estudo tendem a ser estáveis sazonalmente.

Da relação entre o Mg^{2+} e a SiO_2 destaca-se de imediato a elevada concentração que a Furna do Enxofre apresenta nestes elementos, relativamente às outras amostragens (Fig. 32A). A lagoa do Algar do Carvão (Terceira) demonstra um enriquecimento em sílica semelhante à Furna do Enxofre, mas que não é correspondido no que diz respeito ao ião Mg^{2+} .

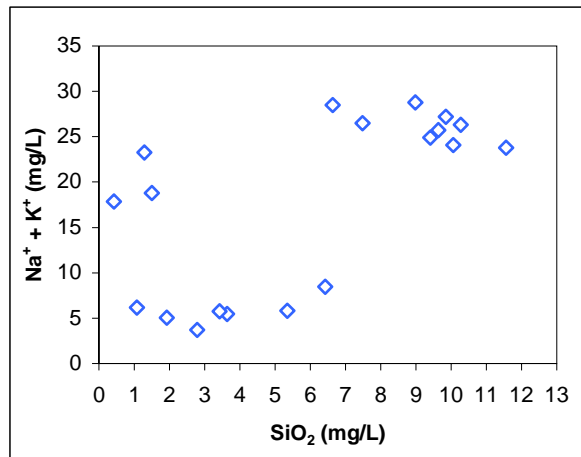


Fig. 31 – Distribuição dos lagos de São Miguel relacionando os iões Na^+ e K^+ com a SiO_2 na amostragem de Inverno.

Excluindo as amostras das grutas lávicas, é possível identificar, na Figura 32B, a disposição das amostras em três direcções diferentes. Observa-se que um grupo de amostras de águas se situa junto ao eixo das ordenadas, apresentando um aumento neste elemento (Mg^{2+}), um segundo conjunto de águas com concentração em magnésio sensivelmente constante e aumentando a concentração em sílica e um terceiro conjunto de amostras de água que apresentam um enriquecimento nestes dois parâmetros. Este último conjunto de amostras de águas pertence à lagoa das Furnas, sugerindo a existência de lixiviação da rocha da lagoa.

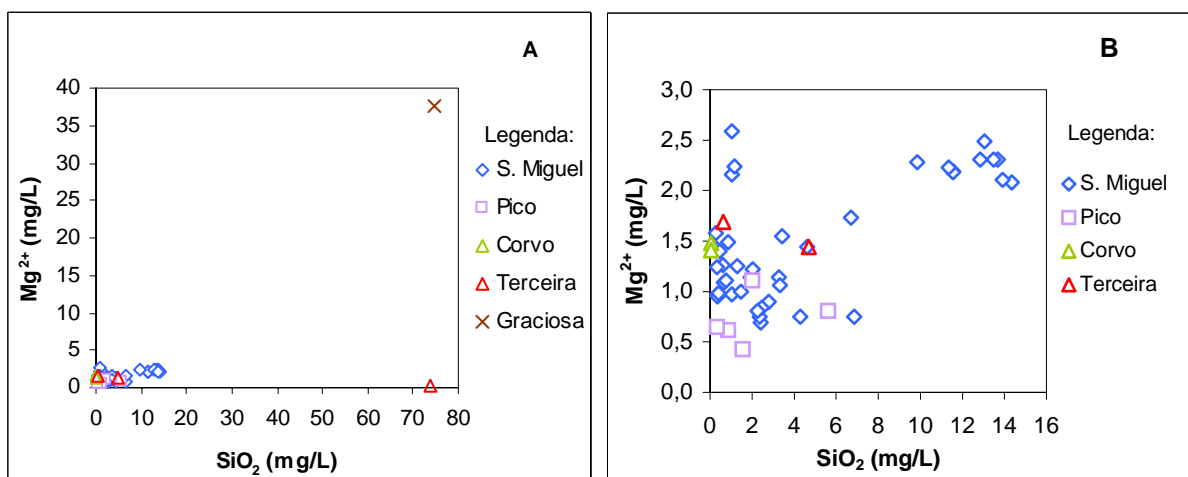


Fig. 32 – Distribuição dos lagos dos Açores, relacionando o ião Mg^{2+} com a SiO_2 na amostragem de Verão. O esquema A inclui as amostras da Furna do Enxofre e do Algar do Carvão ao contrário do esquema B.

3.4 – Análise grupal

Os dados presentes na Tabela 10 foram utilizados na determinação do nível de similaridade dos parâmetros até agora analisados.

O resultado da análise grupal através do modo-R permitiu determinar diferentes grupos de elementos químicos (Fig. 33). Um destes grupos é constituído pelo pH e temperatura, tendo-se verificado que a o comportamento do pH é altamente influenciado pela temperatura na água dos lagos. Um segundo grupo constituído pela condutividade, bicarbonato e dióxido de carbono total revela que o controlo da mineralização da água é exercido pelas espécies carbonatadas. Este grupo possui uma certa proximidade com a associação onde se encontra o dióxido de carbono livre.

O CO₂ livre pertence ao conjunto de elementos constituídos pelos aniões Cl⁻, SO₄²⁻ e pelos catiões Mg²⁺ e Ca²⁺. A relação existente entre o cloreto e o sulfato indica uma contribuição de origem marinha para a maioria dos lagos estudados. A associação destes elementos com o CO₂ livre também sugere que, para estes lagos, o dióxido de carbono livre possa ter uma origem essencialmente a partir da decomposição da matéria orgânica, a qual está presente em grande quantidade devido ao processo de eutrofização que alguns lagos apresentam.

A relação que existe entre o Na⁺ e a SiO₂ indicia que o processo água-rocha contribui grandemente para o quimismo das águas dos lagos. No entanto, não se exclui a possibilidade de ocorrer no fundo dos lagos algum tipo de contaminação através de águas hidrotermais.

A análise grupal modo-Q permitiu identificar vários grupos de amostras de água que possuem características semelhantes como se depreende do respectivo dendograma (Fig.34).

Um primeiro grupo é constituído pelas amostras com a referência 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 34, 35, 38, 41 e 55, que correspondem às lagoas situadas no interior de caldeiras de colapso, com excepção da amostra n.º 55 que pertence ao Algar do Carvão. Este grupo possui uma ligação fraca com um segundo conjunto de amostras (Ref. 10, 11, 14, 15, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 44 e 47). Este último grupo corresponde à lagoa do Fogo, também localizada numa caldeira de colapso, e a um conjunto de pequenos lagos localizados em crateras de explosão. As amostras

destes lagos são caracterizadas pela baixa mineralização e por uma evolução química essencialmente controlada pela contribuição de sais marinhos.

O terceiro grupo de amostras de água patenteia um enriquecimento bem marcado em CO_2 total. Este grupo é constituído pelas amostras 6, 9, 12, 17, 18, 36, 39, 42 e 51 que têm a particularidade de pertencerem quase na totalidade à amostragem executada no fundo dos lagos. Além da contribuição esperada de dióxido de carbono a partir da decomposição da matéria orgânica, é muito provável que parte deste enriquecimento de CO_2 também tenha uma contribuição a partir de fluidos vulcânicos, como no caso da Furna do Enxofre (Ref. 51).

O quarto e último grupo de amostras é constituído pelas amostras 13, 19, 20, 21, 28, 32, 45, 46, 48, 54 e 56. Este grupo revela uma ligação fraca com o grupo anterior e corresponde a lagos de pequena dimensão onde se regista, essencialmente, uma contribuição de sais marinhos.

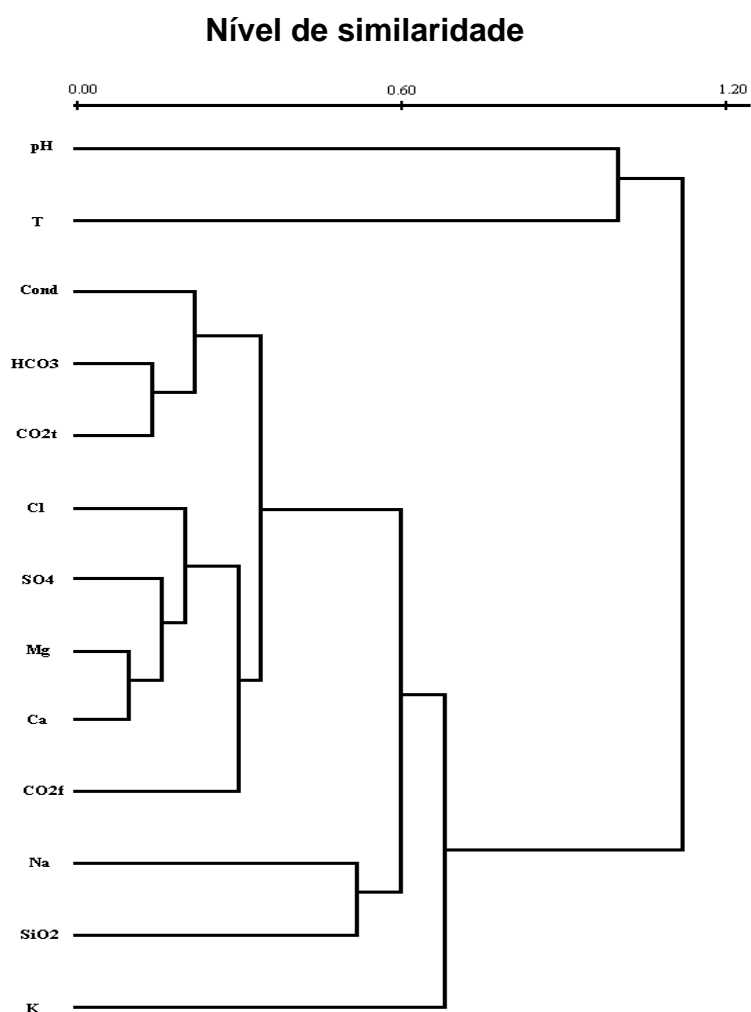


Fig. 33 – Dendrograma da análise grupal modo-R.

Nível de similaridade

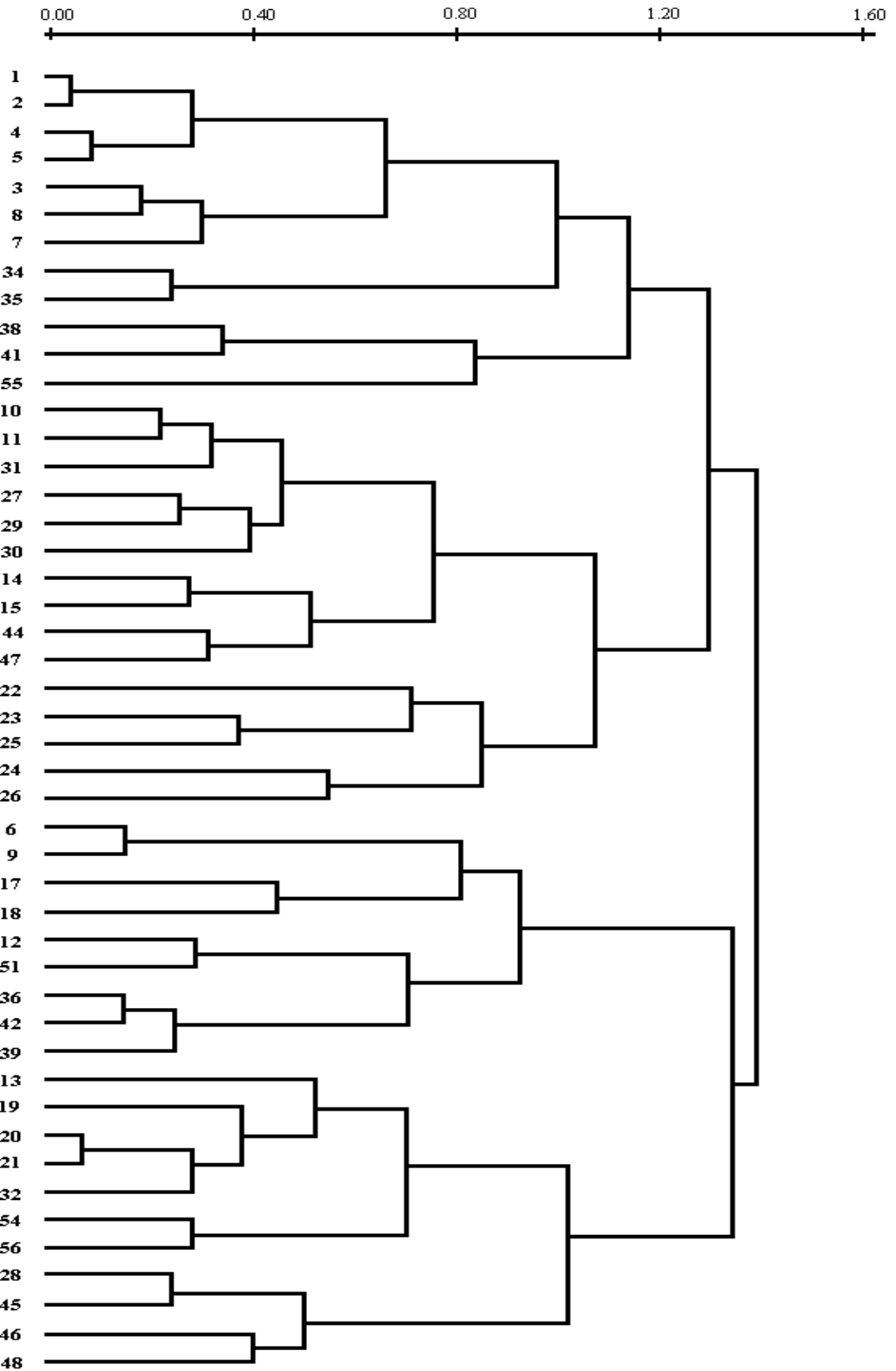


Fig. 34 – Dendrograma da análise grupal modo-Q.

3.5 – Perfis

No decurso das campanhas de amostragem de Verão e de Inverno foram executados perfis hidrogeoquímicos em nove lagos da ilha de São Miguel. Deste modo, foi possível o estudo da variação da composição química daqueles lagos em função da profundidade. Atendendo aos objectivos propostos na presente investigação, esta constitui a primeira abordagem levada a cabo neste âmbito.

O número de perfis efectuado por lago foi planeado logo no início dos trabalhos tendo em conta, principalmente, a área superficial, a profundidade e o tipo de estrutura geológica associada a cada lago. Os perfis feitos nos diferentes lagos nas duas campanhas foram efectuados sempre nos mesmos pontos de amostragem. Na amostragem de Verão, as recolhas efectuadas foram feitas metro a metro na coluna de água. Na campanha de Inverno, procedeu-se à mesma metodologia empregue no Verão para a determinação dos diferentes parâmetros presentes na Tabela 10 e 11, com excepção do Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} que foram determinados, na segunda campanha, de 2 em 2 metros. Esta metodologia foi decidida após a interpretação dos resultados da campanha de Julho.

No complexo vulcânico das Sete Cidades, foram executados seis perfis, nomeadamente nas lagoas das Sete Cidades (Norte e Sul), de Santiago, do Canário e nas lagoas Empadadas. Destes perfis, dois foram executados na lagoa das Sete Cidades, um na parte Sul do lago (lagoa Verde) e outro na parte norte (lagoa Azul; Fig. 4). Tanto no Verão como no Inverno, a profundidade máxima que estes perfis atingiram foi de 21 e 22 metros, respectivamente.

Na lagoa de Santiago, foi feito um único perfil, sensivelmente a meio do lago. Na primeira campanha, recolheu-se água à profundidade máxima de 30 metros e na segunda a 29 metros de profundidade. Apesar de no Inverno o lago ter apresentado um ligeiro aumento do volume em água, o perfil efectuado nesta época apresentou uma menor profundidade devido ao desaparecimento da poita que marcava o local da primeira amostragem. No entanto, procurou-se fazer a segunda amostragem no local mais próximo possível do ponto inicial.

Na lagoa do Canário, foi executado um perfil apenas na amostragem de Verão, atingindo-se uma profundidade de 2 metros.

Foi efectuado um perfil por amostragem nas lagoas das Empadadas. Na lagoa situada mais a Norte, atingiu-se a profundidade de 4 metros no Verão e de 6

metros no Inverno, enquanto que na lagoa situada mais a Sul se atingiu a profundidade de 2 metros nas duas amostragens.

No complexo vulcânico do Fogo, levou-se a cabo a execução de quatro perfis, nomeadamente nas lagoas do Fogo, Congro e São Brás. Na lagoa do Fogo, efectuaram-se dois perfis, um localizado a Norte do lago e um mais a Sul, na zona de maior profundidade. Na primeira amostragem, atingiu-se a profundidade de 10 metros para o ponto mais a Norte e 24 metros para o segundo ponto de amostragem. Na época fria, registou-se uma profundidade de 11 e de 24 metros para os mesmos pontos de amostragem.

Na lagoa do Congro, procedeu-se a uma amostragem por campanha, tendo sido o perfil executado durante o Inverno aquele que atingiu maior profundidade (18 metros), enquanto que no Verão a profundidade alcançada foi de 16 metros. Neste complexo, efectuou-se também um perfil no lago de São Brás, que atingiu a profundidade máxima de 2 metros nas duas épocas.

Por último, foram feitos três perfis na lagoa do complexo vulcânico das Furnas. Um mais a Sul, próximo da capela, outro a Norte, mais próximo do campo fumarólico e o último localizado a Oeste em relação aos outros dois perfis. As profundidades atingidas no Verão foram de 10 metros nos dois primeiros perfis e 11 metros no terceiro ponto referido. Por seu turno, no Inverno registaram-se as profundidades para os mesmos pontos de amostragem, de 11 metros no primeiro e 10 metros nos restantes.

Numa primeira análise dos resultados dos perfis efectuados, foi possível a distinção das lagoas do Canário (Anexo I), das Empadadas Sul (Anexo II) e de São Brás (Anexo III), onde os parâmetros analisados para cada perfil apresentam variações muito pequenas de concentração ao longo da coluna de água nas duas campanhas efectuadas. Estas lagoas são caracterizadas, de um modo geral, por possuírem uma pequena área superficial e uma pequena profundidade, correspondendo a lagos de pequeno volume face aos demais estudados.

No entanto, na lagoa das Empadadas que se localiza mais a Norte, na qual se alcançou a profundidade máxima de 6 metros, os resultados de Verão apresentam-se como uma excepção face aos demais (Fig. 35 e Anexo II). Nesta lagoa, verificou-se que a concentração do dióxido de carbono livre aumenta de 1.9 mg/L para 7.6 mg/L e o dióxido de carbono total aumenta de 5.0 mg/L para 11.6 mg/L no último metro de profundidade. Apesar de se verificar um aumento de concentração para

mais do dobro, estes valores são muito baixos. As linhas que determinam a evolução do CO_2 total, CO_2 livre e HCO_3^- em profundidade, ao manifestarem um traçado tão semelhante entre si, indicam que a concentração do dióxido de carbono total resulta quer do aumento do teor em dióxido de carbono livre, quer do teor em bicarbonato.

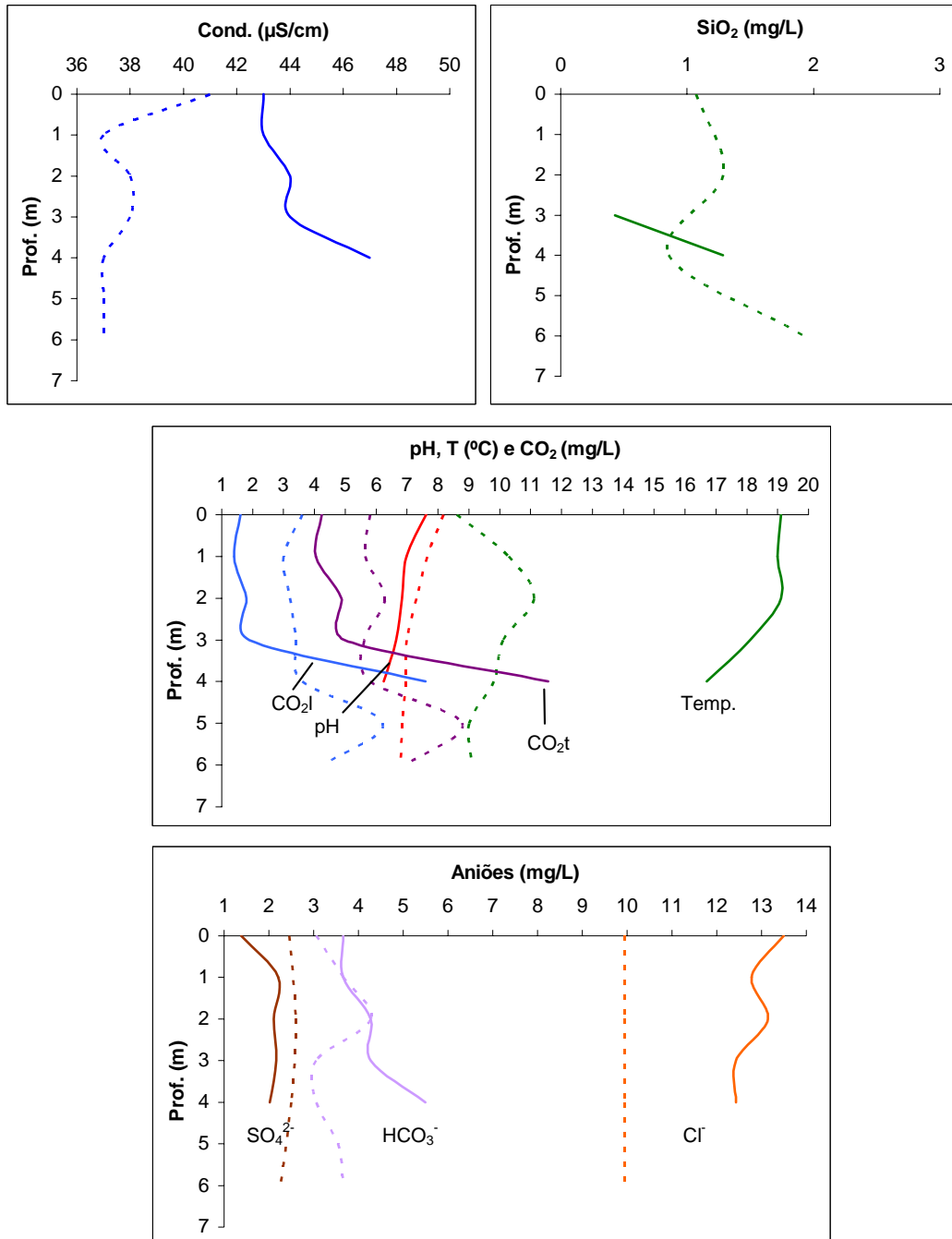


Fig. 35 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Empadada (Norte). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

O bicarbonato manifesta um ligeiro aumento de concentração desde a superfície, mas é no último metro de profundidade que se verifica um aumento mais significativo deste anião. A linha caracterizada por este elemento é muito semelhante à linha referente à condutividade, a qual também manifesta um ligeiro aumento da mineralização da água a esta profundidade. Contudo, o incremento em SiO_2 pode ser explicado unicamente como resultado da diminuição da actividade biológica.

Na amostragem de Verão, os resultados referentes à sílica indicam um aumento deste composto em profundidade, apesar de só existirem dados disponíveis para o último metro de profundidade.

A temperatura, factor de extrema importância na avaliação da variação da densidade e, conseqüentemente, na determinação da estratificação dos lagos, demonstra uma descida a partir dos dois metros de profundidade enquanto que o valor do pH diminui ligeiramente a partir da superfície. Os catiões manifestam variações pouco significativas que podem ser observadas no Anexo II.

Na segunda amostragem, a temperatura e a condutividade foram os parâmetros que maior discrepância manifestaram face à primeira campanha, mas apresentam variações muito pequenas.

A temperatura demonstra uma variação a partir dos 2 metros de profundidade, indicando que a estratificação de origem térmica se mantém ao longo do ano, embora, à semelhança da amostragem anterior, não haja uma clara definição do *hypolimnion*. O dióxido de carbono livre e total continua a manter um traçado semelhante entre si, manifestando um aumento na sua concentração a partir dos 4 metros, tal como o bicarbonato que aumenta ligeiramente a sua concentração a partir dos 4 metros.

Assim, da interpretação destes dados, principalmente no que diz respeito ao CO_2 livre e total, sugere-se que o aumento do teor do primeiro poderá ter origem na decomposição da matéria orgânica existente no fundo do lago. A existir algum tipo de contaminação vulcânica, esta será muito ténue. Registe-se que neste lago existe uma grande densidade de algas devido ao processo de eutrofização de que a lagoa é alvo. Assim, não se exclui a possibilidade deste processo influir nas conclusões apresentadas, apesar da lagoa Empadada, situada mais a Sul, apresentar o mesmo processo de eutrofização e não corresponder ao mesmo traçado para os parâmetros aí determinados (Anexo II).

Num segundo grupo de lagos (Furnas, Fogo, Congro, Sete Cidades e Santiago) de maior área e profundidade, verifica-se a variação mais acentuada de alguns parâmetros ao longo da coluna de água. A maioria dos lagos estudados apresentar uma estratificação de origem térmica no Verão. No Inverno, a diminuição da temperatura provoca o esbatimento da estratificação, havendo, deste modo, uma mistura de água ao longo de toda a coluna, como sugerem os dados referentes à amostragem de Inverno (Tabela 11).

Segundo Wetzel (1993), os lagos com profundidades suficientes para estratificar, situados nas regiões temperadas, no final do Verão e do Outono quando se verifica a diminuição da temperatura do ar, apresentam uma perda de calor e como consequência o esbatimento da estratificação. À medida que a água da superfície se torna mais densa e afunda, a sua tendência é misturar-se através de uma combinação de correntes de convexão e circulação epilimnética induzida pelo vento. A descida das águas de superfície no *metalimnion* continua à medida que o lago vai arrefecendo. A perda total de estratificação normalmente é drástica e poderá ocorrer em poucas horas, especialmente se for provocada por velocidades elevadas dos ventos.

Observa-se no período de Inverno, principalmente para a temperatura e para a condutividade, que os seus valores não se alteram ao longo do perfil. Também a variação do dióxido de carbono não é significativa ao longo de toda a coluna de água.

O pH é invariavelmente ácido abaixo dos 15 metros de profundidade, verificando-se uma maior concentração do dióxido de carbono no *hipolimnion* relativamente ao *epilimnion*.

No Verão, o perfil executado mais a Norte na lagoa das Sete Cidades (lagoa Azul) demonstrou a existência de estratificação térmica (Fig. 36). Deste modo, existem duas camadas de água separadas por uma termoclina situada entre os 6 e os 20 metros de profundidade. A temperatura mantém-se constante na primeira camada, decrescendo 5 °C quando atinge o *hipolimnion*.

É a partir dos 6 metros de profundidade que se verifica o aumento do dióxido de carbono livre e total e a diminuição do pH e da condutividade (Fig. 36). A variação da concentração do bicarbonato é pequena ao longo do perfil, sendo a sua influência sobre a concentração do CO₂ livre pouco significativa (Anexo IV). Os restantes catiões e aniões manifestam concentrações muito constantes ao longo da coluna de

água e a condutividade decresce para valores iguais aos registados de Inverno (Fig. 36; e Anexo IV). A interpretação dos dados sugere que o aumento da concentração do dióxido de carbono poderá ter origem a partir da decomposição da matéria orgânica existente no fundo do lago. Como não há mistura de águas entre as duas camadas devido à estratificação, o dióxido de carbono acumula-se no *hipolimnion*, aumentando de concentração ao longo do Verão.

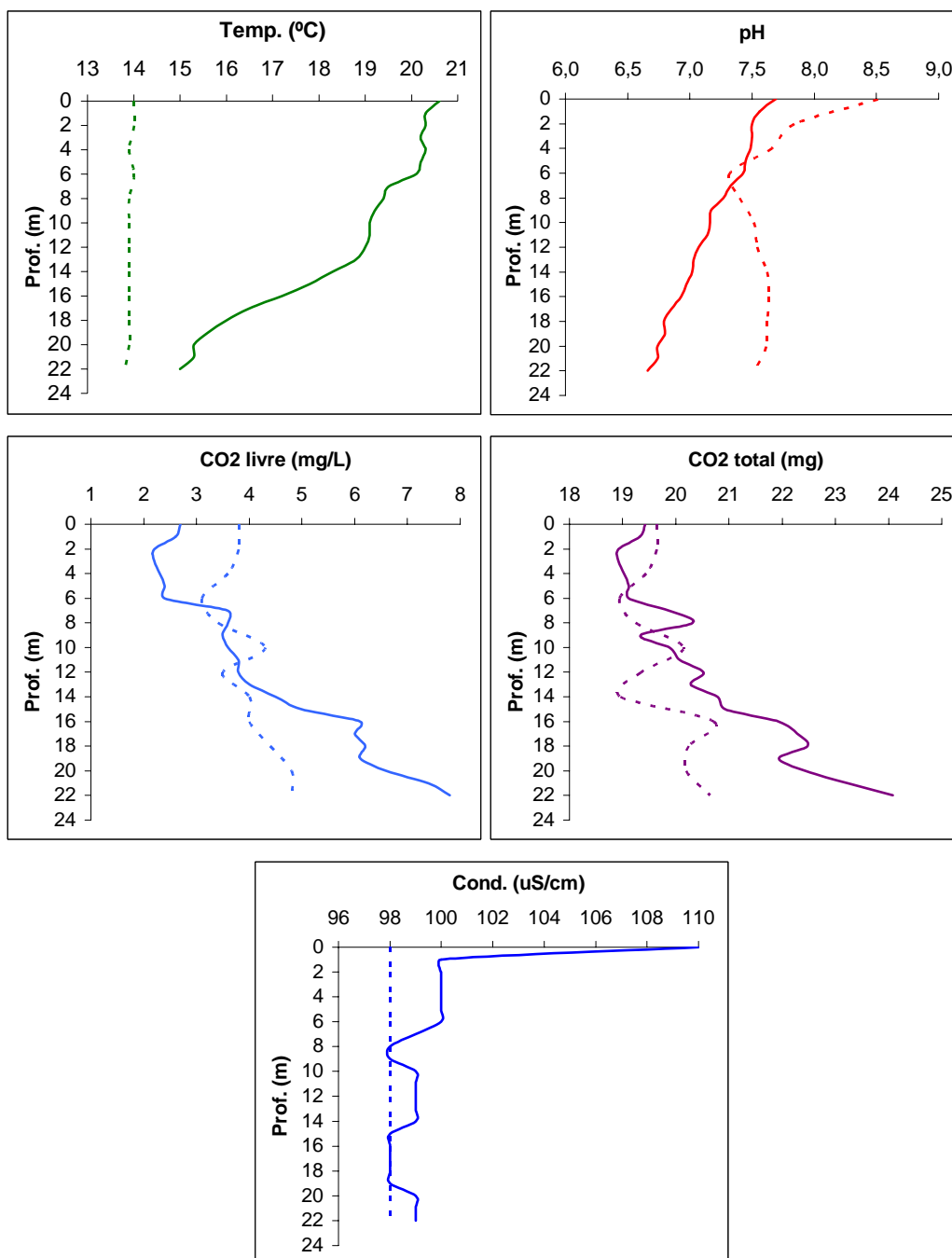


Fig. 36 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Norte). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

No Inverno, a diminuição da temperatura provoca o esbatimento da termoclina, ocorrendo, deste modo, uma mistura de água ao longo de toda a coluna, como sugerem os dados referentes à amostragem de Inverno. Observa-se neste período do ano, principalmente no que diz respeito à temperatura e à condutividade que os seus valores não se alteram ao longo do perfil. Também a variação do dióxido de carbono não é significativa ao longo de toda a coluna de água.

No perfil executado na lagoa Verde das Sete Cidades, situada mais a Sul, verifica-se que a estratificação de origem térmica se situa nos 7 metros de profundidade (Fig. 37), ao contrário dos 6 metros do ponto de amostragem da lagoa Azul. Abaixo desta profundidade verifica-se que a temperatura diminuindo drasticamente. O pH também sofre uma forte diminuição a partir dos 8 metros, profundidade esta onde se regista uma maior diminuição da condutividade (Fig. 37 e 39). Estes dados não deixam dúvidas quanto à possibilidade de existir termoclina entre os 7 e os 15 metros de profundidade.

Os dados relativos ao dióxido de carbono livre e total também demonstram um enriquecimento significativo da sua concentração em profundidade no período de Verão (Fig. 38). No entanto, só dispomos destes dados a partir dos 9 metros devido à técnica empregue na determinação do CO₂ livre não permitir o seu cálculo quando o pH se situa acima dos 8.30.

Os valores de pH à superfície são muito elevados devido à actividade biológica. Com efeito, a actividade fotossintética promovida pelas algas é um processo que conduz ao consumo de CO₂ e, assim, potencia o incremento do pH.

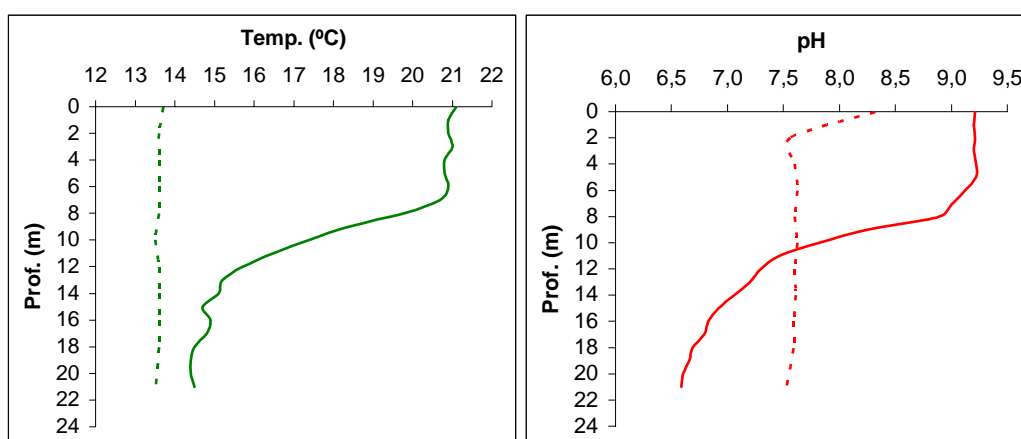


Fig. 37 - Resultados do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Os dados relativos ao CO_2 são muito semelhantes entre si, verificando-se que este composto aumenta, sobretudo, com o incremento de dióxido de carbono livre. O bicarbonato a esta profundidade aumenta ligeiramente, tal como o ião cálcio (Anexo V). Assim, estes dados revelam que a produção de CO_2 livre poderá exceder os mecanismos de neutralização da acidez da água. Desta forma o CO_2 livre é convertido em bicarbonato através da interacção água-rocha. Este processo é compatível com o grande aumento da condutividade que se verifica a partir desta profundidade (Fig. 39). No entanto, não se pode comparar este resultado com a SiO_2 por só existir o seu registo até aos 12 metros, embora se assumia por ventura tal não fosse suficientemente elucidativo, uma vez que o teor de sílica é fortemente influenciado pela actividade biológica. Deste modo, é possível que haja uma contribuição de origem vulcânica em profundidade e que o ligeiro aumento de HCO_3^- resulte da neutralização dos fluidos ácidos.

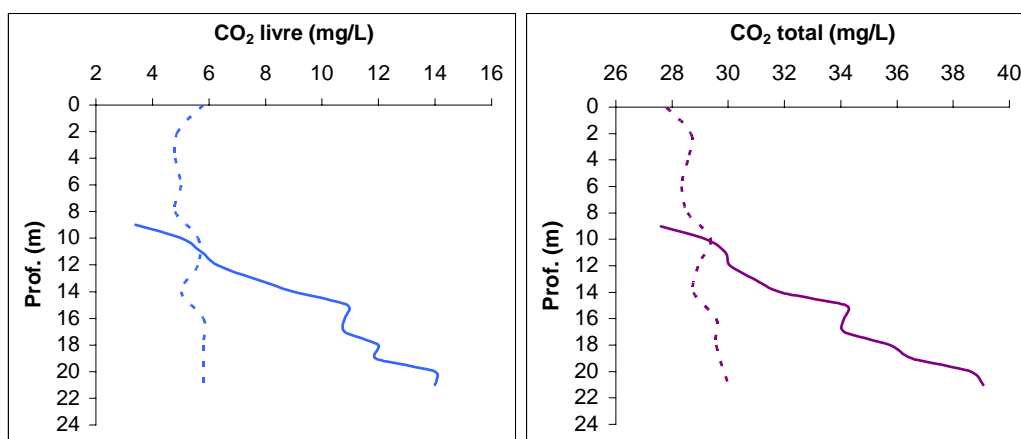


Fig. 38 – Resultado do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Os resultados de Inverno (Fig. 37, 38, 39 e Anexo V), à semelhança do perfil feito na Lagoa Azul, permitem constatar que a estratificação térmica neste período se encontra esbatida, possibilitando a mistura de água entre as referidas camadas existentes na época de Verão e a homogeneização das concentrações dos diferentes parâmetros na coluna da água. Assim, verificam-se variações insignificantes ao longo do perfil executado na época de Inverno.

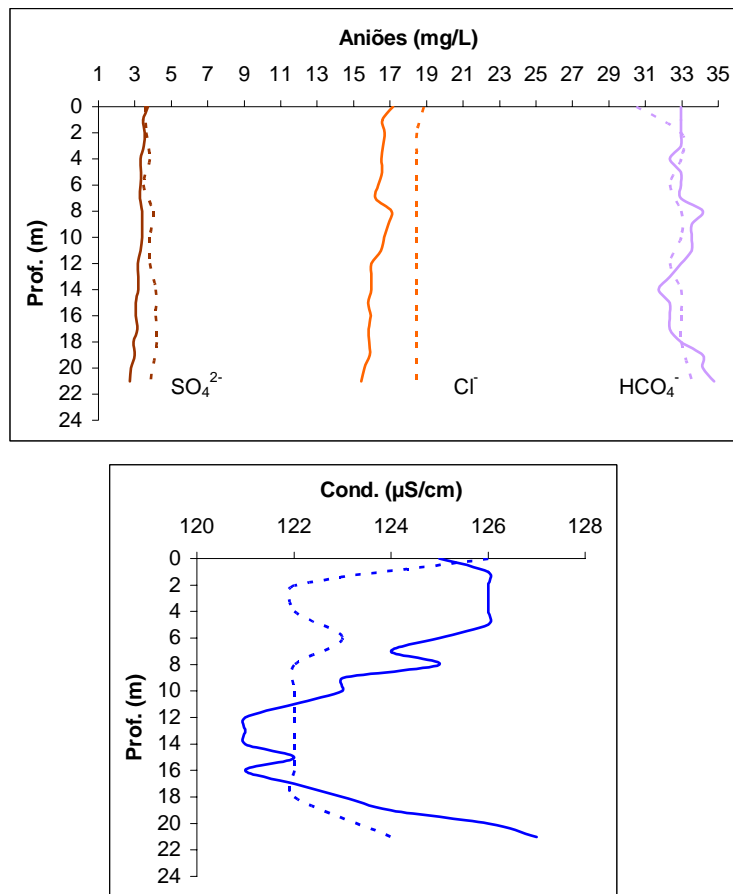


Fig. 39 – Resultado do perfil efectuado na lagoa das Sete Cidades (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

O perfil efectuado na Lagoa de Santiago demonstra algumas semelhanças com o obtido na lagoa Verde (Sete Cidades), nomeadamente no que concerne ao traçado das linhas dos diferentes parâmetros analisados (Fig. 40 e 41). Verifica-se um decréscimo brusco da temperatura a partir dos 6 metros de profundidade (Termoclina), a qual tende a estabilizar aos 18 metros (*hipolimnion*). O CO_2 total manifesta uma variação da sua concentração ao longo da coluna da água. Também não foi possível determinar a sua concentração até aos 9 metros pelas razões anteriormente apresentadas para a lagoa Verde.

A variação da concentração do bicarbonato ao longo da coluna de água é pouco significativa. Por isso, o aumento do CO_2 total deve-se, sobretudo, ao enriquecimento do dióxido de carbono livre ao longo do perfil.

O pH também manifesta uma descida brusca do seu valor ao longo da termoclina, estabilizando no *hipoilimnion*.

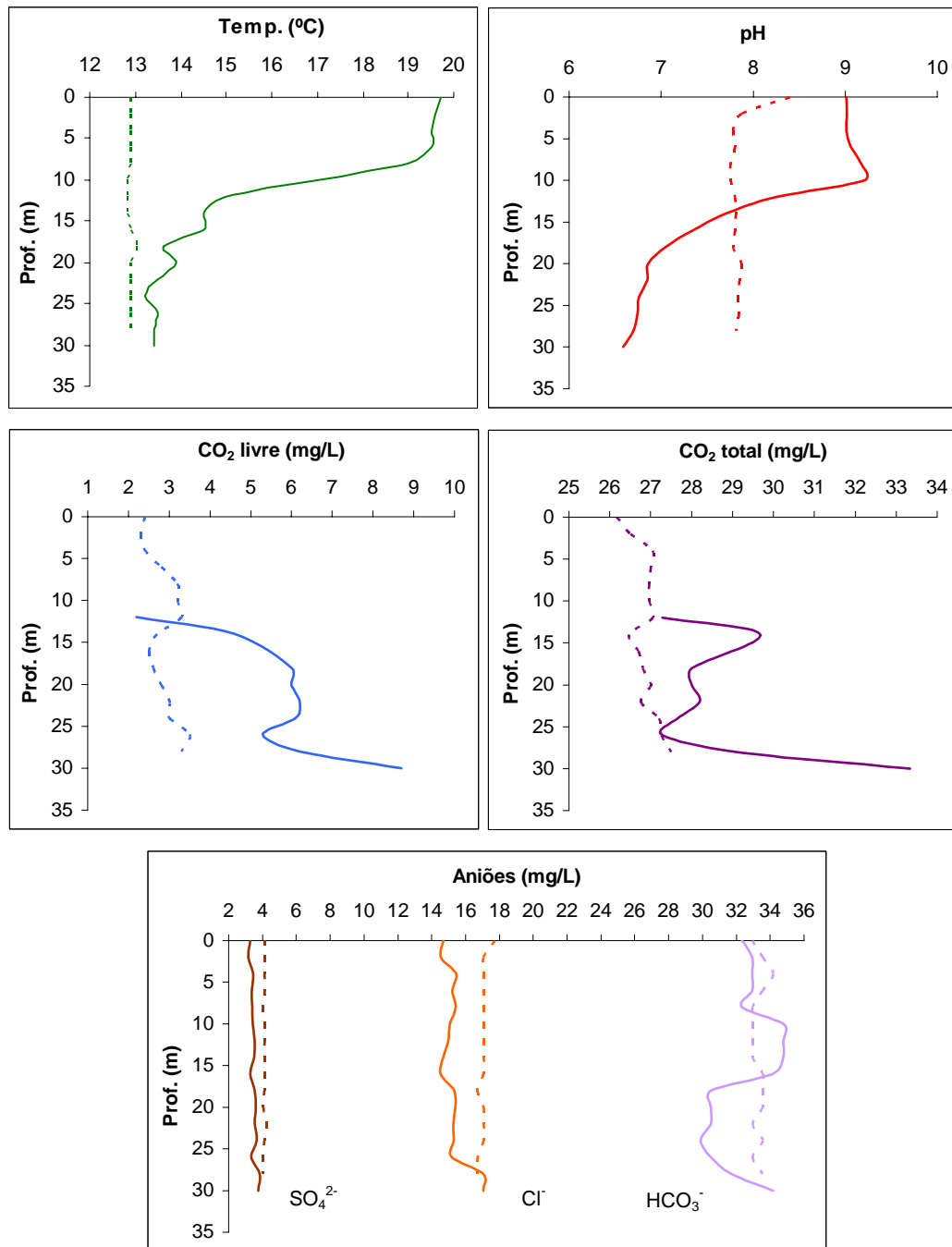


Fig. 40 – Resultado do perfil efectuado na lagoa de Santiago. As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Para o CO_2 total e livre, o HCO_3^- e o ião cloreto verifica-se um aumento ligeiro na sua concentração a partir dos 25 metros de profundidade, aumento esse que coincide com um aumento ténue do valor da condutividade. Todos os outros parâmetros se manifestam de forma constante ao longo do perfil (anexo VI). Assim, estes dados apontam para um enriquecimento destes parâmetros no *hipolimnion*.

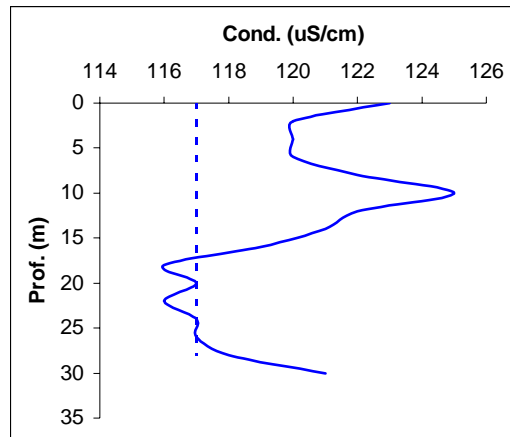


Fig. 41 - Resultados do perfil efectuado na lagoa de Santiago. As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Também à semelhança da lagoa Verde (Sete Cidades) é no *hipolimnion* que se verifica o grande aumento da concentração de CO_2 livre e total e um aumento significativo do bicarbonato e do cloreto coincidente com o aumento da condutividade. Deste modo, não se exclui a possibilidade de haver uma contaminação de fluidos vulcânicos no fundo do lago. Estes fluidos também aumentam a concentração do ião HCO_3^- , pela neutralização dos fluidos ácidos a partir da interacção água-rocha, uma vez que o incremento de CO_2 livre sugere que excede os mecanismos da sua neutralização. Relativamente aos dados de Inverno, verifica-se o mesmo que na lagoa Verde (Sete Cidades).

O perfil executado na parte Norte da lagoa do Fogo registou uma profundidade de 10 metros no Verão e de 11 metros no Inverno. Os resultados obtidos são muito semelhantes ao primeiro grupo de lagos analisados (Anexo 7). Deste modo, verifica-se que na amostragem de Verão os diferentes parâmetros demonstram uma concentração relativamente constante ao longo da coluna da água. Na amostragem de Inverno, verifica-se que os diferentes parâmetros analisados apresentam valores constantes ao longo da coluna de água, com excepção do CO_2 livre e total e do HCO_3^- que denotam, no *hipolimnion*, uma pequena variação de concentração (inferior a 2 mg/L).

Relativamente ao perfil de maior profundidade situado mais a Sul, verifica-se que no Verão a termoclina ocorre a uma profundidade de 11 metros, definindo claramente o *epilimnion*, o qual coincide com uma maior diminuição do pH e com o aumento da concentração do CO_2 livre e total (Fig. 42). Os dados sugerem que o

CO₂ livre é o principal responsável pelo aumento de CO₂ total, uma vez que o HCO₃⁻ se apresenta constante ao longo da coluna de água, da mesma forma que a condutividade também tende a ser constante ao longo do perfil (Fig. 42 e 43).

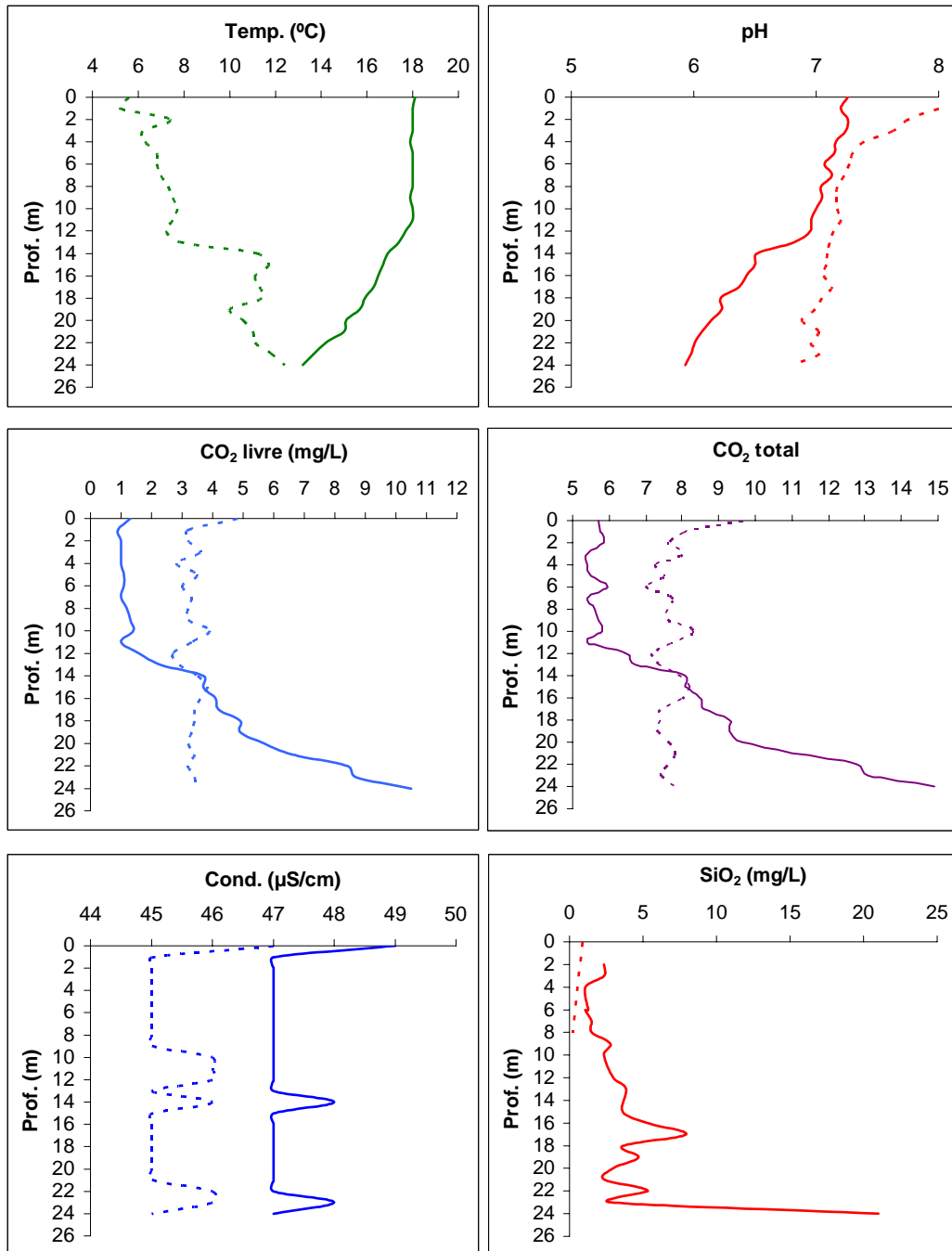


Fig. 42 - Resultados do perfil efectuado na lagoa do Fogo (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

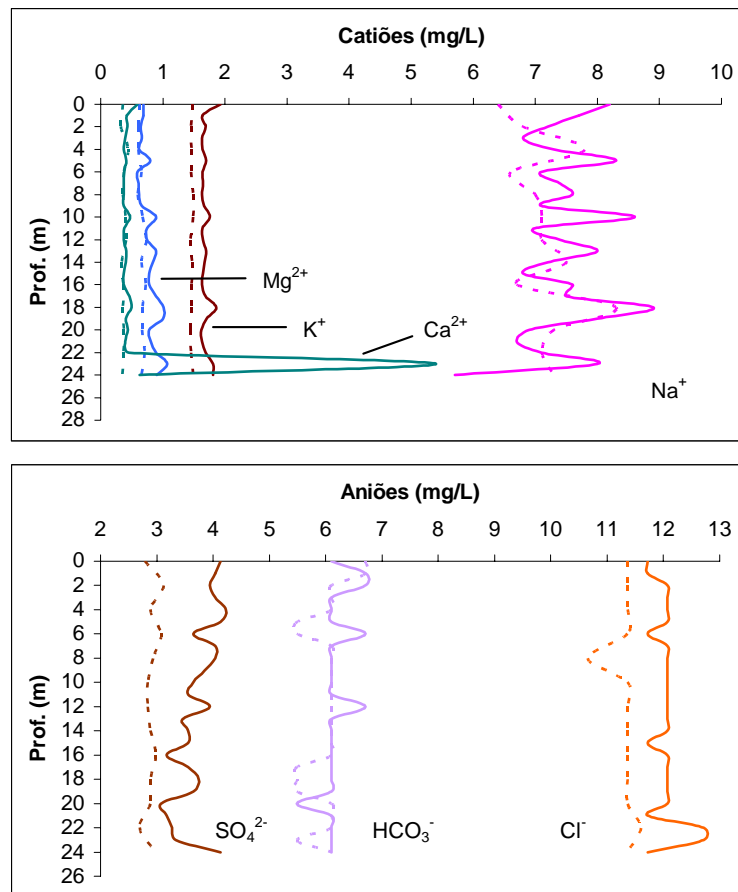


Fig. 43 – Resultados do perfil efectuado na lagoa do Fogo (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Os catiões Mg^{2+} e K^+ apresentam valores constantes ao longo da coluna de água, enquanto que o catião Na^+ demonstra uma variação inferior a 1 mg/L ao longo do perfil. O Ca^{2+} é o catião que apresenta maior variação de concentração no *hipolimnion*. Esta variação é superior a 5 mg/L e ocorre à mesma profundidade (22 m) onde se verifica um aumento ligeiro da concentração dos aniões Cl^- e SO_4^{2-} .

Relativamente à sílica, é notório o seu aumento ao longo da coluna de água. Estes parâmetros apontam para a possibilidade de uma eventual influência de fluidos ácidos de origem vulcânica, devido, principalmente, ao grande incremento de CO_2 livre em profundidade, o qual aumenta para mais do dobro. Salienta-se o facto de que neste lago a eutrofização não se manifesta com tanta acuidade como no caso das Furnas e das Sete Cidades. Assim, é de admitir que o aumento de CO_2 tenha uma contribuição vulcânica, sendo em parte, responsável pelo aumento do CO_2 livre em profundidade.

Na lagoa do Congro observa-se uma estratificação de origem térmica que coincide geralmente com a brusca descida do pH, da condutividade e do potássio que ocorre por volta dos 3 metros de profundidade (Fig. 44 e 45). É a partir dos 12 metros de profundidade (*hipolimnion*) que se registam alterações significativas dos diferentes parâmetros.

Verifica-se que neste lago o CO_2 livre e o HCO_3^- contribuem para o incremento do dióxido de carbono total no *hipolimnion*. É a esta profundidade que se regista um maior aumento de concentração do dióxido de carbono livre e total para mais do dobro das suas concentrações iniciais. Também é aos 12 metros que se verifica um aumento significativo do bicarbonato e da condutividade, bem como uma ligeira diminuição do pH. Este aumento da mineralização é independente da variação da temperatura da água. O potássio e o cálcio registam igualmente um aumento da sua concentração a esta profundidade (Fig. 44, 45 e 46).

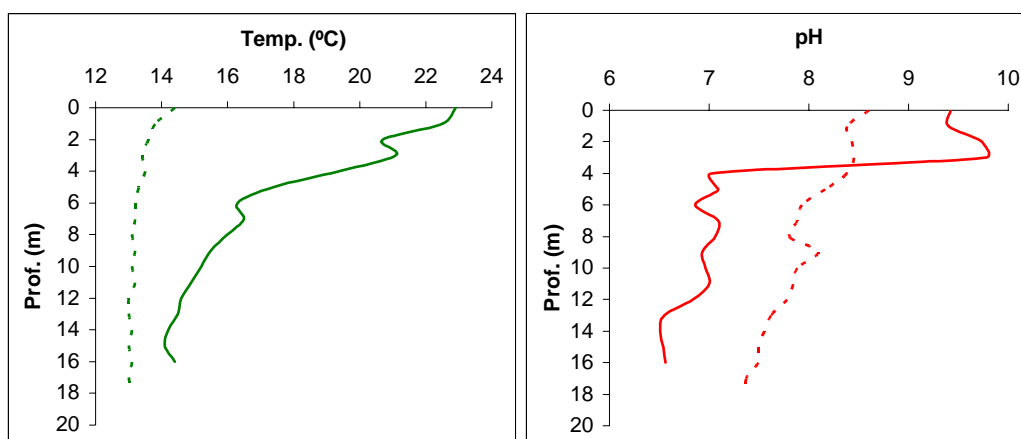


Fig. 44 – Resultados do perfil efectuado na lagoa de Congro. As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Perante estes dados, é evidente a possibilidade de contaminação, através de fluidos magmáticos, das águas do fundo do lago.

O aumento do CO_2 livre indica que o processo de neutralização dos fluidos vulcânicos que converte aquele composto em bicarbonato através da interacção água-rocha não consegue contrabalançar a entrada em solução de dióxido de carbono. No entanto, o enriquecimento de SiO_2 em profundidade demonstra ser compatível com o enriquecimento do bicarbonato através deste mecanismo de neutralização que, conseqüentemente, contribui para o aumento da mineralização a esta profundidade. Contudo, ressalva-se que o empobrecimento em SiO_2 verificado

à superfície pode ser condicionado pela fixação induzida pelo fitoplâncton, o que não sucede em profundidade.

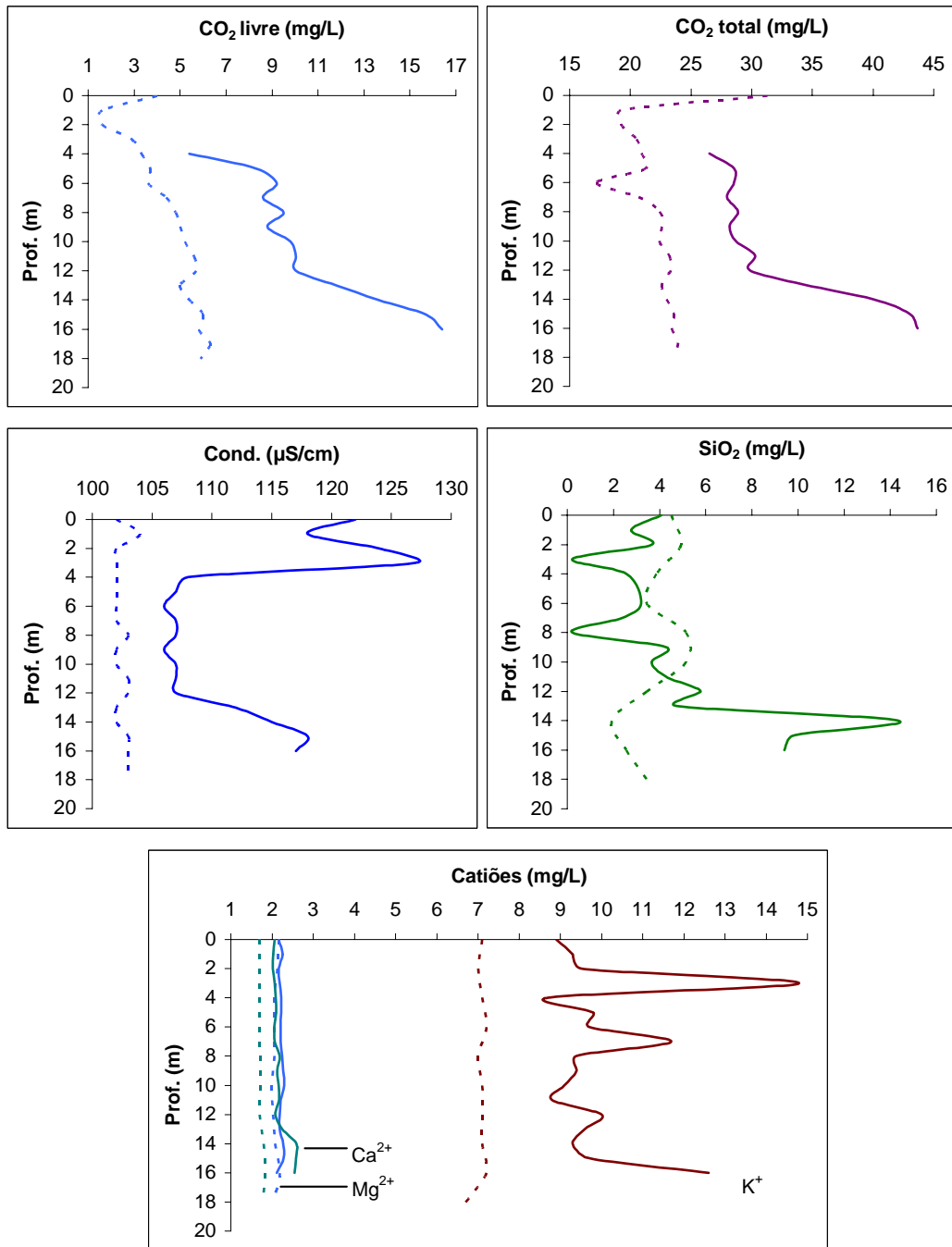


Fig. 45 – Resultados do perfil efectuado na lagoa de Congo. As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

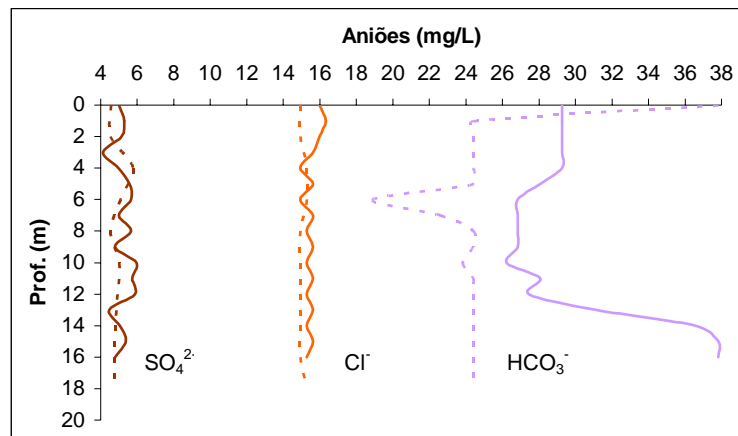


Fig. 46 – Resultados do perfil efectuado na lagoa do Congro. As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

No Inverno, à semelhança dos outros lagos, a diminuição da temperatura permite esbater a estratificação existente de Verão e possibilita a mistura da água, ocorrência esta que conduz à homogeneização dos parâmetros analisados em toda a coluna de água, como demonstram os resultados das Figuras 44, 45 e 46.

No lago das Furnas, é patente a ausência de diferentes níveis de densidade da água ao longo do perfil efectuado mais a Sul na amostragem de Verão e de Inverno (Fig. 47). No geral, os parâmetros analisados apresentam valores constantes ao longo da coluna de água, com excepção do dióxido de carbono livre e total e da condutividade, que aumentam de concentração no Verão a partir dos 9 metros de profundidade. O HCO_3^- contribui para o aumento da concentração do dióxido de carbono total (Fig. 47 e 48).

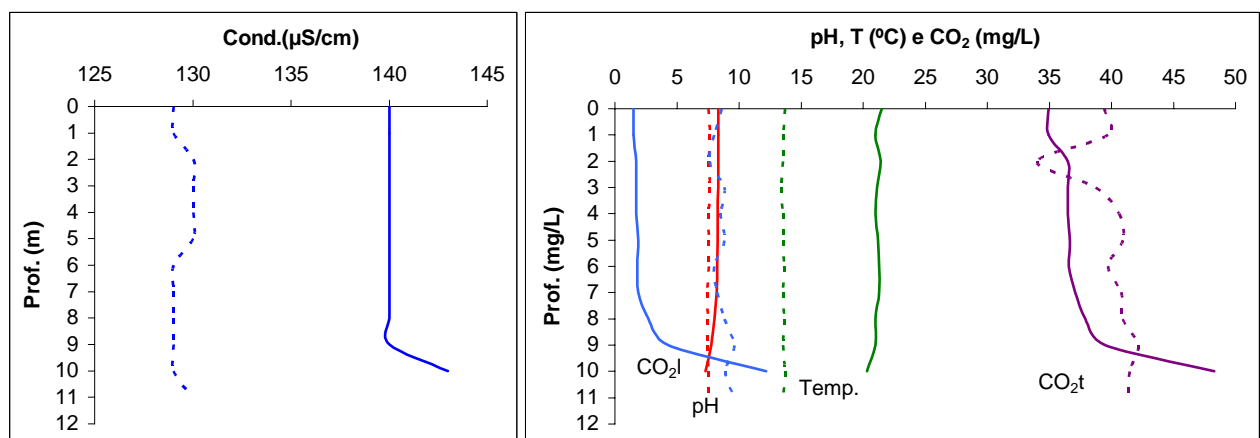


Fig. 47 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

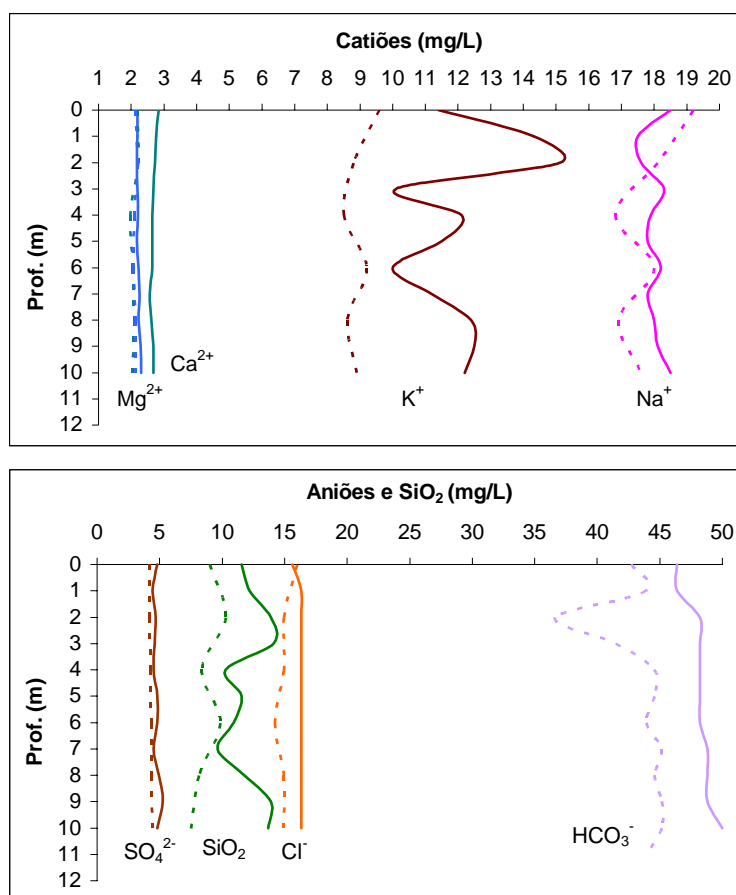


Fig. 48 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Sul). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

O perfil executado no Verão, na zona Oeste da lagoa das Furnas, demonstra uma descida pouco significativa da temperatura desde os 5 metros aos 9 metros de profundidade (*hipolimnion*), acompanhada da descida do pH (Fig. 49). Também é a esta profundidade que o CO₂ livre e total aumentam significativamente de concentração. O dióxido de carbono livre apresenta no *hipolimnion* uma concentração sete vezes superior ao *epilimnion* (23.4 mg/L), enquanto que o dióxido de carbono total apresenta no *hipolimnion* um valor de 62.1 mg/L. Relativamente ao bicarbonato, no último metro de profundidade manifesta-se um aumento de concentração de 5.5 mg/L (Fig. 50). Também é no último metro de profundidade que se regista um aumento da mineralização da água.

No Inverno, verificou-se que os diferentes parâmetros analisados não apresentam variações significativas.

Quanto ao perfil efectuado a Norte da lagoa das Furnas, no Verão, também se registou uma diminuição pouco significativa da temperatura entre o *epilimnion* e o

hipolimnion (2.2 °C). Do mesmo modo, o pH também diminuiu os seus valores a partir dos 5 metros de profundidade e a sílica aumentou a sua concentração a partir desta profundidade (Fig. 51).

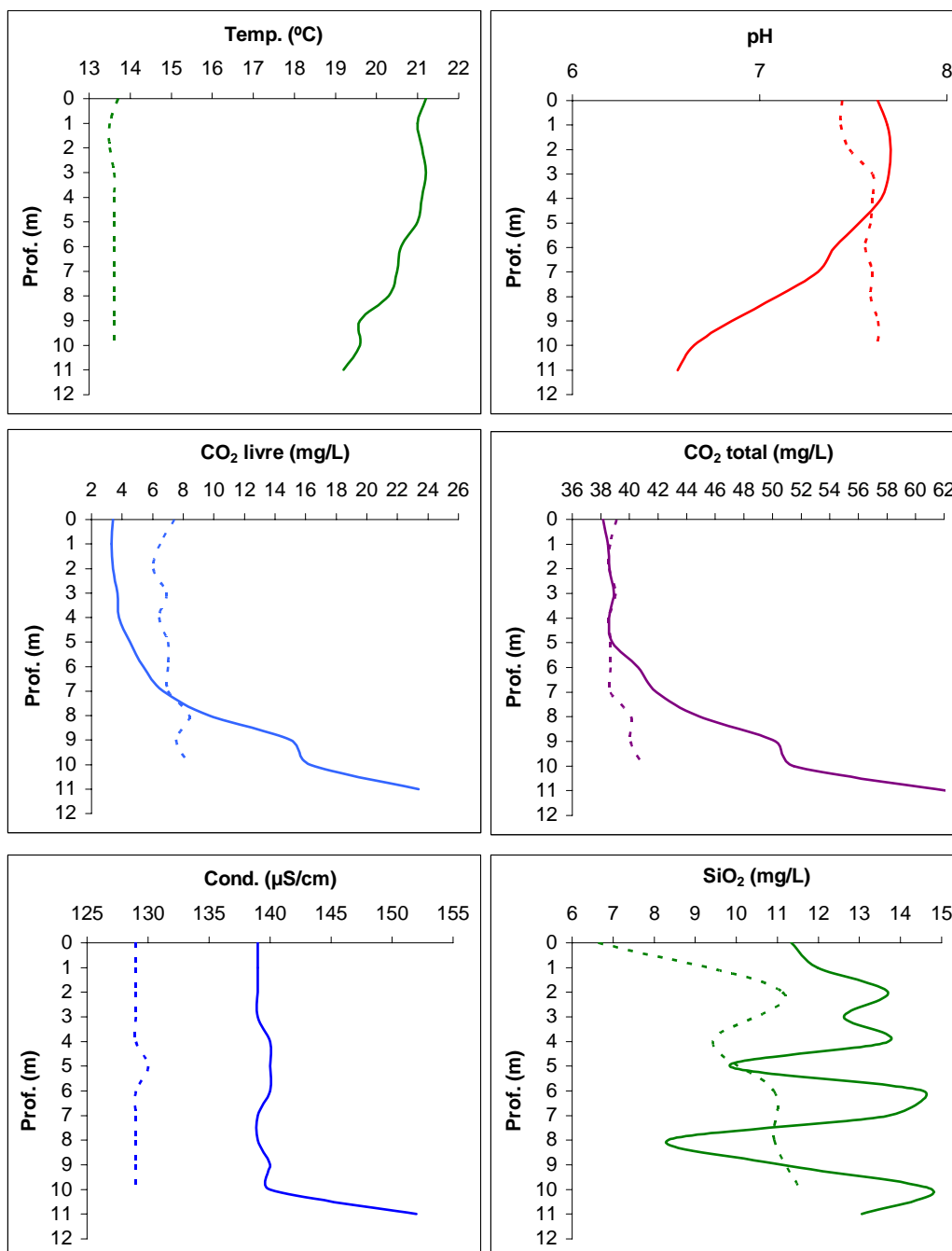


Fig. 49 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Oeste). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

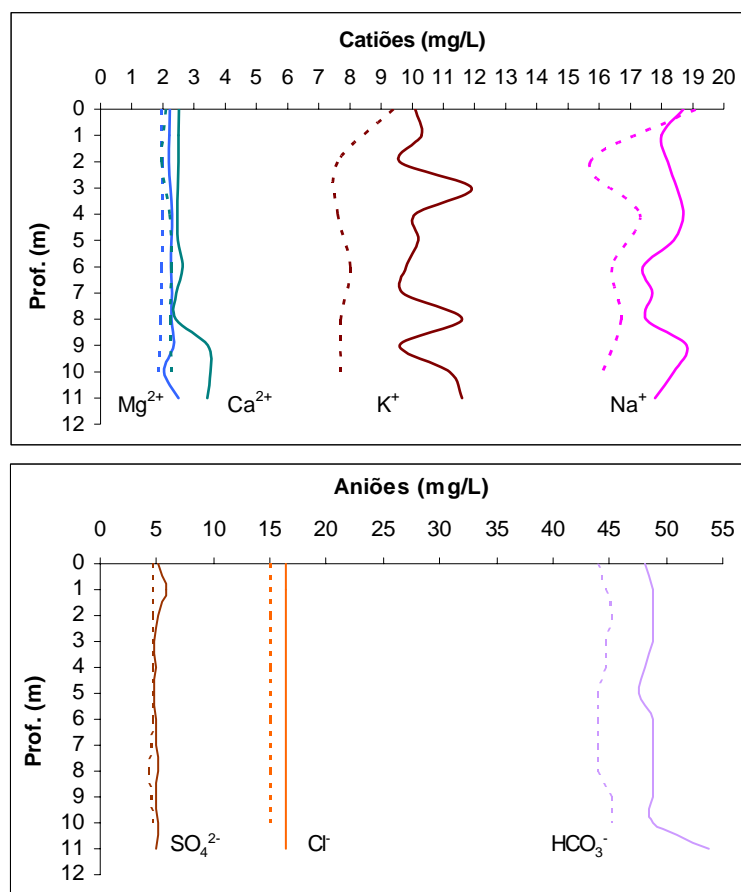


Fig. 50 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Oeste). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Foi neste local de amostragem onde se verificaram as maiores concentrações de CO₂. O dióxido de carbono livre e total registaram, no fundo do lago, concentrações de 27.8 e 64.44 mg/L, respectivamente. O bicarbonato manifesta um pequeno aumento de concentração a partir dos 7.5 metros de profundidade, onde também se regista um aumento da mineralização da água (Fig. 51 e 52).

Relativamente aos restantes parâmetros analisados, estes não registam variações significativas ao longo da coluna de água com excepção do ião K⁺ que regista um aumento de concentração no *epilimnion* (Fig. 52).

Os dados da amostragem de Inverno sugerem que a estratificação de origem térmica não existe ao longo do ano. Os parâmetros analisados na segunda amostragem tendem a manifestar concentrações sem grandes variações ao longo do perfil. Excepção feita às concentrações do dióxido de carbono livre e total que manifestam um enriquecimento significativo ao longo da coluna de água. O CO₂ livre no *hipolimnion* registou uma concentração superior à verificada no Verão (28.4

mg/L), enquanto que o CO₂ total apresenta uma concentração próxima da registada na primeira amostragem (61.0 mg/L). Nos perfis a Norte e a Oeste é onde se verificam maiores semelhanças entre as três amostragens efectuadas.

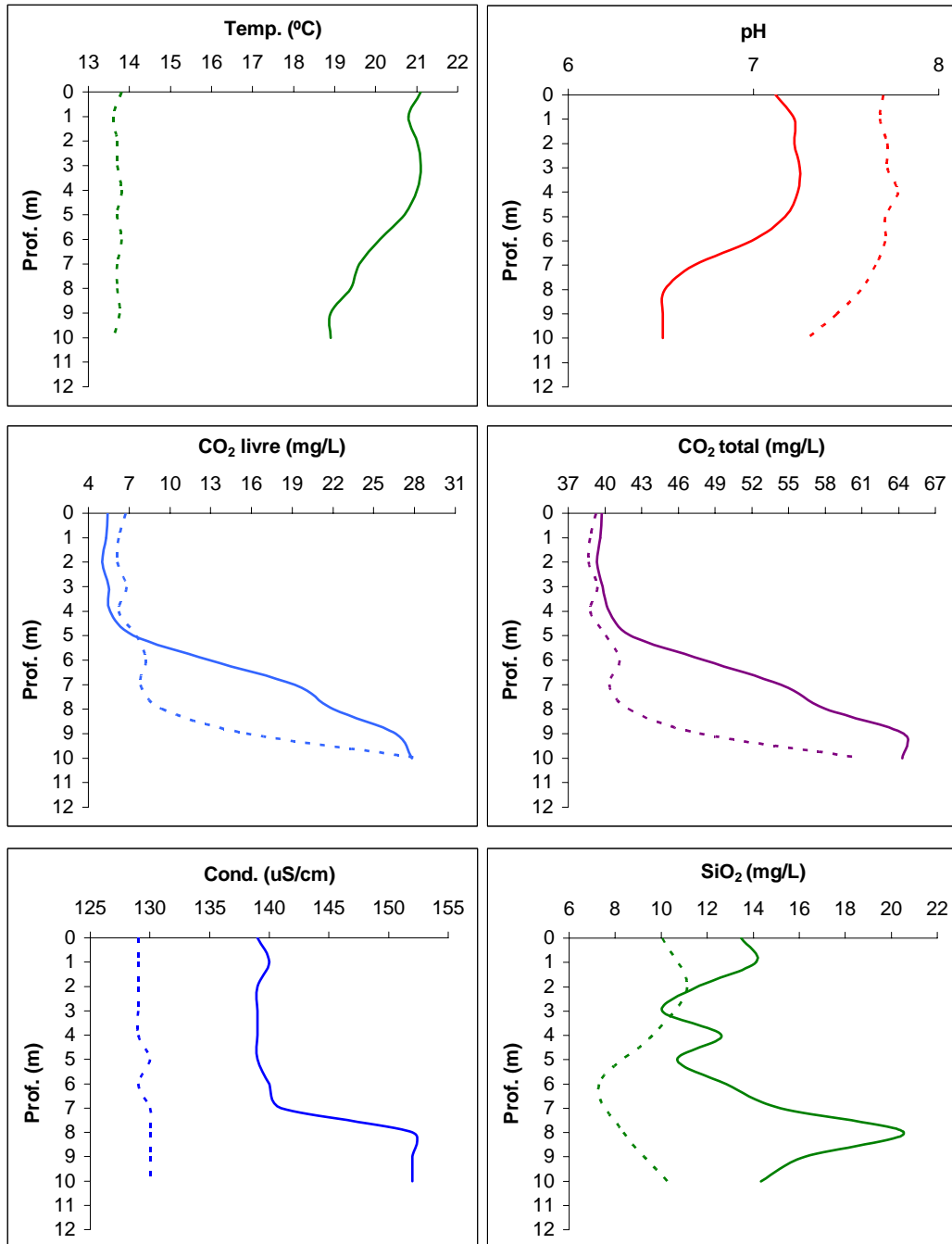


Fig. 51 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Norte). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

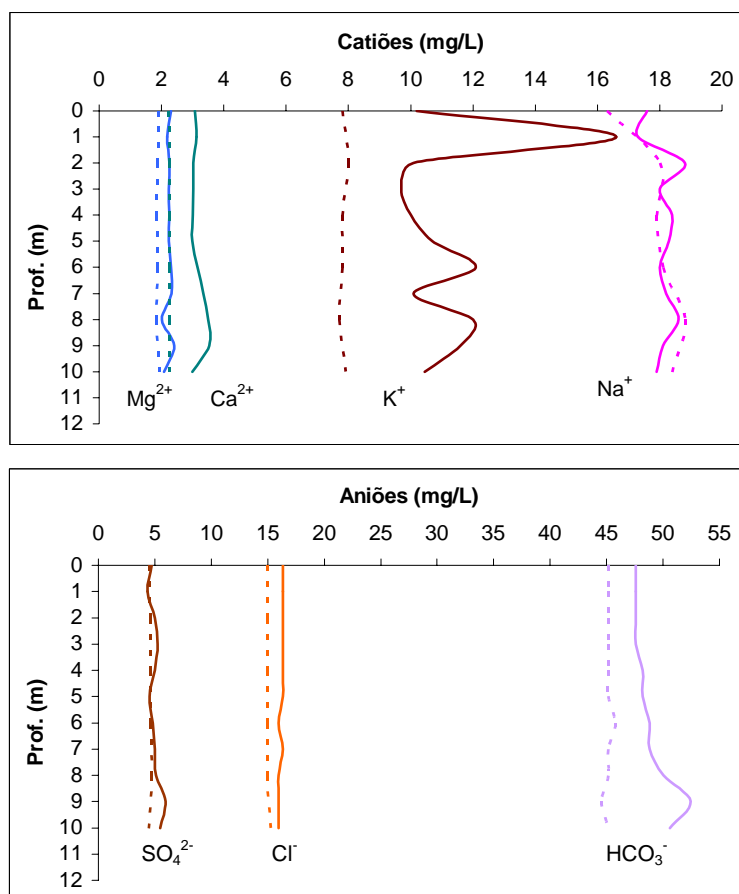


Fig. 52 – Resultados do perfil efectuado na lagoa das Furnas (Norte). As linhas contínuas referem-se à amostragem de Verão e as linhas tracejadas referem-se à amostragem de Inverno.

Relativamente à mineralização da água no *hipolimnion*, verifica-se que esta tende a aumentar no sentido Sul-Norte do lago, assim como também é no perfil executado mais a Norte onde se regista um maior valor de condutividade, mesmo a uma menor profundidade. A concentração da sílica também apresenta um enriquecimento no mesmo sentido, situação que poderá estar associada aos factores biológicos já discutidos anteriormente. O dióxido de carbono livre e total seguem este aumento de concentração no sentido Norte do lago, assim como se regista um aumento de concentração a uma menor profundidade no perfil executado a Norte. O bicarbonato, apesar de denotar um aumento de concentração menos significativo, também é nos dois perfis realizados mais a Norte da lagoa das Furnas que regista maiores concentrações.

Embora este lago possua uma grande densidade de algas devido ao processo de eutrofização que ocorre na lagoa, os dados analisados sugerem um incremento de dióxido de carbono livre de origem inorgânica que é independente da

possível contribuição do CO₂ de origem orgânica. É de admitir que, parcialmente, o aumento de CO₂ possa ter uma contribuição vulcânica, sendo, em parte, responsável pelo aumento verificado em profundidade. É igualmente admissível que, para além da possível contaminação a partir de voláteis magmáticos em profundidade, a descarga para o lado de fluidos hidrotermais em profundidade ou directamente a partir da escorrência superficial originada no campo fumarólico situado junto à margem Norte, seja também um processo com influência sobre o quimismo da água, nomeadamente no que diz respeito à promoção do bicarbonato e da sílica.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As erupções vulcânicas que ocorrem em lagos vulcânicos induzem uma variação das propriedades físico-químicas das águas dos lagos, numa fase pré-eruptiva (Christenson, 2000; Delmelle *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2000; Varekamp, 2002). Deste modo, tem-se utilizado a hidrogeoquímica na vigilância de riscos geológicos, apesar dos registos referentes à aplicação deste método na monitorização vulcânica serem muito recentes.

A monitorização geoquímica das águas dos lagos tem sido aplicada em massas de água vulcânicas como no caso do vulcão Ruapelu, na Nova Zelândia (Giggenbach e Glover, 1975; Christenson e Wood, 1993; Christenson, 2000); na *laguna caliente* do vulcão Poàs na Costa Rica (Brantley *et al.*, 1987; Rowe *et al.*, 1992; Martínez *et al.*, 2000); no lago Yugama do vulcão Kusatsu-Shirane no Japão (Takano e Watanuki, 1990; Ohba *et al.*, 2000); no lago Nyos (e. g. Kusakabe *et al.*, 2000) in Marini *et al.* (2003); no lago Albano na Itália (Cioni *et al.*, 2003); no lago Quilotoa no Equador (Aguilera, *et al.*, 2000) e no lago Yugama (Takano *et al.*, 2000).

A monitorização dos lagos vulcânicos tem incidido na análise geoquímica de diferentes elementos. Para Hurst *et al.* (1991), Armienta *et al.* (2000), Christenson (2000) e Rymer *et al.* (2000), a relação entre os parâmetros Mg^{2+} e o Cl^- é fundamental na monitorização vulcanológica. Estes autores consideram que se da comparação do cruzamento dos elementos anteriores entre diferentes amostragens for inferida uma variação, esta poderá estar relacionada com erupções vulcânicas. Estas variações são flutuações particularmente observadas no período que medeia entre crises.

Em lagos vulcânicos de águas ácidas, normalmente designados como salmoras, além da relação Mg^{2+}/Cl^- , a análise e cruzamento dos aniões SO_4^{2-}/Cl^- revela-se de grande importância vulcanológica, permitindo acompanhar a evolução nos sistemas vulcânicos e a possibilidade de quantificar a desgaseificação da câmara magmática (Aeschbach-Hertig *et al.*, 1999; Delmelle *et al.*, 2000; Sriwana *et al.*, 2000 e Armienta *et al.*, 2000).

Os catiões K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^+ e Fe^+ também são bons indicadores da evolução dos sistemas vulcânicos, uma vez que são controlados através da contaminação das águas dos lagos por fluidos vulcânicos de natureza ácida. Assim,

quando este material entra nos lagos, vai influenciar o equilíbrio existente e reagir com o material rochoso, o qual tende a libertar, por dissolução, estes catiões nas massas de água (Christenson, 2000; Giggenbach, 1989; Delmelle *et al.*, 2000; Sriwana *et al.*, 2000; Aguilera *et al.*, 2000; Varekamp, 2002 e Cioni *et al.*, 2003).

No Arquipélago dos Açores nunca foi explorada a hidrogeoquímica dos lagos vulcânicos na monitorização vulcanológica. As análises efectuadas até hoje foram muito esporádicas e com outros objectivos de estudo (Cruz *et al.*, 1999; Martini *et al.*, 1994). No entanto, esta técnica poderia contribuir qualitativamente para a vigilância vulcânica. A existência de lagoas localizadas em complexos vulcânicos potencialmente activos, além de contribuir para uma melhor monitorização vulcânica, também contribuiria para um melhor conhecimento destes sistemas. Um estudo mais aprofundado destes sistemas lacustres poderia fornecer informação adicional acerca da composição dos fluidos magmáticos de cada sistema vulcânico. É possível obter informação acerca dos componentes pertencentes às zonas de subducção, do manto, da crosta e de todos os materiais envolvidos nestas estruturas (Fehn *et al.*, 2002).

Foram executadas amostragens em 16 lagos da ilha de São Miguel e 4 lagos na ilha Terceira. Na totalidade dos lagos estudados, além das amostras recolhidas, incluíram-se dados compilados da bibliografia existente.

Dos lagos amostrados, 72.7% localizam-se em cones vulcânicos, nomeadamente 36.4% dos lagos localizam-se em cones de escória, 13.6% em *Maars* e 13.6% em caldeiras de colapso. Muitos dos lagos apresentam pequenas áreas que variam entre os $8.94 \times 10^{-4} \text{ km}^2$ e 18.36 km^2 . A lagoa das Éguas e Rasa (S. D.) possuem a menor profundidade (0.8 m), enquanto que a maior profundidade foi registada na lagoa de Santiago (30 m).

As águas analisadas são frias, apresentam mineralizações baixas e são do tipo Na-Cl e Na-HCO₃. O estudo dos diferentes elementos químicos demonstrou uma variação que decresce na seguinte ordem: Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺>K⁺ para os catiões e Cl⁻>HCO₃⁻>SO₄²⁻ para os aniões.

Foi possível a identificação de dois processos de evolução geoquímica destas massas de água. (1) uma contribuição de origem atmosférica, dominada pelo quimismo da água do mar, permitindo um enriquecimento, principalmente, dos iões Na⁺ e Cl⁻ e (2) uma contribuição de origem vulcânica, contribuindo directamente para o aumento do CO₂ e dos diferentes elementos resultantes das reacções água-rocha.

A concentração de dióxido de carbono variou entre os 2.7 mg/L e 64.4 mg/L (média = 22.7 mg/L e mediana = 21.8 mg/L) nos diferentes lagos. A maioria dos lagos apresentou pequenas concentrações de CO₂ conciliável com uma origem a partir da decomposição da matéria orgânica. No entanto, alguns lagos apresentam concentrações de CO₂ mais elevadas susceptíveis de terem igualmente uma origem vulcânica, nomeadamente os lagos das Furnas (São Miguel) e Furna do Enxofre (Graciosa).

Foram executados perfis em diversos lagos, os quais demonstraram, no Verão, a existência de estratificação de origem térmica que permite o aumento da concentração de CO₂ no *hipolimnion*. No Inverno, a diminuição da temperatura permite o esbatimento da estratificação térmica, permitindo a circulação em toda a coluna de água. Deste modo, o enriquecimento de CO₂ no fundo dos lagos é menos significativo.

As lagoas das Sete Cidades e Santiago localizadas no complexo vulcânico das Sete Cidades, as lagoas do Fogo e do Congro, localizadas no complexo vulcânico do Fogo, e a lagoa das Furnas, localizada no complexo vulcânico das Furnas, todas situadas na ilha de São Miguel, são lagos que reúnem excelentes condições, tais como, acesso, dimensão e, principalmente, as suas profundidades, podendo constituir um grande contributo para a monitorização das referidas estruturas vulcânicas. Apesar da lagoa das Furnas apresentar uma profundidade máxima não muito significativa, possui condições já exploradas nos capítulos anteriores, que lhe conferem a categoria de um excelente local de estudo.

As lagoas localizadas no interior de grutas lávicas, o Algar do Carvão (ilha Terceira) e a Furna do Enxofre (ilha Graciosa) – esta última também devido ao seu interesse a nível vulcânico e turístico – poderão ser alvo de uma monitorização.

No sentido de aprofundar o conhecimento acerca destas massas de água, principalmente na ilha de São Miguel, as lagoas referidas anteriormente poderiam ser objecto de estudo no âmbito do presente Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos. Deste modo, sendo aplicada uma malha de amostragem apertada em cada um destes lagos, seria possível um conhecimento mais aprofundado da batimetria destes lagos e a possível determinação de estruturas associadas aos sistemas vulcânicos.

Como é referido no presente trabalho, há fortes indícios de contaminação das águas dos lagos por fluidos hidrotermais. Assim, seria possível a escolha de

determinados locais de amostragem nos diferentes lagos no sentido de serem aplicadas análises periódicas ao longo da coluna de água para melhor se conhecerem estes sistemas e a possível interação destas águas com as câmaras magmáticas existentes em profundidade.

Em face dos resultados obtidos, julga-se ser possível obter-se uma melhor compreensão destas massas de água sob a provável influência de fluidos vulcânicos. no entanto, seria necessário um estudo mais aprofundado destes sistemas, nomeadamente o aumento do número de amostragens em profundidade nos principais lagos (Sete Cidades, Santiago, Fogo, Congro e Furnas).

Também seria relevante abranger outros lagos do Arquipélago dos Açores, como os lagos da ilha das Flores e, principalmente, o lago da Furna do Enxofre (Graciosa).

Seria fundamental a análise ao isótopo $\delta^{13}\text{C}$ para aferir a origem do carbono nestes sistemas lacustres. Também seria vantajosa uma análise mais aprofundada dos elementos maiores, menores e em traço. Deste modo, seria possível a construção de uma base de dados que, com uma amostragem periódica nestes lagos, contribuiria para a monitorização dos sistemas vulcânicos onde se encontram estas massas de água.

BIBLIOGRAFIA

AESCHBACH-HERTIG, W., HOFER, M. KIPFER, R., IMBODEN, D.M., WIELER, R. (1999) - Accumulation of mantle gases in a permanently stratified volcanic lake (Lac Pavin, France). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, pp. 3357-3372.

AGUILERA, E., CHIODINI, G., CIONI, R., GUIDI, M., MARINI, L. E RACO, B. (2000) - Water chemistry of Lake Quiltoa (Ecuador) and assessment of natural hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 271-285.

ALLARD, P., DAJLEVIC, D. e DELARUE C. (1989) - Origin of carbon dioxide emanation from the 1979 Dieng eruption, Indonesia: Implications for the origin of the 1986 Nyos catastrophe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, pp. 195 – 206.

ARMIENTA, M.A., DE LA CRUZ-REYNA, S., MACÍAS, J.L. (2000) - Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 105-125.

AZEVEDO, J.M.M.,(1998) - Geologia e Hidrogeologia da ilha das Flores (Açores-Portugal). Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 403p.

BARBERI, F., CHELINI, W., MARINELLI, G. e MARTINI, M. (1989) - The gas cloud of Lake Nyos (Cameroon, 1986): Results of the Italian technical mission. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, pp. 125-134.

BERNER, E.K. & BERNER, R.A. (1996) - Global Environment. Water, Air and Geochemical Cycles. Prentice-Hall, New Jersey, 376p.

BLONG, R.J. (1984) - Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions, Academic Press, Sydney, 388p.

CARVALHO, M.R. (1989) - HIDSPEC, um programa de especiação e cálculo de equilíbrios água/rocha, Aplicações, Lisboa. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para efeito de obtenção do Grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada. 238p.

CHRISTENSON, B.W. (2000) - Geochemistry of fluids associated with the 1995-1996 eruption of Mt. Ruapehu, New Zealand: signatures and processes in the magmatic-hydrothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 1-30.

CIONI R., GUIDI, M., BRUNELLA, R., MARINI, L., GAMBARDELLA, B. (2003) - Water chemistry of Lake Albano (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 120, pp. 179-195.

CONSTÂNCIA, J.P., BRAGA, T.J., NUNES, J.C., MACHADO, E., SILVA, L. (1997) - Lagoas e Lagoeiros da ilha de S. Miguel. Amigos dos Açores, Ponta Delgada, 131p.

CRUZ, J.V.M.F. (1997) - Estudo Hidrogeológico da ilha do Pico (Açores-Portugal). Dissertação apresentada à Universidade dos Açores para efeito de obtenção do Grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrologia, 433p.

CRUZ, J.V., COUTINHO, R.M., CARVALHO, M.R., OSKARSSON, N., GISLASON, S.R. (1999) - Chemistry of waters from Furnas volcano, São Miguel: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, pp. 151-167.

CRUZ, J.V., ZILDA, F., NUNES, J.C., ANTUNES, P. (2002) - Lagos Vulcânicos da ilha do Pico: Caracterização hidrogeoquímica e Comparação Com Outros Lagos do Arquipélago dos Açores (Portugal) II Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico – Livro de Resumos, Fajã de Baixo, pp. 74.

CRUZ, J.V., ANTUNES, P. e AMARAL, C. (2003a) - Caracterização hidrogeoquímica em lagos vulcânicos da ilha São Miguel (AÇORES-PORTUGAL), Actas do IV Congresso Ibérico de Geoquímica In: Neiva, A.M.R., Neves, L.J.P.F., Silva, M.M.V.G. e Gomes, E.M.C., (Eds.) Universidade de Coimbra, Portugal, pp. 356-358.

CRUZ, J.V., ANTUNES, P. e AMARAL, C. (2003b) - Perfis Hidrogeoquímicos em Lagos Vulcânicos da ilha de São Miguel (AÇORES – PORTUGAL), Actas do IV Congresso Ibérico de Geoquímica In: Neiva, A.M.R., Neves, L.J.P.F., Silva, M.M.V.G. e Gomes, E.M.C., Universidade de Coimbra, Portugal, pp. 375-377.

CRUZ, J.V., ANTUNES, P., AMARAL, C., FRANÇA, Z. e NUNES, J.C. (2003c) - Volcanic Lakes from Azores Archipelago (Portugal): geological setting and geochemical characterization (submetido para publicação).

DELMELLE, P. & BERNAR, A. (2000) - Volcanic lakes. In: Sigurdsson, H., McNutt, S.R., Rymer, H., Six, D. (Eds.) Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, San Diego, pp. 877-895

DELMELLE, P., BERNAR, A., KUSAKABE, M., FISCHER, T.P., TAKANO, B. (2000) - Geochemistry of the magmatic-hydrothermal system of Kawah Ijen volcano, East Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 31-53

DIAS, E. (1986) - Estudo Bio-ecológico da Bacia da Lagoa do Negro. Rep. Dep. Biologia, Universidade dos Açores, Ponta Delgada.

DROTRH-INAG (2001) - Plano Regional da Água – Relatório Técnico, Versão para consulta Pública, Ponta Delgada. 414p.

FEHN, U., SNYDER, G.T., VAREKAMP, J.C. (2002) - Detection of recycled marine sediment components in crater lake fluids using ¹²⁹I. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, pp. 451-460.

FERREIRA, T.J.L. (1994) - Contribuição para o estudo das emanações Gasosas Associadas a Processos de Vulcanismo no Arquipélago dos Açores, provas de A.P.C.C., Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 183 p.

FERREIRA, T., GASPAR, J.L., QUEIROZ, G. (1993) - Considerações sobre as emanações gasosas da Furna do Enxofre (ilha Graciosa, Açores). *Açoreana* 7, 603-612.

GIGGENBACH, W.F. & GLOVER, R.B. (1975) - The use of chemical indicators in the surveillance of volcanic activity affecting the Crater Lake on Mt Ruapehu, New Zealand. *Bull. Volcanol.* 39, pp. 70-81.

GIGGENBACH, W.F. (1989) - Water and gas chemistry of Lake Nyos and its bearing on the eruptive process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42, pp. 337-362.

GONÇALVES, V.N.C. (1997) - Estrutura da comunidade de fitoplâncton da lagoa das Furnas, provas de APCC, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 229p.

HP (1986) - Aproveitamento Hidroelétrico da Lagoa do Paúl, estudo preliminar (não publicado). Rep. Hidrotécnica Portuguesa, Lisboa.

HURST, A.W., BIBBY, H.M., SCOTT, B.J. e MCUINNESS, M.J. (1991) - The heat source of Ruapehu Crater Lake; deduction from the energy and mass balances. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 46, pp. 1-20.

KANARI, S. (1989) - An inference on the process of gas outburst from Lake Nyos, Cameroon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, pp. 135-149.

KEMPTER, K.A. & ROWE, G.L. (2000) - Leakage of Active Crater lake brine through the north flank at Rincón de la Vieja volcano, northwest Costa Rica, and implications for crater collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 143-159.

KLING, G.W., TUTTLE, M.L. e EVANS, W.C. (1989) - The evolution of thermal structure and water chemistry in Lake Nyos. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, pp. 151-165.

KLING, G., EVANS, W. e TANYILEKE, G. (2001) - Technical report on the October 2001 field expedition to lakes Nyos and Monoun, Cameroon *University of Michigan*, <http://www.biology.lsa.umich.edu/~gwk/research/nyos.html> (Setembro de 2000).

KUSAKABE, M., OHSUMI, T. e ARAMAKI, S. (1989) - The Lake Nyos gas disaster: chemical and isotopic evidence in waters and dissolved gases from three Cameroonian crater lakes, Nyos, Monoun and Wum. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39, pp. 165-185.

KUSAKABE, M., KOMODA, Y., TAKANO, B., ABIKO, T. (2000a) - Sulfur isotopic effects in the disproportionation reaction of sulphur dioxide in hydrothermal fluids: implications for the $\delta^{34}\text{S}$ variations of dissolved bisulfate and elemental sulphur from active crater lakes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 287-307.

KUSAKABE, M., TANYILEKE, G.Z., McCORD, S.A., SCHLADOW, S.G. (2000b) - Recent pH and CO₂ profiles at Lakes Nyos and Monoun, Cameroon: implications for the degassing strategy and its numerical simulation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 241-260.

LANGMUIR, D. (1997) - Aqueous environmental geochemistry. Prentice-Hall, New Jersey, 600p.

MARINI, L., ZUCCOLINI, M.V., SALDI, G. (2003) - The bimodal pH distribution of volcanic lake waters. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121, pp. 83-98.

MARTÍNEZ, M., FERNÁNDEZ, E., VALDÉS, J., BARBOZA, V., VAN DER LAAT, R., DUARTE, E., MALAVASSI, E., SANDOVAL, L., BARQUERO, J. e MARINO, T. (2000) - Chemical evolution and volcanic activity of the active crater lake of Poás

volcano, Costa Rica, 1993 – 1997. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 127-141.

MARTINI, M., GIANNINI, L., PRATI, F., TASSI, F., CAPACCIONI, B. e IOZZELLI, P. (1994) - Chemical characters of crater lakes in the Azores and Italy: the anomaly of Lake Albano. *Geochemical Journal*, Vol. 28, pp. 173-184.

MASTIN, L.G. & WITTER, J.B. (2000) - The hazards of eruptions through lakes and seawater. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 195-214.

OGAWA, T. (1989) - The volcanic caves at Açores islands. *Dojin* 8, pp. 13-22.

OHBA, T., HIRABAYASHI, J., NOGAMI, K. (2000) - D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 329-346.

PASTERNAK, G. B. & VAREKAMP, J. C. (1994) - The geochemistry of the Keli Mutu crater lakes, Flores, Indonesia. *Geochemical Journal*. 28, pp. 243-262.

PASTERNAK, G.B. & VAREKAMP, J.C. (1997) - Volcanic lake systematics I. Physical constraints. *Bull Volcanol*. 58, pp. 528-538.

PINTO, M.S. (1998) - Gaspar Frutuoso, os Açores e a Atlântida de Platão. *Boletim HFCT* 1. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, pp. 1-8.

POORTER, R.P.E., VAREKAMP, J.C., VAN BERGEN, M.J., KREULEN, R., SRIWANA, T., VROON, P.Z. e WIRAKUSUMAH, A.D. (1989) - The Sirung volcanic boiling spring: Na extreme chloride-rich, acid brine on pantar (Lesser Sunda Islands, Indonesia). *Chemical Geology*, 76, pp. 215-228.

PORTEIRO, J.M. (2000) - Lagoas dos Açores: Elementos de Suporte ao Planeamento Integrado. Dissertação apresentada para efeito de obtenção do Grau de Doutor em Geografia, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 344p.

POURCHET, M., PINGLOT, J.F., MALEY, J., MÉLIÈRES, M.A., ZOGNING, A. (1990) - Lake Bambuluwé (Cameroon): building-up the same scenario as Lake Nyos? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42, pp. 397-400.

RICE, A. (2000) - Rollover in volcanic crater lakes: a possible cause for Lake Nyos type disasters. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 233-239.

RONDE, C.E.J., STOFFERS, P., GARBE-SCHÖNBERG, D., CHRISTENSON, B.W., JONES, B., MANCONI, R., BROWNE, P.R.L., HISSMANN, K., BOTZ, R., DAVY, B.W., SCHMIT, M., BATTERSHILL, C.N. (2002) - Discovery of activite hydrothermal venting in Lake Taupo, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, pp. 257-275.

RYMER, H., CASSIDY, J., LOCKE, C.A., BARBOZA, M.V., BARQUERO, J., BRENES, J., VAN DER LAAT, R., (2000) - Geophysical studies of the recent 15-years eruptive cycle at Poás Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 425-442.

SABROUX, J.C., VILLEVIELLE, A., DUBOIS, E., DOYTTE, C., HALBWACHS, M., VANDEMEULEBROUCK, J., (1990) - Satellite monitoring of the vertical temperature profile of Lake Nyos, Cameroon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42, pp. 381-385.

SCARTH, A. (1999) - *Vulcan´s Fury: man against the volcano*. World Print Ltd, Hong Kong. pp. 245-253.

SIGURDSSON, H., DEVINE, J.D., TCHOUA, F.M., PREVER, T.S., PRINGLE, M. K.W. e EVANS, W.C. (1987) Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, pp. 1-16

SPARKS, R.S.J., BURSIK, M.I., CAREY, S.N., GILBERT, J.S., GLAZE, L.S., SIGURDSSON, H. e WOODS, A.W. (1997) - *Volcanic Plumes*, John Wiley & Sons, New York, 590 p.

SRIWANA, T., VAN BERGEN, M.J., VAREKAMP, J.C., SUMARTI, S., TAKANO, B., VAN OS, B.J.H., LENG, M.J. (2000) - Geochemistry of the acid Kawah Putih lake, Patuha Volcano, West Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 77-104.

TAKANO, B. e WATANUKI, K. (1990) - Monitoring of volcanic eruptions at Yugama crater lake by aqueous sulfur oxyanions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 40, pp. 71-87.

TAKANO, B., ZHENG, Q. e OHSAWA, S. (2000) - A telemetering system for monitoring aqueous polythionates in an active crater lake. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 397-406.

TIMMS, B.V. (1992) *Lake Geomorphology*. Gleneagles Publishing, Australia. pp. 61-76

VAREKAMP, J.C., THOMAS, E. (1998) - Volcanic and anthropogenic contributions to global weathering budgets. *Journal of Geochemical Exploration*. 62, pp. 149-159.

VAREKAMP, J.C., KREULEN, R. (2000) - The stable isotope geochemistry of volcanic lakes, with examples from Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 309-327.

VAREKAMP, J.C., PASTERNAK, G.B., ROWE Jr., G.L. (2000) - Volcanic lake systematics II. Chemical constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 161-179.

VAREKAMP, J.C. (2002) - Volcanic lakes: Coloured windows into magma chamber. II Jornadas Internacionais de Vulcanologia da Ilha do Pico, Pico, Portugal, pp. 71-72.

WATERLOO HYDROGEOLOGIC (1998-1999) - AquaChem V. 3.7 for Windows 95/98/NT aqueous Geochemical Analysis, Plotting and Modeling.

WETZEL, R. G. (1993). *Limnologia*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 407p.

ZHANG, Y (2000) - Energetics of gas-driven limnic and volcanic eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 215-218.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todas as pessoas e amigos que colaboraram e contribuíram, de alguma forma, ao longo desta tese e que me permitiram chegar onde cheguei:

- ao Prof. Doutor José Virgílio Cruz, pela sugestão do tema deste trabalho, o qual suscitou o meu interesse desde o início. Na qualidade de orientador, apesar dos seus muito afazeres profissionais, sempre se mostrou disponível quando solicitado. A sua dedicação e empenho na matéria em estudo, assim como as suas preciosas orientações, não só me permitiram concluir este trabalho, como também me possibilitou evoluir profissionalmente. Agradeço-lhe igualmente a confiança depositada na minha pessoa, sem a qual esta tarefa teria sido mais difícil. Guardarei, para sempre, o seu exemplo a nível profissional e humano.

- à Doutora Gabriela Queiroz, na altura Directora do Departamento de Geociências, pela criação e manutenção das condições para a conclusão deste trabalho.

- à Prof. Doutora Teresa Ferreira, na altura Coordenadora do Curso de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, pela capacidade de organização e disponibilidade demonstrada ao longo do curso.

- ao Prof. Doutor João Luís Gaspar, actualmente Coordenador do Curso de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, pelas facilidades concedidas ao longo do curso.

- aos docentes e investigadores envolvidos na leccionação do curso de Mestrado.

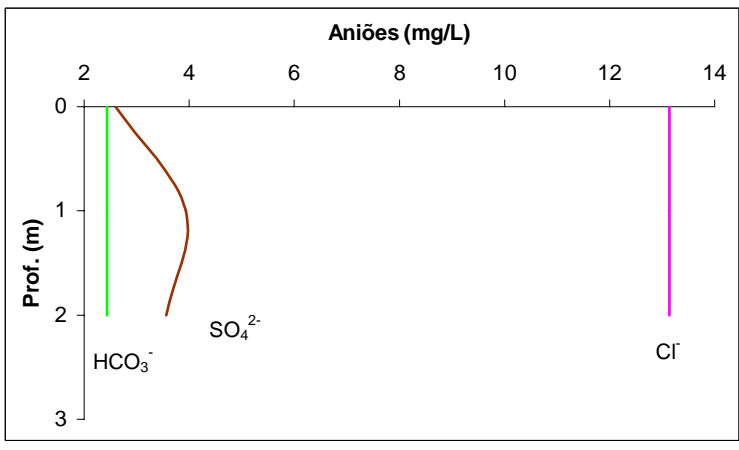
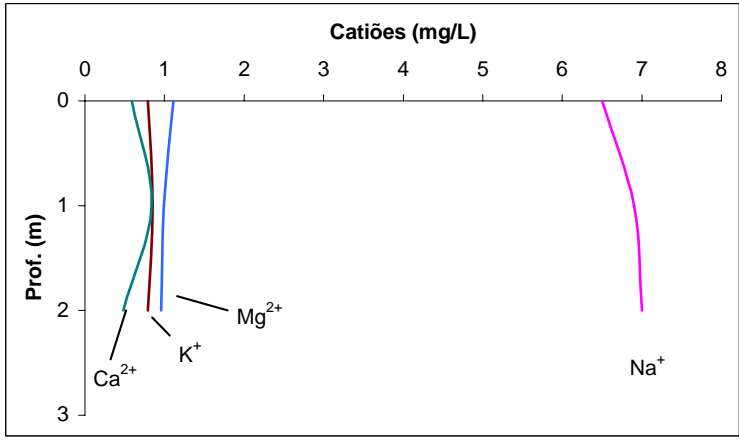
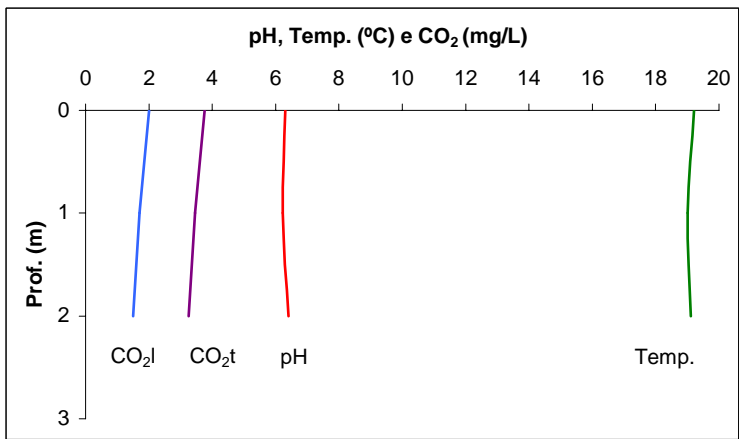
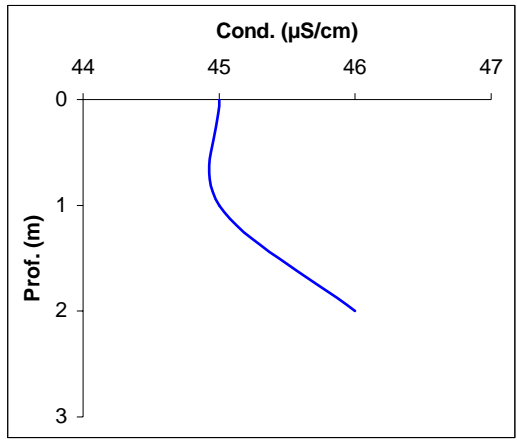
- à Directora do Serviço de Recursos Hídricos (Direcção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos), Dr.^a Dina Pacheco, a cedência dos barcos utilizados na presente investigação, assim como todos os restantes funcionários que participaram na mesma.

- ao grupo espeleológico Os Montanheiros, nomeadamente ao Engenheiro Paulo Barcelos e ao Sr. Fernando Pereira, pelas facilidades concedidas no acesso ao lago do Algar do Carvão.
- ao funcionário e amigo Rui Mestre, que sempre me acompanhou e ajudou em todas as saídas para o campo, de forma incansável, manifestando sempre disponibilidade e capacidade de iniciativa.
- à Dr. Catarina Amaral, pela colaboração dispensada no Laboratório de Hidrogeoquímica do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores e pela constante disponibilidade e apoio ao longo deste trabalho.
- à minha colega e amiga Fátima Viveiros, pela sua colaboração e ajuda ao longo do Curso de Mestrado e ao modo como me permitiu fazer a ponte entre o meu local de trabalho e a Universidade dos Açores.
- aos meus colegas de Licenciatura e do Curso de Mestrado que, de alguma forma, manifestaram a sua amizade e companheirismo.
- à funcionária do Departamento de Geociências, Patrícia Raposo, pela atenção que sempre manifestou no tratamento de questões burocráticas.
- à Escola 3/S Vitorino Nemésio (Praia da Vitória), através do seu Presidente Dr. João Feliciano, pela compreensão e facilidades concedidas durante o tempo que leccionei naquele estabelecimento de ensino.
- aos pais da minha esposa, por toda a ajuda que sempre dispensaram em todos os momentos e pelo carinho e incentivo manifestado ao longo deste trabalho.
- aos meus pais por todo o apoio, carinho e dedicação que sempre manifestaram. Agradeço-lhes o incentivo e a ajuda manifestada durante o meu percurso académico, mas sobretudo, aquilo que hoje sou.

- ao meu irmão, por todo o apoio e amizade manifestada ao longo da minha vida e, em especial, durante este trabalho.

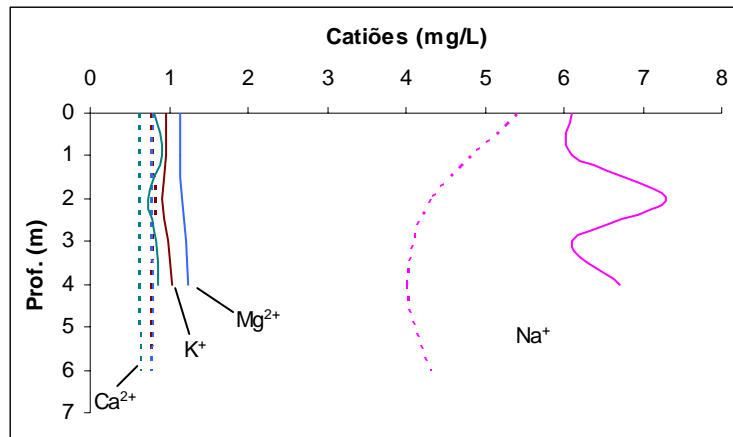
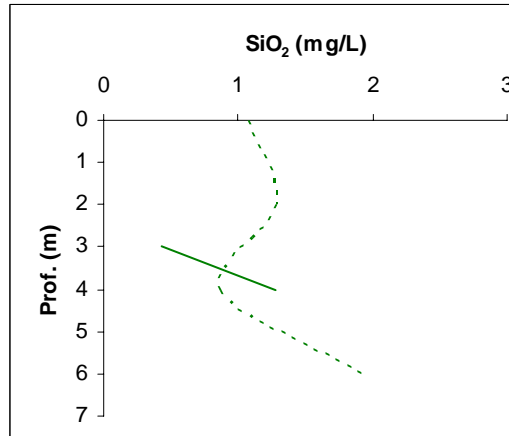
- Por último, à Susana, a pessoa mais importante na minha vida. A ela agradeço a contribuição directa no decorrer deste trabalho, nomeadamente na sua revisão e apoio em todos os momentos, tornando possível a conclusão deste projecto. Agradeço-lhe pela pessoa que é, pela sua força, carinho e amizade que nunca me faltaram. Pela sua determinação, organização e, sobretudo, pela energia que dispõe em tudo o que faz, é para mim fonte de inspiração e exemplo a seguir. Mas, em especial, agradeço-lhe o companheirismo, alegria e amor que trouxe à minha vida. A ela dedico a presente dissertação.

ANEXO I
(Iagoa do Canário)

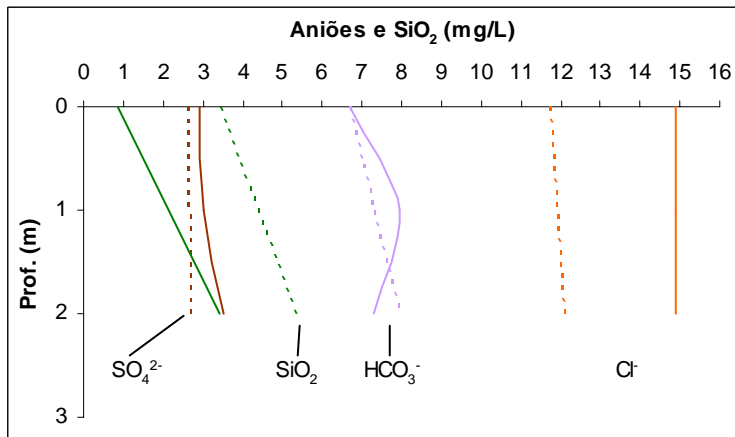
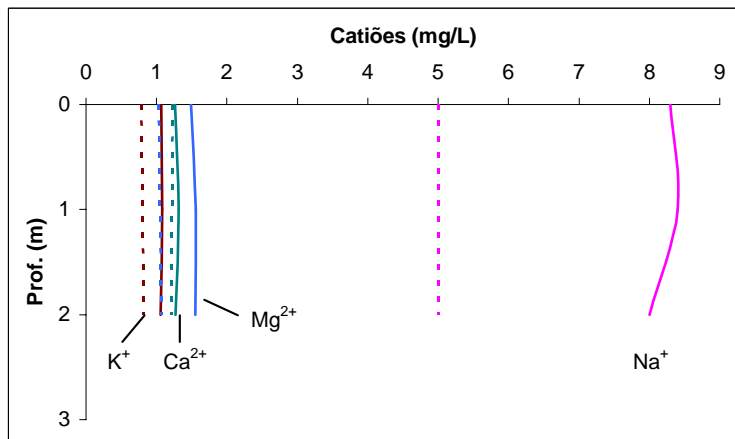
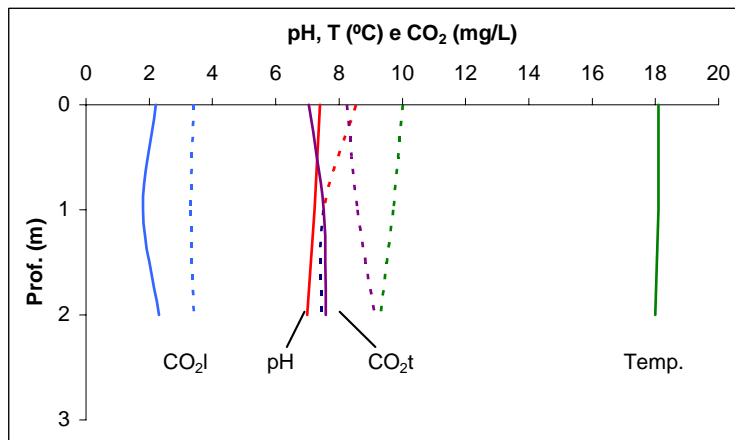
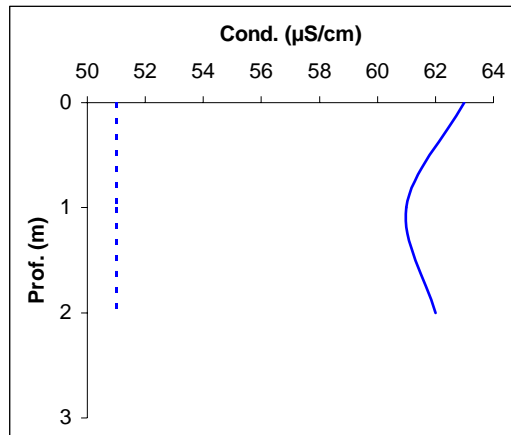


ANEXO II
(lagoa das Empadadas)

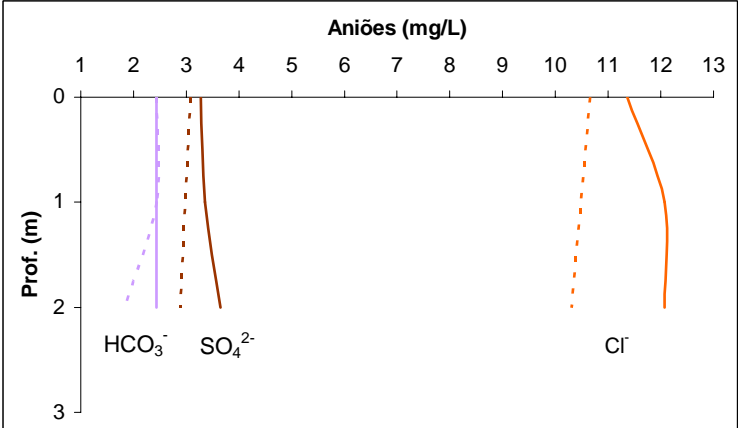
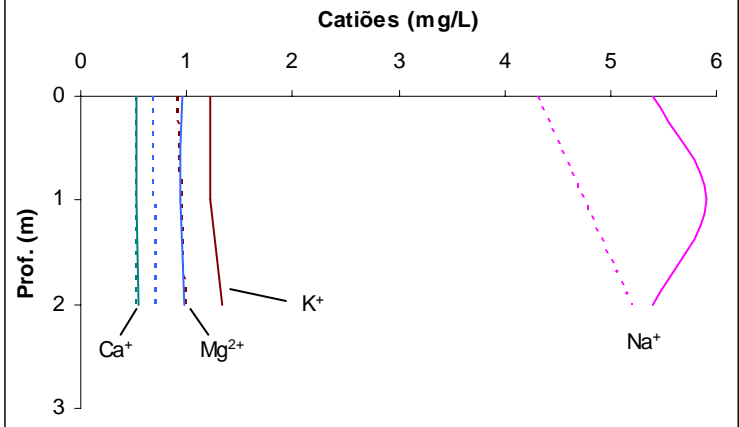
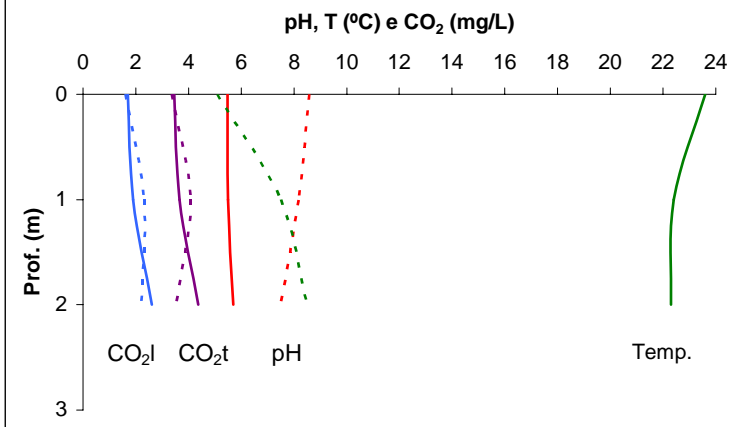
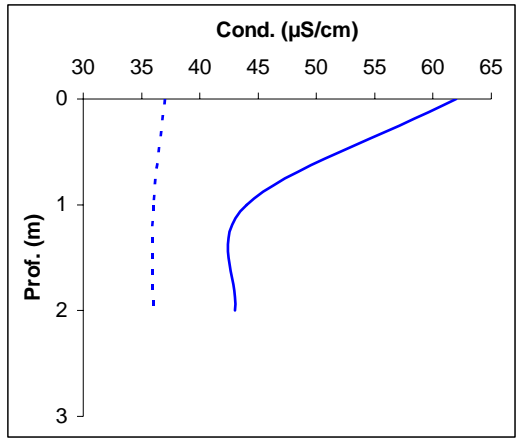
Lagoa das Empadadas - Norte



Lagoa das Empadadas - Sul

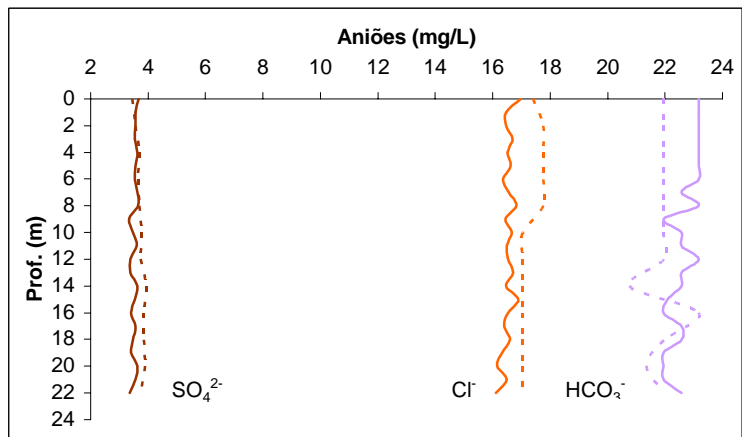
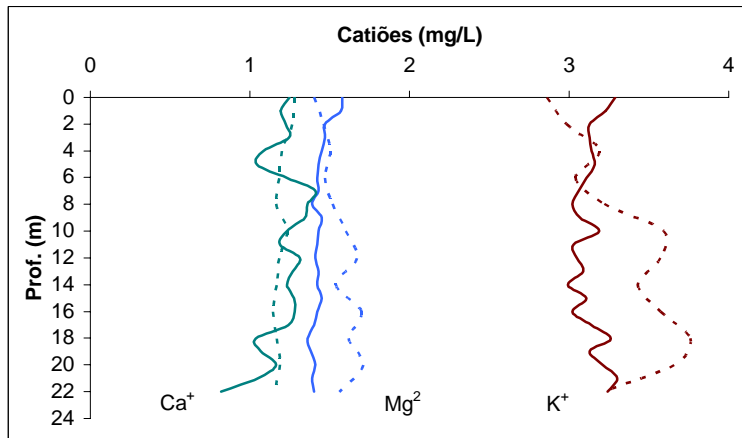
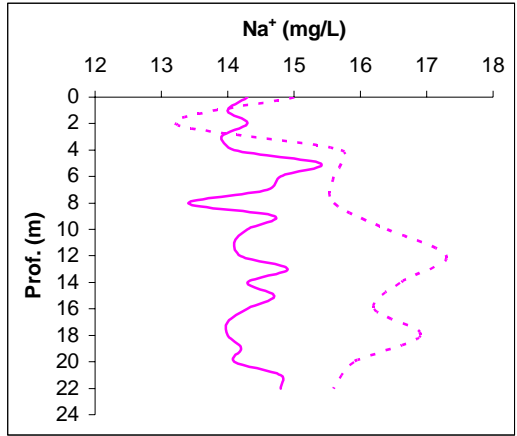


ANEXO III
(lagoa de São Brás)



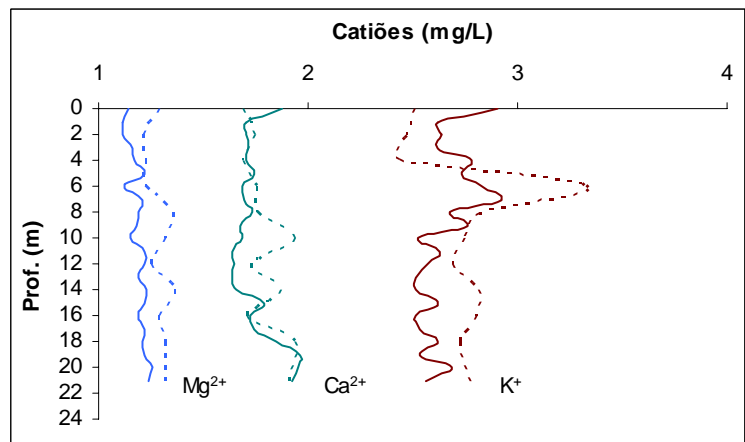
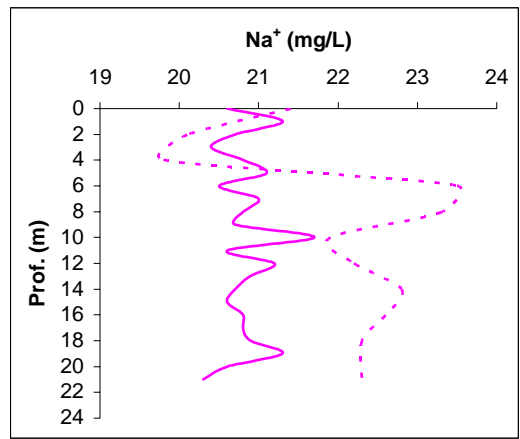
ANEXO IV

(lagoa das Sete Cidades - Norte)

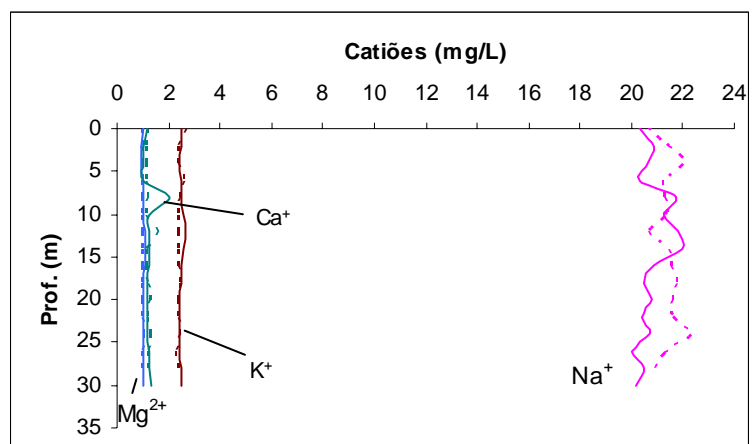


ANEXO V

(lagoa das Sete Cidades – Sul)



ANEXO VI
(lagoa de Santiago)



ANEXO VII
(lagoa do Fogo – Norte)

