

JEREMIAS ALVES CABRAL

**AVALIAÇÃO DOS PERIGOS VULCÂNICOS E FENÓMENOS
ASSOCIADOS NA ILHA DO FOGO (CABO VERDE):
IMPLICAÇÕES PARA O PLANEAMENTO DE EMERGÊNCIA E
ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À UNIVERSIDADE DOS AÇORES PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE DOUTOR NO RAMO DE GEOLOGIA, ESPECIALIDADE DE VULCANOLOGIA

ORIENTADORES:

PROFESSOR DOUTOR JOÃO LUÍS ROQUE GASPAR
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

PROFESSORA DOUTORA TERESA DE JESUS LOPES FERREIRA
UNIVERSIDADE DOS AÇORES



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2015

Às mulheres da minha vida

Andresa Lobo Alves

Luísa Almeida Pereira

Jelise Pereira Cabral

Celisa Patrícia Pereira Cabral

Índice

LISTA DE FIGURAS	V
LISTAS DE TABELAS	XI
AGRADECIMENTOS.....	XIII
RESUMO	XVII
ABSTRACT.....	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Estudos anteriores	5
1.3. Objetivos do trabalho.....	8
1.4. Estrutura do trabalho	9
2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO.....	13
2.1. Localização geográfica e divisão administrativa	13
2.2. Caracterização climática	16
2.3. Origem e enquadramento geotectónico.....	23
2.4. Vulcanismo e sismicidade.....	27
2.5. Geologia da ilha do Fogo	30
2.6. Recursos hídricos na ilha do Fogo	36
3. ANÁLISE MORFOESTRUTURAL	41
3.1. A ilha no contexto arquipelágico.....	41
3.2. Formas e estruturas vulcânicas.....	42
3.2.1. Aspectos gerais.....	42
3.2.2. Vulcão central com caldeira	47
3.2.3. O Pico do Fogo	48
3.2.4. Cones de escórias	49
3.2.5. Escoadas lávicas	55
3.2.5.1. Escoadas lávicas <i>aa</i>	57
3.2.5.2. Escoadas lávicas <i>pahoehoe</i>	57
3.3. Estruturas tectónicas	60
3.3.1. Falhas	60
3.3.2. Lineamentos	63
3.3.3. Alinhamentos vulcânicos.....	63

3.4.	Colapsos de flanco ou grandes deslizamentos	64
4.	VULCANISMO HISTÓRICO DA ILHA DO FOGO.....	67
4.1.	Nota prévia	67
4.2.	Erupções históricas.....	69
4.2.1.	Erupção de 1500.....	69
4.2.2.	Erupção de 1564.....	70
4.2.3.	Erupção de 1578.....	71
4.2.4.	Erupção de 1596.....	72
4.2.5.	Erupção de 1604.....	73
4.2.6.	Erupção de 1662 / 1663	75
4.2.7.	Erupção de 1675.....	76
4.2.8.	Erupção de 1680.....	78
4.2.9.	Erupção de 1683.....	79
4.2.10.	Erupção de 1689.....	80
4.2.11.	Erupção de 1693.....	82
4.2.12.	Erupção de 1695.....	83
4.2.13.	Erupção de 1699.....	84
4.2.14.	Erupção de 1712.....	88
4.2.15.	Erupção de 1713.....	90
4.2.16.	Erupção de 1722 - 1724.....	91
4.2.17.	Erupção de 1757.....	95
4.2.18.	Erupção de 1761.....	96
4.2.19.	Erupção de 1769.....	96
4.2.20.	Erupção de 1774 (?).....	99
4.2.21.	Erupção de 1785.....	99
4.2.22.	Erupção de 1799.....	104
4.2.23.	Erupção de 1816.....	108
4.2.24.	Erupção de 1847.....	112
4.2.25.	Erupção de 1852.....	115
4.2.26.	Erupção de 1857.....	117
4.2.27.	Erupção de 1858.....	119
4.2.28.	Erupção de 1909.....	120
4.2.29.	Erupção de 1951.....	121
4.2.30.	Erupção de 1995.....	130

5.	PERIGO VULCÂNICO E SUSCEPTIBILIDADE A ESCOADAS LÁVICAS	141
5.1.	Perigo vulcânico	141
5.1.1.	Nota prévia	141
5.1.2.	Perigos diretos	143
5.1.2.1.	Escoadas lávicas	143
5.1.2.2.	Piroclastos	144
5.1.2.2.1.	Piroclastos de trajetória balística	145
5.1.2.2.2.	Piroclastos de queda (cinzas vulcânicas e <i>lapilli</i> de queda)	148
5.1.2.2.3.	PDC's (<i>Pyroclastic Density Currents</i>)	149
5.1.2.2.4.	Lahars	151
5.1.2.3.	Gases vulcânicos	152
5.2.	Avaliação de suscetibilidade a escoadas lávicas	157
5.2.1.	Nota prévia	157
5.2.2.	Caso de estudo	157
5.2.2.1.	Seleção do modelo de simulação	158
5.2.2.2.	Caracterização e determinação dos parâmetros a utilizar	159
5.2.2.2.1.	Modelo Numérico de Elevação de Terreno	159
5.2.2.2.2.	Definição da área fonte	164
5.2.2.2.3.	Definição do comprimento da escoada	167
5.2.2.2.4.	Definição da correção da altura	168
5.2.2.2.5.	Definição do número de iterações a usar	168
5.2.2.3.	Análise de suscetibilidade a escoadas lávicas	169
6.	CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE VULNERABILIDADE	177
6.1.	Nota prévia	177
6.2.	Caracterização geral da área	178
6.2.1.	Demografia	178
6.2.2.	Edificado	181
6.2.3.	Parque Natural do Fogo	184
6.2.4.	Infraestruturas básicas	185
6.2.4.1.	Rede viária	185
6.2.4.2.	Sistemas de abastecimento de água potável e de drenagem de águas residuais	186
6.2.4.3.	Unidades de saúde	190
6.2.4.4.	Energia	190

ÍNDICE

6.2.4.5.	Telecomunicações	191
6.2.4.6.	Sistemas de transporte.....	192
6.2.4.6.1.	Transporte terrestre	193
6.2.4.6.2.	Transporte marítimo	194
6.2.4.6.3.	Transporte aéreo.....	195
6.3.	Vulnerabilidade à ação sísmica	197
6.3.1.	Nota prévia	197
6.3.2.	Metodologia	197
6.3.3.	Apresentação dos dados.....	202
6.3.4.	Discussão	206
6.4.	Vulnerabilidade às escoadas lávicas.....	208
6.4.1.	Nota prévia	208
6.4.2.	Edificado	209
6.4.3.	Estradas.....	209
6.4.4.	Pontos de água	212
6.4.5.	Cenário de Chá das Caldeiras.....	213
7.	ERUPÇÃO VULCÂNICA DE 2014 NA ILHA DO FOGO.....	217
7.1.	Nota prévia	217
7.2.	Antecedentes.....	220
7.3.	Início e evolução da erupção vulcânica	222
7.4.	Atividades de protecção civil.....	247
7.5.	Assessoria científica.....	254
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	259
	BIBLIOGRAFIA.....	269
ANEXOS		
ANEXO I	.....	A-1
ANEXO II	.....	A-13
ANEXO III	.....	A-17
ANEXO IV	.....	A-21
ANEXO V	.....	A-31
ANEXO VI	.....	A-57
ANEXO VII	.....	A-71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização do arquipélago de Cabo Verde.	14
Figura 2.2 – Subdivisão da ilha do Fogo: a) concelhos; b) freguesias.	15
Figura 2.3 – Mapa com localização das estações.	18
Figura 2.4a – Precipitação na ilha do Fogo (média anual de 1980 a 2008).	19
Figura 2.4b – Precipitação na ilha do Fogo (média anual de 1980 a 2008).	20
Figura 2.5 – Precipitação média registada na ilha do Fogo entre 1980 a 2008.	20
Figura 2.6a - Percentil da precipitação em cada uma das estações meteorológicas da ilha do Fogo.	21
Figura 2.6b - Percentil da precipitação em cada uma das estações meteorológicas da ilha do Fogo.	22
Figura 2.7 – Distribuição das ilhas de Cabo Verde nos três pedestais (Bebiano, 1932).	24
Figura 2.8 – Idades aproximadas das ilhas do arquipélago de Cabo Verde (Madeira <i>et al.</i> , 2008).	25
Figura 2.9 – Localização epicentral de sismos ($M \geq 4$) na área do arquipélago de Cabo Verde registados pela rede mundial (NEIC-USGS).	29
Figura 2.10 – Quimismo das rochas do arquipélago de Cabo Verde (Torre de Assunção e Canilho, 1969-1970).	31
Figura 2.11 – Diagrama SiO_2 – alcalis total (Fogo) (Torre de Assunção e Canilho, 1969-1970).	31
Figura 2.12 – Diagrama SiO_2 – alcalis totais (Torre de Assunção e Canilho, 1969-1970).	32
Figura 2.13 – Diagrama SiO_2 – enriquecimento em soda (Torre de Assunção e Canilho, 1969-1970).	32
Figura 2.14 – Carta geológica da ilha do Fogo (Machado e Assunção 1965).	34
Figura 2.15 - Estratigrafia do vulcão do Fogo. Identificação de quatro períodos distintos de vulcanismo: 1º - estágio inicial (grupo Ribeira de Almada); 2º - primeiras lavas subaéreas (grupo Monte Barro); 3º - edificação da maior parte da ilha (grupo Monte Amarelo); 4º - estágio pós-colapso (grupo Chã das Caldeiras). Adaptado de Foeken <i>et al.</i> (2009).	35
Figura 2.16 – Chafariz.	36
Figura 3.1 - Modelo Numérico de Elevação de Terreno (MNET) do Fogo: 1 – Vulcão central principal, que corresponde ao edifício que define a própria ilha; 2 – Vulcão central do Pico do Fogo; 3 – Cones de escórias com escoadas lávicas associadas.	43
Figura 3.2 - Mapa hipsométrico da ilha do Fogo.	44
Figura 3.3 - Carta de declives da ilha do Fogo.	45
Figura 3.4 - Perfis topográficos.	46
Figura 3.5 - Distribuição de cones de escórias da ilha do Fogo.	50
Figura 3.6 - Dimensões de um cone de escórias (Wood, 1980a <i>in</i> Gaspar, 1996).	52
Figura 3.7 - Diagrama H_{co} vs W_{co} para os 228 cones de escória da ilha do Fogo considerados na presente análise.	53

Figura 3. 8 - Diagrama Hco vs Wco para 24 cones de escória do interior da caldeira. a) Fogo 44 – cone de 1995, b) Fogo 36 e c) Monte Losna.	54
Figura 3.9 - Diagrama Hco vs Wco para 24 cones de escória do interior da caldeira: a) Fogo 44 – cone de 1995, b) Fogo 36 e c) Monte Losna.	55
Figura 3.10 - Escoadas lávicas cartografadas (adaptado de Torres et al., 1997).	56
Figura 3.11 - Escoadas lávicas do tipo <i>aa</i> : A e B – superfície áspera (clinker); C e D – frente da escoada.	57
Figura 3.12 - Escoadas lávicas do tipo <i>pahoehoe</i> : A, B, C, D – Lavas encordoadas; E e F – <i>Toes</i>	59
Figura 3.13 - Esboço estrutural da ilha do Fogo (Brum da Silveira <i>et al.</i> , 1997b).	61
Figura 3.14 - Depósito submarino atribuído ao colapso do flanco leste do Vulcão do Fogo (Masson e Le Bas 2008).	64
Figura 4.1 – Ilustração que contempla o porto da Praia e a ilha do Fogo com o seu vulcão em atividade (Thomas Philips, 1746).	82
Figura 4.2 – Ilustração da ilha do Fogo com o seu vulcão em atividade, da ilha Brava e dos ilhéus (Duplessis, 2004).	85
Figura 4.3 - Ilustração da ilha do Maio, porto da Praia e a ilha do Fogo com o seu vulcão em atividade (Dampier, 1703).	86
Figura 4.4 – Mapa com as rotas percorridas durante a expedição de 1699 (Dampier, 1703).	87
Figura 4.5 – Mapa com as rotas percorridas durante a expedição de 1712 (Frezier, 1716).	89
Figura 4.6 – Ilustração da ilha do Fogo e do seu vulcão (Schley <i>in</i> Prévost, 1747).	94
Figura 4.7 – Desenhos que acompanharam a descrição da erupção de 1785 (Feijó <i>in</i> Arquivo Histórico Ultramarino).	101
Figura 4.8 – Desenhos de Brito Capello (1857) que acompanham o relato das erupções vulcânica de 1816, 1847 e 1852.	111
Figura 4.9 – Uma das primeiras fotografias da erupção de 1951 (<i>in</i> Ribeiro, 1960). ...	124
Figura 4.10 - Coluna eruptiva observada e fotografada pelo Dr. Francisco Mendes no segundo dia da erupção de 1951 (<i>in</i> Ribeiro, 1960).	125
Figura 4.11 - Coluna eruptiva no início da erupção de 1951 observada a partir de São Filipe (http://www.fotolog.com/40_amelia/242000000000002974/).	125
Figura 4.12 - Coluna eruptiva do Monte Orlando, observada no dia 9 de julho de 1951 (Ribeiro, 1960).	126
Figura 4.13 - Casas afetadas em 1951 pelo sismo das 15 horas do dia 12 de junho, na localidade de Corvo (Ribeiro, 1960).	126
Figura 4.14 – Concentração de gado junto à cisterna de Fonte Aleixo em 1951 (Ribeiro, 1960).	129
Figura 4.15 – Monte Orlando e Monte Rendall fotografados da bordeira em 2014.	129
Figura 4.16 – Lóbulos de lavas <i>pahoehoe</i> da erupção de 1995 fotografados em 2013.	134
Figura 4.17 – Mapa da caldeira do Fogo e distribuição das escoadas lávicas da erupção de 1995 (Gaspar <i>et al.</i> , 1995).	135

Figura 5.1 – Bomba vulcânica gigante emitida no decurso da erupção de 1995.....	147
Figura 5.2 - Bombas vulcânicas: A - crosta; B - vesículas coalescentes na parte superior; C - aspeto exterior da bomba; D - aspeto interior da bomba.....	147
Figura 5.3 - Áreas fonte selenadas para a simulação.....	160
Figura 5.4 - Variação da percentagem de células com diferenças de probabilidade superior a 5% para diferentes MNET, no interior da naldeira da ilha do Fogo.....	162
Figura 5.5 - Variação da percentagem de células com diferenças de probabilidade superior a 5% para diferentes MNET, no exterior da caldeira da ilha do Fogo.....	162
Figura 5.6 - Tempo consumido ao correr as simulações para diferentes MNET.....	163
Figura 5.7 - Áreas fontes definidas considerando os centros eruptivos.....	165
Figura 5.8 - Áreas fontes definidas para as estruturas tectónicas (adaptado de Brum da Silveira <i>et al.</i> , 1997b).....	166
Figura 5.9 - Áreas fontes totais consideradas na ilha do Fogo.....	167
Figura 5.10 – Percentagens de células com diferença de probabilidade superior a 5% <i>versus</i> números de iterações.....	169
Figura 5.11 - Resultado da simulação usando o modelo Grapel 4 considerando todas as células fonte com igual probabilidade de gerar fluxos de lavas.....	171
Figura 5.12 - Mapa de probabilidades de inundação por escoadas lávicas na ilha do Fogo, em classes, considerando todas as células fonte com igual probabilidade de gerar fluxos de lava.....	172
Figura 5.13 – Carta de suscetibilidade a escoadas lávicas na ilha do Fogo.....	173
Figura 5.14 – Carta de suscetibilidade a escoadas lávicas com centros emissores no interior da caldeira.....	174
Figura 6.1 - Distribuição da população na ilha do Fogo (Dados do Censo 2010). Ver designação das zonas do concelho de Santa Catarina na tabela 6.1.....	179
Figura 6.2 - Gráfico da população residente na área de estudo.....	180
Figura 6.3 - Distribuição do edificado na ilha do Fogo.....	182
Figura 6.4 – Número de edifícios por tipologia e freguesias do concelho de Santa Catarina.....	183
Figura 6.5 - Área correspondente ao Parque Natural do Fogo.....	184
Figura 6.6 - Localização dos pontos de água nas diferentes freguesias da ilha.....	188
Figura 6.7 - Rede de distribuição de água (AGUABRAVA 2010).....	189
Figura 6.8 - Percentagem das habitações pertencentes a cada classe de vulnerabilidade no concelho de Santa Catarina, por zona.....	205
Figura 6.9 – Caracterização do edificado de acordo com as classes de suscetibilidade.....	210
Figura 6.10 – Caracterização das estradas de acordo com as classes de suscetibilidade.....	211
Figura 6.11 - Caracterização dos pontos de água de acordo com as classes de suscetibilidade.....	212
Figura 7.1 - Uma das primeiras fotografias tiradas à chegada à ilha do Fogo (26/11/2014).....	218

Figura 7.2 - Habitantes de Portela com alguns dos bens que conseguiram salvar, observam, impotentes e com angústia, a progressão das lavas em direção às suas habitações.....	219
Figura 7.3 – Localização das 8 bocas eruptivas dos primeiros dias da erupção (26/11/2014).	223
Figura 7.4 - Primeiras escoadas lávicas aa que atingiram a sede do Parque Natural do Fogo (26/11/2014).....	223
Figura 7.5 - Pequenos danos numa parte da parede exterior da sede do Parque Natural do Fogo (26/11/2014).	224
Figura 7.6 Coluna eruptiva no início do dia (26/11/2014).....	224
Figura 7.7 - Coluna eruptiva no final do dia (26/11/2014).	224
Figura 7.8 – Em primeiro plano, união das bocas 5 e 6, a partir das quais se passaram a observar fontes de lava e explosões de grandes bolhas lávicas. Em segundo plano uma coluna eruptiva vertical de cinzas emitidas a partir da boca 7 (27/11/2014).	226
Figura 7.9 - Fonte e rios de lava (27/11/2014).	226
Figura 7.10 – Exemplo de uma das bolhas de lava (29/11/2014).	227
Figura 7.11 - Resto do edifício sede do Parque Natural do Fogo a ser arrastado por uma frente de lava aa (30/11/2014).	227
Figura 7.12 - Resto do edifício sede do Parque Natural do Fogo a ser arrastado pela frente de lava aa (30/11/2014).....	228
Figura 7.13 - Frente de lava aa que destruiu parcialmente Portela (1/12/2014).....	229
Figura 7.14 - Espessura da frente de lava aa na principal rua de Portela (1/12/2014).	229
Figura 7.15 - Rio de lava na base do cone da erupção (1/12/2014).	230
Figura 7.16 – Constante obstrução de estradas alternativas no sopé da bordeira (2/12/2014).	230
Figura 7.17 - Coluna eruptiva (30/11/2014).....	231
Figura 7.18 - Coluna eruptiva (01/12/2014).....	231
Figura 7.19 - Coluna eruptiva junto ao solo (9/12/2014).	231
Figura 7.20 - Frente de escoada lávica a escassos metros de atingir o polidesportivo em Portela (6/12/2014).	233
Figura 7.21 - Destruição de habitação na Portela (6/12/2014).	233
Figura 7.22 - Centro de Portela ocupado por um rio de lava (7/12/2014).	234
Figura 7.23 – Diversos canais de lava entre Portela e Bangaeira (7/12/2014).	234
Figura 7.24 - Observação noturna das diferentes ramificações de lavas em Bangaeira (7/12/2014).	235
Figura 7.25 - Explosão de vapor numa cisterna em Bangaeira (7/12/2014).	235
Figura 7.26 - Frente de lava parada em Bangaeira (10/12/2014)	236
Figura 7.27 - Início da destruição total da cooperativa em Portela (14/12/2014).....	237
Figura 7.28 - Nova frente de lava a descer a rampa entre Portela e Bangaeira (14/12/2014).	237
Figura 7.29 - Queda de uma parte da parede da igreja católica devido à pressão das lavas (14/12/2014).	238
Figura 7.30 - Segunda escoada lávica que atingiu Bangaeira (16/12/2014).....	238
Figura 7.31 - Fase final do fluxo de lava entre Portela e Bangaeira (16/12/2014).....	239

Figura 7.32 - Tubo lávico entre Portela e Bangaieira, numa altura em que o fluxo havia diminuído (18/12/2014).....	239
Figura 7.33 - Lava canalizada pela linha de água de Ilhéu de Losna (18/12/2014). ...	241
Figura 7.34 - Frente de uma escoada lávica <i>pahohoe</i> em direção ao povoado de Ilhéu de Losna (18/12/2014).....	241
Figura 7.35 - Adega Saudade a ser consumida pelas lavas em Ilhéu de Losna (19/12/2014).	242
Figura 7.36 - Avanço das lavas sobre as estradas alternativas no sopé da bordeira (21/12/2014).	242
Figura 7.37 - Habitações a serem destruídas em Ilhéu de Losna (21/12/2014).	243
Figura 7.38 - Alguns habitantes de Ilhéu de Losna na frente de lava a resgatar mandioca perante a ameaça de uma frente de lava (21/12/2014).	243
Figura 7.39 – Cone de 2014 após o final da erupção (7/02/2015).	244
Figura 7.40 - Crateras da erupção de 2014 (11/02/2015).	244
Figura 7.41 - Cartografia das escoadas lávicas emitidas durante a erupção de 2014.	246
Figura 7.42 – Bens resgatados amontoados na costa do Monte Amarelo a aguardarem a reabertura das estradas alternativas (26/12/2014).	249
Figura 7.43 – Bens agrupados na encosta do Monte Amarelo (26/12/2014).	249
Figura 7.44 – Trabalhos de abertura das estradas em Monte Cova Tina (26/12/2014).	250
Figura 7.45 - Primeiro veículo com bens particulares a sair de Chã das Caldeiras depois da reabertura das estradas (26/11/2014).	250
Figura 7.46 - Retoma da evacuação de pessoas e bens, assim como de gado (27/11/2014).	251
Figura 7.47 - Retirada de alguns produtos da cooperativa vinícola (27/11/2014).	251
Figura 7.48 - Caravana de viaturas que durou vários dias (27/11/2014).....	252
Figura 7.49 - Centros de acolhimento dos deslocados: a) São Filipe; b) Mosteiros; c) Achada Furna.	253

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 – Agrupamento das ilhas e ilhéus.	13
Tabela 2.2 – Sinopse relativa à topologia das ilhas da República de Cabo Verde (Bebiano, 1932).....	14
Tabela 2.3 – Sismicidade instrumental ($M \geq 4$) na área do arquipélago de Cabo Verde, registada pela rede mundial (NEIC-USGS).	28
Tabela 2.4 – Informações referentes aos furos e à nascente da ilha do Fogo (INGRH).	37
Tabela 4. 1 - Distribuição das famílias desalojadas pelos diferentes acampamentos (Mota Gomes e Rodrigues, 1997b).	137
Tabela 5.1 - Nomenclatura utilizada para classificação de depósitos piroclásticos de acordo com o tamanho dos fragmentos (Sohn e Chough, 1989).....	145
Tabela 5.2 - Toxicologia dos gases vulcânicos e aerossóis (Williams-Jones e Rymer, 2000 <i>in</i> Ferreira 2000).	153
Tabela 5.3 – Percentagens de células com diferença de probabilidades inferior ou igual a 5% e superior a 5% e o tempo da simulação utilizando uma área fonte de 10.000 m ² no interior da caldeira e no exterior.	163
Tabela 5.4 - Classes de suscetibilidade atendendo a intervalos de igual probabilidade de inundação por escoadas lávicas.	170
Tabela 6.1 - População residente nas zonas estudadas, segundo o Censo 2010.	180
Tabela 6.2 – Tipologia de edifícios cartografados na ilha do Fogo.	181
Tabela 6.3 - Tipo de pavimento e estado de conservação das estradas da ilha do Fogo até 2010.	185
Tabela 6.4 - Tipo de pavimento e estado de conservação das estradas nacionais da ilha do Fogo até 2010.	185
Tabela 6.5 - Tipo de pavimento e estado de conservação das estradas municipais da ilha do Fogo até 2010.	186
Tabela 6.6 - Parque de viaturas de aluguer em 31/12/2009 (DGTR).	194
Tabela 6.7 - Viaturas matriculadas em 2009.	194
Tabela 6.8 - Ficha tipo utilizada no inquérito para levantamento das vulnerabilidades do edificado (adaptado de Gomes, 2003).....	198
Tabela 6.9 - Descrição das tipologias das habitações para cada uma das classes de vulnerabilidade (adaptado de Gomes, 2003).	200
Tabela 6.10 - Correspondência entre a percentagem de danos verificada no sismo de Faial em 1998, os danos referidos na EMS-98 e o tipo de intervenção a executar (Gomes, 2003).....	201
Tabela 6.11 - Identificação das habitações pertencentes a cada classe de vulnerabilidade no concelho de Santa Catarina, por zona.	203
Tabela 6.12 - Total de habitações pertencentes a cada classe de vulnerabilidade no concelho de Santa Catarina.	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.13 - Cenários dos danos nas habitações provocados por sismos de grau igual ou superior a VII.	207
Tabela 6.14 - Número de pessoas cujas habitações poderão sofrer danos 3, 4 ou 5.	207
Tabela 6.15 - Distribuição das áreas suscetíveis de serem inundadas por escoadas lávicas.	209
Tabela 6.16 - Número de edifícios expostos à ação das escoadas lávicas, de acordo com as diferentes classes de suscetibilidade.	209
Tabela 6.17 - Extensão das estradas expostas à ação das escoadas lávicas, de acordo com as diferentes classes de suscetibilidade.	211
Tabela 6.18 - Número de pontos de água expostos à ação das escoadas lávicas, de acordo com as diferentes classes de suscetibilidade.	213
Tabela 6.19 - Distribuição das áreas suscetíveis de serem inundadas por escoadas lávicas a partir de centros localizados no interior da caldeira.	213
Tabela 6.20 – Número de edifícios expostos à ação das escoadas lávicas, de acordo com as diferentes classes de suscetibilidade (centros eruptivos no interior da caldeira).	213
Tabela 6.21- Extensão das estradas expostas à ação das escoadas lávicas, de acordo com as diferentes classes de suscetibilidade (centros eruptivos no interior da caldeira).	214
Tabela 6.22 – Número de pontos de água expostos à ação das escoadas lávicas, de acordo com as diferentes classes de suscetibilidade (centros eruptivos no interior da caldeira).	214
Tabela 7.1 - Distribuição dos deslocados de Chã das Caldeiras.	252

AGRADECIMENTOS

Um trabalho científico não é e nem deve ser um trabalho individual, uma vez que implica cooperação entre diversas entidades e pessoas. Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho tive apoio de muitas pessoas e instituições, que deram o seu contributo para a concretização deste trabalho, por isso gostaria de expressar o meu profundo agradecimento a todos os que de uma forma ou de outra ajudaram nesta caminhada. Gostaria de expressar um agradecimento particular às seguintes entidades e pessoas:

- Ao Governo da Região Autónoma dos Açores e ao Governo da República de Cabo Verde, pelo protocolo assinado que permitiu a abertura do concurso da bolsa de doutoramento de que vim a beneficiar;
- Ao Fundo Regional para Ciência e Tecnologia (FRCT) pela conceção da bolsa que permitiu a minha estadia nos Açores durante 4 anos e em particular à Dra. Célia Amaral e ao Dr. Francisco Pinto que foram os meus interlocutores nesta instituição;
- À Direção Regional de Ciência e Tecnologia (DRCT) pelo financiamento do projeto que permitiu a aquisição de materiais necessários ao desenvolvimento do trabalho e algumas das deslocações a Cabo Verde para realizar trabalhos de campo;
- A todas as instituições cabo-verdianas e portuguesas que facultaram documentos e depoimentos bastante úteis na materialização do projeto;
- À Universidade dos Açores, ao Departamento de Geociências e a todos os professores afetos a este departamento pelo acolhimento na Academia e pelos ensinamentos quer ao longo da componente curricular do mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos que tive o privilégio de participar, quer ao longo desta longa estadia nos Açores;
- Ao Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores (CVARG), pelo acolhimento, integração nas equipas de trabalho e apoio em todas as fases do desenvolvimento do trabalho. Um agradecimento especial à sua diretora, Doutora Gabriela Queiroz.
- Ao Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA), pelo acolhimento, integração nos diversos grupos de monitorização e pelo contrato de trabalho feito no final da bolsa, que permitiu concluir este trabalho. Um agradecimento

AGRADECIMENTOS

especial à sua diretora Doutora Teresa Ferreira, pelo pronto financiamento da deslocação a Cabo Verde para o acompanhamento da erupção vulcânica de 2014;

- Ao Serviço Nacional de Proteção Civil e Bombeiros de Cabo Verde na pessoa do seu presidente Arlindo Lima, pelas facilidades em termos de tempo que me concedeu na fase final da redação da dissertação e pela minha integração na equipa de proteção civil que acompanhou a erupção vulcânica de 2014 e que facilitou bastante a minha permanência na ilha do Fogo;
- Ao atual Magnífico Reitor, Doutor João Luís Gaspar, orientador científico deste trabalho pelo incentivo, ensinamentos, sugestões, revisão do trabalho, amizade e sobretudo por conciliar o imenso trabalho de reitor com a orientação da presente dissertação;
- As mesmas palavras de agradecimento à orientadora científica do presente trabalho, a Doutora Teresa Ferreira, pelo tempo despendido na orientação científica deste trabalho e por conseguir conciliar a referida orientação com imensos trabalhos e desafios constantes que a presidência do CIVISA lhe impõe;
- Aos docentes do mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Doutores Rui Coutinho, José Pacheco, Nicolau Wallenstein, Virgílio Cruz, João Porteiro, Gabriela Queiroz, Teresa Ferreira, João Luís Gaspar pelos ensinamentos que foram muito úteis no desenvolvimento deste trabalho e sobretudo, pelos laços de amizade construídos.
- A todos os docentes, funcionários do departamento, do CVARG e do CIVISA pelo apoio, carinho e amizade com que me acolheram;
- Ao amigo, professor Douror Alberto da Mota Gomes, com quem tive o primeiro contacto com a geologia e despertou-me o gosto pela investigação e, pelos conselhos, incentivos, cedência de documentos e toda disponibilidade que sempre demonstrou.
- À colega Vera Alfama pelo apoio, partilha de informações discussões e amizade demonstrada ao longo desta caminhada;
- Ao colega, amigo e companheiro Carlos Primo pela amizade, acolhimento e integração no seio da sua família que agora considero como a minha família nos Açores, e pela resolução de imensos problemas informáticos que surgiram no decorrer deste trabalho;

- Aos colegas e amigos Catarina Goulart e José Medeiros pelas imensas ajudas na resolução de problemas relacionados com a cartografia da ilha do Fogo e respostas às dúvidas relacionadas com o Sistema de Informação Geográfico (SIG);
- À amiga Ana Gomes pela leitura e discussão de parte deste trabalho e pela amizade;
- À amiga Fátima Viveiros pelo carinho amizade e a paciência para ler parte do trabalho;
- Aos colegas e amigos do grupo de futebol Tsunamis e Terramotos, pelos muitos golos marcados e sofridos, pelas derrotas e vitórias, pelos convívios que preencheram muitos vazios e sobretudo, pela amizade e carinho;
- À Patrícia Raposo pela amizade e por ajudar nos serviços de secretariado;
- Ao colega e companheiro de gabinete Adriano Pimentel pelo carinho, amizade e todo o apoio, principalmente na realização de simulações de fluxo das escoadas lávicas e dispersão de piroclastos de queda aquando da erupção de 2014;
- A todos os colegas e amigos do CVARG e do CIVISA nomeadamente: Ana Hipólito, Ana Rita Mendes, Ana Rosa Medeiros, Arturo Montalvo, Beatriz Estrela Rego, Bruno Coelho, Bruno Medeiros, Carlos Melo, Catarina Silva, César Andrade, Crisálida Rego, Ernesto Sousa, Flávio Soares, Irina Araújo, Joana Pacheco, João Araújo, João Couto, Jun Okada, Lucia Rodriges, Maria Fé, Maria João Poim, Massimiliano Porreca, Mercês Mota, Nuno Cabral, Paulo Amaral, Paulo Pacheco, Pedro Freire, Rita Carmo, Rita Marques, Rogério Sousa, Ruben Luís, Rui Correia, Rui Marques, Rui Mestre, Sário Armas, Sérgio Oliveira, Vitor Sousa, Vitório Zanon, ou seja, a todos os que tive o prazer de conhecer através do CVARG e do CIVISA;
- Aos colegas e amigos Jailson Andrade e Flávio Pina pelo apoio nos trabalhos de campo;
- À historiadora Susana Vieira pelo apoio na pesquisa de documentos e pela amizade demonstrada;
- À amiga Arlinda Fonte pelo apoio na tradução de alguns documentos antigos e pela amizade e carinho demonstrados;
- À Associação dos Imigrantes nos Açores (AIPA) pelos convívios e bons momentos proporcionados;

AGRADECIMENTOS

- À Helena Primo pela amizade e carinho demonstrados ao aceitar ser minha madrinha do Crisma, e pelos muitos momentos de convívio que me proporcionou;
- À Dona Inácia e ao Sr. Manuel pelo carinho e muitos momentos de convívios que me proporcionaram;
- A todos os amigos e colegas que deram apoio e demonstraram a sua solidariedade ao longo de todo o processo de doutoramento;
- À minha comadre Judith Costa pelo apoio amizade e carinho;
- Aos compadres Mario Mendes Sanches e Maria da Cruz Pires pelo apoio e amizade que sempre demonstraram;
- À minha comadre Maria Celestina Pereira e à sua família pelo apoio e amizade incondicional que sempre demonstraram;
- Ao Leonardo Moniz pela amizade e carinho que sempre demonstrou;
- À minha mãe Andresa Lobo Alves e aos meus irmãos por todo carinho e compreensão;
- A todas as pessoas que tive o privilégio de conhecer ao longo desta caminhada e ao longo da minha vida;
- À minha companheira de vida, Luísa Almeida Pereira, pelo apoio, encorajamento, incentivo, carinho, amor, compreensão pela minha longa ausência e sobretudo pela superação das dificuldades de ter que cuidar sozinha das meninas;
- Às minhas filhas Jelise Cabral e Celisa Cabral por compreenderem a ausência, pelo amor e por existirem na minha vida;

RESUMO

O arquipélago de Cabo Verde é composto por 10 ilhas e vários ilhéus de origem vulcânica, sendo a ilha do Fogo a única onde se registaram erupções históricas. É neste contexto que o presente trabalho se debruça sobre a avaliação dos perigos vulcânicos e fenómenos associados nesta ilha, e nas respetivas implicações em termos de planeamento de emergência e ordenamento do território.

Para se compreender melhor o vulcanismo da ilha do Fogo, fez-se o enquadramento geotectónico do arquipélago e da ilha, foi analisada bibliografia especializada e cartografadas as principais formas e produtos vulcânicos relacionados com a atividade mais recente. Foram também analisados e calculados os parâmetros morfométricos dos cones de escórias, comparando-se os resultados obtidos com os determinados para outras regiões vulcânicas.

Paralelamente, fez-se a pesquisa, revisão e análise de todos os relatos encontrados sobre erupções vulcânicas e sismos históricos ocorridos na ilha do Fogo. Constatou-se que desde o ano de 1500 ocorreram cerca de 31 erupções vulcânicas localizadas no interior da caldeira do Vulcão do Fogo e no Pico do Fogo, cujos estilos eruptivos foram essencialmente havaiano e estromboliano e que tiveram significativos impactos económicos, sociais, ambientais e culturais.

Com base na caracterização da história eruptiva desde 1500 identificaram-se os diversos perigos vulcânicos diretos e indiretos. Os primeiros correspondem às escoadas lávicas e piroclastos de queda de natureza basáltica, e gases vulcânicos. Os segundos são, sobretudo, os sismos que antecederam os vários episódios eruptivos.

Para se efetuar a análise da suscetibilidade ao desenvolvimento de escoadas lávicas, realizaram-se vários ensaios utilizando o modelo de simulação “Grapel 4”, incluído na ferramenta de SIG designada por VORIS, para se determinarem os valores mais adequados para os parâmetros da modelação. Concluiu-se que o modelo numérico de elevação de terreno com células de 50 metros era o mais indicado. As áreas fonte consideradas são as diretamente relacionadas com a distribuição dos centros emissores pré-existentes e com as estruturas tectónicas. Foram assim produzidas duas cartas de suscetibilidade a escoadas lávicas, uma ao nível da ilha e outra considerando apenas as áreas fonte situadas no interior da caldeira. Ambas foram posteriormente utilizadas nos estudos de vulnerabilidades.

No que se refere às vulnerabilidades, analisaram-se os principais elementos expostos, incluindo pessoas, edifícios, estradas e pontos de água para os perigos sísmico e de escoadas lávicas.

Relativamente ao perigo sísmico, tomou-se como área de estudo o concelho de Santa Catarina, uma vez que os sismos mais fortes sentidos na ilha estiveram relacionados com a ocorrência de erupções vulcânicas e é neste município que se localizam os vários centros eruptivos históricos, em particular os das erupções vulcânicas de 1951, 1995 e 2014. Neste contexto, utilizou-se a Escala Macrossísmica Europeia (EMS-98, Grunthal, 1998) para a definição das classes de vulnerabilidade do edificado, tendo-se constatado que 64,6% das habitações se encontra na classe mais vulnerável. Com base na classificação efetuada foram criados vários cenários para sismos com intensidades de grau V a X. A metodologia utilizada para avaliação das vulnerabilidades no que se refere ao perigo sísmico pode ser aplicada aos restantes municípios da ilha do Fogo e a outros municípios do arquipélago.

Foram também analisados os elementos expostos às escoadas lávicas, tendo em consideração as duas cartas de suscetibilidades obtidas. Foram quantificadas as áreas passivas de serem afetadas pelas escoadas lávicas de acordo com o grau de suscetibilidade e observados os elementos expostos a tal perigo que se localizavam no interior dessas áreas, tais como edificado, estradas e pontos de água.

Na fase final da elaboração da tese, mais concretamente a 23 de novembro de 2014, ocorreu uma nova erupção vulcânica na ilha do Fogo, cuja descrição sumária se apresenta. O trabalho realizado durante o decurso da atividade eruptiva permitiu produzir um mapa das escoadas lávicas. Verifica-se, assim, que foi coberta uma área da ordem dos 4,67 km² no interior de Chã das Caldeiras e emitido um volume de lavas de cerca de 5,6 x 10⁷ m³, o que resulta numa taxa média de efusão de 7,2 x 10⁵ m³/d, isto é, 8,4 m³/s. A erupção levou à evacuação da totalidade da população residente em Chã das Caldeiras, tendo-se registado a destruição da maioria do edificado e outras infraestruturas em Portela, Bangaeira, e no ilhéu de Losna e ainda a cobertura de uma significativa área agrícola.

O evento eruptivo de 2014 veio confirmar a importância de se reequacionar o ordenamento do território e o planeamento de emergência na ilha do Fogo, assim como a necessidade de se implementar um programa de monitorização e vigilância sismovulcânica baseado na aplicação de técnicas geofísicas, geodésicas e geoquímicas, cuja análise integrada possibilite o desenvolvimento de um sistema de alerta e aviso eficaz em termos de proteção civil.

ABSTRACT

The Cape Verde archipelago consists of 10 islands and several islets of volcanic origin, being Fogo island the only one where historical volcanism has occurred. In this context, the present work focuses on the assessment of volcanic hazards and associated phenomena on this island, and in its respective implications for emergency and land use planning.

To better understand the volcanism of Fogo island, the archipelago and the island geotectonic setting was characterized, the scientific literature was analysed and the mapping of the main volcanic forms and products related with the most recent activity was performed. Also, the morphometric parameters of cinder cones were analyzed and calculated and the results were compared with those obtained from similar studies for other volcanic regions.

At the same time the research, review and analysis of all available accounts on Fogo island historical volcanic eruptions and earthquakes was performed. It was found that since the year 1500 about 31 volcanic eruptions had occurred inside the caldera of Fogo volcano and at Pico do Fogo whose eruptive styles were essentially Hawaiian and Strombolian causing significant economic, social, environmental and cultural impacts.

Based on the characterization of the post 1500 eruptive history the various direct and indirect volcanic hazards were identified. The first ones correspond to lava flows and pyroclast fallout of basaltic nature and volcanic gases. The latter are mainly earthquakes that preceded several eruptive episodes

In order to perform the analysis the susceptibility to lava flows on Fogo island, several tests were done using the simulation model "Grapel 4", included in the GIS tool VORIS to determine the most appropriate values for the modelling parameters. It was concluded that the most suitable numerical model of terrain elevation was the one with cells of 50 meters. The source areas defined are those directly related to the distribution of pre-existing eruptive centres and tectonic structures. Two susceptibility maps of lava flows were produced, one at the island scale and another based only in the source areas located within the caldera. Both were later used for vulnerability studies.

Regarding the vulnerability to seismic and lava flows hazard the major exposed elements, including people, buildings, roads and water sources for seismic hazard and lava flows were analysed.

With regard to seismic hazard the municipality of Santa Catarina was taken as case study once the strongest earthquakes felt on the island were related to the occurrence of volcanic eruptions and also, many of the historical eruptive centres in particularly the ones of 1951, 1995 and 2014 eruptions. The European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) was applied for the definition of building vulnerability classes. It was found that 64.6% of the dwellings belong to the most vulnerable class. Based on the vulnerability classification established several scenarios were created for earthquakes with intensities V to X. The methodology used for building vulnerability assesment in relation to seismic hazard can be applied to other municipalities of the island of Fogo as well of the archipelago.

During the final stage of the development of this study the volcanic eruption of November 23, 2014 took place and some of the eruption observation and follow-up results and the experience lived at Fogo island are reported.

The exposed elements to lava flows were also evaluated taking into account the two susceptibilities maps that were produced. The possible areas to be affected by lava flows were quantified according to the degree of susceptibility and the exposed elements to such hazard located within these areas were observed, such as buildings, roads and water sources.

In the final stage of this thesis, more precisely on November 23, 2014, a new volcanic eruption started on the Fogo island turning still possible to present a brief description of it. The work done during the ongoing of the eruptive activity allowed the production of the lava flows inundation map. Lava flows covered an area in Chã das Caldeiras in the order of 4.67 km². The volume of the emitted lavas was about 5,6 x10⁷ m³, which results in an average effusion rate 7,2 x 10⁵ m³/d, i.e. 8,4 m³/s. The eruption led to the evacuation of the entire inhabitants of Chã das Caldeiras. The majority of buildings and other infrastructures at Portela, Bangaeira, and Ilhéu de Losna were destroyed and a significant area of agricultural land was covered by the lavas.

The 2014 eruptive event confirmed the importance of rethinking the land use and the emergency planning on Fogo island, as well as the need to implement a seismovolcanic monitoring and surveillance programme based on the application of geophysical, geodetic and geochemical techniques whose integrated analysis makes

possible the development of an alert and effective warning system in terms of civil protection.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Antecedentes

O arquipélago de Cabo Verde é constituído por 10 ilhas de origem vulcânica, sendo a ilha do Fogo a única a apresentar erupções históricas. Desde o seu povoamento, que terá ocorrido entre 1462 e 1493, foram registadas cerca de 30 erupções vulcânicas e outros fenómenos associados a vulcanismo.

As erupções vulcânicas, com duração variável desde alguns dias a vários meses, foram essencialmente de natureza havaiana e estromboliana e marcaram fortemente a evolução social, económica e cultural da ilha e das suas gentes. Algumas dessas erupções provocaram mesmo vítimas, como foi o caso do evento de 1847, que em resultado da sismicidade associada causou a morte de uma criança e ferimentos em quatro pessoas.

A escolha de realizar um trabalho sobre a ilha do Fogo e, em particular, a definição de um tema subordinado ao estudo da sua vulcanologia, foi fortemente motivada pela erupção vulcânica de Abril de 1995 que, à época, tive a oportunidade de seguir pelos meios de comunicação social e influenciou a minha decisão de prosseguir estudos universitários através do ingresso no curso de licenciatura em Geologia – Ramo Científico, ministrado pelo Instituto Superior de Educação, uma estrutura agora integrada na Universidade de Cabo Verde.

O trabalho que se apresenta é uma extensão desse percurso académico e só foi possível pela oportunidade criada através do protocolo de cooperação técnica e científica assinado entre o Governo da República de Cabo Verde e o Governo Regional dos Açores, em 2008. Um acordo que, entre outras áreas, abrangeu o domínio da Vulcanologia e me permitiu ingressar no curso de doutoramento da Universidade dos Açores. Aqui, tive igualmente a possibilidade de frequentar a componente curricular do mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, da responsabilidade do Centro de Vulcanologia e Avaliação dos Riscos Vulcânicos (CVARG), facto que se veio a revelar bastante útil para a definição das terminologias e a compreensão de conceitos seguidos por esta escola de Vulcanologia portuguesa. Por seu turno, o tema escolhido para a elaboração da dissertação beneficiou dos estudos desenvolvidos pelo CVARG na ilha do Fogo aquando da erupção vulcânica de

1995, acompanhada no terreno por investigadores e estudantes desta unidade de investigação.

Por uma feliz coincidência temporal, na fase final da redação desta tese, ocorreu mais uma erupção vulcânica na ilha do Fogo, a qual tive o privilégio de seguir praticamente desde o seu início, integrado numa missão científica patrocinada pelo CVARG e pelo CIVISA, mas também de apoio às ações de proteção civil. Durante quase três meses, acompanhei o evoluir da erupção no terreno, vivi o fascínio deste tipo de fenómenos, as angústias das populações afetadas e as dificuldades das autoridades de proteção civil na gestão da crise, o que determinou a decisão de incluir no trabalho um capítulo específico sobre o evento.

1.2. Estudos anteriores

A ilha do Fogo desde sempre despertou atenção dos navegadores que passaram pelas águas cabo-verdianas e têm sido alvo de diversos estudos de carácter científico nos diversos ramos da Geologia.

Uma das primeiras referências aos aspetos físicos da ilha do Fogo data de 1507 e deve-se ao impressor e tradutor germânico “Valentim Fernandes”, também conhecido por Valentim Fernandes Alemão ou Valentim Fernandes da Morávia, no seu trabalho “*Descrição das ilhas Atlânticas*”, reproduzido por Costa (1939) e por Baião (1940).

Datadas do século XVI, XVII e XVIII encontram-se, ainda, várias referências à ilha do Fogo, designadamente ao seu vulcão e respetivas erupções. Estes fenómenos sempre despertaram interesse e admiração dos diversos navegadores, viajantes e piratas que por ali passaram, muitos dos quais deixaram registos em diários de bordo que foram depois publicados em outros tipos de documentos (Gaspar Frutuoso, 1522-1591; Fenner, 1566; Francis Drake, 1589; Mocquet, 1645; André de Faro, 1664 *in* Silveira, 1945; Beauchesne, 1699; Dampier, 1703; Froger, 1715; Frezier, 1716; Beeckman, 1718; Dampier, 1723; Ovington, 1725; Roberts, 1726; Thomas Philips, 1746; Prévost, 1747; Anónimo, 1769-1784; Fleurieu, 1773; Anónimo, 1784; Cliffe, 1825-1882).

No final do século XVIII observou-se uma viragem no que refere aos estudos e relatos das diversas erupções vulcânicas da ilha do Fogo, com o aparecimento de descrições mais completas e detalhadas. Nessa altura o governo português enviou para Cabo Verde, numa missão científica, o naturalista brasileiro João da Silva Feijó, que durante a sua estadia no arquipélago enviou algumas cartas ao ministro da metrópole, onde fez a descrição física das ilhas do Maio, Santiago, Brava e Fogo. Neste contexto, tratou áreas como a mineralogia, a hidrologia e a geomorfologia e efetuou a descrição completa da erupção vulcânica de 1785 ocorrida na ilha do Fogo. Um ano mais tarde, Feijó (1786) descreveu a erupção vulcânica ocorrida nesse ano num trabalho intitulado “*Memória sobre a nova irrupção volcânica do Pico da Ilha do Fogo*”, e em 1797 publicou uma versão corrigida do mesmo trabalho.

No século XIX, vários trabalhos foram apresentados versando diferentes temas que vão desde a simples cronologia dos anos de ocorrência de sismos e erupções vulcânicas até à descrição de alguns desses eventos, entre outras temáticas (Basto, 1800; Castilho, 1836; Chelmicki, 1841; Lopes de Lima, 1844; Vasconcellos, 1847a,b; Sainte-Claire Deville, 1848; Monteiro, 1850; Barreiros, 1852; Pimentel, 1856; Brito Capello, 1857; Valdez, 1864; Abranches, 1877; Lacerda, 1878; Botelho da Costa,

1885; Senna Barcelos, 1899). Um destaque para a obra de Sainte-Claire Deville (1848) que efetuou um estudo geológico da ilha do Fogo, destacando algumas erupções históricas e apresentando as primeiras análises de rochas da ilha.

São vários os trabalhos publicados no século XX que abordaram a geologia, a vulcanologia e a sismicidade de Cabo Verde. Um dos primeiros trabalhos deveu-se a Friedlander (1914) que abordou a geomorfologia e a vulcanologia, apontou diversas datas relativas à ocorrência de erupções históricas e fez referência a alguns produtos vulcânicos. Bebiano (1929) realçou a espetacularidade do vulcão do Fogo, considerando-o como uma das maiores belezas geológicas do mundo e reclamou a situação de abandono em que o mesmo se encontrava quando deveria fazer parte dos manuais escolares tal como acontecia com outros vulcões do mundo. Em 1932, o mesmo autor abordou a geologia da ilha do Fogo no contexto do arquipélago e destacou algumas erupções vulcânicas registadas na ilha.

A geologia, a petrologia, a vulcanologia, a mineralogia, a pedologia e a cartografia foram estudados por Teixeira (1950), Côrrea (1954), Torre de Assunção (1955, 1956 e 1958), Ribeiro (1960), Assunção (1964), Machado (1965a,b), Machado e Assunção (1965), Assunção *et al.* (1967), Assunção (1968), Torre de Assunção e Canilho (1969-1970), Machado (1973), Faria (1974), Serralheiro (1976), Lewis (1982), Carreira (1985), Dinis e Matos (1987), Monteiro Marques (1990), Correia e Costa (1995). Por seu turno, os trabalhos de Miranda (1947), Ferreira (1956), Mendes (1956), Monteiro (1981), Pires e Neves (1981) e Fonseca *et al.* (1995) abordaram, no essencial, a sismicidade registada na ilha do Fogo.

Uma das erupções vulcânicas mais estudadas da ilha do Fogo foi a que ocorreu em 1995. Após o início do evento, a 2 de abril, várias equipas de investigadores portugueses e de outras nacionalidades deslocaram-se à ilha do Fogo com o objetivo de acompanhar a erupção e colaborar com as autoridades cabo-verdianas. Os principais resultados dos estudos então realizados foram apresentados num simpósio científico que decorreu em Lisboa, tendo os trabalhos em causa sido mais tarde publicados num volume que integrou publicações relacionadas com o enquadramento geotectónico do evento (Brum da Silveira *et al.*, 1997a,b; Gaspar *et al.*, 1997; Heleno *et al.*, 1997; Matias *et al.*, 1997; Pereira e Burton, 1997; Heleno e Fonseca, 1999), a caracterização geológica e vulcanológica da erupção (Figueiredo, 1997; Figueiredo *et al.*, 1997; Madeira *et al.*, 1997; Munhá *et al.*, 1997; Silva *et al.*, 1997; Torres *et al.*, 1997a,b; Wallenstein *et al.*, 1997) e o impacto da erupção em termos de saúde pública e danos (Bárber *et al.*, 1997; Bugalho e Espírito Santo, 1997; Correia, 1997; Correia *et*

al., 1997; Ferreira *et al.*, 1997; Lagos Costa, 1997; Le Guern, 1997; Le Guern *et al.*, 1997; Monteiro *et al.*, 1997; Mota Gomes e Rodrigues, 1997; Mota Gomes *et al.*, 1997; Quental e Soares, 1997; Tazieff *et al.*, 1997).

Após a erupção vulcânica de 1995 e o congresso que se realizou sobre a mesma, aumentou o interesse dos cientistas e/ou grupos de investigação no que diz respeito à vulcanologia e aos diversos fenómenos geológicos da ilha do Fogo. Reflexo de tal facto são os inúmeros trabalhos, nas mais diversas áreas, que têm sido publicados desde então (Costa 1998; Day *et al.*, 1999; Heleno da Silva *et al.*, 1999; Heleno e Fonseca, 1999; Mota Gomes, 2000; Amelung e Day, 2002; Andrade *et al.*, 2002; Custódio *et al.*, 2003a,b; Faria, 2003; Fonseca *et al.*, 2003; Heleno, 2003; Madeira *et al.*, 2005; Pereira, 2005; Brum da Silveira, 2006; Heleno *et al.*, 2006a,b; Alfama *et al.*, 2008; Madeira *et al.*, 2008; Olehowski *et al.*, 2008; Rodrigues e Fattori (2008); Foeken *et al.*, 2009; Faria, 2010; Costa, 2011; Hildner *et al.*, 2011; 2012).

1.3. Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação dos perigos vulcânicos da ilha do Fogo, em particular dos perigos vulcânicos e da sismicidade associada, e suas implicações para efeitos de planeamento de emergência e ordenamento do território, numa perspetiva de análise multiriscos. Para se atingir tal objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Efetuar a análise morfoestrutural da ilha;
- Determinar o tipo de erupções que tem caracterizado a ilha do Fogo, incluindo a sua natureza, magnitude e frequência;
- Identificar os perigos vulcânicos e fenómenos associados;
- Identificar e caracterizar os diferentes estilos eruptivos;
- Modelar a progressão de escoadas lávicas para a definição de cenários eruptivos de interesse para o planeamento de emergência e o ordenamento do território;
- Produzir cartas de suscetibilidades às escoadas lávicas;
- Efetuar o estudo das vulnerabilidades à ação sísmica no concelho de Santa Catarina da ilha do Fogo.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho que se apresenta versa sobre os perigos vulcânicos e fenómenos associados na ilha do Fogo e embora inicialmente tenha sido estruturado em seis capítulos, foi depois complementado com a inserção de um último capítulo dedicado à erupção vulcânica de 2014.

No primeiro capítulo deste documento começa-se por fazer o enquadramento do trabalho, tecendo algumas considerações sobre as motivações que conduziram à seleção da área de estudo e do tema a abordar. Posteriormente, apresenta-se uma listagem dos diversos trabalhos publicados sobre a geologia, a cartografia, a vulcanologia e a sismicidade da ilha do Fogo e apresentam-se os objetivos, geral e específicos, inicialmente traçados para o desenvolvimento do estudo.

O segundo capítulo é inteiramente dedicado ao enquadramento geográfico e geológico do arquipélago de Cabo Verde e da ilha do Fogo, descrevendo-se, sumariamente, a respetiva localização geográfica e divisão administrativa, as características meteorológicas que condicionam o estado do tempo na região, a sua origem e enquadramento geotectónico, e a vulcanologia e sismicidade registadas. Por fim, faz-se uma breve referência à geologia e aos recursos hídricos da ilha do Fogo.

O terceiro capítulo é dedicado à análise morfoestrutural da ilha do Fogo, um aparelho vulcânico central, marcado pela presença de uma caldeira que trunca a sua parte superior e no centro da qual se eleva o vulcão cónico do Pico. Neste contexto, analisam-se as formas vulcânicas observadas, onde se destacam, pela quantidade, os cones de escórias e as escoadas lávicas associadas que se desenvolvem quer no interior da caldeira, quer nos flancos do vulcão que constitui a própria ilha. Dá-se igualmente nota da presença de importantes estruturas tectónicas e releva-se a presença de testemunhos de deslizamentos, um dos quais, virado a leste, marcou a evolução geomorfológica da própria ilha e influência hoje o risco vulcanológico ao facilitar a progressão de escoadas lávicas em direção a áreas populacionais.

As erupções históricas registadas na ilha do Fogo desde o seu povoamento até ao início do presente trabalho são apresentadas no quarto capítulo. Apresenta-se uma síntese dos relatos históricos encontrados sobre cada um dos eventos, faz-se referência aos estudos que lhes foram dedicados e faz-se a reinterpretação dos acontecimentos registados.

No quinto capítulo abordam-se os diversos perigos vulcânicos e faz-se o estudo da suscetibilidade a escoadas lávicas na ilha do Fogo. Seguindo metodologias já empregues no estudo de outras regiões vulcânicas e aplicadas a vulcões dos Açores, utiliza-se um modelo computacional para determinar as zonas de maior probabilidade de inundação por escoadas lávicas.

No sexto capítulo faz-se a caracterização dos elementos vulneráveis a fenómenos vulcânicos, incluindo a sismicidade associada. Discutem-se as características gerais da ilha e identificam-se os elementos de vulnerabilidade, discutindo-se o risco associado a erupções vulcânicas e apresentando-se um caso de estudo relativamente à vulnerabilidade dos edificadros à ação sísmica.

No sétimo e último capítulo apresenta-se o testemunho vivido aquando da erupção vulcânica registada na ilha do Fogo em 2014, descrevendo-se o desenvolvimento do episódio desde o seu início no dia 23 de novembro de 2014.