

César Cristóvão Costa Andrade

**EMISSÃO DE CO₂ EM LAGOS VULCÂNICOS DOS
AÇORES: QUANTIFICAÇÃO E IMPLICAÇÕES
HIDROGEOQUÍMICAS.**



Universidade dos Açores
Departamento de Geociências
2014

César Cristóvão Costa Andrade

**EMIÇÃO DE CO₂ EM LAGOS VULCÂNICOS DOS
AÇORES: QUANTIFICAÇÃO E IMPLICAÇÕES
HIDROGEOQUÍMICAS.**

**DISSERTAÇÃO REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO EM GEOLOGIA
DO AMBIENTE E SOCIEDADE, DE ACORDO COM O DISPOSTO NO ART 9º
DO REGULAMENTO DO MESTRADO EM GEOLOGIA DO AMBIENTE E
SOCIEDADE, PUBLICADO EM DIÁRIO DA REPÚBLICA, II SÉRIE, Nº155,
DE 10 DE AGOSTO DE 2012.**

ORIENTADORES:

**DOUTOR JOSÉ VIRGÍLIO CRUZ
DOUTOR RUI COUTINHO
DOUTORA FÁTIMA VIVEIROS**



Universidade dos Açores
Departamento de Geociências
2014

**“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus,
não sou o que era antes”.**

(Martin Luther King)

Aos meus pais e irmã
E em especial a ti Sónia

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
AGRADECIMENTOS	XV
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XXII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Tipos de Lagos.....	1
1.1.1. Lagos Vulcânicos.....	3
1.1.1.1. Distribuição e Características dos Lagos Vulcânicos.....	3
1.1.1.2. Processos em Lagos Vulcânicos.....	6
1.2. Gases Vulcânicos	9
1.3. Tipos de Desgaseificação	10
1.3.1. Desgaseificação Focalizada	11
1.3.2. Desgaseificação Difusa	11
1.4. Dióxido de Carbono (CO ₂).....	12
1.4.1. Características e Origem	12
1.4.2. Fluxo de CO ₂ em Regiões Vulcânicas.....	13
1.4.3. Estudo de CO ₂ em Lagos Vulcânicos	13
1.4.4. Monitorização Geoquímica em Lagos Vulcânicos.....	15
2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS EM ESTUDO	18
2.1. Localização Geográfica.....	18
2.2. Enquadramento Geodinâmico.....	19
2.3. Enquadramento Climático	20
2.3.1. Ilha de São Miguel.....	21
2.4. Sismicidade e Vulcanismo	23
2.5. Enquadramento Geológico.....	27
2.5.1. Ilha de São Miguel.....	28
2.5.1.1. Principais Sistemas Vulcânicos.....	28

2.5.1.1.1. Vulcão das Sete Cidades.....	29
2.5.1.1.1.1. Tectónica	30
2.5.1.1.1.2. Manifestações de Vulcanismo Secundário	31
2.5.1.1.1.3. Sistemas Lacustres	32
2.5.1.1.2. Vulcão do Fogo	34
2.5.1.1.2.1. Tectónica	35
2.5.1.1.2.2. Manifestações de Vulcanismo Secundário	36
2.5.1.1.2.3. Sistemas Lacustres	37
2.5.1.1.3. Sistema Vulcânico da Achada das Furnas	38
2.5.1.1.3.1. Tectónica	39
2.5.1.1.3.2. Manifestações de Vulcanismo Secundário	40
2.5.1.1.3.3. Sistemas Lacustres	41
2.5.1.1.4. Vulcão das Furnas	42
2.5.1.1.4.1. Tectónica	43
2.5.1.1.4.2. Manifestações de Vulcanismo Secundário	45
2.5.1.1.4.3. Sistemas Lacustres	46
3. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA	48
3.1. Considerações Gerais.....	48
3.2. Metodologia de Amostragem e Métodos de Análise.....	48
3.3. Caracterização Hidrogeoquímica dos Lagos	52
3.3.1. Parâmetros Físicos.....	52
3.3.1.1. Temperatura.....	52
3.3.1.2. Condutividade Elétrica	60
3.3.2. Parâmetros Químicos	64
3.3.2.1. pH	64
3.3.2.2. Alcalinidade.....	67
3.3.2.3. CO ₂ Livre.....	70
3.3.3. Elementos Maiores: Catiões	75
3.3.3.1. Sódio.....	75
3.3.3.2. Potássio	78
3.3.3.3. Magnésio	81
3.3.3.4. Cálcio	84
3.3.4. Elementos Maiores: Aniões	86

3.3.4.1. Bicarbonato.....	86
3.3.4.2. Cloreto	89
3.3.4.3. Sulfato.....	92
3.3.4.4. Fluoreto.....	95
3.3.5. Outros Constituintes	98
3.3.5.1. Sílica	98
3.3.6. Fácies Hidrogeoquímica	101
3.3.7. Índices de Saturação	103
3.3.8. Processos Hidrogeoquímicos	108
4. CARTOGRAFIA E QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ EM LAGOS	
VULCÂNICOS	119
4.1. Metodologia	119
4.1.1. Amostragem	119
4.1.1.1. Condicionantes da Amostragem.....	124
4.1.1.2. Precauções Tomadas Durante a Realização dos Trabalhos	125
4.1.2. Análise.....	125
4.2. Apresentação e Discussão dos Resultados	127
4.2.1. Estatística Descritiva	127
4.2.2. Gráficos e Frequência Acumulada.....	128
4.2.3. Cartografia de Fluxo de CO ₂	132
4.2.3.1. Relação com as Estruturas Tectónicas	141
4.2.3.2. Relação com as Anomalias de Desgaseificação Difusa no Solo	144
4.2.4. Emissão de CO ₂ para a Atmosfera	146
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	150
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXOS	
ANEXO I.....	A-1
ANEXO II.....	A-5
ANEXO III.....	A-20

ANEXO IV A-26
ANEXO V A-31
ANEXO VI A-35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estratificação térmica em águas de lagos, e seus diferentes estratos (adaptado de Wetzel, 2001 <i>in</i> Bengtsson <i>et al.</i> , 2012).	8
Figura 1.2 Diferentes tipos de desgaseificação e modos de ocorrência dos gases vulcânicos à superfície associados a um sistema vulcânico (adaptado de Allard, 1996 <i>in</i> Viveiros 2003).	10
Figura 2.1 Localização geográfica do arquipélago dos Açores (adaptado de Pacheco <i>et al.</i> , 2013).	18
Figura 2.2 Esquema das estruturas mais representativas da designada plataforma dos Açores. Legenda: MAR - Crista Médio-Atlântica; EAFZ – Zona de Fratura Este dos Açores; TR – Rift da Terceira; GF – Falha Glória; NA – Placa Norte-Americana; EU – Placa Eurasiática; NU – Placa Núbica (Africana) (Quartau <i>et al.</i> , 2014).	20
Figura 2.3 Distribuição espacial da temperatura média anual do ar na ilha de São Miguel, de acordo com o modelo CIELO (CLIMAAT, 2005).	22
Figura 2.4 Distribuição espacial humidade relativa média anual do ar na ilha de São Miguel, de acordo com o modelo CIELO (CLIMAAT, 2005).	22
Figura 2.5 Distribuição espacial da precipitação acumulada na ilha de São Miguel, de acordo com o modelo CIELO (CLIMAAT, 2005).	23
Figura 2.6 Carta epicentral do arquipélago dos Açores referente ao período compreendido entre o ano de 1997 e 25 de Maio de 2009 (dados do CIVISA, 2009 <i>in</i> Pacheco <i>et al.</i> , 2013).	24
Figura 2.7 Localização dos principais sismos históricos que afetaram a região dos Açores (<i>in</i> Pacheco <i>et al.</i> , 2013).	25
Figura 2.8 Erupções vulcânicas históricas registadas no arquipélago dos Açores. Os triângulos a vermelho representam a localização dos eventos eruptivos (modificado de Weston, 1964, com dados de Queiroz <i>et al.</i> , 1995, Queiroz, 1997, Ferreira, 2000 e Gaspar <i>et al.</i> , 2003 <i>in</i> Pacheco <i>et al.</i> , 2013).	26
Figura 2.9 Modelo digital de terreno da ilha de São Miguel com as unidades vulcanológicas: 1 – Sete Cidades; 2 – Região dos Picos; 3 – Fogo; 4 – Região da Achada das Furnas; 5 – Furnas; 6 – Povoação-Nordeste (adaptado de Moore, 1991b <i>in</i> Pacheco <i>et al.</i> , 2013).	28
Figura 2.10 Cartografia das estruturas tectónicas consideradas no Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Carmo, 2013).	31

Figura 2.11 Identificação de manifestações de vulcanismo secundário no Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Viveiros, 2003).	32
Figura 2.12 Lagoa das Sete Cidades (imagem cedida por Coutinho, 2013).	33
Figura 2.13 Lagoa de Santiago (imagem cedida por Coutinho, 2013).	34
Figura 2.14 Cartografia das estruturas tectónicas consideradas no Vulcão do Fogo (adaptado de Carmo, 2013).	36
Figura 2.15 Identificação de manifestações de vulcanismo secundário no Vulcão do Fogo. A mancha de desgaseificação difusa a verde, foi delimitada de acordo com o trabalho de Marcos <i>et al.</i> (2003) (adaptado de Viveiros, 2003). ..	37
Figura 2.16 Lagoa do Fogo situada no Vulcão do Fogo (imagem cedida por Coutinho, 2013).	38
Figura 2.17 Cartografia das estruturas tectónicas consideradas no Sistema Vulcânico da Achada das Furnas e Vulcão das Furnas (adaptado de Carmo, 2013).	39
Figura 2.18 Distribuição dos teores de CO ₂ nos solos do Sistema Vulcânico da Achada das Furnas (adaptado de Marcos, 2006).	40
Figura 2.19 Lagoa do Congro, o maior lago situado no Sistema Vulcânico da Achada das Furnas (imagem cedida por Coutinho, 2013).	41
Figura 2.20 Lagoa de São Brás, situada no Sistema Vulcânico da Achada das Furnas (imagem cedida por Coutinho, 2013)	42
Figura 2.21 Cartografia das estruturas tectónicas consideradas no Vulcão das Furnas (adaptado de Carmo, 2013).	44
Figura 2.22 Identificação de manifestações de vulcanismo secundário no Vulcão das Furnas (adaptado de Viveiros, 2010). (As imagens I, II e III correspondem a locais de manifestações visíveis de vulcanismo e a IV corresponde ao mapa de desgaseificação de CO ₂ nos solos do Vulcão das Furnas).	45
Figura 2.23 Lagoa das Furnas situada no interior da caldeira das Furnas (imagem cedida por Coutinho, 2013).	47
Figura 3.1 (a) Embarcação pneumática equipada com um motor elétrico utilizado nas lagoas de Santiago, São Brás e Congro; (b) Embarcação com motor a diesel cedida pela DRA.	50

Figura 3.2	
Garrafa amostradora da marca SEBA utilizada para a recolha de água ao longo da coluna de água dos lagos estudados.	51
Figura 3.3	
(a) Aparelho com referência ICS- 1000, que deteta os aniões por cromatografia iónica; Aparelho com referência GBC Sens AA Dual, (b) que deteta os catiões por espectrometria de absorção atómica.	51
Figura 3.4	
Histograma relativo à distribuição dos valores da temperatura nos lagos estudados.	54
Figura 3.5	
Evolução da temperatura na coluna de água face à variação sazonal na Lagoa Verde (A) e na Lagoa Azul (B).	55
Figura 3.6	
Evolução da temperatura na coluna de água face à variação sazonal na Lagoa de Santiago.	56
Figura 3.7	
Evolução da temperatura na coluna de água face à variação sazonal na Lagoa do Fogo.	57
Figura 3.8	
Evolução da temperatura na coluna de água face à variação sazonal na Lagoa do Congro.	58
Figura 3.9	
Evolução da temperatura na coluna de água face à variação sazonal na Lagoa de São Brás.	59
Figura 3.10	
Evolução da temperatura na coluna de água face à variação sazonal na Lagoa das Furnas em ambos os pontos (“Furnas Entrada” (A) e “Furnas Capela” (B)).	60
Figura 3.11	
Histograma relativo à distribuição dos valores da condutividade elétrica nos lagos estudados.	61
Figura 3.12	
Evolução da condutividade elétrica na coluna de água na Lagoa Azul e Verde (A) e da Lagoa de Santiago (B) e das Furnas (C) em ambos os pontos (“Furnas Entrada” e “Furnas Capela”). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	62
Figura 3.13	
Evolução da condutividade elétrica na coluna de água na Lagoa do Congro.	63
Figura 3.14	
Evolução da condutividade elétrica na coluna de água na Lagoa do Fogo (A) e na Lagoa de São Brás (B).	64
Figura 3.15	
Histograma relativo à distribuição dos valores de pH nos lagos estudados.	65

Figura 3.16	
Evolução do pH na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde (A) das Sete Cidades, de São Brás (B), das Furnas (C) e do Fogo (D). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	66
Figura 3.17	
Evolução do pH na coluna de água nas Lagoas de Santiago (A) e do Congro (B).	67
Figura 3.18	
Evolução da Temperatura (A) e do pH (B) na coluna de água nas Lagoas das Furnas (Ponto “Capela” e “Entrada”) e Santiago. Os resultados Santiago 1 correspondem à 1. ^a , enquanto que os pontos “Furnas Capela” 2 e “Furnas Entrada” 2 são da 2. ^a amostragem.	67
Figura 3.19	
Histograma relativo à distribuição dos valores de alcalinidade nos lagos estudados.	68
Figura 3.20	
Evolução da alcalinidade na coluna de água nas Lagoas de São Brás (A) e do Fogo (B).	69
Figura 3.21	
Evolução da alcalinidade e da temperatura na coluna de água na Lagoa do Congro.	69
Figura 3.22	
Evolução da alcalinidade na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde (A), Santiago (B) e das Furnas (C). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	70
Figura 3.23	
Histograma relativo à distribuição dos valores de CO ₂ livre nos lagos estudados.	72
Figura 3.24	
Evolução do dióxido de carbono livre na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), Fogo (B), São Brás (C) e Furnas (D). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	73
Figura 3.25	
Evolução do dióxido de carbono livre na coluna de água nas Lagoas de Santiago (A) e do Congro (B).	73
Figura 3.26	
Evolução da temperatura e do dióxido de carbono livre na coluna de água na Lagoa de Santiago (A) e na Lagoa do Congro (B), referentes à 1. ^a amostragem.	74
Figura 3.27	
Histograma relativo à distribuição dos valores de sódio nos lagos estudados.	76
Figura 3.28	
Evolução do sódio na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), de Santiago (B), do Fogo (C), de São Brás (D), do Congro (E) e das Furnas (F). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	77

Figura 3.29	
Histograma relativo à distribuição dos valores de potássio nos lagos estudados.	79
Figura 3.30	
Evolução do potássio na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), de Santiago (B), do Fogo (C), de São Brás (D), do Congro (E) e das Furnas (F). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	80
Figura 3.31	
Histograma relativo à distribuição dos valores de magnésio nos lagos estudados.	82
Figura 3.32	
Evolução do magnésio na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), de Santiago (B), do Fogo (C), de São Brás (D), do Congro (E) e das Furnas (F). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	83
Figura 3.33	
Histograma relativo à distribuição dos valores de cálcio nos lagos estudados.	84
Figura 3.34	
Evolução do cálcio na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), de Santiago (B), do Fogo (C), de São Brás (D), do Congro (E) e das Furnas (F). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	85
Figura 3.35	
Histograma relativo à distribuição dos valores de HCO_3^- nos lagos estudados.	87
Figura 3.36	
Evolução do bicarbonato na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), de Santiago (B), do Fogo (C), de São Brás (D), do Congro (E) e das Furnas (F). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	88
Figura 3.37	
Histograma relativo à distribuição dos valores de cloreto nos lagos estudados.	90
Figura 3.38	
Evolução do cloreto na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A) Santiago (B), do Congro (C) e das Furnas (D). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	91
Figura 3.39	
Evolução do cloreto na coluna de água realizada nas Lagoas do Fogo (A) e de São Brás (B).	92
Figura 3.40	
Histograma relativo à distribuição dos valores de sulfato nos lagos estudados.	93
Figura 3.41	
Evolução do sulfato na coluna de água nas Lagoas de Santiago (A) e do Fogo (B).	93

Figura 3.42	Evolução do sulfato na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), do Congro (B) e das Furnas (C). Os resultados Azul 1, Verde 1, Capela 1 e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	94
Figura 3.43	Evolução do sulfato na coluna de água realizada na Lagoa de São Brás.	95
Figura 3.44	Histograma relativo à distribuição dos valores de Fluoreto nos lagos estudados.	97
Figura 3.45	Evolução do fluoreto na coluna de água nas Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades (A), de Santiago (B) e das Furnas (C). Os resultados Azul 1, Verde 1 e Capela 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Azul 2, Verde 2, Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	98
Figura 3.46	Histograma relativo à distribuição dos valores de sílica nos lagos estudados.	99
Figura 3.47	Evolução da sílica na coluna de água nas Lagoas de Santiago (A), São Brás (B), do Congro (C) e das Furnas (D). Os resultados Capela e Entrada 1 correspondem à 1. ^a amostragem, enquanto os pontos Capela 2 e Entrada 2 são da 2. ^a amostragem.	100
Figura 3.48	Diagrama de Piper relativo à composição das águas das Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades, de Santiago, Fogo, São Brás, Congro e das Furnas.	102
Figura 3.49	Diagrama de Schoeller relativo à composição das águas das Lagoas Azul e Verde das Sete Cidades, de Santiago, Fogo, São Brás, Congro e das Furnas.	103
Figura 3.50	Variação do logaritmo do índice de saturação (Log IS), relativamente à calcite, em função do pH existente nas águas dos Lagos.	105
Figura 3.51	Variação do logaritmo do índice de saturação (Log IS), relativamente à dolomite, em função do pH existente nas águas dos Lagos.	105
Figura 3.52	Variação do logaritmo do índice de saturação (Log IS), relativamente à sílica amorfa, em função da concentração de sílica existente nas águas dos Lagos.	106
Figura 3.53	Variação do logaritmo do índice de saturação (Log IS), relativamente à calcedónia, em função da concentração de sílica existente nas águas dos Lagos.	107
Figura 3.54	Variação do logaritmo do índice de saturação (Log IS), relativamente ao quartzo, em função da concentração de sílica existente nas águas dos Lagos.	107

Figura 3.55	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o ião cloreto e a condutividade elétrica nas diferentes amostragens.	109
Figura 3.56	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta os iões sódio e cloreto nas diferentes amostragens. ...	110
Figura 3.57	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o ião sulfato e a condutividade elétrica nas diferentes amostragens.	111
Figura 3.58	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o ião bicarbonato e a condutividade elétrica nas diferentes amostragens.	112
Figura 3.59	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta os catiões sódio e potássio e o ião bicarbonato nas diferentes amostragens.	113
Figura 3.60	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o dióxido de carbono livre e o ião bicarbonato nas diferentes amostragens.	114
Figura 3.61	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o catião sódio mais o potássio e a sílica nas diferentes amostragens.	115
Figura 3.62	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o catião magnésio e a sílica nas diferentes amostragens.	115
Figura 3.63	Distribuição dos lagos de São Miguel, tendo em conta o ião fluoreto e a condutividade elétrica nas diferentes amostragens.	116
Figura 3.64	Relação entre os valores médios dos principais catiões e a condutividade elétrica, com as respetivas retas de correlação linear. (A) sódio vs condutividade; (B) potássio vs condutividade; (C) magnésio vs condutividade (D) cálcio vs condutividade).	118
Figura 4.1	Localização dos lagos estudados na ilha de São Miguel. Os números representam as diferentes unidades vulcanológicas: 1– Sete Cidades; 2– Região dos Picos; 3– Fogo; 4– Região da Achada das Furnas; 5– Furnas; 6– Povoação-Nordeste (adaptado de Moore, 1991b <i>in</i> Pacheco <i>et al.</i> , 2013). As letras representam os lagos em estudo: A- Lagoa de Santiago; B- Lagoa de São Brás; C- Lagoa do Congro; D- Lagoa das Furnas.	119
Figura 4.2	Estação portátil de medição de fluxo de CO ₂ com câmara de acumulação flutuante.	121
Figura 4.3	Equipamento GA2000 da Geotechnical Instruments, utilizado na medição da pressão barométrica.	122

Figura 4.4	Lagoa do Congro perante condições meteorológicas adversas (chuva, nebulosidade e vento) (5 de fevereiro de 2014).	124
Figura 4.5	Lagoa do Congro perante boas condições meteorológicas (6 de fevereiro de 2014).	124
Figura 4.6	Gráficos de probabilidade acumulada do fluxo de CO ₂ referente à 1. ^a amostragem decorrida nas Lagoas de Santiago (a), São Brás (b), do Congro (c) e das Furnas (d).	130
Figura 4.7	Gráficos de probabilidade acumulada da concentração de CO ₂ referente à 2. ^a amostragem decorrida nas Lagoas de Santiago (a), São Brás (b), do Congro (c) e das Furnas (d).	131
Figura 4.8	Bolhas de desgaseificação observadas à superfície da Lagoa das Furnas.	132
Figura 4.9	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa do Congro referente à amostragem "teste" (a) e à 1. ^a amostragem (b) (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	133
Figura 4.10	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa do Congro referente à 2. ^a amostragem (b) (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	134
Figura 4.11	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa de São Brás referente à 1. ^a amostragem (a) e 2. ^a amostragem (b) (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	135
Figura 4.12	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa de Santiago referente à 1. ^a amostragem (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	136
Figura 4.13	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa de Santiago referente à 2. ^a amostragem (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	137
Figura 4.14	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa das Furnas referente à 1. ^a amostragem (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	138
Figura 4.15	Mapa de fluxo de CO ₂ na Lagoa das Furnas referente à 2. ^a amostragem (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m).	139
Figura 4.16	Rede de amostragem do fluxo de CO ₂ na Lagoa das Furnas referente à 1. ^a amostragem (a) e ao teste realizado (b).	140

Figura 4.17

Mapa de fluxo de CO₂ na Lagoa das Furnas referente ao teste realizado (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m). 141

Figura 4.18

Localização das principais zonas anómalas de fluxo de CO₂, referente à 1.^a amostragem na Lagoa das Furnas, e das principais estruturas tectónicas (M1) e (M2) (de acordo com Carmo, 2013). 142

Figura 4.19

Localização das principais zonas anómalas de fluxo de CO₂, referente à 2.^a amostragem na Lagoa das Furnas e das principais estruturas tectónicas (M1) e (M2) (de acordo com Carmo, 2013). 143

Figura 4.20

Mapa de fluxo de CO₂ no Vulcão das Furnas (Viveiros, 2010), incluindo a cartografia de CO₂ da Lagoa das Furnas referente à 1.^a amostragem (método de interpolação: IDW com seis pontos vizinhos; tamanho da célula = 5x5 m). 145

Figura 4.21

Localização das principais zonas anómalas de concentração de ²²²Rn no solo (R1 a R10) e dos campos fumarólicos no Vulcão das Furnas: A – Lagoa das Furnas, B – Freguesia das Furnas, C – Ribeira dos Tambores e D – Ribeira Quente (Silva, 2013). 146

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1	
Inventário da percentagem de água existente nos diferentes compartimentos na superfície da Terra (adaptado de Day <i>et al.</i> , 2006).	1
Tabela 2.1	
Principais características dos lagos estudados (adaptado de Antunes,2008).	46
Tabela 4.1	
Número de pontos amostrados em cada lago estudado bem como o referido período de amostragem.	123
Tabela 4.2	
Estatística descritiva do fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹) nas duas amostragens realizadas nas Lagoas de Santiago, São Brás, Congro e na Lagoa das Furnas.	127
Tabela 4.3	
Valor do fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹) medido a partir dos 95% da frequência acumulada nas duas amostragens realizadas nas Lagoas de Santiago, São Brás, Congro e na Lagoa das Furnas.	128
Tabela 4.4	
Valor da emissão de CO ₂ para as Lagoas de Santiago, São Brás, Congro e Lagoa das Furnas.	147
Tabela 4.5	
Valor da emissão difusa de dióxido de carbono em alguns lagos vulcânicos estudados no mundo (* presente trabalho; 1- Kusakabe <i>et al.</i> (2008); 2-Padrón <i>et al.</i> (2008); 3-López <i>et al.</i> (2004), 4-Bernard <i>et al.</i> (2004); 5-Mazot (2005); 6-Mazot & Taran (2009); 7-Mazot <i>et al.</i> (2010); 8-Mazot (2010); 9-Pérez <i>et al.</i> (2011); 10- Arpa <i>et al.</i> (2013)).	147

AGRADECIMENTOS

A elaboração da presente dissertação só foi possível com a colaboração e disponibilidade de diversas pessoas e entidades. Expresso aqui o meu reconhecimento e agradecimento de forma especial:

- ao anterior Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor Jorge Medeiros e ao atual Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor João Luís Gaspar, pela autorização da realização do mestrado em Geologia do Ambiente e Sociedade;
- ao anterior diretor de departamento, Professor Doutor José Virgílio Cruz e ao atual diretor o Professor Doutor José Pacheco pelas facilidades concedidas na concretização deste trabalho;
- à Doutora Gabriela Queiroz, atual Diretora do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores, pelas ótimas condições proporcionadas na realização desta dissertação;
- à Professora Doutora Teresa Ferreira, atual Diretora do Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores da Universidade dos Açores, pela minha incorporação neste grupo fantástico e pelas ótimas condições proporcionadas na realização desta dissertação;
- De um modo muito especial gostaria de demonstrar uma enorme gratidão ao Prof. Doutor José Virgílio Cruz, pela sugestão do tema deste trabalho, o qual suscitou o meu interesse desde o início, mesmo não sabendo o que me esperava nem a certeza que a metodologia iria resultar. Igualmente pela sua disponibilidade, paciência e compreensão com as minhas viagens, pelos conhecimentos e despertar do espírito científico; por ter sugerido a minha entrada nesta que se tornou quase numa segunda casa para mim – o Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos. Por ter sempre acreditado em mim, e mais importante ainda, transmitindo-me confiança e calma através das suas célebres frases " Eu estou calmo" possibilitando assim a realização do tema de tese

aqui apresentado. Terei sempre em conta o seu profissionalismo, não é só um "bossa", mas sim uma grande pessoa e amigo, um grande ser humano que é;

- À minha orientadora, Doutora Fátima Viveiros, que igualmente foi uma grande responsável pela conclusão deste trabalho, que ao longo deste tempo sempre disse que iria conseguir, mesmo não sabendo o que me esperava numa área em que não estava totalmente à vontade. Super paciente, com as minhas asneiras, com as minhas dúvidas com os meus erros, o seu jeito divertido de chamar à atenção, relevou-se um fator de enorme importância nas correções realizadas, simplesmente incansável e não tenho como agradecer, talvez o “César Augusto” sim;

- ao Professor Doutor Rui Moreira da Silva Coutinho pelo incentivo da permanência do tema deste trabalho, pelos ensinamentos no domínio da hidrogeoquímica, pela sua disponibilidade, apesar dos seus afazeres profissionais, pelas sugestões sobre o modo de organizar o presente documento, bem como na revisão e correção dos textos e, sobretudo, pela amizade, pelo apoio moral e total disponibilidade demonstrada;

- à Professora Doutora Regina Cunha, docente do Departamento de Biologia da Universidade dos Açores, a qual devo muito do que sou hoje, talvez a pessoa que me mais marcou no meu percurso académico, responsável por inúmeras conquistas, desde do meu primeiro ano de licenciatura indicando-me o caminho a seguir;

- a todos os meus os professores, com particular destaque para os docentes do curso de mestrado do qual fui aluno, por tudo o que aprendi e reaprendi;

- a todos os outros docentes e investigadores do Departamento de Geociências, pela sua disponibilidade em prestar qualquer esclarecimento e partilhar todo o tipo de conhecimento científico;

- a todos os meus colegas desta edição do mestrado, pela ajuda e amizade demonstrada ao longo deste tempo em especial ao amigo Carlos Melo por todas as trocas de ideias e sugestões partilhadas;
- a todos os colegas, investigadores e funcionários do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores, nomeadamente à Patrícia Raposo, ao Rui Correia e a Dona Mercês Mota na resolução de diversos problemas de carácter burocrático; agradecia também, ao Ernesto Sousa, Vitor Sousa e ao Bruno Medeiros, pela camaradagem;
- à Catarina Silva pela sua colaboração e amizade, na discussão de ideias, sugestões e partilha de documentação;
- à Rita Mestre para além do seu pouco tempo e disponibilidade esteve sempre disponível em ajudar-me em dúvidas e na relacionadas com o SIG;
- à Catarina Silva e ao José Medeiros, por todo o apoio com o SIG e prontidão na resolução de problemas;
- à Rita Carmo e à Ana Rita Hipólito, pela sempre pronta partilha de documentação;
- ao meu colega e amigo Pedro Freire, pela sua pronta disponibilidade na discussão de ideias, sugestões, partilha de conhecimentos e colaboração na realização deste trabalho;
- aos Andreas, à Joana Eleutério e em especial à Lúcia, pela incansável ajuda em vários trabalhos de campo, resolução de problemas que iriam surgindo ao longo do tempo;
- ao Roberto Resendes pela amizade a ajuda ao longo deste tempo;
- ao funcionário e mais do que isso amigo Rui Mestre, que sempre me ajudou nas incansáveis saídas de campo e na execução de diversas tarefas laboratoriais; pela amizade demonstrada ao longo deste percurso, pela partilha de

conhecimentos, apoio, paciência e companheirismo demonstrado nas longas viagens de barco, motivação dada nas longas chuvadas e dias de frio enfrentados, não esquecendo a sua camaradagem nos perigos enfrentados nas difíceis descidas às lagoas nunca me deixando desanimar;

- à Direcção Regional do Ambiente, em particular à Dr.^a Dina Pacheco (diretora dos serviços), pela cedência dos barcos utilizados na presente investigação nas lagoas;

- à Secretaria Regional da Agricultura e Ambiente, pela disponibilização de dados referentes à batimetria das lagoas;

- a toda a minha família, pais, irmã, cunhados e sobrinhos, pelo apoio prestado durante este período de maior ausência e pela força necessária que me transmitiram perante todas as adversidades;

- à minha equipa de arbitragem pela amizade;

- Por último, mas sempre em primeiro lugar, à Sónia, pelo amor, amizade, compreensão e paciência ilimitadas ao longo dos últimos anos do meu percurso académico e pessoal, pelo carinho e afecto nas horas de maior desalento e, sobretudo por nunca ter deixado de acreditar em mim.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho, o meu sincero obrigado a todos!

Resumo

A origem vulcânica dos Açores explica a existência de inúmeros sistemas lacustres dispersos por várias ilhas, em especial na ilha de São Miguel que apresenta o maior número destas massas de água.

O enquadramento geodinâmico complexo do arquipélago dos Açores é responsável pela acentuada atividade vulcânica e sísmica que caracteriza a ilha de São Miguel. No arquipélago dos Açores ocorrem vários locais onde é notória a presença de fenómenos de desgaseificação, bem representados por campos fumarólicos, por nascentes de água termal e mineral gasocarbónica. No entanto, a desgaseificação associada aos sistemas vulcânicos ativos abrange também áreas que podem ser mais extensas, surgindo de um modo difuso e impercetível as designadas áreas de desgaseificação difusa através dos solos. Como estudado no presente trabalho, estas emissões também podem ocorrer através dos lagos, sendo apenas identificadas com recurso a equipamentos específicos.

O presente trabalho evidencia a necessidade de se proceder à caracterização e quantificação da desgaseificação difusa através dos lagos vulcânicos. Para este efeito, selecionaram-se lagos localizados nos vários sistemas vulcanológicos onde ocorrem massas deste tipo, e realizaram-se amostragens de água ao longo da coluna de água, assim como se efetuaram medições do fluxo de dióxido de carbono libertado à superfície.

As amostragens efetuadas ao longo da coluna de água permitiram verificar que alguns lagos possuem estratificação da água de origem térmica no período de verão, identificando-se aumentos de concentração significativos em profundidade, nomeadamente de dióxido de carbono, que é mantido no *hipolimnion*, sendo a neutralização da acidez da água promovida pela interação água-rocha o que acarreta um enriquecimento em HCO_3^- . No período de inverno não existe estratificação, permitindo assim que ocorra a homogeneização dos elementos ao longo da coluna de água. Além da contribuição do CO_2 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 (e.g. Lagoa das Furnas).

Outro fenómeno modificador da composição química da água dos lagos é a contaminação por sais de origem marinha a partir do transporte atmosférico. Assim de uma forma geral, as fácies hidrogeoquímicas das águas dos lagos estudados na ilha de São Miguel são as cloretada sódica e bicarbonatada sódica.

Para a medição do fluxo de CO₂ foi utilizado um equipamento portátil que efetua medições pelo método da câmara de acumulação, o qual foi modificado para permitir efetuar medições na água.

Realizaram-se duas campanhas de amostragem, uma na época quente (1.^a amostragem) e outra na época mais fria (2.^a amostragem), tendo os valores do fluxo de CO₂ nos lagos estudados oscilado entre 0 e 20960 g m⁻² d⁻¹. O valor médio na 1.^a amostragem é igual a 288,51 g m⁻² d⁻¹ e na 2.^a amostragem igual a 38,60 g m⁻² d⁻¹. Contudo, se excluirmos os resultados obtidos na Lagoa das Furnas, por serem muito superiores aos observados nos restantes lagos, os valores médios situam-se em 3,51 g m⁻² d⁻¹ e 5,64 g m⁻² d⁻¹ na 1.^a e 2.^a amostragem, respetivamente.

De modo a tentar identificar o ruído de fundo, e o limite a partir do qual os valores do CO₂ nos lagos são associados a uma origem hidrotermal, foi realizada uma análise estatística através da representação gráfica (GSA), permitindo identificar a presença de diferentes populações. O ruído do fundo foi calculado a partir da Lagoa das Furnas usando os resultados da 2.^a amostragem (38,0 g m⁻² d⁻¹).

A análise da distribuição espacial do fluxo de CO₂ nos lagos utilizando a interpolação pelo método determinístico IDW (*Inverse Distance Weighted*), destacou as Lagoas das Furnas (1.^a e 2.^a amostragens) e a de Santiago (2.^a amostragem) como aquelas que apresentam zonas anómalas. Nos restantes lagos os valores são inferiores ao ruído de fundo, e deverão estar associados a uma origem apenas biogénica.

O fluxo de CO₂ na Lagoa das Furnas apresenta várias populações que representam diferentes origens (biogénica e hidrotermal). A população com valores

de fluxo de CO₂ mais elevados representa as emissões de CO₂ provenientes de profundidade (origem hidrotermal) e está associada às zonas da lagoa com bolhas de desgaseificação visíveis à superfície do lago.

Com base na distribuição do fluxo de CO₂, na Lagoa das Furnas foram identificadas quatro zonas anómalas e, de entre os lagos estudados, é a única onde se evidencia também associação entre os fenómenos de desgaseificação e a tectónica local.

Os valores estimados de emissão de CO₂ permitem concluir que os lagos em estudo emitem para a atmosfera valores entre os 0,02 t d⁻¹ e 59,74 t d⁻¹ de CO₂. No caso específico da Lagoa das Furnas, com emissão entre 12,27 e 31,95 t km⁻² d⁻¹, os seus valores permitem sugerir que esta está posicionada entre os vinte lagos de origem vulcânica a nível mundial que emitem mais CO₂ para a atmosfera.

ABSTRACT

The volcanic origin of the Azores explains the existence of many lake systems scattered over the islands, mainly in the island of Sao Miguel which has the largest number of these water bodies.

The archipelago of the Azores lies in a complex geodynamic framework which is responsible for the volcanic and seismic activity, as well as by the several fumarolic fields and springs of mineral carbonated water that exist in the Azores. Nevertheless, degassing phenomena linked to active volcanic systems occurs in vaster areas, in a quite imperceptible and diffuse way, as soil degassing. As shown in this study, using adequate equipment, these manifestations can also be seen and measured in superficial water bodies, such as lakes.

The present work emphasizes the need for further characterization and quantification of diffuse degassing through volcanic lakes. For this purpose, several lakes located in various volcanic systems were selected, where samples were taken throughout the water column and measurements of the carbon dioxide flow at the lake surface were made.

Sampling performed along the water column showed that some lakes present water stratification mainly in the summer due to a thermal effect, where there is a significant increase on carbon dioxide concentration, which is kept in the *hipolimnion*, and the water acidity is neutralized by water-rock interaction which cause a HCO_3^- enrichment. During wintertime stratification is not observed, enabling element homogenization along the water column. In addition to the contribution of free CO_2 produced by organic matter decomposition, it is quite possible that some increase on CO_2 concentration results from the contamination of magmatic fluids (e.g. Furnas Lake).

Another phenomenon responsible for the modification of lake water chemistry is the contamination due to sea aerosols carried by the wind. Thus, the more common hydrogeochemical facies of lake waters studied in São Miguel are sodium chloride sodium bicarbonate rich.

For the measurement of the CO₂ flux a portable device that performs measurements by the accumulation chamber method was used – It was modified to enable fluctuation on the lake surface.

Two sampling campaigns were performed, one in the summer (1st sampling) and another in the coldest season (2nd sampling). The values of CO₂ concentration in the studied lakes ranged between 0 and 20960.19 g m⁻² d⁻¹. The average value in the 1st sampling campaign was 288.51 g m⁻² d⁻¹, while and during the 2nd sampling campaign it was 38.60 g m⁻² d⁻¹. However, if the results from Furnas lake are excluded, because they are much higher than those observed in the other lakes, average values are 3.51 g m⁻² d⁻¹ and 5.64 g m⁻² d⁻¹, respectively in the 1st and 2nd sampling campaigns.

In order to identify the background noise, as well as the threshold level at which the values of CO₂ emission in lakes are considered abnormal, a statistical analysis was performed using plot generated with GSA, allowing the identification of different populations. The background noise was calculated from the Furnas lake data measured during the 2nd sampling campaign (38.0 g m⁻² d⁻¹).

The spatial distribution of CO₂ concentration in lakes was determined using the deterministic interpolation method IDW (*Inverse Distance Weighted*), and shows that Lagoa das Furnas (1st and 2nd samplings) and Lagoa de Santiago (2nd sampling) depict anomalous zones. In the remaining lakes values are lower than the background noise, which is explained by the biogenic nature of gaseous emanations.

The Furnas lake CO₂ flow derives from different origins (biogenic and hydrothermal). Higher CO₂ concentration spots have a deep hydrothermal source and are linked to the gas bubbles visible on the lake surface.

Taking in consideration the CO₂ flow distribution, four anomalous areas were identified at Furnas lake and it is the only one of the studied lakes that shows a clear association between degassing and local tectonic features.

The estimated values for CO₂ emission from the lakes into the atmosphere range between 0.02 and 59.74 t d⁻¹. In the specific case of Furnas lake, whose emissions range between 12.27 and 31.95 t km⁻² d⁻¹, values suggest that this lake is among the twenty lakes worldwide that release the most CO₂ to into the atmosphere.

1. INTRODUÇÃO

1.1. TIPOS DE LAGOS

Cerca de 71% da superfície da Terra é coberta de água, uma característica fundamental do planeta Terra, que o distingue de todos os outros do sistema solar (Shueller, 2009).

Da imensa quantidade de água que constitui a hidrosfera, mais de 97% (Tabela 1.1) é salgada e está circunscrita aos oceanos, com um tempo de renovação desta água muito longo (cerca de 3100 anos). A restante percentagem (cerca de 3%), corresponde à água doce, que em grande parte está retida: (1) nas calotes glaciares, e cujo tempo de renovação é mais longo do que o da água salgada (cerca de 16000 anos), (2) nos aquíferos, com água subterrânea que se renova após cerca de 300 anos, (3) nos lagos, com tempos de renovação variáveis da ordem dos 100 anos e, (4) nos rios, que se renovam rapidamente, em cerca de 12-20 dias (Day *et al.*, 2006).

Tabela 1.1 | Inventário da percentagem de água existente nos diferentes compartimentos na superfície da Terra
(adaptado de Day *et al.*, 2006)

Reservatório	Total (%)
Oceanos	97,4
Calotes polares e Glaciares	1,9
Água Subterrânea	> 0,6
Lagos	0,014
Humidade do solo	0,01
Atmosfera	0,001
Rios	0,0001
Biosfera	0,00004

Os lagos são massas de água, algumas delas de grandes dimensões, aprisionadas em depressões existentes no local onde as mesmas estão situadas.

Existem mais de 100 milhões de lagos em todo mundo com áreas maiores que 0,01 km², sendo classificados principalmente de acordo com a sua origem geológica. A sua gênese poderá ocorrer de vários modos, e os três principais tipos de lagos formados de forma natural, destacados por Hanson (2007), de acordo com a respetiva origem são: **(1) lagos de origem glaciária**, os mais comuns em todo o mundo, ocupam depressões como resultado da erosão por glaciares, sobretudo devido à glaciação que ocorreu durante o Pleistocénico, que com a pressão glacioestática e o contínuo avanço ou recuo das massas de gelo sobre o terreno, produziam ou aprofundavam as depressões que mais tarde eram preenchidas por água oriunda do degelo dos glaciares. É possível encontrar um grande número de lagos glaciares na Escandinávia, na Rússia e no norte da América, sendo o estado de Minnesota (EUA) o que apresenta maior número (cerca de 11000).

O lago Superior é o maior lago glacial do mundo pela área de superfície (82880 km²) e situa-se entre o Canadá (província de Ontário) e os Estados Unidos da América (Hanson, 2007). Outra forma são os lagos sub-glaciares, isto é, os que se encontram debaixo de uma camada de gelo como o lago Vostok.

Os lagos **(2) de origem tectónica** são, em geral, os lagos mais longos no tempo geológico e apresentam maiores áreas superficiais e profundidades (Katz, 1995). A sua origem resulta de movimentos da crosta, falhas ou depressões (e.g. grabens).

São exemplos deste tipo de lagos, o Lago Victoria situado na parte ocidental do Grande Vale do Rife, na África Oriental com 68870 km² de área, que corresponde ao segundo maior lago de água doce do mundo; outro exemplo é o Lago Baikal, no sul da Sibéria (Rússia), que é o lago mais profundo (1637 m) e com maior volume de água (23600 km³) do mundo a par do Lago Tanganyika, também situado no Grande Vale do Rife Africano (Rafferty, 2011).

Os lagos de, **(3) origem vulcânica** são objeto de estudo na presente dissertação, assunto que será mais desenvolvido no próximo ponto.

Garratt (2006) apresenta um modelo de formação menos comum e não incluído nos três tipos anteriores, é o exemplo de um curso de um determinado rio ser bloqueado por diversas razões, (e.g. escoadas lávicas, detritos, ação humana ou animal), e esta barreira permanecer no tempo, formando um lago. Na década de 1910, um deslizamento de rochas no Vale Murghab (Afeganistão) bloqueou o escoamento fluvial formando até hoje o designado Lago Sarez, com cerca de 60 km de comprimento e 505 m de profundidade.

1.1.1. LAGOS VULCÂNICOS

1.1.1.1. DISTRIBUIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS LAGOS VULCÂNICOS

Desde o holocénico, foram inventariados 714 vulcões e deste número, 16% possuem lagos no interior das suas crateras (Delmelle *et al.*, 2000). Podemos encontrar um pouco por todo o mundo este tipo de lagos, mas concentram-se particularmente nas zonas onde existem arcos vulcânicos (Rowe *et al.*, 1992; Simkin & Siebert, 1994 *in* Pasternack & Varekamp, 1997; Delmelle & Bernard, 2000), contudo, o número exato varia devido ao carácter efémero dos lagos localizados no interior dos vulcões ativos. Naturalmente, o designado Anel do Fogo do Pacífico, área que apresenta a maior concentração de vulcões ativos do mundo, apresenta o maior número destas massas de água.

O maior lago vulcânico identificado é o lago Toba situado a norte da ilha de Sumatra, na Indonésia, com uma superfície de 1100 km² e uma profundidade máxima aproximada de 505 m, contendo assim cerca de 240 km³ de volume de água (Meybeck, 1995).

A génese destas bacias associa-se a vários mecanismos. De um modo geral, as depressões e cavidades formam-se à medida que os materiais vulcânicos são ejetados e geram um vazio, podendo o magma libertado, uma vez arrefecido, formar depressões. Também o colapso dos tetos dos tubos lávicos quando arrefecidos, poderão, mais tarde, vir a aprisionar água se estas depressões não possuírem

drenagem. No entanto, é mais frequente a gênese de lagos formados em depressões criadas pela ejeção violenta de magma originando crateras de explosão, como por exemplo os *maars* e as caldeiras. A morfologia destes lagos varia consoante o tipo de erupção que lhes dá origem (Timms, 1992; Wetzel, 1993).

Na sequência de erupções do tipo havaiana ou estromboliana a forma vulcânica predominante originada são os cones de escórias, que são os tipos de edifícios vulcânicos mais simples e comuns do mundo (MacDonald, 1972). São formados essencialmente por piroclastos basálticos soltos podendo, por vezes, estes apresentarem-se soldados (*spatter cones*). Os piroclastos podem apresentar-se com dimensões variadas, podendo existir níveis intercalados de pequenas escoadas lávicas. Apresentam uma forma cônica bem definida e associam-se frequentemente à presença no seu topo de uma cratera de explosão. Normalmente são monogenéticos, ou seja edificadas durante uma única erupção vulcânica (Vespermann *et al.*, 2000; Thompson & Tarbuck, 2005).

Os lagos associados a cones de escória normalmente surgem quando ocorre a impermeabilização do fundo da cratera, processo muitas vezes associado aos fenómenos de meteorização. Os lagos que ocupam o fundo destes cones, na sua generalidade, apresentam uma área superficial e profundidades muito reduzidas.

Os *maars* são formas hidrovulcânicas isto é, resultam do contacto entre o magma e a água de superfície ou subterrânea (Cas & Wright, 1988). Em sentido lato, *maars* são estruturas vulcânicas resultantes de atividade hidromagmática explosiva, e caracterizam-se por crateras de grande diâmetro relativamente à altura do seu bordo (*in* Pacheco, 2001). Normalmente apresentam crateras com uma forma circular relativamente bem definida, com os flancos dos cones pouco espessos e que diminuem rapidamente de espessura no sentido oposto da cratera e, geralmente, com um ângulo de inclinação inferior a 25%, sendo a cratera posteriormente preenchida com água, normalmente, coincidindo com o nível hidrostático formando um lago (Vespermann *et al.*, 2000; Nelson, 2004).

No que diz respeito aos lagos localizados em *maars*, estes normalmente possuem maior volume de água relativamente aos situados nos cones de escória, pois as suas dimensões podem variar entre os 60 m e os 2000 m de diâmetro e profundidades entre os 10 m e os 200 m. Estes sistemas aquáticos também podem apresentar pequenas áreas superficiais, e de margens baixas, em geral formadas por uma mistura de piroclastos e fragmentos soltos de rochas provenientes das paredes do edifício (Wetzel, 1993).

Após grandes erupções vulcânicas, quando a câmara magmática é drenada, e a estrutura geológica é incapaz de suportar o peso do edifício vulcânico sobre ela, ocorre o colapso da estrutura. Após a fase eruptiva, as caldeiras recebem água meteórica permitindo a formação de lagos que ocupam grande parte do fundo destas estruturas. Os processos de formação de caldeiras ainda é muito discutida por diversos autores, mas o conceito de subsidência é inteiramente aceite e utilizado por toda a comunidade científica (Lipman, 2000).

As caldeiras apresentam uma cratera de colapso mais ou menos com uma forma circular a elipsoidal, com um diâmetro que poderá variar entre 1 e 80 km. As caldeiras classificadas como pequenas apresentam um diâmetro inferior a 5 km e normalmente estão associadas a escorrências lávicas. As caldeiras que apresentam grandes dimensões vulgarmente estão associadas ao vulcanismo de maior explosividade (subpliniano ou pliniano). De uma forma geral, o diâmetro da caldeira de um vulcão aumenta proporcionalmente ao volume de material expelido durante o episódio eruptivo (Vespermann *et al.*, 2000; Nelson, 2004).

Os lagos situados no interior de caldeiras de colapso, são normalmente os que encerram maior volume de água. Apesar de na sua generalidade não apresentarem grandes profundidades, são os que ostentam maiores áreas superficiais com uma topografia aplanada como resultado da subsidência que a originou.

1.1.1.2. PROCESSOS EM LAGOS VULCÂNICOS

Os processos dinâmicos em lagos são regidos por forças exercidas sobre o corpo de água e por forças que atuam na própria massa de água. Os lagos, interagem diretamente com a água atmosférica, água de superfície e com a água subterrânea. A maioria dos lagos, em especial os que se situam em regiões temperadas, encerra de uma forma geral água natural (Wetzel, 1993).

A hidrologia dos lagos bem como a qualidade das suas águas são fortemente influenciadas pela morfologia, pelo substrato geológico, bem como pelo cenário climático existente na região onde o mesmo está inserido, como o vento, que transfere força e energia para a superfície da água, e por outras interações que ocorrem nestes sistemas dinâmicos, como são exemplos, a entrada de água subterrânea, de precipitação e por entradas de água proveniente de rios ou nascentes que drenam para os lagos, provocando trocas de calor e também, a troca de calor entre a água e os sedimentos, o que dá origem a correntes de densidade, ou pelas suas saídas, através da evaporação e por drenagem lateral ou em profundidade (Hutchinson, 1957; Meybeck, 1995).

A importância relativa de cada um dos processos envolvidos variam de lago para lago. Toma-se o exemplo de em regiões áridas, muitas vezes à superfície ou em profundidade, não existem saídas diretas e a água é perdida somente pela evaporação, fazendo com que a renovação da água seja mais prolongada; ao contrário, a renovação da água é mais rápida em zonas permeáveis, como é o caso de lagos situados em formas de relevo cársico (Berner & Berner, 1996).

Vários processos modificadores afetam a composição química da água dos lagos, pelo que é importante saber a origem de cada substância a ser transportada para um lago, o seu modo de transporte, os seus reservatórios, as suas características geoquímicas e os processos biológicos em que participa. Pois uma porção significativa do fluxo dissolvido e de materiais em suspensão transportados pelos rios são devido à denudação química e à erosão. Em tempos históricos, estes fluxos podem ter sido substancialmente aumentados, devido a mudanças do solo, e

à acidificação da chuva. A transformação de florestas em terras de cultivo e de pastagem muitas vezes aumenta as taxas de erosão da matéria em suspensão em pelo menos uma ordem de magnitude (Wolman, 1967).

Existem outros fatores, como por exemplo os fatores biológicos, que contribuem de forma acentuada na diversidade de cada um destes sistemas, pois as atividades destes organismos nos sistemas aquáticos induz uma dinâmica na transformação de energia e matéria e, conseqüentemente, um impacto significativo na qualidade ambiental dos biotas (Lampert *et al.*, 2007). Contudo, quando os lagos são perturbados pela ação antropogénica, a produção biológica destes sistemas normalmente é alterada, tendendo para um estado eutrófico.

A eutrofização de um lago é um processo que poderá ocorrer naturalmente com a acumulação de matéria orgânica no fundo e conseqüente diminuição do volume de água, processo que ocorre durante um longo período de tempo e que poderá ser medido à escala geológica. Porém, o homem tem acelerado grandemente este processo através do enriquecimento artificial de nutrientes nestes reservatórios ou também com a adição de material orgânico (Berner & Berner, 1996).

Numa escala macro, é possível identificar um certo número de processos distintos que causam a mistura em lagos induzindo a circulação e geração de turbulência perdendo assim a sua transparência; assim, lagos mais escuros retém maior índice de calor à superfície que, associados às reações biológicas, contribui para o aumento do pH à superfície dos lagos e para um ambiente anóxico no seu fundo. Simultaneamente a ocorrência de diferenças de densidade, devido à temperatura, ou salinidade, promovem a estratificação, o que restringe o desenvolvimento do fluxo e geração da turbulência.

Um gradiente de densidade estável neutraliza o movimento vertical induzido pela turbulência, tendo assim um efeito amortecedor sobre o movimento que reduz a mistura vertical. A estratificação desenvolve-se muitas vezes em lagos por causa da baixa velocidade do vento, de tempos de residência longos em águas mais

profundas (Imboden & Wüest, 1995), fatores estes que tendem a reduzir a mistura (Turner, 1973).

O gradiente de temperatura, ao longo da coluna de água, pode originar estratificação térmica, identificando três camadas de água: a mais superficial designada *epilimnion*; sob esta encontra-se uma camada onde se verifica uma descida significativa da temperatura (termoclina), também podendo ser designada por *mesolimnion* ou *metalimnion* e, por fim, uma mais profunda o *hipolimnion* com temperaturas inferiores. Thiennemann (1918) mostrou que em alguns lagos estratificados ocorre uma redução drástica de oxigênio no *hipolimnion*. Em certos momentos, os lagos podem formar uma termoclina alguns metros abaixo da superfície (Fig. 1.1). Lagos em regiões temperadas geralmente têm profundidades de 5-10 m ou mais. Esses lagos normalmente formam uma termoclina durante o período de verão que estratifica. Lagos tropicais podem também estratificar, mas a estratificação pode ser discriminada por ventos fortes.

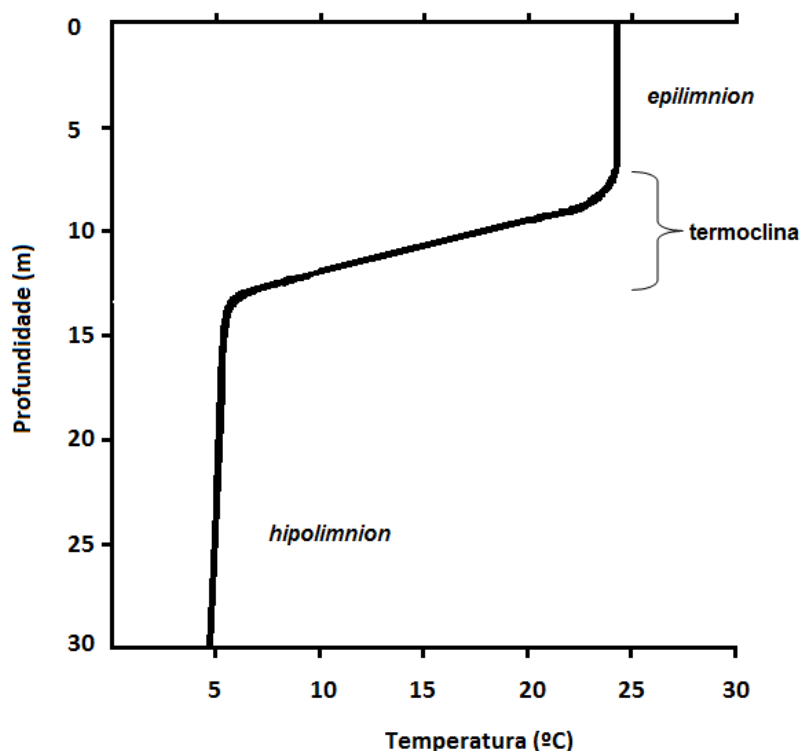


Figura 1.1 | Estratificação térmica em águas de lagos, e seus diferentes estratos (adaptado de Wetzel, 2001 in Bengtsson *et al.*, 2012).

1.2. GASES VULCÂNICOS

Os gases vulcânicos são constituídos na sua grande maioria por água (H₂O) e por quantidades variáveis de compostos de carbono (CO₂, CO, CH₄), enxofre (S₂, SO₂, H₂S, COS), halogéneos (HCl, HF, HBr) e vários constituintes menores (NH₃, N₂, H₂, O₂, Ar, He, Rn) (Baubron *et al.*, 1991; Giggenbach, 1996; Delmelle & Stix, 2000; Giggenbach *et al.*, 2001).

Como elementos traço surgem os metais, como por exemplo o sódio (Na), o vanádio (V), o crómio (Cr), o bismuto (Bi), o cobre (Cu), o zinco (Zn) e o ouro (Au), os quais estão normalmente associados a fumarolas de alta temperatura (Allard, 1983; Delmelle & Stix, 2000).

A diferença de solubilidade entre os vários constituintes do magma exerce, também, um controlo sobre a composição dos gases vulcânicos. Em consequência deste facto, por ordem decrescente de solubilidade, observa-se a seguinte distribuição: HF > HCl > H₂O > SO₂ > H₂ ≥ He > Ar > CO₂ (Allard, 1996; Delmelle & Stix, 2000). Verifica-se, assim, que o CO₂ é preferencialmente enriquecido nas fases gasosas iniciais, durante os períodos pré-eruptivos, podendo igualmente ser aprisionado em inclusões fluidas em fenocristais e vesículas em basaltos sub-oceânicos, em ambientes de pressões mais elevadas. Contrariamente, o HCl e o HF tendem a ser libertados nas fases tardias da desgaseificação magmática (Allard, 1994).

Estes constituintes voláteis têm um papel central nos processos vulcânicos pois condicionam as propriedades físicas do magma (temperatura, densidade e viscosidade) e são igualmente responsáveis pelo comportamento dos mesmos nos reservatórios (Allard, 1994). As erupções mais explosivas estão relacionadas com magmas evoluídos e enriquecidos em gases expelidos, que geram cada vez maiores pressões à medida que ascendem para níveis mais superficiais (Delemelle & Stix, 2000). Os voláteis que chegam à superfície e são libertados na atmosfera designam-se por gases vulcânicos (Allard, 1983; 1994; 1996; Martini, 1996).

1.3. TIPOS DE DESGASEIFICAÇÃO

Nos magmas encontram-se dissolvidas diversas espécies gasosas em quantidades variáveis, e que são libertadas para a atmosfera, não só no decurso de erupções vulcânicas, mas também nos períodos de repouso entre fases eruptivas (Baubron *et al.*, 1991; Allard, 1996).

A desgaseificação pode ocorrer de forma focalizada como por exemplo, através de fumarolas, ou de forma difusa como é o exemplo da desgaseificação através dos solos (Fig. 1.2).

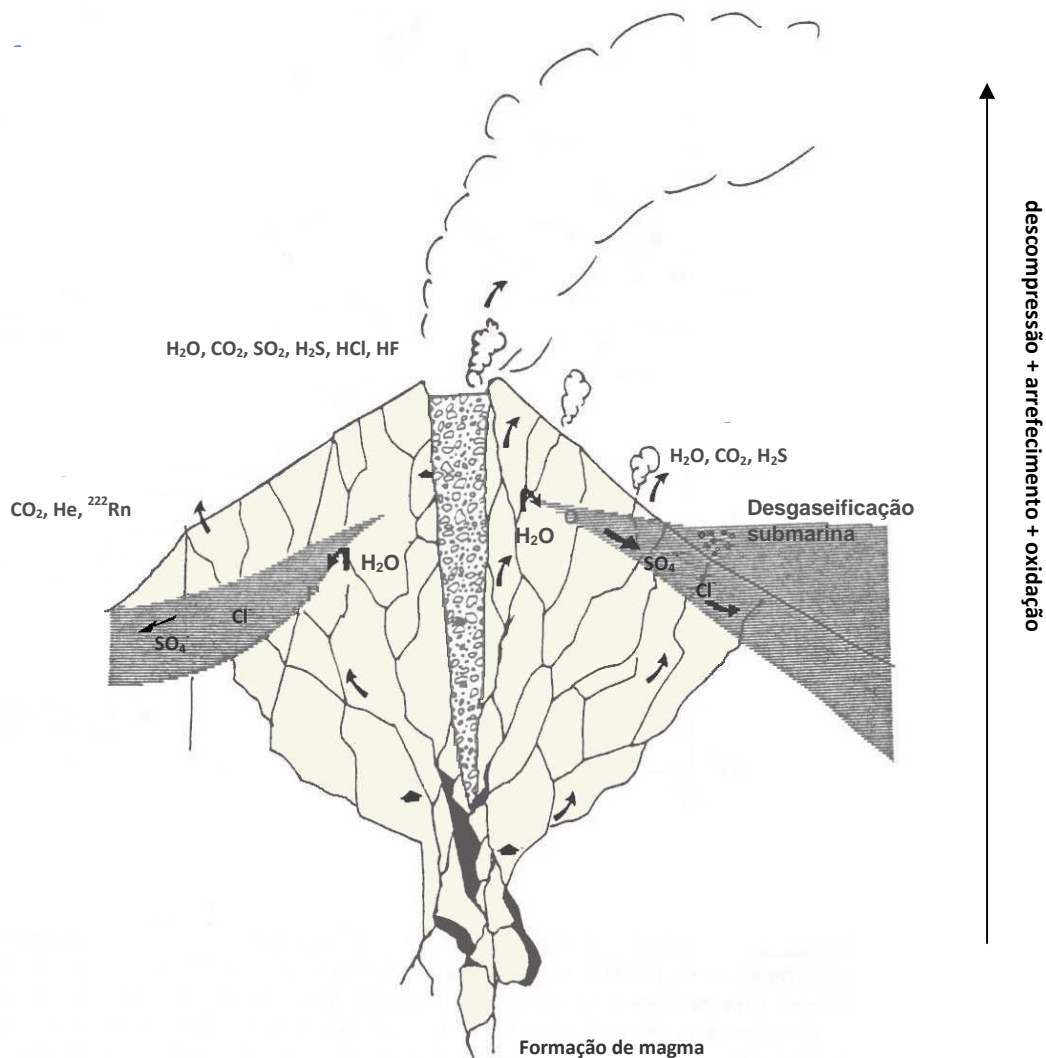


Figura 1.2 | Diferentes tipos de desgaseificação e modos de ocorrência dos gases vulcânicos à superfície associados a um sistema vulcânico (adaptado de Allard, 1996 *in* Viveiros 2003).

1.3.1. DESGASEIFICAÇÃO FOCALIZADA

Este tipo de desgaseificação expressa-se em áreas bem definidas como as emanções que se observam nas crateras de vulcões ativos, que evidenciam a presença de magma a maior profundidade e se revestem de particular interesse para a compreensão da sua evolução. São comuns a essas emanções, gases com características ácidas como SO₂, o HCl e o HF (Allard, 1996; Stix & Gaonac`H, 2000).

Outra forma de desgaseificação focalizada são as fumarolas, podendo as mesmas serem de elevada ou baixa temperatura, com composição química diferente, caracterizando-se estas últimas, (normalmente hidrotermais) por serem enriquecidas em CO₂, terem pouco ou nenhum HCl e apresentarem uma baixa razão SO₂/H₂S. O metano (CH₄) aparece frequentemente nestas emissões, sendo-lhe atribuída uma origem hidrotermal mais associada a baixas temperaturas (Martini, 1996; Delmelle & Stix, 2000).

1.3.2. DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA

A desgaseificação difusa através dos solos é caracterizada por emissões gasosas que ocorrem de forma contínua e impercetível através da superfície dos aparelhos vulcânicos (Allard *et al.*, 1991). As zonas de ocorrência dos fenómenos de desgaseificação difusa encontram-se normalmente associadas a locais de vulcanismo ativo, bem como com a existência de falhas e fraturas por onde os gases se escapam preferencialmente até à superfície (Irwin & Barnes, 1980; Baubron *et al.*, 1991), sendo os principais gases emitidos nestas áreas o CO₂ e o ²²²Rn (Allard, 1996; Allard *et al.*, 1998).

Assim, os estudos efetuados neste domínio podem ser aplicados, não só (1) na monitorização de vulcões ativos, mas também (2) em estudos de sismicidade, na tentativa de identificar precursores sísmicos (Irwin & Barnes, 1980; King, 1993), (3) na cartografia de falhas ativas (*e.g.* King, 1993; Giammanco *et al.*, 1998; Baubron *et*

al., 2002; Faria, 2002; Marcos *et al.*, 2003; Sousa, 2003; Viveiros, 2003; 2010), (4) na exploração geotérmica (Chiodini *et al.*, 1995) e na (5) avaliação do risco para a saúde pública (Baubron *et al.*, 1994a; 1994b; Baxter *et al.*, 1999; Ferreira, 2000; Sousa, 2003; Viveiros *et al.*, 2009; Silva, 2013).

1.4. DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

1.4.1. CARACTERÍSTICAS E ORIGEM

O dióxido de carbono é um gás incolor, inodoro e mais denso que o ar. Aquando da ascensão de magma, o dióxido de carbono é dos primeiros gases a ser libertado pelos vulcões e um dos que são exsolvidos em maiores quantidades (Holloway & Plank, 1994; William-Jones & Rymer, 2000; Bruno *et al.*, 2001). Já à superfície, a deteção de anomalias pode permitir o estudo e identificação, por exemplo, de zonas de falhas (*e.g.* Baubron *et al.*, 1990; Allard *et al.*, 1998; Chiodini *et al.*, 1998; Giammanco *et al.*, 1998; Bruno *et al.*, 2001; Aiuppa *et al.*, 2004).

O CO₂ natural pode ter diversas origens, nomeadamente, pode ser proveniente do manto, de rochas carbonatadas existentes na crosta ou ser resultado de atividade biogénica (Toutain *et al.*, 2002).

A emissão de CO₂, a uma escala global, associada à atividade vulcânica subaérea e submarina, está estimada atualmente em aproximadamente 0,64 Gt por ano (Burton *et al.*, 2013); uma parte desta emissão, cerca de 12%, tem origem a partir de lagos vulcânicos (0,09 Gt por ano) (Perez *et al.*, 2011; Burton *et al.*, 2013). Em São Miguel, a Lagoa das Furnas é responsável por 5% da emissão total de CO₂ que é emitido a partir do vulcão das Furnas (Viveiros *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2014).

1.4.2. FLUXO DE CO₂ EM REGIÕES VULCÂNICAS

As libertações de CO₂ que ocorrem de forma difusa podem ser monitorizadas apenas com recurso a equipamentos específicos, quer pela medição da concentração deste gás no solo, quer pela determinação do seu fluxo (efluxo). No que se refere à quantificação do fluxo, existem várias metodologias, incluindo métodos diretos e indiretos (Viveiros, 2003).

Os métodos diretos para a medição do fluxo de CO₂ podem ser aplicados de forma dinâmica ou estática fornecendo resultados semelhantes, enquanto que os métodos indiretos são baseados na medição inicial da concentração de CO₂ a diferentes profundidades calculando-se, a partir dos diferentes valores obtidos, o fluxo de CO₂ (Chiodini *et al.*, 1998).

De acordo com Tonani & Miele (1991 *in* Chiodini *et al.*, 1998), o método da câmara de acumulação é considerado o mais adequado para efetuar medições de fluxo em áreas vulcânicas e geotérmicas, pois sendo um método absoluto não requer pressupostos ou correções relacionadas com as características do solo.

O método da câmara de acumulação foi inicialmente utilizado para a medição de fluxo em solos, tendo sido adaptado para realizar o mesmo procedimento em lagos vulcânicos, método abordado nos capítulos seguintes da presente dissertação.

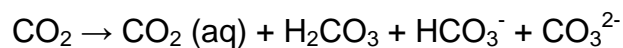
1.4.3. ESTUDO DE CO₂ EM LAGOS VULCÂNICOS

A origem e concentração do dióxido de carbono na água dos lagos vulcânicos poderão depender de vários fatores, sendo o CO₂ um composto essencial na determinação do equilíbrio químico destes sistemas.

O CO₂ é 200 vezes mais solúvel em água do que o oxigénio, o que obedece às leis normais da solubilidade de gases para as condições de temperatura e pressão verificadas nos lagos vulcânicos. A concentração de CO₂ dissolvido na água a partir

da concentração atmosférica (0,033 %) é cerca de 1,1 mg/L a 0 °C, 0,6 mg/L a 15 °C e 4 mg/L a 30 °C (Wetzel, 1993). A solubilidade superior deste gás deve-se ao facto das trocas entre o CO₂ e a água se processarem através de reações químicas; assim a constante da Lei de Henry não poderá ser aplicada diretamente, já que o dióxido de carbono, quando em contacto com a água, origina outras espécies dissolvidas como o ácido carbónico, bicarbonato e carbonato (Custódio, 1983; Deutsch, 1997).

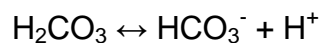
De facto, a solubilidade do gás corresponde à quantidade total que está dissolvido na água e que se exprime pela soma das espécies de carbono inorgânico em solução de acordo com a equação:



Contudo, a concentração do CO₂ (aq) depende da pressão parcial de CO₂ (g), segundo a constante da Lei de Henry (Deutsch, 1997). A hidratação do dióxido de carbono dissolvido resulta na formação de um ácido fraco (ácido carbónico).

Esta reação, apesar de ser independente do pH, ocorre normalmente a um valor inferior ou igual a 8, com uma concentração de equilíbrio de H₂CO₃ em relação ao CO₂ não hidratado, de cerca de 1/400, e com uma constante de equilíbrio de 10-5 moles/L a 25 °C (Deutsch, 1997).

Este ácido fraco dissocia-se rapidamente em solução, em comparação com a reação de hidratação anterior, dando origem ao bicarbonato. Como esta reação envolve o hidrogênio, a sua concentração é dependente do pH:



Em solução, o aumento da concentração de bicarbonato corresponde ao aumento do pH. O bicarbonato atinge a concentração do ácido carbónico a um pH igual a 6,4, e que corresponde ao valor da constante de equilíbrio ($K_e = 10^{-14,8}$) da reação de formação. Acima do valor de pH de 6,4 a concentração do bicarbonato ultrapassa a concentração do ácido carbónico.

O aumento da concentração do carbonato na água faz-se duas vezes mais rápido que a concentração do bicarbonato e atinge a mesma concentração a um pH de 10,3 (White, 1999).

Logo, nos lagos representados como sistemas abertos, a camada mais superficial será significativamente influenciada pela componente de dióxido de carbono proveniente das trocas gasosas que se processam à superfície do lago e que são dependentes do pH. Desta forma, haverá uma maior dissolução deste componente consoante o aumento do pH da água.

De acordo com Deutsch (1997), a concentração de dióxido de carbono dissolvido na água e em equilíbrio com o ar atmosférico será de 0,4 mg/L, para um pH próximo de 6 e de 18 mg/L, para um pH igual a 8. No entanto, a quantidade de CO₂ na água mais superficial depende da fotossíntese e da respiração, que em águas mais produtivas tende a aumentar o fluxo de dióxido de carbono atmosférico para a água. Os equilíbrios das reações que ocorrem nesta camada, têm como resultado uma reação tampão da água alcalina, sendo a componente do bicarbonato dominante (Wetzel, 1993).

1.4.4. MONITORIZAÇÃO GEOQUÍMICA EM LAGOS VULCÂNICOS

A importância do estudo dos lagos vulcânicos reside em vários fatores, que podem estar diretamente ou indiretamente relacionados com o facto destas massas de água poderem interagir com os sistemas magmáticos, sendo ao mesmo tempo importante para a monitorização de eventos vulcânicos (Varekamp, 2002).

As diferentes tipologias das águas nos lagos vulcânicos e as diferentes características inerentes a estes, poderão influenciar diretamente as propriedades físicas e químicas das águas dos lagos, em vários casos, por influência dos gases e dos líquidos libertados pelas câmaras magmáticas localizadas em profundidade.

Desta forma, pode considerar-se que as características de alguns lagos vulcânicos refletem fenómenos com origem nos magmas, que nos permite inferir o que se passa em profundidade, nomeadamente estudar os 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).

Particularmente, os lagos vulcânicos que se situam nos edifícios vulcânicos ativos são sistemas dotados de uma dinâmica individual. Estes interagem com material de origem magmática, sendo reservatórios naturais onde ocorre a condensação natural dos gases vulcânicos, de fluidos hidrotermais, algumas vezes, extremamente acidificados e mineralizados. Assim, o estudo dos lagos vulcânicos possibilita um melhor conhecimento sobre estas propriedades físicas e químicas que estão relacionadas com as erupções magmáticas e, principalmente, com as modificações a nível térmico e químico que poderão preceder uma erupção vulcânica (Delmelle & Bernard, 2000). Desta forma, é de enorme interesse o acompanhamento e monitorização destas variações nos lagos vulcânicos devido ao potencial de perigosidade que representam para as populações que habitam as áreas próximas destes edifícios vulcânicos. As mudanças que estes fenómenos de origem magmática poderão induzir nas características físico-químicas dos lagos servem, vulgarmente, de linha de base para a monitorização dos mesmos. A hidrogeoquímica relacionada com a atividade vulcânica de um lago poderá ser uma ferramenta extremamente importante para a monitorização da atividade vulcânica, quando combinada com outras técnicas aplicadas ao estudo do vulcanismo. Visto que os lagos vulcânicos também poderão ser a fonte de possíveis pequenas catástrofes (poluição atmosférica, difusão de gases tóxicos, etc.), estes estão relacionados diretamente com erupções que poderão ocorrer dentro dos lagos vulcânicos. Assim a sua monitorização constitui um ponto fundamental para a prevenção de qualquer acontecimento que possa ocorrer em consequência da atividade vulcânica (Martínez *et al.*, 2000).

Outro fator importante para a monitorização geoquímica dos lagos vulcânico é a cor da água. Esta resulta da absorção e dispersão da radiação solar através das

substâncias dissolvidas ou em suspensão. Alguma alteração na cor da água poderá revelar uma alteração na interação com o *input* de origem vulcânica, já que a cor da água nestes sistemas é afetada pela alteração da precipitação química (Berner & Berner, 1996).

Já no decorrer do século XXI, começou-se a desenvolver um maior interesse sobre o comportamento e características dos lagos vulcânicos. Atualmente, um pouco por todo o mundo, os lagos estão a ser estudados e monitorizados por equipas de investigação tal como sintetizado em Rowet *et al.* (2014).

Nos Açores, o estudo hidrogeoquímico de lagos, e as suas relações com o ambiente vulcânico tem ganho expressão com o passar dos anos, com contribuições de Martini *et al.* (1994), Cruz *et al.* (2002; 2003a; 2003b), Antunes, (2003; 2008), Antunes *et al.* (2005), Cruz *et al.* (2006) e Antunes *et al.* (2007a; 2007b).