

Avaliação do Controlo Estrutural na Desgaseificação Difusa nas Plataformas Lávicas do Vulcão das Sete Cidades (São Miguel, Açores)

Dissertação de Mestrado

Luciana Patrícia Ferreira

Mestrado em

VULCANOLOGIA E RISCOS GEOLÓGICOS



Avaliação do Controlo Estrutural na Desgaseificação Difusa nas Plataformas Lávicas do Vulcão das Sete Cidades (São Miguel, Açores)

Dissertação de Mestrado

Luciana Patrícia Ferreira

Orientadores

Doutora Rita Lúcio Carmo

Doutorada em Geologia (especialidade de Vulcanologia), Investigadora do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR) da Universidade dos Açores

Doutora Maria de Fátima Batista Viveiros

Doutorada em Geologia (especialidade de Vulcanologia), Professora Associada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade dos Açores

Dissertação de Mestrado submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos

*“A natureza criou o tapete sem fim que recobre a superfície da terra.
Dentro da pelagem desse tapete vivem todos os animais,
respeitosamente. Nenhum o estraga, nenhum o rói,
exceto o homem.”*

Monteiro Lobato

*Aos meus pais e irmãos
e à minha avó dedico.*

ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABELAS.....	V
AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	X

SECÇÃO I

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Nota prévia	2
1.2 Gases vulcânicos e hidrotermais	3
1.3 Tipos de desgaseificação.....	5
1.3.1 Desgaseificação focalizada	6
1.3.2 Desgaseificação difusa.....	6
1.3.2.1 Mecanismos de transporte de gás.....	8
1.3.2.2 Caracterização do dióxido de carbono	10
1.3.2.2.1 Origem do CO ₂	10
1.4 Variabilidade dos valores de fluxo de CO ₂ no solo	12
1.4.1 Interferências instrumentais e metodológicas	12
1.4.2 Efeitos ambientais	14

1.5 Correlação da desgaseificação difusa com estruturas tectónicas	17
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
2.1 Nota prévia	20
2.2 Localização geográfica.....	21
2.3 Caracterização meteorológica e do uso do solo	23
2.4 Enquadramento geodinâmico.....	26
2.5 Enquadramento geológico.....	29
2.5.1 Aspetos gerais	29
2.5.2 Vulcão das Sete Cidades	30
2.5.2.1 Geomorfologia e geologia.....	30
2.5.2.2 Vulcanoestratigrafia e vulcanismo histórico	35
2.5.2.3 Tectónica	41
2.6 Manifestações hidrotermais e zonas de desgaseificação difusa.....	44

SECÇÃO II

3 METODOLOGIA	54
3.1 Nota prévia	54
3.2 Amostragem	55
3.2.1 Fluxo de CO ₂ no solo	55
3.2.1.1 Medições de fluxo de CO ₂ e de temperatura no solo	59
3.2.2 Aquisição de dados tectónicos	66
3.3 Análise dos dados.....	69
3.3.1 Fluxo de CO ₂	69

3.3.1.1 Abordagem Estatística Gráfica (<i>GSA</i>)	69
3.3.1.2 Simulação Sequencial Gaussiana (<i>sGs</i>)	70
3.3.2 Dados tectónicos	75
3.3.3 Perfis de desgaseificação e estruturas tectónicas	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1 Nota prévia	78
4.2 Estatística descritiva	79
4.3 Origem do CO ₂	81
4.4 Pontos de controlo	85
4.5 Distribuição espacial do CO ₂ e da temperatura do solo	88
4.5.1 Plataforma lávica da Ferraria	91
4.5.2 Plataforma lávica dos Mosteiros	103
4.5.3 Risco para a saúde pública	105
4.6 Estimativa da emissão total de CO ₂	106
4.6.1 Emissão de CO ₂ comparada com outras regiões vulcânicas-hidrotermais	108
4.7 Correlação com as estruturas tectónicas	112
CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
BIBLIOGRAFIA E WEBGRAFIA	129
ANEXOS	
ANEXO I – Medições efetuadas em campo na plataforma lávica da Ferraria	A1
ANEXO II – Medições efetuadas em campo na plataforma lávica dos Mosteiros	A19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diferentes tipos de desgaseificação e respetivos gases associados a um sistema vulcânico (adaptado de Fischer e Chiodini, 2015).....	5
Figura 1.2 Distribuição da desgaseificação da Terra e das falhas ativas. Distribuição das emissões de dióxido de carbono (pontos a verde) e falhas ativas com (linhas a magenta) e sem (linhas a azul) componente normal de movimentação (adaptado de Tamburello <i>et al.</i> , 2018).....	18
Figura 2.1 Localização geográfica do Arquipélago dos Açores. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84 (<i>in</i> Marques, 2013).....	21
Figura 2.2 Localização das áreas alvo de estudo na ilha de São Miguel. Os círculos a vermelho e a azul correspondem às plataformas lávicas dos Mosteiros e da Ferraria, respetivamente. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	22
Figura 2.3 Enquadramento tectónico do Arquipélago dos Açores, encontrando-se representadas as principais estruturas morfotectónicas (adaptado de Silva <i>et al.</i> , 2020). Legenda: JTA – Junção Tripla dos Açores; NA – placa Norte-Americana; EU – placa Eurasiática; NU – placa Núbia; CMA – Crista Média Atlântica; FG – Falha Gloria; RT – <i>Rift</i> da Terceira; ZFAG - Zona de Fratura Açore-Gibraltar; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; Fl – Flores; C – Corvo; G – Graciosa; T – Terceira; SJ – São Jorge; FA – Faial; P – Pico; SMG – São Miguel; SMA – Santa Maria. O RT (<i>s.l.</i>) compreende toda a faixa da região dos Açores. Batimetria da região dos Açores de EMODnet Bathymetry Consortium (2018); batimetria e topografia mundiais de The GEBCO_08 Grid; países de ESRI.....	27
Figura 2.4 Sistemas vulcânicos da ilha de São Miguel: (1) Vulcão das Sete Cidades, (2) Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, (3) Vulcão do Fogo, (4) Sistema Vulcânico Fissural do Congro, (5) Vulcão das Furnas, (6) Vulcão da Povoação, (7) Sistema Vulcânico do Nordeste (adaptado de Carmo <i>et al.</i> , 2015).....	30

Figura 2.5 Localização do Vulcão das Sete Cidades na ilha de São Miguel (<i>in</i> Queiroz <i>et al.</i> , 2015).....	31
Figura 2.6 Estruturas vulcânicas principais identificadas no Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Queiroz <i>et al.</i> , 2015).....	32
Figura 2.7 Fotografia aérea da caldeira do Vulcão das Sete Cidades (Fonte: istock). Link: https://www.terre.tv/wp-content/uploads/2022/06/iStock-1207075569-1024x683.jpg.webp	33
Figura 2.8 Fotografia dos restos do cone de tufos dos Mosteiros (gentilmente cedida por Francisca Branco).....	34
Figura 2.9 Localizações dos principais cones de escória, cones de pedra pomes, lagos, fajãs lávicas e erupções submarinas históricas (triângulos) na região do Vulcão das Sete Cidades (<i>in</i> Queiroz <i>et al.</i> , 2008).....	39
Figura 2.10 Principais estruturas tectónicas e vulcânicas do Vulcão das Sete Cidades e respetivo histograma circular de frequências não ponderadas das direções. Legenda: FF – Falha das Feteiras; LVF – Falha da Lomba do Vasco; LF – Falha da Lombinha; LHF – Falha da Lomba dos Homens (adaptado de Carmo <i>et al.</i> , 2015).....	42
Figura 2.11 Locais (pontos vermelhos) onde foram observadas e medidas falhas no Vulcão das Sete Cidades e respetivos histogramas circulares de frequências não ponderadas das direções dos planos de falha (adaptado de Carmo <i>et al.</i> , 2015).....	44
Figura 2.12 Localizações das nascentes termais, das áreas de desgaseificação submarinas, dos poços e dos furos reconhecidos na área de estudo. As coordenadas das nascentes termais, dos furos e do poço foram retiradas do Projeto HYDROVULC (Freire, 2006). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	45
Figura 2.13 Áreas de desgaseificação difusa no solo nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. (a) corresponde ao mapa da concentração de CO ₂ no solo para a plataforma dos Mosteiros (adaptado de Viveiros <i>et al.</i> , 2015) e (b) ao mapa de fluxo de CO ₂ no solo para a Ferraria (adaptado de Lisetti, 2013).....	46
Figura 2.14 Composições isotópicas de δ ² H e de δ ¹⁸ O (‰ vs V-SMOW) para a água termal da Ferraria (triângulo vermelho; projeto INOGAZ); nascentes de água fria (estrela azul) e água do lago (triângulo azul) (Coutinho <i>et al.</i> , 1996); água do mar (quadrado azul); e fluido termal (círculo) (<i>in</i> Carvalho <i>et al.</i> , 2011).....	49

Figura 2.15 Localização dos pontos de água amostrados (pontos) (adaptado de Coutinho <i>et al.</i> , 1996).....	49
Figura 2.16 Mapas do tipo-E relativos ao fluxo de CO ₂ para a Lagoa de Santiago. (A), (B), (C) e (D) dizem respeito às várias amostragens efetuadas em novembro, abril, setembro e dezembro, respetivamente (adaptado de Andrade <i>et al.</i> , 2019).	52
Figura 2.17 Mapa de fluxo de CO ₂ emitido pelas lagoas das Sete Cidades (tamanho da célula = 6 x 6 m) (<i>in</i> Andrade <i>et al.</i> , 2020).....	52
Figura 3.1 Esquema da medição de fluxo de CO ₂ no solo pelo método da câmara de acumulação. Legenda: PDA - conversor analógico-digital; IRGA - detetor de infravermelhos (adaptado de Fischer e Chiodini, 2015).....	56
Figura 3.2 Medição de fluxo de CO ₂ no solo executada na zona da Ferraria (ilha de S. Miguel, Açores), recorrendo ao método da câmara de acumulação.....	59
Figura 3.3 Medição de concentração de gases no interior do poço localizado na plataforma lávica dos Mosteiros (ilha de S. Miguel, Açores).....	60
Figura 3.4 Localização dos perfis de amostragem definidos na plataforma lávica dos Mosteiros. A equidistância vertical das curvas de nível é de 10 m. Legenda: PM – Perfil Mosteiros; FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	62
Figura 3.5 Localização dos pontos de amostragem nas plataformas lávicas (a) da Ferraria e (b) dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades. A equidistância vertical das curvas de nível é de 10 m. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	64
Figura 3.6 Poço antigo, nos Mosteiros, onde terá ocorrido uma morte por inalação de CO ₂ . O círculo a amarelo indica a localização do ponto de controlo e a circunferência a branco o poço referido. As fotografias 1 e 2 apresentam uma aproximação ao poço e o interior do mesmo, respetivamente. Fotografias de 15/11/2023.....	65
Figura 0.7 Localização do afloramento selecionado, contendo falhas, na plataforma lávica da Ferraria. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	68
Figura 0.8 Equipamento utilizado na segunda campanha de campo. À esquerda encontra-se o distanciómetro e à direita a bússola.....	68

Figura 0.9 Esquema utilizado para a aplicação da <i>sGs</i> (adaptado de Viveiros, 2010).....	72
Figura 0.10 Exemplo de um variograma e as suas características principais. Legenda: <i>sill</i> – patamar; <i>range</i> – alcance; <i>nugget</i> – efeito pepita (adaptado de Bohling, 2005).....	74
Figura 0.11 Exemplos de modelos de variogramas teóricos mais utilizados (adaptado de Bohling, 2005).....	74
Figura 3.12 Localização dos perfis de desgaseificação elaborados na área de estudo. A figura (a) refere-se à plataforma lávica da Ferraria e a (b) à plataforma lávica dos Mosteiros. Legenda: PF – Perfil Ferraria; PM – Perfil Mosteiros; FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	77
Figura 4.1 Diagramas de probabilidades dos valores de fluxo de CO ₂ no solo medidos nas plataformas lávicas (a) da Ferraria e (b) dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades. Os valores de fluxo de CO ₂ apresentados em cada um dos diagramas assinalam os limites biogénicos prováveis das populações de cada uma das plataformas amostradas, estimados com base no percentil 95 destas populações.....	82
Figura 4.2 Variação do fluxo de CO ₂ nos pontos de controlo identificados.....	87
Figura 4.3 Ortofotomapa da plataforma lávica da Ferraria, no Vulcão das Sete Cidades, com as classificações estabelecidas com base nos valores de fluxo de CO ₂ no solo dos pontos amostrados. As figuras (a) e (b) demonstram as aproximações efetuadas dos locais assinalados com o retângulo vermelho. O retângulo a preto representa a seleção de valores, conjunto de dados “F1”, que entraram para a aplicação do método. As formas geomorfológicas e as estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo <i>et al.</i> (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	89
Figura 4.4 Ortofotomapa da plataforma lávica dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades, com as classificações estabelecidas com base nos valores de fluxo de CO ₂ no solo dos pontos amostrados. As estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo <i>et al.</i> (2015). A letra “M” representa a <i>DDS</i> identificada na área de estudo. Legenda: FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....	90
Figura 4.5 Histogramas dos logaritmos dos valores (a) de fluxo de CO ₂ no solo e (b) de temperatura do solo medidos na plataforma lávica da Ferraria, conjunto de dados “F1”, no	

Vulcão das Sete Cidades. As linhas a vermelho representam a distribuição Gaussiana teórica.....93

Figura 4.6 | Variogramas experimentais e modelados dos valores (a) de fluxo de CO₂ no solo e (b) de temperatura do solo transformados em distribuição normal para o conjunto de dados “F1”. As linhas a vermelho representam o modelo de variograma utilizado e os círculos a preto simbolizam os variogramas experimentais obtidos dos valores de fluxo de CO₂ no solo e de temperatura do solo transformados em distribuição normal para o conjunto de dados “F1”, respetivamente. Legenda: *sill* – patamar; *range* – alcance; *nugget* – efeito pepita.....93

Figura 4.7 | Mapa do tipo-E relativo ao fluxo de CO₂ no solo para o conjunto de dados “F1”, na plataforma lávica da Ferraria (tamanho do pixel = 1×1 m). As figuras de (a) a (d) demonstram as aproximações efetuadas dos locais assinalados com o retângulo preto. As medições efetuadas na restante parte da estrada e à volta do Pico das Camarinhas e do domo não permitiram efetuar interpolações e são representadas por pontos individuais com cores graduadas. As letras de “A” a “D” representam as DDS identificadas na área de estudo. As estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....95

Figura 4.8 | Mapa do tipo-E para a temperatura no solo considerando o conjunto de dados “F1”, na plataforma lávica da Ferraria (tamanho do pixel = 1×1 m). As medições efetuadas na restante parte da estrada e à volta do Pico das Camarinhas e do domo não permitiram efetuar interpolações e são representadas por pontos individuais com cores graduadas. As estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....96

Figura 4.9 | Mapa de probabilidades para o fluxo de CO₂ no solo para o conjunto de dados “F1”, na plataforma lávica da Ferraria, Vulcão das Sete Cidades (tamanho do pixel = 1×1 m). (a) e (b) representam as aproximações efetuadas nos locais de destaque definidos anteriormente. A escala de cores evidencia a probabilidade do fluxo de CO₂ no solo exceder os 28 g m⁻² d⁻¹. As letras de “A” a “D” representam as DDS identificadas na área de estudo. As estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.....97

- Figura 4.10** | Perfil vulcanoestratigráfico com os pontos 164 e 165 (adaptado de Lisetti, 2013). A linha a vermelho delimita o término da escoada lávica. Os pontos 164 e 165 apresentam um fluxo de CO₂ de 3,55 e 18,52 g m⁻² d⁻¹, respetivamente.....99
- Figura 4.11** | Diagrama de probabilidades dos valores de temperatura no solo medidos na plataforma lávica da Ferraria, no Vulcão das Sete Cidades. O valor de temperatura do solo apresentado no diagrama assinala o limite biogénico provável da população da plataforma amostrada, estimado com base no percentil 95 destas populações.....102
- Figura 4.12** | Diagrama de probabilidades dos valores de temperatura no solo medidos na plataforma lávica dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades. O valor de temperatura do solo apresentado no diagrama assinala o valor correspondente ao ruído de fundo.....104
- Figura 4.13** | Fotografia do interior do poço com as localizações de cada medição de concentração de gás efetuada. Fotografia de 11/02/2024.....105
- Figura 4.14** | Afloramento com falhas observado na plataforma lávica da Ferraria. A figura (a) apresenta a fotografia do afloramento e a (b) a respetiva interpretação efetuada. Nas falhas representadas a linha branca contínua foram medidas as direções magnéticas e as inclinações dos planos de falha, sendo representadas a tracejado os segmentos em que não foi possível observar a sua continuidade. As camadas assinaladas a amarelo e a castanho constituem os depósitos com estratificação entrecruzada (níveis alternados de cinzas, de granulometrias variáveis) e com uma matriz de cinza com clastos, respetivamente, mais visíveis, podendo auxiliar na definição da cinemática de cada falha (marcadores estratigráficos). A forma a verde assinala a vegetação que se encontra no meio das camadas, impedindo a visualização da continuidade das mesmas. A forma a preto representa um filão, muito fraturado, que se encontra no local. A escala mede 1,56 m e encontra-se assinalada pela seta a vermelho.....113
- Figura 4.15** | Análise geométrica das falhas observadas na estação 101 (terminologia estabelecida por Carmo, 2013). A figura (a) refere-se à representação estereográfica no hemisfério inferior da rede de *Schmidt* (diagrama β) e a (b) ao histograma circular de frequências não ponderadas das direções dos planos de falha e dos ângulos de inclinação. Programa *TectonicsFP*[®] (Ortner *et al.*, 2002).....114
- Figura 4.16** | Perfis de desgaseificação de fluxo de CO₂ no solo efetuados nas plataformas lávicas da Ferraria (PF1 a PF4) e dos Mosteiros (PM1 a PM4), no Vulcão das Sete Cidades. A linha a preto, os segmentos de reta a cinzento (contínuos) e a azul (tracejado), e as barras a

vermelho representam, respetivamente, a topografia, as falhas referidas anteriormente, os limites e o dobro dos limites biogénicos para cada área de estudo, e os valores de fluxo de CO₂ no solo. Os perfis PF1 e PF2 foram desenvolvidos considerando o nível do solo (altura).
Legenda: PF – Perfil Ferraria; FF – Falha Ferraria; FPC – Falha do Pico das Camarinhas; PM – Perfil Mosteiros; FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. A localização dos perfis encontra-se ilustrada na figura 3.12.122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Média por mês das variáveis meteorológicas dos microclimas dos Mosteiros e dos Ginetes (adaptado de CLIMATE-DATA.org).....	25
Tabela 2.2 Escala estratigráfica do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Queiroz <i>et al.</i> , 2015).....	37
Tabela 2.3 Parâmetros vulcânicos dos últimos 5.000 anos localizados no interior da caldeira (adaptado de Queiroz <i>et al.</i> , 2008). Ref. – referência.....	38
Tabela 2.4 Inventário dos pontos de águas minerais nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Costa, 2006). Sistema de coordenadas: WGS84.....	47
Tabela 2.5 Composição dos elementos maiores e outros constituintes dos pontos de águas minerais nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Costa, 2006). T. – temperatura; Cond. – condutividade; Alc. – alcalinidade; Ref. – referência.....	47
Tabela 2.6 Composição dos elementos menores e em traço dos pontos de águas minerais nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Costa, 2006). Ref. – referência.....	48
Tabela 3.1 Número de medições e estratégia de amostragem utilizada nas diferentes áreas de estudo. A base de dados assinalada com asterisco (*) resulta do somatório das restantes bases de dados do local. Ref. – referência.....	62
Tabela 4.1 Estatísticas descritivas das variáveis medidas nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades.....	80
Tabela 4.2 Parâmetros estatísticos das populações de fluxo de CO ₂ e intervalos de confiança de 90% da média para as plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades.....	81

Tabela 4.3 Médias de fluxo de CO ₂ no solo medidos, pelo método da câmara de acumulação, em zonas com diferentes tipos de vegetação. Para além da média, também são fornecidos os desvio-padrão e os valores máximo e mínimo de fluxo observados em cada tipo de vegetação.....	84
Tabela 4.4 Medições de diferentes parâmetros nos pontos de controlo das plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. Ref. – referência; PCF – ponto de controlo Ferraria; PCM – ponto de controlo Mosteiros. Sistema de coordenadas: WGS84.....	87
Tabela 4.5 Estatísticas descritivas dos valores de fluxo de CO ₂ no solo e da temperatura do solo do conjunto de dados “F1”, na plataforma lávica da Ferraria, Vulcão das Sete Cidades.....	92
Tabela 4.6 Parâmetros estatísticos das populações de temperatura do solo para a plataforma lávica da Ferraria, no Vulcão das Sete Cidades.....	102
Tabela 4.7 Valores de concentração de gases medidos no poço dos Mosteiros.....	106
Tabela 4.8 Emissão de CO ₂ difuso nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. As estimativas foram baseadas na realização das 100 simulações de <i>sGs</i> e da <i>GSA</i> . A área “M” resultou da soma das áreas de cada perfil. Ref. – referência; Pop. – população; N° - número.....	107
Tabela 4.9 Desgaseificação difusa de CO ₂ emitido de diversas áreas de desgaseificação no mundo. As áreas estão organizadas segundo a emissão de CO ₂ km ⁻²	111
Tabela 4.10 Medições efetuadas na estação 101 (terminologia estabelecida por Carmo, 2013). Ref. – referência.....	113

AGRADECIMENTOS

A realização da presente tese só foi possível graças à colaboração e disponibilidade de diversas pessoas e entidades. Como tal, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a sua elaboração, nomeadamente:

- ao anterior Reitor da Universidade dos Açores, Professor Doutor João Luís Gaspar e à atual Reitora da Universidade dos Açores, Professora Doutora Susana Mira Leal, pela autorização da realização do Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos;

- à Faculdade de Ciências e Tecnologia, por ter sido a minha instituição de acolhimento, onde pude crescer tanto a nível pessoal como profissional;

- ao Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos pelo apoio na execução da tese, nomeadamente pela cedência de material de campo;

- ao anterior Presidente do Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, Professor Doutor Rui Marques, e à atual Presidente, Doutora Gabriela Queiroz, pelo apoio concedido que facilitou a realização deste trabalho;

- às minhas orientadoras, Professora Doutora Fátima Viveiros e Professora Doutora Rita Carmo, por toda a disponibilidade, discussão, sugestões, companheirismo e partilha de conhecimentos que permitiram o enriquecimento deste trabalho, sem elas este trabalho não poderia ter sido possível;

- ao Bruno Medeiros e ao António Cordeiro pelo auxílio no trabalho de campo e pela partilha de conhecimentos;

- ao Professor Doutor Nicolau Wallenstein, pelo incentivo em continuar o Mestrado;

- a todos os meus professores, em especial para aqueles que me lecionaram no Mestrado, por tudo o que aprendi;

- a todos os meus colegas de mestrado, inclusive de outras edições, pela ajuda, amizade e companheirismo demonstrado ao longo de todo o tempo.

- a todos os meus colegas de trabalho, pelo incentivo;

AGRADECIMENTOS

- à Mestre Catarina Goulart e ao Senhor José Medeiros, por todo o apoio com o SIG e na resolução de problemas;
- ao povo dos Mosteiros, pela prontidão em auxiliar e a fornecer autorizações na passagem às suas propriedades.
- à Francisca Branco, pela disponibilização de fotografias da sua autoria.
- à Professora Maria José Aurélio, pela transmissão do seu gosto pela área;
- à minha família, por todo o apoio fornecido, quer a nível emocional como de trabalho, e pela paciência;
- ao meu companheiro, por todo o seu apoio, mesmo nas horas mais difíceis;

RESUMO

No arquipélago dos Açores existem vários locais onde é notória a presença de fenómenos de desgaseificação, bem representados por campos fumarólicos, nascentes termais e de água fria gasocarbónica. A desgaseificação associada a sistemas vulcânicos ativos pode também compreender áreas mais amplas, surgindo de modo difuso e impercetível nas designadas áreas de desgaseificação difusa. Os gases frequentemente associados a estas emanações são o dióxido de carbono (CO_2) e o radão (^{222}Rn).

A desgaseificação difusa ocorre principalmente em zonas de falhas ou fraturas, pelo que estruturas tectónicas como *grabens* ou outras estruturas geológicas distensivas estão geralmente associadas a este tipo de fenómeno, uma vez que facilitam o transporte do gás desde profundidade até à superfície. A libertação destes gases através da superfície pode, por vezes, ser acompanhada de anomalias térmicas que se desenvolvem como resposta à circulação de fluidos.

Os fenómenos de desgaseificação que caracterizam o Vulcão das Sete Cidades (ilha de São Miguel) encontram-se sob a forma de desgaseificação difusa subaérea e submarina e de nascentes termais. A água da nascente termal da Ferraria emerge ao nível do mar, na zona sul do delta lávico, com uma temperatura da ordem dos 60°C e apresenta uma composição cloretada sódica. Outras nascentes localizam-se junto à costa, na fajã lávica dos Mosteiros, cujas características químicas se aproximam às das observadas na Ferraria, mas de temperatura inferior, variando entre os 30 e os 43°C .

No que diz respeito aos valores de emissão de fluxo de CO_2 no solo, medições prévias efetuadas na plataforma lávica da Ferraria sugeriram a presença de CO_2 com origem vulcânica-hidrotermal, tendo sido medidos valores máximos de $355 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Na plataforma dos Mosteiros foram efetuadas medições de concentração de CO_2 no solo, que variaram entre 0 e 22 \% vol. , sugerindo também uma origem profunda para o gás libertado.

O Vulcão das Sete Cidades está afetado por um sistema de fraturas dominante com direção geral NW-SE, claramente relacionado com o regime tectónico regional. No flanco NW do vulcão, as estruturas tectónicas apresentam expressão geomorfológica por escarpa de falha,

estendendo-se desde a zona costeira até ao bordo da caldeira, definindo o designado *Graben* dos Mosteiros. O prolongamento para NW, na zona da fajã lávica dos Mosteiros, é incerto. No que diz respeito à plataforma lávica da Ferraria, as falhas expostas nas arribas apresentam direções ENE-WSW a E-W, compatíveis com a orientação dos alinhamentos vulcânicos presentes naquela área, que podem materializar a presença de fraturas radiais ao vulcão, ou corresponder ao testemunho de falhas oceânicas profundas.

Entre 2022 e 2023 foram realizadas 939 medições de fluxo de CO₂, pelo método da câmara de acumulação, nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades, das quais 585 medições dizem respeito à Ferraria e 354 aos Mosteiros. O fluxo de CO₂ varia entre 0 e 932 g m⁻² d⁻¹ para a fajã lávica da Ferraria e de 0,6 a 145 g m⁻² d⁻¹ para o caso dos Mosteiros. Estas gamas de variação sugerem a presença de diferentes origens (biogénica e/ou vulcano-hidrotermal) para o CO₂ emitido em ambas as áreas de estudo. A distinção entre as duas origens de CO₂ é determinada através da aplicação de uma abordagem gráfica estatística (*GSA*), sugerindo um valor limite biogénico aproximado de cerca de 21 e 35 g m⁻² d⁻¹, respetivamente, para a área de estudo da Ferraria e dos Mosteiros.

A cartografia da emissão difusa de CO₂ para a plataforma lávica da Ferraria foi efetuada através da simulação sequencial Gaussiana (*sGS*). Os mapas de fluxo de CO₂ permitem reconhecer quatro estruturas de desgaseificação difusa (*DDS*) nas proximidades da nascente termal, da pseudocratera, das estruturas tectónicas aflorantes no talude localizado a norte da plataforma lávica e na estrada que dá acesso às termas da Ferraria. Quanto aos Mosteiros, foram definidos perfis associados às principais estruturas tectónicas, identificando-se apenas uma área de desgaseificação anómala, no talude junto ao porto. Em ambas as áreas de estudo, as estruturas de desgaseificação difusa identificadas parecem ser controladas por estruturas tectónicas, essencialmente com características distensivas. De facto, as estruturas tectónicas identificadas na plataforma da Ferraria evidenciam direções ENE-WSW a E-W (253-273°), a inclinar para N e S (≈ de 40 a 90°), e aparentam ser normais, sendo as suas movimentações deduzidas pelo deslocamento de marcadores estratigráficos. No que diz respeito às estruturas presentes nos Mosteiros (Falha da Lombinha e Falha da Lomba dos Homens), estas revelam direções NW-SE (316-323°), inclinando para NE e SW (≈ 65°), também evidenciando componente normal.

As campanhas de fluxo de CO₂ também contemplaram medições de temperatura do solo. Nestas medições, observa-se que a temperatura do solo varia entre 19,4 e 40,2°C na plataforma da Ferraria e entre 14,7 e 30,9°C para os Mosteiros. A análise dos dados de temperatura do solo não permitiu identificar de forma clara a presença de anomalias térmicas em nenhuma das áreas de estudo, pois os valores mais elevados registados na Ferraria parecem resultar da influência da forte insolação sobre a escoada lávica basáltica exposta.

A emissão total de CO₂ dos solos das plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades foi estimada, através do método *GSA*, em cerca de 2,10 t d⁻¹ (área ≈ 0,16 km²), das quais 0,91 e 1,19 t d⁻¹ dizem respeito às fajãs da Ferraria e dos Mosteiros, respetivamente. No que diz respeito à contribuição hidrotermal, esta encontra-se estimada em cerca de 0,3 t d⁻¹ (0,1 t d⁻¹ para a Ferraria e 0,2 t d⁻¹ para os Mosteiros), equivalendo a cerca de 2,5% (0,004 km²) da área amostrada.

Palavras-chave:

Desgaseificação difusa de CO₂; estruturas tectónicas; Vulcão das Sete Cidades.

ABSTRACT

Azores's archipelago is characterized by the presence of several places with degassing phenomena, such as fumarolic fields, thermal springs and cold CO₂-rich springs. Degassing associated with active volcanic systems can also cover wider areas, appearing in a diffuse and unnoticeable way, through the so-called diffuse degassing areas. The gases often associated with these emanations are carbon dioxide (CO₂) and radon (²²²Rn).

Diffuse degassing occurs mainly in fault or fracture zones, so tectonic structures, such as *grabens* or other distensive geological structures are generally associated with this type of phenomenon, as they facilitate the transport of the gas from depth to the surface. Thermal anomalies, which develop due to the circulation of fluids, can sometimes occur also in these areas.

The degassing phenomena that characterize the Sete Cidades Volcano (São Miguel Island) occur as thermal springs, subaerial and submarine diffuse degassing. The water from the Ferraria's thermal spring emerges at sea level, in the southern part of the lava delta, with a temperature around 60°C and a sodium chloride composition. Other springs are also located near the coast, in the Mosteiros's lava platform, whose chemical characteristics are similar to those observed in Ferraria, but with lower temperatures, varying between 30 and 43°C.

In what concerns the soil CO₂ fluxes, previous surveys carried out on Ferraria's lava platform suggested the presence of volcanic-hydrothermal CO₂. Maximum soil CO₂ fluxes were 355 g m⁻² d⁻¹. On Mosteiros's platform, soil CO₂ concentrations ranged between 0 and 22 vol.%, suggesting also a deep-derived origin for the CO₂.

Sete Cidades Volcano is affected by a dominant fracture system with a general NW-SE direction, clearly related to the regional tectonic regime. On the NW flank of the volcano, the tectonic structures are expressed geomorphologically as a fault scarp, extending from the coastal area to the edge of the caldera, defining the so-called Mosteiros *Graben*. The extension to the NW, in the Mosteiros's lava platform, is uncertain. About the Ferraria's lava platform, the faults exposed in the cliffs show ENE-WSW to E-W directions, compatible with the

orientation of the volcanic alignments present in that area, which may materialize the presence of fractures radial to the volcano, or correspond to the testimony of deep oceanic faults.

Between 2022 and 2023, 939 soil CO₂ flux measurements were carried out using the accumulation chamber method on the Sete Cidades lava platforms, of which 585 measurements were done at Ferrara, and 354 at Mosteiros. The soil CO₂ flux varies between 0 and 932 g m⁻² d⁻¹ for Ferrara's lava platform and from 0,6 to 145 g m⁻² d⁻¹ for Mosteiros. These ranges of variation suggest the presence of different origins (biogenic and/or volcanic-hydrothermal) for the CO₂ emitted in both study areas. A graphical statistical approach (*GSA*) infers the existence of different CO₂ origins, with approximate biogenic limit values of around 21 and 35 g m⁻² d⁻¹, respectively, for the Ferrara and Mosteiros study areas.

The diffuse CO₂ map for Ferrara's lava platform was carried out using the sequential Gaussian simulation (*sGs*). Four diffuse degassing structures (*DDS*) were identified, namely in the vicinities of the thermal spring, the pseudocrater, the tectonic structures outcropping on the slope located to the north of the lava platform, and the access road to the Ferrara platform. As for Mosteiros, profiles associated with the main tectonic structures were defined, and only one area of anomalous degassing was identified, on the slope near the harbor. In both study areas, the diffuse degassing structures identified appear to be controlled by tectonic structures, essentially with distensional characteristics. The tectonic structures identified on Ferrara's platform show ENE-WSW to E-W directions (253-273°), inclining to the N and S (≈ 40 to 90°), and appear to be normal. Their movements are deduced by the displacement of stratigraphic markers. In what concerns the Mosteiros' structures (Lombinha Fault and Lomba dos Homens Fault), they show NW-SE directions (316-323°), inclining to NE and SW (≈ 65°), also with a normal component.

The soil CO₂ flux campaigns also included soil temperature measurements, which varied between 19.4 and 40.2°C on the Ferrara's platform, and between 14.7 and 30.9°C in Mosteiros. A clear presence of thermal anomalies was not identified in any of the study areas. The higher values recorded in Ferrara seem to be the result of the influence of strong insolation on the exposed basaltic lava flows.

The total soil CO₂ emission from the Sete Cidades Volcano's lava platforms was estimated, using the *GSA* method, as around 2.10 t d⁻¹ (area ≈ 0.16 km²), of which 0.91 and 1.19 t d⁻¹, respectively, relate to the Ferrara and Mosteiros platforms. The hydrothermal contribution is

estimated at around 0.3 t d^{-1} (0.1 t d^{-1} for Ferraria and 0.2 t d^{-1} for Mosteiros), equivalent to around 2.5% (0.004 km^2) of the sampled area.

Key-words:

CO₂ diffuse degassing; tectonic structures; Sete Cidades Volcano.

SECÇÃO I

INTRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

1 | INTRODUÇÃO

1.1 | Nota prévia

As emissões de gás de sistemas vulcânicos e hidrotermais são os resultados diretos de processos que ocorrem no manto, crosta e hidrosfera. Através da composição química, isotópica e do fluxo de gases vulcânicos, é possível obter informações sobre esses processos, bem como potencialmente identificar precursores de erupções vulcânicas (Fischer e Chiodini, 2015; Lee *et al.*, 2018). Cerca de 70 vulcões entram em erupção por ano a nível global, no entanto, o número de vulcões com desgaseificação passiva (englobando as emissões difusas e focalizadas dos vulcões quiescentes) é ainda pouco conhecido, estimando-se que possa ser cinco a sete vezes superior. Apesar disso, o acesso direto a estas zonas de desgaseificação é facilitado em comparação com o das plumas eruptivas, inclusivamente por razões de segurança. A desgaseificação passiva emite uma média de 90 a 99% do total de voláteis libertados pelos vulcões, sendo a determinação destas emissões umas das etapas mais importantes para avaliar a troca de elementos entre o manto e a superfície (Fischer e Chiodini, 2015). Nos últimos anos as áreas de desgaseificação difusa têm sido alvo de um número crescente de estudos, os quais têm demonstrado que a quantificação dos gases libertados nestas zonas é essencial para compreender os processos de desgaseificação do planeta (Fischer e Aiuppa, 2020).

Considerando os trabalhos desenvolvidos em áreas de desgaseificação, o primeiro capítulo pretende caracterizar os diferentes tipos de desgaseificação associados a um sistema vulcânico, com especial enfoque para a relação com as estruturas tectónicas.

1.2 | Gases vulcânicos e hidrotermais

O termo gás vulcânico é utilizado para emissões que estão relacionadas com a desgaseificação de vulcões, como oposição às emissões observadas em falhas tectónicas. Os gases magmáticos caracterizam-se por serem libertados do magma, podendo ser amostrados em fumarolas, normalmente de alta temperatura, em crateras vulcânicas. Na presença de sistemas hidrotermais alimentados por vulcões, os gases designam-se hidrotermais sendo a sua composição o resultado da interação de gases magmáticos com uma fase líquida (Fischer e Chiodini, 2015).

Os gases vulcânicos e hidrotermais são constituídos por um número restrito de elementos químicos que formam os vários compostos moleculares. Deles fazem parte os elementos maiores, nomeadamente o hidrogénio (H), o carbono (C), o oxigénio (O), o enxofre (S), o azoto (N), alguns halogéneos como o cloro (Cl), o flúor (F) e o bromo (Br), e os elementos menores, pertencentes ao grupo dos gases nobres, de que fazem parte o radão (Rn), o hélio (He), o néon (Ne), o árgon (Ar), o cripton (Kr) e o xénon (Xe). Ainda ocorrem, geralmente associados a fumarolas de elevada temperatura, vestígios de metais, em quantidades traço, tais como o sódio (Na), o vanádio (V), o crómio (Cr), o bismuto (Bi), o cobre (Cu), o zinco (Zn) e o ouro (Au) (Allard, 1996; Giggenbach, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Stix e Gaonac'h, 2000). Quanto aos compostos originados por estes elementos, os predominantes são a água (H₂O, 30 – 90 mol.%), o dióxido de carbono (CO₂, 5 – 40 mol.%), o dióxido de enxofre (SO₂, 5 – 50 mol. %), o sulfureto de hidrogénio (H₂S, < 2 mol. %), o hidrogénio molecular (H₂, < 2 mol. %) e o monóxido de carbono (CO, < 0,5 mol. %), sendo a H₂O e o CO₂ os componentes voláteis mais importantes (Hansell e Oppenheimer, 2004; Burgisser e Degruyter, 2015; Williams-Jones e Rymer, 2015; Werner *et al.*, 2019).

A composição química e isotópica dos gases vulcânicos e hidrotermais no líquido magmático apresenta uma variabilidade significativa e depende essencialmente de fatores relacionados com a tipologia do vulcão, o estado da atividade vulcânica, como as condições termodinâmicas (pressão e temperatura), a composição química das fontes magmáticas e as diferenças de solubilidade dos vários constituintes gasosos nos líquidos silicatados, cuja sequência de aumento de solubilidade apresenta-se como: CO₂ < Ar < He < H₂ < SO₂ < H₂O

$< \text{HCl} < \text{HF}$. Devido à sua baixa solubilidade nos líquidos silicatados, o CO_2 encontra-se associado às primeiras fases de desgaseificação magmática, aspecto essencial durante os períodos pré-eruptivos, pois pode ser um relevante precursor ao libertar-se primeiro que os restantes voláteis (*e.g.* Baubron *et al.*, 1991; Allard, 1996; Giggenbach, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Fischer e Chiodini, 2015; Williams-Jones e Rymer, 2015).

Os compostos voláteis constituem a força motriz das erupções vulcânicas (Allard, 1996) e revelam ainda um papel essencial nos processos vulcânicos, já que condicionam não só o comportamento dos mesmos nos reservatórios, como também as propriedades físicas do magma (densidade, viscosidade e temperatura) (Edmonds e Wallace, 2017). Desta forma, magmas mais evoluídos, enriquecidos em gases, estão associados a erupções mais energéticas/explosivas (Delmelle e Stix, 2000; Pistolesi *et al.*, 2021; Geshi *et al.*, 2022).

São vários os fatores que interferem com a composição magmática original dos gases e apenas uma pequena percentagem da composição do gás inicial é observada à superfície, na forma de gás vulcânico. Durante a ascensão magmática, os gases presentes no magma podem sofrer reequilíbrios devido às variações de pressão e temperatura, ou pela adição de novos gases, resultantes da interação com outros sistemas circundantes como rochas encaixantes, reservatórios de águas superficiais (água meteórica ou sistemas hidrotermais), ou ainda interações entre a biosfera/atmosfera (Shimoike e Notsu, 2000), provocando alterações na sua composição (Allard, 1996; Giggenbach, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Lee *et al.*, 2018).

Os gases vulcânicos e magmáticos possuem na sua constituição elevadas concentrações de SO_2 , cloreto de hidrogénio (HCl), fluoreto de hidrogénio (HF) e CO. Durante o processo de infiltração nos aquíferos hidrotermais, os gases magmáticos sofrem alterações na sua constituição devido à interação com a água, convertendo-se em gases hidrotermais. Estes gases hidrotermais, para além de serem mais ricos em H_2O e empobrecidos nos componentes ácidos mais solúveis em água (*e.g.* Moune *et al.*, 2022 e referências nele citadas), ainda contêm metano (CH_4) e H_2S , sendo este último o resultado da reação do SO_2 com a água líquida, modificando a razão $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ original (Giggenbach, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Fischer e Chiodini, 2015; Werner *et al.*, 2019). Além disso, a infiltração destes componentes ácidos nos aquíferos promove a alteração ácida das rochas hospedeiras, o que, por sua vez, gera reações químicas complexas e efeitos de tamponamento durante outras interações gás-rocha (Moretti e Stefánsson, 2020).

1.3 | Tipos de desgaseificação

Nos magmas encontram-se dissolvidas diversas espécies gasosas, em concentrações variáveis, e que são libertadas para a atmosfera, não só nos períodos de atividade eruptiva de um vulcão, mas também nos períodos de dormência/repouso (Chiodini *et al.*, 1998; Delmelle e Stix, 2000; Hernández *et al.*, 2012), podendo surgir à superfície de forma focalizada e visível, em plumas eruptivas, bolhas em lagos de lava, fumarolas e lagos ácidos, ou de forma difusa e impercetível, através dos solos, de lagos, e de nascentes termais ou de água fria gasocarbónica (Allard, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Ferreira, 2000; Stix e Gaonac'h, 2000; Viveiros, 2003; Camarda *et al.*, 2019; Werner *et al.*, 2019; Fischer e Aiuppa, 2020; Jentsch *et al.*, 2021) (Fig. 1.1).

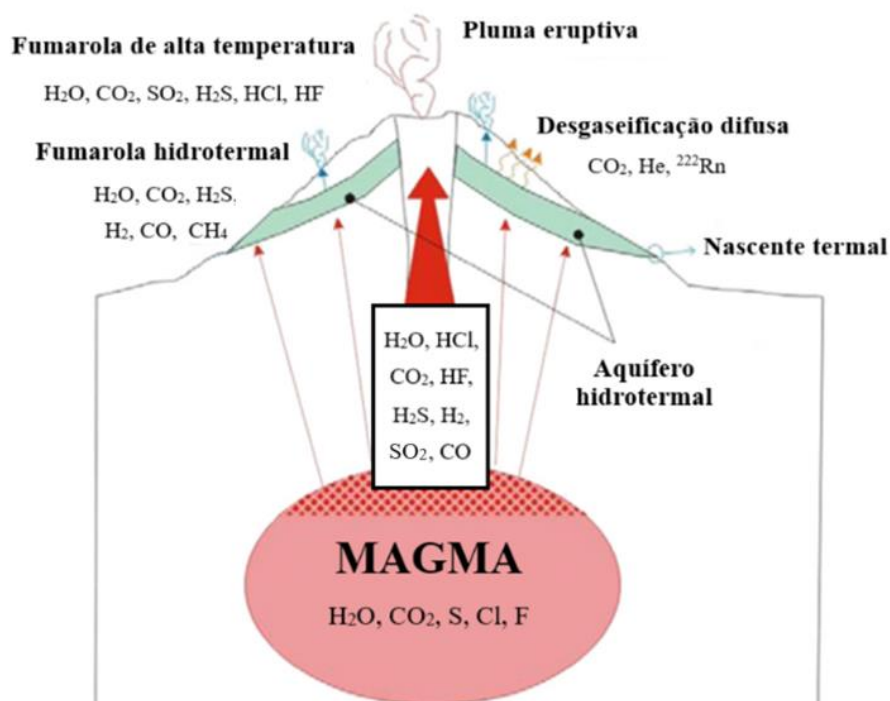


Figura 3.1 | Diferentes tipos de desgaseificação e respetivos gases associados a um sistema vulcânico (adaptado de Fischer e Chiodini, 2015).

1.3.1 | Desgaseificação focalizada

A desgaseificação focalizada manifesta-se em áreas bem definidas e caracteriza-se por emissões gasosas que ocorrem de forma concentrada e visível. Este tipo de desgaseificação é geralmente observado em crateras de vulcões ativos, na forma de plumas vulcânicas, assinalando a presença de magma a maiores profundidades, e estão-lhe associados, normalmente, gases de natureza ácida a elevadas temperaturas, como o SO₂, o HCl e o HF (Allard, 1996; Stix e Gaonac'h, 2000; Fischer e Aiuppa, 2020).

As fumarolas também correspondem a zonas de desgaseificação focalizada. As fumarolas podem ser classificadas como sendo de elevada ou de baixa temperatura e revelam uma composição química significativamente diferente, caracterizando-se estas últimas por serem enriquecidas em CO₂, pobres em HCl, apresentarem uma baixa razão SO₂/H₂S e possuírem CH₄ e CO. As fumarolas de baixa temperatura estão relacionadas com a presença de um sistema hidrotermal que surge frequentemente nestas emissões (Delmelle e Stix, 2000; Fischer e Aiuppa, 2020).

1.3.2 | Desgaseificação difusa

A desgaseificação difusa caracteriza-se por emissões gasosas que ocorrem de forma contínua e impercetível, inclusive em períodos não eruptivos, através da superfície dos aparelhos vulcânicos (Allard *et al.*, 1991; Werner *et al.*, 2019; Fischer e Aiuppa, 2020 e referências nele citadas). Este tipo de emanação ocorre normalmente a temperaturas mais próximas das do meio envolvente e encontra-se geralmente associado a zonas de vulcanismo ativo ou dormente e a zonas de falhas e fraturas, locais permeáveis para a ascensão dos voláteis até à superfície (Chiodini *et al.*, 1998; Delmelle e Stix, 2000; Stix e Gaonac'h, 2000; Williams-Jones e Rymer, 2000; Aiuppa *et al.*, 2004; Mazot *et al.*, 2011). Os gases podem percolar através dos poros existentes no solo ou encontrar-se dissolvidos em águas de nascentes termais e em águas gasocarbónicas (Allard, 1996; Delmelle e Stix, 2000). Associados a este tipo de desgaseificação estão os gases considerados não ácidos/reativos (com solubilidade reduzida),

tais como o CO₂, o H₂, o He e o radão (²²²Rn) (Allard, 1996; Delmelle e Stix, 2000; Chiodini *et al.*, 2001). A acompanhar a libertação destes gases através dos solos reconhecem-se, por vezes, anomalias térmicas, que se desenvolvem como resposta à circulação de gases magmáticos, calor e água em vulcões ativos, e que permitem monitorizar e compreender a dinâmica de arrefecimento ou de aquecimento dos sistemas vulcânicos (*e.g.* Allard, 1996; Chiodini *et al.*, 2005; Marcos, 2006; Werner *et al.*, 2008; Bloomberg *et al.*, 2014; Tamburello *et al.*, 2018; Collignon *et al.*, 2021).

Os primeiros trabalhos efetuados no domínio da desgaseificação difusa em áreas vulcânicas foram desenvolvidos nos vulcões Etna (Allard *et al.*, 1991) e Vulcano (Baubron *et al.*, 1990). Neles é demonstrado que a quantidade de CO₂ libertada pelos flancos dos vulcões ativos podia apresentar a mesma ordem de magnitude do que a de CO₂ libertado pelas fumarolas e plumas vulcânicas. Estudos recentes revelam que a emissão de CO₂ fumarólico pode até ser inferior à desgaseificação difusa de CO₂ (Werner *et al.*, 2019), como é o caso do Vulcão Ebeko, que liberta cerca de 40 t d⁻¹ a partir de fumarolas e aproximadamente 50 t d⁻¹ nas áreas de desgaseificação difusa (Kotenko *et al.*, 2022).

As aplicações dos estudos efetuados neste domínio podem ser (1) a monitorização de vulcões ativos, (2) a identificação de precursores de atividade sismovulcânica (*e.g.* Cardellini *et al.*, 2017; Epiard *et al.*, 2017; Bini *et al.*, 2019), (3) a cartografia de falhas ativas (*e.g.* Hutchison *et al.*, 2015; Viveiros *et al.*, 2017; Epiard *et al.*, 2017; Hunt *et al.*, 2017; Tamburello *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2019; Daskalopoulou *et al.*, 2019; Lamberti *et al.*, 2019; Camarda *et al.*, 2020; Collignon *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021; Randazzo *et al.*, 2022; Villarroel, 2022; Hutchison *et al.*, 2023; Taussi *et al.*, 2023), (4) a identificação de capturas de CO₂ e a exploração geotérmica (*e.g.* Fischer *et al.*, 2019; Werner *et al.*, 2019), (5) a avaliação do risco para a saúde pública (*e.g.* Viveiros *et al.*, 2009, 2010, 2016; Silva, 2013; Barberi *et al.*, 2019) e, mais recentemente, (6) a avaliação do impacto nas alterações climáticas (*e.g.* Di Martino e Gurrieri, 2022; Sun *et al.*, 2023). Atualmente, a emissão de CO₂ associada à atividade vulcânica subaérea, a uma escala global, está estimada entre cerca de 0,22 e 0,30 Gt por ano, e entre aproximadamente 0,28 e 0,36 Gt por ano, considerando as cristas médio-oceânicas (*Mid Ocean Ridge*, MOR) (Werner *et al.*, 2019), valores inferiores aos publicados previamente por Burton *et al.* (2013) (a estimativa associada à atividade vulcânica subaérea e submarina é de ≈ 0,64 Gt).

1.3.2.1 | Mecanismos de transporte de gás

Apesar de ainda não existir um modelo que explique a totalidade do comportamento dos voláteis na desgaseificação difusa em vulcões (Delmelle e Stix, 2000), vários autores propõem que os mecanismos dominantes no transporte dos gases através dos solos são a difusão e a convecção, controlados pelo gradiente de concentração ou pelo gradiente de pressão, respetivamente (*e.g.* Chiodini *et al.*, 1998; Werner *et al.*, 2000; Viveiros, 2010).

Ao processo que conduz o transporte de espécies químicas numa mistura de vários componentes fisicamente homogéneos sob a influência do gradiente de potencial químico (de uma região com elevada concentração para uma de baixa concentração) dá-se o nome de difusão e expressa-se pela primeira lei de Fick, apresentada na equação 1.1 (*e.g.* Chiodini *et al.*, 1998; Evans *et al.*, 2001; Camarda *et al.*, 2007):

$$\varphi_d = -vD(dC/d\lambda) \quad (1.1)$$

φ_d – Velocidade de difusão por unidade área (cm s^{-1});

v – Coeficiente de porosidade do meio;

D – Coeficiente de difusão ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);

$dC/d\lambda$ – Gradiente de concentração na direção λ .

O mecanismo que caracteriza o transporte de fluidos sob a influência de gradientes de pressão ao longo de uma dada direção entende-se por convecção, ou advecção, e é descrito pela equação que traduz a lei de Darcy (equação 1.2):

$$\varphi_a = (k/\mu)(dP/d\lambda) \quad (1.2)$$

φ_a – Velocidade do fluido por unidade de área (cm s^{-1});

k – Coeficiente de permeabilidade, em unidades darcy [$1 \text{ cm}^2 (\text{s.atm})^{-1}$];

μ – Viscosidade do fluido;

$dP/d\lambda$ – Gradiente de pressão na direção λ .

Considerando que não há sistemas isolados, o transporte de gás em ambientes naturais resulta da atuação em simultâneo destes dois tipos de processos, sendo o fluxo total o somatório das componentes difusiva e convectiva, representado na equação 1.3 (e.g. Chiodini *et al.*, 1998; Camarda *et al.*, 2006):

$$\varphi = -vD(dC/d\lambda) + (k/\mu)(dP/d\lambda) \quad (1.3)$$

Dependendo da gama de valores que o fluxo apresentar, é possível distinguir o tipo de processo predominante. Valores baixos de fluxo de gás estão normalmente associados ao processo de difusão e valores elevados estão relacionados ao de convecção. Também é possível avaliar a origem do processo através da realização de perfis de concentração de CO_2 no solo, já que estes revelam como é que este gás se comporta em profundidade dependendo da tipologia de transporte. Quando são observados gradientes de concentração de CO_2 verticais lineares, os valores de fluxo são baixos e o transporte é dominado por difusão; se são observadas formas curvas, o fluxo de gás é elevado e regista-se a convecção. Para valores muito elevados de fluxo, o transporte é normalmente caracterizado por convecção (Camarda *et al.*, 2007; Viveiros, 2010).

1.3.2.2 | Caracterização do dióxido de carbono

O CO₂ é um gás asfixiante, incolor e inodoro, e caracteriza-se por ser uma das espécies gasosas mais abundantemente libertadas nos magmas e dos fluidos vulcânicos. A sua exsolução precoce, favorecida pela baixa solubilidade deste componente nos magmas silicatados a baixas e médias pressões, e associada à fraca reatividade com as rochas, possibilita estabelecer uma relação entre o seu incremento à superfície e uma possível intrusão magmática num reservatório. A deteção de anomalias à superfície revela-se, por isso, uma ferramenta essencial para a monitorização vulcânica (*e.g.* Allard *et al.*, 1991; Baubron *et al.*, 1991; Allard, 1996; Hernández *et al.*, 2001; Carapezza *et al.*, 2004; Giammanco *et al.*, 2006; Aiuppa *et al.*, 2010; Liuzzo *et al.*, 2013; de Moor *et al.*, 2016; Kotenko *et al.*, 2022).

Por ser um gás asfixiante e mais denso que o ar a condições de pressão e temperatura normais (densidade 1,52 vezes superior à do valor médio do ar atmosférico), um dos principais riscos associados a este volátil resulta da sua tendência em acumular-se em locais topograficamente deprimidos ou em zonas pouco ventiladas, como as divisões inferiores de habitações (*e.g.* Williams-Jones e Rymer, 2015). Estas situações já conduziram a catástrofes com inúmeras fatalidades, como são os casos ocorridos na Indonésia, no Dieng Plateau, em 1979 (Le Guern *et al.*, 1982), na República dos Camarões, no Lago Monoun, em 1984 (Sigurdsson *et al.*, 1987), e no Lago de Nyos, em 1986 (Barberi *et al.*, 1989).

1.3.2.2.1 | Origem do CO₂

As emissões de CO₂ do solo representam uma parte substancial do carbono global emitido para a atmosfera (*e.g.* Burton *et al.*, 2013; Hutchison *et al.*, 2015; Tamburello *et al.*, 2018; Camarda *et al.*, 2020) e podem ter diversas origens. O CO₂ emitido através dos solos em áreas vulcânicas é geralmente produzido pela respiração das plantas e raízes, pelo decaimento oxidativo da matéria orgânica e pela degradação biogénica dos componentes orgânicos (Oertel *et al.*, 2016; Camarda *et al.*, 2020). Apesar da elevada percentagem de CO₂ libertado por esta fonte, nem toda as emissões para a atmosfera são de origem biogénica, podendo surgir da

crosta, do manto terrestre e de corpos magmáticos e/ou da dissolução de rochas carbonatadas existentes na crosta (Irwin e Barnes, 1980; Dasgupta e Hirschmann, 2010; Burton *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016).

O fluxo de CO₂ libertado pelo solo pode apresentar tanto contribuições biogénicas como magmáticas e, por esta razão, é necessário proceder à sua distinção. Esta coexistência de fontes revela-se frequentemente em áreas hidrotermais, traduzindo-se em distribuições estatísticas complexas dos dados devido à mistura de diferentes populações estatísticas, tornando a identificação da contribuição vulcânica hidrotermal um desafio para os investigadores (Chiodini *et al.*, 1998; Viveiros, 2010; Fischer e Chiodini, 2015; Collignon *et al.*, 2021).

A forma mais precisa para determinar as origens do gás consiste em utilizar a composição isotópica do carbono existente no CO₂ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) (Chiodini *et al.*, 2008). Esta técnica tem sido empregue com êxito em inúmeros estudos um pouco por todo o mundo (*e.g.* Chiodini *et al.*, 2008; Viveiros *et al.*, 2010, 2020; Bini *et al.*, 2020; Lamberti *et al.*, 2019).

Os isótopos de carbono mais estáveis encontrados na natureza são o ¹²C e o ¹³C correspondendo a 98,89% e a 1,11%, respetivamente, do carbono da Terra (Nier, 1950 *in* Hoefs, 2004). A terminologia geoquímica mais utilizada para se designar a composição isotópica deste elemento é através dos valores de delta (δ), representando este símbolo a diferença entre os valores padrão e médios (Hoefs, 2004). Para os isótopos de carbono, o valor padrão mais usado diz respeito à formação designada *Pee Dee Belemnite* (PDB), constituindo esta o valor isotópico internacional de referência (Coplen, 1996).

De maneira geral, os valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ variam dependendo de como o CO₂ foi formado, nomeadamente através da exsolução do magma em profundidade ou de processos biológicos no solo. No caso do CO₂ associado aos carbonatos, os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ rondam os 0‰ *vs.* PDB, enquanto que os da matéria orgânica, mais leves, variam de forma geral entre -25 e -14‰ *vs.* PDB (Hoefs, 2004). Quanto aos valores de origem vulcânica/hidrotermal, estes apresentam uma gama de valores normalmente entre os -9 e os -4 ‰ *vs.* PDB (Hoefs, 2004).

A composição isotópica de carbono na biomassa continental varia de acordo com o tipo de plantas presentes, mais especificamente com o tipo de processo fotossintético que cada uma delas executa, podendo as plantas ser classificadas de C3 ou C4. As plantas C4 demonstram valores isotópicos de ¹³C de cerca de -14‰. No que diz respeito às plantas C3, estas apresentam

valores mais leves ($\approx -25\text{‰}$), devido à baixa eficiência que estas plantas têm em fixar este isótopo (Nakamura *et al.*, 1990; Albarède, 2003; Hoefs, 2004).

O carbono do ar atmosférico apresenta uma composição de $\delta^{13}\text{C}$ a variar entre -8‰ e -7‰ (Albarède, 2003). Relativamente ao carbono presente associado ao manto, foi reconhecido um intervalo de valores entre -9 e -4‰ (Albarède, 2003; Hoefs, 2004).

1.4 | Variabilidade dos valores de fluxo de CO_2 no solo

As medições de fluxo de CO_2 no solo podem apresentar variabilidade, podendo esta estar correlacionada com a metodologia de medição do gás (colocação da câmara de acumulação no solo, características do equipamento, operadores diferentes) e/ou com os parâmetros de superfície e de profundidade que possam influenciar na libertação do gás, tais como as propriedades físicas do meio (*e.g.* porosidade, permeabilidade), a respiração biológica dos solos e os parâmetros meteorológicos (*e.g.* pressão atmosférica, temperatura, direção e velocidade do vento) (Hinkle, 1990; Gerlach *et al.*, 2001; Lewicki *et al.*, 2005). A combinação de todos estes fatores pode causar diferenças significativas durante, e entre, campanhas de fluxo de CO_2 .

1.4.1 | Interferências instrumentais e metodológicas

A variabilidade dos valores de fluxo de CO_2 pode ocorrer durante a fase de amostragem devido (1) às características e precisão dos analisadores de gás, (2) às diferenças nas metodologias de amostragem aplicadas e (3) à experiência do operador (Viveiros, 2010).

Os instrumentos utilizados podem ser os responsáveis por divergências nos valores de fluxo, uma vez que a utilização de diferentes instrumentos (com detetores distintos, por exemplo) podem causar variabilidade. Para que tal não aconteça, os instrumentos necessitam de ser calibrados, testados e comparados antes de cada campanha (Viveiros, 2010).

O método da câmara de acumulação constitui um dos métodos mais utilizados nas investigações de fluxo de CO₂ vulcânico e hidrotermal, providenciando uma medição simples e rápida. Apesar disso, ações como a colocação da câmara na superfície do solo podem modificar o fluxo de gás na sua taxa de libertação natural. Assim sendo, as câmaras podem perturbar o fluxo de CO₂ (1) causando variações na pressão do ar no interior da câmara, (2) modificando o gradiente de concentração de CO₂ através da interface solo-ar, (3) desviando o fluxo de gás à volta da câmara e (4) provocando uma acumulação de vapor de água dentro da câmara (Welles *et al.*, 2001; Evans *et al.*, 2001; Lewicki *et al.*, 2005). A fim de se assegurar uma adequada vedação entre a câmara e o solo e atenuar as contribuições atmosféricas na medição, alguns autores (Gerlach *et al.*, 2001; Lewicki *et al.*, 2005) defendem a inserção de um “colar” no solo onde a câmara assenta alguns autores pode ser necessário a inserção de um “colar” no solo onde a câmara assenta.

A experiência do operador é outro fator importante. Na tentativa de caracterizar a variabilidade natural de fluxo de CO₂, o operador pode deparar-se com dificuldades em selecionar a curva CO₂-tempo mais representativa, podendo resultar em diferenças significativas (Lewicki *et al.*, 2005). Nesta sequência, trabalhos recentes (Lamberti *et al.*, submetido) revelam a necessidade de efetuar medições comparativas entre diferentes equipas que possam estar a realizar amostragens numa determinada área. A reprodutibilidade dos valores de fluxo utilizando o método da câmara de acumulação foi estimada em $\approx 10\%$ para fluxos de CO₂ entre os 10 e os 10.000 g m⁻² d⁻¹ (Chiodini *et al.*, 1998) e a incerteza aumentou para $\pm 12\%$ e $\pm 24\%$, respetivamente, para medições em áreas em que os valores de fluxo de CO₂ no solo são médios e baixos (Carapezza e Granieri, 2004).

Para além da observada durante a fase de amostragem, a variabilidade também pode estar associada à fase de tratamento dos dados, nomeadamente às técnicas estatísticas aplicadas aos dados. A aplicação de diferentes métodos ao mesmo conjunto de dados pode resultar em variabilidade, e por isso a seleção do método de interpolação a utilizar é de particular importância (*e.g.* Lewicki *et al.*, 2005). Por exemplo, o método de interpolação *kriging* produz efeitos de suavização nos valores extremos, modificando assim os valores obtidos numa dada zona. O recurso a simulação Gaussiana sequencial permite, de certa forma, avaliar a variabilidade dos métodos utilizados e, conseqüentemente, aumentando a variabilidade dos valores (Cardellini *et al.*, 2003).

1.4.2 | Efeitos ambientais

Apesar de se verificar variabilidade relacionada com as metodologias selecionadas e as incertezas instrumentais, os fatores externos também podem interferir significativamente com o fluxo de CO₂ no solo. Os principais fatores externos que podem influenciar o fluxo são as propriedades físicas do meio (*e.g.* permeabilidade, porosidade), os mecanismos de transporte de gás, a respiração e a humidade do solo, e os parâmetros atmosféricos (*e.g.* pressão atmosférica, temperatura do ar, precipitação, velocidade e direção do vento) (*e.g.* Granieri *et al.*, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2008, 2015, 2020; Camarda *et al.*, 2019; Girault *et al.*, 2022; Kotenko *et al.*, 2022; Villarroel, 2022; Chao *et al.*, 2022).

As propriedades físicas do solo podem ter impactes significativos no comportamento dos fluidos, já que o tipo de solo afeta a quantidade de poros e a humidade presente no solo, influenciando diretamente nos processos de desgaseificação (Hinkle, 1990). Estudos recentes (*e.g.* Bini *et al.*, 2020; Chao *et al.*, 2022) revelam a necessidade de considerar diferenças nas propriedades do solo durante a monitorização dos dados sempre que se quiser inferir as condições do sistema em profundidade.

Muitos dos trabalhos efetuados em áreas de desgaseificação difusa mostram que os parâmetros atmosféricos, como a pressão atmosférica, a temperatura do ar (dependendo do local), a precipitação, a velocidade e a direção do vento são os fatores que mais influenciam no fluxo de CO₂ (*e.g.* Granieri *et al.*, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2008; Camarda *et al.*, 2017), induzindo variações de até três ordens de magnitude. Estes fatores influenciam diretamente a emissão de CO₂ através da produção de fluxo forçado, ou indiretamente através da indução de alterações nas características físicas do solo (Camarda *et al.*, 2019). Os primeiros estudos que estabeleceram relações entre o CO₂ do solo e as condições meteorológicas foram realizados com o CO₂ biogénico (*e.g.* Witkamp, 1969), sendo posteriormente aplicados ao CO₂ de origem profunda e correlacionados com os fatores externos na década de 90 (*e.g.* Hinkle, 1990, 1994; Chiodini *et al.*, 1998). Após esse período, foram desenvolvidos vários trabalhos em diversas zonas de desgaseificação difusa (*e.g.* Viveiros *et al.*, 2008, 2014, 2015; Camarda *et al.*, 2019; Morita *et al.*, 2019; Pérez *et al.*, 2022) que demonstraram que as variáveis ambientais podem influenciar até cerca de 50% a libertação de gás do solo (*e.g.* Oliveira *et al.*, 2018).

O efeito da pressão barométrica, mais conhecido por efeito de bombeamento (*pumping effect*), possui um papel essencial na libertação de espécies gasosas de meios porosos fraturados para a atmosfera (Witkamp, 1969; Mourzenko *et al.*, 2014). Nesse tipo de meios, as fraturas aí existentes funcionam geralmente como passagens de gás; durante as flutuações de pressão atmosférica aumentam significativamente a amplitude e a irregularidade dos movimentos verticais (Nilson *et al.*, 1991; Auer *et al.*, 1996; Mourzenko *et al.*, 2014; Bourret *et al.*, 2019). Em condições de pressões atmosféricas elevadas, o ar atmosférico pressiona a interface com o solo, movendo-se para a zona vadosa e inibindo o escape dos gases do solo. Em contraste, em períodos de baixas pressões barométricas, o fluxo de gás a partir do solo aumenta, já que a pressão sobre a superfície é rapidamente reduzida e o gás do solo, oriundo dos espaços dos poros, flui para a atmosfera a fim de restaurar o equilíbrio (Neeper e Stauffer, 2005, 2012; Viveiros *et al.*, 2015; Bourret *et al.*, 2019).

Para além da pressão barométrica, variáveis como a precipitação, a queda de neve e a temperatura do solo e do ar também condicionam fortemente a libertação dos gases no solo (*e.g.* Chiodini *et al.*, 1998; Granieri *et al.*, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2008; Carapezza *et al.*, 2009; Rinaldi *et al.*, 2012; Boudoire *et al.* 2017; Gasparini, 2021). Jentsch *et al.* (2021) evidencia que a temperatura do solo pode ter uma correlação positiva com o fluxo de CO₂, reforçando que as temperaturas do solo podem explicar alguma da variação que ocorre em zonas de desgaseificação difusa.

A variabilidade também pode estar associada, por exemplo, ao vento. A velocidade e a direção do vento podem apresentar grandes flutuações em escalas de tempo relativamente curtas (segundos a minutos), facto que não se observa em fatores como a pressão atmosférica e a temperatura, que demonstram o mesmo tipo de flutuações em escalas de tempo diurnas e mais longas. O fluxo de CO₂ pode responder rapidamente às mudanças na velocidade e direção do vento, sendo capaz de explicar parcialmente as grandes variações observadas no fluxo ao longo de um período relativamente curto (Lewicki *et al.*, 2005, 2007; Viveiros *et al.*, 2008). Levintal *et al.* (2019) evidenciou a correlação positiva entre o fluxo de CO₂ e a velocidade do vento e explorou a magnitude do transporte induzido pelo vento através da velocidade média do vento e da permeabilidade do solo. Os ventos orográficos locais também devem ser considerados, uma vez que estes foram responsáveis pelas mudanças diurnas que ocorreram no

fluxo de CO₂ em estações permanentes em Mammoth Mountain no final da década de 90 do século passado (EUA) (McGee *et al.*, 2000).

A influência dos parâmetros ambientais no fluxo de gás varia consoante o local de monitorização (Viveiros *et al.*, 2008; Carapezza *et al.*, 2009), muito embora a interferência das variáveis externas no fluxo de gás num determinado local também possa variar ao longo do tempo (Viveiros, 2010). Assim, é essencial compreender e quantificar as correlações entre os parâmetros ambientais e o fluxo de CO₂ do solo em cada local de monitorização, para poder discriminar entre os efeitos meteorológicos e as alterações nas fontes vulcânicas/hidrotermais de origem profunda (*e.g.* Viveiros *et al.*, 2014; Morita *et al.*, 2019).

O comportamento periódico observado no fluxo de CO₂ está normalmente associado a variações diárias e anuais. As variações diárias e sazonais do fluxo de CO₂ do solo podem derivar da respiração dos solos, em áreas em que o gás tem uma origem biogénica, e estão maioritariamente correlacionadas com os ciclos atmosféricos (*e.g.* Witkamp, 1969). Também foram identificadas variações cíclicas nas séries temporais de ²²²Rn (*e.g.* Steinitz *et al.*, 2007; Richon *et al.*, 2009; Perrier e Girault, 2013; Siino *et al.*, 2019). No entanto, apesar de se reconhecer a influência das condições ambientais no comportamento do fluxo de CO₂ em áreas de origem biogénica, existem apenas alguns estudos na literatura que reportam variações diárias no CO₂ do solo emitido em áreas vulcânicas/hidrotermais (*e.g.* Granieri *et al.*, 2003; Viveiros *et al.*, 2008, 2014; Hernández *et al.*, 2012; Rinaldi *et al.*, 2012; Morita *et al.*, 2019). Morita *et al.* (2019) identificaram a periodicidade que afetava os sinais de fluxo de CO₂ no solo aplicando análise espectral aos dados dos parâmetros ambientais e do fluxo de CO₂ do Vulcão Aso, no Japão. Para além da periodicidade diurna, os ciclos anuais têm sido reconhecidos nos vulcões das Furnas e do Fogo (Açores) e em Solfatara (Vulcano, Itália), sendo os meses mais chuvosos caracterizados por valores de fluxo de CO₂ mais elevados (Viveiros *et al.*, 2008, 2014; Oliveira *et al.*, 2018).

As variações nas emissões de CO₂ no solo podem ser também induzidas devido a alterações no sistema vulcânico ou hidrotermal. Constituem exemplos de áreas onde foram detetadas anomalias de CO₂ associadas a períodos de reativação vulcânica, os vulcões Mammoth Mountain, Long Valley Caldera na Califórnia (EUA) (Farrar *et al.*, 1995); San Miguel, El Salvador (Pérez *et al.*, 2006); Ukinrek Maars, Alasca (EUA) (Evans *et al.*, 2009); o sistema vulcânico El Hierro, nas ilhas Canárias (Melián *et al.*, 2014); Etna (De Gregorio *et al.*, 2014;

De Gregorio e Camarda, 2016), Vulcano (Inguaggiato *et al.*, 2022) e Stromboli (Itália) (Carapezza *et al.*, 2009).

Os fatores ambientais controlam não só os processos mais superficiais, como também os fenômenos mais profundos, no entanto persistem dúvidas sobre a profundidade a que essas influências se fazem sentir (Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2014). A variabilidade associada aos valores de fluxo de CO₂ do solo causada por processos meteorológicos pode encobrir as alterações que ocorrem em profundidade, revelando-se importante a monitorização dos parâmetros atmosféricos e a realização das campanhas de medição em condições meteorológicas estáveis (Gerlach *et al.*, 2001; Cusano *et al.*, 2021). De forma a evitar a influência externa dos parâmetros meteorológicos, é normalmente aplicado um procedimento de filtragem digital e estatística às séries de dados de monitorização, essencialmente quando se tratam de dados de estações permanentes (*e.g.* Granieri *et al.*, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2008, 2015; Liuzzo *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2018; Morita *et al.*, 2019).

1.5 | Correlação da desgaseificação difusa com estruturas tectónicas

A desgaseificação da Terra ocorre preferencialmente em regiões vulcânicas, geotermiais e tectónicas (*e.g.* Cui *et al.*, 2019; Camarda *et al.*, 2020) e é favorecida por fatores como a ascensão magmática, os sistemas de falhas e o aumento da permeabilidade da crosta (*e.g.* Camarda *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021; Taussi *et al.*, 2023). As descontinuidades crustais, zonas onde a permeabilidade é superior à das rochas envolventes, como as falhas ativas e as fraturas, atuam como as principais vias de circulação de gases, permitindo a migração de fluidos, oriundos da crosta profunda e do manto, até à superfície (*e.g.* Granieri *et al.*, 2006; Carapezza *et al.*, 2012; Barberi *et al.*, 2013; Tamburello *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2019; Lamberti *et al.*, 2019; Camarda *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021). As falhas, dependendo do seu estado de atividade e das suas características (*e.g.* propriedades mecânicas das rochas, interações fluido-rocha), podem aumentar ou reduzir a permeabilidade das rochas e do solo. No estado de ativação da falha dá-se o aumento da permeabilidade, ocorrendo a fraturação das rochas (Camarda *et al.*, 2020). Durante este estado, as falhas são mais favoráveis à emissão de gás, originando, em alguns locais, zonas de anomalia de gás nos

solos. Estas zonas são utilizadas como indicadores de características estruturais para a deteção de estruturas tectónicas ocultas (Yang *et al.*, 2021).

São vários os estudos de fluxo de CO₂ que revelam a existência de alinhamentos de fluxo de gás elevados associados a estruturas tectónicas regionais (*e.g.* Baubron *et al.*, 1990; Aiuppa *et al.*, 2004; Werner e Cardellini, 2006; Toutain *et al.*, 2009; Viveiros *et al.*, 2010, 2017; Tamburello *et al.*, 2018). As emissões de CO₂ e as falhas principais encontram-se geralmente concentradas em torno de margens continentais ativas, mais concretamente, em duas regiões principais do globo: (1) leste da Europa central e (2) oeste dos Estados Unidos (Tamburello *et al.*, 2018; Fig. 1.2). As duas áreas mencionadas, para além de coincidirem geograficamente com importantes zonas de sismicidade histórica, são também local de falhas importantes. A semelhança entre a distribuição das emissões de CO₂ e as zonas de sismicidade suporta a relação entre a desgaseificação e a existência de estruturas tectónicas ativas (Barnes, *et al.*, 1978; Tamburello *et al.*, 2018).

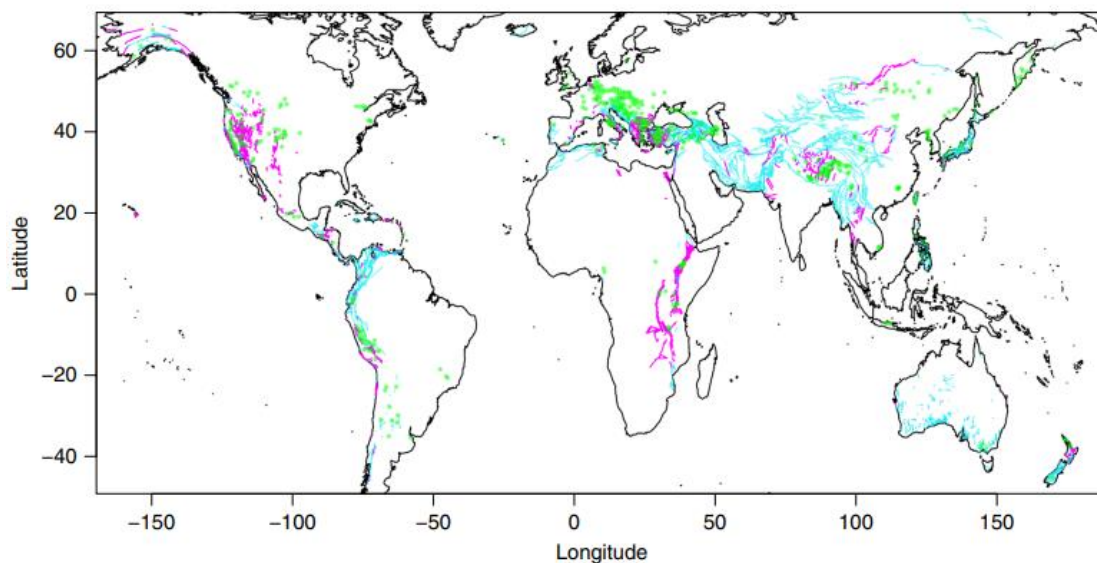


Figura 1.4 | Distribuição da desgaseificação da Terra e das falhas ativas. Distribuição das emissões de dióxido de carbono (pontos a verde) e falhas ativas com (linhas a magenta) e sem (linhas a azul) componente normal de movimentação (adaptado de Tamburello *et al.*, 2018).

As emissões de gás são mais proeminentes em regimes tectónicos distensivos, com falhas ativas com componente de movimentação normal (Fig. 1.2). Tal preferência encontra-se explicada por Tamburello *et al.* (2018), que atribui a esse tipo de regime a capacidade de gerar canais de circulação para os gases profundos a micro e macroescalas. De entre todas as subcategorias de falhas, as que mais apresentam correlação com a libertação de CO₂ são as normais e as de desligamento (Tamburello *et al.*, 2018; Lamberti *et al.*, 2019).

Tal como descrito anteriormente, o reconhecimento de alinhamentos de anomalias geoquímicas pode revelar a presença de locais preferenciais de ascensão de fluidos. Quando a emissão anómala de CO₂ no solo ocorre através de regiões relativamente restritas, denominam-se estruturas de desgaseificação difusa (*difusse degassing structures, DDS*) (Chiodini *et al.*, 2001). Assim como acontece a nível global, a distribuição espacial das *DDS* no contexto tectónico é principalmente influenciada pelos padrões de permeabilidade que, por sua vez, são guiados pela disposição dos lineamentos tectónicos. Os *grabens* são estruturas tectónicas a que estão normalmente associadas as *DDS* (*e.g.* Lamberti *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2019; Collignon *et al.*, 2021; Hutchison *et al.*, 2023), já que são formados por falhas normais que favorecem a libertação de gás.

A relação entre a desgaseificação da Terra e a tectónica foi inicialmente demonstrada por Barnes *et al.* (1978), na Califórnia. Posteriormente, foram efetuados vários estudos a diferentes escalas (local, regional e continental) em regiões vulcânicas (*e.g.* Giammanco *et al.*, 1997; Werner e Cardellini, 2006; Mazot *et al.*, 2014), sísmicas (*e.g.* Irwin e Barnes, 1980; Chiodini *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2009; Uysal *et al.*, 2009; Quattrocchi *et al.*, 2011; Tamburello *et al.*, 2018;), e zonas de falhas (*e.g.* Annunziatellis *et al.*, 2008; Faulkner *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013; Van Der Meer *et al.*, 2014; Dupré *et al.*, 2015), confirmando as relações existentes entre desgaseificação e tectónica.

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 | Nota prévia

No Arquipélago dos Açores existem inúmeros locais onde é notória a presença de fenómenos de desgaseificação, nomeadamente ao nível dos campos fumarólicos e de nascentes termais e de água fria gasocarbónica. Contudo, a desgaseificação associada a sistemas vulcânicos ativos pode também compreender áreas mais amplas, surgindo de modo difuso e impercetível nas designadas áreas de desgaseificação difusa. No Vulcão das Sete Cidades, vulcão central localizado na parte W da ilha de São Miguel, os fenómenos de desgaseificação encontram-se sob a forma de desgaseificação difusa subaérea e submarina e de nascentes termais.

Os primeiros estudos de desgaseificação difusa do solo efetuados no arquipélago (*e.g.* Baubron *et al.*, 1994; Baxter *et al.*, 1999; Oskarsson *et al.*, 1999) foram destinados ao Vulcão das Furnas e revelaram uma grande área de desgaseificação de CO₂ coincidente com a zona de implantação do parque habitacional da freguesia. No Vulcão das Sete Cidades, nomeadamente nas plataformas lávicas, foram efetuados poucos estudos de desgaseificação difusa, sendo apenas reconhecidos um estudo de fluxo de CO₂ no solo na Ferraria (Lisetti, 2013) e um de concentração de CO₂ no solo nos Mosteiros (Viveiros *et al.*, 2015).

A desgaseificação difusa a partir dos solos depende de muitos fatores, tanto intrínsecos (*e.g.* características geológicas do vulcão, estado de atividade), como extrínsecos (*e.g.* condições meteorológicas) ao vulcão. No entanto, é importante salientar que a desgaseificação também depende da presença de estruturas tectónicas na área, sendo, por conseguinte, importante o seu reconhecimento. Este capítulo contará com uma caracterização geral de todos estes aspetos para o Vulcão das Sete Cidades.

2.2 | Localização geográfica

O Arquipélago dos Açores situa-se no Oceano Atlântico Norte, entre os paralelos 39°43'23'' (ponta mais a N da ilha do Corvo) e 36°55'43'' de latitude N (ponta mais a S da ilha de Santa Maria) e dos meridianos 24°46'15'' (ponta mais a E dos ilhéus das Formigas) e 31°16'24'' de longitude W (ponta mais a W da ilha das Flores), a cerca de 1.900 km a W de Portugal Continental. É composto por nove ilhas de origem vulcânica que, no seu conjunto, perfazem 2.350 km² de área, alinhadas diagonalmente segundo uma orientação geral WNW-ESE e dispostas segundo uma faixa com cerca de 630 km de extensão.

Considerando a sua proximidade geográfica, as ilhas encontram-se associadas em três grupos distintos: o Grupo Ocidental, constituído pelas ilhas do Corvo e das Flores; o Grupo Central, formado pelas ilhas Graciosa, Terceira, São Jorge, Faial e Pico; e o Grupo Oriental, do qual fazem parte as ilhas de São Miguel e de Santa Maria (Fig. 2.1).

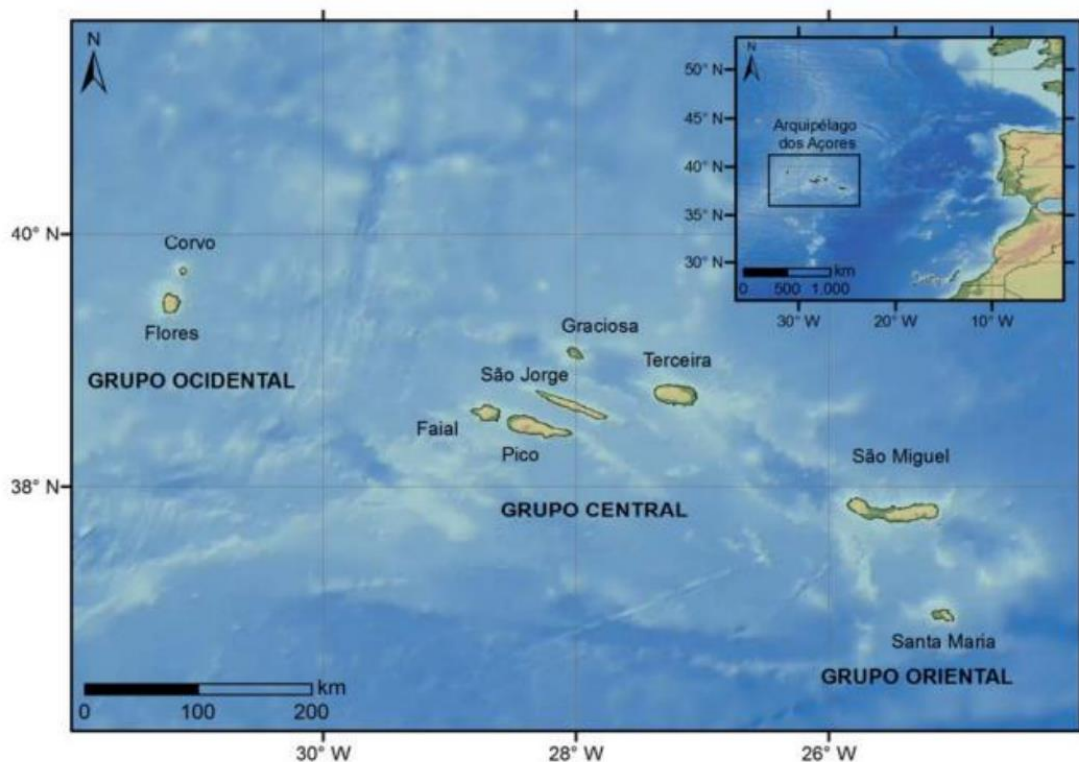


Figura 2.1 | Localização geográfica do Arquipélago dos Açores. Mapa apresentado com coordenadas geográficas, datum WGS84 (in Marques, 2013).

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A ilha de São Miguel (Fig. 2.2) situa-se entre as latitudes 37°42' e 37°54'N e as longitudes 25°51' e 25°08'W e apresenta uma forma aproximadamente retangular, alongada segundo a direção E-W. São Miguel é a maior ilha do arquipélago, com um comprimento máximo de cerca de 64 km e uma largura que varia entre os 8 e os 15 km, abrangendo uma área aproximada de 747 km² e uma altitude máxima de 1.103 m (Pico da Vara). A ilha é composta pelos concelhos de Ponta Delgada, Ribeira Grande, Lagoa, Vila Franca do Campo, Povoação e Nordeste.

As áreas de estudo, sobre a qual foi desenvolvida a presente dissertação, inserem-se na ilha de São Miguel, concelho de Ponta Delgada, nas freguesias dos Mosteiros e dos Ginetes, e correspondem, mais concretamente, às plataformas lávicas dos Mosteiros (37°54'01'' a 37°53'13''N e 25°49'28'' a 25°48'42''W) e da Ferraria (37°51'45'' a 37°51'28''N e 25°51'20'' a 25°50'39''W), respetivamente (Fig. 2.2).

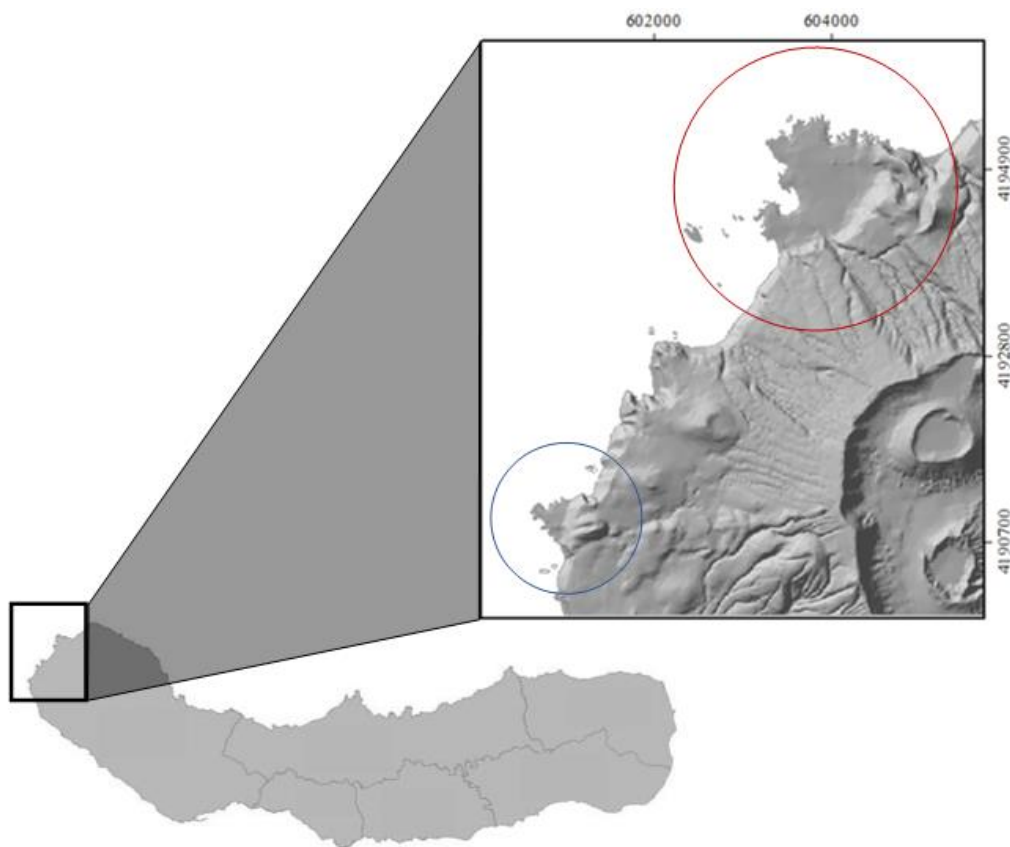


Figura 2.2 | Localização das áreas alvo de estudo na ilha de São Miguel. Os círculos a vermelho e a azul correspondem às plataformas lávicas dos Mosteiros e da Ferraria, respetivamente. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

2.3 | Caracterização meteorológica e do uso do solo

O clima do Arquipélago dos Açores, segundo a classificação de Köppen (*in* AHA-SRAM, 2011), enquadra-se na categoria de climas temperados quentes, sendo o grupo oriental do tipo Csb (clima temperado com verão seco e suave) (IPMA, 2022). O clima é influenciado principalmente pela localização geográfica do arquipélago, uma vez que este se situa em plena bacia do Atlântico Norte, numa zona de transição e de encontro de massas de ar de proveniência tropical e massas de ar mais frio, temperado ou de origem polar. A configuração anticiclónica do Atlântico Norte, mais conhecida por “Anticiclone dos Açores”, é o fator dominante das condições meteorológicas do arquipélago, caracterizando assim o clima da região por amenidade térmica, elevados índices de humidade do ar (normalmente superiores a 70 %), taxas de insolação pouco elevadas, precipitação regular e abundante (por vezes superior a 10 mm), e ventos vigorosos (por vezes superior a 36 km h⁻¹), que acompanham o evoluir dos padrões de circulação atmosférica à escala da bacia do Atlântico Norte (Bettencourt, 1979; Azevedo, 2001; AHA-SRAM, 2011). Para além do clima estabelecido a nível de arquipélago e das variações climáticas observadas de um extremo ao outro do mesmo, foram identificadas também variações espaciais significativas dentro de cada ilha (por ação, por exemplo, da altitude, distância ao mar, geomorfologia da ilha) (Azevedo, 2001; AHA-SRAM, 2011), dando origem a inúmeros microclimas locais. De forma a identificar os microclimas e a justificar o tipo de vegetação presentes na área de estudo, foi efetuada uma descrição mais detalhada das condições meteorológicas nesta zona. A tabela 2.1 demonstra os valores médios de algumas variáveis meteorológicas dos microclimas dos Mosteiros e dos Ginetes.

Nos Mosteiros verifica-se um microclima temperado quente, com temperatura e precipitação média anual a rondar os 17,2°C e os 822 mm, respetivamente, baseadas em 30 anos climatológicos. Ao longo do ano, é verificada uma flutuação nas temperaturas médias de cerca de 7,6°C, sendo agosto o mês com maior temperatura registada (21,7°C) e março o de menor temperatura (14,2°C). No que diz respeito à precipitação, observa-se uma variação de aproximadamente 102 mm entre o mês mais seco (julho; 22 mm) e o mês mais chuvoso (dezembro; 124 mm). O mês com maior humidade relativa registada é o mês de junho, com 80,10%, e o menor é o novembro (73,45%) (CLIMATE-DATA.org).

Como não existem valores específicos para a plataforma da Ferraria, utilizaram-se os correspondentes aos Ginetes, freguesia onde se inclui a Ferraria. A freguesia encontra-se a uma altitude superior em relação aos Mosteiros, e possui um microclima mais ameno e moderado que o anterior, revelando uma temperatura e precipitação média anual de cerca de 17,2°C e de 1.010 mm, respetivamente, para os mesmos anos climatológicos. Igualmente ao que acontece nos Mosteiros, observa-se uma flutuação das temperaturas de aproximadamente 7,6°C entre os meses com maior (agosto; 21,7°C) e menor temperatura (março; 14,2°C). Entre o mês mais seco (julho; 25 mm) e o mais chuvoso (dezembro; 154 mm), verifica-se uma notável variação na precipitação, rondando os 129 mm. O comportamento da humidade relativa nesta freguesia é o mesmo que o ocorrido nos Mosteiros (CLIMATE-DATA.org).

As condições meteorológicas presentes nas áreas de estudo contribuem para o desenvolvimento de culturas nesta região, principalmente ao nível da plataforma dos Mosteiros, sendo esta composta em grande parte por terrenos agrícolas e de pastorícia. Regra geral, estes terrenos concentram-se mais a N e para o interior da freguesia. Para além destes, também são observados alguns complexos habitacionais mais próximos do litoral W e, de forma menos frequente, terrenos abandonados, com vegetação muito densa, a montante. O solo, excluindo os terrenos agrícolas e destinados à pastorícia, revela-se compacto, apresentando algumas escórias mais a montante.

Quanto à Ferraria, por ser uma área estritamente turística, não são observadas habitações ao nível da fajã; o único edifício lá presente corresponde a um antigo hospital termal, recentemente recuperado para fins turísticos (Carvalho *et al.*, 2009, 2011). O solo é essencialmente constituído por escoadas lávicas basálticas e escórias. A vegetação restringe-se a pequenas plantas rasteiras e a algumas árvores de grande porte próximo do parque de estacionamento na plataforma. A montante da Ferraria, próximo aos cones vulcânicos, ainda podem ser encontrados alguns terrenos destinados a pastoreio.

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Tabela 2.1 | Média por mês das variáveis meteorológicas dos microclimas dos Mosteiros e dos Ginetes
(adaptado de CLIMATE-DATA.org).

Mês	Temperatura média (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitação / Chuva (mm)	Humidade (%)	Dias de chuva	Média de horas de sol (h)
01	14,8	13,8	15,8	(1) 87 (2) 111	77	(1) 9 (2) 11	(1) 5,4 (2) 5,2
02	14,2	13,1	15,2	(1) 76 (2) 95	76	(1) 8 (2) 9	(1) 5,9 (2) 5,7
03	14,2	13,0	15,2	(1) 84 (2) 107	75	(1) 8 (2) 9	(1) 6,8 (2) 6,7
04	14,6	13,5	15,8	(1) 64 (2) 78	77	(1) 7 (2) 8	(1) 7,1 (2) 7,0
05	16,2	15,0	17,3	(1) 60 (2) 73	78	(1) 7 (2) 8	(1) 7,9 (2) 7,8
06	18,4	17,1	19,5	(1) 37 (2) 46	80	6	(1) 8,0 (2) 8,1
07	20,5	19,3	21,8	(1) 22 (2) 25	80	4	(1) 8,4 (2) 8,3
08	21,7	20,5	23,0	(1) 36 (2) 43	78	(1) 6 (2) 7	(1) 8,5 (2) 8,3
09	20,9	19,7	22,1	(1) 56 (2) 67	76	(1) 7 (2) 8	(1) 7,9 (2) 7,6
10	18,9	17,8	19,9	(1) 99 (2) 119	76	11	(1) 6,5 (2) 6,4
11	16,7	15,7	17,7	(1) 77 (2) 92	73	9	5,4
12	15,5	14,5	16,5	(1) 124 (2) 154	77	(1) 11 (2) 12	(1) 5,5 (2) 5,3

(1) e (2) correspondem aos valores das variáveis dos Mosteiros e dos Ginetes, respetivamente, que divergem entre si. As variáveis temperatura média, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitação/chuva, humidade e dias de chuva são baseadas em 30 anos climatológicos (1991-2021), enquanto que a variável média de horas de sol corresponde a 20 anos (1999-2019).

2.4 | Enquadramento geodinâmico

As ilhas que constituem o Arquipélago dos Açores estão inseridas num contexto tectónico peculiar de junção tripla (Junção Tripla dos Açores, JTA), com coordenadas aproximadas 39°N e 30°W (Laughton e Whitmarsh, 1974), entre as placas litosféricas Norte-Americana (NA), Eurasiática (EU) e Núbia (NU; Africana) (*e.g.* Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015), e correspondem a estruturas vulcânicas emergentes de uma vasta plataforma submarina, caracterizada por uma batimetria anómala pouco profunda (*e.g.* Miranda *et al.*, 2015), normalmente designada por “Plataforma dos Açores” (PA) (Fig. 2.3). A dinâmica regional é dominada pela presença de importantes sistemas de fraturas, em que se destacam: a Crista Média Atlântica (CMA), cruzando o arquipélago entre os grupos ocidental e central e separando a placa Norte-Americana das restantes; o *Rift* da Terceira (RT), de orientação WNW-ESE, desde a CMA até à ilha de Santa Maria, englobando as ilhas dos Grupos Central e Oriental e separando as placas Eurasiática e Núbia; e a Falha Gloria (FG), a E da PA. O RT e a FG estabelecem o segmento ocidental e central, respetivamente, da Zona de Fratura Açore-Gibraltar (ZFAG). No limite S da PA reconhece-se ainda outra estrutura, de orientação E-W, com expressão entre a CMA até próximo de Santa Maria, que é praticamente assísmica, denominada Zona de Fratura Este dos Açores (ZFEA) (*e.g.* Carmo, 2013; Pacheco *et al.*, 2013).

A Plataforma dos Açores corresponde a uma área elevada de forma aproximadamente triangular, limitada, de grosso modo, pela linha batimétrica 2.000 m (Needham e Francheteau, 1974), abrangendo uma área na ordem dos 5,8 milhões de km². Esta estrutura, assimétrica relativamente à CMA (Carmo, 2013; Marques, 2013), encontra-se limitada a N pela Zona de Fratura *Kurchatov* (latitude 40°30'N) e a S pela ZFEA (latitude 37°N), estendendo-se para E até ao extremo ocidental da FG (longitude 24°W) (Carmo, 2013). Representada como uma zona de deformação difusa e complexa (Fig. 2.3), esta estrutura encontra-se cisalhada por um regime transtensivo direito (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015; Madeira *et al.*, 2015), causado pela diferença das taxas de expansão da CMA, mais elevadas a norte da junção tripla (*e.g.* Fernandes *et al.*, 2003), e pela obliquidade do RT relativamente à direção da expansão (*e.g.* Madeira *et al.*, 2015). Esta estrutura é caracterizada por uma alternância de fossas (ou bacias) e cristas submarinas (ou elevações) que definem vários alinhamentos (Lourenço *et al.*, 1998; Carmo, 2013).

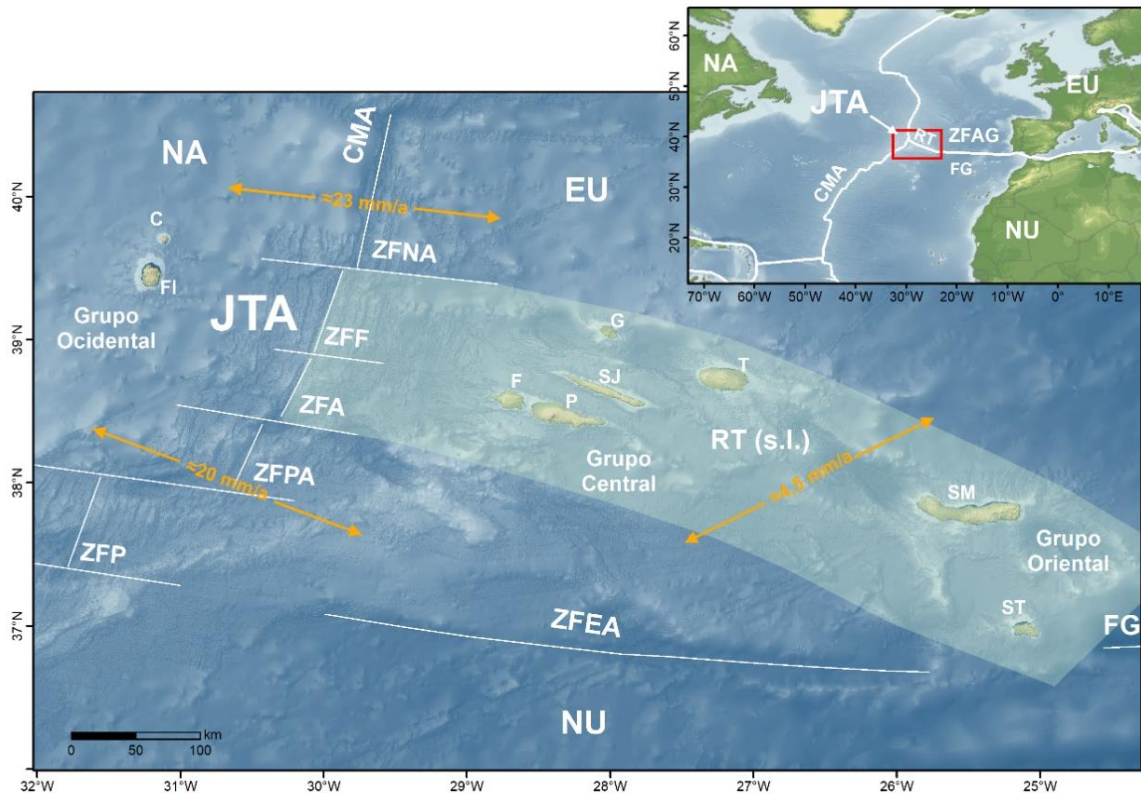


Figura 2.3 | Enquadramento tectónico do Arquipélago dos Açores, encontrando-se representadas as principais estruturas morfo-tectónicas (adaptado de Silva *et al.*, 2020). Legenda: JTA – Junção Tripla dos Açores; NA – placa Norte-Americana; EU – placa Eurasiática; NU – placa Núbia; CMA – Crista Média Atlântica; FG – Falha Gloria; RT – *Rift* da Terceira; ZFAG - Zona de Fratura Açore-Gibraltar; ZFNA – Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFF – Zona de Fratura do Faial; ZFA – Zona de Fratura Açor; ZFPA – Zona de Fratura Princesa Alice; ZFP – Zona de Fratura do Pico; ZFEA – Zona de Fratura Este dos Açores; FI – Flores; C – Corvo; G – Graciosa; T – Terceira; SJ – São Jorge; FA – Faial; P – Pico; SMG – São Miguel; SMA – Santa Maria. O RT (*s.l.*) compreende toda a faixa da região dos Açores. Batimetria da região dos Açores de EMODnet Bathymetry Consortium (2018); batimetria e topografia mundiais de The GEBCO_08 Grid; países de ESRI.

Apesar de não ser totalmente consensual, vários estudos (Gente *et al.*, 2003; Madureira *et al.*, 2005; Silveira *et al.*, 2006) apontam para a Plataforma dos Açores resultar da interação entre uma pluma mantélica e a JTA. Este facto pode ser comprovado por inúmeras evidências, das quais se destacam, a elevada e anormal espessura da crosta oceânica na região, na ordem dos 14 km (Dias *et al.*, 2007), a morfologia da CMA nesta região, a ocorrência de anomalias batimétricas, gravimétricas, sísmicas e geoquímicas, sugerindo que o manto seja enriquecido e possua temperaturas anormalmente elevadas (*e.g.* Cannat *et al.*, 1999; Gente *et al.*, 2003; Madureira *et al.*, 2005; Silveira *et al.*, 2006; Carmo, 2013; Pacheco *et al.*, 2013).

A ZFAG corresponde à fronteira entre as placas Eurasiática e Núbia, estendendo-se desde o Arquipélago dos Açores até à região de Gibraltar. Esta estrutura caracteriza-se pela sua complexidade, sendo possível distinguir três setores principais com orientação, expressão morfológica e regimes tectónicos distintos, representativos das diferentes taxas de expansão a N e a S da JTA (*in* Carmo, 2013). Este movimento relativo entre as duas placas provoca transtensão a ocidente, desligamento puro ao nível do sector central (FG) e transpressão a oriente (*e.g.* Madeira e Ribeiro, 1990; Madeira, 1998). O setor ocidental (direção média 300°) prolonga-se desde a CMA até à extremidade ocidental da FG (longitude 24°30'W) e compreende a região dos grupos Central e Oriental do arquipélago, bem como o RT, sendo limitado a S pela ZFEA (Carmo, 2013).

O RT, de orientação geral WNW-ESE, corresponde, no sentido lato (*s.l.*), à faixa densamente fraturada e vulcanicamente ativa que engloba os grupos Central e Oriental do Arquipélago dos Açores (*e.g.* Carmo, 2013; Pacheco *et al.*, 2013). O nome segue o definido por Machado (1959) para o, alinhamento de bacias, cristas e montes submarinos, compreendendo, de NW para SE, a Bacia Oeste da Graciosa, a ilha Graciosa, a Bacia Este da Graciosa, a ilha Terceira, a Crista Submarina da Terceira, a Fossa Hironnelle, o Banco D. João de Castro, a ilha de São Miguel, a Fossa da Povoação, os ilhéus das Formigas e a Fossa das Formigas. As estruturas tectónicas presentes no RT exibem direções dominantes WNW-ESE, NW-SE, NNW-SSE, NE-SW e N-S (Lourenço *et al.*, 1998; Madeira, 1998), controlando muitas vezes a morfologia das depressões e cristas vulcânicas situadas nessa região. Para além daquelas, também se observa por toda a PA a direção E-W, interpretada como sendo a expressão morfológica de falhas transformantes que cruzam a dorsal na zona dos Açores (Gaspar, 1996; Madeira, 1998). O RT apresenta sismicidade elevada, com mecanismos focais com soluções em desligamento direito com componente normal em planos nodais orientados WNW-ESE a NW-SE, em desligamento esquerdo com componente normal em planos com direção NNW-SSE a N-S, e em falha normal e inversos segundo as mesmas direções (*e.g.* McKenzie, 1972; Udías *et al.*, 1976, 1986; Udías, 1980; Hirn *et al.*, 1980; Grimison e Chen, 1986; Buforn *et al.*, 1988; Miranda *et al.*, 1998; Borges, 2003; Borges *et al.*, 2007, 2008; Matias *et al.*, 2007).

O peculiar enquadramento geotectónico do Arquipélago dos Açores reflete-se na intensa atividade sísmica e vulcânica registada na região (Gaspar *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020), especialmente ao nível da CMA e do RT. Desde o povoamento no século XV, as ilhas açorianas têm sido assoladas por cerca de 28 erupções vulcânicas e 30 sismos destruidores que foram responsáveis por centenas de mortes e danos materiais severos (*e.g.* Weston, 1964; Silveira *et al.*, 2003; Gaspar *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020).

2.5 | Enquadramento geológico

2.5.1 | Aspetos gerais

A ilha de São Miguel situa-se no segmento SE do *Rift* da Terceira, uma das zonas mais importantes dos Açores no que diz respeito à atividade sismovulcânica, e resulta da coalescência de diversos sistemas vulcânicos, alguns dos quais já extintos (*e.g.* Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Carmo *et al.*, 2015). A forma alongada da ilha segundo a direção E-W, deve-se à distribuição dos principais centros eruptivos (*e.g.* Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015 e referências nele citadas).

A ilha é constituída na sua totalidade por cinco edifícios vulcânicos e duas zonas de vulcanismo fissural basáltico (Fig. 2.4) (Pacheco *et al.*, 2013). De entre os vários sistemas ativos que constituem a ilha, contabilizam-se três vulcões poligenéticos quiescentes com caldeira, nomeadamente os vulcões das Sete Cidades, do Fogo e das Furnas, interligados por dois sistemas vulcânicos fissurais, Picos e Congro (*e.g.* Pacheco *et al.*, 2013 e referências nele citadas). O setor oriental da ilha é formado pelos sistemas vulcânicos mais antigos e inativos, o Vulcão da Povoação e o Sistema Vulcânico do Nordeste (*e.g.* Pacheco *et al.*, 2013; Duncan *et al.*, 2015). Os vulcões centrais ativos são caracterizados por produtos resultantes de erupções traquíticas explosivas, subplinianas a plinianas, enquanto que nas zonas fissurais, o vulcanismo é caracterizado por erupções havaianas e/ou estrombolianas, com erupções traquíticas esporádicas (Pacheco *et al.*, 2013).

Na ilha de São Miguel, as estruturas dominantes tendem de NW-SE (N 30-60° W) a WNW-ESE (N 60-80° W), com os dois conjuntos de falhas mergulhando entre 60 a 90° para NE ou para SW. Também se registam, de forma menos frequente e de menor comprimento, falhas de orientação NNW-SSE (N 10-30° W) para N-S, com inclinação entre 60 a 90° para E ou W; NE-SW (N 30-60° E), de mesma inclinação para NW e SE; e E-W, de mesma inclinação para N e S (Carmo *et al.*, 2015).

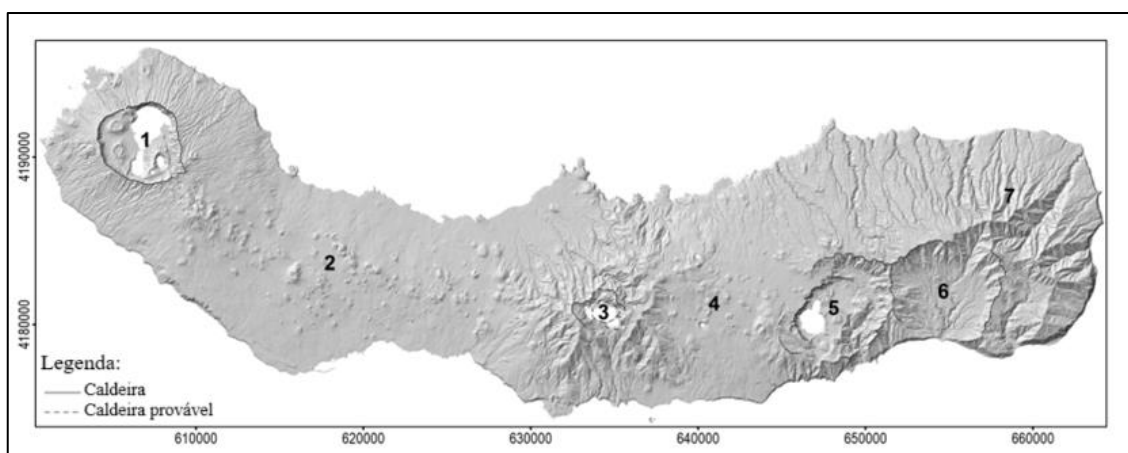


Figura 2.4 | Sistemas vulcânicos da ilha de São Miguel: (1) Vulcão das Sete Cidades, (2) Sistema Vulcânico Fissural dos Picos, (3) Vulcão do Fogo, (4) Sistema Vulcânico Fissural do Congro, (5) Vulcão das Furnas, (6) Vulcão da Povoação, (7) Sistema Vulcânico do Nordeste (adaptado de Carmo *et al.*, 2015).

2.5.2 | Vulcão das Sete Cidades

2.5.2.1 | Geomorfologia e geologia

O Vulcão das Sete Cidades (Fig. 2.5) situa-se no extremo ocidental da ilha de São Miguel, mais concretamente entre as latitudes 37°47' e 37°55'N e as longitudes 25°42' e 25°52'W (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015), sendo limitado pelo mar em três dos seus flancos e a SE pelo Sistema Vulcânico Fissural dos Picos (SVFP) (Pacheco *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015).

Este maciço é dominado por um vulcão central, marcado superiormente por uma caldeira, e diversos aparelhos vulcânicos, tais como cones de pedra-pomes e escórias, *maars* e domos, que se encontram situados tanto no interior da caldeira como nos seus flancos exteriores (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015; Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). Ainda se observam cones e anéis de tufos e escoadas lávicas basálticas (Fig. 2.6) (Queiroz, 1997).

O Vulcão das Sete Cidades apresenta uma forma aproximadamente cônica, com um diâmetro basal subaéreo médio de 12 km e uma altitude máxima de 845 m, correspondente ao monumento geodésico do Pico da Cruz (Queiroz *et al.*, 2015). Ocupa uma área de cerca de 110 km² e um volume de 45 km³ acima do nível médio do mar (Queiroz *et al.*, 2008, 2015; Pacheco *et al.*, 2013). O Vulcão das Sete Cidades é formado pela acumulação de depósitos vulcanoclásticos e escoadas lávicas, e a edificação ter-se-á iniciado há mais de 210.000 anos (Moore 1990) e foi realizada a partir de uma boca eruptiva central que deu origem a inúmeras erupções de duração, estilo e magnitude variáveis (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015).

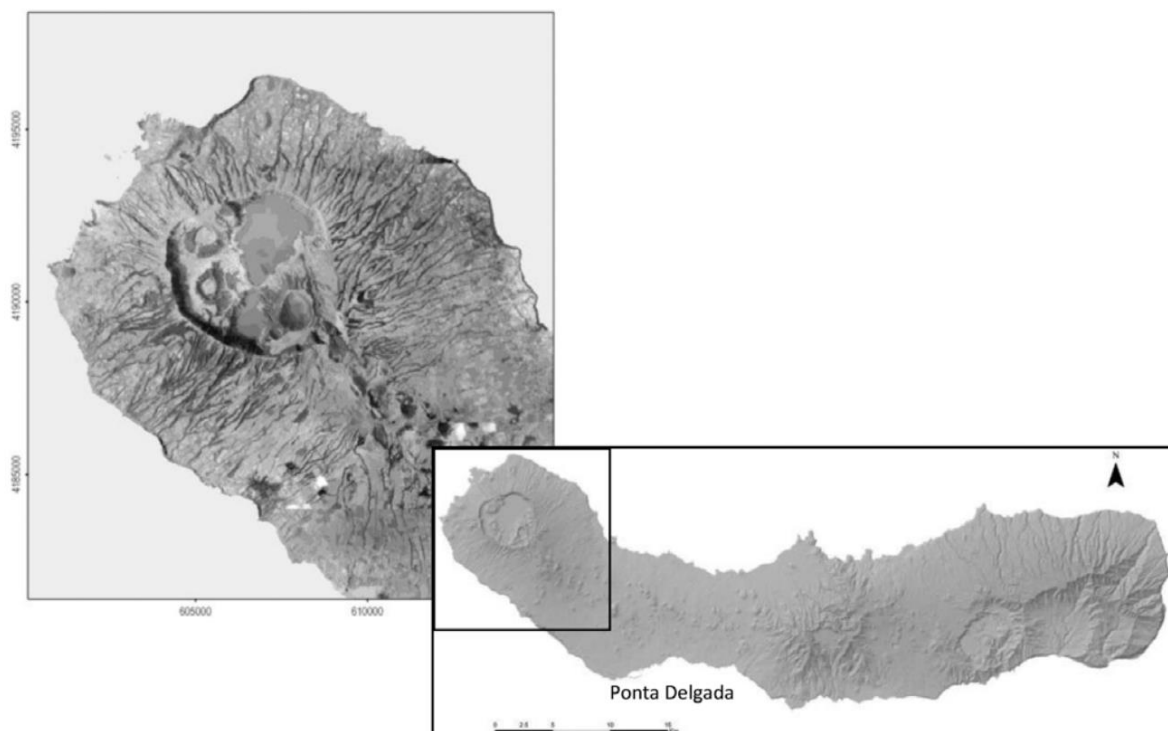


Figura 2.5 | Localização do Vulcão das Sete Cidades na ilha de São Miguel (*in* Queiroz *et al.*, 2015).

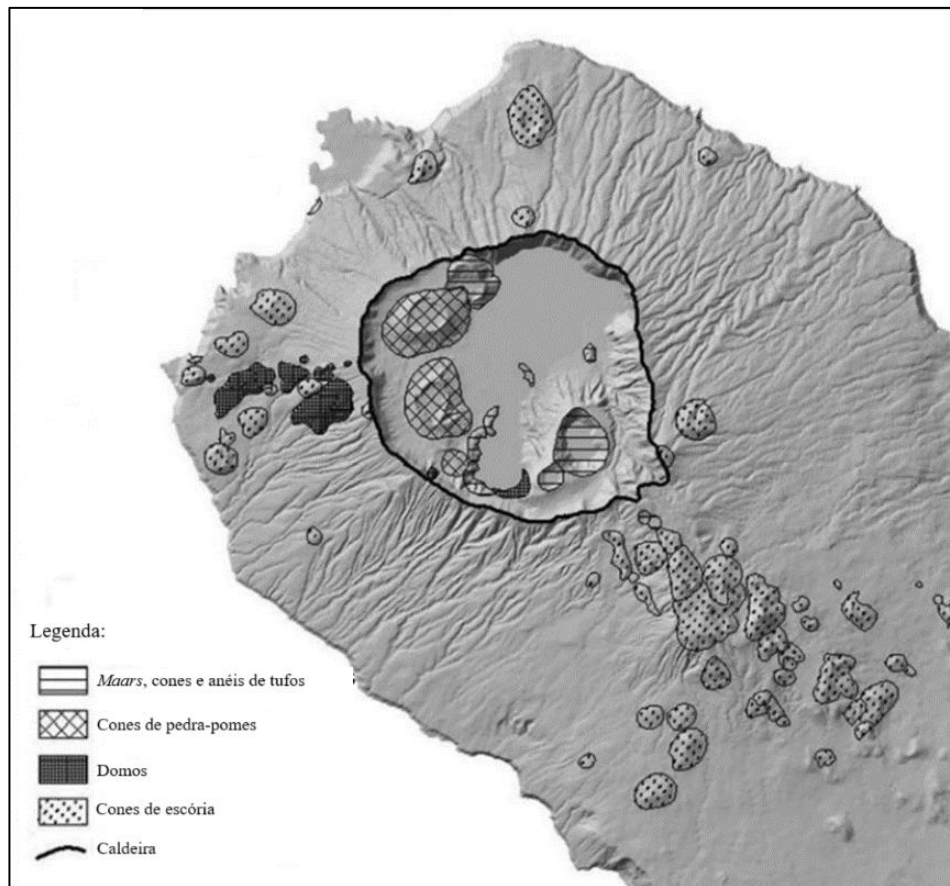


Figura 2.6 | Estruturas vulcânicas principais identificadas no Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Queiroz *et al.*, 2015).

A caldeira (Fig. 2.7) é a característica morfológica mais proeminente do edifício vulcânico (Queiroz *et al.*, 2008) e consiste numa depressão de forma aproximadamente circular, com cerca de 5 km de diâmetro e uma profundidade média de 350 m, em parte ocupada por quatro lagos, dois deles interligados (Queiroz, 1997; Pacheco *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2015). Esta estrutura encontra-se limitada por paredes abruptas subverticais, com alturas variando entre os 30 m, próximo ao cone da Seara, e os 400 m, na zona do monumento geodésico dos Remédios (Queiroz, 1997), e ocupa uma área basal na ordem dos 15 km², perfazendo um volume total de 5,2 km³ (Queiroz *et al.*, 2008, 2015). A sua forma resulta de três episódios de colapso de caldeira, cada um deles associado a diferentes erupções explosivas paroxísticas, mencionadas no ponto seguinte.



Figura 2.7 | Fotografia aérea da caldeira do Vulcão das Sete Cidades (Fonte: istock). Link: <https://www.terre.tv/wp-content/uploads/2022/06/iStock-1207075569-1024x683.jpg.webp>.

Os flancos exteriores do vulcão central apresentam uma inclinação média de 12° , aumentando para 18° próximo ao bordo da caldeira, local onde existe maior acumulação de depósitos piroclásticos pela sua proximidade às fontes eruptivas (Queiroz *et al.*, 2008, 2015). Nas encostas superiores, os vales são mais profundos, tanto pela ação que os cursos de água proporcionam, como também pela elevada espessura de depósitos piroclásticos não coesos no local. Estes cursos de água nos flancos do vulcão estabelecem um padrão radial a montante, em torno da caldeira, com exceção de alguns casos em que a orientação é controlada por falhas e/ou estruturas vulcânicas secundárias (Carmo, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

Os cones de escórias são as formas vulcânicas mais comuns no Vulcão das Sete Cidades e são o resultado da acumulação de escórias basálticas que foram expelidas durante erupções pontuais, normalmente estrombolianas e/ou havaianas (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015). Possuem, em geral, uma planta aproximadamente circular, quando relacionados com erupções centrais, ou elípticas, no caso das fissurais, apresentando no seu topo uma ou várias crateras que, em resultado da extrusão de escoadas lávicas, podem-se encontrar abertas (Carmo, 2013). Dispostos radialmente em torno do vulcão, estes edifícios vulcânicos concentram-se principalmente nas vertentes W e SE do vulcão, refletindo um claro controlo tectónico (Queiroz *et al.*, 2015). Na área de estudo, observam-se essencialmente quatro cones de escórias, um na

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

zona dos Mosteiros, correspondente ao Pico de Mafra, e três próximos da Ponta da Ferraria, salientando-se o Pico das Camarinhas (Fig. 2.9).

Outra das estruturas vulcânicas relativamente comuns no Vulcão das Sete Cidades são os cones ou anéis de tufos, produzidos por erupções submarinas litorais, condicionando a sua génese devido à existência de água na altura da erupção. Junto à costa NW do maciço, encontram-se os restos de dois anéis de tufos basálticos, nomeadamente os ilhéus dos Mosteiros e dos Frades (Fig. 2.8), localizados ao largo da fajã lávica dos Mosteiros e da Ponta do Escalvado, respetivamente (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015).

Ainda se podem observar alguns domos, concentrados no flanco W do vulcão, nomeadamente na zona dos Piquinhos e das Murtas (Fig. 2.6), dos quais um faz parte da área de estudo (o primeiro a W do Pico das Camarinhas) (Carmo, 2013).



Figura 2.8 | Fotografia dos restos do cone de tufos dos Mosteiros (gentilmente cedida por Francisca Branco).

O litoral da zona W da ilha de São Miguel é normalmente caracterizado por arribas altas, constituídas essencialmente por sequências de escoadas lávicas basálticas (*s.l.*) alternadas com depósitos piroclásticos. A altura das arribas revela-se muito variável, encontrando-se algumas

zonas a 50 m (*e.g.* Santo António) e outras a 200 m (*e.g.* Escalvado) (Carmo, 2013; Queiroz *et al.*, 2015). No setor NW, a existência das fajãs lávicas dos Mosteiros e da Ferraria, construídas a partir das escoadas lávicas emitidas pelos cones do Pico de Maфра e das Camarinhas, respetivamente, tornaram a linha de costa nessa zona mais sinuosa (Carmo, 2013).

Para além da morfologia associada a fenómenos vulcânicos, também é possível observar estruturas morfológicas relacionadas com ações tectónicas e que condicionam a localização de alguns cursos de água. Estas estruturas distensivas representam-se na topografia como ressaltos resultantes de desnivelamentos ao longo de falhas, constituindo *grabens* (Queiroz *et al.*, 2008, 2015; Carmo, 2013). No setor NW é possível observar o *Graben* dos Mosteiros.

2.5.2.2 | Vulcanoestratigrafia e vulcanismo histórico

Tal como referido, o Vulcão das Sete Cidades conta com uma história eruptiva com mais de 200.000 anos e apresenta uma estratigrafia complexa, em que, por exemplo, surgem algumas dúvidas quanto à formação da sua caldeira (Queiroz *et al.*, 2008, 2015). O esquema estratigráfico simplificado para o Vulcão das Sete Cidades encontra-se organizado em dois grupos principais: o Grupo Inferior e o Grupo Superior (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015).

O Grupo Inferior compreende todos os depósitos relacionados com a edificação subaérea do edifício mais antigos que a Formação do Risco (cerca de 36.000 anos), período no qual a caldeira se começou a formar no topo do vulcão (Queiroz, 1997). Este período foi marcado por uma atividade vulcânica essencialmente efusiva, na forma de escoadas lávicas de diferentes composições (basálticas e traquíticas) (Queiroz *et al.*, 2008). Sobre as lavas traquíticas de base ainda se observam alguns depósitos piroclásticos dos quais se destacam ignimbritos, *surges* e níveis pomíticos de queda, que demonstram elevada alteração. No topo da unidade é possível reconhecer uma sucessão de escoadas lávicas *aa* muito vesiculadas. Alguns dos depósitos estão relacionados com erupções submarinas, revelando características hidromagmáticas (*e.g.* tufos dos ilhéus dos Frades). Atualmente, é possível observar as sequências vulcanoestratigráficas desta unidade em escassos afloramentos situados nas paredes da caldeira e nas arribas marítimas da Ponta da Ferraria e dos Mosteiros, por exemplo (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015; Pacheco *et al.*, 2013).

O Grupo Superior engloba os produtos vulcânicos dos últimos 36.000 anos. Foi também durante este período que ocorreram as erupções paroxismais que condicionaram a forma atual da caldeira: há cerca de 36.000 anos formou-se o setor SE, há aproximadamente 29.000 anos BP este prolongou-se para NW, e há cerca de 16.000 anos BP estendeu-se para NE (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015). A identificação dos depósitos relacionados com estes eventos vulcânicos permitiram o estabelecimento de seis subunidades, que marcam diferentes fases da edificação do vulcão (Tabela 2.2), das quais se destacam: (1) a Formação do Risco, coincidente com o primeiro episódio de formação da caldeira há cerca de 36.000 anos; (2) a Formação da Ajuda, caracterizada por um período subsequente de erupções subaéreas, centradas no interior da caldeira e nos flancos do vulcão, e submarinas, na zona marítima envolvente ao edifício, de menor magnitude; (3) a Formação da Bretanha, correspondente ao episódio paroxísmico que alargou a antiga depressão para NW há aproximadamente 29.000 anos; (4) a Formação das Lombas, compreendendo um novo período de erupções de menores magnitudes; (5) a Formação de Santa Bárbara, relativa ao último evento vulcânico que estendeu a caldeira até à sua forma final há cerca de 16.000 anos; e (6) a Formação das Lagoas, referente ao último período de atividade, estendendo-se até à atualidade. Este último período foi marcado por uma atividade eruptiva predominantemente explosiva, evidenciada pela vasta gama de depósitos presentes, produzidos por diferentes estilos eruptivos associados a três contextos distintos: (1) depósitos pomíticos de queda e depósitos piroclásticos de fluxo (*pyroclastic density currents*; *PDCs*) gerados no decurso de erupções de caráter essencialmente hidromagmático, mas também magmático, no interior da caldeira; (2) domos lávicos, cones de escórias e escoadas lávicas basálticas nos flancos do vulcão, e (3) anéis de tufos e depósitos de tufos de erupções surtseianas no mar (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015; Pacheco *et al.*, 2013).

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Tabela 2.2 | Escala estratigráfica do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Queiroz *et al.*, 2015).

Grupo	Formação	Membro	Datação ¹⁴ C (BP)
Superior	Lagoas	Pepom	< 5.000
		Cascalho Negro	
	Santa Bárbara		15.740±200
	Lombas		
	Bretanha		28.750±240
	Ajuda		
	Risco		35.740±810
Inferior			

A Formação das Lagoas compreende a última fase de atividade do vulcão, com idade inferior a 16.000 anos, sendo composta pelos depósitos mais recentes do Vulcão das Sete Cidades. Estes depósitos tiveram origem em fontes localizadas no interior da caldeira e nos flancos. A formação encontra-se dividida em dois membros distintos, o do Cascalho Negro e o da Pepom, baseados na mudança da natureza da atividade eruptiva de majoritariamente magmática para predominantemente hidromagmática, respetivamente (Queiroz *et al.*, 2008, 2015). A fronteira entre estes dois membros é efetuada através do depósito do Fogo A (Queiroz *et al.*, 2015).

O Membro do Cascalho Negro é constituído por 11 depósitos distintos (CN1 a CN11), cada um deles gerados por diferentes eventos, tendo o mais antigo ocorrido há cerca de 10.000 anos. Estes depósitos correspondem a depósitos de queda traquíticos, domos e respetivos depósitos de escoadas de blocos e cinzas, piroclastos basálticos e escoadas lávicas, e tufos basálticos (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2015).

O Membro da Pepom traduz-se na última fase de atividade do Vulcão das Sete Cidades e sobrepõe-se ao depósito do Fogo A (Wallenstein *et al.*, 2015), tendo, por isso, menos de 5.000 anos. É composto essencialmente por depósitos traquíticos, gerados no interior da caldeira, e que cobrem a maior parte da região das Sete Cidades, e, de forma menos proeminente, por escórias e escoadas lávicas de natureza basáltica, derivadas de centros eruptivos localizados nas vertentes do edifício central (Queiroz *et al.*, 2015). Foram identificados depósitos de pelo menos 17 eventos diferentes (P1 a P17), listados na tabela 2.3 (Queiroz, 1997). Todos os

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

produtos resultaram de atividade traquítica explosiva, sendo as principais diferenças registradas ao nível da magnitude das erupções e das proporções relativas entre as fases magmáticas e hidromagmáticas (Queiroz *et al.*, 2015).

Tabela 2.3 | Parâmetros vulcânicos dos últimos 5.000 anos localizados no interior da caldeira (adaptado de Queiroz *et al.*, 2008). Ref. – referência.

Ref.	VEI	Magnitude	Volume (km ³)	Caráter eruptivo	Depósitos	Localização da boca eruptiva	Datação ¹⁴ C (anos BP)
P17	4	4,30	0,25	Hidromagmático	Q, B, PDC	Caldeira Seca	500±100 (a) 663±105 (b)
P16	≤3*	-	-	Hidromagmático	Q, B	Península	-
P15	4	4,50	0,39	Multifase	Q, B	Cone W da Lagoa Verde	-
P14	4	4,21	0,20	Multifase	Q, B	Lagoa Rasa (?)	-
P13	3	3,86	0,09	Hidromagmático	Q, B	Caldeira do Alferes	-
P12	4	3,99	0,12	Oscilatório	Q, B	Lagoa Azul (?)	-
P11	4	4,51	0,41	Multifase	Q, B, PDC	Setor E da caldeira	2.220±70 (c)
P10	<3*	-	-	Multifase	Q, B	Intracaldeira	-
P9	4	4,06	0,15	Hidromagmático	Q, B, PDC	Lagoa Verde (?)	-
P8	4	3,98	0,12	Oscilatório	Q, B, PDC	Lagoa de Santiago (?)	-
P7	≤3*	-	-	Multifase	Q, B	Intracaldeira	-
P6	≤4*	-	-	Multifase	Q, B	Intracaldeira	-
P5	≤3*	-	-	Multifase	Q, B	Intracaldeira	-
P4	≤3*	-	-	Hidromagmático	Q, B	Intracaldeira	-
P3	≤4*	-	-	Multifase	Q, B	Intracaldeira	-
P2	4	4,23	0,21	Hidromagmático	Q, B	Seara	3.580±50 (c)
P1	4	4,19	0,19	Oscilatório	Q, B, PDC	Lagoa Verde (?)	-

Índice de Explosividade Vulcânica (*Volcanic Explosivity Index*, VEI; Newhall e Self, 1982). * Valor estimado por comparação de observações de campo com outros depósitos. Magnitude calculada de acordo com Pyle (2000). Volume calculado depois de Fierstein e Nathenson (1992) para um único declive. Caráter eruptivo: hidromagmático – maioritariamente depósitos de cinzas; oscilatório – depósitos com alternância de cinzas e *lapilli*; multifase – depósitos com fases magmáticas de *lapilli* e outras fases hidromagmáticas ou oscilatórias. Legenda: Q – depósitos de queda; B – clastos balísticos; PDC – depósitos piroclásticos de fluxo. Localização da boca eruptiva: nome da boca eruptiva no interior da caldeira quando determinada; (?) – localização provável. Determinações de datação: (a) Moore e Rubin (1991), (b) Shotton e Williams (1971), (c) Queiroz (1997).

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para além da atividade explosiva traquítica centrada na caldeira, outras 12 erupções, de caráter basáltico, ocorreram nos flancos do vulcão central durante os últimos 5.000 anos (Queiroz, 1997; Ferreira, 2000; Queiroz *et al.*, 2008, 2015), dando origem a diversos cones de escória e a escoadas lávicas. A maioria destas erupções encontram-se relacionadas com a atividade estromboliana ao nível do SVFP, a SE da caldeira (Ferreira *et al.*, 2015). É importante salientar que, ainda durante este período, formaram-se outros cones de escória, dos quais se destacam o Pico de Maфра e o Pico dos Ginetes, mais antigos e de idade incerta, mas estratigraficamente posicionados entre os depósitos P1 e P2, e o Pico das Camarinhas, mais recente, datado de 840 ± 60 anos BP (Moore e Rubin, 1991), coberto apenas pelo depósito P17. Estes últimos três episódios eruptivos deram origem a escoadas lávicas, tendo as do Pico de Maфра e as do Pico das Camarinhas formado, respetivamente, os deltas lávicos dos Mosteiros, com uma idade aproximada maior do que 3.580 anos e menor do que 5.000 anos, e da Ponta da Ferraria, com 840 ± 60 anos BP (Fig. 2.9) (Queiroz *et al.*, 2008, 2015).

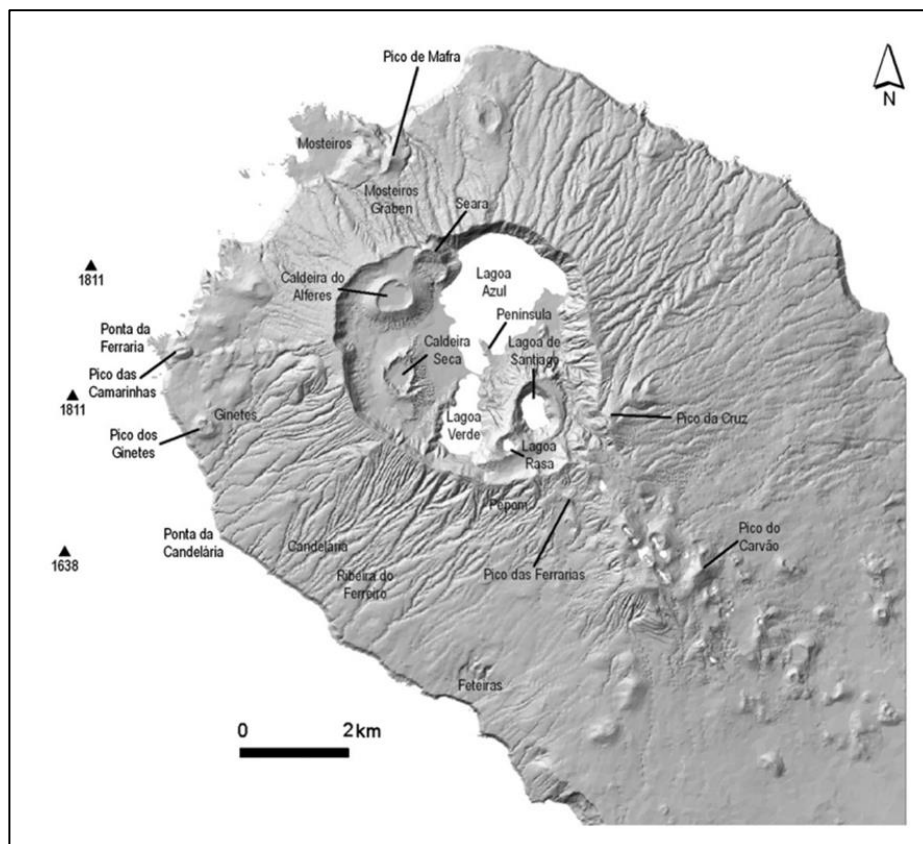


Figura 2.9 | Localizações dos principais cones de escória, cones de pedra pomes, lagos, fajãs lávicas e erupções submarinas históricas (triângulos) na região do Vulcão das Sete Cidades (*in* Queiroz *et al.*, 2008).

Desde o povoamento da ilha de São Miguel, na primeira parte do século XV, não foram registadas erupções históricas subaéreas na zona do Vulcão das Sete Cidades, contudo, ocorreram três erupções submarinas (Fig. 2.9) nas proximidades da costa W do vulcão central. Apesar disto, nenhum relato histórico menciona a deposição de cinzas no interior da ilha para qualquer um destes três eventos vulcânicos e os estudos de campo não revelaram qualquer depósito correlacionável com estes acontecimentos (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015).

A erupção submarina mais antiga, de acordo com os relatos históricos, ocorreu em 1638, a cerca de 3 km a W de Ponta da Candelária (Fig. 2.9), tendo a sua manifestação externa durado aproximadamente 25 dias (Chaves, 1960; Weston, 1964). O material vulcânico expelido por esta erupção (cinzas e blocos) permitiu a construção de um cone, que atingiu uma altura de cerca de 120 m acima do nível médio do mar, mas que terá desaparecido alguns meses depois por ação da erosão marinha (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015).

Os outros dois fenómenos eruptivos submarinos ocorreram em 1811, com quatro meses de intervalo, em duas localizações diferentes (Chaves, 1960). O primeiro ocorreu em fevereiro de 1811, a cerca de 1,7 km a SW de Ponta de Ferraria (Fig. 2.9), e terá sido visível por uma semana. Apesar de não ter formado nenhuma estrutura acima do nível do mar, esta erupção produziu um banco submarino. O segundo evento ocorreu em junho do mesmo ano, num centro eruptivo localizado mais a N da atividade precedente, e gerou, fruto de atividade surtseiana, um ilhéu intitulado de Sabrina. Este ilhéu estava localizado a aproximadamente 1,7 km a NW de Ponta de Ferraria e foi igualmente destruído pela erosão marinha em alguns meses. A atividade sísmica que precedeu e acompanhou estas erupções (intensidade máxima de IX, segundo a escala EMS-98; Silveira *et al.*, 2003) causou grandes destruições em muitas freguesias na costa W da ilha, principalmente no que diz respeito ao edificado. De facto, muitas das habitações das freguesias dos Mosteiros, Ginetes e Candelária ficaram completamente destruídas. Também ocorreram movimentos de vertente na costa NW associados a estes fenómenos (Queiroz, 1997; Silveira *et al.*, 2003; Queiroz *et al.*, 2008, 2015).

2.5.2.3 | Tectónica

O Vulcão das Sete Cidades é dominado por um sistema de falhas de orientação predominante NW-SE, inclinando 60-90° para SW ou para NE, claramente relacionado com o regime tectónico regional do *Rift* da Terceira (*s.l.*) (Fig. 2.10) (*e.g.* Queiroz, 1997; Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015; Madeira *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2015; Queiroz *et al.*, 2015). Este sistema de falhas encontra-se bem representado no flanco NW do vulcão, através de escarpas de falha que se estendem desde a zona costeira até ao bordo da caldeira, definindo uma estrutura em *graben*, o *Graben* dos Mosteiros (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015; Queiroz *et al.*, 2015). Encontram-se também, de forma menos evidente, falhas com orientação N-S (NNW-SSE a NNE-SSW) e NE-SW a ENE-WSW, geomorfologicamente inferidas de alinhamentos de centros eruptivos e da orientação de alguns troços de linhas de água. A distribuição dos centros eruptivos monogenéticos, tanto nas vertentes exteriores como no interior da caldeira do vulcão, sugere a presença de fraturas radiais e concêntricas, respetivamente, facto comprovado também pela presença de filões, com exceção do setor SE (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). No flanco W do vulcão, estes alinhamentos apresentam uma orientação E-W, podendo estar relacionados com a presença de fraturas radiais ou associados a falhas oceânicas profundas (Queiroz, 1997; Carmo, 2013; Pacheco *et al.*, 2013; Carmo *et al.*, 2015; Queiroz *et al.*, 2015).

O *Graben* dos Mosteiros é uma estrutura distensiva proeminente no flanco NW do Vulcão das Sete Cidades caracterizada por uma componente normal dominante, formando escarpas com deslocamentos de até 50-70 m (Queiroz, 1997; Queiroz *et al.*, 2008, 2015; Carmo, 2013; Pacheco *et al.*, 2013; Carmo *et al.*, 2015). As falhas que compõem o *graben* organizam-se em dois grupos distintos, com sentidos de inclinação opostos, NE e SW, englobando o primeiro grupo as falhas da Lomba do Vasco e da Lombinha, e o segundo a Falha da Lomba dos Homens (Carmo, 2013) (Fig. 2.10). Estas estruturas prolongam-se desde o litoral, mas, no que respeita as falhas da Lombinha e da Lomba dos Homens, a sua exposição na zona da fajã lávica dos Mosteiros está limitada por densa vegetação e atividade antrópica, havendo dúvidas quanto à sua localização na plataforma (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). Estas estruturas cruzam a caldeira e estendem-se para SE, para o SVFP, estando materializadas por alinhamentos vulcânicos dispostos *en échelon* direito (Queiroz 1997; Carmo, 2013; Queiroz *et al.*, 2015).

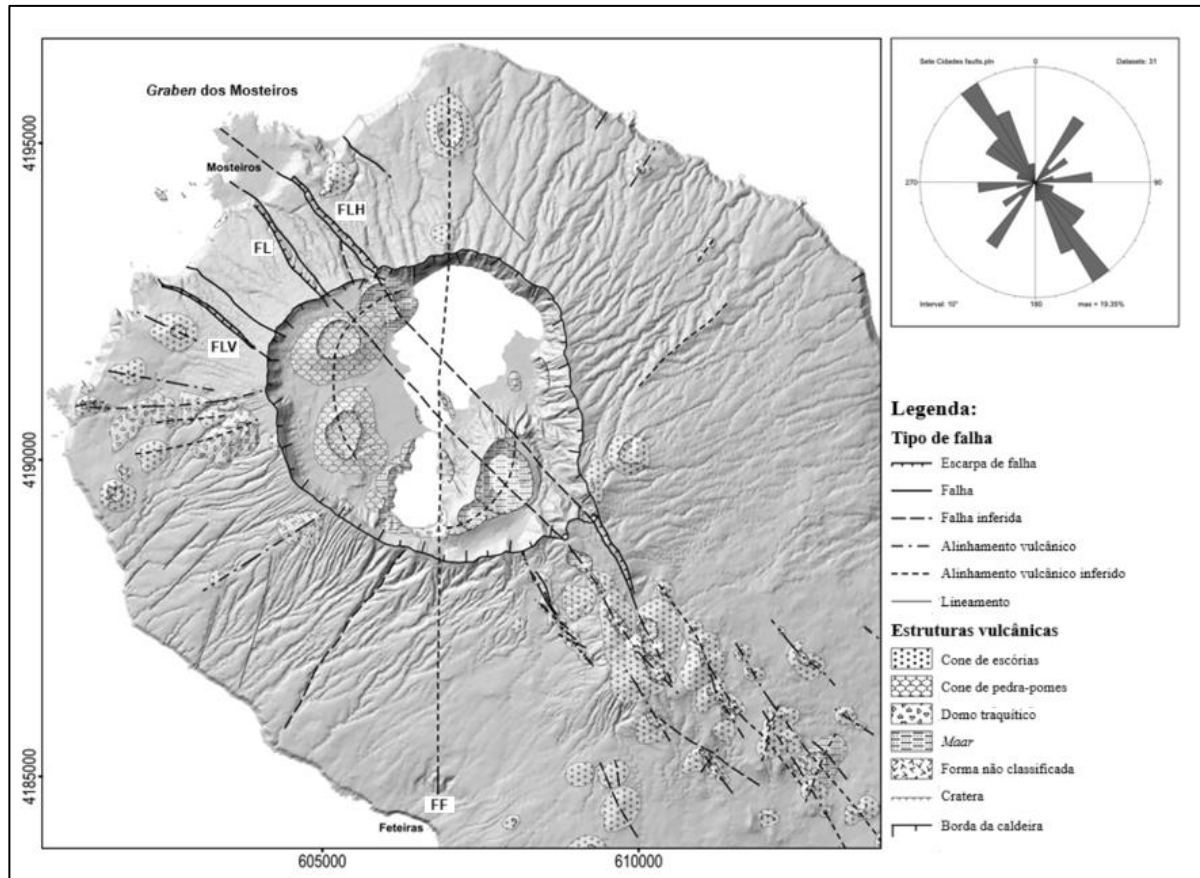


Figura 2.10 | Principais estruturas tectônicas e vulcânicas do Vulcão das Sete Cidades e respetivo histograma circular de frequências não ponderadas das direções. Legenda: FF – Falha das Feteiras; LHV – Falha da Lomba do Vasco; LF – Falha da Lombinha; LHF – Falha da Lomba dos Homens (adaptado de Carmo *et al.*, 2015).

Localizada a NE do cone de escórias do Pico do Escalvado, a Falha da Lomba do Vasco (Fig. 2.10) corresponde ao limite SW do *Graben* dos Mosteiros. Com uma direção geral de 306° e uma inclinação superior a 50° , esta falha prolonga-se ao longo de 1.915 m, desde a arriba litoral até próximo da caldeira, podendo estender-se para NW, tornando-se imersa, e para SE, para a região dos Picos. A expressão geomorfológica desta falha é uma escarpa virada a NE, com 1.770 m de comprimento e 50 m de altura, diminuindo gradualmente de dimensão à medida que progride em direção ao bordo da caldeira, onde deixa de ter qualquer expressão. A inclinação da escarpa varia entre 20 e 50° . Considerando uma inclinação média de 65° e o comando de 50 m da escarpa, torna-se possível estimar uma separação normal acumulada de 55 m para esta estrutura (Carmo, 2013). Com base na idade dos depósitos mais antigos expostos

nas arribas do Vulcão das Sete Cidades (210.000 ± 8.000 anos BP), Carmo (2013) calcula uma taxa de deslizamento mínima de 0,26 mm/ano.

A Falha da Lombinha (Fig. 2.10) estende-se por cerca de 1.907 m, com expressão morfológica por escarpa de falha ao longo de 1.830 m. Esta estrutura prolonga-se desde a plataforma dos Mosteiros até próximo do bordo da caldeira (zona da Seara), influenciando na instalação da linha de água Grotta dos Milhafres, e desenvolve-se para SE, atravessando a caldeira (sem traçado visível), em direção ao SVFP, através de um alinhamento de centros eruptivos (Carmo, 2013). A escarpa evidencia uma direção geral de 323° , com mergulho para NE, característico de movimentação normal com abatimento para NE. Considerando uma altura de escarpa da ordem dos 50 m e um ângulo de inclinação de 65° , Carmo (2013) estima uma separação normal de 55 m. A autora estima taxas de deslizamento de 0,26 mm/ano e 1,91 mm/ano, admitindo que aquela separação normal ocorreu há menos de 210.000 anos (a idade das rochas mais antigas expostas) ou 29.000 anos (idade da Formação da Bretanha), respetivamente.

A Falha da Lomba dos Homens (Fig. 2.10) prolonga-se ao longo de 2.220 m, desde a arriba fóssil dos Mosteiros até ao bordo da caldeira, e demonstra escarpa durante 2.000 m, controlando a implantação da linha de água Grotta do Alqueive (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). Tal como acontece com a Falha da Lombinha, esta estrutura estende-se para SE, sem qualquer expressão na caldeira, revelando novamente expressão através da presença de um vale de fratura (Grotta do Inferno), uma escarpa de falha e de um alinhamento vulcânico (Lagoas Empadadas) (Carmo, 2013). A escarpa apresenta uma direção geral de 316° e encontra-se voltada para SW, revelando movimentação normal com abatimento do bloco SW. Com uma altura bastante variável em toda a sua extensão, na sua extremidade NW, é possível realçar um valor de 50 m, possivelmente atenuado pelo enchimento do bloco abatido com produtos vulcânicos, e um valor de 60 m, correspondente ao comando máximo, observado nas proximidades do cone de escórias do Pico de Mafra e da estrada regional (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). Com uma inclinação de 65° e o comando máximo de 60 m, Carmo (2013) determinou uma separação normal acumulada de aproximadamente 65 m, equivalendo a taxas de deslizamento de 0,31 mm/ano e 2,26 mm/ano nos últimos 210.000 anos (a idade das rochas mais antigas expostas) ou 29.000 anos (idade da Formação da Bretanha), respetivamente.

Ao longo de todo o flanco NW, observam-se falhas sintéticas e antitéticas dos acidentes tectónicos principais (Fig. 2.11) (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015).

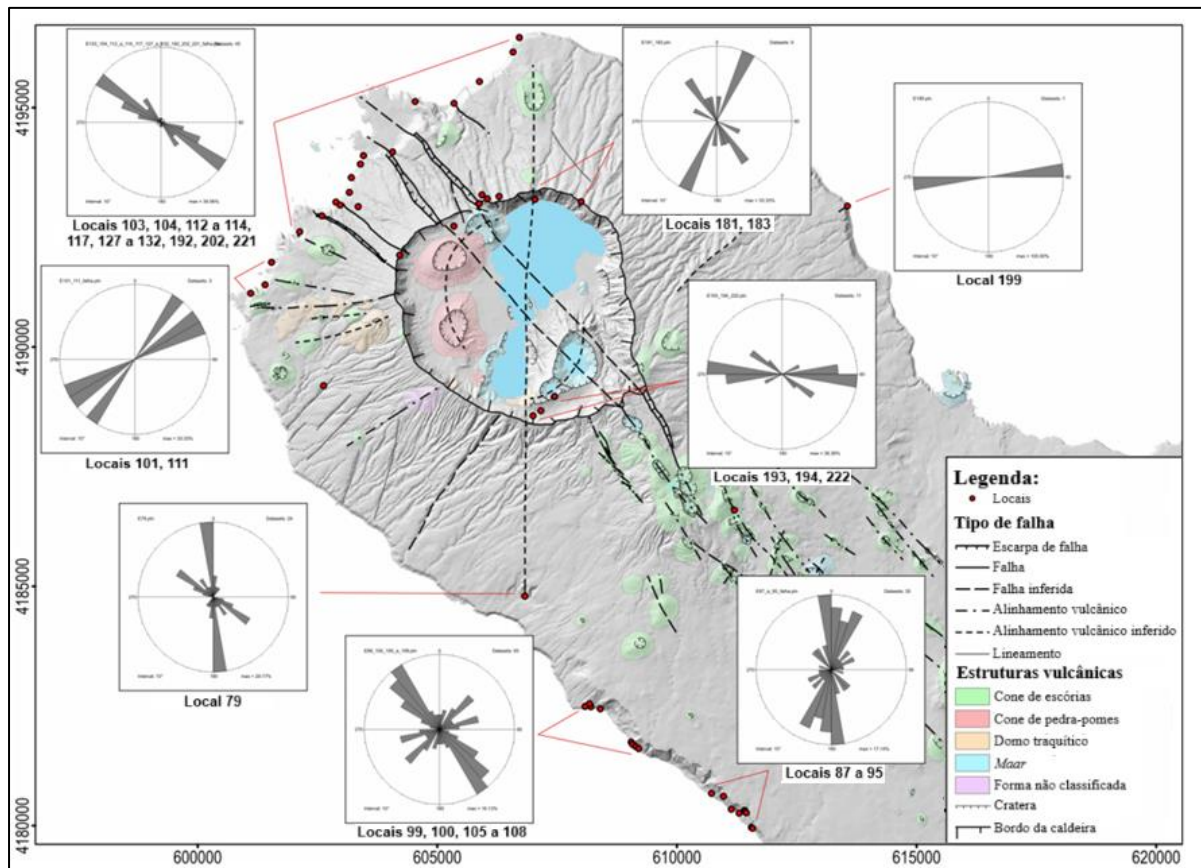


Figura 2.11 | Locais (pontos vermelhos) onde foram observadas e medidas falhas no Vulcão das Sete Cidades e respectivos histogramas circulares de frequências não ponderadas das direções dos planos de falha (adaptado de Carmo *et al.*, 2015).

2.6 | Manifestações hidrotermais e zonas de desgaseificação difusa

Atualmente, a atividade vulcânica no Arquipélago dos Açores é caracterizada por manifestações secundárias de vulcanismo visíveis, sob a forma de fumarolas de baixa temperatura (95 a 100°C), nascentes termais e de água fria gasocarbónica (Cruz *et al.*, 1999; Ferreira *et al.*, 2005; Caliro *et al.*, 2015). As áreas de desgaseificação difusa ocorrem quer através do solo (*e.g.* Ferreira *et al.*, 2005; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010, 2015, 2016), quer ao nível de lagos (*e.g.* Andrade, 2014; Andrade *et al.*, 2016; 2019, 2020; 2021). Com exceção das ilhas de Santa Maria e Corvo, todas as restantes ilhas apresentam pelo menos um tipo de manifestação hidrotermal (*e.g.* Viveiros, 2003; Viveiros *et al.*, 2016). Para além destas

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

formas de desgaseificação subaéreas, são reconhecidos também alguns campos de desgaseificação submarinos ao redor de diversas ilhas, nomeadamente São Miguel, Terceira, Graciosa, São Jorge e Faial, que se situam no prolongamento de sistemas vulcânicos terrestres ou associados a estruturas vulcano-tectónicas submarinas (Viveiros, 2003, Moreno *et al.*, 2016).

As principais manifestações secundárias presentes no Vulcão das Sete Cidades são as nascentes termais situadas na praia dos Mosteiros e na Ponta da Ferraria, os campos de desgaseificação submarinos, localizados nas imediações dos Mosteiros (Fig. 2.12), e as áreas de desgaseificação difusa no solo (Fig. 2.13) (Viveiros, 2003; Costa, 2006; Lisetti, 2013; Viveiros *et al.*, 2015; Moreno *et al.*, 2016).

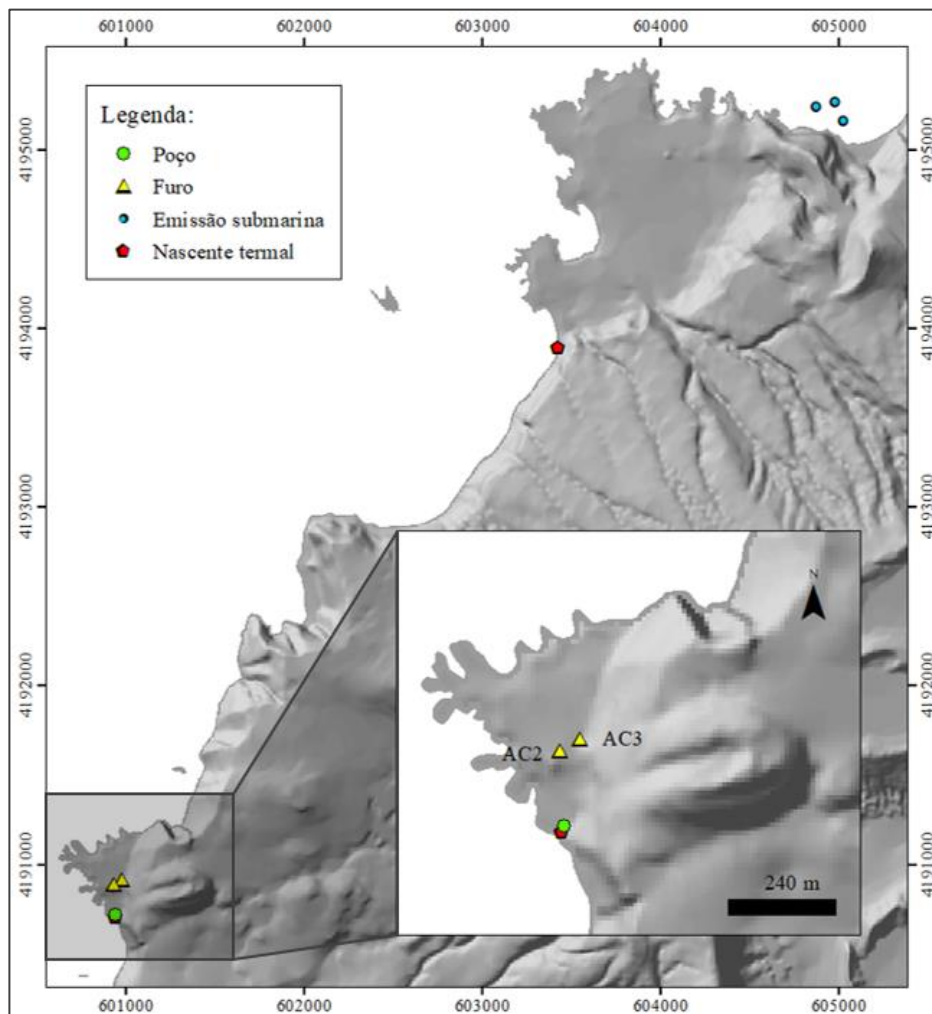


Figura 2.12 | Localizações das nascentes termais, das áreas de desgaseificação submarinas, dos poços e dos furos reconhecidos na área de estudo. As coordenadas das nascentes termais, dos furos e do poço foram retiradas do Projeto HYDROVULC (Freire, 2006). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

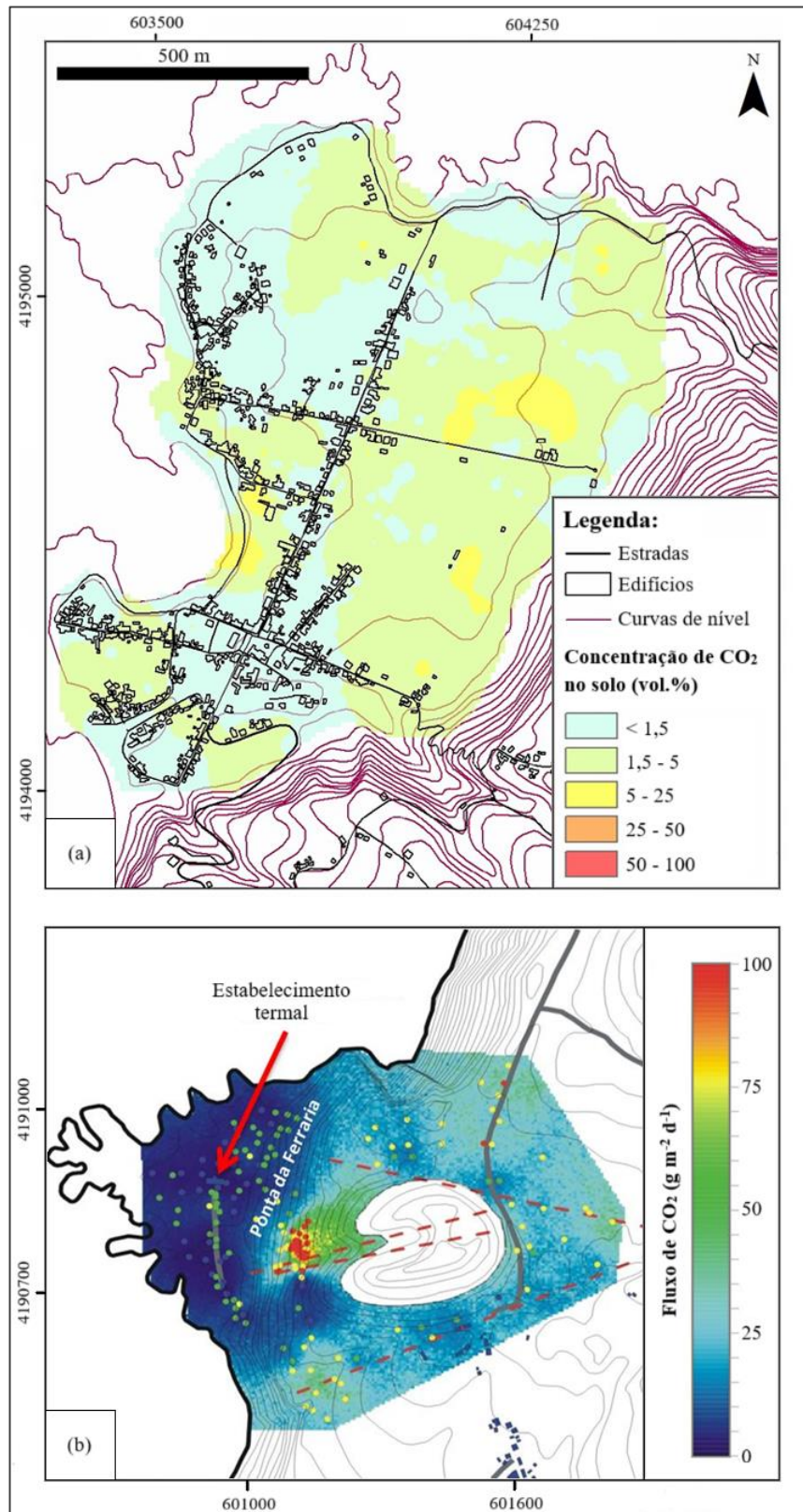


Figura 2.13 | Áreas de desgaseificação difusa no solo nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. (a) corresponde ao mapa da concentração de CO₂ no solo para a plataforma dos Mosteiros (adaptado de Viveiros *et al.*, 2015) e (b) ao mapa de fluxo de CO₂ no solo para a Ferraria (adaptado de Lisetti, 2013).

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As nascentes termais localizadas na área de estudo estão associadas ao sistema de aquífero basal das Sete Cidades e apresentam uma profundidade intertidal (Costa, 2006; Freire, 2006; Aguiar e Costa, 2010; Cruz *et al.*, 2010; Couto *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2023). As tabelas 2.4, 2.5 e 2.6 apresentam um resumo das análises efetuadas às nascentes termais, poços e furos localizados nas plataformas lávicas da Ferraria e dos Mosteiros. As suas localizações encontram-se representadas na figura 2.12.

Tabela 2.4 | Inventário dos pontos de águas minerais nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Costa, 2006). Sistema de coordenadas: WGS84.

	Designação/Local	Tipo	UTM (M)	UTM (P)	Referência
AM71	Ferraria II	Nascente	600927	4190708	Projeto HYDROVULC (Freire, 2006)
AM72	Ferraria I	Poço	600925	4190704	
AM73	Ferraria III (AC2)	Furo	600954	4190922	
AM74	Ferraria IV (AC3)	Furo	600981	4190917	
AM75	Mosteiros	Nascente	603404	4193822	

Tabela 2.5 | Composição dos elementos maiores e outros constituintes dos pontos de águas minerais nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Costa, 2006). T. – temperatura; Cond. – condutividade; Alc. – alcalinidade; Ref. – referência.

	T. (°C)	pH	SDT (mg/L)	Cond. (µs/cm)	Alc. (mg/L)	CO ₂ L (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	F (mg/L)	ERB (%)	Ref.
AM71	67,7	5,97	85.440,00	4.220	454,00	382,00	192,60	1.000,00	568,00	500,00	n.d.	1.814,00	4.009,40	553,90	n.d.	n.d.	3
AM72	62,5	n.d.	20.956,50	n.d.	479,67	n.d.	107,60	6.676,70	n.d.	508,33	487,04	1.305,60	11.296,94	585,20	n.d.	0	1
AM73	58,0	6,1 ^b	19.298,92	27.000	498,40	n.d.	143,00	5.700,00	339,00	310,00	572,00	1.120,00	10.500,00	608,00	0,70	-2	2
AM74	57,0	6,2 ^c	19.671,92	28.000	505,70	n.d.	143,00	5.900,00	357,00	317,00	582,00	1.118,00	10.630,00	617,00	0,70	-1	2
	61,0	6,16 ^a	n.d.	32.600	n.d.	n.d.	189,00	5.370,00	232,00	200,00	349,00	1.388,00	9.848,00	630,70	0,70	n.d.	4
AM75	43,0	5,78	14.076,30	20.200	489,00	338,20	128,40	3.870,00	205,00	240,00	440,00	797,00	7.455,00	596,58	n.d.	-3	3

1 – Accioaiuoli (1940); 2 – Cabral (2002); 3 - Projeto HYDROVULC (2006); 4 – Carvalho *et al.* (2011).

^aDeterminado em laboratório a 20°C de temperatura; ^bdeterminado em laboratório a 22°C de temperatura;

^cdeterminado em laboratório a 21°C de temperatura.

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Tabela 2.6 | Composição dos elementos menores e em traço dos pontos de águas minerais nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades (adaptado de Costa, 2006). Ref. – referência.

	B (µg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	Li (µg/L)	Mn (µg/L)	Sr (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)	Cr (µg/L)	Ni (µg/L)	As (µg/L)	Hg (µg/L)	Cu (µg/L)	Cd (µg/L)	Br (µg/L)	Ref.
AM71	6.800,00	200,00	230,00	1.300,00	3.020,00	12.300,00	4,00	80,00	<50	240,00	0,21	<20	160,00	<1	57.900,00	3
AM72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1
AM73	4.600,00	32,00	1.000,00	780,00	2.400,00	n.d.	15,00	60,00	3,00	12,00	175,00	n.d.	<40	1,30	n.d.	2
AM74	4.800,00	208,00	1.900,00	820,00	3.400,00	n.d.	17,00	50,00	2,30	15,00	177,00	n.d.	<40	0,70	n.d.	2
	4.200,00	305,00	530,00	600,00	1.410,00	5.950,00	6,00	120,00	n.d.	<30	212,00	n.d.	<20	<1	n.d.	4
AM75	3.100,00	400,00	110,00	500,00	80,00	4.270,00	7,00	570,00	<500	70,00	17,00	<200	<200	0,01	238,00	3

1 – Accioaiuoli (1940); 2 – Cabral (2002); 3 - Projeto HYDROVULC (2006); 4 – Carvalho *et al.* (2011).

A água termal da Ferraria emerge ao nível do mar com uma temperatura máxima de 67,7°C (na zona da nascente) (Tabela 2.5). Com um pH ligeiramente ácido (5,97 na zona da nascente) (Tabela 2.5), esta água apresenta uma composição cloretada sódica e mineralização elevada (Carvalho *et al.*, 2009, 2011).

Os resultados das análises isotópicas desenvolvidas por Carvalho *et al.* (2011) no furo AC3 (Fig. 2.14) evidenciaram que a água termal da Ferraria corresponde a uma mistura entre a água do mar e um fluido termal primário, principal agente contribuidor para o enriquecimento em CO₂ de origem profunda.

Considerando os valores da composição isotópica de δ²H e de δ¹⁸O da água termal (-4,17 e -1,0 ‰, respetivamente) (Fig. 2.14) juntamente com os estabelecidos para a água do mar e para as águas meteóricas regionais (Carvalho, 1999), Carvalho *et al.* (2011) puderam, para além de comprovar que se tratava de uma mistura, inferir a composição isotópica do fluido termal (-18 ‰ de δ²H e -3,8 ‰ de δ¹⁸O). Os valores obtidos são compatíveis com a gama isotópica reportada por Coutinho (1990) e Coutinho *et al.* (1996) para as nascentes e poços de água fria localizados no Vulcão das Sete Cidades entre 60 (-22 ‰ de δ²H e -4,3 ‰ de δ¹⁸O) e 750 (-15 ‰ de δ²H e -3,1 ‰ de δ¹⁸O) m de altitude. A nascente localizada a altitude mais baixa (Rocha das Capelas; Fig. 2.15) é alimentada por um fluido cujas características isotópicas são muito semelhantes às inferidas para a componente sem água do mar na Ferraria, apresentando

2 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

valores de $-20,7\text{ ‰}$ de $\delta^2\text{H}$ e $-4,03\text{ ‰}$ de $\delta^{18}\text{O}$ (Coutinho, 1990; Coutinho *et al.*, 1996). O valor de $\delta^{13}\text{C}$ obtido para o carbono dissolvido na água termal ($-3,83\text{ ‰}$) denota uma origem mantélica e é semelhante a outras determinações isotópicas em fumarolas e nascentes termais relacionadas com os vulcões das Furnas e do Fogo na ilha de São Miguel (Carvalho, 1999; Cruz *et al.*, 1999; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010, 2023; Caliro *et al.*, 2015).

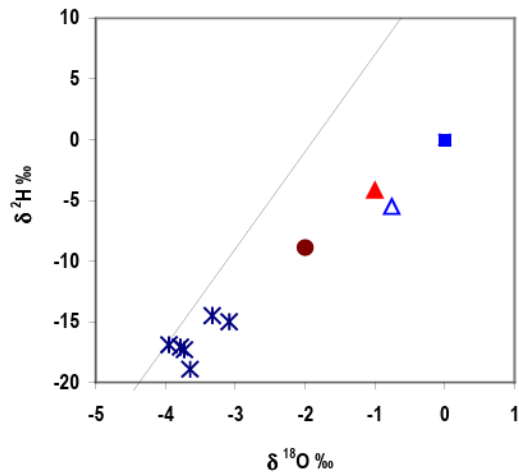


Figura 2.14 | Composições isotópicas de $\delta^2\text{H}$ e de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs V-SMOW) para a água termal da Ferraria (triângulo vermelho; projeto INOGAZ); nascentes de água fria (estrela azul) e água do lago (triângulo azul) (Coutinho *et al.*, 1996); água do mar (quadrado azul); e fluido termal (círculo) (*in* Carvalho *et al.*, 2011).

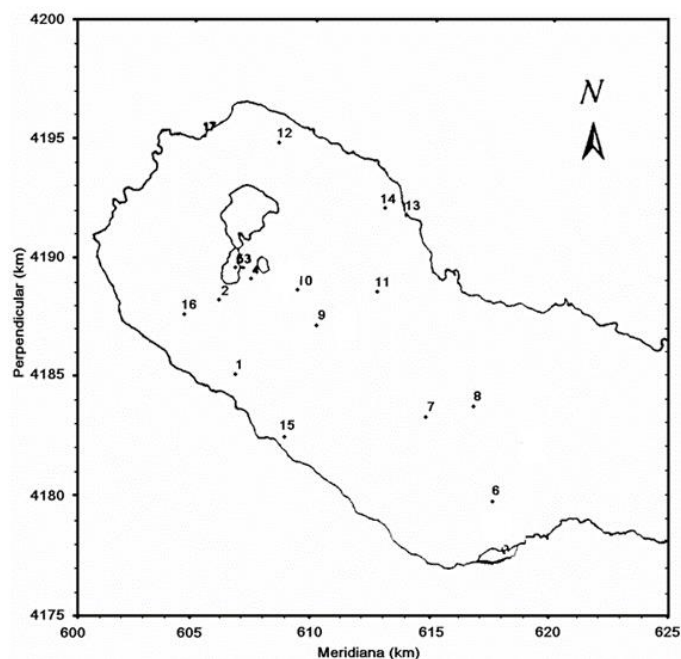


Figura 2.15 | Localização dos pontos de água amostrados (pontos) (adaptado de Coutinho *et al.*, 1996).

No que diz respeito à água da nascente termal dos Mosteiros, a temperatura de emergência é inferior à registada na Ferraria, com cerca de 43°C (Tabela 2.5). Apesar de apresentar uma menor mineralização, as concentrações de CO₂ dissolvido encontradas são semelhantes às da Ferraria (Carvalho *et al.*, 2009, 2011) (Tabela 2.5).

As emissões submarinas presentes nos Mosteiros (Fig. 2.12) são dominadas pela presença de CO₂ e de gases como o CH₄, He, N₂, O₂ e Ar, em concentrações reduzidas. A ausência de componentes como o H₂S e o H₂, típicos das fumarolas hidrotermais, sugerem, em concordância com a sua localização, que as fontes sejam provavelmente um prolongamento para o mar das DDS identificadas em terra, estando neste caso associadas às principais estruturas tectónicas que atravessam o Vulcão das Sete Cidades (Moreno *et al.*, 2016; Viveiros *et al.*, 2016).

O primeiro estudo de desgaseificação difusa do solo efetuado neste sistema vulcânico (Queiroz, 1997) focou-se no interior da caldeira das Sete Cidades. Os valores médios de concentração de CO₂ no solo, medida a cerca de 40 cm de profundidade, oscilaram entre 3 e 4 % vol., tendo-se verificado valores na ordem dos 20 % vol. no interior do cone da Caldeira Seca e entre 6 e 8 % vol. ao longo de alguns segmentos das fraturas de orientação NW-SE. Não foram identificadas zonas de anomalia térmica (Queiroz, 1997). Posteriormente a este, alguns trabalhos foram desenvolvidos, abrangendo outras áreas do Vulcão das Sete Cidades, tais como as plataformas lávicas dos Mosteiros (*e.g.* Viveiros *et al.*, 2015) e da Ferraria (*e.g.* Lisetti, 2013). Segundo Viveiros *et al.* (2015), as concentrações de CO₂ no solo nos Mosteiros variavam entre 0 e 22 % vol., situando a maior parte da freguesia numa zona com concentração de CO₂ no solo inferior a 5 % vol. (Fig. 2.13a), valor considerado limite para a contribuição biogénica. As temperaturas no solo oscilavam entre os 13 e os 23°C, não tendo sido identificadas anomalias térmicas. Na zona da Ferraria, também não foram identificadas anomalias térmicas no solo (Lisetti, 2013). Apesar da temperatura ter variado entre 20 e 36°C, os valores máximos medidos foram justificados pela influência da temperatura do ar e exposição solar. Neste caso, foram efetuadas 186 medições de fluxo de CO₂ recorrendo ao método da câmara de acumulação e os valores oscilaram entre 1,4 e 355 g m⁻² d⁻¹ (Fig. 2.13b).

O estudo de Viveiros *et al.* (2015) (Fig. 2.13a) demonstrou mais uma vez que as áreas de desgaseificação difusa podem não estar associadas a uma anomalia térmica. No caso dos Mosteiros, onde não existem emissões visíveis subaéreas, estas zonas de desgaseificação foram

identificadas em 2006 quando um dos residentes da freguesia reportou sintomas associados à possível exposição de CO₂, nomeadamente dificuldade em respirar, dores de cabeça, tonturas e vômitos, tendo os investigadores do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos da Universidade dos Açores detetado valores elevados de CO₂ no ar interior de um edifício, com valores máximos de 20,9 % vol. (Viveiros *et al.*, 2015).

No que diz respeito à estimativa da emissão total (*output*) de CO₂ para o Vulcão das Sete Cidades, o único estudo efetuado até ao momento no solo foi o de Lisetti (2013) que estabeleceu para uma parte da área da Ferraria (0,47 km²) o valor de cerca de 10 t d⁻¹, dos quais 5,2 t d⁻¹ teriam uma origem profunda (hidrotermal/vulcânica).

Quanto à desgaseificação de CO₂ nos lagos, alguns estudos têm vindo a ser realizados no Vulcão das Sete Cidades. Andrade *et al.* (2019) debruçaram-se sobre a Lagoa de Santiago e obtiveram valores de fluxo de CO₂ entre 0 e 34,8 g m⁻² d⁻¹, localizando-se os valores mais elevados a S deste lago, associados à amostragem de dezembro de 2016 (Fig. 2.16). No que consta à temperatura da água, esta oscilou entre os 12,4 e os 22,1°C, verificando-se as maiores temperaturas igualmente em dezembro. A análise isotópica efetuada para a Lagoa de Santiago, ainda que apresente valores tipicamente biogénicos ($\delta^{13}\text{C} = -18,5$ e $-13,2$ ‰) mais leves que o valor atmosférico ($-8,3$ ‰; Clark, 2015), apresenta uma coincidência espacial entre os valores de fluxo de CO₂ mais elevados e as composições isotópicas mais pesadas ($\delta^{13}\text{C} = -13,2$ ‰), o que levou Andrade *et al.* (2019) a não excluir uma potencial contribuição de CO₂ com origem profunda. O valor total da emissão de CO₂ difuso evidenciou uma gama de valores entre 0,22 e 5,56 t d⁻¹, sendo novamente na amostragem de dezembro onde se registaram os valores mais elevados. Para a Lagoa das Sete Cidades (Andrade *et al.*, 2020), os valores de fluxo de CO₂ registados oscilaram entre 2,1 e 17,9 g m⁻² d⁻¹ (Lagoa Verde) e de 0,3 a 17,2 g m⁻² d⁻¹ no caso da Lagoa Azul, registando-se os valores mais elevados na Lagoa Verde, perto da zona de transição para a Lagoa Azul (região de macrófitas) (Fig. 2.17). Os valores de temperatura da água na Lagoa Azul variaram entre 13,4 e 14,2°C e os da Lagoa Verde entre 13,9 e 14,5°C. As análises isotópicas de carbono na água revelaram que os resultados obtidos, entre $-19,6$ e $-14,3$ ‰ *vs.* V-PDB, são compatíveis com uma origem biogénica, sendo mais leves que o valor atmosférico ($\delta^{13}\text{C} = -8,3$ ‰; Clark, 2015). A emissão total de CO₂ estimada na Lagoa das Sete Cidades corresponde a 30,8 t d⁻¹, das quais 5,8 t d⁻¹ são respetivos à Lagoa Verde e 25,0 t d⁻¹ dizem respeito à Lagoa Azul.

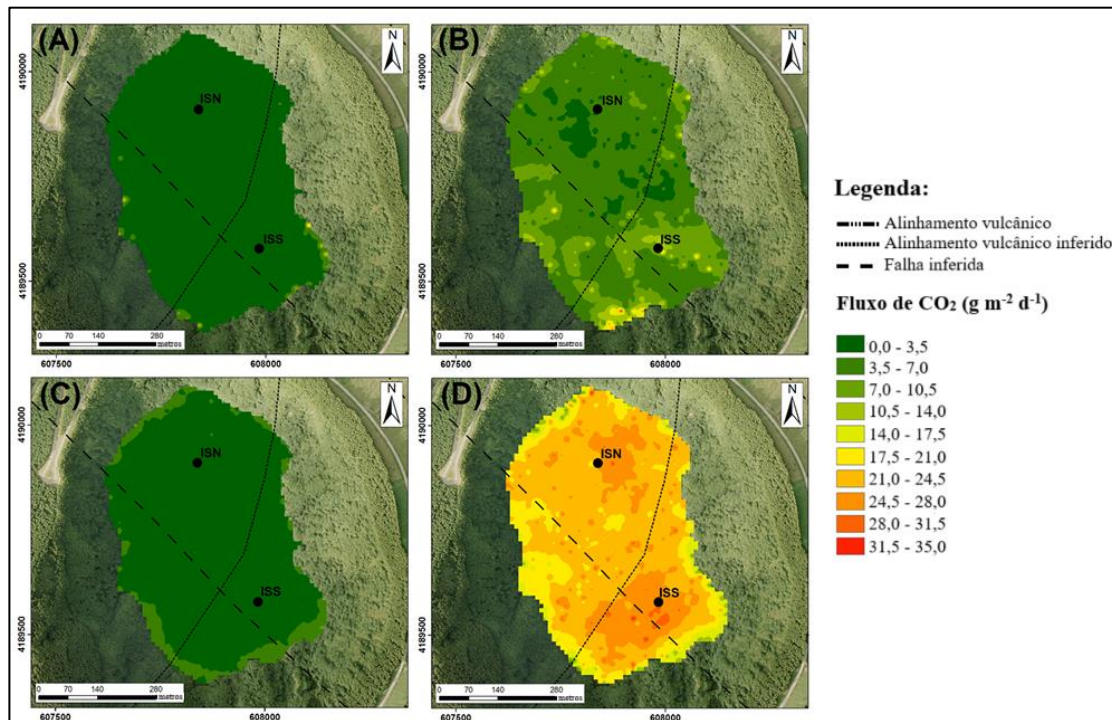


Figura 2.16 | Mapas do tipo-E relativos ao fluxo de CO₂ para a Lagoa de Santiago. (A), (B), (C) e (D) dizem respeito às várias amostragens efetuadas em novembro, abril, setembro e dezembro, respetivamente (adaptado de Andrade *et al.*, 2019).

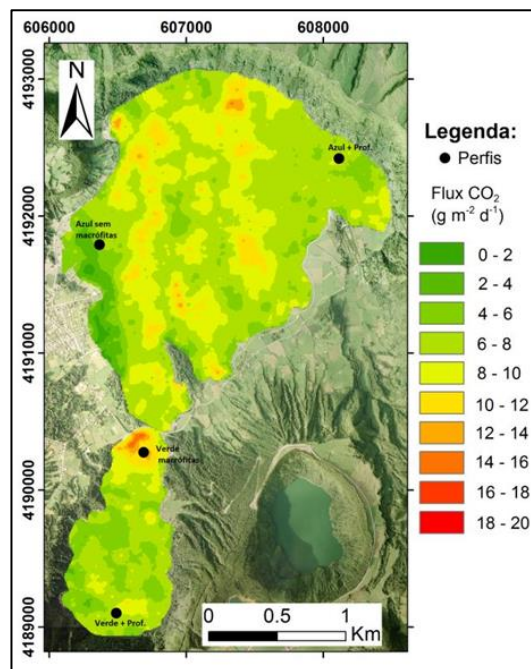


Figura 2.17 | Mapa de fluxo de CO₂ emitido pelas lagoas das Sete Cidades (tamanho da célula = 6 x 6 m) (in Andrade *et al.*, 2020).

SECÇÃO II

CARTOGRAFIA DE ÁREAS DE DESGASEIFICAÇÃO DIFUSA E ESTRUTURAS TECTÓNICAS

3 | METODOLOGIA

3.1 | Nota prévia

A relação entre a libertação de CO₂ no solo e estruturas tectónicas tem vindo a ser demonstrada desde os anos 80 (*e.g.* Barnes *et al.*, 1978) e tem sido comprovada ao longo do tempo sob a forma de diversas metodologias e instrumentos analíticos (*e.g.* Duddridge *et al.*, 1991; Lewicki e Brantley, 2000; Guerra e Lombardi, 2001; Baubron *et al.*, 2002; Cardellini *et al.*, 2003; Carapezza *et al.*, 2009; Mazot *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2012; Liuzzo *et al.*, 2015; Hunt *et al.*, 2017; Tamburello *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2019; Daskalopoulou *et al.*, 2019; Lamberti *et al.*, 2019; Camarda *et al.*, 2020; Collignon *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021; Hutchison *et al.*, 2023; Taussi *et al.*, 2023; Viveiros *et al.*, 2023). Uma das abordagens mais utilizadas para evidenciar esta relação encontra-se descrita em Baubron *et al.* (2002) e consiste em definir perfis de fluxo de gás que cruzem estruturas tectónicas. Com este método é possível investigar a atividade das estruturas em causa e determinar se estas possuem algum tipo de controlo estrutural sobre o fluxo emitido a partir do solo. A progressiva evolução dos instrumentos analíticos e das técnicas tem permitido o desenvolvimento de estudos cada vez mais complexos, como é o caso de Ma *et al.* (2021), que efetuou um estudo de raios gama como método de delimitação das falhas na área de estudo.

O presente capítulo irá focar-se essencialmente na caracterização das metodologias de amostragem e da aquisição dos dados, bem como nos equipamentos utilizados. Ainda incluirá a vertente de tratamento dos dados, onde serão descritas as abordagens estatísticas e as análises tectónicas aplicadas, assim como os perfis de desgaseificação efetuados.

3.2 | Amostragem

3.2.1 | Fluxo de CO₂ no solo

Nas últimas décadas têm sido utilizadas diferentes técnicas para quantificar as emissões difusas de CO₂, podendo ser subdivididas em métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos baseiam-se na estimativa da concentração de CO₂ a diferentes profundidades, aplicando um modelo teórico unidimensional de transporte de gás num meio poroso homogêneo (Lei de Fick), sendo necessário considerar as propriedades do solo e o coeficiente de difusão do gás (Chiodini, *et al.*, 1998; Camarda *et al.*, 2006). Quanto aos métodos diretos, a determinação do fluxo de gás pode ser efetuada através de procedimentos dinâmicos e estáticos. No que diz respeito aos procedimentos dinâmicos, estes consistem na medição da concentração de CO₂ no solo e no ar atmosférico através de uma sonda inserida no solo, a uma determinada profundidade, à qual está associada uma bomba de aspiração que auxilia na entrada de gás para conseqüente medição do seu valor constante, denominada “concentração dinâmica” (Gurrieri e Valenza, 1988; Camarda *et al.*, 2006). O fluxo através do solo é posteriormente calculado com recurso a uma função que envolve a concentração medida, a taxa de aspiração, uma constante dependente das características do aparelho, a permeabilidade do solo e o próprio fluxo imposto, constringindo o uso desta técnica tal como no método indireto (Gurrieri e Valenza, 1988).

Os procedimentos estáticos englobam diversas técnicas, desde a utilização de soluções alcalinas como forma de retenção do CO₂ proveniente do solo até a medições diretas do solo, como o método da câmara de acumulação (Chiodini *et al.*, 1998).

O método da câmara de acumulação ou método da câmara fechada (Chiodini *et al.*, 1998) consiste na medição da variação da concentração de CO₂, obtida através da determinação da taxa de aumento no interior de uma câmara cilíndrica invertida de fundo aberto de volume conhecido, colocada na superfície do solo durante um período de tempo (Parkinson, 1981; Chiodini *et al.*, 1998). A mistura de gás acumulada no interior da câmara de acumulação é garantida pelo uso de uma ventoinha, necessária para a precisão das medições de fluxo de CO₂,

e é continuamente aspirada por uma bomba e transportada para um detetor de infravermelhos (IRGA), de modo a evitar a entrada de água (Fig. 3.1). Os valores da concentração de CO₂ são adquiridos por um conversor analógico-digital (PDA), e posteriormente representados num computador de mão, no qual é visualizada a variação da concentração em função do tempo, cabendo ao operador do instrumento seleccionar o segmento de reta que melhor se ajusta à curva representativa da concentração de CO₂ (Chiodini *et al.*, 1998; Evans *et al.*, 2001; Carapezza e Granieri, 2004). Atualmente, dependendo do modelo de instrumento e/ou programa utilizado, é possível seleccionar automaticamente o período de tempo com a melhor reta de regressão.

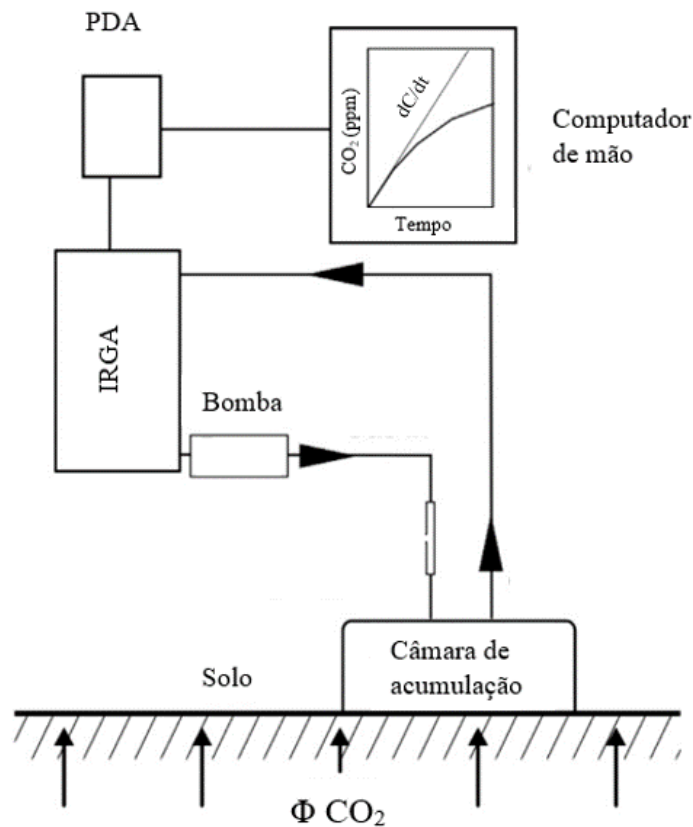


Figura 3.1 | Esquema da medição de fluxo de CO₂ no solo pelo método da câmara de acumulação. Legenda: PDA - conversor analógico-digital; IRGA - detetor de infravermelhos (adaptado de Fischer e Chiodini, 2015).

Os valores de fluxo de gás são calculados a partir do declive da reta escolhida, através de uma equação teórica, considerando ainda os valores de volume, pressão e temperatura da atmosfera da câmara (Norman *et al.*, 1992), apresentada abaixo (Equação 1.4):

$$\phi_{CO_2} = \frac{PV}{RTA} \left(\frac{d[CO_2]}{dt} \right) \quad (1.4)$$

ϕ_{CO_2} – Fluxo de CO₂;

$\frac{d[CO_2]}{dt}$ – Incremento da concentração de CO₂ no interior da câmara em função do tempo;

$\frac{P}{RT}$ – T e P são a temperatura interna e pressão na câmara, respetivamente, sendo o R a constante de gás universal (desde que o cálculo da concentração de gás assuma o comportamento de gás ideal);

A – Área da câmara;

V – Volume do sistema.

O método da câmara de acumulação foi inicialmente utilizado com o objetivo de determinar a respiração dos solos para a agricultura (Parkinson, 1981) e para medir o fluxo de outras espécies gasosas do solo, como o N₂O (Kinzig e Socolow, 1994), passando a ser aplicada anos mais tarde em ambientes vulcânicos e geotérmicos em diferentes locais do globo (*e.g.* Chiodini *et al.*, 1996; 1998; Padrón *et al.*, 2008; Viveiros *et al.*, 2010; Lamberti *et al.*, 2019; Villarroel, 2022). Este método constitui-se como uma das melhores técnicas de medição do fluxo de CO₂ em regiões vulcânicas e geotérmicas por ser um método simples, rápido e absoluto, que não requer nem correções, nem suposições, nem correlações que dependam das características físicas do solo (Tonani e Miele, 1991, *in* Chiodini *et al.*, 1998), como acontece com o método da concentração dinâmica. No entanto, é necessário ter em consideração alguns aspetos, já que qualquer perturbação no exterior (*e.g.* precipitação) ou no interior da câmara de acumulação (*e.g.* impedimento da rotação da ventoinha, no caso em que é aplicável) pode influenciar o

valor de fluxo de CO₂ (Lewicki *et al.*, 2005). Para que tal não aconteça e de modo a minimizar a influência do método na variabilidade do fluxo de CO₂, Lewicki *et al.* (2005) sugeriram uma série de procedimentos que se devem adotar antes e durante cada campanha de fluxo de CO₂ com a câmara de acumulação em ambientes vulcânicos e hidrotermais, descritos abaixo:

- a) Calibração do *IRGA* com os gases *standard* antes das medições de fluxo de CO₂;
- b) Definição da amostragem de modo a distribuir de forma homogênea os pontos de amostragem por toda a área estudada, de modo a obter conjuntos de dados adequados a um tratamento geoestatístico;
- c) Utilização de um dessecante/filtros em linha para evitar a entrada de água no *IRGA*;
- d) Minimização da perturbação do solo aquando do posicionamento da câmara de acumulação no solo, priorizando sempre que possível a colocação da câmara em locais aplanados;
- e) Selagem entre a câmara de acumulação e o solo de forma a prevenir a contaminação atmosférica do ar nas medições e a conservar um sistema isolado;
- f) Seleção do segmento linear da curva de concentração de CO₂ vs. tempo mais adequado (com menor erro associado); o período de recolha de dados deve ser suficiente de modo a permitir a mistura adequada do gás atmosférico com o gás do solo; alterações a curto prazo (alguns segundos ou menos) na curva devem ser ignoradas (*e.g.* aumento muito rápido nos primeiros segundos).
- g) Recuperação do circuito da câmara de acumulação com ar atmosférico antes de cada medição;
- h) Execução do levantamento de fluxo de CO₂ em condições meteorologicamente estáveis; as medições não devem ser efetuadas durante e imediatamente após períodos de precipitação, por exemplo.

3.2.1.1 | Medições de fluxo de CO₂ e de temperatura no solo

As medições de fluxo de CO₂ no solo foram efetuadas segundo o método da câmara de acumulação (Fig. 3.2), recorrendo a instrumentos portáteis (produzidos pela *West Systems*[®] *S.r.l.*) semelhantes aos das estações permanentes instaladas no Arquipélago dos Açores (*e.g.* Viveiros, 2010), e utilizados em estudos anteriores de fluxo de CO₂ espacial (*e.g.* Ferreira *et al.*, 2005; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010, 2012, 2015, 2017, 2020, 2023; Pacheco, 2013; Lisetti, 2013; Girault *et al.*, 2022). Para este trabalho foram consideradas as sugestões descritas por Lewicki *et al.* (2005).

No total, foram realizadas duas campanhas de fluxo de CO₂ e de temperatura no solo nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades, uma abrangendo ambas as plataformas lávicas, nomeadamente a da Ferraria e arredores e a dos Mosteiros (setembro e outubro de 2022), e outra mais específica, somente na plataforma lávica dos Mosteiros (maio de 2023). A execução desta segunda campanha encontra-se justificada posteriormente neste capítulo. Cada uma destas campanhas incluiu tanto medições de fluxo de CO₂ como de temperatura no solo.



Figura 3.2 | Medição de fluxo de CO₂ no solo executada na zona da Ferraria (ilha de S. Miguel, Açores), recorrendo ao método da câmara de acumulação.

O levantamento dos valores de fluxo de CO₂ e de pressão atmosférica em cada ponto de amostragem, em ambas as áreas, foi efetuado recorrendo a duas estações portáteis de fluxo de CO₂, WS1018 e WS0008, previamente calibradas no laboratório de geoquímica de gases do IVAR, Universidade dos Açores (Fig. 3.2). Estas estações são dotadas de um detetor de CO₂ da marca *LICOR*, modelo *LI-800 (L-IR)*, que efetua medições até aos 20.000 ppm e medições de fluxo de CO₂ entre 0 e 30.000 g m⁻² d⁻¹ (West Systems, 2014). Ambas as estações possuem uma câmara de acumulação com 3,0 × 10⁻³ m³ de volume interno.

A visualização dos dados (de fluxo e de pressão atmosférica) foi feita através de smartphone, recorrendo à aplicação *FluxManager 0.9.35* (produzida pela *West Systems® S.r.l.*). As localizações dos pontos de amostragem foram obtidas através de dois *GPS*, modelos *Garmin GPSMAP® 62s* e *86s*, com precisões de ≈ 5 e 3 m, respetivamente.

Os valores de temperatura do ar e do solo, a cerca de 10 cm de profundidade, foram medidos recorrendo a um termómetro *Rotronic®*, modelo *T51*, com uma sonda termoeleétrica tipo *K*, de 1 cm de diâmetro.

Para além dos valores de fluxo de CO₂ no solo e das temperaturas, também foi medida a concentração de diferentes gases (CO₂, H₂S, CO e CH₄) no interior de um poço (Fig. 3.3), descrito mais a frente neste capítulo, utilizando um analisador de gases da marca *Geotechnical Instruments®*, modelo *GA2000 plus*.



Figura 3.3 | Medição de concentração de gases no interior do poço localizado na plataforma lávica dos Mosteiros (ilha de S. Miguel, Açores).

Os dados adquiridos foram registados no campo numa tabela e assinaladas as posições das amostras em ortofotomapas, formato A4, representativos das plataformas lávicas da Ferraria e dos Mosteiros, à escala 1:6.000 e 1:8.000, respetivamente, sendo posteriormente transcritos para formato digital. Os pontos georreferenciados foram introduzidos num Sistema de Informação Geográfica (*software ArcGIS® 10.8.1 da ESRI*) e as posições corrigidas manualmente de acordo com os ortofotomapas, quando necessário. A conversão de ppm s⁻¹ para g m⁻² d⁻¹ foi, posteriormente, efetuada considerando os valores da pressão barométrica e da temperatura do ar na zona.

No que diz respeito à definição da estratégia de amostragem, é necessário ter em conta que o CO₂ não se liberta de forma homogénea por todo o espaço, sendo necessário definir uma estratégia adaptada à área de estudo de forma a quantificar a variabilidade espacial da zona, e que as condições de campo (*e.g.* características geomorfológicas, infraestruturas antropogénicas, acessibilidades) podem impedir a alocação dos pontos de amostragem na localização pretendida, influenciando de forma direta nas localizações de cada amostra, na distribuição final dos pontos e na qualidade das bases de dados. De forma a obter uma *grid* bem distribuída de pontos, traçou-se, inicialmente, num mapa os locais de amostragem pretendidos, sendo mais tarde rearranjados e realocados como esperado durante a execução da campanha.

Este estudo conta com um total de 939 medições de fluxo de CO₂ no solo realizadas nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades, organizadas tal como demonstra a tabela 3.1. A amostragem foi dividida essencialmente em duas áreas principais: a plataforma lávica da Ferraria e arredores (base de dados “F”), com 585 medições, realizadas em toda a plataforma, estrada e ao redor dos cones vulcânicos lá existentes; e a dos Mosteiros (base de dados “M”), com 354 medições, realizadas ao longo de quatro perfis (Fig. 3.4). Esta divisão da amostragem permitiu a organização do trabalho em zonas distintas, bem como o estudo dos diferentes objetivos para cada área (Fig. 3.5).

Tabela 3.2 | Número de medições e estratégia de amostragem utilizada nas diferentes áreas de estudo. A base de dados assinalada com asterisco (*) resulta do somatório das restantes bases de dados do local. Ref. – referência.

Área de estudo	Ref.	Nº de medições	Estratégia de amostragem	Área (m ²)	Período de amostragem
Ferraria	F	585	Irregular (≈ 2 – 10 m de distância)	55.819	09/2022 – 10/2022
Mosteiros*	M	354	Irregular/perfis (≈ 12 – 25 m de distância)	62.524	10/2022 e 05/2023
Mosteiros	M1	64	Irregular/perfis (≈ 20 – 25 m de distância)	-	10/2022
Mosteiros	M2	290	Irregular/perfis (≈ 12 – 15 m de distância)	-	05/2023

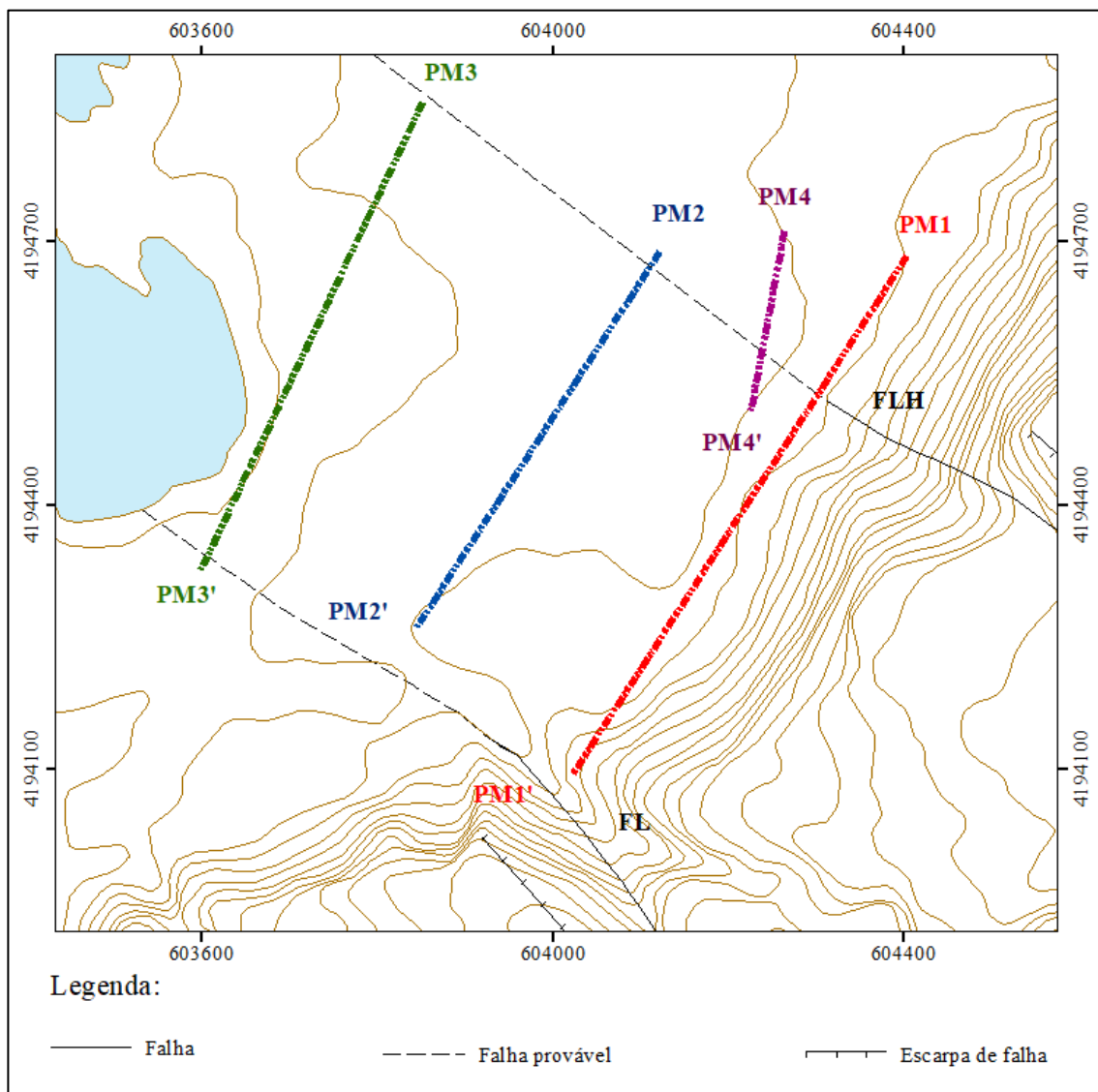


Figura 3.4 | Localização dos perfis de amostragem definidos na plataforma lávica dos Mosteiros. A equidistância vertical das curvas de nível é de 10 m. Legenda: PM – Perfil Mosteiros; FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

A maior parte das medições na plataforma, estrada e arredores dos cones vulcânicos da Ferraria (base dados “F”; Tabela 3.1) foram representados com uma malha irregular (Fig. 3.5), com cerca de 7 a 10 m de distância, devido à morfologia, infraestruturas e acessibilidades presentes na área, salvo algumas exceções em locais mais aplanados e desprovidos de infraestruturas onde se pôde proceder a uma distribuição mais regular. Em zonas de afloramento contendo falhas, o espaçamento das medições foi reduzido para cerca de 2 a 5 m, de forma a identificar à *posteriori* se a libertação de gás poderá estar relacionada com a existência de falhas na zona. Nesta área, principalmente no que diz respeito à zona da plataforma, optou-se por efetuar um estudo mais pormenorizado do fluxo de CO₂ e da temperatura do solo, de forma a que pudessem ser aplicados métodos geoestatísticos aos dados, a fim de elaborar mapas de distribuição espacial, estimar a quantidade de CO₂ emitido, identificar a quantidade de CO₂ de origem hidrotermal e tentar estabelecer uma correlação com as estruturas tectónicas.

No que diz respeito aos Mosteiros, a estratégia de amostragem contou com dois momentos distintos, distribuídos pelas duas campanhas realizadas. Por ser uma área relativamente extensa, a primeira amostragem (base de dados “M1”; Tabela 3.1) foi realizada com intervalos de 20 a 25 m, ao longo de três perfis com direção NE-SW e um com orientação NNE-SSW (Fig. 3.4), que atravessavam a parte central da plataforma de forma a incluírem tanto a Falha da Lombinha como a Falha da Lomba dos Homens descritas em Carmo (2013). A execução do último perfil mencionado (perfil “PM4”) justifica-se pelo facto do perfil PM1-PM1’ não ser contínuo, devido à existência de vegetação muito densa. Consequentemente, efetuou-se um desvio, de cerca de 100 m para W (Fig. 3.4), realizando o perfil PM4-PM4’, paralelo à lacuna. Decidiu-se, posteriormente, efetuar uma segunda amostragem, sob os mesmos perfis referidos anteriormente, mas com menor distância entre os pontos (12 a 15 m) de forma a melhor identificar eventuais variações espaciais. Esta segunda campanha incluiu, também, medições com o mesmo distanciamento descrito anteriormente nas imediações de um poço antigo (Fig. 3.6) que, segundo a população local, terá provocado, nos anos 90, um morto devido à inalação de CO₂. Em ambas as campanhas, a existência de elevada densidade do edificado, o revestimento do solo com calçada e breu, e a passagem de uma linha de água, impedem o acesso à Falha da Lombinha, principalmente a E da fajã lávica, pelo que apenas um dos perfis (PM3) cruza aquela estrutura tectónica (Fig. 3.4). O estudo desta área, ao contrário da plataforma da Ferraria, não contemplou a análise geoestatística dos dados, sendo realizada

apenas a análise estatística, pois a amostragem não é representativa de todas as direções espaciais da área. Esta análise permitiu a identificar a origem dos dados, estimar a quantidade de CO₂ emitido e tentar estabelecer uma correlação com as estruturas tectónicas da zona.

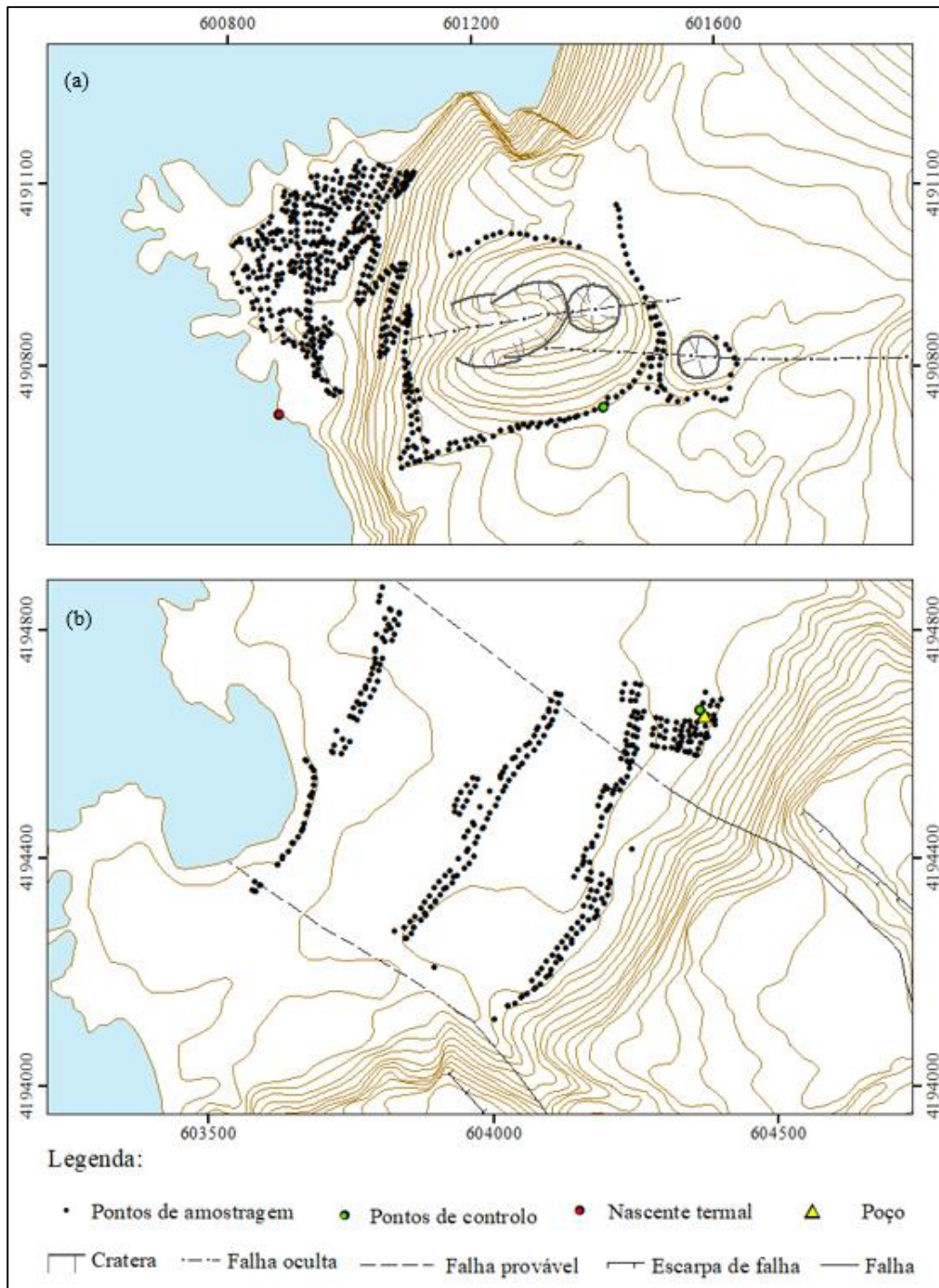


Figura 3.5 | Localização dos pontos de amostragem nas plataformas lávicas (a) da Ferraria e (b) dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades. A equidistância vertical das curvas de nível é de 10 m. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.



Figura 3.6 | Poço antigo, nos Mosteiros, onde terá ocorrido uma morte por inalação de CO_2 . O círculo a amarelo indica a localização do ponto de controle e a circunferência a branco o poço referido. As fotografias 1 e 2 apresentam uma aproximação ao poço e o interior do mesmo, respetivamente. Fotografias de 15/11/2023.

Considerando que os parâmetros meteorológicos podem afetar a variabilidade dos valores de fluxo de CO₂ (e.g. Viveiros *et al.*, 2008, 2015; Oliveira *et al.*, 2018), foram definidos na área de estudo pontos de controlo. Este procedimento tem como objetivo a recolha de dados comparativos necessários para a verificação de possíveis variações temporais do fluxo de CO₂. Estes pontos de controlo foram estabelecidos em zonas acessíveis e facilmente reconhecíveis no campo de modo a facilitar a sua localização. Para cada zona de estudo foi definido um ponto de controlo, os quais se encontram assinalados na figura 3.5.

A área estudada caracteriza-se pela presença de diferentes tipos de vegetação e de solos, tendo-se evitado a realização de medições nas proximidades de árvores de grande porte.

3.2.2 | Aquisição de dados tectónicos

Tal como foi referido anteriormente, as falhas podem aumentar ou reduzir a permeabilidade das rochas e do solo dependendo do seu estado de atividade. Esta emissão de gás pode dar origem a zonas de anomalia de gás no solo. A atividade de uma falha pode ser demonstrada através de inúmeros critérios, dos quais se salientam os geológicos (geomorfológicos e estratigráficos), os históricos, os geofísicos (normalmente sismológicos), os geodésicos (e.g. Slemmons e McKinney, 1977) e os geoquímicos (e.g. Giammanco *et al.*, 1997; Baubron *et al.*, 2002; Faria, 2002; Sousa, 2003; Marcos, 2006; Silva, 2006; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010; Carmo, 2013; Tamburello *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2019; Lamberti *et al.*, 2019; Buttitta *et al.*, 2020; Camarda *et al.*, 2020; Collignon *et al.*, 2021; Hutchison *et al.*, 2023), sendo utilizados para o âmbito desta dissertação os geológicos e os geoquímicos.

A aquisição dos dados tectónicos dos Mosteiros e da Ferraria iniciou-se com trabalho de gabinete, procedendo-se numa primeira fase à recolha e análise de bibliografia alusiva à tectónica da área de estudo e das metodologias necessárias para o levantamento dos dados. Esta etapa ainda foi marcada pela análise de ortofotomapas, à mesma escala dos utilizados anteriormente em formato A0, pela observação e interpretação estereoscópica de fotografia aérea, na escala aproximada 1:8.000, de 1995, e 1:15.000, de 2001, fiadas 30 e 5, respetivamente, e por estudos e observações de campo da estratigrafia da área. Neste estudo, a

investigação foi predominantemente direcionada para uma análise da atividade tectónica com base em critérios geológicos, sempre que possível, comprovados por outro tipo de critérios.

Os estudos geológicos desenvolveram-se ao longo de duas campanhas de campo (setembro de 2022 e fevereiro de 2023) nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. As campanhas permitiram a identificação e a validação de falhas não documentadas em trabalhos anteriores e falhas já referidas em Carmo (2013) e Carmo *et al.* (2015), assim como o estudo pormenorizado de afloramentos (*e.g.* taludes, arribas litorais) contendo falhas. A primeira campanha, efetuada nas duas plataformas, foi destinada ao reconhecimento da área, identificando afloramentos que contivessem falhas que ainda não tivessem sido referenciadas e que pudessem ter impacto nos objetivos do trabalho, procedendo à validação de todas as eventuais estruturas tectónicas cartografadas da área. A segunda visita ao campo compreendeu o estudo pormenorizado dos afloramentos selecionados, nomeadamente na plataforma lávica da Ferraria (Fig. 3.7), utilizando para tal uma bússola (Fig. 3.8), modelo *MC-1* da *Suunto*[®], para medir as inclinações e as direções (atitudes) das várias estruturas tectónicas identificadas, e a elaboração do perfil do talude com as respetivas falhas. Também se procedeu à medição da altura do talude e das falhas através de um instrumento de medição indireta a laser, um distanciómetro (Fig. 3.8) da *Leica DISTOTM* modelo *D8*.

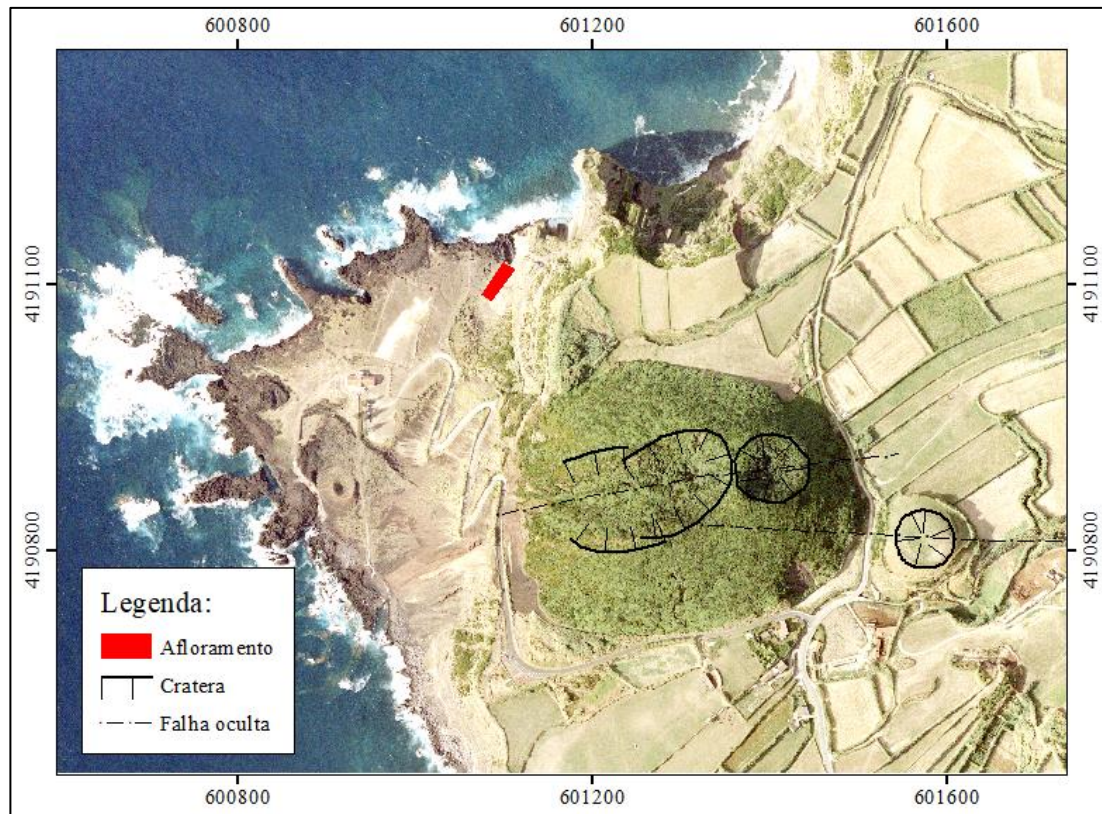


Figura 0.7 | Localização do afloramento selecionado, contendo falhas, na plataforma lávica da Ferraria. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

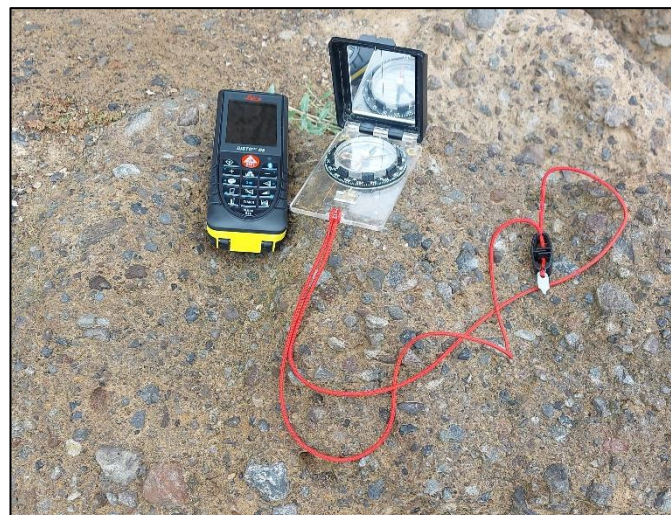


Figura 0.8 | Equipamento utilizado na segunda campanha de campo. À esquerda encontra-se o distanciômetro e à direita a bússola.

3.3 | Análise dos dados

3.3.1 | Fluxo de CO₂

3.3.1.1 | Abordagem Estatística Gráfica (GSA)

Em áreas hidrotermais, o fluxo de CO₂ no solo pode-se caracterizar por apresentar distribuições estatísticas complexas resultantes da mistura de diferentes populações estatísticas, evidenciando a coexistência de fontes de CO₂ hidrotermais e biogénicas (Chiodini *et al.*, 1998, 2008). De forma a identificar as diferentes populações representativas das diversas fontes de CO₂ existentes nas DDS (Chiodini *et al.*, 1998), aplicaram-se, aos dados, metodologias estatísticas baseadas em gráficos de probabilidade acumulada. A atividade biogénica nos solos é normalmente demonstrada através dos valores mais baixos de fluxo de CO₂, constituindo-se esta população como a de base. Os valores mais elevados de fluxo de CO₂ poderão estar associados a desgaseificação de CO₂ de origem profunda (vulcânica-hidrotermal). Esta metodologia de distinção das populações tem vindo a ser aplicada, mesmo nos dias de hoje, em praticamente todos os trabalhos relacionados com o fluxo de CO₂ em zonas vulcânicas-hidrotermais, não só para identificar as fontes de CO₂ como também para definir um limiar razoável e representativo do fluxo de CO₂ (*e.g.* Chiodini *et al.*, 2001; Cardellini *et al.*, 2003, 2017; Carapezza *et al.*, 2009; Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010, 2017, 2020; Lisetti, 2013; Andrade, 2014; Bini *et al.*, 2019, 2020; Lamberti *et al.*, 2019; Andrade *et al.*, 2020; Collignon *et al.*, 2021; Taussi *et al.*, 2023).

Tal como foi referido anteriormente, o fluxo de CO₂ no solo nas DDS pode ser emitido de diversas fontes, desde biogénicas a vulcânicas. Esta dualidade de origens de gás resulta, normalmente, em distribuições bimodais dos valores de CO₂, que se traduz nos gráficos de probabilidade logarítmica por uma curva com um ponto de inflexão, descrevendo a distribuição teórica de duas populações log-normal sobrepostas. No caso de um gráfico de probabilidade logarítmica com uma só família seria representada uma reta, e com n populações log-normais

sobrepostas resultaria numa curva caracterizada por $n-1$ pontos de inflexão. Um gráfico de probabilidade logarítmica normal é uma representação gráfica que auxilia na avaliação da proximidade que uma distribuição de um conjunto de dados tem de ser normal (gaussiana), estabelecendo uma reta no caso da distribuição ser normal (Cardellini *et al.*, 2003; Viveiros, 2010).

O método da Abordagem Estatística Gráfica (*GSA*, na terminologia inglesa, como é mais conhecido) (Chiodini *et al.*, 1998), utilizado no âmbito deste estudo, consiste na partição destas distribuições complexas em diferentes populações log-normais individuais. A partição das populações da área de estudo foi efetuada utilizando o executável *chiodSC.exe* (propriedade de G. Chiodini, INGV), selecionando os valores mais apropriados para o ajuste de cada população à curva dos dados. A estatística de cada população (média, desvio padrão e proporção de cada população log-normal particionada) foi então estimada graficamente, aplicando o procedimento proposto por Sinclair (1974), e a validade do modelo e dos parâmetros estatísticos estimados das populações foi avaliada comparando, num gráfico de probabilidades, a distribuição resultante da combinação das populações teóricas com a distribuição dos dados. O fluxo médio de CO₂ e o intervalo de confiança de 90% da média foram, posteriormente, calculados através do estimador t de Sichel (David, 1977). A libertação total de CO₂ da área de estudo obtém-se através do somatório das contribuições de cada população, calculadas pelo produto sucessivo da área da zona de estudo (S), pela porção correspondente da população (S_i) e pelo valor do estimador t . Para a aplicação do método *GSA*, os valores de fluxo devem ser previamente convertidos no seu logaritmo (Chiodini *et al.*, 1998; Cardellini *et al.*, 2003; Viveiros, 2010; Collignon *et al.*, 2021).

3.3.1.2 | Simulação Sequencial Gaussiana (*sGs*)

A geoestatística é um ramo da estatística utilizado nas Ciências da Terra que considera que existe relação espacial entre a distribuição dos valores. As técnicas de interpolação de dados assentam no conceito de continuidade espacial evidenciado na geoestatística e são, normalmente, utilizadas na análise de dados espaciais, procedendo à estimativa de locais não amostrados. Esta estimativa é realizada através da correlação espacial entre dados próximos (Goovaerts, 1999), considerando que dois dados próximos têm maior probabilidade de ser semelhantes do que dois dados afastados, uma vez que a distribuição espacial dos valores não

é aleatória (Isaaks e Srivastava, 1989). Apesar de existirem muitos métodos de interpolação, a maior parte deles (*e.g. kriging*) não preserva os dados originais, realizando suavizações irregulares que provocam possíveis estruturas artificiais (Isaaks e Srivastava, 1989; Deutsch e Journel, 1998; Goovaerts, 1999).

Nesta sequência, os algoritmos de simulação estocástica têm como objetivo preservar a variabilidade dos atributos medidos, respeitando os dados originais sem a necessidade de suavizar os valores extremos. O primeiro estudo em que este método foi aplicado a dados de fluxo de CO₂ no solo foi realizado por Cardellini *et al.* (2003), sob a forma de simulações Gaussianas sequenciais (*sGs*). A partir desse trabalho, os procedimentos *sGs* passaram a ser cada vez mais adotados nos estudos de modelação dos fluxos difusos de CO₂ do solo em ambientes vulcânicos e geotérmicos, substituindo os métodos tradicionais de interpolação (*e.g. Chiodini et al.*, 2004, 2007, 2021; Lewicki *et al.*, 2005; Granieri *et al.*, 2010; Viveiros *et al.*, 2010, 2017, 2020; Hernández *et al.*, 2012; Lisetti, 2013; Fischer e Chiodini, 2015; Epiard *et al.*, 2017; Bini *et al.*, 2019, 2020; Daskalopoulou *et al.*, 2019; Lamberti *et al.*, 2019; Camarda *et al.*, 2020; Pérez *et al.*, 2020; Collignon *et al.*, 2021; Girault *et al.*, 2022; Villarroel, 2022; Hutchison *et al.*, 2023). Esta metodologia revela-se adequada tanto para modelar a variabilidade espacial e calcular a produção total de CO₂, como também para quantificar a incerteza das estimativas.

A técnica *sGs* é efetuada utilizando o algoritmo descrito por Deutsch e Journel (1998) e consiste na realização de múltiplas simulações da distribuição espacial de um atributo (*e.g. o* fluxo de CO₂ no solo). A simulação representa-se como condicional e sequencial, dependendo a variável simulada em cada local não amostrado, obtida através da função de distribuição normal definida pela média e pela variância da *krigagem*, tanto dos dados originais como dos previamente simulados na sua vizinhança (Deutsch e Journel, 1998; Goovaerts, 1999; Cardellini *et al.*, 2003). Para a execução desta metodologia, é necessário garantir previamente que a distribuição dos dados (*e.g. histograma*) é normal (Deutsch e Journel, 1998; Goovaerts *et al.*, 2005), uma vez que são utilizados modelos multi-Gaussianos e estes requerem habitualmente uma transformação dos dados para a distribuição normal, realizada através da substituição dos valores originais pelos quantis correspondentes na distribuição normal padrão (Deutsch e Journel, 1998). As simulações podem ser realizadas utilizando diferentes tipos de *krigagem* como método de interpolação, sendo que, para uma abordagem multi-Gaussiana com resultados normais, a mais apropriada é a *krigagem* simples. As diferenças observadas entre as múltiplas realizações podem ser utilizadas como uma medida de incerteza (Goovaerts, 2001),

fundamental para a avaliação da adequação das metodologias de amostragem utilizadas e para a validação dos resultados.

O método *sGs* foi aplicado aos dados de fluxo de CO₂ na zona da plataforma lávica e em parte da estrada de acesso à Ferraria, utilizando o comando *Sequential Gaussian (sgsim)*, baseado no algoritmo de Deutsch e Journel (1998), inserido no *software WinGslib* (versão 1.5.6), uma caixa de ferramentas que armazena algoritmos de *software* geostatístico para todos os programas *GSLIB* (Deutsch e Journel, 1998). A aplicação deste procedimento nesta área possibilitou, principalmente, a elaboração de mapas de distribuição espacial do CO₂ e da temperatura, já que permite estimar dados em locais não amostrados, e a elaboração de mapas de probabilidades, responsáveis por estimar a quantidade de CO₂ emitido de origem hidrotermal e por identificar as *DDS*. Toda a metodologia efetuada encontra-se esquematizada abaixo (Fig. 3.9):

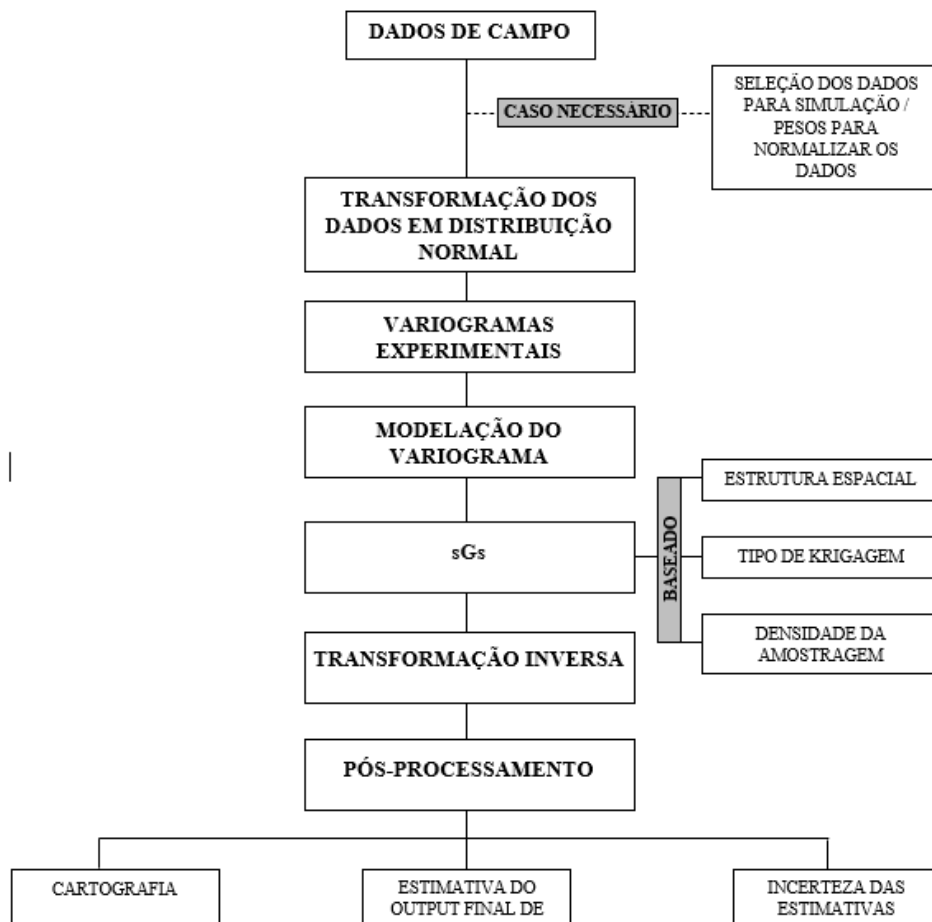


Figura 0.9 | Esquema utilizado para a aplicação da *sGs* (adaptado de Viveiros, 2010).

O procedimento iniciou-se com a seleção dos dados que entrariam para a simulação, ou seja, que tivessem alguma relação entre si para efeitos de interpolação. Os dados obtidos na campanha de amostragem na zona da Ferraria, tal como se pode observar na figura 3.5, encontram-se melhor distribuídos na zona da plataforma relativamente à restante área, por ser uma área mais ampla. Na estrada e ao redor dos cones vulcânicos, a distribuição é mais restrita uma vez que a estrada é limitada por um lado pelo Pico das Camarinhas e pelo outro por vertentes inclinadas, disponibilizando apenas as margens para efeitos de medição, e a amostragem ao redor das formas vulcânicas apenas serviu para identificar o possível prolongamento de alguma falha cartografada.

Pelo facto da distribuição da amostragem nestas áreas não ser representativa e se encontrarem afastadas dos dados da plataforma, efetuaram-se testes com diferentes conjuntos de dados (*e.g.* toda a amostragem, a plataforma e a estrada, e a plataforma e parte da estrada) no *WinGslib* a fim de determinar se possuíam algum tipo de relação. Destes testes foi possível constatar que apenas parte dos dados amostrados na estrada apresentavam correlação com os dados da plataforma, sendo esta parte e a da plataforma contabilizadas para a realização da simulação.

Selecionados os dados e, após a identificação de que os dados não seguiam a distribuição normal (revelado no histograma), procedeu-se à sua transformação para uma distribuição normal através do processo *normal score transform (nscore)* (Deutsch e Journel, 1998; Cardellini *et al.*, 2003).

Os dados transformados foram, posteriormente, tratados através do comando *irregularly spaced data variogram computation (gamv)* e projetados na forma de variogramas experimentais com a ferramenta *variogram (vargplt)*, com o intuito de identificar o variograma mais adequado para a gama de valores obtida. As variáveis *number of lags*, *unit lag separation distance* e *lags tolerance* foram estabelecidas de acordo com a distância (em metros) das medições efetuadas em campo e com a área total das medições. A construção do modelo de variograma a aplicar na simulação foi efetuada utilizando o comando *variogram file from model (vmodel)* e teve como base o variograma elegido anteriormente, procurando ajustar o modelo ao mesmo. Na execução desta etapa, foram utilizados os parâmetros estabelecidos anteriormente, definidas novas variáveis (*e.g.* *nugget*, *sill* e *range*) (Fig. 3.10) e selecionado o tipo de modelo que mais se adequa ao variograma (Fig. 3.11). Tal como foi descrito anteriormente, as simulações foram realizadas aplicando o programa *sgsim*.

Ao todo foram geradas 100 realizações de fluxo e de temperatura, considerando os dados do modelo e da área. Todas as figuras geradas no programa *WinGslib* foram visualizadas através do *software GView*, versão 2.6.

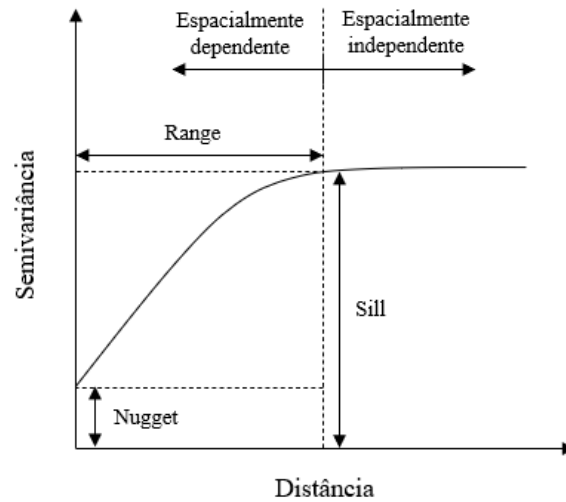


Figura 0.10 | Exemplo de um variograma e as suas características principais. Legenda: *sill* – patamar; *range* – alcance; *nugget* – efeito pepita (adaptado de Bohling, 2005).

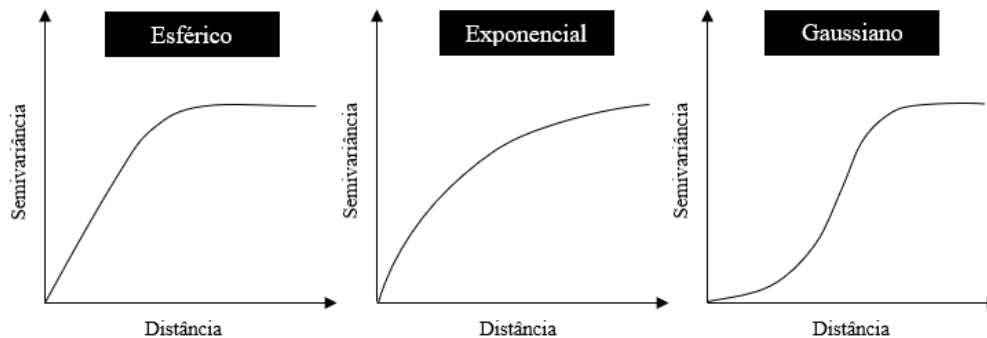


Figura 0.11 | Exemplos de modelos de variogramas teóricos mais utilizados (adaptado de Bohling, 2005).

Os resultados das simulações foram apresentados sob a forma de dois mapas distintos, um tipo-E e um de probabilidade, utilizando o comando *processing of multiple simulations (postsim)*. O mapa tipo-E apresenta os valores previstos em qualquer localização, obtidos através da média de todas as simulações, e revela-se essencial no cálculo da estimativa da desgaseificação difusa total da área (Cardellini *et al.*, 2003; Villarroel, 2022). O mapa de probabilidades reporta a probabilidade de cada valor simulado ser superior a um determinado

limiar, podendo ser usado para definir as *DDS* e estimar a desgaseificação hidrotermal, já que estas zonas são caracterizadas por terem valores anómalos de CO₂ (*e.g.* Cardellini *et al.*, 2003; Viveiros *et al.*, 2010, 2020; Villarroel, 2022).

3.3.2 | Dados tectónicos

A recolha de toda a informação de campo e de gabinete teve como objetivo a análise geométrica e cinemática dos acidentes tectónicos identificados e a sua cartografia. Neste estudo foram identificadas estruturas tectónicas de interesse na plataforma lávica da Ferraria.

A análise geométrica das estruturas identificadas foi efetuada a partir do programa informático de geologia estrutural *TectonicsFP*[®] (Ortner *et al.*, 2002), versão 1.7.9, através da interpretação de histogramas circulares de frequências não ponderadas das direções e de representações estereográficas na rede de *Schmidt*. A análise foi efetuada utilizando as inclinações e as direções cartográficas de máxima inclinação do plano de falha, previamente corrigidas em função da declinação magnética (ângulo entre o norte geográfico e o norte magnético), calculada com base na informação disponibilizada pela folha 27 (2001) da Carta Militar de Portugal, editada pelo Instituto Geográfico do Exército. Esta correção varia de local para local e, num mesmo local, varia com o passar do tempo. Neste estudo, a correção introduzida foi de 7°W, considerando a declinação magnética no ano de publicação da carta e da variação média anual. A direção cartográfica resulta, assim, da diferença entre a direção magnética do plano, medida no campo, e a declinação magnética. Com as direções cartográficas já obtidas, utilizou-se o sentido de inclinação das estruturas para calcular as direções cartográficas de máxima inclinação dos planos de falha. Quanto às estruturas com sentido de inclinação desconhecido (*e.g.* alinhamentos de edifícios vulcânicos, lineamentos), cujas características não se encontram expostas em afloramentos, considerou-se o ângulo de inclinação como 90° (Carmo, 2013), como é o caso da Falha do Pico das Camarinhas.

A análise cinemática foi realizada apenas através da deslocação de marcadores estratigráficos, uma vez que não foram identificadas nem evidências geomorfológicas, nem estrias nas estruturas em análise. Os marcadores de natureza estratigráfica apresentam, no entanto, alguns inconvenientes aquando da sua utilização já que, de forma geral, apenas

permitem a determinação de separações verticais, resultando parte delas diretamente da componente horizontal da movimentação (Madeira, 1998).

3.3.3 | Perfis de desgaseificação e estruturas tectónicas

Após a identificação de valores anómalos de fluxo de CO₂ e das consequentes *DDS*, integraram-se os dados da geoquímica e da geofísica (*e.g.* topografia) para a elaboração de perfis de desgaseificação com as estruturas tectónicas inseridas. Estes perfis permitiram estudar a potencial correlação entre a existência de falhas e as áreas de emissão de gás.

A elaboração dos perfis de desgaseificação contou com a execução de várias etapas, recorrendo a diferentes ferramentas. A primeira etapa diz respeito à delimitação de perfis topográficos utilizando a ferramenta *3D Analyst* do *ArcGIS*, após a produção do modelo digital do terreno da área (Fig. 3.12). Estes perfis foram traçados considerando as localizações das medições efetuadas e as estruturas tectónicas identificadas. A exportação dos dados dos perfis foi realizada no formato de tabela *HTML*. Os dados exportados foram, posteriormente, transcritos para um documento Excel, onde se procedeu à introdução manual de cada valor de fluxo de CO₂ com base na sua distância relativamente ao perfil, estabelecendo assim o perfil de desgaseificação. A última etapa consiste na inserção das estruturas tectónicas reconhecidas no perfil, tendo em conta a sua localização no mesmo e a sua inclinação. No caso da plataforma dos Mosteiros, utilizaram-se os mesmos perfis inicialmente delineados para a realização das medições de fluxo de CO₂ e de temperatura como perfis de desgaseificação.

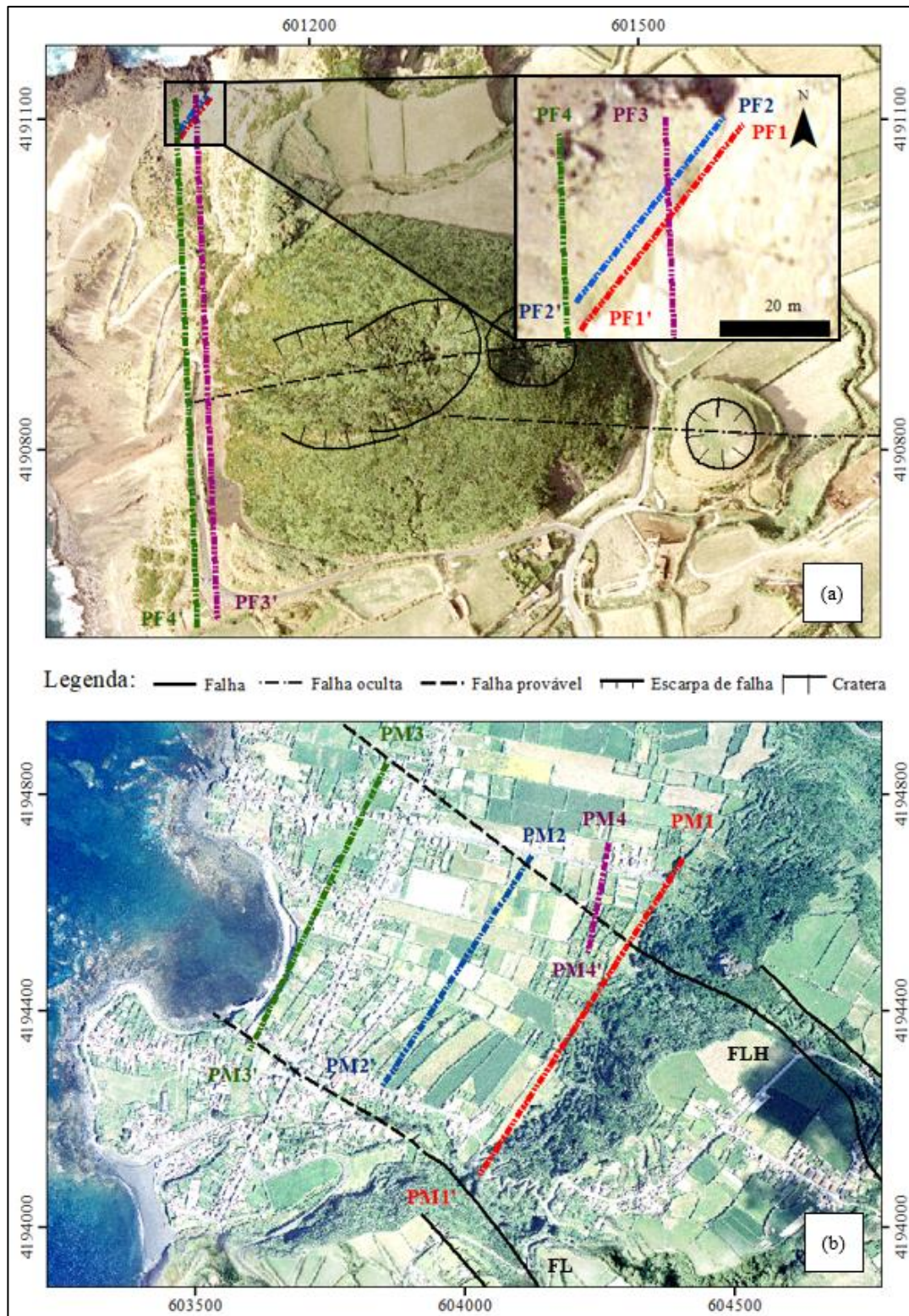


Figura 3.12 | Localização dos perfis de desgaseificação elaborados na área de estudo. A figura (a) refere-se à plataforma lávica da Ferraria e a (b) à plataforma lávica dos Mosteiros. Legenda: PF – Perfil Ferraria; PM – Perfil Mosteiros; FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 | Nota prévia

O capítulo 4 irá focar-se na apresentação dos resultados e nas abordagens estatísticas aplicadas aos dados, nomeadamente na definição das populações de fluxo de CO₂ no solo e na elaboração dos mapas de desgaseificação de fluxo de CO₂ e de temperatura no solo, nas análises estruturais, no que diz respeito à atividade das falhas tectónicas observadas em afloramentos, e na respetiva correlação dos dados de fluxo de CO₂ no solo com as estruturas tectónicas.

Para além da apresentação dos resultados, este capítulo contempla a discussão dos mesmos tendo por base também trabalhos anteriores.

4.2 | Estatística descritiva

Os valores de fluxo de CO₂ no solo nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades revelam-se bastante variáveis, registrando valores entre 0 e 932,4 g m⁻² d⁻¹ para a Ferraria e entre 0,6 e 144,9 g m⁻² d⁻¹ para os Mosteiros. A média e a mediana dos valores de fluxo de CO₂ medidos na plataforma dos Mosteiros ($\approx 19,4$ e $\approx 17,1$ g m⁻² d⁻¹, respectivamente) são superiores às observadas na Ferraria ($\approx 11,9$ e $\approx 5,2$ g m⁻² d⁻¹, respectivamente), no entanto, os valores mais elevados de fluxo encontram-se na plataforma da Ferraria, na zona próxima da nascente termal.

Os valores de temperatura no solo oscilam entre os 19,4 e os 40,2°C na Ferraria e os 14,7 e os 30,9°C nos Mosteiros, revelando uma média de $\approx 24,3$ e $\approx 21,2$ °C e uma mediana de $\approx 22,7$ e $\approx 20,7$ °C, respectivamente. Quanto à temperatura do ar, no período compreendido entre setembro e outubro de 2022, os valores variaram entre 20,1 e 29,8°C na plataforma da Ferraria, com uma média e uma mediana a rondar os $\approx 23,2$ e os $\approx 22,5$ °C, respectivamente. Na fajã lávica dos Mosteiros, a temperatura oscilou entre 15,9 e 26,7°C no período de amostragem (outubro de 2022 e maio de 2024), apresentando uma média de $\approx 21,4$ °C e uma mediana de $\approx 21,3$ °C. É importante salientar que a campanha referente à Ferraria foi realizada no verão e a dos Mosteiros no inverno, pelo que algumas das variações observadas podem ser o resultado de diferentes períodos do ano.

A estatística descritiva aplicada à base de dados encontra-se representada na tabela 4.1. Os dados das medições efetuadas estão disponíveis no ANEXO I e II.

Tabela 4.1 | Estatísticas descritivas das variáveis medidas nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades.

	Estatísticas descritivas	Área de estudo	
		Ferraria	Mosteiros
	Área de estudo	Ferraria	Mosteiros
	Referência	F	M
	Período de amostragem	09/2022-10/2022	10/2022 e 05/2023
	Número de pontos de controlo	1	1
	Número de medições	585	354
Fluxo de CO ₂	Média (g m ⁻² d ⁻¹)	11,9	19,4
	Mediana (g m ⁻² d ⁻¹)	5,2	17,1
	Mínimo (g m ⁻² d ⁻¹)	0,0	0,6
	Máximo (g m ⁻² d ⁻¹)	932,4	144,9
	Desvio-Padrão	56,8	15,2
Temperatura do solo	Média (°C)	24,3	21,2
	Mediana (°C)	22,7	20,7
	Mínimo (°C)	19,4	14,7
	Máximo (°C)	40,2	30,9
	Desvio-Padrão	4,1	3,4
Temperatura do ar	Média (°C)	23,2	21,4
	Mediana (°C)	22,5	21,3
	Mínimo (°C)	20,1	15,9
	Máximo (°C)	29,8	26,7
	Desvio-Padrão	2,1	2,0
Pressão barométrica	Média (mbar)	1.016,0	1.024,9
	Mediana (mbar)	1.020,5	1.029,9
	Mínimo (mbar)	985,5	990,8
	Máximo (mbar)	1.024,4	1.039,8
	Desvio-Padrão	9,5	13,8

4.3 | Origem do CO₂

Tal como descrito acima, o fluxo de CO₂ medido nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades apresenta uma grande variação nos seus valores, desde a ausência de fluxo de gás até valores superiores a 900 g m⁻² d⁻¹, sugerindo diferentes tipos de contribuição para o CO₂ libertado. De forma a caracterizar o fluxo de CO₂ emitido e a definir as possíveis origens deste gás, modelou-se o conjunto de dados aplicando o método gráfico GSA (Ponto 3.3.1.1). Os diagramas de probabilidade logarítmica acumulada efetuados com base nos valores de fluxo de CO₂ no solo nestas plataformas (Tabela 4.2) mostram a existência de várias populações (distribuições polimodais) (Fig. 4.1), sugerindo que a desgaseificação difusa de CO₂ no solo é alimentada por diversas fontes. A gama de valores de CO₂ associada a cada uma das populações identificadas (Tabela 4.2) propõe que o CO₂ nas duas plataformas pode ter origem biogénica e vulcânica-hidrotermal.

Tabela 4.2 | Parâmetros estatísticos das populações de fluxo de CO₂ e intervalos de confiança de 90% da média para as plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades.

População	Proporção (%)	Média do logaritmo de fluxo de CO ₂	Variância do logaritmo de fluxo de CO ₂	Média do fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)	Intervalo de confiança de 90% da média de fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
Fa	23	0,36	0,35	3,17	2,76 – 3,74
Fb	74,5	0,80	0,32	8,28	7,53 – 9,26
Fc	2,5	1,95	0,70	298,27	139,08 – 1.559,34
Ma	28	0,87	0,36	10,44	9,02 – 12,48
Mb	69,5	1,26	0,18	19,83	18,69 – 21,25
Mc	2,5	1,85	0,33	93,69	61,18 – 233,50

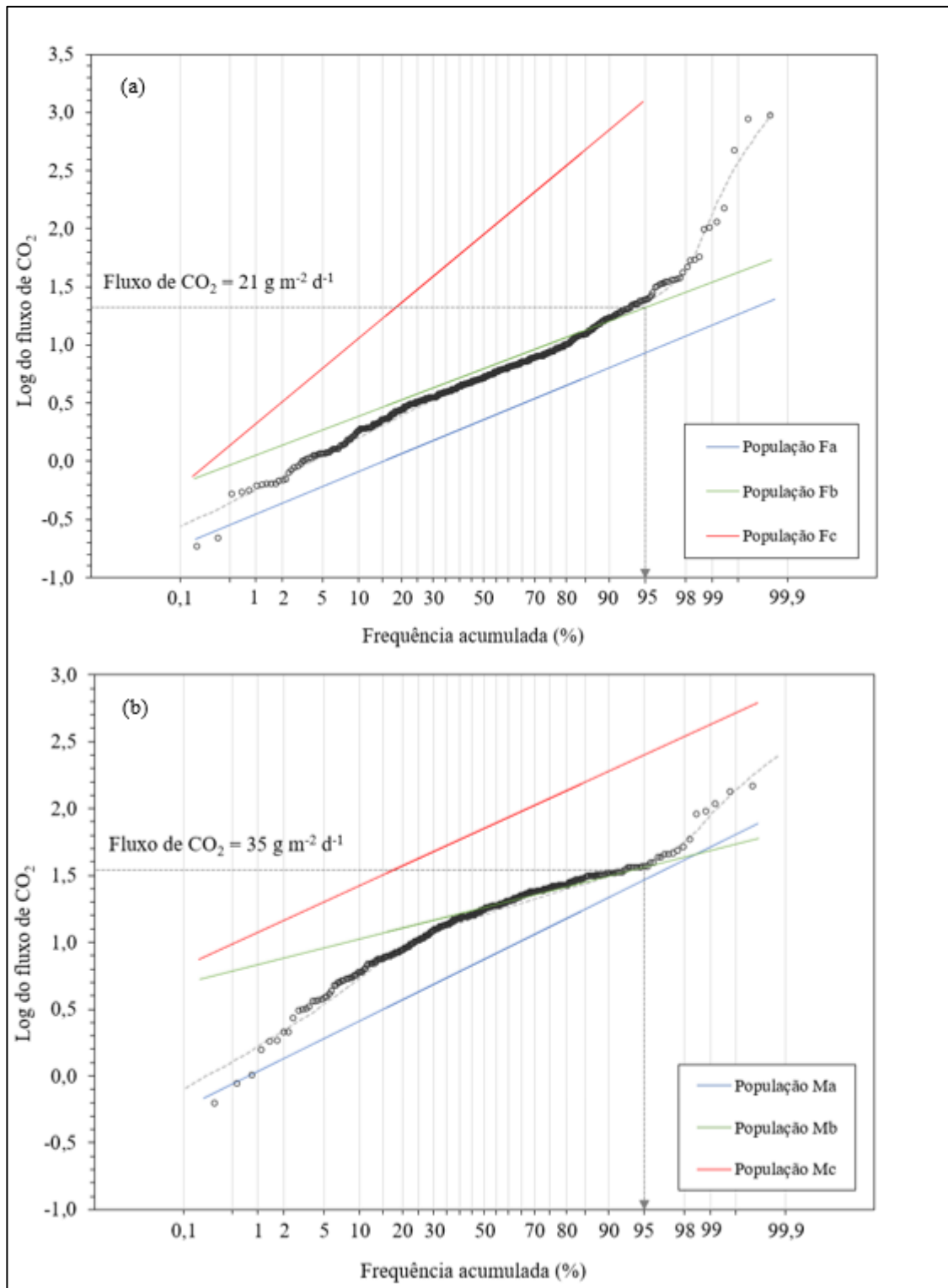


Figura 4.1 | Diagramas de probabilidades dos valores de fluxo de CO_2 no solo medidos nas plataformas lávicas (a) da Ferraria e (b) dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades. Os valores de fluxo de CO_2 apresentados em cada um dos diagramas assinalam os limites biogénicos prováveis das populações de cada uma das plataformas amostradas, estimados com base no percentil 95 destas populações.

A distribuição estatística dos dados em cada plataforma foi modelada considerando a existência de três populações log-normais sobrepostas, designadas por “Fa”, “Fb” e “Fc” para a Ferraria, e “Ma”, “Mb” e “Mc” para os Mosteiros (Fig. 4.1 e Tabela 4.2). A população “Fa” representa 23% dos dados e é caracterizada por valores de fluxo de CO₂ no solo muito baixos (a média do fluxo de CO₂ é de $\approx 3,17 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, segundo o estimador *t* de Sichel, ponto 3.3.1.1). A população “Fc” compreende 2,5% dos dados e evidencia uma grande diferença em termos de média de fluxo de CO₂ comparativamente com as restantes populações ($\approx 298,27 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). A população mais abundante, “Fb”, com 74,5% dos dados, é caracterizada por uma média de fluxo de CO₂ de aproximadamente $8,28 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

No que diz respeito às populações definidas para a plataforma dos Mosteiros, e à semelhança do que acontece na Ferraria, a primeira população, “Ma” (28 % dos dados), corresponde à média de fluxo de CO₂ mais baixa das três populações dos Mosteiros, com cerca de $10,44 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, seguindo-se a população mais abundante (“Mb”; 69,5 % dos dados), com aproximadamente $19,83 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e por último a população “Mc”, representativa de 2,5% dos dados, caracterizada pelos valores médios de fluxo de CO₂ no solo mais elevados, na ordem dos $93,69 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

A análise da média do fluxo de CO₂ no solo das populações de cada plataforma revela, através dos baixos valores médios de fluxo observados, que as populações “Fa” e “Fb”, e “Ma” e “Mb” podem ser consideradas representativas do fluxo de CO₂ biogénico para cada área. Recorrendo à literatura disponível sobre os fluxos de CO₂ no solo, medidos pelo método da câmara de acumulação em solos com diferentes tipos de vegetação, verificou-se que os valores médios de fluxo destas populações enquadram-se nas tipologias de vegetação apresentadas na tabela 4.3, parecendo associar-se desta forma a processos de respiração do solo. Segundo a tabela 4.3, as principais diferenças entre “Fa” e “Fb” podem ser atribuídas aos diversos tipos de vegetação e de solos presentes na área, correspondendo a população “Fa” essencialmente a zonas de escoada lávica com escória e sem vegetação visível, o que explicaria a baixa produção de CO₂ biogénico tal como atesta os valores médios de fluxo. Contudo, não se pode excluir totalmente alguma atividade orgânica. A população “Fb” parece corresponder a zonas de escoada lávica com escória e vegetação visível, e a média de fluxo de CO₂ superior a “Fa”, resultará da ação mais contributiva da vegetação que lá se encontra.

Relativamente aos Mosteiros, a população “Ma” está associada a áreas cujo solo se encontrava arado. Apesar da inexistência de coberto vegetal, estas áreas não são sinónimo de ausência de respiração dos solos ou de atividade orgânica, a qual persiste nos níveis subsuperficiais do solo, apresentando valores médios semelhantes aos da população “Fb”. A população “Mb” corresponde a zonas de solo com vegetação, das quais se destacam os campos de cultivo e os prados pastorícios e/ou não cultivados.

Tabela 4.3 | Médias de fluxo de CO₂ no solo medidos, pelo método da câmara de acumulação, em zonas com diferentes tipos de vegetação. Para além da média, também são fornecidos os desvio-padrão e os valores máximo e mínimo de fluxo observados em cada tipo de vegetação.

Tipo de vegetação	Média do fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)	Desvio-padrão	Fluxo de CO ₂ mínimo (g m ⁻² d ⁻¹)	Fluxo de CO ₂ máximo (g m ⁻² d ⁻¹)	Referências
Terrenos semiáridos	6,7	4,9	0,6	17,3	1, 9, 10, 14
Campo cultivado	7,6	5,2	1,4	23,0	6, 7, 13, 14, 15
Floresta semiárida a tropical	8,6	5,5	1,1	30,4	2, 4, 5, 8, 13, 14, 16
Prados pastorícios e/ou não cultivados	11,8	11,6	0,5	55,1	3, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 17

1 - Angell *et al.*, 2001; 2 - Borken *et al.*, 2002; 3 - Bremer *et al.*, 1998; 4 - Buchmann, 2000; 5 - Casals *et al.*, 2000; 6 - Ellert e Janzen, 1999; 7 - Frank *et al.*, 2002; 8 - Hanson *et al.*, 1993; 9 - La Scala *et al.*, 2000; 10 - Maestre e Cortina, 2003; 11 - Mielnick e Dugas, 2000; 12 - Norman *et al.*, 1992; 13 - Raich e Tufekcioglu, 2000; 14 - Raich e Schlesinger, 1992; 15 - Reth *et al.*, 2005; 16 - Rey *et al.*, 2002; 17 - Yazaki *et al.*, 2004.

Uma vez que as populações “Fb” e “Mb” são constituídas por grande parte dos dados e de zonas ricas em vegetação, estas populações foram consideradas como representativas dos fluxos de CO₂ no solo com origem biogénica para as respetivas áreas de estudo, revelando valores limite prováveis de cerca de 21 e 35 g m⁻² d⁻¹ (Fig. 4.1), tal como selecionado em trabalhos anteriores com base no percentil 95 destas populações (Viveiros *et al.*, 2010; Andrade *et al.*, 2016, 2023). A razão pela qual o limite biogénico estabelecido para a área dos Mosteiros é superior ao da Ferraria pode ter a ver com o facto das áreas onde foram efetuadas as medições

nos Mosteiros serem compostas por um solo com maior cobertura vegetal, o que, por norma, não aconteceu na Ferraria.

As populações “Fc” e “Mc” apresentam valores médios de fluxo de CO₂ no solo bem acima dos observados nas restantes populações de cada área, podendo ser consideradas representativas dos fluxos de CO₂ alimentados por uma fonte endógena, de origem vulcânica-hidrotermal. A elevada incerteza associada à média dos valores de fluxo de CO₂ nestas populações pode ser atribuída à reduzida quantidade de amostras disponíveis para as definir (12 de um total de 585, no caso da Ferraria, e 18 de um total de 354, no caso dos Mosteiros). O mesmo tipo de incerteza foi observado por Lamberti *et al.* (2019) em dados de fluxo de CO₂ localizados no interior da caldeira do vulcão Caviahue, no Complexo vulcânico Caviahue-Copahue (Argentina).

Os limites biogénicos estabelecidos nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades revelam-se comparáveis com os definidos em outras áreas de desgaseificação do Arquipélago dos Açores, que variam entre 25 e 45 g m⁻² d⁻¹ (Viveiros *et al.*, 2010, 2020, 2023), como é o caso do Vulcão das Furnas (Viveiros, 2010), das Furnas do Enxofre (Vulcão do Pico Alto, Viveiros *et al.*, 2020) e das Caldeiras da Ribeira Grande (Vulcão do Fogo, Viveiros *et al.*, 2023). Viveiros (2010) estabeleceu o limite biogénico para a área das Furnas em 25 g m⁻² d⁻¹, muito semelhante ao valor definido para a Ferraria. Lisetti (2013) definiu o valor de 30 g m⁻² d⁻¹ como o limite para a contribuição biogénica, o qual, apesar de ligeiramente superior, concorda com o valor definido no presente trabalho. Esta diferença de valores poderá ser explicada pela gama de valores obtida em ambos os trabalhos, descrita mais à frente.

O valor limite sugerido para a região das Caldeiras da Ribeira Grande, também na ilha de São Miguel (Viveiros *et al.*, 2023), é próximo do estipulado para os Mosteiros, com um limite de 40 g m⁻² d⁻¹.

4.4 | Pontos de controlo

A desgaseificação de CO₂ do solo pode ser influenciada tanto pela origem do gás (biogénico ou hidrotermal), como também pelos fatores ambientais, como a temperatura do ar, a temperatura do solo, a pressão barométrica e a velocidade do vento, podendo estes fatores ser

responsáveis por mais de 50% da variabilidade dos valores de fluxo (Granieri *et al.*, 2003, 2010; Viveiros *et al.*, 2009, 2015; Oliveira *et al.*, 2018).

De forma a avaliar a variação de fluxo de CO₂ ao longo de todo o período de amostragem foram definidos dois pontos de controlo, um para cada área de estudo (Fig. 3.5). O primeiro ponto, “Ponto de Controlo Ferraria” (“PCF”), diz respeito à plataforma lávica da Ferraria e localiza-se a montante da fajã, a S do Pico das Camarinhas, na margem da estrada que dá acesso à Ferraria. O ponto referente aos Mosteiros, “Ponto de Controlo Mosteiros” (“PCM”), situa-se nas proximidades do poço reconhecido. A tabela 4.4 apresenta as diferentes medições efetuadas em ambos os pontos de controlo. Os pontos de controlo foram medidos uma vez por dia, nos períodos de amostragens. As variações observadas encontram-se representadas na figura 4.2.

Tendo em conta o período de tempo amostrado e considerando que as campanhas foram efetuadas em diferentes meses do ano (Tabela 4.4), a variabilidade dos valores de fluxo de CO₂ no solo foi avaliada através dos pontos de controlo definidos para cada área de estudo. Os locais selecionados demonstram que os valores são inferiores aos limites biogénicos estabelecidos (21 e 35 g m⁻² d⁻¹ para as plataformas lávicas da Ferraria e dos Mosteiros, respetivamente), à exceção de um valor associado ao ponto de controlo “PCF” (22,1 g m⁻² d⁻¹). Este valor é significativamente mais elevado quando comparado com os restantes valores (Fig. 4.2) e poderá estar associado quer com o efeito de algum parâmetro meteorológico, quer resultar eventualmente de variação diurna dos valores de fluxo de CO₂ (Rinaldi *et al.*, 2012; Viveiros *et al.*, 2014), pois trata-se do valor medido mais cedo, às 08:20. No caso dos Mosteiros, todos os valores são inferiores ao ruído de fundo, no entanto, é necessário ter em conta que o valor mais elevado (24,2 g m⁻² d⁻¹) foi medido nas proximidades do local definido devido à sua inacessibilidade (o portão estava fechado), podendo estar na origem do aumento observado neste valor em relação aos restantes (este local pode, por exemplo, ser alvo de maior produção biogénica, uma vez que possui mais vegetação). Esta variação salienta, mais uma vez, a necessidade de realizar medições tanto em condições meteorológicas semelhantes como também em períodos semelhantes do dia. Adicionalmente, os pontos de controlo devem estar bem identificados de forma a que as medições sejam sempre efetuadas no mesmo local (Viveiros *et al.*, 2008, 2023).

Tabela 4.4 | Medições de diferentes parâmetros nos pontos de controlo das plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. Ref. – referência; PCF – ponto de controlo Ferraria; PCM – ponto de controlo Mosteiros. Sistema de coordenadas: WGS84.

Área de estudo	Ref.	Data	Hora	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)	Pressão barométrica
Ferraria	PCF1	22/09/2022	11:50	601422	4190729	26,3	25,7	7,9	1.004,1
	PCF2	26/09/2022	08:20	601421	4190732	20,1	21,1	22,1	1.007
	PCF3	29/09/2022	16:26	601419	4190735	23,2	23,8	5,8	1.000,9
	PCF4	30/09/2022	12:13	601422	4190732	22,9	23,2	7,3	1.004,4
	PCF5	12/10/2022	16:26	601424	4190736	25,9	24,9	8,7	1.005,6
	PCF6	14/10/2022	13:01	601418	4190733	23,7	24,3	7,5	1.005,6
	PCF7	21/10/2022	11:16	601419	4190733	24,5	21,8	8,7	993,6
Mosteiros	PCM1	25/10/2022	14:20	604364	4194660	24,6	27,5	15,1	992,8
	PCM2	28/10/2022	10:38	604365	4194658	18	17,7	24,2	997,5
	PCM3	29/10/2022	10:08	604384	4194647	16,8	17,5	3,0	1.000
	PCM4	15/05/2023	10:38	604370	4194658	21,5	19,1	6,3	1.029
	PCM5	22/05/2023	10:33	604366	4194658	20,3	20,3	12,0	1.033,6
	PCM6	24/05/2023	09:25	604366	4194656	19,6	19,5	10,2	1.029,6
	PCM7	25/05/2023	10:13	604366	4194659	18,4	20,1	18,5	1.027,1

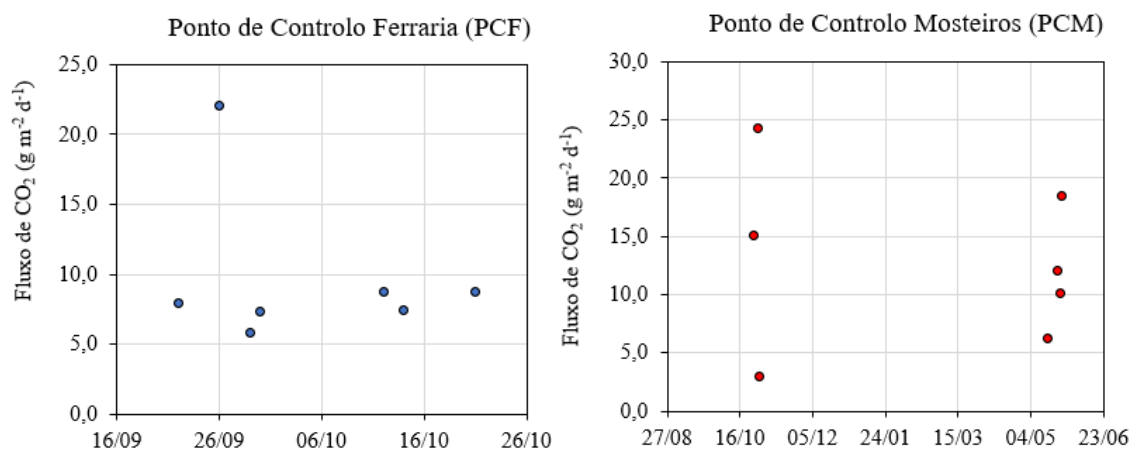


Figura 4.2 | Variação do fluxo de CO₂ nos pontos de controlo identificados.

4.5 | Distribuição espacial do CO₂ e da temperatura do solo

Tendo em conta as contribuições biogénicas estabelecidas no ponto 4.3 para ambas as plataformas, representou-se em ortofotomapas de cada área de estudo (Fig. 4.3 e 4.4) os dados dos subconjuntos “M” e “F” (Tabela 3.1). Os mapas de distribuição efetuados evidenciam a variação do fluxo de CO₂ no espaço, sendo possível observar valores considerados anómalos nas duas áreas.

Na plataforma da Ferraria, os valores mais elevados encontram-se junto à nascente termal e próximo da pseudocratera (Fig. 4.3). Para além destes, é ainda possível verificar valores anómalos na região do afloramento de falhas e em parte da estrada de acesso à Ferraria, representadas com maior detalhe nas aproximações (a) e (b) da figura 4.3, respetivamente. As zonas destacadas foram apresentadas para melhor visualização devido à elevada sobreposição de pontos nessas áreas.

Quanto aos Mosteiros, a zona com os valores de fluxo mais elevados localiza-se nas proximidades do porto, na base de um talude junto à costa marítima, e nas imediações da bomba de saneamento (Fig. 4.4). Outros valores anómalos podem ser encontrados na área mais a N de cada perfil e, no que diz respeito ao perfil localizado mais a E, a cerca da metade do perfil (Fig. 4.4).

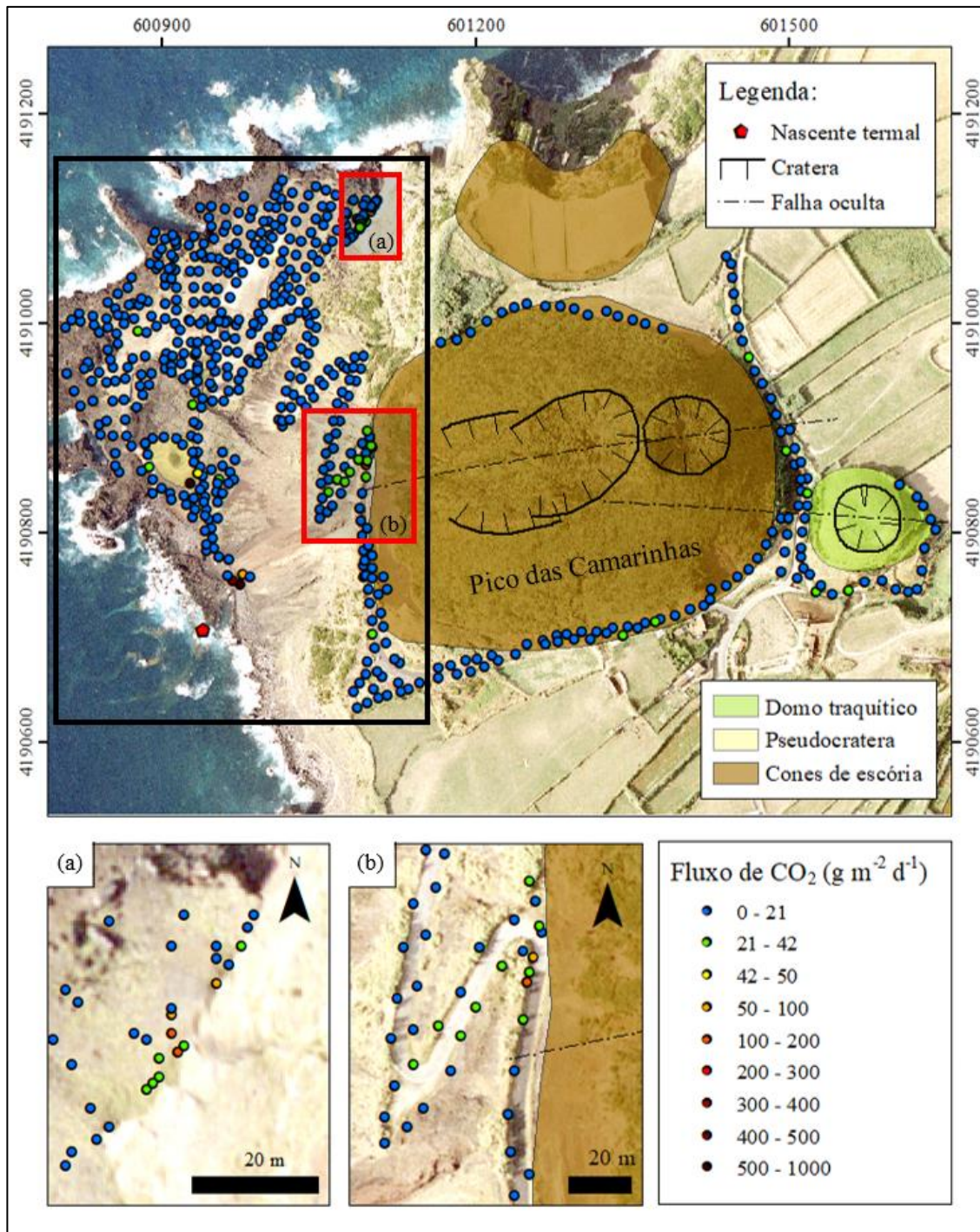


Figura 4.3 | Ortofotomapa da plataforma lávica da Ferraria, no Vulcão das Sete Cidades, com as classificações estabelecidas com base nos valores de fluxo de CO₂ no solo dos pontos amostrados. As figuras (a) e (b) demonstram as aproximações efetuadas dos locais assinalados com o retângulo vermelho. O retângulo a preto representa a seleção de valores, conjunto de dados “F1”, que entraram para a aplicação do método. As formas geomorfológicas e as estruturas tectônicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

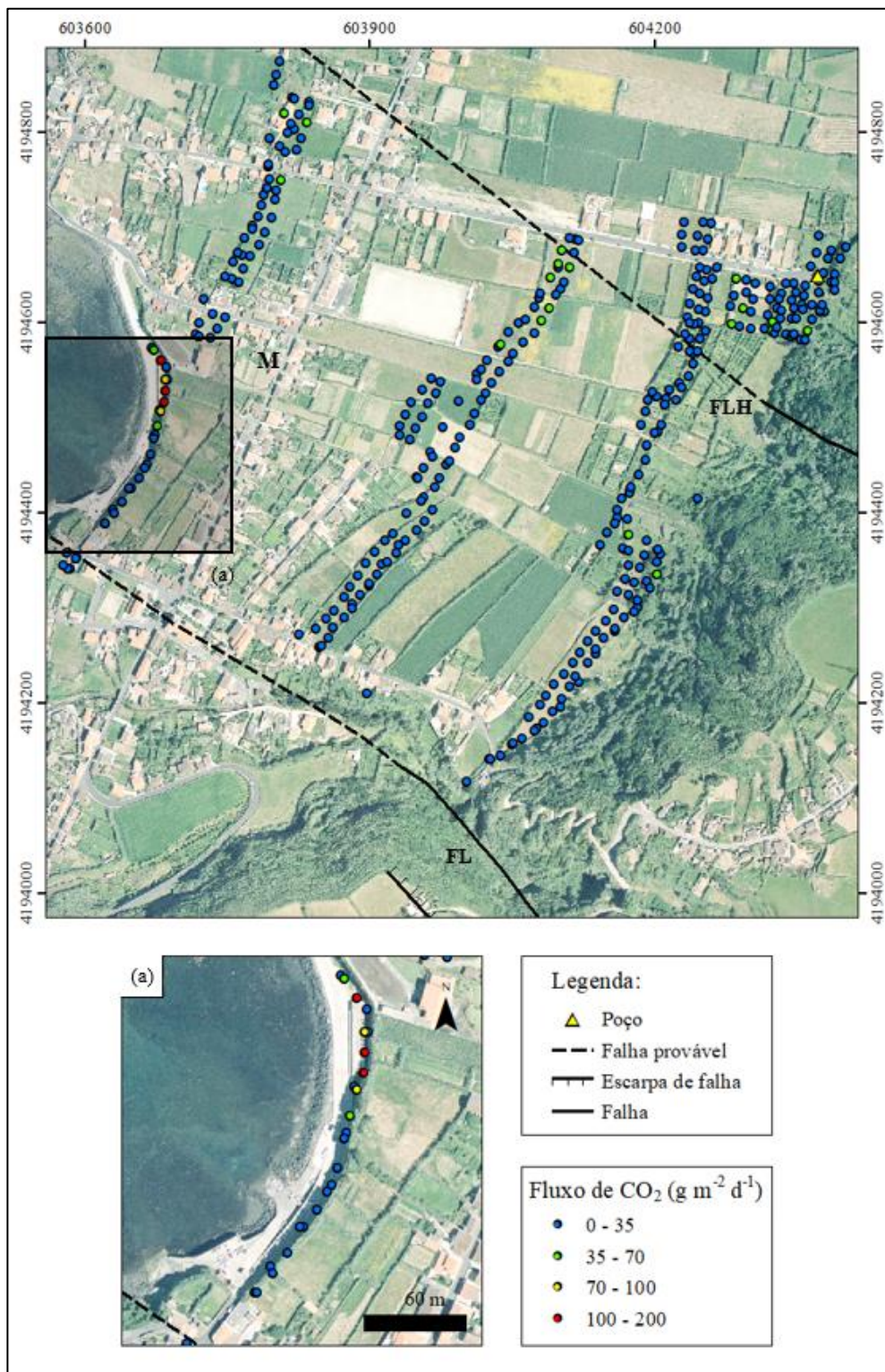


Figura 4.4 | Ortofotomapa da plataforma lávica dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades, com as classificações estabelecidas com base nos valores de fluxo de CO₂ no solo dos pontos amostrados. As estruturas tectônicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). A letra “M” representa a DDS identificada na área de estudo. Legenda: FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

Os mapas contínuos da distribuição espacial do fluxo de CO₂ e da temperatura do solo, assim como os mapas de probabilidades para a Ferraria foram efetuados através do método de interpolação *sGs*. Não foram efetuados mapas contínuos para os Mosteiros devido à estrutura das medições efetuadas (formato de perfis). Neste caso, o número de pontos amostrados associados à sua distribuição espacial, não permitiram estabelecer estrutura espacial de dados compatível com a realização de uma interpolação dos dados.

4.5.1 | Plataforma lávica da Ferraria

Para a área de estudo da Ferraria, tal como descrito no ponto 3.3.1.2, previamente à elaboração destes mapas, procedeu-se à seleção dos dados a incluir na simulação. Após inúmeras tentativas de conjuntos de dados, optou-se por utilizar todos aqueles que estivessem presentes na área da plataforma e até cerca de metade da estrada (todos os dados que se encontrem incluídos no retângulo a preto, figura 4.3, entraram para a simulação). Estes foram os dados que mostravam um variograma representativo de estrutura espacial dos dados. A estatística descritiva dos valores de fluxo de CO₂ no solo e de temperatura no solo deste conjunto de dados, representado por “F1”, encontra-se descrita na tabela 4.5.

Tabela 4.5 | Estatísticas descritivas dos valores de fluxo de CO₂ no solo e da temperatura do solo do conjunto de dados “F1”, na plataforma lávica da Ferraria, Vulcão das Sete Cidades.

Estatística descritiva		
Área de estudo	Ferraria	
Referência	F1	
Número de medições	477	
Fluxo de CO ₂	Média (g m ⁻² d ⁻¹)	12,3
	Mediana (g m ⁻² d ⁻¹)	4,7
	Mínimo (g m ⁻² d ⁻¹)	0,0
	Máximo (g m ⁻² d ⁻¹)	932,4
	Desvio-Padrão	62,7
Temperatura no solo	Média (°C)	24,8
	Mediana (°C)	23,0
	Mínimo (°C)	20,1
	Máximo (°C)	40,2
	Desvio-Padrão	4,2

O gráfico das probabilidades acumuladas e as populações anteriormente definidas já haviam sugerido que os dados de fluxo de CO₂ medidos na plataforma da Ferraria não apresentavam distribuição normal. Os dados do logaritmo do fluxo de CO₂ também não seguem a distribuição normal, por isso, e de forma a aplicar a *sGs* (Deutsch e Journel, 1998), os dados foram transformados recorrendo à ferramenta *nscore* (ponto 3.3.1.2; Fig. 4.5a). O mesmo procedimento foi aplicado aos dados do logaritmo da temperatura do solo, já que os seus dados também não seguiam a distribuição normal (Fig. 4.5b).

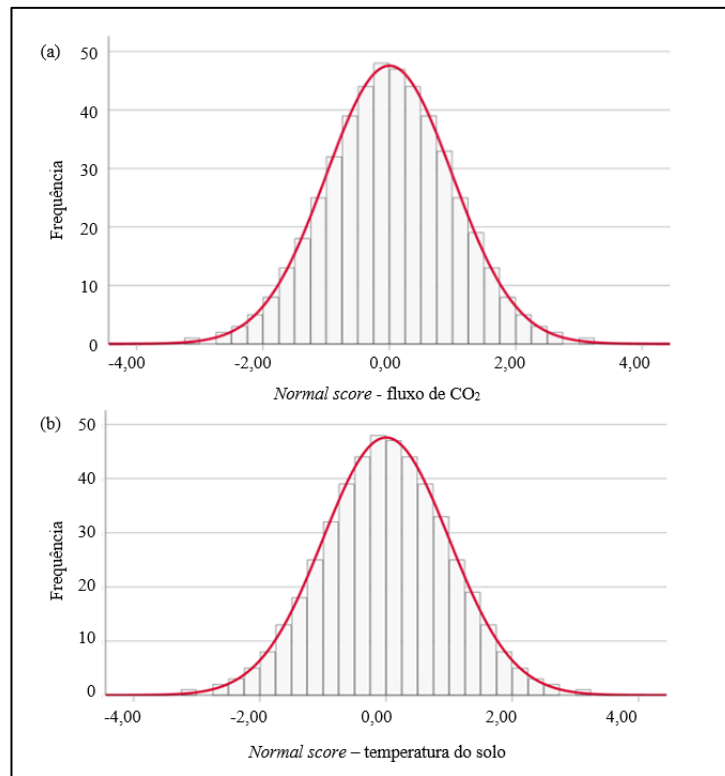


Figura 4.5 | Histogramas dos logaritmos dos valores (a) de fluxo de CO₂ no solo e (b) de temperatura do solo medidos na plataforma lávica da Ferrara, conjunto de dados “F1”, no Vulcão das Sete Cidades. As linhas a vermelho representam a distribuição Gaussiana teórica.

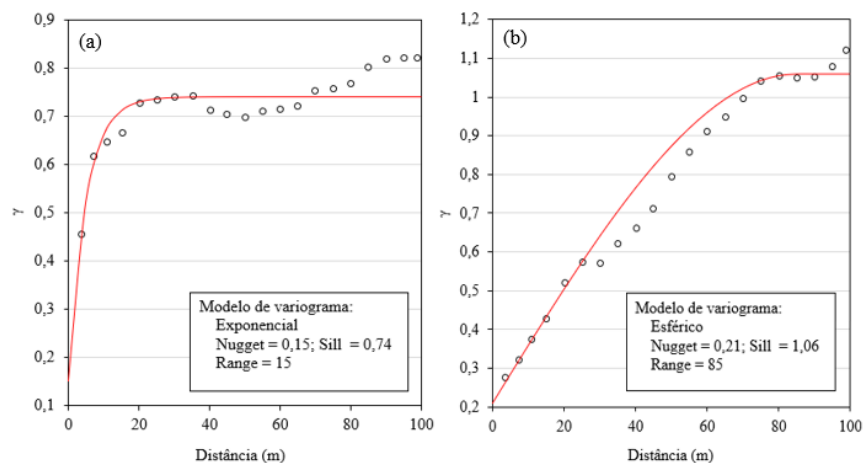


Figura 4.6 | Variogramas experimentais e modelados dos valores (a) de fluxo de CO₂ no solo e (b) de temperatura do solo transformados em distribuição normal para o conjunto de dados “F1”. As linhas a vermelho representam o modelo de variograma utilizado e os círculos a preto simbolizam os variogramas experimentais obtidos dos valores de fluxo de CO₂ no solo e de temperatura do solo transformados em distribuição normal para o conjunto de dados “F1”, respetivamente. Legenda: *sill* – patamar; *range* – alcance; *nugget* – efeito pepita.

Foram efetuadas ao todo 100 simulações equiprováveis para interpolar cada variável (fluxo de CO₂ no solo e temperatura no solo) no conjunto de dados “F1”. Os parâmetros da *sGsim* foram estabelecidos de acordo com as propriedades dos dados (estrutura espacial dos dados, valores máximos e mínimos) e as especificações do variograma, determinadas anteriormente. Para além destes, definiu-se como tipologia de interpolação a *krigagem* simples. Os mapas de fluxo de CO₂ no solo e de temperatura no solo do tipo-E (médias) para a plataforma lávica da Ferraria encontram-se apresentados nas figuras 4.7 e 4.8, respetivamente. As zonas em destaque foram efetuadas de forma a visualizar-se melhor os resultados obtidos nessas áreas. Os dados de fluxo de CO₂ que não foram contabilizados para o cálculo da *sGs* são apresentados como pontos individuais com cores graduadas.

De forma a definir as *DDS* presentes na área de estudo da Ferraria, efetuou-se o mapa de probabilidades apresentado na figura 4.9. Considerando o valor definido para o ruído de fundo biogénico dos fluxos de CO₂ no solo de 21 g m⁻² d⁻¹ (ponto 4.3), estabeleceu-se o valor de 42 g m⁻² d⁻¹, valor duas vezes superior ao limite biogénico, como limite para definir as áreas onde o fluxo de CO₂ será alimentado também por uma origem hidrotermal. A seleção do limite a partir deste critério (duas vezes superior ao limite biogénico) permite reduzir a incerteza causada pela variabilidade dos fluxos de CO₂ biogénicos e foi aplicado anteriormente no Vulcão das Furnas (Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010). Os locais que apresentem probabilidades superiores a 50% do valor de fluxo de CO₂ superior ao limite para contribuição vulcânica/hidrotermal são considerados como *DDS* (Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010).

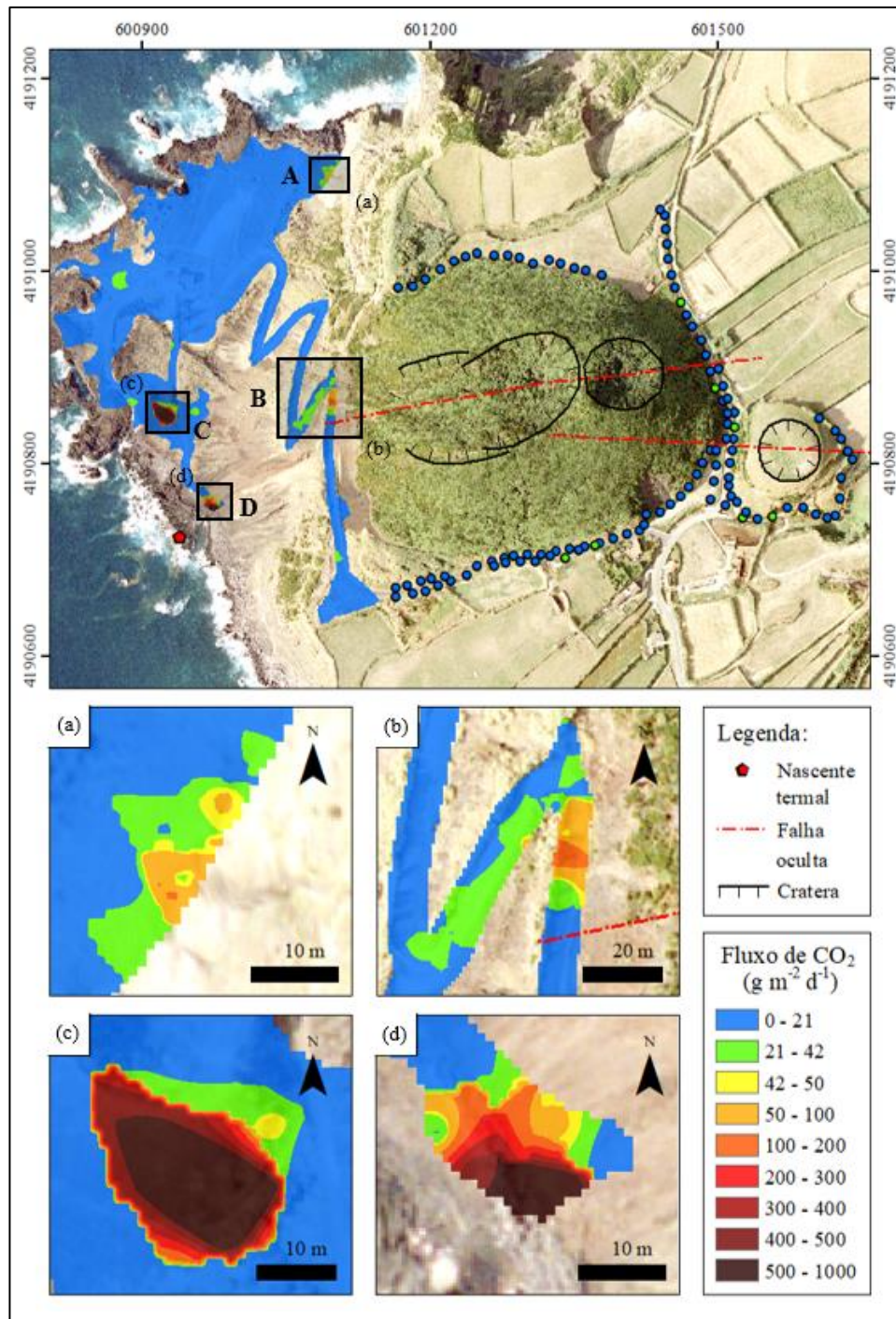


Figura 4.7 | Mapa do tipo-E relativo ao fluxo de CO₂ no solo para o conjunto de dados "F1", na plataforma lávica da Ferraria (tamanho do pixel = 1×1 m). As figuras de (a) a (d) demonstram as aproximações efetuadas dos locais assinalados com o retângulo preto. As medições efetuadas na restante parte da estrada e à volta do Pico das Camarinhas e do domo não permitiram efetuar interpolações e são representadas por pontos individuais com cores graduadas. As letras de "A" a "D" representam as DDS identificadas na área de estudo. As estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

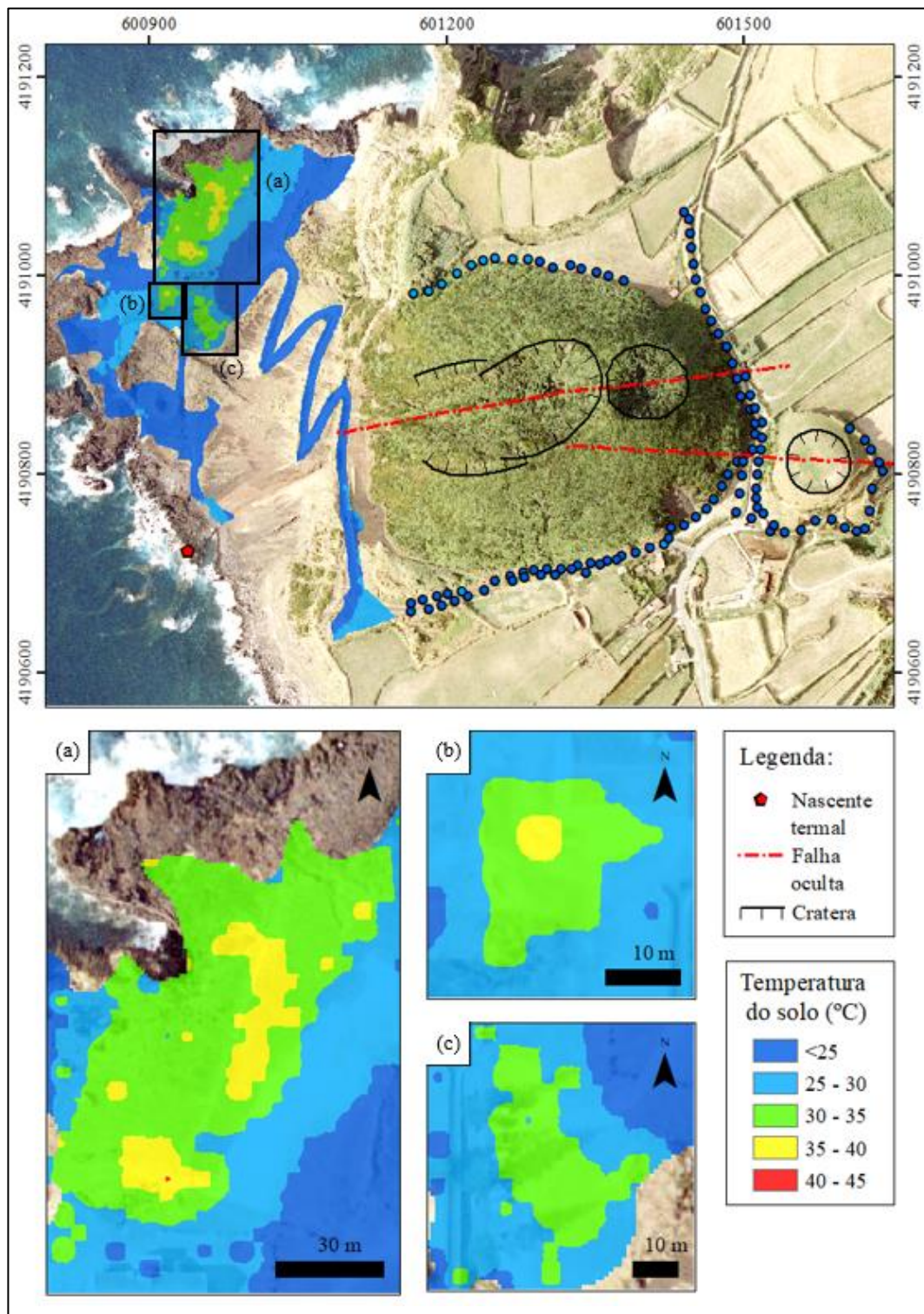


Figura 4.8 | Mapa do tipo-E para a temperatura no solo considerando o conjunto de dados "F1", na plataforma lávica da Ferraria (tamanho do pixel = 1×1 m). As medições efetuadas na restante parte da estrada e à volta do Pico das Camarinhas e do domo não permitiram efetuar interpolações e são representadas por pontos individuais com cores graduadas. As estruturas tectónicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

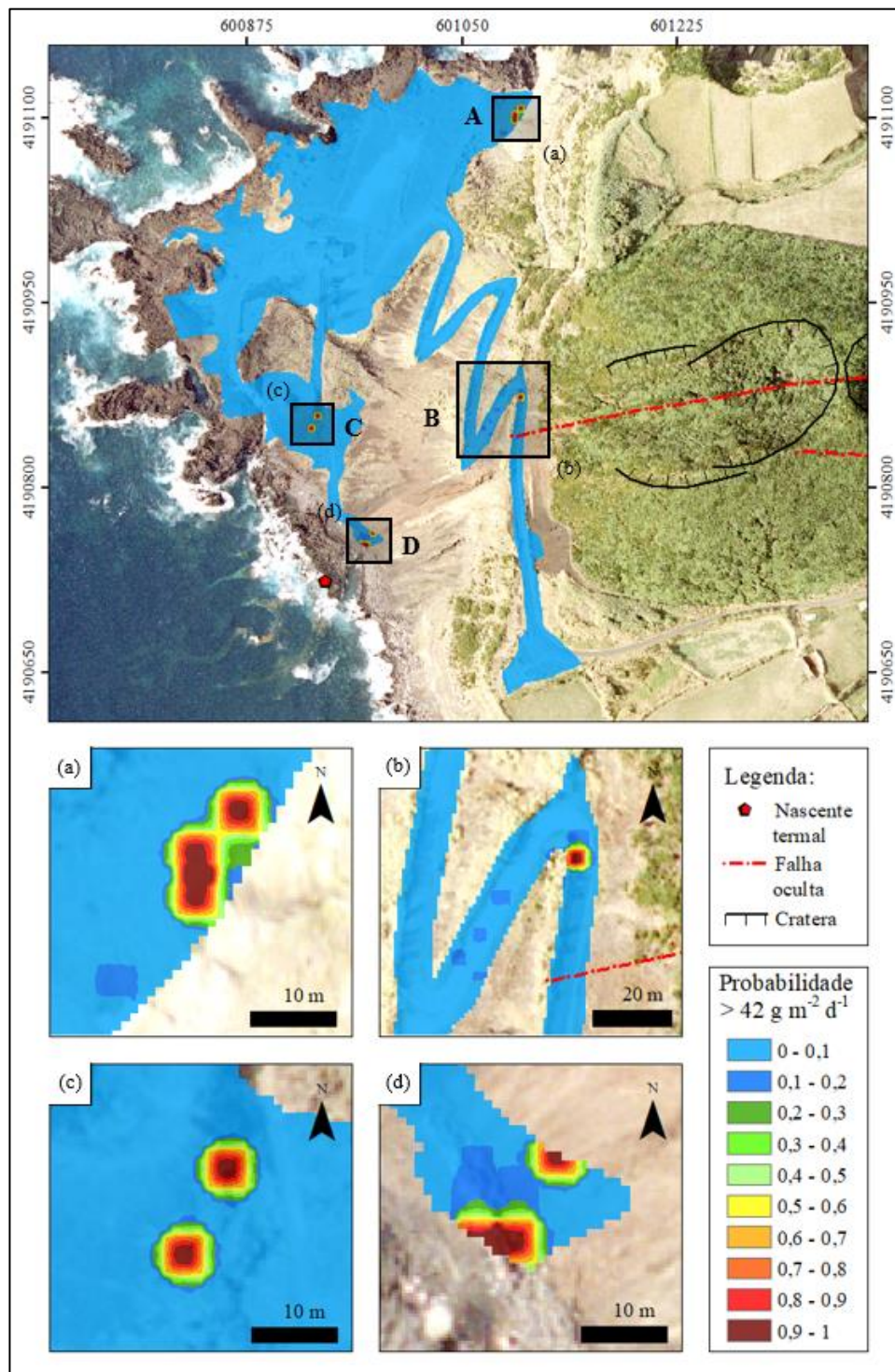


Figura 4.9 | Mapa de probabilidades para o fluxo de CO₂ no solo para o conjunto de dados “F1”, na plataforma lávica da Ferraria, Vulcão das Sete Cidades (tamanho do pixel = 1×1 m). (a) e (b) representam as aproximações efetuadas nos locais de destaque definidos anteriormente. A escala de cores evidencia a probabilidade do fluxo de CO₂ no solo exceder os 28 g m⁻² d⁻¹. As letras de “A” a “D” representam as DDS identificadas na área de estudo. As estruturas tectônicas exibidas foram retiradas de Carmo *et al.* (2015). Projeção UTM, Zona 26S, Datum WGS84.

A figura 4.7 revela que a maior parte da área de estudo se localiza numa zona com baixo fluxo de CO₂ no solo (de 0 a 21 g m⁻² d⁻¹). Os valores mais elevados situam-se próximos da nascente termal, localizada junto à costa, e na base da pseudocratera presente na área (classes máximas dos 500 aos 1.000 g m⁻² d⁻¹). Salientam-se também anomalias de fluxo de CO₂ nas zonas representadas por “A” e “B”, registando-se valores até aproximadamente 148 g m⁻² d⁻¹. Para além destas, reconhecem-se ainda alguns valores elevados na vizinhança e a NW da pseudocratera, assim como na estrada de acesso à plataforma, e que se encontram no limite estabelecido entre os 21 e os 42 g m⁻² d⁻¹.

Os mapas das figuras 4.7 e 4.9 permitiram identificar essencialmente quatro zonas anómalas principais, definidas como “estruturas de desgaseificação difusa” (*DDS*): três na plataforma, representadas por “A”, “B”, “D”, com as suas respetivas áreas de destaque ((a), (c) e (d)), e uma no caminho de acesso à Ferraria, no sopé do cone do Pico das Camarinhas, representada por “C”, evidenciada com mais pormenor no destaque (b) de ambas as figuras. Todas estas zonas apresentam pelo menos uma região com probabilidade 100% de se encontrarem valores acima do limite estabelecido para as *DDS*, ou seja, representam zonas com a presença de CO₂ de origem vulcânica profunda. A zona “A” corresponde à anomalia na zona de um afloramento de falhas e deverá estar associada às estruturas tectónicas identificadas na parede vertical, tal como se poderá ver no ponto 4.7. A *DDS* “B” situa-se no alinhamento da falha oculta identificada previamente por Carmo (2013). A anomalia encontra-se ligeiramente a N da projeção da falha, o que pode significar que o traçado da falha passa mais a N ou sugerir que a falha inclina para N, eventualmente processando-se no bloco abatido que poderá estar fraturado. A zona anómala “C” localiza-se no sopé da pseudocratera e poderá estar associada à falha oculta que atravessa o Pico das Camarinhas e referida acima. Contudo, não se pode excluir que esteja associada a alguma outra estrutura tectónica que atravesse a plataforma e que seja responsável pelas anomalias “C” e “D”, assim como pela desgaseificação da nascente termal. Nas *DDS* “B” e “C”, a desgaseificação anómala de CO₂ que ocorre na base do Pico das Camarinhas e da pseudocratera pode também ser potenciada em alguns pontos por se encontrarem ou topograficamente controladas, tal como referido por Viveiros *et al.* (2010) para o Vulcão das Furnas, ou controladas litologicamente, como evidenciado por Lisetti (2013).

A distribuição espacial do fluxo de CO₂ no solo obtida para a plataforma lávica da Ferraria no presente estudo evidencia algumas similaridades com a obtida por Lisetti (2013), sugerindo que a zona anómala “B” se mantém desde 2012 (Fig. 2.13b). As semelhanças mais visíveis entre os dois trabalhos para esta área são (1) a presença de valores de fluxo baixos em grande parte da área e (2) a área anómala correspondente à falha oculta do Pico das Camarinhas (*DDS* “B”). No que diz respeito à anomalia associada à falha do Pico das Camarinhas, Lisetti (2013) deparou-se com a mesma deslocação dos valores para N. Através da análise vulcanoestratigráfica efetuada no local da anomalia e dos valores de fluxo de CO₂ obtidos nessa zona (Fig. 4.10), a autora demonstrou que o fluxo de CO₂ diferenciava-se muito em pontos situados a poucos centímetros de distância e atribuiu essa variação ao controlo litológico efetuado pela escoada lávica, que influenciava a permeabilidade nos níveis subsuperficiais (os valores medidos abaixo do nível da escoada eram superiores aos encontrados acima). Estes resultados permitem demonstrar que as zonas onde os valores de fluxo de CO₂ são elevados correspondem aos locais onde a litologia permite que o fluxo ascenda, podendo atribuir o desenvolvimento das *DDS* “B” e “C” do presente estudo ao controlo litológico da zona.

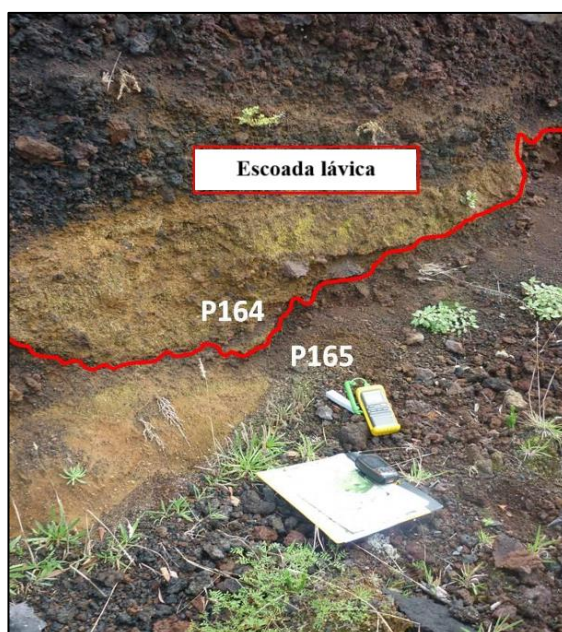


Figura 4.10 | Perfil vulcanoestratigráfico com os pontos 164 e 165 (adaptado de Lisetti, 2013). A linha a vermelho delimita o término da escoada lávica. Os pontos 164 e 165 apresentam um fluxo de CO₂ de 3,55 e 18,52 g m⁻² d⁻¹, respetivamente.

Tal como é possível observar, o presente estudo permitiu identificar outras zonas anómalas para além da reconhecida por Lisetti (2013) nesta plataforma. Estas diferenças podem ser o resultado da utilização de diferentes malhas de amostragem, influenciando diretamente a quantidade, a localização e os valores dos pontos amostrados. A malha geral estabelecida para esta área de estudo no presente trabalho (\approx de 7 a 10 m de distância) foi mais apertada que a utilizada anteriormente por Lisetti (2013) (\approx 20 m de distância), espelhando com mais pormenor as diferentes variações espaciais de fluxo de CO₂. Nos locais com estruturas tectónicas emergentes na zona identificada como (a) (Fig. 4.9), o espaçamento das medições ainda foi mais reduzido, para cerca de 2 a 5 m. As campanhas de fluxo de CO₂ no solo foram realizadas durante os meses de verão, nomeadamente agosto e setembro de 2012 no caso de Lisetti (2013), e na transição de verão para outono, nos meses de setembro e outubro no presente trabalho. Como as amostragens foram efetuadas em épocas do ano semelhantes, os resultados obtidos devem ser comparáveis em termos de sazonalidade, considerando que trabalhos anteriores destacaram a necessidade das campanhas de amostragem de fluxo de CO₂ serem realizadas em épocas do ano semelhantes (Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010; Pacheco, 2013). Não se verificou atividade sísmica significativa na área de amostragem (Silva *et al.*, 2020) e/ou outros sinais de reativação deste sistema vulcânico que possam justificar as diferenças, estando, por isso, a densidade de amostragem na base de uma melhor identificação das áreas anómalas. Para além disto, a anomalia correspondente à nascente termal não tinha sido identificada anteriormente, apesar da nascente termal estar lá presente. Estas observações destacam uma vez mais a necessidade de efetuar amostragens de detalhe de forma a reconhecer as anomalias geoquímicas como referido anteriormente (Viveiros, 2010).

Como descrito acima, a gama de valores do fluxo de CO₂ no solo medidos na área de estudo em Lisetti (2013) variou entre 1,4 e 355 g m⁻² d⁻¹, com uma média de cerca de 20,9 g m⁻² d⁻¹. No presente estudo foram registados valores mínimos e máximos de 0 e 932,4 g m⁻² d⁻¹, respetivamente (média aproximada de 12,3 g m⁻² d⁻¹). A discrepância destes valores deve-se às medições próximas da zona da nascente termal e da pseudocratera (Fig. 2.13b), que não foram amostradas previamente por Lisetti (2013), e que correspondem às zonas onde se registaram os valores mais elevados de fluxo. Excluindo estas duas áreas, a gama de valores no presente trabalho torna-se mais comparável, atingindo valores máximos a rondar os 200 g m⁻² d⁻¹.

O valor de temperatura do solo mais elevado registado na plataforma lávica da Ferraria foi de cerca de 40°C. No que diz respeito à temperatura do ar na mesma área, o valor máximo obtido foi de aproximadamente 30°C. Considerando a diferença entre os valores máximos da temperatura do solo e do ar e os critérios utilizados para as nascentes termais (Schoeller, 1962, *in* Custodio e Llamas, 1983), foi possível verificar que os valores de temperatura do solo não estão dentro do intervalo de diferença de 4°C, podendo indicar a presença de anomalia térmica.

De forma a tentar delimitar as zonas principais de temperaturas anómalas, ou seja, identificar as áreas cuja temperatura do solo parece estar associada a uma contribuição endógena, foi utilizado o valor máximo da temperatura do ar medido ($\approx 30^\circ\text{C}$) durante a amostragem do conjunto de dados “F1” (Sousa, 2003; Silva, 2013; Fig. 4.8). Este valor traduz-se na influência máxima que a temperatura do ar poderia exercer sobre a temperatura do solo em determinado ponto (Silva, 2013), o que parece ser significativo na presente área de estudo caracterizada pela presença de escoadas lávicas basálticas e com pouco, ou nenhum, coberto vegetal, essencialmente na plataforma lávica. O mapa da figura 4.8 evidencia que os valores mais elevados de temperatura se concentram a N da plataforma, estando a restante área associada a temperaturas inferiores, com valores máximos até 30°C.

Na tentativa de se identificar as possíveis origens da temperatura do solo e obter o ruído de fundo mais adequado para toda a amostragem da Ferraria, aplicou-se a metodologia *GSA* aos dados da temperatura do solo (Tabela 4.6; Fig. 4.11). O diagrama de probabilidades revela a existência de duas populações de temperatura distintas, uma relativa a valores de temperatura mais baixos (“FTa”) e outra a valores mais elevados (“FTb”), sugerindo pelo menos dois tipos de influências distintas para a temperatura do solo medida na Ferraria. As zonas com valores mais elevados de temperatura do solo situam-se em áreas de escoada lávica e escórias, com elevada exposição solar, o que pode ter potenciado os valores de temperatura do solo medidos, uma vez que a elevada influência da insolação sobre produtos vulcânicos basálticos provoca uma elevada absorção térmica (*e.g.* Nahhas *et al.*, 2019). Quanto à restante área, a temperatura do solo obtida é consideravelmente mais baixa e é resultante de áreas com vegetação ou solo. Esta dualidade de áreas (zonas de escoada e zonas de vegetação/solo) pode ser explicitada pelas populações do diagrama da figura 4.11, em que a “FTa” poderá dizer respeito aos valores obtidos em zonas com vegetação/solo e “FTb” aos valores de temperatura do solo obtidos em zonas de escoada lávica sem vegetação.

Tabela 4.6 | Parâmetros estatísticos das populações de temperatura do solo para a plataforma lávica da Ferrara, no Vulcão das Sete Cidades.

População	Proporção (%)	Média do logaritmo da temperatura do solo	Variância do logaritmo de fluxo de CO ₂
FTa	67	1,35	0,02
FTb	33	1,45	0,07

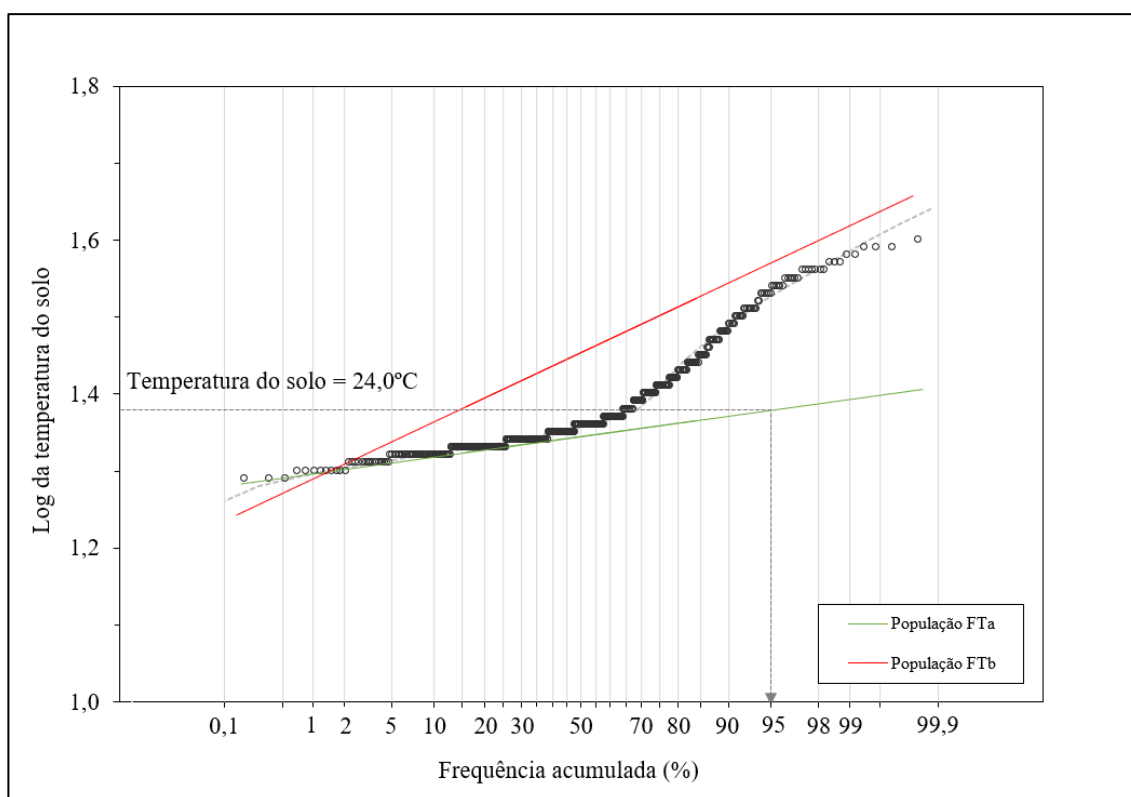


Figura 4.11 | Diagrama de probabilidades dos valores de temperatura no solo medidos na plataforma lávica da Ferrara, no Vulcão das Sete Cidades. O valor de temperatura do solo apresentado no diagrama assinala o limite biogénico provável da população da plataforma amostrada, estimado com base no percentil 95 destas populações.

Para além do referido acima, os mapas de fluxo de CO₂ no solo (Fig. 4.7) e da temperatura do solo (Fig. 4.8) na plataforma lávica da Ferrara exibem padrões distintos entre o fluxo de CO₂ e a temperatura, não estabelecendo relação entre si, nem mesmo nos locais onde se registaram os valores mais elevados de fluxo de CO₂ (o valor máximo de temperatura do solo

encontrado nas zonas de anomalia foi de 26,4°C na DDS “D”). A inexistência de uma correlação entre estas duas variáveis na área encontra-se patente no coeficiente de correlação muito baixo ($R^2 \approx 0,01$) e é representativa da ausência de anomalias térmicas associadas aos valores de fluxo de CO₂, estando os valores mais elevados de temperatura do solo eventualmente associados a outros tipos de fatores, como a elevada exposição solar referida acima.

4.5.2 | Plataforma lávica dos Mosteiros

Os valores anómalos mais elevados de fluxo de CO₂ nos Mosteiros situam-se no talude junto ao porto, com valores máximos de cerca de 145 g m⁻² d⁻¹ (Fig. 4.4). Os restantes valores elevados representados no mapa (a N dos perfis) registam valores até 58 g m⁻² d⁻¹, aproximadamente.

O mapa da figura 4.4 permitiu identificar uma DDS, representada pela letra “M”, com a sua respetiva área de destaque ((a)), na zona próxima ao porto dos Mosteiros. Tal como efetuado para a Ferraria, as DDS nesta área de estudo foram estabelecidas segundo o dobro do limite biogénico definido, nomeadamente 70 g m⁻² d⁻¹. Semelhante ao que acontece com a falha do Pico das Camarinhas na plataforma da Ferraria, esta zona anómala poderá estar associada ao prolongamento provável da Falha da Lombinha para NW, encontrando-se, no entanto, desviada para N do traço da falha. Este local já sido identificado em 2005 como zona anómala em termos de emissão de CO₂ quando construíram a bomba de saneamento, pois nessa altura alguns trabalhadores da Câmara Municipal de Ponta Delgada sentiram-se mal no local da obra e elementos da Universidade dos Açores efetuaram medições e detetaram valores acima dos recomendados em termos de exposição humana na zona dos alicerces (Viveiros, comunicação pessoal).

Para os Mosteiros não existem valores publicados de fluxo de CO₂, no entanto, os valores de concentração de CO₂ no solo apresentados em Viveiros *et al.* (2015) permitem estabelecer algumas relações com os dados de fluxo do presente estudo. As principais semelhanças que predominam são referentes à distribuição do CO₂ e dizem respeito às zonas com maior concentração de CO₂ registadas na plataforma (5 a 25 % vol.; Fig. 2.13a), essencialmente na região anómala junto à costa, onde foram evidenciados os valores mais elevados de fluxo (Fig.

4.4). Esta observação, assim como os elevados valores medidos anteriormente na obra da bomba de saneamento, confirmam que esta anomalia deverá ser estável e presente pelo menos desde 2005. Estes autores reconheceram ainda outras zonas anómalas na região, no entanto, as medições efetuadas pelo presente estudo não identificaram mais nenhuma *DDS* na área de estudo, possivelmente devido à ausência de uma cartografia em toda a plataforma, principalmente no que diz respeito a anomalias de pequenas dimensões.

Relativamente à temperatura do solo medida nos Mosteiros, o valor mais elevado registado foi de cerca de 31°C, enquanto que na temperatura do ar o valor máximo observado foi de aproximadamente 27°C. Considerando os critérios utilizados para as nascentes termais, os valores de temperatura do solo estão dentro dos 4°C de diferença potencialmente definidos (Schoeller, 1962, *in* Custodio e Llamas, 1983), não evidenciando anomalia térmica. Aplicando a metodologia *GSA* aos dados da temperatura do solo nesta área de estudo, confirmou-se que não existia anomalia térmica para esta zona (o diagrama evidencia apenas uma população e o limite provável, selecionado com base no percentil 95 desta população é de cerca de 27°C; Fig. 4.12).

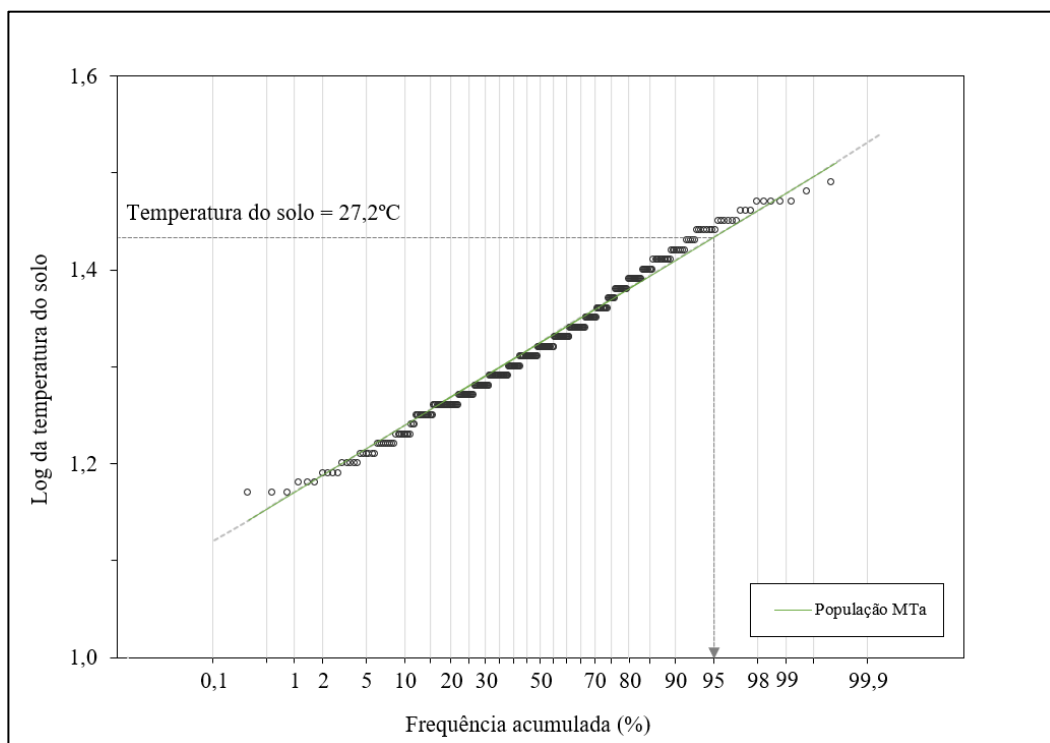


Figura 4.12 | Diagrama de probabilidades dos valores de temperatura no solo medidos na plataforma lávica dos Mosteiros, no Vulcão das Sete Cidades. O valor de temperatura do solo apresentado no diagrama assinala o valor correspondente ao ruído de fundo.

4.5.3 | Risco para a saúde pública

O estudo efetuado por Viveiros *et al.* (2015) permite afirmar que a zona considerada anómala (DDS “M”; Fig. 4.4) apresenta um risco de exposição moderado relativamente ao CO₂, ou seja, concentrações letais em caves e/ou em espaços não ventilados abaixo do nível do solo podem ser registadas.

Na década de 90 do século passado, uma pessoa terá morrido por inalação de CO₂ no interior de poço (Fig. 4.4). Os valores de CO₂ no solo à volta do poço evidenciaram um intervalo de concentrações entre 1,5 e 5 % vol., risco moderado de asfixia, no estudo de Viveiros *et al.* (2015), e de fluxo entre 0 e 35 g m⁻² d⁻¹, no presente estudo.

De forma a determinar o risco por inalação de CO₂ associado a este poço na atualidade, foram efetuadas medições da concentração de alguns gases no seu interior. O poço apresenta um formato retangular com cerca de 5,6 m de comprimento, 2,4 m de largura e 3,8 m de profundidade (a profundidade foi medida até ao nível de solo no seu interior, pelo que a sua profundidade é superior à que foi possível medir). A figura 4.13 e a tabela 4.7 apresentam a localização das medições efetuadas e os valores obtidos, respetivamente.



Figura 4.13 | Fotografia do interior do poço com as localizações de cada medição de concentração de gás efetuada. Fotografia de 11/02/2024.

Tabela 4.7 | Valores de concentração de gases medidos no poço dos Mosteiros.

Referência	CH ₄ (% vol.)	CO ₂ (% vol.)	O ₂ (% vol.)	CO (ppm)	H ₂ S (ppm)	Data da amostragem
C1	0,1	0,0	19,7	0	0	11/02/2024
C2	0,2	0,0	19,7	0	0	
C3	0,2	0,0	19,8	0	0	
C4	0,2	0,0	19,9	0	0	
C5	0,2	0,0	19,8	0	0	

Os resultados obtidos revelam que, pela altura das medições, não se identificaram valores de CO₂ no poço em concentrações passíveis de serem medidas com o detetor utilizado (% vol.) (Tabela 4.7). No entanto, é necessário ter em conta que, alguns dias antes das medições efetuadas, choveu torrencialmente provocando movimentação de solo para dentro do poço (ver a diferença do nível do solo nas figuras 4.10 e 3.6). Este solo poderá ter compactado, impermeabilizando o fundo do poço e evitando a emissão de CO₂. Foram também encontrados, ainda que baixos, valores de CH₄, possivelmente associados a atividade orgânica.

4.6 | Estimativa da emissão total de CO₂

As estimativas das emissões de CO₂ foram determinadas segundo duas metodologias distintas, a *sGs* e a *GSA*. No que diz respeito à plataforma lávica da Ferraria, a estimativa foi efetuada através dos dois métodos, de forma a comparar-se os resultados. Para o caso dos Mosteiros, a metodologia aplicada foi a *GSA*, uma vez que não foram efetuados mapas de desgaseificação interpolados. A emissão total de CO₂ nas áreas estudadas encontram-se representadas na tabela 4.8.

A emissão de CO₂ estimada pelo método *sGs* foi relativa a uma parte da área da Ferraria, correspondente ao conjunto de dados “F1”, uma vez que os restantes dados não estabeleciam correlação com os dados da plataforma (ponto 4.4). De forma a estabelecer uma comparação entre as duas técnicas utilizadas, aplicou-se a *GSA* ao mesmo conjunto de dados.

À semelhança do que foi efetuado para os Mosteiros e para a Ferraria (ponto 4.3), o conjunto de dados “F1” foi repartido em três populações, “F1a”, “F1b” e “F1c”, das quais duas (“F1a” e “F1b”) foram consideradas biogénicas (Tabela 4.8). Assumindo proporções idênticas e áreas por população similares (a área da população “F1c” é igual à da “Fc”) às do conjunto “F”, os valores médios de fluxo de CO₂ do conjunto “F1” revelaram-se muito parecidos aos encontrados em “F”, com a exceção da população “F1c”, que evidencia um valor médio consideravelmente superior ($\approx 415 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Tabela 4.8 | Emissão de CO₂ difuso nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. As estimativas foram baseadas na realização das 100 simulações de *sGs* e da *GSA*. A área “M” resultou da soma das áreas de cada perfil. Ref. – referência; Pop. – população; N° - número.

Método	Área de estudo	Ref.	Pop.	Área (km ²)	N° de medições	Média de fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)	Total da desgaseificação difusa de CO ₂ (t d ⁻¹)	Total da emissão de CO ₂ por área (t d ⁻¹ km ²)	Total da desgaseificação difusa de CO ₂ hidrotermal		
									(t d ⁻¹)	(%)	(t d ⁻¹ km ⁻²)
<i>sGs</i>	Ferraria	F1	Total	0,071	477	-	0,68	9,57	0,10	14,71	1,41
<i>GSA</i>	Ferraria	F1	F1a	0,016	110	3,23	0,05	0,70	-	-	-
			F1b	0,053	355	8,04	0,43	6,05	-	-	-
			F1c	0,002	12	414,61	0,74	10,42	0,70	57,85	9,85
			Total	0,071	477	425,88	1,21	17,03	0,70	57,85	9,85
	Ferraria	F	Fa	0,023	135	3,17	0,07	0,71	-	-	-
			Fb	0,074	436	8,28	0,61	6,16	-	-	-
			Fc	0,002	15	298,27	0,74	7,47	0,70	49,30	7,07
			Total	0,099	585	309,72	1,42	14,34	0,70	49,30	7,07
	Mosteiros	M	Ma	0,018	99	10,44	0,18	2,88	-	-	-
			Mb	0,043	246	19,83	0,86	13,75	-	-	-
			Mc	0,002	9	93,69	0,15	2,40	0,20	12,61	2,34
			Total	0,063	354	123,96	1,19	19,03	0,20	12,61	2,34

A estimativa total obtida para o conjunto de dados “F1”, numa área com cerca de 0,071 km², foi de aproximadamente 0,70 e 1,21 t d⁻¹ pelo método *sGs* e *GSA*, respetivamente (Tabela 4.8). No que diz respeito à desgaseificação hidrotermal e tendo em conta o valor estabelecido como limite biogénico para esta área ($\approx 21 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), a *sGs* e a *GSA* estimaram valores de cerca de 0,1 ($\approx 14,7 \%$ da emissão total) e 0,7 ($\approx 57,9 \%$ da emissão total) t d⁻¹, respetivamente.

Considerando os valores descritos acima, a contribuição biogénica foi estimada subtraindo do valor total a contribuição hidrotermal, resultando em aproximadamente $0,6 \text{ t d}^{-1}$ para a *sGs*, e $0,5 \text{ t d}^{-1}$ para a *GSA*.

A desgaseificação estimada através da *sGs* não é semelhante à estimada pela *GSA*, revelando-se inferior. Esta diferença pode ser justificada pela distribuição não homogênea dos valores anómalos no espaço, como tem em conta a *sGs*, em oposição ao método gráfico, que considera a homogeneidade de todos os dados no espaço. De facto, a adequabilidade do *sGs* para este tipo de estudos já foi comprovada por Cardellini *et al.* (2003).

O total de contribuição biogénica para os Mosteiros determinou-se através do somatório das médias de fluxo de CO_2 das populações consideradas biogénicas de cada área, resultando num valor de 1,04 (Tabela 4.8). Para o caso da Ferraria, subtraiu-se da análise à área total (“F”) a área correspondente à plataforma (“F1”) e que foi quantificada com recurso à *sGs*. Nesta sequência, o fluxo total de CO_2 da Ferraria corresponde a $0,91 \text{ t d}^{-1}$ ($0,7 \text{ t d}^{-1}$ - *sGs*, e $0,21 \text{ t d}^{-1}$ - *GSA*).

As emissões totais de CO_2 estimadas nas fajãs lávicas da Ferraria e dos Mosteiros são de aproximadamente $0,91$ e $1,19 \text{ t d}^{-1}$, respetivamente (Tabela 4.8). No que diz respeito à contribuição hidrotermal profunda, a área “F” liberta cerca de $0,1 \text{ t d}^{-1}$, $\approx 11,0 \%$ da emissão total de “F”, enquanto que a área “M” emite $0,2 \text{ t d}^{-1}$, o equivalente a $\approx 12,6 \%$ da emissão de “M”. Considerando os valores referidos anteriormente, as plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades emitem no total cerca de $2,10 \text{ t d}^{-1}$, das quais $0,3 \text{ t d}^{-1}$ ($\approx 14,3 \%$ da emissão total) correspondem a uma contribuição hidrotermal.

4.6.1 | Emissão de CO_2 comparada com outras regiões vulcânicas-hidrotermais

O estabelecimento de comparações entre as emissões de CO_2 estimadas nas áreas abordadas por este estudo e outras áreas vulcânicas-hidrotermais pode ser relevante para avaliar a taxa de emissão de CO_2 em diferentes ambientes geodinâmicos, tectónicos e vulcânicos. Contudo, esta tarefa pode constituir um desafio pelas (1) metodologias aplicadas (*e.g.* técnicas de medição de CO_2 e densidade de amostragem) e/ou (2) das ferramentas geoestatísticas utilizadas

(Viveiros, 2010 e referências nele citadas). A tabela 4.8 sumariza algumas das áreas vulcânicas-hidrotermais do mundo onde a desgaseificação difusa do solo foi estimada. De forma a reduzir a variabilidade causada pela metodologia de amostragem, todos os trabalhos selecionados referem-se à libertação de CO₂ de forma difusa e as medições foram realizadas com recurso à técnica da câmara de acumulação. A padronização das emissões de fluxo de CO₂, ou seja, a transformação da emissão de CO₂ por unidade de área (t d⁻¹ km⁻²), permitiu estabelecer comparações. Os resultados da padronização dos valores de desgaseificação difusa de CO₂ para cada área de estudo são de aproximadamente 9,19 e 19,03 t d⁻¹ km⁻², para a área “F” e “M”, respetivamente (Tabela 4.8).

As taxas de emissão de CO₂ difuso nas áreas do presente estudo revelam-se comparáveis a outras zonas de desgaseificação quiescente, como é o caso da Caldeira Pululahua, Equador (≈ 10 t d⁻¹ km⁻², Padrón *et al.*, 2008), para a zona da Ferraria, e do Complexo Vulcânico Copahue-Caviahue, na Argentina (≈ 23 t d⁻¹ km⁻², Lamberti *et al.*, 2019), para os Mosteiros (Tabela 4.9). Relativamente a outras zonas de desgaseificação, nomeadamente campos fumarólicos (*e.g.* Cratera La Fossa, ≈ 333 t d⁻¹ km⁻², Granieri *et al.*, 2006), vulcões em períodos de reativação (*e.g.* Nea Kameni, ≈ 1.050-1.900 t d⁻¹ km⁻², Parks *et al.*, 2013) e em erupção (*e.g.* Vulcão Stromboli, ≈ 268 t d⁻¹ km⁻², Carapezza *et al.*, 2009) as emissões estimadas revelam-se bastante inferiores.

No arquipélago dos Açores, à semelhança do que acontece em outras partes do mundo, os valores da emissão de CO₂ estimados em algumas áreas vulcânicas-hidrotermais com campos fumarólicos também são mais elevados que os obtidos no presente estudo. Destas destacam-se o vulcão das Furnas (Viveiros, 2010; Viveiros *et al.*, 2010, 2012), a Ribeira Quente (Viveiros, 2010) e as Caldeiras da Ribeira Grande (Viveiros *et al.*, 2023), em São Miguel, e as Furnas do Enxofre (Viveiros *et al.*, 2020), na Terceira, todas com valores superiores a 100 t d⁻¹ km⁻² (Tabela 4.9).

Tal como referido, Lisetti (2013) estimou a emissão total de CO₂ na plataforma lávica da Ferraria e arredores, a qual resultou, numa área de aproximadamente 0,47 km⁻², em cerca de 11 t d⁻¹ km⁻², próximo do obtido neste estudo para a mesma zona (≈ 9 t d⁻¹ km⁻²; Tabela 4.9).

No que diz respeito aos lagos no Vulcão das Sete Cidades, as emissões totais de CO₂ nas lagoas de Santiago (Andrade *et al.*, 2019) e das Sete Cidades (Andrade *et al.*, 2020) foram estimadas, tendo em conta o máximo de emissão obtido numa área de 0,25 e 4,46 km², em aproximadamente 22 e 7 t d⁻¹ km⁻², respetivamente (Tabela 4.9). Estes valores referem-se

essencialmente a uma componente biogénica, não tendo sido identificados, no caso dos estudos efetuados nos lagos vulcânicos das Sete Cidades, valores claramente representativos de uma emissão endógena.

Tabela 4.9 | Desgaseificação difusa de CO₂ emitido de diversas áreas de desgaseificação no mundo. As áreas estão organizadas segundo a emissão de CO₂ km⁻².

Área de estudo	Fluxo de CO ₂ total (t d ⁻¹)	Área (km ²)	Fluxo de CO ₂ padronizado (t d ⁻¹ km ⁻²)	Referência
Lagoa das Sete Cidades, São Miguel, Açores *	31	4,46	7	Andrade <i>et al.</i> , 2020
Caldeira Cuicocha, Equador	106	13,30	8	Padrón <i>et al.</i> , 2008
Plataforma lávica da Ferraria	0,91	0,099	9	Este estudo
Caldeira Pululahua, Equador	270	27,60	10	Padrón <i>et al.</i> , 2008
Plataforma lávica da Ferraria, São Miguel, Açores	5	0,47	11	Lisetti, 2013
Ilha Pantelleria, Itália	989	84	12	Favara <i>et al.</i> , 2001
Plataforma lávica dos Mosteiros	1	0,063	19	Este estudo
Lagoa de Santiago, São Miguel, Açores *	0,2 - 6	0,25	1 - 22	Andrade <i>et al.</i> , 2019
Complexo Vulcânico Copahue-Caviahue, Argentina	209	9	23	Lamberti <i>et al.</i> , 2019
Vulcão Satsuma-Iwojima, Japão	80	2,50	32	Shimoike <i>et al.</i> , 2002
Caldeira Nisyros, Grécia	84	2,00	42	Cardellini <i>et al.</i> , 2003
Ilhas Nea Kameni, Grécia	15	0,28	55	Chiodini <i>et al.</i> , 1998
Complexo vulcânico Planchón-Peteroa, Argentina e Chile	6	0,077	84	Lamberti <i>et al.</i> , 2021
Vulcão Peteroa, Argentina	7	0,070	93	Lamberti <i>et al.</i> , 2019
Furnas do Enxofre, Terceira, Açores +	3	0,024	106	Viveiros <i>et al.</i> , 2020
Caldeiras da Ribeira Grande, São Miguel, Açores	30	0,27	111	Viveiros <i>et al.</i> , 2023
Caldeira das Furnas, São Miguel, Açores	866	5,85	148	Viveiros, 2010
Área vulcânica Hakkoda, Japão	127	0,58	219	Hernández <i>et al.</i> , 2003
Vulcão Stromboli, Itália \$	80	0,30	268	Carapezza <i>et al.</i> , 2009
Fumarolas da Lagoa das Furnas, Açores	14	0,04	326	Viveiros, 2010
Cratera La Fossa, Itália	200	0,60	333	Granieri <i>et al.</i> , 2006
Bacia Hot Spring, Vulcão Yellowstone, EUA	60	0,16	387	Werner <i>et al.</i> , 2008
Fumarolas na freguesia das Furnas, São Miguel, Açores	12-15	0,03	414-517	Viveiros, 2010
Vulcão Mud, Vulcão Yellowstone, EUA	1.730	3,5	494	Werner <i>et al.</i> , 2008
Lui-Huang-Ku, Tailândia	22	0,03	659	Lan <i>et al.</i> , 2007
Ribeira Quente, São Miguel, Açores	243	0,35	694	Viveiros, 2010
Vulcão Teide, Espanha	380	0,53	717	Hernández <i>et al.</i> , 1998
Vulcão Vesúvio, Itália	1	0,00	787	Granieri <i>et al.</i> , 2010
Lago Horseshoe, caldeira de Long Valley, EUA	104	0,13	802	Cardellini <i>et al.</i> , 2003
Ilhas Nea Kameni, Santorini, Grécia #	21-38	0,02	1.050-1.900	Parks <i>et al.</i> , 2013
Vulcão Merapi, Indonésia	200	≈ 0,07	2.857	Toutain <i>et al.</i> , 2009
Vulcão Solfatara, Itália	677	0,23	3.009	Granieri <i>et al.</i> , 2010
Vulcão Cerro Negro, Nicarágua	2.800	0,58	4.828	Salazar <i>et al.</i> , 2001

* Medições efetuadas em lagos; #Medições efetuadas em período de reativação vulcânica; \$ Medições efetuadas em período de atividade vulcânica; + As estimativas apresentadas são apenas da componente hidrotermal.

4.7 | Correlação com as estruturas tectônicas

As estruturas tectônicas presentes nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades referenciadas na bibliografia não têm expressão morfológica à superfície, sendo inferidas principalmente por via aérea (Carmo, 2013). No que diz respeito aos Mosteiros, a sua exposição na zona da fajã encontra-se restringida por densa vegetação e atividade antrópica, provocando incerteza quanto à sua localização na plataforma (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). Quanto à Ferraria, as falhas ocultas existentes são inferidas pela presença e/ou pela forma das crateras das estruturas vulcânicas que lá se encontram.

Tal como descrito no capítulo 3.2.2, foi identificado um afloramento expondo falhas na área de estudo da Ferraria (Fig. 4.14a). As estruturas tectônicas que afloram no respetivo talude (FF1 a FF11; Fig. 4.14b e Tabela 4.10) encontram-se em conformidade com as descritas em Carmo (2013), evidenciando direções ENE-WSW a E-W (253-273°), a inclinar para N e S (Fig. 4.15), podendo corresponder a acidentes radiais do próprio vulcão central. A maior parte das estruturas observadas apresenta ângulos de inclinação elevados, superiores a 60, no entanto, também se registam alguns valores inferiores a 50° (Fig. 4.15). Apesar de não terem sido identificadas estrias, as movimentações dos acidentes (cinemática) aparentam ser normais, deduzidas pelo deslocamento, ainda que mínimo, de marcadores estratigráficos (Tabela 4.10). As medições efetuadas nos planos das falhas da estação 101 (terminologia estabelecida por Carmo, 2013) encontram-se descritas na tabela 4.10.

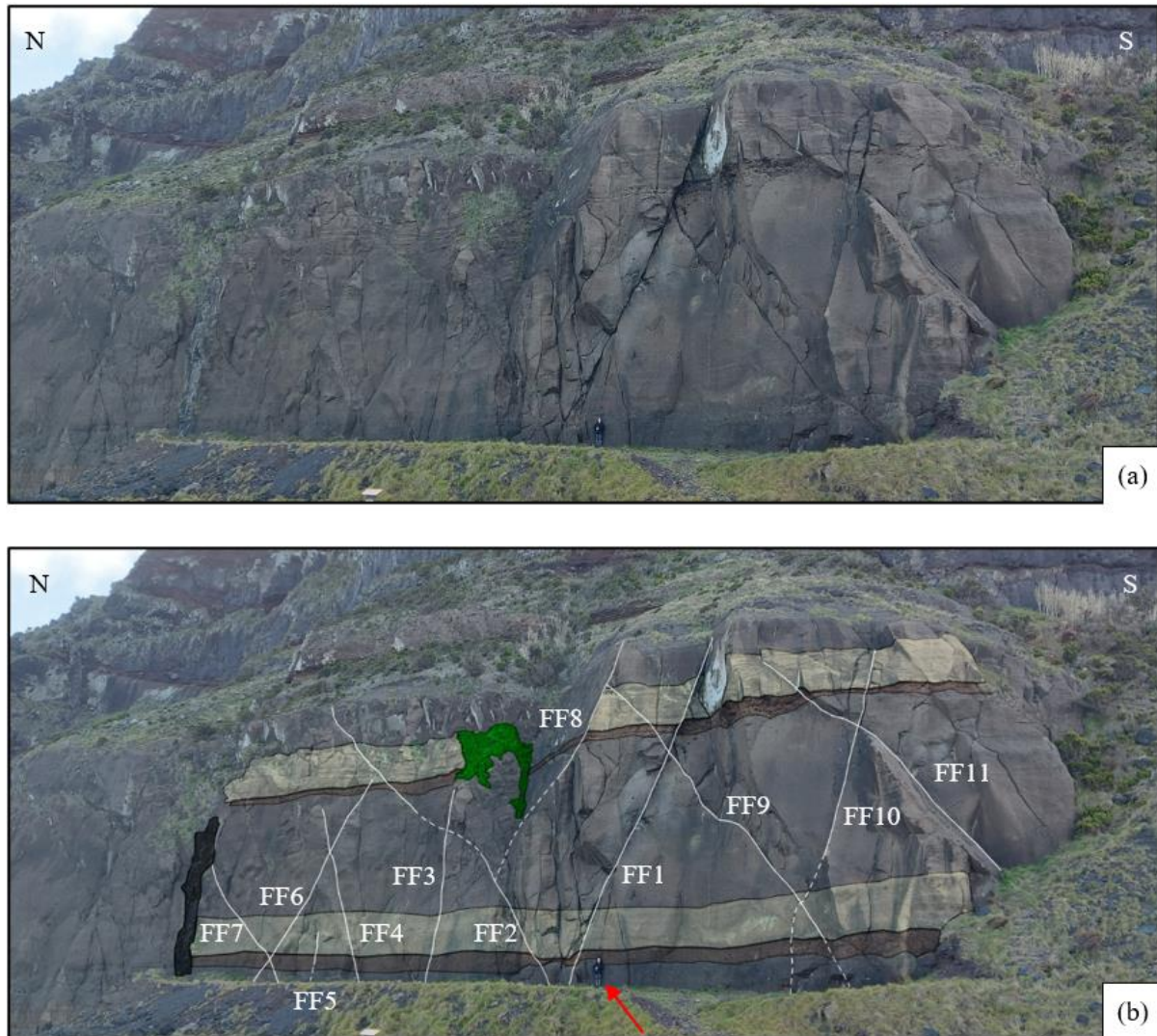


Figura 4.14 | Afloramento com falhas observado na plataforma lávica da Ferraria. A figura (a) apresenta a fotografia do afloramento e a (b) a respectiva interpretação efetuada. Nas falhas representadas a linha branca contínua foram medidas as direções magnéticas e as inclinações dos planos de falha, sendo representadas a tracejado os segmentos em que não foi possível observar a sua continuidade. As camadas assinaladas a amarelo e a castanho constituem os depósitos com estratificação entrecruzada (níveis alternados de cinzas, de granulometrias variáveis) e com uma matriz de cinza com clastos, respetivamente, mais visíveis, podendo auxiliar na definição da cinemática de cada falha (marcadores estratigráficos). A forma a verde assinala a vegetação que se encontra no meio das camadas, impedindo a visualização da continuidade das mesmas. A forma a preto representa um filão, muito fraturado, que se encontra no local. A escala mede 1,56 m e encontra-se assinalada pela seta a vermelho.

Tabela 4.10 | Medições efetuadas na estação 101 (terminologia estabelecida por Carmo, 2013). Ref. – referência.

Ref.	Identificação da falha	Direção magnética do plano de falha	Inclinação do plano de falha	Direção cartográfica do plano de falha	Direção cartográfica de máxima inclinação do plano de falha	Cinemática
FF1	FA2FERR012	272	60N	265	355	Normal
FF2	FA2FERR013	90	78S	83	173	Normal
FF3	FA2FERR014	280	85N	273	3	Normal
FF4	FA2FERR015	270	75S	263	173	Normal
FF5	FA2FERR016	268	74S	261	171	Normal
FF6	FA2FERR017	260	65N	253	343	Normal
FF7	FA2FERR018	78	57S	71	161	Normal
FF8	FA2FERR019	82	70N	75	345	Normal
FF9	FA2FERR020	86	60S	79	169	Normal
FF10	FA2FERR021	106	70N	99	9	Normal
FF11	FA2FERR022	82	46S	75	165	Normal

A “Identificação da falha” segue a formatação proposta por Carmo (2013), a fim de integrarem na base de dados AZORIS (Gaspar *et al.*, 2004), do Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos (IVAR). A “Direção cartográfica do plano de falha” foi calculada considerando o valor da declinação magnética descrito na folha 27 (2001) da Carta Militar de Portugal (7°). A “Direção cartográfica de máxima inclinação do plano de falha” foi determinada a partir da direção cartográfica.

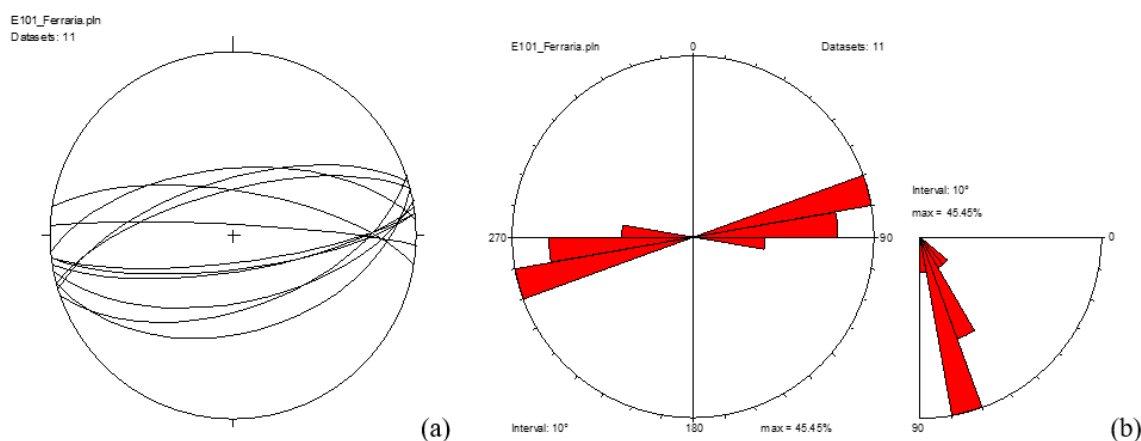


Figura 4.15 | Análise geométrica das falhas observadas na estação 101 (terminologia estabelecida por Carmo, 2013). A figura (a) refere-se à representação estereográfica no hemisfério inferior da rede de Schmidt (diagrama β) e a (b) ao histograma circular de frequências não ponderadas das direções dos planos de falha e dos ângulos de inclinação. Programa *TectonicsFP*[®] (Ortner *et al.*, 2002).

As estruturas tectónicas reconhecidas por Carmo (2013) e Carmo *et al.* (2015) presentes nas fajãs lávicas da Ferraria e dos Mosteiros são do tipo ocultas e prováveis, respetivamente, sendo inferidas pelo alinhamento de formas vulcânicas, no primeiro caso, e pelo prolongamento de escarpas de falha, no segundo, como referido anteriormente. No entanto, considerando as direções e as inclinações das falhas da Lombinha (FL) e da Lomba dos Homens (FLH), na plataforma dos Mosteiros, e a inclinação da Falha do Pico das Camarinhas, na plataforma da Ferraria, segundo os critérios já estabelecidos (Capítulo 3.3.2), é possível deduzir os dados tectónicos dos seus prolongamentos para cada plataforma. Para tal, assumiram-se as direções e as inclinações da FL (323°, 65° NE) e da FLH (316°, 65° SW) para os prolongamentos prováveis na fajã lávica dos Mosteiros, e a inclinação de 90° para a Falha do Pico das Camarinhas.

As plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades evidenciam duas famílias de falhas principais, NW-SE (316-323°) e ENE-WSW a E-W (253-273°, Fig. 4.15). A de orientação NW-SE diz respeito às falhas que constituem o *Graben* dos Mosteiros, concordante com a direção do *Rift* da Terceira (*s.l.*), e apresenta inclinações fortes, na ordem dos 65°, para NE e SW (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015). A segunda família, aflorante na fajã lávica da Ferraria, revela uma direção ENE-WSW a E-W e é igualmente caracterizada por inclinações elevadas (40 a 90°) em sentidos contrários, N e S (Fig. 4.15). Esta direção encontra-se ainda representada pela Falha do Pico das Camarinhas, podendo indicar a presença de fraturas radiais ao Vulcão das Sete Cidades (Carmo, 2013), ou corresponder ao testemunho de falhas oceânicas profundas (Queiroz, 1997; Carmo, 2013).

Todas as falhas mencionadas anteriormente sugerem a existência de componente normal, principalmente através da deslocação de marcadores estratigráficos. No caso da Ferraria, a análise cinemática foi efetuada exclusivamente a partir da deslocação de marcadores estratigráficos, através da observação direta de depósitos, nomeadamente da parte superior do afloramento (Fig. 4.14). Destes, foi possível constatar que existe, de facto, um abatimento centimétrico do bloco a teto da falha “FF1”, por exemplo, em relação ao bloco abatido, comprovando a sua movimentação normal.

Os perfis de desgaseificação integram os dados da geoquímica e da geofísica obtidos nas plataformas lávicas da Ferraria e dos Mosteiros (Fig. 4.16) e permitem avaliar a potencial correlação entre o fluxo de CO₂ no solo e as estruturas tectónicas presentes em cada área de

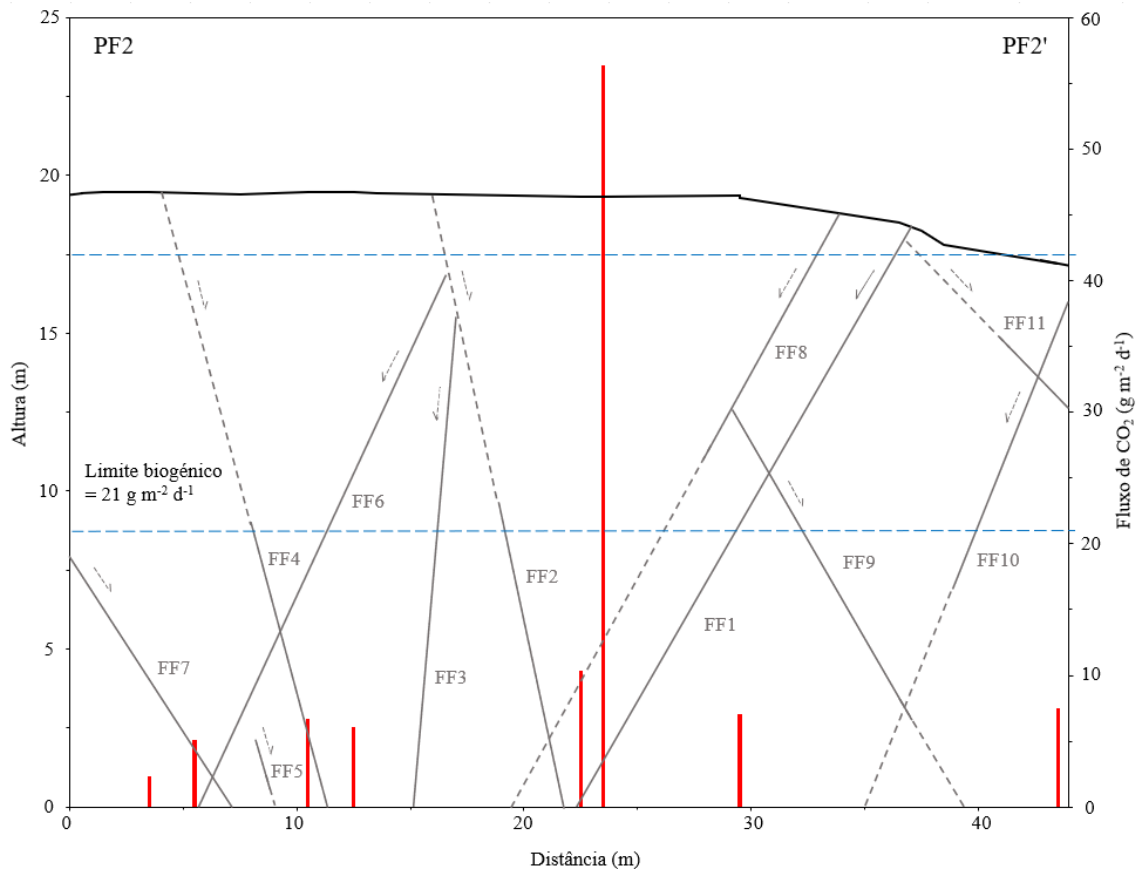
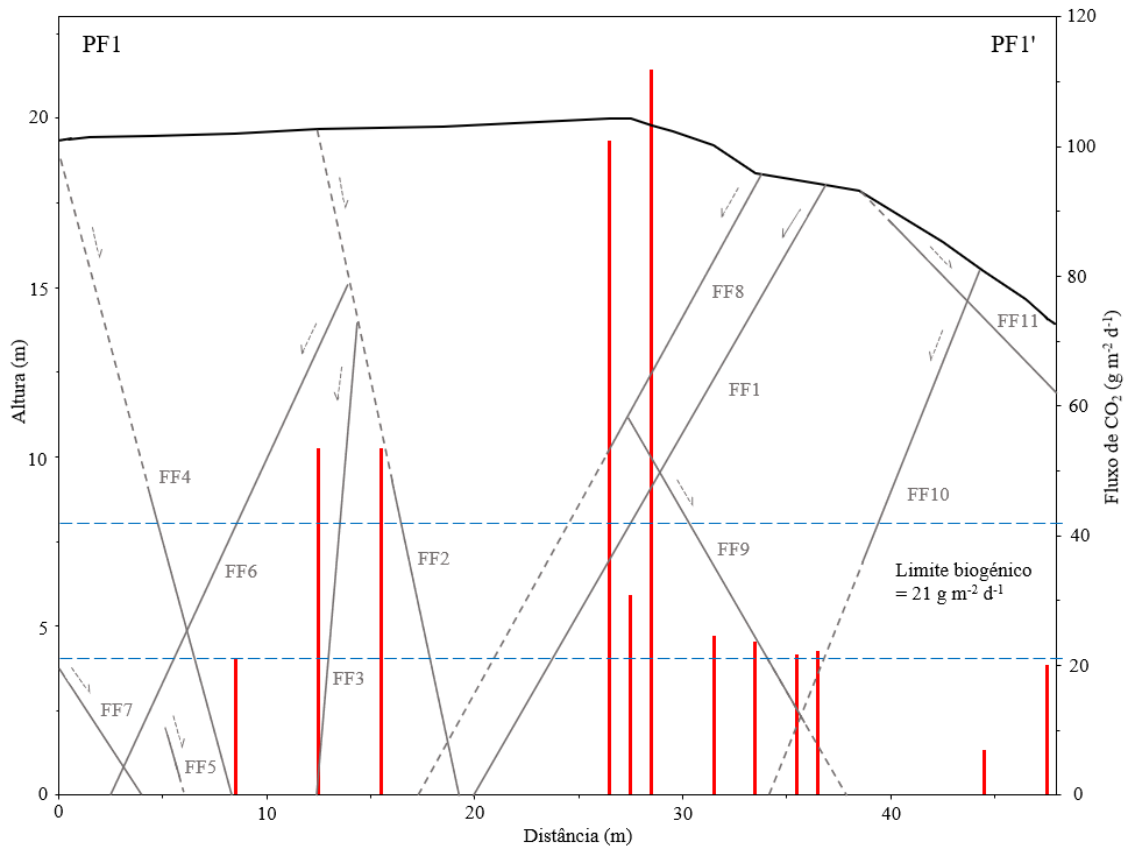
estudo. Através da inspeção da distribuição geral dos fluxos de CO₂ nas fajãs lávicas e da localização das estruturas tectónicas presentes, foram definidos quatro perfis de desgaseificação para cada área de estudo (“PF1” a “PF4” para a Ferraria e “PM1” a “PM4” para os Mosteiros, Fig. 3.12).

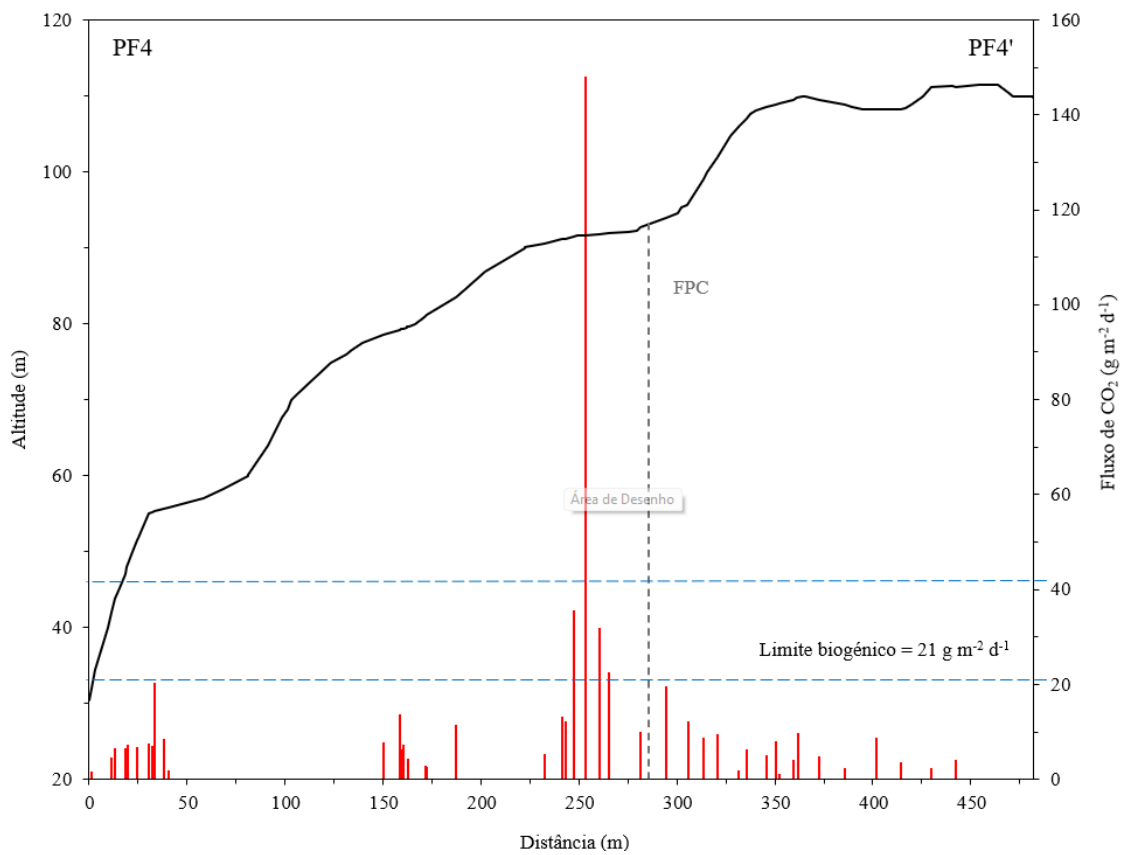
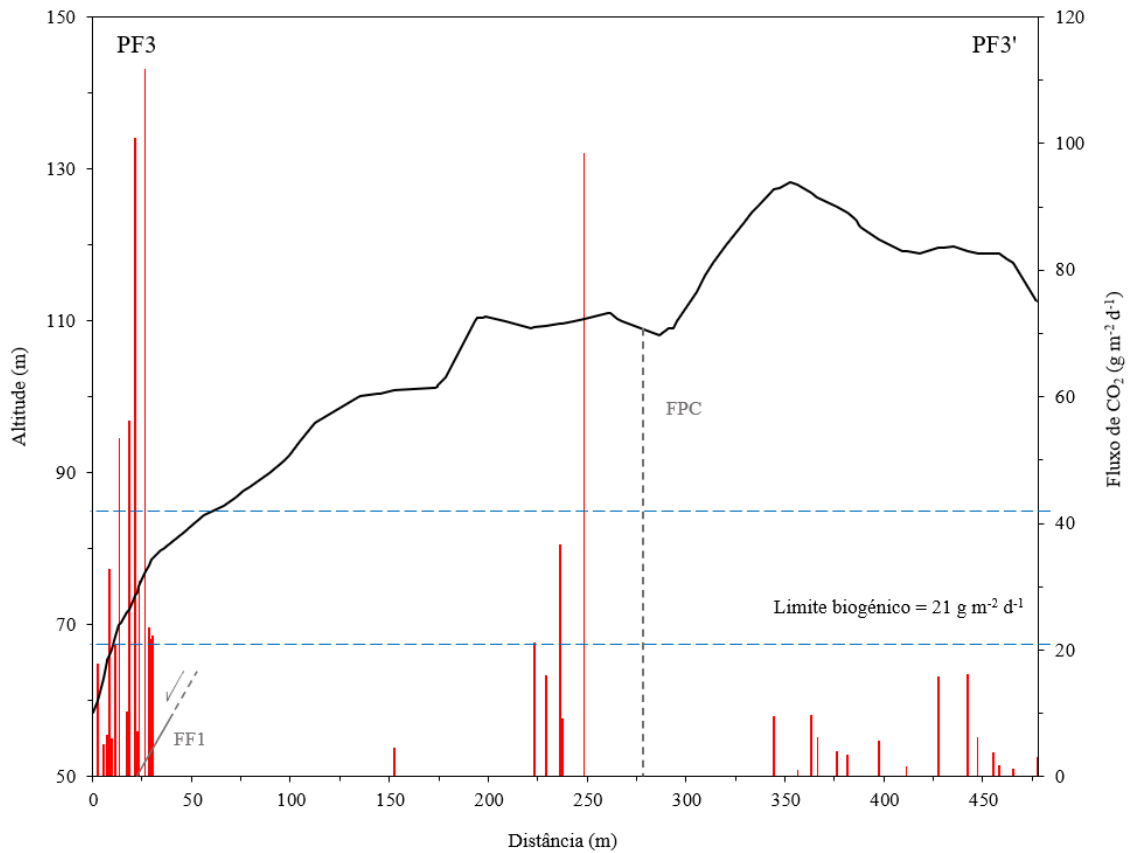
Os perfis “PF1” e “PF2” (Fig. 4.16) foram efetuados próximo à DDS “A” (Fig. 4.7 e 4.9) e demonstraram uma relação considerável entre as localizações das falhas representadas e dos valores de fluxo de CO₂ na área, principalmente no que diz respeito ao perfil “PF2”. O facto do primeiro perfil não evidenciar uma maior correlação pode ser explicado pela fraturação significativa que o talude apresenta, possivelmente provocando a introdução de ar atmosférico nos níveis subsuperficiais do terreno e diminuindo os valores de CO₂. O solo compacto e as litologias diferentes também podem desempenhar um efeito tampão na zona por onde supostamente o CO₂ poderia migrar para a superfície, levando-o a libertar-se noutros locais. Os valores de fluxo de CO₂ mais elevados registados nos dois perfis parecem estar correlacionados com a falha mais evidente (“FF1”) visto que, para além de evidenciarem uma proximidade a essa falha, os valores são considerados anómalos, ultrapassando o dobro do limite biogénico estabelecido ($\approx 42 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; ponto 4.5). É nesta falha que se observa também uma separação normal de ordem centimétrica dos níveis estratigráficos assinalados anteriormente (Fig. 4.14b), podendo indicar, à semelhança de inúmeros estudos (*e.g.* Tamburello *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2019; Lamberti *et al.*, 2019; Camarda *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021), que a emissão de CO₂ hidrotermal através do solo sucede-se normalmente em regime distensivo.

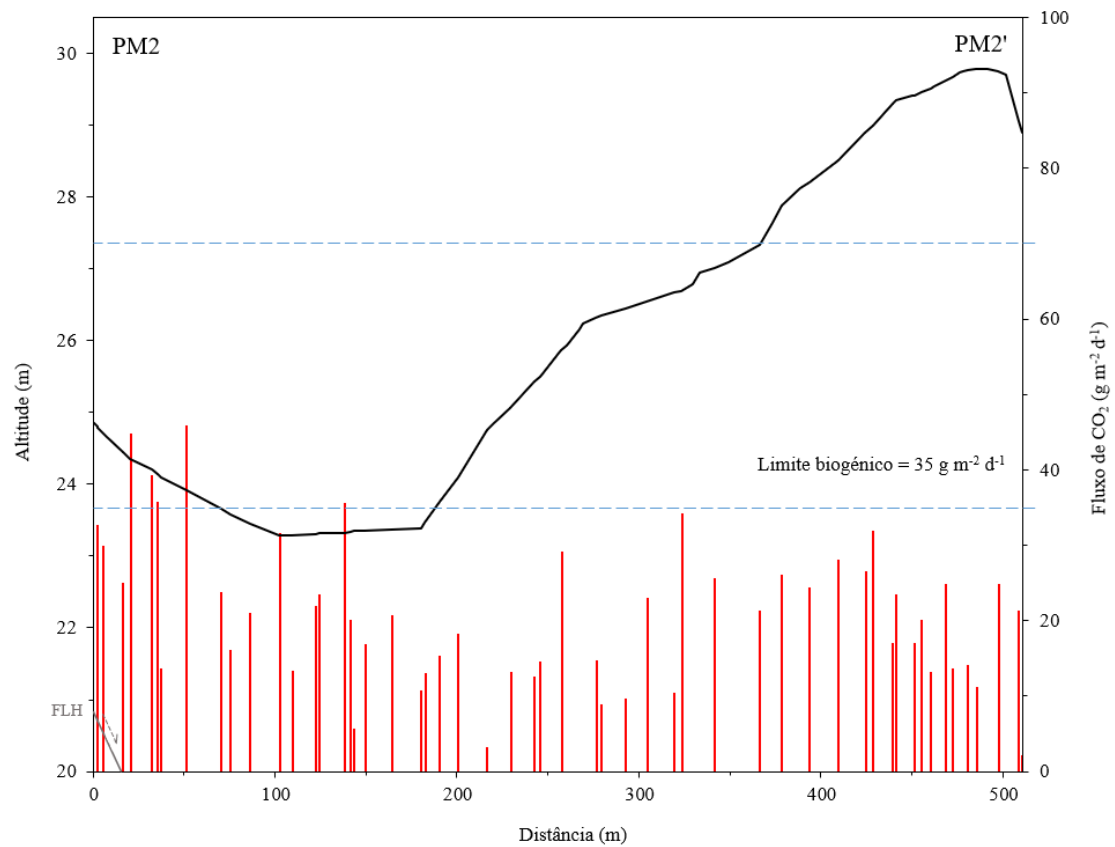
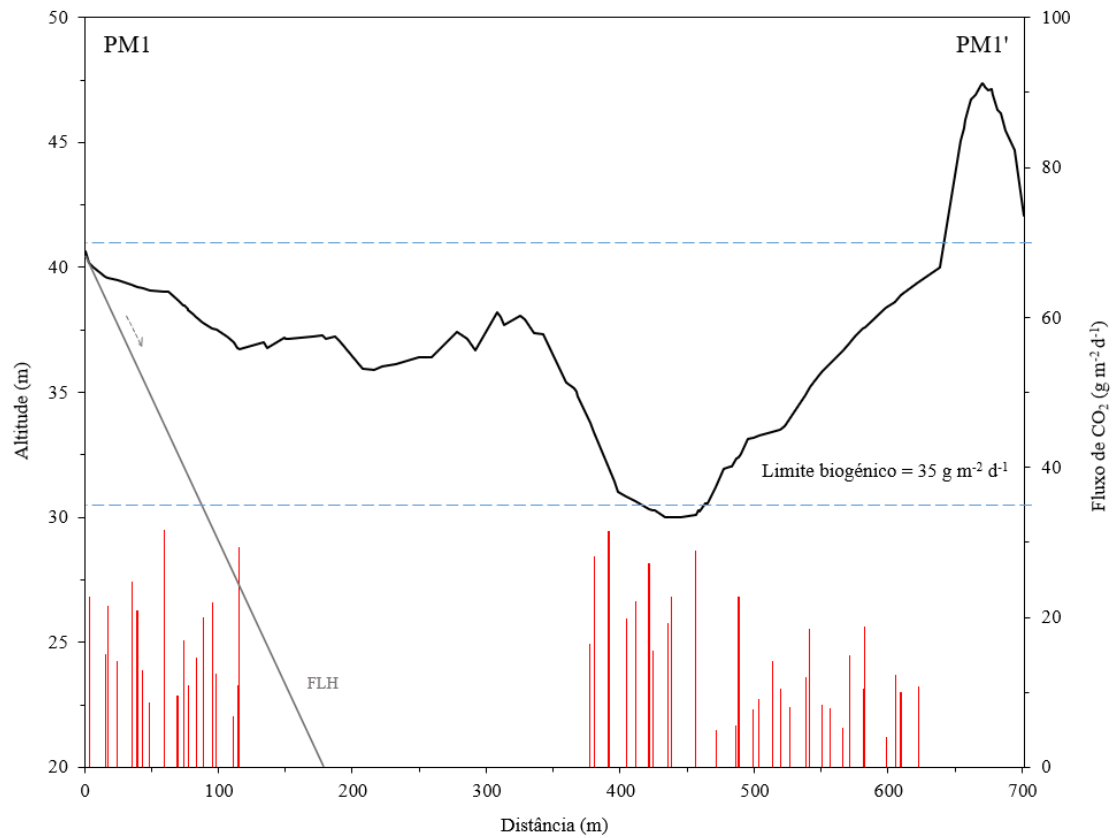
Quanto aos perfis mais extensos (“PF3” e “PF4”; Fig. 4.16), estes evidenciam duas zonas de anomalia de CO₂ principais, correspondentes às DDS “A” e “B” (Fig. 4.7 e 4.9). No perfil “PF3” optou-se por representar a falha “FF1” devido à sua proximidade ao perfil e de forma a justificar os valores elevados iniciais. Os perfis permitiram salientar, mais uma vez, o desvio existente entre os valores anómalos e a Falha do Pico das Camarinhas. Como a estrutura apresenta um sentido de inclinação desconhecido, Carmo (2013) cartografou a falha considerando a morfologia do cone e o alinhamento das crateras lá existentes, nomeadamente as que se encontram mais para E. Observando atentamente a morfologia da cratera situada mais a W, é possível denotar que esta parece ser mais alongada na direção E-W do que a imediatamente a seguir, evidenciando que a falha pode, efetivamente, curvar ligeiramente e aproximar-se da direção E-W, inclinando para N, como sugerido anteriormente. No entanto, importa, ainda, sublinhar que, para além da Falha do Pico das Camarinhas, existe outra

estrutura vulcanotectónica concorrente, definida pelo alinhamento de domos lávicos no flanco W do Vulcão das Sete Cidades, com direção semelhante, que pode, eventualmente, explicar o referido desvio nos valores anómalos de CO₂.

No que diz respeito aos Mosteiros, os perfis de desgaseificação (“PM1”, “PM2”, “PM3” e “PM4”; Fig. 4.16) não evidenciam uma correlação evidente entre os valores de fluxo de CO₂ no solo e as estruturas tectónicas. Contudo, “PM2” e “PM3” apresentam alguns valores acima do limite biogénico ($\approx 35 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; ponto 4.5) e até no caso de “PM3” os valores são claramente considerados provenientes de profundidade. No caso do perfil “PM2”, os valores mais elevados parecem relacionar-se com o prolongamento da Falha da Lomba dos Homens, no entanto, torna-se difícil apurar com mais confiança pois os valores são relativamente próximos do limite biogénico. Esta fraca correlação e a dificuldade em estabelecer uma relação com CO₂ proveniente de profundidade poderia ser obviada com a quantificação da assinatura isotópica dos valores de carbono existentes no CO₂ (Chiodini *et al.*, 2008). Contudo, a inexistência deste tipo de metodologia na Universidade dos Açores não possibilitou a realização desse tipo de abordagem. Trabalhos futuros na plataforma dos Mosteiros deveriam contemplar a amostragem isotópica do carbono. Quanto ao perfil “PM3”, os valores de fluxo são claramente anómalos, acima do dobro do limite biogénico, e por isso a origem vulcânica-hidrotermal é sugerida. Os valores mais elevados de fluxo de CO₂ medidos na fajã lávica dos Mosteiros no prolongamento para NW da Falha da Lombinha encontram-se desviados cerca de 200 m para N do traço de falha provável cartografado por Carmo (2013). Esta diferença pode dever-se ao facto do traço da Falha da Lombinha na zona da fajã lávica ser, efetivamente, mais a N, na zona da anomalia. Na sua cartografia, Carmo (2013) baseou-se em descrições históricas que apontavam para a ocorrência de rotura superficial na zona da igreja da freguesia dos Mosteiros, com abatimento do bloco NE. Esta rotura histórica pode ter ocorrido numa falha secundária sintética do acidente principal. Outra possibilidade é a desgaseificação mais elevada de CO₂ se manifestar numa zona do bloco abatido, possivelmente fraturado, localizada na vertical do plano de Falha da Lombinha, que mergulha para NE.







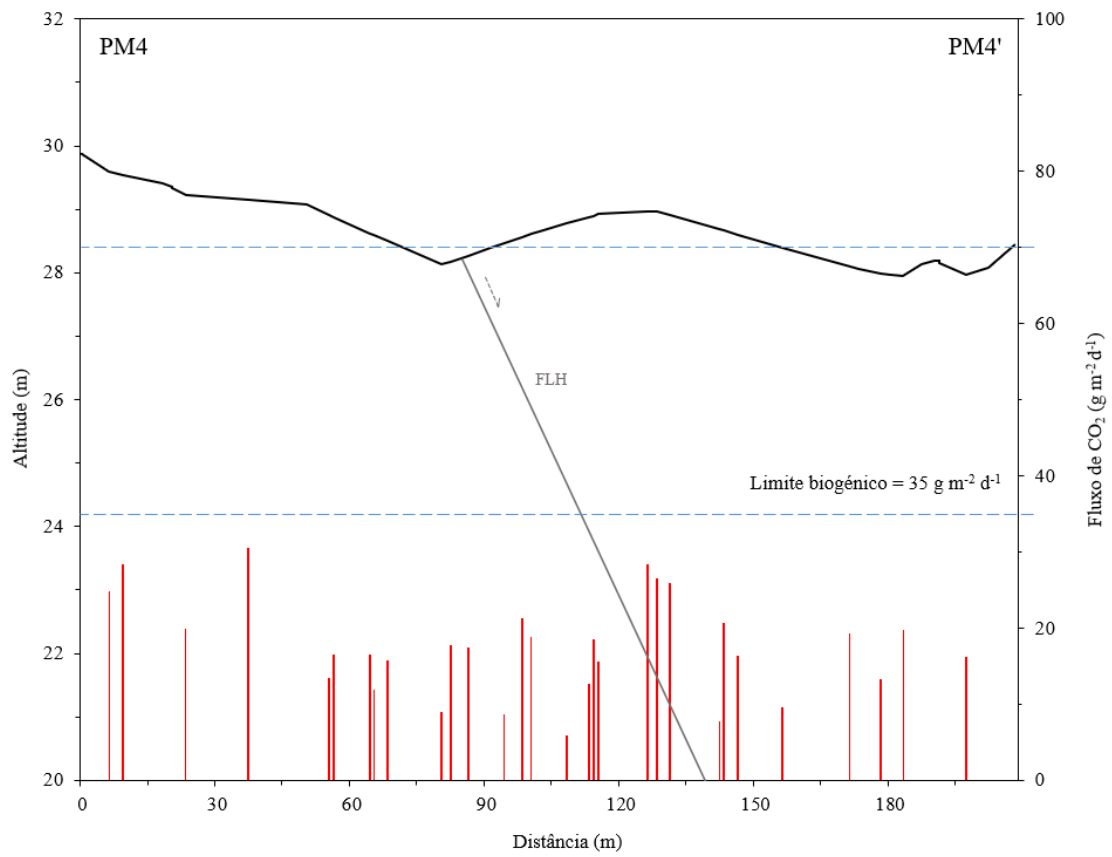
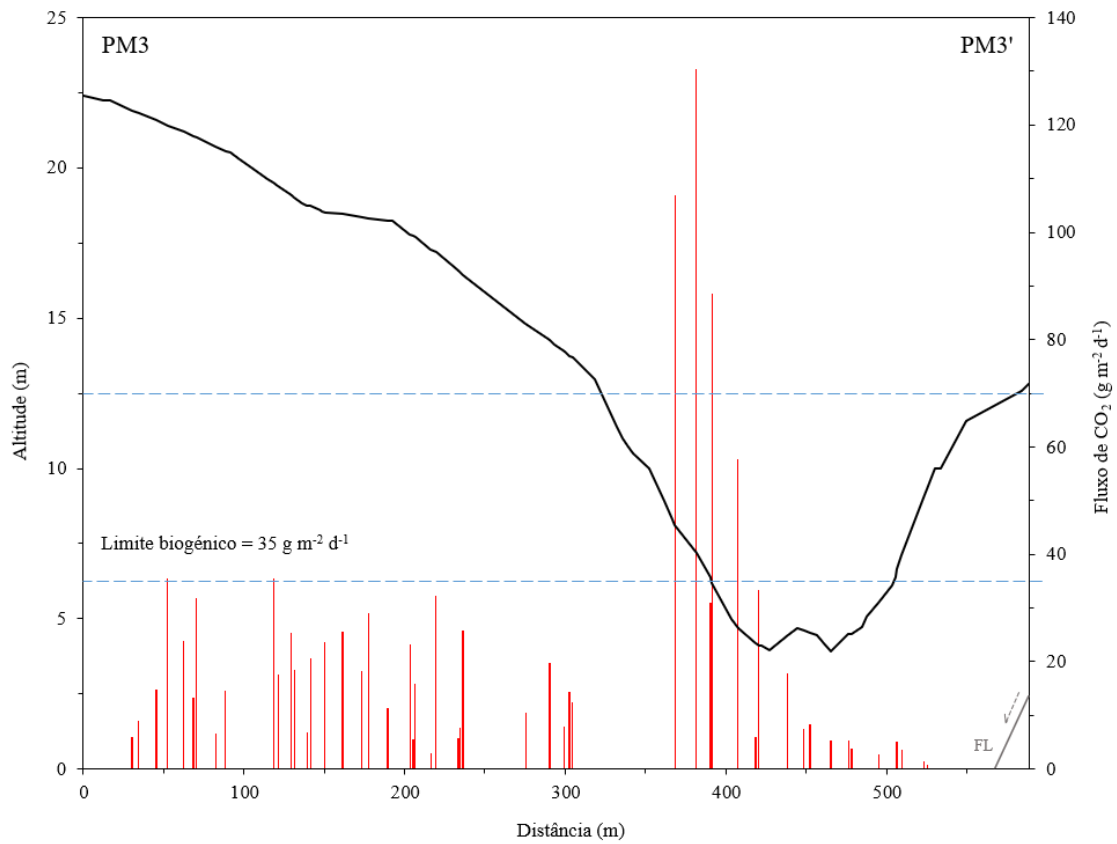


Figura 4.16 | Perfis de desgaseificação de fluxo de CO₂ no solo efetuados nas plataformas lávicas da Ferraria (PF1 a PF4) e dos Mosteiros (PM1 a PM4), no Vulcão das Sete Cidades. A linha a preto, os segmentos de reta a cinzento (contínuos) e a azul (tracejado), e as barras a vermelho representam, respetivamente, a topografia, as falhas referidas anteriormente, os limites e o dobro dos limites biogénicos para cada área de estudo, e os valores de fluxo de CO₂ no solo. Os perfis PF1 e PF2 foram desenvolvidos considerando o nível do solo (altura). Legenda: PF – Perfil Ferraria; FF – Falha Ferraria; FPC – Falha do Pico das Camarinhas; PM – Perfil Mosteiros; FL – Falha da Lombinha; FLH – Falha da Lomba dos Homens. A localização dos perfis encontra-se ilustrada na figura 3.12.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Vulcão das Sete Cidades é considerado o vulcão central mais ativo da ilha de São Miguel, tendo sido palco de pelo menos 17 erupções vulcânicas nos últimos 5.000 anos. Corresponde a um aparelho principal com caldeira e a diversos edifícios vulcânicos, localizados no interior da caldeira, nos flancos e no mar. Os fenómenos de desgaseificação neste vulcão encontram-se sob a forma de desgaseificação difusa subaérea e submarina e de nascentes termais. O presente trabalho enquadrou-se no âmbito do estudo da desgaseificação difusa de CO₂ através dos solos e na sua correlação com as estruturas tectónicas nas plataformas lávicas deste vulcão, nomeadamente Mosteiros e Ferraria. O trabalho teve como objetivos (1) definir os valores de referência para o fluxo de CO₂ nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades, (2) caracterizar os padrões de desgaseificação de CO₂, (3) definir as estruturas de desgaseificação difusa (*DDS*), (4) estimar a emissão de CO₂ para a atmosfera, (5) confirmar a existência de falhas prováveis anteriormente cartografadas nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades, (6) identificar eventuais valores anómalos de fluxo de CO₂ e de temperatura do solo associados a estruturas tectónicas, e (7) estabelecer correlações entre a existência, o tipo de estruturas tectónicas, e as áreas de desgaseificação difusa de CO₂.

A aquisição de dados nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades para a realização da cartografia do fluxo de CO₂ e da temperatura do solo decorreu ao longo de várias campanhas realizadas entre setembro de 2022 e maio de 2023. A área de amostragem da Ferraria contemplou medições na plataforma lávica, nas margens da estrada de acesso à fajã e à volta do Pico das Camarinhas e do domo imediatamente a leste, enquanto que nos Mosteiros, a amostragem cingiu-se apenas à plataforma, sob a forma de perfis de desgaseificação, numa área circunscrita entre as falhas da Lomba dos Homens e da Lombinha. As medições de fluxo de CO₂ no solo foram efetuadas segundo o método da câmara de acumulação. Este estudo resultou da realização de 939 medições de fluxo de CO₂ no solo e de temperatura do solo, 585 na Ferraria e 354 nos Mosteiros, apresentando o fluxo de CO₂ uma grande variabilidade nos seus valores, desde a ausência de fluxo de gás até valores superiores a 900 g m⁻² d⁻¹ (de 0 a 932,4 g m⁻² d⁻¹ no caso da Ferraria e de 0,6 a 144,9 g m⁻² d⁻¹ no caso dos Mosteiros). Quanto à temperatura do solo, os valores oscilaram entre 14,7 e 40,2°C (de 19,4 a 40,2°C na Ferraria e

de 14,7 a 30,9°C nos Mosteiros). No período total, a temperatura do ar variou entre 15,9 e 29,8°C.

A aplicação da análise estatística através da representação gráfica (*GSA*) aos conjuntos de dados de fluxo de CO₂ log-transformados de ambas as plataformas permitiu reconhecer a presença de três populações para cada área de estudo, sugerindo a existência de diferentes tipos de contribuição para o CO₂ libertado, e possibilitou tanto a identificação do ruído de fundo (21 g m⁻² d⁻¹ para a Ferraria e 35 g m⁻² d⁻¹ para os Mosteiros), como também a definição das principais zonas de desgaseificação anómala (42 g m⁻² d⁻¹ no caso da Ferraria e 70 g m⁻² d⁻¹ nos Mosteiros) nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades.

O método *GSA* foi igualmente aplicado aos valores de temperatura do solo log-transformados, sendo identificadas duas populações na fajã lávica da Ferraria e uma na dos Mosteiros. Para além deste método, foram utilizados outros critérios para a definição do ruído de fundo e a identificação de potenciais zonas de anomalia térmica. Esses critérios contemplaram o valor máximo da temperatura do ar medido durante as amostragens, assim como os critérios utilizados para identificar nascentes termais. A análise dos dados de temperatura do solo resultantes da aplicação das diferentes metodologias sugere a ausência de anomalias térmicas em ambas as áreas de estudo. Os valores mais elevados observados na Ferraria foram associados à elevada influência da insolação que, ao fazer-se sentir sobre os produtos vulcânicos basálticos, provoca uma considerável absorção térmica.

A análise espacial dos dados de fluxo de CO₂ para a plataforma lávica da Ferraria foi efetuada através de 100 simulações equiprováveis resultantes da aplicação da simulação sequencial Gaussiana (*sGs*), que permitiu a elaboração de mapas de médias (do tipo-E) e de probabilidade. Também foi gerado um mapa do tipo-E para a temperatura do solo, de forma a se visualizar a distribuição da temperatura na área. Esta análise possibilitou a identificação de quatro zonas anómalas principais na área de estudo da Ferraria (*DDS* “A” a “D”), uma das quais já tinha sido reconhecida em trabalhos anteriores (Lisetti, 2013) (*DDS* “B”). No que diz respeito aos Mosteiros, não foi possível proceder à elaboração de mapas interpolados de dados devido à disposição espacial selecionada, no entanto, a análise do mapa de distribuição dos valores de fluxo de CO₂ no solo permitiu reconhecer uma área de desgaseificação anómala (*DDS* “M”), junto ao porto, e coincidente com uma das áreas de risco moderado de CO₂ apresentadas por Viveiros *et al.* (2015). As anomalias reconhecidas entre o presente estudo e os referidos anteriormente parecem ter permanecido estáveis durante a última década em ambas as

plataformas. As zonas de desgaseificação difusa anómala parecem ser controladas, em grande parte, pelas estruturas tectónicas presentes em ambas as plataformas.

A análise geométrica das estruturas tectónicas identificadas no afloramento de falhas presente na plataforma lávica da Ferraria demonstra que as falhas evidenciam direções ENE-WSW a E-W (253-273°), compatíveis com a orientação dos alinhamentos vulcânicos existentes no flanco W do vulcão, a inclinar para N e S (\approx de 40 a 90°), podendo corresponder a acidentes radiais do próprio vulcão central ou a testemunhos de fraturas oceânicas profundas. A análise cinemática, baseada no deslocamento, de ordem centimétrica, de marcadores estratigráficos, mostra que estas estruturas apresentam movimentação aparentemente normal. As estruturas prováveis presentes na plataforma dos Mosteiros dizem respeito às falhas que constituem o prolongamento para NW do *Graben* dos Mosteiros (falhas da Lombinha e da Lomba dos Homens) e revelam direções NW-SE (316-323°), concordantes com a direção do *Rift* da Terceira (*s.l.*), inclinando para NE e SW (\approx 65°). Como tal, também são estruturas com componente de movimentação normal. As análises geológicas efetuadas na área de estudo da Ferraria, em junção com as informações retiradas de trabalhos anteriores (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015) sobre as estruturas dos Mosteiros, revelam que as falhas são resultantes de tensões distensivas, apresentando, portanto, potencial para emitir gases.

Os perfis de desgaseificação efetuados (“PF1” a “PF4” para a Ferraria e “PM1” a “PM42” para os Mosteiros) integraram os dados de geoquímica obtidos nas plataformas lávicas da Ferraria e dos Mosteiros e permitiram avaliar a potencial correlação entre o fluxo de CO₂ no solo e as estruturas tectónicas presentes em cada área de estudo. Estes perfis mostraram uma relação considerável entre as localizações das falhas representadas e os valores de fluxo de CO₂, principalmente no que diz respeito à área da Ferraria. As diferenças observadas nesta zona podem ser atribuídas, e no que diz respeito aos perfis que atravessam a plataforma lávica da Ferraria com direção sensivelmente NE-SW, e localizados junto ao talude da zona norte da plataforma (designados de “PF1” e “PF2”), à fraturação significativa que o talude do afloramento de falhas apresenta, possivelmente provocando a introdução de ar atmosférico nos níveis subsuperficiais do solo, e/ou ao solo compacto e litologias diferentes, podendo desempenhar um efeito tampão na zona por onde supostamente o CO₂ se libertaria para a superfície. No caso dos perfis “PF3” e “PF4”, que atravessam toda a plataforma lávica, nas proximidades da base do cone, com uma orientação N-S, a diferença pode dever-se ao facto da cartografia anterior da Falha do Pico das Camarinhas (Carmo, 2013; Carmo *et al.*, 2015) ter sido efetuada sem se considerar o aparente alongamento mais E-W da cratera localizada mais

a W deste cone, ou pode resultar do facto de se estar numa zona de interseção de falhas ocultas materializadas por alinhamentos de formas vulcânicas presentes no flanco W do vulcão. Quanto aos perfis dos Mosteiros, estes não demonstram uma relação clara entre os valores de fluxo de CO₂ e as estruturas tectónicas, apesar de se observarem alguns valores de fluxo acima do limite definido como biogénico nas imediações da Falha da Lomba dos Homens (“PM2”, perfil situado a meio da plataforma). No perfil “PM3”, localizado mais a W da plataforma, verifica-se claramente que os valores são anómalos, acima do dobro do limite biogénico, podendo estar associados à Falha da Lombinha. O desvio observado da zona anómala em relação ao traço desta falha poderá estar relacionado com a cartografia da mesma, uma vez que esta foi baseada em descrições históricas que apontavam para a ocorrência de rotura superficial na zona da igreja da freguesia dos Mosteiros, com abatimento do bloco NE, ou, por outro lado, a anomalia pode estar a manifestar-se numa zona do bloco abatido, possivelmente fraturado, localizada na vertical do plano de Falha da Lombinha, que mergulha para NE.

As estimativas das emissões de CO₂ nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades foram determinadas através das técnicas *sGs* e *GSA*. No que diz respeito à fajã lávica da Ferraria, a estimativa foi efetuada através dos dois métodos, sendo aplicado o método *sGs* para uma parte da Ferraria (conjunto de dados “F1”) e a *GSA* para a área total. No caso dos Mosteiros, a metodologia aplicada para toda a área foi a *GSA*, uma vez que não foram efetuados mapas de desgaseificação interpolados. A estimativa obtida para o conjunto de dados designados como “F1”, numa área com cerca de 0,071 km², apresenta um valor de aproximadamente 0,7 pelo método *sGs*, dos quais 0,1 t d⁻¹ (≈ 14,7 % da emissão total) dizem respeito à desgaseificação hidrotermal. O CO₂ emitido da área externa à plataforma da Ferraria foi estimado em 0,21 t d⁻¹. As emissões de CO₂ estimadas nas fajãs lávicas da Ferraria e dos Mosteiros são de aproximadamente 0,91 (*sGs* + *GSA*) e 1,19 t d⁻¹ (*GSA*), respetivamente. Quanto à contribuição hidrotermal, a emissão na área da Ferraria corresponde a 0,1 t d⁻¹, enquanto que na área dos Mosteiros estimou-se ser 0,2 t d⁻¹. As plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades emitem no total cerca de 2,10 t d⁻¹, dos quais 0,3 t d⁻¹ (≈ 14,2 %) correspondem a uma contribuição hidrotermal.

O presente trabalho demonstra, mais uma vez, a importância da cartografia geoquímica em áreas vulcânicas, dominadas pela presença, muitas vezes de estruturas tectónicas ocultas. A quantificação do CO₂ emitido para a atmosfera, assim como a identificação de estruturas de desgaseificação difusa, constituem conhecimento de base que pode ser utilizado no futuro, para

identificar potenciais alterações associadas a uma eventual reativação do Vulcão das Sete Cidades.

A identificação de *DDS* é também relevante em termos de avaliação do risco para a saúde pública, uma vez que o CO₂ se pode acumular em zonas confinadas no ambiente exterior, ou mesmo introduzir-se em edifícios, e constituir um perigo para a vida humana, como já ocorreu, inclusivamente na freguesia dos Mosteiros. A cartografia apresentada deverá constituir uma ferramenta em termos de ordenamento do território e de cartografia de riscos geológicos.

De forma a compreender e a complementar alguns dos resultados obtidos na presente dissertação, é importante continuar a desenvolver trabalhos relacionados com esta temática no Vulcão das Sete Cidades quer no que diz respeito à monitorização sismovulcânica, quer em questões de saúde pública. Como tal, sugerem-se como trabalhos futuros:

Estender a realização da cartografia de fluxo de CO₂ no solo e de temperatura do solo a toda a área da plataforma lávica dos Mosteiros. Este estudo poderia permitir a aplicação de metodologias de interpolação aos dados, que possibilitam a identificação de outras potenciais zonas anómalas na área e a melhor caracterização das anomalias já identificadas, assim como a melhor compreensão da possível relação entre as anomalias geoquímicas e as estruturas tectónicas presentes. A realização de cartografia de detalhe da plataforma dos Mosteiros permitirá também quantificar a emissão do fluxo de CO₂ para a atmosfera, assim como definir mapas de suscetibilidade e de risco para a exposição a este gás.

Determinar a composição isotópica dos valores de carbono (¹³C) associados ao fluxo de CO₂ nas plataformas lávicas da Ferraria e dos Mosteiros de forma a confirmar os limites estabelecidos para a contribuição biogénica, assim como definir a assinatura isotópica do CO₂ com origem vulcânica-hidrotermal da área de estudo. O recurso à caracterização isotópica do carbono libertado é de particular importância na plataforma dos Mosteiros, onde se registam valores de fluxo de CO₂ numa gama intermédia, e que podem ser associados também a uma origem biogénica. A caracterização isotópica poderá, assim, permitir uma melhor correlação entre os valores de fluxo de gás e as estruturas tectónicas existentes, principalmente no que diz respeito aos valores medidos no traço da Falha da Lomba dos Homens.

Quantificar a emissão total de CO₂ proveniente de profundidade nas duas plataformas lávicas considerando não só a desgaseificação difusa, mas também o CO₂ libertado a partir das nascentes termais.

Efetuar a cartografia das zonas submarinas circundantes a ambas as plataformas com recurso a sonar e/ou ROV de forma a identificar potenciais áreas de desgaseificação para além das reconhecidas na zona norte da plataforma dos Mosteiros. Este estudo permitiria não só a avaliação da extensão das anomalias submarinas, mas também a sua caracterização em termos composição química e isotópica.

Instalar uma estação permanente de medição de fluxo de CO₂ numa das *DDS* identificadas no presente estudo, o que possibilitaria a monitorização permanente do Vulcão das Sete Cidades ao nível também da geoquímica de gases. As áreas identificadas como *DDS* representam zonas com contribuição de fluidos provenientes de profundidade, e por isso são adequadas para a monitorização geoquímica.

Efetuar medições adicionais de temperatura do solo não só considerando diferentes épocas do ano, mas também a avaliação da temperatura do solo a maior profundidade, se possível, em algumas das zonas onde foram medidos os valores de temperatura do solo mais elevados no presente estudo. De facto, o trabalho realizado não permitiu identificar zonas de anomalia térmica, apesar de terem sido medidos valores máximos de temperatura do solo de 40°C. Considerando o impacto da temperatura do ar e das variações sazonais nos níveis superficiais do solo, assim como a existência de nascentes termais na área de estudo, será importante a realização de estudos adicionais para discriminar a existência, ou não, de anomalias térmicas.

Realizar campanhas de desgaseificação de radão nas plataformas lávicas do Vulcão das Sete Cidades. Com este trabalho seria possível avaliar a correlação deste gás com o CO₂, podendo a cartografia do mesmo contribuir também para identificar estruturas tectónicas ocultas. Considerando o impacto que o radão pode ter em termos de saúde pública, essa cartografia seria relevante para a avaliação do risco para a saúde pública, e deveria incluir campanhas de quantificação do radão do solo e no interior de edifícios.

Aplicar técnicas de paleossismologia aos segmentos prováveis e sem expressão morfológica das falhas dos *Graben* dos Mosteiros, como a abertura de trincheiras, ou aplicação de métodos geofísicos, tais como o *GPR* (*Ground-Penetrating Radar*), nos segmentos prováveis, permitindo, deste modo, aceder a uma maior profundidade e, conseqüentemente, a uma maior fração do registo geológico.

BIBLIOGRAFIA

Accioaiuoli, L. (1940). *Águas minerais do continente e ilha de S. Miguel*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa, 162 p.

Aguiar, P. e Costa, A.C. (2010). *Shallow hydrothermal vents and marine protected areas within the Azores archipelago*. Centro de Informação Geográfica e Planeamento Territorial, Universidade dos Açores, Ponta Delgada.

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

Aiuppa, A., Burton, M., Caltabiano, T., Giudice, G., Guerrieri, S., Liuzzo, M., Murè, F. e Salerno, G. (2010). Unusually large magmatic CO₂ gas emissions prior to a basaltic paroxysm. *Geophysical Research Letters*, 37(17). DOI: 10.1029/2010GL043837.

Aiuppa, A., Caleca, A., Federico, C., Gurrieri, S. e Valenza, M. (2004). Diffuse degassing of carbon dioxide at Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy) and its relation with regional tectonics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133(1-4): 55-79. DOI: 10.1016/S0377-0273(03)00391-3.

Albarède, F. (2003). *Geochemistry. An Introduction*. Cambridge University Press, 248p.

Allard, P. (1996). Geochemistry of volcanic gases: composition, origin and flux. Applications to volcano monitoring. In: Barberi, F., Casale, R. e Fantechi, R. (Eds.), *Proceedings of the course: the mitigation of volcanic hazards*. European Commission, 375-392.

Allard, P., Carbonnelle, J., Dajlevic, D., Le Bronec, J., Morel, P., Robe, M.C., Maurenas, J.M., Faivre-Pierret, R., Martin, D., Sabroux, J.C. e Zettwoog, P. (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, 351: 387-391. DOI: 10.1038/351387a0.

Andrade, C. (2014). *Emissão de CO₂ em lagos vulcânicos dos Açores: quantificação e implicações hidrogeoquímicas*. Dissertação de Mestrado em Geologia do Ambiente e Sociedade, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 176p.

Andrade, C., Cruz, J.V., Viveiros, F. e Coutinho, R. (2020). Emissão de CO₂ na Lagoa das Sete Cidades (São Miguel, Açores). *Comunicações Geológicas*, 107(Especial II): 105-109. ISSN: 0873-948X, e-ISSN: 1647-581X.

Andrade, C., Cruz, J.V., Viveiros, F. e Coutinho, R. (2021). Diffuse CO₂ emissions from Sete Cidades volcanic lake (São Miguel island, Azores): Influence of eutrophication processes. *Environmental Pollution*, 268, Part A, 115624. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115624.

Andrade, C., Viveiros, F., Cruz, J.V., Branco, R., Moreno, L., Silva, C., Coutinho, R. e Pacheco, J. (2019). Diffuse CO₂ flux emission in two maar crater lakes from São Miguel Island (Azores, Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 369: 188-202. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.11.030.

Andrade, C., Viveiros, F., Cruz, J.V., Coutinho, R. e Silva, C. (2016). Estimation of the CO₂ flux from Furnas volcanic Lake (São Miguel, Azores). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 315: 51-64. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.005.

Andrade, C., Zanon, V., Viveiros, F., Cruz, J.V., Pimentel, A. e Coutinho, R. (2023). Quantification of diffuse CO₂ flux emission from the crater lagoon of Vila Franca do Campo Islet (São Miguel, Azores). *Bulletin of Volcanology*, 85, 25. DOI: 10.1007/s00445-023-01639-y.

Angell, R.F., Svejcar, T., Bates, J., Saliendra, N.Z. e Johnson, D.A. (2001). Bowen ratio and closed chamber carbon dioxide flux measurements over sagebrush steppe vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2): 153-161. DOI: 10.1016/S0168-1923(01)00227-1.

Annunziatellis, A., Beaubien, S.E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M. e Lombardi, S. (2008). Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): implications for CO₂ geological storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(3): 353-372. DOI: 10.1016/j.ijggc.2008.02.003.

Azevedo, D.E. (2001). Condicionantes dinâmicas do clima do Arquipélago dos Açores. Elementos para o seu estudo. *Açoreana*, 9(3): 309-317.

Barberi, F., Carapezza, M.L., Cioni, R., Lelli, M., Menichini, M., Ranaldi, M., Ricci, T. e Tarchini, L. (2013) New geochemical investigations in Platanares and Azacualpa geothermal

sites (Honduras). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257: 113-134. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.03.011.

Barberi, F., Carapezza, M.L., Tarchini, L., Ranaldi, M., Ricci, T. e Gattuso, A. (2019). Anomalous discharge of endogenous gas at Lavinio (Rome, Italy) and the lethal accident of 5 september 2011. *GeoHealth*, 3(12): 407-422. DOI: 10.1029/2019GH000211.

Barberi, F., Chelini, W., Marinelli, G. e Martini, M. (1989). The gas cloud of Lake Nyos (Cameroon, 1986): results of the italian technical mission. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39(2-3): 125-134. DOI: 10.1016/0377-0273(89)90053-X.

Barnes, I., Irwin, W.P. e White, D.E. (1978). *Global distribution of carbon dioxide discharges, and major zones of seismicity*. Water-Resources Investigations, 78-39, U.S Geological Survey Open-File Report.

Baubron, J.C., Allard, P. e Toutain, J.P. (1990). Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, 344: 51-53. DOI: 10.1038/344051a0.

Baubron, J.C., Allard, P., Sabroux, J., Tedesco, D. e Toutain, J.P. (1991). Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of the Geological Society*, 148: 571-576. DOI: 10.1144/gsjgs.148.3.057.

Baubron, J.C., Baxter, P., Coutinho, R., Allard, P., Ferreira, T. e Gaspar, J.L. (1994). Methodology for the drawing up of the Furnas gas hazard map. *In: Barberi, F., Casale, R. e Fratta, M. (Eds.) The European laboratory volcanoes*. Workshop proceedings, Catania: 262-267.

Baubron, J.C., Rigo, A. e Toutain, J. P. (2002). Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonics areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1-2): 69-81. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00596-9.

Baxter, P., Baubron, J.C. e Coutinho, R. (1999). Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas Volcano, São Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 95-106. DOI: 10.1016/S0377-0273(99)00070-0.

Bettencourt, M.L. (1979). *O clima dos Açores como recurso natural, especialmente em agricultura e indústria do turismo*. O clima de Portugal, Lisboa: Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

Bini, G., Chiodini, G., Cardellini, C., Vougioukalakis, G.E. e Bachmann, O. (2019). Diffuse emission of CO₂ and convective heat release at Nisyros caldera (Greece). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 376(2019): 44-53. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2019.03.017.

Bini, G., Chiodini, G., Lucchetti, C., Moschini, P., Caliro, S., Mollo, S., Selva, J., Tuccimei, P., Galli, G. e Bachmann, O. (2020). Deep versus shallow sources of CO₂ and Rn from a multi-parametric approach: the case of the Nisyros caldera (Aegean Arc, Greece). *Scientific Reports*, 10, 13782. DOI: 10.1038/s41598-020-70114-x.

Bloomberg, S., Werner, C., Rissmann, C., Mazot, A., Horton, T., Gravley, D., Kennedy, B. e Oze, C. (2014). Soil CO₂ emissions as a proxy for heat and mass flow assessment, Taupō Volcanic Zone, New Zealand. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4885-4904. DOI: 10.1002/2014GC005327.

Bohling, G. (2005). Introduction to geostatistics and variogram analysis. Kansas Geological Survey, 1, 1-20.

Borges, J.F. (2003). *Fonte sísmica em Portugal - algumas implicações na Geodinâmica da região Açores-Gibraltar*. Tese de Doutoramento no ramo de Física, Universidade de Évora, 237 p.

Borges, J.F., Bezzeghoud, M., Buforn, E., Pro, C. e Fitas, A. (2007). The 1980, 1997 and 1998 Azores earthquakes and some seismo-tectonic implications. *Tectonophysics*, 435(1-4): 37-54. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.01.008.

Borges, J.F., Caldeira, B., Bezzeghoud, M. e Buforn, E. (2008). Sismicidade e sismotectónica dos Açores: implicações geodinâmicas. In: Oliveira, C.S., Costa A. e Nunes J.C. (Eds.). *Sismo 1998-Açores. Uma década depois*. ISBN: 978-989-20-1223-0.

Borken, W., Xu, Y.-J., Davidson, E.A. e Beese, F. (2002). Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 8(12): 1205-1216. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00547.x.

Boudoire, G., Di Muro, A., Liuzzo, M., Ferrazzini, V., Peltier, A., Gurrieri, S., Michon, L., Giudice, G., Kowalski, P. e Boissier, P. (2017). New perspectives on volcano monitoring in a tropical environment: continuous measurements of soil CO₂ flux at Piton de la Fournaise (La

- Réunion Island, France). *Geophysical Research Letters*, 44(16): 8244-8253. DOI: 10.1002/2017GL074237.
- Bourret, S.M., Kwicklis, E.M., Miller, T.A. e Stauffer, P.H. (2019). Evaluating the importance of barometric pumping for subsurface gas transport near an underground nuclear test site. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 180134: 1-17. DOI: 10.2136/vzj2018.07.0134.
- Bremer, D.J., Ham, J.M., Owensby, C.E. e Knapp, A.K. (1998). Responses of Soil Respiration to Clipping and Grazing in a Tallgrass Prairie. *Journal of Environmental Quality*, 27(6): 1539-1548. DOI: 10.2134/jeq1998.00472425002700060034x.
- Buchmann, N. (2000). Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(11-12): 1625-1635. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00077-8.
- Bufo, E., Udías, A. e Colombás, M.A. (1988). Seismicity, source mechanisms and tectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary. *Tectonophysics*, 152(1-2): 89-118. DOI: 10.1016/0040-1951(88)90031-5.
- Burgisser, A. e Degruyter, W. (2015). Magma Ascent and Degassing at Shallow Levels. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H. e Stix, J. (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition, Academic Press: 225-236. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00011-0.
- Burton, M.R., Sawyer, G.M. e Granieri, D. (2013). Deep Carbon Emissions from Volcanoes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1): 323-354. DOI: 10.2138/rmg.2013.75.11
- Buttitta, D., Caracausi, A., Chiaraluce, L., Favara, R., Morticelli, M.G. e Sulli, A. (2020). Continental degassing of helium in an active tectonic setting (northern Italy): the role of seismicity. *Scientific Reports*, 10, 162. DOI: 10.1038/s41598-019-55678-7.
- Cabral, M. (2002). *Boletim de Análise físico-química n° 9155*. INOVA, Ponta Delgada.
- Caliro, S., Viveiros, F., Chiodini, G. e Ferreira, T. (2015). Gas geochemistry of hydrothermal fluids of the S. Miguel and Terceira islands, Azores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 168: 43-57. DOI: 10.1016/j.gca.2015.07.009.
- Camarda, M., De Gregorio, S., Capasso, G., Di Martino, R.M.R., Gurrieri, S. e Prano, V. (2019). The monitoring of natural soil CO₂ emissions: issues and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 198, 102928. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102928.

- Camarda, M., De Gregorio, S., Di Martino, R.M.R., Favara, R. e Prano, V. (2020). Relationship between soil CO₂ flux and tectonic structures in SW Sicily. *Annals of Geophysics*, 63(1), SE104. DOI: 10.4401/ag-8264.
- Camarda, M., De Gregorio, S., Favara, R. e Gurrieri, S. (2007). Evaluation of carbon isotope fractionation of soil CO₂ under an advective-diffusive regimen: a tool for computing the isotopic composition of unfractionated deep source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(12): 3016-3027. DOI: 10.1016/j.gca.2007.04.002.
- Camarda, M., Gurrieri, S. e Valenza, M. (2006). CO₂ flux measurements in volcanic areas using the dynamic concentration method: influence of soil permeability. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05202. DOI:10.1029/2005JB003898.
- Camarda, M., Prano, V., Cappuzzo, S., Gurrieri, S. e Valenza, M. (2017). Temporal variations in air permeability and soil CO₂ flux in volcanic ash soils (island of Vulcano, Italy). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(8): 3241-3253. DOI: 10.1002/2017GC006857.
- Cannat, M., Briais, A., Deplus, C., Escartín, J., Georgen, J., Lin, J., Mercouriev, S., Meyzen, C., Muller, M., Pouliquen, G., Rabain, A. e Silva, P. (1999). Mid-Atlantic Ridge - Azores hotspot interactions: along-axis migration of a hotspot-derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 257-269. DOI: 10.1016/S0012-821X(99)00234-4.
- Carapezza, M.L. e Granieri, D. (2004). CO₂ soil flux at Vulcano (Italy): comparison between active and passive methods. *Applied Geochemistry*, 19(1): 73-88. DOI: 10.1016/S0883-2927(03)00111-2.
- Carapezza, M.L., Ricci, T., Ranaldi, M. e Tarchini, L. (2009). Active degassing structures of Stromboli and variations in diffuse CO₂ output related to the volcanic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182(3-4): 231-245. DOI: 10.1016/j.volgeo.2008.08.006.
- Carapezza, M.L., Barberi, F., Ranaldi, M., Ricci, T., Tarchini, L., Barrancos, J., Fischer, C., Granieri, D., Lucchetti, C., Melian, G., Perez, N., Tuccimei, P., Vogel, A. e Weber, K. (2012). Hazardous gas emissions from the flanks of the quiescent Colli Albani volcano (Rome, Italy). *Applied Geochemistry*, 27(9): 1767-1782. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.012.

Cardellini, C., Chiodini, G. e Frondini, F. (2003). Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil: mapping and quantification of gas release. *Journal of Geophysical Research*, 108(B9), 2425. DOI: 10.1029/2002JB002165.

Cardellini, C., Chiodini, G. e Frondini, F., Avino, R., Bagnato, E., Caliro, S., Lelli, M. e Rosiello, A. (2017). Monitoring diffuse volcanic degassing during volcanic unrests: the case of Campi Flegrei (Italy). *Scientific Reports*, 7, 6757. DOI: 10.1038/s41598-017-06941-2.

Carmo, R. (2013). *Estudos de neotectónica na Ilha de S. Miguel, uma contribuição para o estudo do risco sísmico no Arquipélago dos Açores*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, Ponta Delgada: 307p.

Carmo, R., Madeira, J., Ferreira, T., Queiroz, G. e Hipólito, A. (2015). Volcano-tectonic structures of São Miguel Island, Azores. Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago). In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S. e Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 65-86. DOI: 10.1144/M44.6.

Carvalho, M.R. (1999). *Hidrogeologia do maciço vulcânico de Água de Pau/Fogo, S. Miguel, Açores*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade Hidrogeologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 445p.

Carvalho, M.R., Mateus, A., Nunes, J.C. e Carvalho, J.M. (2009). Caracterização da água termal da Ferraria (S. Miguel, Açores): origem e evolução composicional. In: Nunes, J.C., Martins Carvalho, J., Rubio, R.F. (Eds.), *Actas do Encontro Internacional de Termalismo e Turismo Termal - III Fórum Ibérico de Águas Engarrafadas e Termalismo*, Furnas, São Miguel (Açores).

Carvalho, M.R., Mateus, A., Nunes, J.C. e Carvalho, J.M. (2011). Chemistry of the Ferraria thermal water, S. Miguel Island, Azores: mixing and precipitation processes. *Environmental Earth Science*, 64: 539-547. DOI: 10.1007/s12665-010-0877-8.

Casals, P., Romanyà, J., Cortina, J., Bottner, P., Coûteaux, M.-M. e Vallejo, V.R. (2000). CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 48: 261-281. DOI: 10.1023/A:1006289905991.

Chao, S., Liu, M., Dong, Q.-y., Zhang, L., Wang, P., Chen, H.-y. e Ma, R. (2022). Variation characteristics of CO₂ in a newly-excavated soil profile, Chinese Loess Plateau: excavation-induced ancient soil organic carbon decomposition. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(1): 19-32. DOI: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.01.003.

Chaves, F.A. (1960). Erupções submarinas nos Açores. Informações que os navegantes podem prestar sobre tal assunto. *Açoreana*, 5(4), 50p.

Chiodini, G., Baldini, A., Barberi, F., Carapezza, M.L., Cardellini, C., Frondini, F., Granieri, D. e Ranaldi, M. (2007). Carbon dioxide degassing at Latera caldera (Italy): evidence of geothermal reservoir and evaluation of its potential energy. *Journal of Geophysical Research*, 112, B12204. DOI: 10.1029/2006JB004896.

Chiodini, G., Caliro, S., Avino, R., Bini, G., Giudicepietro, F., De Cesare, W., Ricciolino, P., Aiuppa, A., Cardellini, C., Petrillo, Z., Selva, J., Siniscalchi, A. e Tripaldi, S. (2021). Hydrothermal pressure-temperature control on CO₂ emissions and seismicity at Campi Flegrei (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 414, 107245. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107245.

Chiodini, G., Caliro, S., Cardellini, C., Avino, R., Granieri, D. e Schmidt, A. (2008). Carbon isotopic composition of soil CO₂ efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO₂ degassing in volcanic-hydrothermal areas. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(3-4): 372-379. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.07.051.

Chiodini, G., Cardellini, C., Amato, A., Boschi, E., Caliro, S., Frondini, F. e Ventura, G. (2004). Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in central and southern Italy. *Geophysical Research Letters*, 31, L07615. DOI: 10.1029/2004GL019480.

Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., e Marini, L. (1998). Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5): 543-552. DOI: 10.1016/S0883-2927(97)00076-0.

Chiodini, G., Frondini, F. e Raco, B. (1996). Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater, Vulcano island (Italy). *Bulletin of Volcanology*, 58: 41-50.

Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L. e Ventura, G. (2001). CO₂ degassing and energy release at Solfatara Volcano, Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 106: 16213-16221.

Chiodini, G., Granieri, D., Avino, R., Caliro, S., Costa, A. e Werner, C. (2005), Carbon dioxide diffuse degassing and estimation of heat release from volcanic and hydrothermal systems. *Journal of Geophysical Research*, 110, B08204. DOI: 10.1029/2004JB003542.

Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, 456p.

Collingnon, M., Cardellini, C., Duprat-Oualid, S., Hammer, Ø., Chiodini, G., Vandemeulebrouck, J., Gonzalez-Vidal, D., Espinoza, A., Tassara, A. e Ruch, J. (2021). Carbon dioxide diffuse emission at the Tolhuaca hydrothermal system (Chile) controlled by tectonics and topography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 417, 107316. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107316.

Coplen, T.B., De Bièvre, P., Krouse, H.R., Vocke Jr., R.D., Gröning, M. e Rozanski, K. (1996). Ratios for light-element isotopes standardized for better interlaboratory comparison. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 77(27): 255-255. DOI: 10.1029/96EO00182.

Costa, A. (2006). *Atlas hidrogeológico das águas minerais dos Açores*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 118p.

Coutinho, R. (1990). *Estudo hidrogeológico do Maciço das Sete Cidades*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 134p.

Coutinho, R., Carreira, P.M., Almeida, C., Monge Soares, A.M., Vieira, M.C.R., Carvalho, M.R. e Cruz, J.V. (1996). Estudo isotópico dos sistemas aquíferos do Maciço das Sete Cidades, S. Miguel - Resultados preliminares. *Recursos Hídricos*, 17: 25-32.

Couto, R.P., Rodrigues, A.S. e Neto, A.I. (2015). Shallow-water hydrothermal vents in the Azores (Portugal). *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15(4): 495-505. DOI: 10.5894/rgci584.

Cruz, J.V., Coutinho, R., Carvalho, M.R., Oskarsson, N. e Gislason, S.R. (1999). Chemistry of waters from Furnas volcano, São Miguel, Azores: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 151-167. DOI: 10.1016/S0377-0273(99)00073-6.

Cruz, J.V., Freire, P. e Costa, A. (2010). Mineral waters characterization in the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190(3-4): 353-364. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2009.12.001.

Cui, Y.J., Li, Y., Si, X.Y., Yang, L.X., Lui, Z.F., Sun, F.X., Li, X.Y., Zheng, H.W. e Du, J.G. (2019). Tectonic controls on near-surface variations in CH₄ and CO₂ concentrations along the northwestern margin of the Ordos Block, China. *Geofluids*, 2019, 7909483. DOI: 10.1155/2019/7909483.

Cusano, P., Caputo, T., De Lauro, E., Falanga, M., Petrosino, S., Sansivero, F. e Vilardo, G. (2021). Tracking the endogenous dynamics of the Solfatara volcano (Campi Flegrei, Italy) through the analysis of ground thermal image temperatures. *Atmosphere*, 12, 940. DOI: 10.3390/atmos12080940.

Custódio, E. e Llamas, M.R. (1983). *Hidrologia subterránea (Ed.)*. Omega, Barcelona, 2, 2359p.

Dasgupta, R. e Hirschmann, M.M. (2010). The deep carbon cycle and melting in Earth's interior. *Earth and Planetary Science Letters*, 298(1-2): 1-13. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.06.039.

Daskalopoulou, K., Gagliano, A.L., Calabrese, S., Vigni, L.L., Longo, M., Kyriakopoulos, K., Pecoraino, G. e D'Alessandro, W. (2019). Degassing at the Volcanic/Geothermal System of Kos (Greece): Geochemical Characterization of the Released Gases and CO₂ Output Estimation. *Geofluids*, 2019, 3041037. DOI: 10.1155/2019/3041037.

David, M. (1977). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 364p.

De Gregorio, S. e Camarda, M. (2016). Evaluation of the eruptive potential and probability in open conduit volcano (Mt Etna) based on soil CO₂ flux measurements. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU General Assembly 2016, EGU2016-12700.

De Gregorio, S., Camarda, M., Gurrieri, S. e Favara, R. (2014). Change in magma supply dynamics identified in observations of soil CO₂ emissions in the summit area of Mt. Etna. *Bulletin of Volcanology*, 76, 846. DOI: 10.1007/s00445-014-0846-2.

De Moor, J.M., Aiuppa, A., Avard, G., Wehrmann, H., Dunbar, N., Muller, C., Tamburello, G., Giudice, G., Liuzzo, M., Moretti, R., Conde, V. e Galle, B. (2016). Turmoil at Turrialba

volcano (Costa Rica): degassing and eruptive processes inferred from high-frequency gas monitoring. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8): 5761-5775. DOI: 10.1002/2016JB013150.

Delmelle, P. e Stix, J. (2000). Volcanic Gases. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H. e Stix, J. (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* (2 ed.). Elsevier Inc., 803-815.

Deutsch, C.V. e Journel, A.G. (1998). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Applied Geostatistics Series* (Ed.). Oxford University Press, New York Oxford: 369p.

Di Martino, R.M.R. e Gurrieri, S. (2022). Theoretical principles and application to measure the flux of carbon dioxide in the air of urban zones. *Atmospheric Environment*, 288, 119602. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119302.

Dias, N.A., Matias, L., Lourenço, N., Madeira, J., Carrilho, F. e Gaspar, J.L. (2007). Crustal seismic velocity structure near Faial and Pico islands (Azores), from local earthquake tomography. *Tectonophysics*, 445(3-4): 301-317. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.09.001.

Duddridge, G.A., Grainger, P. e Durrance, E.M. (1991). Fault detection using soil gas geochemistry. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24: 427-435. DOI: 10.1144/GSL.QJEG.1991.024.04.0.

Duncan, A.M., Guest, J. E., Wallenstein, N. e Chester, D. (2015). The older volcanic complexes of São Miguel island, Azores: Nordeste and Povoação. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 147-153. DOI: 10.1144/M44.11.

Dupré, S., Scalabrin, C., Grall, C., Augustin, J.-M., Henry, P. e Şengör, C. (2015). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 2891-2912. DOI: 10.1002/2014JB011617.

Edmonds, M. e Wallace, P.J. (2017). Volatiles and Exsolved Vapor in Volcanic Systems. *Elements*, 13(1): 29-34. DOI: 10.2113/gselements.13.1.29.

Ellert, B.H. e Janzen, H.H. (1999). Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian Prairies. *Soil and Tillage Research*, 50 (1): 21-32. DOI: 10.1016/S0167-1987(98)00188-3.

EMODnet Bathymetry Consortium (2018). EMODnet Digital Bathymetry (DTM), <http://doi.org/10.12770/18ff0d48-b203-4a65-94a9-5fd8b0ec35f6>.

Epiard, M., Avard, G., Maarten de Moor, J., Cruz, M.M., Castillo, G.B. e Bakkar, H. (2017). Relationship between diffuse CO₂ degassing and volcanic activity. Case study of the Poás, Irazú, and Turrialba volcanoes, Costa Rica. *Frontiers in Earth Science*, 5. DOI: 10.3389/feart.2017.00071.

Evans, W.C., Bergfeld, D., Mcgimsey, R.G. e Hunt, A.G. (2009). Diffuse gas emissions at the Ukinrek Maars, Alaska: Implications for magmatic degassing and volcanic monitoring. *Applied Geochemistry*, 24(4): 527-535. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2008.12.007.

Evans, W.C., Sorey, M.L., Kennedy, B.M., Stonestrom, D.A., Rogie, J.D. e Shuster, D.L. (2001). High CO₂ emissions through porous media: transport mechanisms and implications for flux measurement and fractionation. *Chemical Geology*, 177(1-2): 15-29. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00379-X.

Faria, C. (2002). *Estudo de anomalias geoquímicas associadas a processos de desgaseificação difusa na ilha do Faial: contribuição para a cartografia de falhas ativas*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 95p.

Farrar, C.D., Sorey, M.L., Evans, W.C., Howle, J.F., Kerr, B.D., Kennedy, B.M., King, C.-Y. e Southon, J.R. (1995). Forest-killing diffuse CO₂ emission at Mammoth Mountain as a sign of magmatic unrest. *Nature*, 376: 675-678. DOI: 10.1038/376675a0.

Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. e Withjack, M.O. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11): 1557-1575. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.06.009.

Favara, R., Giammanco, S., Inguaggiato, S., e Pecoraino, G. (2001). Preliminary estimate of CO₂ output from Pantelleria Island volcano (Sicily, Italy): Evidence of active mantle degassing. *Applied Geochemistry*, 16(7-8): 883-894. DOI: 10.1016/S0883-2927(00)00055-X.

Fernandes, R., Ambrosius, B., Noomen, R., Bastos, L., Wortel, M., Spakman, W. e Govers, R. (2003). The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 30(16), 1828. DOI: 10.1029/2003GL017089.

Ferreira, T. (2000). *Caracterização da actividade vulcânica da ilha de S. Miguel (Açores): vulcanismo basáltico recente e zonas de desgaseificação*. Avaliação de riscos. Tese de

Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 248p.

Ferreira, T., Gaspar, J.L., Viveiros, F., Marcos, M., Faria, C. e Sousa, F. (2005). Monitoring of fumarole discharge and CO₂ soil degassing in the Azores: contribution to volcanic surveillance and public health risk assessment. *Annals of Geophysics*, 48, 4/5: 787-796.

Ferreira, T., Gomes, A., Gaspar, J.L. e Guest, J. (2015). Distribution and significance of basaltic eruptive centres: São Miguel, Azores. *In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 135-146. DOI: 10.1144/M44.10.

Fierstein, J. e Nathenson, M. (1992). Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bulletin of Volcanology*, 54: 156-167.

Fischer, T.P. e Aiuppa, A. (2020). AGU Centennial Grand Challenge: volcanoes and deep carbon global CO₂ emissions from subaerial volcanism - recent progress and future challenges. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21, e2019GC008690. DOI: 10.1029/2019GC008690.

Fischer, T.P. e Chiodini, G. (2015). Volcanic, magmatic and hydrothermal gases. *In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H. e Stix, J. (Eds.), The Encyclopedia of Volcanoes*, Second Edition, Academic Press: 779-797.

Fischer, T.P., Arellano, S., Carn, S., Aiuppa, A., Galle, B., Allard, P., Lopez, T., Shinohara, H., Kelly, P., Werner, C., Cardellini, C. e Chiodini, G. (2019). *Scientific Reports*, 9, 18716. DOI: 10.1038/s41598-019-54682-1.

Frank, A.B., Liebig, M.A. e Hanson, J.D. (2002). Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(9): 1235-1241. DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00062-7.

Freire, P. (2006). *Águas minerais da ilha de São Miguel (Açores): caracterização hidrogeológica e implicações para a monitorização vulcanológica*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 173p.

Gaspar, J.L. (1996). *Ilha Graciosa (Açores) – história vulcanológica e avaliação do hazard*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, 260p.

Gaspar, J.L., Goulart, C., Queiroz, Q., Silveira, D. e Gomes, A. (2004). Dynamic structure and

data sets of a GIS database for geological risk analysis in the Azores volcanic islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 233-242. SRef-ID: 1684-9981/nhess/2004-4-233.

Gaspar, J.L., Queiroz, G., Ferreira, T., Medeiros, A.R., Goulart, C. e Medeiros, J. (2015). Earthquakes and volcanic eruptions in the Azores Region: geodynamic implications from major historical events and instrumental seismicity. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 33-49 DOI: 10.1144/M44.4.

Gasparini, A. (2021). *Experimental and numerical modelling of CO₂ behaviour in the soil-atmosphere interface. Implications for risk assessment of carbon capture storage projects*. Tese de Doutoramento em Engenharia Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona: 118p.

Gente, P., Dymant, J., Maia, M. e Goslin, J. (2003). Interaction between the Mid-Atlantic Ridge and the Azores hot spot during the last 85 My: emplacement and rifting of the hot spot-derived plateaus. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(10), 8514, DOI: 10.1029/2003GC000527.

Gerlach, T.M., Doukas, M.P., Mcgee, K.A. e Kessler, R. (2001). Soil efflux and total emission rates of magmatic CO₂ at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California, 1995-1999. *Chemical Geology*, 177(1-2): 101-116. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00385-5.

Geshi, N., Oikawa, T., Weller, D.J. e Conway, C.E. (2022). Evolution of the magma plumbing system of Miyakejima volcano with periodic recharge of basaltic magmas. *Earth, Planets and Space*, 74, 20. DOI: 10.1186/s40623-022-01577-7.

Giammanco, S., Gurrieri, S. e Valenza, M. (2006). Fault-controlled soil CO₂ degassing and shallow magma bodies: summit and lower east rift of Kilauea volcano (Hawaii), 1997. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 853-867. DOI: 10.1007/s00024-006-0039-9.

Giammanco, S., Gurrieri, S. e Valenza, M. (1997). Soil CO₂ degassing along tectonic structures of Mount Etna (Sicily): the Pernicana fault. *Applied Geochemistry*, 12(4): 429-436. DOI: 10.1016/S0883-2927(97)00011-5.

Giggenbach, W.F. (1996). Chemical composition of volcanic gases. In: Scarpa, R. e Tilling, R.I. (Eds.), *Monitoring and mitigation of Volcano Hazards*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 221-253.

Girault, F., Viveiros, F., Silva, C., Thapa, S., Pacheco, J.E., Adhikari, L.B., Bhattarai, M.,

Koirala, B.P., Agrinier, P., France-Lanord, C., Zanon, V., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S. e Perrier, F. (2022). Radon signature of CO₂ flux constrains the depth of degassing: Furnas volcano (Azores, Portugal) versus Syabru-Bensi (Nepal Himalayas). *Scientific Reports*, 12, 10837. DOI: 10.1038/s41598-022-14653-5.

Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89: 1-45.

Goovaerts, P. (2001). Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 103: 3-26.

Goovaerts, P., Avruskin, G., Meliker, J., Slotnick, M., Jacquez, G.M. e Nriagu., J. (2005). Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of Southeast Michigan. *Water Resources Research*, 41(7), W07013 10.1029.

Granieri, D., Avino, R. e Chiodini, G. (2010). Carbon dioxide diffuse emission from the soil: ten years of observations at Vesuvio and Campi Flegrei (Pozzuoli), and linkages with volcanic activity. *Bulletin of Volcanology*, 72: 103-118. DOI: 10.1007/s00445-009-0304-8.

Granieri, D., Carapezza, M.L., Chiodini, G., Avino, R., Caliro, S., Ranaldi, M., Ricci, T. e Tarchini, L. (2006). Correlated increase in CO₂ fumarolic content and diffuse emission from La Fossa crater (Vulcano, Italy): Evidence of volcanic unrest or increasing gas release from a stationary deep magma body? *Geophysical Research Letters, Solid Earth*, 33(13). DOI: 10.1029/2006GL026460.

Granieri, D., Chiodini, G., Marzocchi, W. e Avino, R. (2003). Continuous monitoring of CO₂ soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): influence of environmental and volcanic parameters. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1-2): 167-179. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00232-2.

Grimison, N.L. e Chen, W.-P. (1986). The Azores-Gibraltar plate boundary: focal mechanisms, depths of earthquakes and their tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 92(B2): 2029-2047. DOI: 10.1029/JB091iB02p02029.

Guerra, M. e Lombardi, S. (2001). Soil-gas method for tracing neotectonic faults in clay basins: the Pisticci field (Southern Italy). *Tectonophysics*, 339(3-4): 511-522. DOI: 10.1016/S0040-1951(01)00072-5.

Gurrieri, S. e Valenza, M. (1988). Gas transport in natural porous mediums: a method for

measuring CO₂ flows from the ground in volcanic and geothermal areas. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 43: 1151-1158.

Hansell, A. e Oppenheimer, C. (2004). Health hazards from volcanic gases: a systematic literature review. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 59(12): 628-639. DOI: 10.1080/00039890409602947.

Hanson, P.J., Wullschleger, S.D., Bohlman, S.A. e Todd, D.E. (1993). Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. *Tree Physiology*, 13(1): 1-15. DOI: 10.1093/treephys/13.1.1.

Hernández, P., Notsu, K., Tsurumi, M., Mori, T., Ohno, M., Shimoike, Y., Salazar, J. e Perez, N. (2003). Carbon dioxide emissions from soils at Hakkoda, north Japan. *Journal of Geophysical Research*, 108(B4): 1-10. DOI: doi.org/10.1029/2002jb001847.

Hernández, P.A., Pérez, N.M., Fridriksson, T., Egbert, J., Ilyinskaya, E., Thárhallsson, A., Ívarsson, G., Gíslason, G., Gunnarsson, I., Jónsson, B., Padrón, E., Melián, G., Mori, T. e Notsu, K. (2012). Diffuse volcanic degassing and thermal energy release from Hengill volcanic system, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 74(10): 2435-2448. DOI: 10.1007/s00445-012-0673-2.

Hernández, P.A., Pérez, N.M., Salazar, J. M., Nakai, S., Notsu, K. e Wakita, H. (1998). Diffuse emission of carbon dioxide, methane, and helium-3 from Teide Volcano, Tenerife, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 25(17): 3311-3314. DOI: 10.1029/98GL02561.

Hernández, P.A., Salazar, J.M., Shimoike, Y., Mori, T., Notsu, K. e Perez, N. (2001). Diffuse emission of CO₂ from Miyakejima volcano, Japan. *Chemical Geology*, 177(1-2): 175-185. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00390-9.

Hinkle, M.E. (1990). Factors affecting concentrations of helium and carbon dioxide in soil gases. In: Durrance, E.M., Galimov, E.M., Hinkle, M.E., Reimer, G.M., Sugisaki, R. e Augustithis, S.S. (Eds.), *Geochemistry of gaseous elements and compounds*. Theophrastus Publications, S.A.: 421-448.

Hinkle, M.E. (1994). Environmental conditions affecting of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases. *Applied Geochemistry*, 9(1): 53-63. DOI: 10.1016/0883-2927(94)90052-3.

Hirn, A., Haessler, H., Hoang Trong, P., Wittlinger, G. e Mendes Victor, L.A. (1980). Aftershock sequence of the January 1st, 1980, earthquake and present-day tectonics in the Azores. *Geophysical Research Letters*, 7(7): 501-504. DOI: 10.1029/GL007i007p00501.

Hoefs, J. (2004). *Stable Isotope Geochemistry (5 Ed.)*. Springer-Verlag, Berlin, 244p.

Hunt, J.A., Zafu, A., Mather, T.A., Pyle, D.M. e Barry, P.H. (2017). Spatially variable CO₂ degassing in the Main Ethiopian Rift: implications for magma storage, volatile transport, and rift related emissions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18: 3714-3737. DOI: 10.1002/2017GC006975.

Hutchison, W., Mather, T.A., Pyle, D.M., Biggs, J. e Yirgu, G. (2015). Structural controls on fluid pathways in an active rift system: A case study of the Aluto volcanic complex. *Geosphere*, 11(3): 542-562. DOI: 10.1130/GES01119.1.

Hutchison, W., Ogilvie, E.R.D., Birhane, Y.G., Barry, P.H., Fischer, T.P., Ballentine, C.J., Hillegonds, D.J., Biggs, J., Albino, F., Cervantes, C. e Guðbrandsson, S. (2023). Gas emissions and subsurface architecture of fault-controlled geothermal systems: a case study of the North Abaya geothermal area. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24, e2022GC010822. DOI: 10.1029/2022GC010822.

Inguaggiato, S., Vita, F., Diliberto, I.S., Inguaggiato, C., Mazot, A., Cangemi, M. e Corrao, M. (2022). The volcanic activity changes occurred in the 2021–2022 at Vulcano island (Italy), inferred by the abrupt variations of soil CO₂ output. *Scientific Reports*, 12, 21166. DOI: 10.1038/s41598-022-25435-4.

Irwin, W.P. e Barnes, I. (1980). Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B6): 3115-3121. DOI: 10.1029/JB085iB06p03115.

Isaaks, E.H. e Srivastava, R.M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, Oxford, 561p.

Jentsch, A., Duesing, W., Jolie, E. e Zimmer, M. (2021). Monitoring the response of volcanic CO₂ emissions to changes in the Los Humeros hydrothermal system. *Scientific Reports*, 11, 17972. DOI: 10.1038/s41598-021-97023-x.

Kinzig, A.P. e Socolow, R.H. (1994). Human impacts on the nitrogen cycle. *Physics Today*, 47(11): 24-31. DOI: 10.1063/1.881423.

Kotenko, T.A., Melnikov, D.V. e Tarasov, V. (2022). Gas emission on Ebeko volcano, Kuril islands in 2003-2021: geochemistry, flows, and indicators of activity. *Journal of Volcanology and Seismology*, 16(4): 264-279. DOI: 10.1134/S0742046322040054.

La Scala Junior, N., Marques Junior, J., Pereira, G.T. e Corá, J.E. (2000). Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10): 1469-1473. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00053-5.

Lamberti, M.C., Agosto, M., Llano, J., Nogués, V., Venturi, S., Vélez, M.L., Albite, J.M., Yiries, J., Chiodini, G., Cardellini, C., Tassi, F., García, S., Nuñez, N., Sánchez, H. e Gómez, M. (2021). Soil CO₂ flux baseline in Planchón-Peteroa Volcanic Complex, Southern Andes, Argentina-Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102930. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102930.

Lamberti, M.C., Sierra, D., Cardellini, C., Viveiros, F., Vásconez Müller, A., Vasconez, F.J., Narváez, D.F., Silva, C., Melián, G., Caliro, S., Kis, B.M., Ionescu, A. e Hidalgo, S. (submetido). Results of the soil diffuse degassing survey from the 2017 IAVCEI CCVG 13th Volcanic Gas Workshop: Pululahua Dome Complex, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Lamberti, M.C., Vigide, N., Venturi, S., Agosto, M., Yagupsky, D., Winocur, D., Barcelona, H., Velez, M.L., Cardellini, C. e Tassi, F. (2019). Structural architecture releasing deep-sourced carbon dioxide diffuse degassing at the Cavihue-Copahue Volcanic Complex. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 374: 131-141. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2019.02.004.

Lan, T.F., Yang, T.F., Lee, H.F., Chen, Y.G., Chen, C.H., Song, S.R., e Tsao, S. (2007). Compositions and flux of soil gas in Liu-Huang-Ku hydrothermal area, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165(1-2): 32-45. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.04.015.

Laughton, A.S. e Whitmarsh, R.B. (1974). The Azores-Gibraltar plate boundary. In: Kristjansson, L. (Ed.), *Geodynamics of Iceland and the North Atlantic Area*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht: 63-81.

Le Guern, F., Tazieff, H. e Faivre Pierret, R. (1982). An example of health hazard: people killed by gas during a phreatic eruption: Dieng Plateau (Java, Indonesia), February 20th 1979. *Bulletin Volcanologique*, 45(2): 153-156. DOI: 10.1007/BF02600430.

Lee, A., Mumford, K.A., Wu, Y., Nicholas, N. e Stevens, G.W. (2016). Understanding the vapour-liquid equilibrium of CO₂ in mixed solutions of potassium carbonate and potassium glycinate. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 47: 303-309. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.02.005.

Lee, S., Kang, N., Park, M., Hwang, J.Y., Yun, S.H. e Jeong, H.Y. (2018). A review on volcanic gas compositions related to volcanic activities and non volcanological effects. *Geosciences Journal*, 22: 183-197. DOI: 10.1007/s12303-017-0056-y.

Levintal, E., Dragila, M.I. e Weisbrod, N. (2029). Impact of wind speed and soil permeability on aeration time in the upper vadose zone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269-270: 294-304. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.009.

Lewicki, J.L. e Brantley, S.L. (2000). CO₂ degassing along the San Andreas Fault, Parkfield, California. *Geophysical Research Letters*, 27(1): 5-8. DOI: 10.1029/1999GL008380.

Lewicki, J.L., Bergfeld, D., Cardellini, C., Chiodini, G., Granieri, D., Varley, N. e Werner, C. (2005). Comparative soil CO₂ flux measurements and geostatistical estimation methods on Masaya volcano, Nicaragua. *Bulletin of Volcanology*, 68: 76-90. DOI: 10.1007/s00445-005-0423-9.

Lewicki, J.L., Hilley, G.E., Tosha, T., Aoyagi, R., Yamamoto, K. e Benson, S.M. (2007). Dynamic coupling of volcanic CO₂ flow and wind at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California. *Geophysical Research Letters*, 34(3), L03401, DOI: 10.1029/2006GL028848.

Li, A.J., Lyamin, A.V. e Merifield, R.S. (2009). Seismic rock slope stability charts based on limit analysis methods. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2): 135-148. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.01.004.

Li, H., Wang, H., Xu, Z., Si, J., Pei, J., Li, T., Huang, Y., Song, S.-R., Kuo, L.-W., Sun, Z., Chevalier, M.-L. e Liu, D. (2013). Characteristics of the fault-related rocks, fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, 584: 23-42. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.08.021.

Lisetti, A. (2013). *Studio del flusso di CO₂ diffuso dal suolo nell'area di punta da Ferrara, São Miguel, Azzorre*. Tese de licenziatura no ramo de Geologia, Università Degli Studi Di Perugia: 94 p.

Liuzzo, M., Di Muro, A., Giudice, G., Michon, L., Ferrazzini, V. e Gurrieri, S. (2015). New evidence of CO₂ soil degassing anomalies on Piton de la Fournaise volcano and the link with volcano tectonic structures. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16: 4388-4404. DOI: 10.1002/2015GC006032.

Liuzzo, M., Gurrieri, S., Giudice, G. e Giuffrida, G. (2013). Ten years of soil CO₂ continuous monitoring on Mt. Etna: Exploring the relationship between processes of soil degassing and volcanic activity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(8): 2886-2899. DOI: 10.1002/ggge.20196.

Lourenço, N., Miranda, J.M., Luis, J., Ribeiro, A., Mendes Victor, L.A., Madeira, J. e Needham, H.D. (1998). Morpho-tectonic analysis of the Azores Volcanic Plateau from a new bathymetric compilation of the area. *Marine Geophysical Researches*, 20: 141-156.

Ma, Y., Kong, X.-Z., Zhang, C., Scheuermann, A., Bringemeier, D. e Li, L. (2021). Quantification of Natural CO₂ Emission Through Faults and Fracture Zones in Coal Basins. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092693. DOI: 10.1029/2021GL092693.

Machado, F. (1959). Submarine pits of the Azores Plateau. *Bulletin Volcanologique* (série II), 21: 109-116.

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

Madeira, J. e Ribeiro, A. (1990). Geodynamic models for the Azores triple junction: a contribution from tectonics. *Tectonophysics*, 184(3-4): 405-415. DOI: 10.1016/0040-1951(90)90452-E.

Madeira, J., Brum da Silveira, A., Hipólito, A. e Carmo, R. (2015). Active tectonics in the central and eastern Azores islands along the Eurasia-Nubia boundary: a review. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 15-32. DOI: 10.1144/M44.3.

- Madureira, P., Moreira, M., Mata, J. e Allègre, C. (2005). Primitive neon isotopes in Terceira island (Azores archipelago). *Earth and Planetary Science Letters*, 233(3-4): 429-440. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.02.030.
- Maestre, F.T. e Cortina, J. (2003). Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 23(3): 199-209. DOI: 10.1016/S0929-1393(03)00050-7.
- Marcos, M. (2006). *Estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores, com base na análise de variações espaciais de CO₂ e temporais de ²²²Rn*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 135p.
- Marques, R. (2013). *Estudo de movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores): inventariação, caracterização e análise da suscetibilidade*. Tese de Doutoramento no ramo Geologia, especialidade de Vulcanologia. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências, 226 p.
- Matias, L., Dias, N.A., Morais, I., Vales, D., Carrilho, F., Madeira, J. e Gaspar, J.L. (2007). The 9th of July 1998 Faial island (Azores, North Atlantic) seismic sequence. *Journal of Seismology*, 11: 275-298.
- Mazot, A., Rouwet, D., Taran, Y., Inguaggiato, S. e Varley, N. (2011). CO₂ and He degassing at El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: gas flux, origin and relationship with local and regional tectonics. *Bulletin of Volcanology*, 73: 423-441. DOI: 10.1007/s00445-010-0443-y.
- Mcgee, K.A., Gerlach, T.M., Kessler, R. e Doukas, M.P. (2000). Geochemical evidence for a magmatic CO₂ degassing event at Mammoth Mountain, California, September-December 1997. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B4): 8447-8456. DOI: 10.1029/2000JB900009.
- McKenzie, D. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30(2): 109-185. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x.
- Melián, G., Hernández, P.A., Padrón, E., Pérez, N.M., Barrancos, J., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Calvo, D. e Nolasco, D. (2014). Spatial and temporal variations of diffuse CO₂ degassing at El Hierro volcanic system: relation to the 2011-2012 submarine eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(9): 6976-6991.

- Mielnick, P.C. e Dugas, W.A. (2000). Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(2): 221-228. DOI: 10.1016/S0038-0717(99)00150-9.
- Miranda, J.M., Luis, J.F., Lourenço, N. e Fernandes, R.M.S. (2015). The structure of the Azores Triple Junction: implications for São Miguel island. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 5-13. DOI: 10.1144/M44.2.
- Miranda, J.M., Mendes Victor, L.A., Simões, J.Z., Luis, J., Matias, L., Shimamura, H., Shiobara, H., Nemoto, H., Mochizuki, H., Hirn, A. e Lépine, J.C. (1998). Tectonic setting of the Azores Plateau deduced from a OBS survey. *Marine Geophysical Researches*, 20: 171-182.
- Moore, R.B. e Rubin, M. (1991). Radiocarbon dates for lava flows and pyroclastic deposits on São Miguel, Azores. *Radiocarbon*, 33(1): 151-164. DOI: 10.1017/S0033822200013278.
- Moreno, L., Viveiros, F., Couto, R., Silva, C., Range, P., Geraldés, D. e Pacheco, J.E. (2016). Chemical composition of submarine degassing areas in São Miguel island (Azores archipelago). *Actas das 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico: 317-319.
- Moretti, R. e Stefánsson, A. (2020). Volcanic and Geothermal Redox Engines. *Elements*, 16(3): 179-184. DOI: <https://doi.org/10.2138/gselements.16.3.179>.
- Morita, M., Mori, T., Yokoo, A., Ohkura, T. e Morita, Y. (2019). Continuous monitoring of soil CO₂ flux at Aso volcano, Japan: the influence of environmental parameters on diffuse degassing. *Earth, Planets and Space*, 71(1). DOI: 10.1186/s40623-018-0980-8.
- Moune, S., Moretti, R., Burtin, A., Jessop, D.E., Didier, T., Robert, V., Bonifacie, M., Tamburello, G., Komorowski, J.-C., Allard, P. e Buscetti, M. (2022). Gas monitoring of volcanic-hydrothermal plumes in a tropical environment: the case of La Soufrière de Guadeloupe unrest volcano (Lesser Antilles). *Frontiers in Earth Science*, 10, 795760. DOI: 10.3389/feart.2022.795760.
- Mourzenko, V.V., Varloteaux, C., Guillon, S., Thovert, J.-F., Pili, E. e Adler, P.M. (2014). Barometric pumping of a fractured porous medium. *Geophysical Research Letters*, 41(19): 6698-6704. DOI: 10.1002/2014GL060865.
- Nahhas, T., Py, X. e Sadiki, N. (2019). Experimental investigation of basalt rocks as storage

material for high-temperature concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110: 226-235. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.060.

Nakamura, K., Takai, Y. e Wada, E. (1990). Carbon isotopes of soil gases and related organic matter in an agroecosystem with special reference to paddy field. In: Durrance, E.M., Galimov, E.M., Hinkle, M.E., Reimer, G.M., Sugisaki, R. e Augustithis, S.S. (Eds.), *Geochemistry of Gaseous Elements and Compounds*. Theophrastus Publications, S.A., Athens, Greece: 455-484.

Needham, H.D. e Francheteau, J. (1974). Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36°48' north. *Earth and Planetary Science Letters*, 22(1): 29-43. DOI: 10.1016/0012-821X(74)90061-2.

Neeper, D.A. e Stauffer, P. (2005). Unidirectional gas flow in soil porosity resulting from barometric pressure cycles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78(4): 281-289. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2005.06.001.

Neeper, D.A. e Stauffer, P.H. (2012). Transport by oscillatory flow in soils with rate-limited mass transfer: 1. Theory. *Vadose Zone Journal*, 11(2). DOI: 10.2136/vzj2011.0093.

Newhall, C.G. e Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87(C2): 1231-1238. DOI: 10.1029/JC087iC02p01231.

Norman, J.M., Garcia, R. e Verma, S.B. (1992). Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D17): 18845-18853. DOI: 10.1029/92JD01348.

Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F. e Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils - A review. *Geochemistry*, 76(3): 327-352. DOI: 10.1016/j.chemer.2016.04.002.

Oliveira, S., Viveiros, F., Silva, C. e Pacheco, J.E. (2018). Automatic Filtering of Soil CO₂ Flux Data; Different Statistical Approaches Applied to Long Time Series. *Frontiers in Earth Science*, 6, 208. DOI: 10.3389/feart.2018.00208.

Ortner, H., Reiter, F. e Acs, P. (2002). Easy handling of tectonic data: the programs TectonicVB for Mac and TectonicsFP for Windows™. *Computers & Geosciences*, 28: 1193-1200. DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00038-9.

Oskarsson, N., Pálsson, K., Ólafsson, H. e Ferreira, T. (1999). Experimental monitoring of carbon dioxide by low power IR-sensors: soil degassing in the Furnas Volcanic Centre, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92(1-2): 181-193. DOI: 10.1016/S0377-0273(99)00075-X.

Pacheco, J. (2013). *Avaliação de variações sazonais em zonas de desgaseificação difusa no vulcão das Furnas: implicações em termos de monitorização sismovulcânica*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 116p.

Pacheco, J.M., Ferreira, T., Queiroz, G., Wallenstein, N., Coutinho, R., Cruz, J.V., Pimentel, A., Silva, R., Gaspar, J.L. e Goulart, C. (2013). Notas sobre a geologia do arquipélago dos Açores. In: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J.C. (Eds.), *Geologia de Portugal*. Escolar Editora, 2: 595-690.

Padrón, E., Hernández, P.A., Toulkeridis, T., Pérez, N.M., Marrero, R., Melián, G., Virgili, G. e Notsu, K. (2008). Diffuse CO₂ emission rate from Pululahua and the lake-filled Cuicocha calderas, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1): 163-169. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.11.023.

Parkinson, K.J. (1981). An improved method for measuring soil respiration in the field. *Journal of Applied Ecology*, 18, 1: 221-228. DOI: 10.2307/2402491.

Parks, M.M., Caliro, S., Chiodini, G., Pyle, D.M., Mather, T.A., Berlo, K., Edmonds, M., Biggs, J., Nomikou, P. e Raptakis, C. (2013). Distinguishing contributions to diffuse CO₂ emissions in volcanic areas from magmatic degassing and thermal decarbonation using soil gas ²²²Rn-δ¹³C systematics: Application to Santorini volcano, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 377-378: 180-190. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.06.046.

Pérez, N.M., Hernández, P.A., Melián, G.V., Pádrón, E., Asensio-Ramos, M., Barrancos, J., Padilla, G.D., Rodríguez, F., D'Auria, L., Amonte, C., Alonso, M., Martín-Lorenzo, A., Calvo, D., Rodríguez, C., Hernández, W., Coldwell, B. e Pankhurst, M.J. and the International Collaborative Research TEAM (2022). The 2021 Cumbre Vieja eruption: an overview of the geochemical monitoring program. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May, 2022 EGU22-12491. DOI: 10.5194/egusphere-egu22-12491.

Pérez, N.M., Hernández, P.A., Pádrón, E., Cartagena, R., Olmos, R., Barahona, F., Melián, G., Salazar, P. e López, D.L. (2006). Anomalous diffuse CO₂ emission prior to the January 2002

short-term unrest at San Miguel volcano, El Salvador, Central America. *Pure and applied geophysics*, 163: 883-896. DOI: 10.1007/s00024-006-0050-1.

Pérez, N.M., Melián, G.V., Hernández, P.A., Pádrón, E., Padilla, G.D., Baldago, M.C., Barrancos, J., Rodríguez, F., Asensio-Ramos, M., Alonso, M., Arcilla, C. e Lagmay, A.M. (2020). Diffuse CO₂ degassing precursors of the January 2020 eruption of Taal volcano, Philippines. *Scientific Reports*, 12, 19091. DOI: 10.1038/s41598-022-22066-7.

Perrier, F. e Girault, F. (2013). Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations. *Geophysical Journal International*, 195(2): 945–971. DOI: 10.1093/gji/ggt280.

Pistolesi, M., Aravena, A., Constantini, L., Vigiani, C., Cioni, R. e Bonadonna, C. (2021). Explosive behavior of intermediate magmas: the example of Cotopaxi volcano (Ecuador). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009991. DOI: 10.1029/2021GC009991.

Pyle, D.M. (2000). Sizes of volcanic eruptions. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. e Stix, J. (Eds.) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, CA: 263-269.

Quattrocchi, F., Galli, G., Gasparini, A., Magno, L., Pizzino, L., Sciarra e Voltattorni, N. (2011). Very slightly anomalous leakage of CO₂, CH₄ and radon along the main activated faults of the strong L'Aquila earthquake (Magnitude 6.3, Italy). Implications for risk assessment monitoring tools & public acceptance of CO₂ and CH₄ underground storage. *Energy Procedia*, 4: 4067-4075. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.349.

Queiroz, G. (1997). *Vulcão das Sete Cidades (S. Miguel, Açores) - história eruptiva e avaliação do hazard*. Tese de Doutoramento no ramo Geologia, especialidade de Vulcanologia. Universidade dos Açores, Departamento de Geociências, 226p.

Queiroz, G., Gaspar, J.L., Guest, J.E., Gomes, A. e Almeida, M.H. (2015). Eruptive history and evolution of Sete Cidades volcano, São Miguel Island, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 87-104. DOI: 10.1144/M44.7.

Queiroz, G., Pacheco, J.M., Gaspar, J.L., Aspinall, W.P., Guest, J.E. e Ferreira, T. (2008). The last 5000 years of activity at Sete Cidades volcano (São Miguel island, Azores): implications

for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3): 562-573. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.001.

Raich, J.W. e Schlesinger, W.H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2): 81-99. DOI: 10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x.

Raich, J.W. e Tufekciogul, A. (2000). Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48: 71-90. DOI: 10.1023/A:1006112000616.

Randazzo, P., Caracausi, A., Aiupa, A., Cardellini, C., Chiodini, G., Apollaro, C., Paternoster, M., Rosiello, A. e Vespasiano, G. (2022). Active degassing of crustal CO₂ in areas of tectonic collision: a case study from the Pollino and Calabria sectors (Southern Italy). *Frontiers in Earth Science*, 10, 946707. DOI: 10.3389/feart.2022.946707.

Reth, S., Reichstein, M. e Falge, E. (2005). The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux - a modified model. *Plant soil*, 268: 21-35. DOI: 10.1007/s11104-005-0175-5.

Rey, A., Pegoraro, E., Tedeschi, V., De Parri, I., Jarvis, P.G e Valentini, R. (2002). Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 8(9): 851-866. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00521.x.

Richon, P., Perrier, F., Pili, E. e Sabroux, J.-C (2009). Detectability and significance of 12 hr barometric tide in radon-222 signal, dripwater flow rate, air temperature and carbon dioxide concentration in an underground tunnel. *Geophysics Journal International*, 176: 683-694. DOI: 10.1111/j.1365 246X.2008.04000.x.

Rinaldi, A.P., Vandemeulebrouck, J., Todesco, M. e Viveiros, F. (2012). Effects of atmospheric conditions on surface diffuse degassing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117(B11201). DOI: 10.1029/2012JB009490, 2012.

Salazar, J.M.L., Hernández, P.A., Pérez, N.M., Melián, G., Álvarez, J., Segura, F., e Notsu, K. (2001). Diffuse emission of carbon dioxide from Cerro Negro volcano, Nicaragua, Central America. *Geophysical Research Letters*, 28(22): 4275-4278. DOI: 10.1029/2001GL013709.

Shimoike, Y. e Notsu, K. (2000). Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101(3-4): 211-221. DOI: 10.1016/S0377-0273(00)00178-5.

Shimoike, Y., Kazahaya, K., e Shinohara, H. (2002). Soil gas emission of volcanic CO₂ at Satsuma-Iwojima volcano, Japan. *Earth Planets and Space*, 54(3): 239-247. DOI: 10.1186/BF03353023.

Shotton, F. e Williams, R. (1973). Birmingham University Radiocarbon dates VII. *Radiocarbon*, 15(3): 451-468.

Sigurdsson, H., Devine, J.D., Tchua, F.M., Presser, F.M., Pringle, M.K.W. e Evans, W.C. (1987). Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31(1-2): 1-16. DOI: 10.1016/0377-0273(87)90002-3.

Siino, M., Scudero, S., Cannelli, V., Piersanti, A. e D'Alessandro, A. (2019). Multiple seasonality in soil radon time series. *Scientific Reports*, 9, 8610. DOI: 10.1038/s41598-019-44875-z.

Silva, C. (2006). *Estudo da desgaseificação difusa no vulcão das Furnas (ilha de S. Miguel): o caso do ²²²Rn*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 167p.

Silva, C. (2013). *Estudo da desgaseificação difusa de ²²²Rn: implicações em termos de monitorização sismovulcânica, recursos geotérmicos e saúde pública*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 376p.

Silva, R., Carmo, R. e Marques, R. (2020). Characterization of the tectonic origins of historical and modern seismic events and their societal impact on the Azores Archipelago, Portugal. In: Dilek, Y., Ogawa, Y. e Okubo, Y. (Eds.), *Characterization of Modern and Historical Seismic-Tsunamic Events, and Their Global-Societal Impacts*. Geological Society, London, Special Publications, 501. DOI: 10.1144/SP501-2019-106.

Silveira, D., Gaspar, J.L., Ferreira, T. e Queiroz, G. (2003). Reassessment of the historical seismic activity with major impact in S. Miguel island (Azores). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(6): 615-623. DOI: 10.5194/nhess-3-615-2003.

Silveira, G., Stutzmann, E., Davaille, A., Montagner, J., Mendes-Victor, L. e Sebai, A. (2006). Azores hotspot signature in the upper mantle. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156(1-2): 23-34. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.022.

Sinclair, A. J. (1974). Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration*, 3: 129-149.

Sousa, F. (2003). *Cartografia de anomalias geoquímicas associadas a processos de desgaseificação difusa no vulcão das Furnas (S. Miguel, Açores): contribuição para a avaliação de riscos vulcânicos*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 106p.

Steinitz, G., Piatibratova, O. e Barbosa, S.M. (2007). Radon daily signals in the Elat Granite, southern Arava, Israel. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B10). DOI: 10.1029/2006JB004817.

Stix, J. e Gaonac'h, H. (2000). Gas, Plume and Thermal Monitoring. In: Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. American Press, 1141-1163.

Sun, Y., Guo, Z., Fortin, D., Zhao, W., Cheng, Z., Li, J. e Zhang, Y. (2023). Diffuse emission of CO₂ from the Langjiu Geothermal Field, Western Tibet. *Journal of Geochemical Exploration*, 249, 107219. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107219.

Tamburello, G., Pondrelli, S., Chiodini, G. e Rouwet, D. (2018). Global-scale control of extensional tectonics on CO₂ earth degassing. *Nature Communications*, 9: 4608. DOI: 10.1038/s41467-018-07087-z.

Taussi, M., Nisi, B., Brogi, A., Liotta, D., Zucchi, M., Venturi, S., Cabassi, J., Boschi, G., Ciliberti, M. e Vaselli, O. (2023). Deep regional fluid pathways in an extensional setting: the role of transfer zones in the hot and cold degassing areas of the Larderello geothermal system (Northern Apennines, Italy). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24, e2022GC010838. DOI: 10.1029/2022GC010838.

The GEBCO_08 Grid, version 20100927, <http://www.gebco.net>.

Torres, P., Llopis, A.L., Melo, C.S. e Rodrigues, A. (2023). Environmental impact of cadmium in a volcanic archipelago: research challenges related to a natural pollution source. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 100. DOI: 10.3390/jmse11010100.

Toutain, Jean-Paul, Sortino F., Baubron, Jean-Claude, Richon, P., Surono, Sumarti, S. e Nonell, A. (2009). Structure and CO₂ budget of Merapi volcano during inter-eruptive periods. *Bulletin of Volcanology*, 71: 815-826. DOI: 10.1007/s00445-009-0266-x.

Udías, A. (1980). Seismic stresses in the region Azores-Spain-Western Mediterranean. *Rock*

Mechanics, Suppl. 9: 75-84.

Udías, A., Espinosa, A.F., Mezcua, J., Buforn, E., Vegas, R., Nishenko, S.P., Martínez Solares, J.M. e López Arroyo, A. (1986). Seismicity and tectonics of the North African-Eurasian plate boundary (Azores-Iberia-Tunisia). U.S. Geological Survey Open-File Report: 86-626. DOI: 10.3133/ofr86626.

Udías, A., López Arroyo, A. e Mezcua, J. (1976). Seismotectonic of the Azores-Alboran region. *Tectonophysics*, 31(3-4): 259-289. DOI: 10.1016/0040-1951(76)90121-9.

Uysal, I.T., Feng, Y.-x., Zhao, J.-x., Bolhar, R., Isik, V., Baublys, K.A., Yago, A. e Golding, S.D. (2011). Seismic cycles recorded in late Quaternary calcite veins: geochronological, geochemical and microstructural evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(1-2): 84-96. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.12.039.

Van Der Meer, D.G., Zeebe, R.E., van Hinsbergen, D.J.J., Sluijjs, A., Spakman, W. e Torsvik, T.H. (2024). Plate tectonic controls on atmospheric CO₂ levels since the Triassic. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, 111(12): 4380-4385. DOI: 10.1073/pnas.1315657111.

Villarroel, M. (2022). *Soil CO₂ emissions at Chiles Volcano, Ecuador: survey from Aguas Hediondas and Lagunas Verdes*. Tese de Mestrado em Geologia, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay, Urcuquí, 62p.

Viveiros, F. (2003). *Contribuição para o estudo dos processos de desgaseificação difusa nos Açores no âmbito da monitorização sismovulcânica e da avaliação do risco: discriminação de factores que influenciam a variação do fluxo de CO₂*. Dissertação de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 140p.

Viveiros, F. (2010). *Soil CO₂ flux variations at Furnas volcano (São Miguel Island, Azores)*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 140p.

Viveiros, F., Baldoni, E., Massaro, S., Stocchi, M., Costa, A., Caliro, S., Chiodini, G. e Andrade, C. (2023). Quantification of CO₂ degassing and atmospheric dispersion at Caldeiras da Ribeira Grande (São Miguel Island, Azores). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 438, 107807. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107807.

- Viveiros, F., Cardellini, C., Ferreira, T. e Silva, C. (2012). Contribution of CO₂ emitted to the atmosphere by diffuse degassing from volcanoes: The Furnas volcano case study. *International Journal of Global Warming*, 4(3/4): 287-304. DOI: 10.1504/IJGW.2012.049444.
- Viveiros, F., Cardellini, C., Ferreira, T., Caliro, S., Chiodini, G. e Silva, C. (2010). Soil CO₂ emissions at Furnas volcano, São Miguel Island, Azores archipelago: volcano monitoring perspectives, geomorphologic studies, and land use planning application. *Journal of Geophysical Research*, 115, B12208. DOI: 10.1029/2010JB007555.
- Viveiros, F., Chiodini, G., Cardellini, C., Caliro, S., Zanon, V., Silva, S., Rizzo, A.R., Hipólito, A. e Moreno, L. (2020). Deep CO₂ emitted at Furnas do Enxofre geothermal area (Terceira Island, Azores archipelago). An approach for determining CO₂ sources and total emissions using carbon isotopic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 401, 106968. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2020.106968.
- Viveiros, F., Ferreira, T., Cabral Vieira, J., Silva, C. e Gaspar, J.L. (2008). Environmental influences on soil CO₂ degassing at Furnas and Fogo volcanoes (São Miguel Island, Azores archipelago). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177: 883-893. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.07.005.
- Viveiros, F., Ferreira, T., Silva, C. e Gaspar, J.L. (2009). Meteorological factors controlling soil gases and indoor CO₂ concentration: A permanent risk in degassing areas. *Science of the Total Environment*, 407: 1362-1372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.10.009.
- Viveiros, F., Gaspar, J.L., Ferreira, T., Silva, C., Marcos, M. e Hipólito, A. (2015). Mapping of soil CO₂ diffuse degassing at São Miguel Island and its public health implications. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 185-195. DOI: 10.1144/M44.14.
- Viveiros, F., Marcos, M., Faria, C., Gaspar, J.L., Ferreira, T. e Silva, C. (2017). Soil CO₂ degassing path along volcano-tectonic structures in the Pico-Faial-São Jorge islands (Azores archipelago, Portugal). *Frontiers Earth Science*, 5, 50. DOI: 10.3389/feart.2017.00050.
- Viveiros, F., Moreno, L., Carreiro-Silva, M., Couto, R., Silva, C., Range, P., Geraldes, D., Parra, H., Ferreira, T. e Pacheco, J. (2016). Volcanic gas emissions offshore of São Miguel and Faial islands (Azores archipelago). *Actas das 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico: 320-323.

Viveiros, F., Vandemeulebrouck, J., Rinaldi, A.P., Ferreira, T., Silva, C. e Cruz, J.V. (2014). Periodic behavior of soil CO₂ emissions in diffuse degassing areas of the Azores archipelago: Application to seismovolcanic monitoring. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119: 7578-7597. DOI: 10.1002/2014JB011118.

Wallenstein, N., Duncan, A., Guest, J.E. e Almeida, M.H. (2015). Eruptive history of Fogo Volcano, São Miguel, Azores. In: Gaspar, J.L., Guest, J.E., Duncan, A.M., Barriga, F.J.A.S., Chester, D.K. (Eds.), *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago)*. Geological Society of London Memoir, 44: 105-123. DOI: 10.1144/M44.8.

Welles, J.M., Demetriades-Shah, T.H. e Mcdermitt, D.K. (2001). Considerations for measuring ground CO₂ effluxes with chambers. *Chemical Geology*, 177(1-2): 3-13. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00388-0.

Werner, C. e Cardellini, C. (2006). Comparison of carbon dioxide emissions with fluid upflow, chemistry, and geologic structures at the Rotorua geothermal system, New Zealand, *Geothermics*, 35(3): 221-238. DOI: 10.1016/j.geothermics.2006.02.006.

Werner, C., Brantley, S.L. e Boomer, K. (2000). CO₂ emissions related to the Yellowstone volcanic system. Statistical sampling, total degassing, and transport mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, 105(B5): 10831-10846. DOI: 10.1029/1999JB900331.

Werner, C., Fischer, T.P., Aiuppa, A., Edmonds, M., Cardellini, C., Carn, S., Chiodini, G., Cottrell, E., Burton, M., Shinohara, H. e Allard, P. (2019). Carbon dioxide emissions from subaerial volcanic regions. Two decades in review. Cambridge University Press, ISBN: 9781108677950. DOI: 10.1017/9781108677950.008.

Werner, C., Hurwitz, S., Evans, W.C., Lowenstern, J.B., Bergfeld, D., Heasler, H., Jaworowski, C. e Hunt, A. (2008). Volatile emissions and gas geochemistry of Hot Spring Basin, Yellowstone National Park, USA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(4): 751-762. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.09.016.

West Systems (2014). Portable diffuse flux meter with Li-COR CO₂ detector handbook. *West Systems web site*. Acedido a 29 de abril de 2024 em <https://www.westsystems.com/NUOVO/it/>.

Weston, F.S. (1964). List of recorded volcanic eruptions in the Azores with brief reports. *Boletim do Museu e Laboratório de Mineralogia e Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 10(1): 3-18.

Williams-Jones, G. e Rymer, H. (2015). Hazards of Volcanic Gases. *In*: Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H. e Stix, J. (Eds.), *The Encyclopedia of Volcanoes* Second Edition, Academic Press: 985-992.

Witkamp, M. (1969). Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil. *Ecology*, 50(5): 922-924. DOI: 10.2307/1933713.

Yang, Y., Li, Y., Li, Y., Ji, L., Gong, Y., Du, F., Zhang, L. e Chen, Z. (2021). Present-Day Activity of the Anninghe Fault and Zemuhe Fault, Southeastern Tibetan Plateau, derived from soil gas CO₂ emissions and locking degree. *Earth and Space Science*, 8, e2020EA001607. DOI: 10.1029/2020EA001607.

Yazaki, Y., Mariko, S. e Koizumi, H. (2004). Carbon dynamics and budget in a *Miscanthus sinensis* grassland in Japan. *Ecological Research*, 19: 511-520. DOI: 10.1111/j.1440-1703.2004.00665.x.

Zhang, J., Terrones, M., Park, C.R., Mukherjee, R., Monthieux, M., Koratkar, N., Kim, Y.S., Hurt, R., Frackowiak, E., Enoki, T., Chen, Y., Chen, Y. e Bianco, A. (2016). Carbon science in 2016: status, challenges and perspectives. *Carbon*, 98: 708-732. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.11.060.

Zhou, Y., Xu, B. e Leung, H. (2010). On the ability of complexity metrics to predict fault-prone classes in object-oriented systems. *Journal of Systems and Software*, 83(4): 660 -674. DOI: 10.1016/j.jss.2009.11.704.

WEBGRAFIA

Climate Data (n.d.). Clima Mosteiros (Portugal). *Climate Data Website*. Acedido em 29 de abril de 2024 em: <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/azores/mosteiros-214235/>.

Climate Data (n.d.). Clima Ginetes (Portugal). *Climate Data Website*. Acedido em 29 de abril de 2024 em: <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/azores/ginetes-323871/>.

IPMA (2024). Normais Climatológicas. *IPMA Website*. Acedido a 29 de abril de 2024 em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>.

ANEXOS

**ANEXO I – Resultados das medições efetuadas na
plataforma lávica da Ferraria**

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
22/09/2022	10:45	F1	601083	4191085	23,1	22,7	0,491	1018,8	6,95
22/09/2022	10:50	F2	601080	4191088	23,1	22,9	0,534	1018,1	7,55
22/09/2022	10:55	F3	601089	4191091	23,3	23,9	1,574	1018,0	22,24
22/09/2022	10:55	F4	601087	4191100	23,4	22,7	0,459	1017,9	6,48
22/09/2022	10:58	F5	601094	4191097	23,4	23,5	7,908	1019,0	111,83
22/09/2022	11:01	F6	601095	4191098	23,4	23,6	2,185	1019,0	30,90
22/09/2022	11:02	F7	601093	4191100	23,3	23,7	7,129	1019,0	100,85
22/09/2022	11:05	F8	601093	4191103	23,4	23,3	3,984	1018,9	56,33
22/09/2022	11:06	F9	601100	4191108	23,4	23,6	3,784	1019,0	53,51
22/09/2022	11:09	F10	601102	4191111	23,5	22,9	1,483	1019,2	20,97
22/09/2022	11:11	F11	601104	4191114	23,4	23,4	2,324	1018,8	32,86
22/09/2022	11:14	F12	601106	4191119	23,4	23,5	0,164	1019,1	2,32
22/09/2022	11:15	F13	601105	4191117	23,3	23,0	0,361	1018,9	5,11
22/09/2022	11:16	F14	601100	4191114	23,3	23,4	0,474	1018,9	6,70
22/09/2022	11:20	F15	601100	4191112	23,4	22,9	0,433	1019,0	6,12
22/09/2022	11:23	F16	601093	4191104	23,4	22,8	0,735	1019,0	10,39
22/09/2022	11:25	F17	601089	4191099	23,5	22,7	0,502	1018,9	7,10
22/09/2022	11:27	F18	601091	4191096	23,5	23,9	1,744	1019,0	24,65
22/09/2022	11:29	F19	601091	4191093	23,5	23,4	1,673	1019,1	23,65
22/09/2022	11:31	F20	601090	4191092	23,3	23,0	1,538	1019,0	21,76
22/09/2022	11:32	F21	601081	4191083	23,3	22,4	1,424	1019,0	20,14
22/09/2022	11:50	PCF	601419	4190731	26,3	25,7	0,574	1004,1	7,92
26/09/2022	8:51	F22	601095	4191119	21,6	20,1	1,252	1020,3	17,84
26/09/2022	8:54	F23	601093	4191114	21,1	20,6	0,083	1020,1	1,18
26/09/2022	8:56	F24	601078	4191105	21,3	20,1	0,457	1020,3	6,52
26/09/2022	8:59	F25	601077	4191095	20,5	20,9	0,462	1020,3	6,61
26/09/2022	9:01	F26	601077	4191081	21,3	21,2	0,585	1020,1	8,34
26/09/2022	9:08	F27	601076	4191079	21,6	20,6	0,133	1019,1	1,89
26/09/2022	9:11	F28	601063	4191079	21,8	21,1	0,666	1020,2	9,48
26/09/2022	9:12	F29	601057	4191072	21,6	21,7	0,808	1020,2	11,51
26/09/2022	9:15	F30	601050	4191060	21,9	21,0	0,570	1020,4	8,11
26/09/2022	9:19	F31	601047	4191045	21,6	21,3	0,463	1020,5	6,60
26/09/2022	9:22	F32	601068	4191090	21,7	21,7	0,935	1020,1	13,31
26/09/2022	9:24	F33	601074	4191099	21,5	22,0	0,500	1020,4	7,13
26/09/2022	9:26	F34	601076	4191107	21,6	21,0	0,312	1020,3	4,44

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
26/09/2022	9:29	F35	601083	4191118	21,6	21,1	0,116	1020,5	1,65
26/09/2022	9:34	F37	601062	4191113	21,8	21,5	0,610	1020,3	8,68
26/09/2022	9:36	F38	601058	4191103	21,6	21,8	0,288	1020,3	4,10
26/09/2022	9:38	F39	601055	4191094	21,6	21,4	0,300	1020,5	4,27
26/09/2022	9:39	F40	601048	4191078	21,7	20,8	0,563	1021,0	8,02
26/09/2022	9:41	F41	601044	4191066	21,5	21,6	0,622	1021,5	8,87
26/09/2022	9:44	F42	601038	4191054	21,6	21,1	0,256	1021,5	3,65
26/09/2022	9:48	F43	601029	4191044	22,0	22,3	0,237	1020,3	3,37
26/09/2022	9:51	F44	601032	4191032	22,5	22,0	0,473	1020,4	6,72
26/09/2022	9:53	F45	601039	4191021	22,4	21,8	0,485	1020,3	6,89
26/09/2022	9:54	F46	601047	4191010	21,6	22,3	0,442	1020,3	6,30
26/09/2022	9:56	F47	601040	4191007	21,0	21,6	0,693	1020,2	9,89
26/09/2022	9:58	F48	601037	4191011	21,4	21,9	0,630	1019,9	8,98
26/09/2022	9:59	F49	601031	4191011	22,0	21,8	0,569	1020,3	8,09
26/09/2022	10:02	F50	601020	4191004	21,6	21,9	0,479	1020,6	6,83
26/09/2022	10:04	F51	601011	4190995	21,8	23,0	0,436	1020,4	6,21
26/09/2022	10:05	F52	601003	4190987	21,8	23,1	0,364	1020,5	5,18
26/09/2022	10:07	F53	600994	4190978	21,7	22,4	0,266	1021,4	3,79
26/09/2022	10:09	F54	600984	4190966	22,0	22,6	0,365	1021,5	5,20
26/09/2022	10:12	F55	600986	4190963	22,1	22,7	0,243	1020,3	3,46
26/09/2022	10:14	F56	600992	4190962	21,7	21,5	0,468	1021,4	6,67
26/09/2022	10:16	F57	600997	4190969	22,4	23,3	0,269	1021,5	3,83
26/09/2022	10:18	F58	600994	4190974	22,5	22,4	0,129	1021,5	1,83
26/09/2022	10:20	F59	601005	4190979	22,0	23,0	0,340	1020,4	4,84
26/09/2022	10:22	F60	601011	4190988	21,9	22,0	0,188	1020,5	2,68
26/09/2022	10:24	F61	601015	4190995	22,0	23,3	0,260	1020,3	3,70
26/09/2022	10:26	F62	601024	4191005	21,3	22,4	0,649	1020,2	9,25
26/09/2022	10:28	F63	601024	4191023	22,1	22,7	0,495	1020,3	7,04
26/09/2022	10:31	F64	601018	4191028	22,2	23,2	0,333	1020,4	4,73
26/09/2022	10:33	F65	601022	4191035	22,1	23,4	0,153	1020,5	2,18
26/09/2022	10:35	F66	601017	4191046	22,1	23,1	0,427	1021,5	6,08
26/09/2022	10:37	F67	601013	4191041	21,8	22,6	0,244	1021,5	3,48
26/09/2022	10:38	F68	601008	4191036	21,9	22,4	0,479	1021,4	6,82
26/09/2022	10:40	F69	601009	4191028	21,6	22,8	0,346	1021,3	4,93
26/09/2022	10:41	F70	601014	4191022	22,0	23,2	0,178	1020,4	2,53

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
26/09/2022	10:43	F71	601007	4191020	21,8	23,0	0,201	1021,0	2,86
26/09/2022	10:45	F72	600998	4191020	22,1	21,8	0,308	1021,6	4,39
26/09/2022	10:48	F73	600993	4191010	23,3	22,2	0,179	1021,6	2,54
26/09/2022	10:50	F74	600997	4191004	23,6	22,8	0,311	1021,4	4,41
26/09/2022	10:52	F75	600992	4190998	22,3	22,7	0,355	1021,4	5,05
26/09/2022	10:53	F76	600988	4191000	24,4	22,4	0,433	1021,2	6,12
26/09/2022	10:56	F77	600986	4190991	22,1	22,2	0,185	1021,5	2,63
26/09/2022	11:08	F78	600973	4190973	25,1	21,6	0,045	1021,6	0,63
26/09/2022	11:10	F79	600970	4190986	23,9	22,3	0,078	1021,5	1,10
26/09/2022	11:11	F80	600971	4190999	23,5	23,6	1,199	1021,3	16,99
26/09/2022	11:14	F81	600974	4191004	23,9	24,3	0,253	1021,5	3,58
26/09/2022	11:16	F82	600963	4191003	23,5	23,5	0,133	1021,4	1,88
26/09/2022	11:19	F83	600952	4191003	24,4	24,3	0,562	1021,5	7,94
26/09/2022	11:21	F84	600941	4191004	25,6	25,8	0,163	1021,4	2,29
26/09/2022	11:22	F85	600926	4191004	25,1	25,1	0,314	1021,5	4,43
26/09/2022	11:25	F86	600957	4191011	24,6	27,0	0,365	1021,5	5,15
26/09/2022	11:28	F87	600965	4191026	24,2	25,2	0,209	1021,5	2,95
26/09/2022	11:32	F88	600971	4191040	23,1	25,4	0,366	1021,5	5,19
26/09/2022	11:35	F89	600978	4191049	23,7	27,1	0,407	1021,5	5,76
26/09/2022	11:37	F90	600984	4191062	24,4	25,7	0,475	1021,7	6,71
26/09/2022	11:40	F91	600989	4191075	24,5	25,9	0,349	1021,5	4,93
26/09/2022	11:44	F92	600995	4191087	24,8	29,5	0,303	1021,5	4,28
26/09/2022	11:46	F93	601003	4191098	24,1	27,8	0,370	1021,5	5,23
26/09/2022	11:48	F94	601010	4191111	27,8	27,9	0,285	1021,4	3,98
26/09/2022	11:51	F95	601015	4191120	23,9	23,6	0,489	1021,6	6,92
26/09/2022	11:53	F96	601025	4191126	23,9	24,2	0,423	1021,5	5,99
26/09/2022	11:56	F97	601022	4191113	23,5	25,3	0,111	1021,5	1,57
26/09/2022	11:58	F98	601016	4191101	23,5	26,1	0,290	1021,3	4,11
26/09/2022	12:02	F99	601014	4191091	23,7	25,6	0,448	1021,4	6,34
26/09/2022	12:05	F100	601008	4191095	23,5	28,3	0,083	1021,5	1,18
26/09/2022	12:07	F101	601004	4191085	23,9	27,5	0,369	1021,4	5,22
26/09/2022	12:10	F102	601006	4191083	24,2	24,3	0,269	1021,5	3,80
26/09/2022	12:13	F103	601003	4191072	24,6	25,0	0,196	1021,5	2,77
26/09/2022	12:16	F104	600996	4191077	24,5	25,1	0,335	1021,5	4,73
26/09/2022	12:20	F105	600993	4191070	24,2	25,9	0,349	1021,2	4,93

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
26/09/2022	12:23	F106	600998	4191059	23,9	25,5	0,303	1021,5	4,29
26/09/2022	12:27	F107	601015	4191060	25,0	25,4	0,316	1021,5	4,46
26/09/2022	12:40	F108	601023	4191052	24,0	25,0	0,114	1021,5	1,61
26/09/2022	12:43	F109	601029	4191066	23,5	28,3	0,370	1021,5	5,24
26/09/2022	12:44	F110	601034	4191079	24,6	27,6	0,676	1021,4	9,54
26/09/2022	12:46	F111	601043	4191088	25,3	29,7	0,580	1021,4	8,17
26/09/2022	12:47	F112	601048	4191100	25,2	27,1	0,323	1021,6	4,55
26/09/2022	12:50	F113	601054	4191113	24,1	29,1	0,189	1021,7	2,67
26/09/2022	12:53	F114	601057	4191128	24,6	24,4	0,610	1021,3	8,61
26/09/2022	12:55	F115	601048	4191132	23,7	25,1	0,203	1021,3	2,87
26/09/2022	12:58	F116	601041	4191123	25,3	27,3	0,378	1021,4	5,32
26/09/2022	12:59	F117	601036	4191111	25,1	29,4	0,133	1021,4	1,87
26/09/2022	13:02	F118	601029	4191098	25,4	29,7	0,282	1021,6	3,97
26/09/2022	13:05	F119	601023	4191082	24,1	29,2	0,477	1021,0	6,74
26/09/2022	13:08	F120	601017	4191069	23,3	26,7	0,124	1021,5	1,76
29/09/2022	8:23	F121	601405	4190727	20,3	21,2	0,608	1006,8	8,58
29/09/2022	8:25	F122	601391	4190722	20,5	21,7	0,389	1006,7	5,49
29/09/2022	8:26	F123	601377	4190718	20,2	20,8	0,571	1006,7	8,06
29/09/2022	8:29	F124	601362	4190714	20,1	21,0	0,825	1006,8	11,66
29/09/2022	8:31	F125	601346	4190711	20,3	21,9	0,509	1006,7	7,19
29/09/2022	8:34	F126	601332	4190709	20,4	22,4	1,001	1006,8	14,13
29/09/2022	8:36	F127	601316	4190706	20,5	21,6	0,208	1006,8	2,93
29/09/2022	8:39	F128	601302	4190706	20,4	21,0	0,333	1006,8	4,70
29/09/2022	8:42	F129	601288	4190704	20,5	20,9	0,386	1006,8	5,45
29/09/2022	8:45	F130	601278	4190702	20,2	20,8	0,473	1006,8	6,68
29/09/2022	8:48	F131	601265	4190698	20,3	20,1	0,841	1008,1	11,89
29/09/2022	8:57	F132	601101	4190882	20,6	21,5	0,645	1013,0	9,15
29/09/2022	9:01	F133	601096	4190866	20,7	21,1	10,435	1013,0	148,04
29/09/2022	9:04	F134	601098	4190874	20,3	21,2	6,931	1012,9	98,45
29/09/2022	9:06	F135	601100	4190884	20,2	21,3	2,576	1012,9	36,60
29/09/2022	9:09	F136	601099	4190892	20,2	21,4	1,121	1013,0	15,93
29/09/2022	9:14	F137	601097	4190898	20,5	21,3	1,493	1012,9	21,19
29/09/2022	9:17	F138	601092	4190886	23,0	21,4	0,379	1013,0	5,34
29/09/2022	9:20	F139	601081	4190877	21,1	21,8	0,930	1012,9	13,17
29/09/2022	9:23	F140	601075	4190863	21,2	23,1	0,850	1014,2	12,05

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
29/09/2022	9:26	F141	601068	4190852	21,5	23,1	1,562	1014,2	22,13
29/09/2022	9:30	F142	601060	4190840	21,4	22,8	1,660	1014,2	23,52
29/09/2022	9:33	F143	601060	4190851	21,1	21,9	1,045	1015,3	14,84
29/09/2022	9:37	F144	601061	4190865	20,8	22,0	0,778	1015,3	11,06
29/09/2022	9:40	F145	601064	4190881	21,1	22,7	0,305	1015,4	4,33
29/09/2022	9:43	F146	601067	4190896	21,3	22,6	1,430	1016,4	20,31
29/09/2022	9:46	F147	601070	4190907	21,5	22,3	0,322	1016,7	4,57
29/09/2022	9:49	F148	601074	4190920	21,4	21,9	0,315	1016,7	4,47
29/09/2022	9:54	F149	601079	4190931	21,2	20,3	0,810	1016,8	11,51
29/09/2022	9:58	F150	601086	4190946	20,8	20,6	0,177	1017,7	2,52
29/09/2022	10:04	F151	601091	4190958	20,5	21,7	0,305	1017,6	4,35
29/09/2022	10:07	F152	601093	4190969	21,3	20,8	0,327	1017,7	4,65
29/09/2022	10:09	F153	601085	4190968	21,1	21,6	0,548	1017,6	7,80
29/09/2022	10:12	F154	601070	4190964	21,0	22,7	0,233	1017,6	3,32
29/09/2022	10:15	F155	601060	4190956	21,9	21,6	0,338	1017,7	4,80
29/09/2022	10:18	F156	601051	4190946	21,4	22,6	0,431	1019,2	6,14
29/09/2022	10:21	F157	601042	4190937	21,5	22,5	0,419	1019,2	5,96
29/09/2022	10:24	F158	601033	4190927	21,4	22,8	0,635	1018,9	9,04
29/09/2022	10:28	F159	601024	4190920	21,7	22,4	0,690	1019,0	9,81
29/09/2022	10:32	F160	601026	4190932	21,2	21,8	0,320	1020,0	4,56
29/09/2022	10:35	F161	601033	4190948	20,9	20,7	0,407	1020,5	5,81
29/09/2022	10:38	F162	601037	4190960	21,1	21,7	0,688	1020,2	9,82
29/09/2022	10:41	F163	601041	4190972	20,7	21,5	0,414	1021,2	5,92
29/09/2022	10:43	F164	601045	4190984	21,3	21,1	0,537	1021,4	7,67
29/09/2022	10:46	F165	601048	4190997	21,0	21,0	0,550	1021,6	7,86
29/09/2022	10:59	F166	601042	4191000	21,4	21,4	0,593	1021,5	8,46
29/09/2022	11:03	F167	601039	4190989	21,5	21,8	0,858	1021,4	12,24
29/09/2022	11:06	F168	601034	4190977	21,3	20,4	0,140	1021,5	2,00
29/09/2022	11:08	F169	601029	4190964	20,8	21,1	0,420	1020,3	6,00
29/09/2022	11:12	F170	601023	4190950	21,0	21,4	0,239	1020,3	3,41
29/09/2022	11:15	F171	601019	4190936	21,6	21,7	0,537	1020,3	7,65
29/09/2022	11:19	F172	601015	4190921	21,2	21,0	0,337	1020,3	4,81
29/09/2022	11:23	F173	601012	4190909	21,5	21,1	0,557	1019,2	7,93
29/09/2022	11:27	F174	601016	4190903	21,8	20,7	1,386	1019,0	19,71
29/09/2022	11:30	F175	601016	4190907	21,1	22,8	0,244	1019,6	3,48

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
29/09/2022	11:33	F176	601023	4190909	22,2	21,4	0,912	1019,4	12,95
29/09/2022	11:36	F177	601038	4190921	21,5	22,4	0,650	1019,1	9,25
29/09/2022	11:38	F178	601045	4190930	21,9	21,6	1,198	1019,1	17,03
29/09/2022	11:41	F179	601055	4190942	21,7	21,6	0,430	1019,0	6,12
29/09/2022	11:44	F180	601064	4190952	21,8	21,8	0,508	1019,0	7,22
29/09/2022	11:47	F181	601074	4190960	21,8	21,8	0,965	1019,1	13,72
29/09/2022	11:49	F182	601078	4190957	21,8	21,2	0,504	1017,9	7,16
29/09/2022	11:52	F183	601084	4190959	21,7	20,9	0,442	1017,8	6,28
29/09/2022	11:55	F184	601080	4190947	21,2	20,7	0,204	1017,9	2,90
29/09/2022	11:58	F185	601073	4190935	21,3	21,7	0,562	1017,0	7,99
29/09/2022	12:03	F186	601068	4190924	21,8	21,8	0,223	1016,7	3,16
29/09/2022	12:06	F187	601064	4190908	22,0	21,0	0,646	1016,6	9,16
29/09/2022	12:09	F188	601060	4190891	21,6	20,9	0,536	1016,6	7,61
29/09/2022	13:14	F189	601057	4190877	21,3	20,6	0,405	1016,4	5,75
29/09/2022	13:17	F190	601055	4190861	21,2	20,1	0,455	1018,4	6,48
29/09/2022	13:20	F191	601053	4190848	21,8	20,5	0,793	1015,6	11,24
29/09/2022	13:23	F192	601054	4190833	21,4	20,7	0,429	1015,3	6,09
29/09/2022	13:25	F193	601051	4190823	21,6	21,3	1,304	1014,8	18,48
29/09/2022	13:28	F194	601051	4190815	21,4	21,5	0,682	1015,0	9,67
29/09/2022	13:31	F195	601058	4190820	21,8	22,0	1,120	1015,4	15,87
29/09/2022	13:35	F196	601063	4190826	22,1	22,0	0,621	1015,6	8,79
29/09/2022	13:39	F197	601072	4190838	22,0	22,8	1,406	1015,2	19,90
29/09/2022	13:43	F198	601075	4190849	22,6	22,4	2,510	1014,1	35,42
29/09/2022	13:46	F199	601080	4190858	22,3	24,1	2,250	1014,1	31,78
29/09/2022	13:49	F200	601088	4190871	22,7	23,4	2,522	1014,3	35,58
29/09/2022	13:51	F201	601095	4190876	22,4	22,9	0,864	1014,4	12,20
29/09/2022	13:55	F202	601097	4190869	22,1	22,5	2,942	1014,2	41,59
29/09/2022	13:58	F203	601095	4190854	22,1	22,9	1,587	1012,8	22,40
29/09/2022	14:01	F204	601092	4190838	22,4	22,2	0,701	1012,8	9,89
29/09/2022	14:03	F205	601090	4190824	22,0	21,6	1,387	1012,9	19,59
29/09/2022	14:06	F206	601091	4190812	21,9	21,1	0,864	1012,8	12,21
29/09/2022	14:08	F207	601092	4190798	21,2	20,8	0,668	1012,1	9,45
29/09/2022	14:11	F208	601093	4190783	21,8	22,6	0,442	1011,2	6,24
29/09/2022	14:14	F209	601093	4190769	21,9	21,0	0,561	1011,7	7,92
29/09/2022	14:17	F210	601093	4190758	21,2	21,3	0,678	1011,7	9,59

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
29/09/2022	14:20	F211	601094	4190774	22,1	21,9	0,352	1011,6	4,96
29/09/2022	14:23	F212	601096	4190760	21,8	22,5	0,292	1011,7	4,12
29/09/2022	14:26	F213	601098	4190747	22,5	22,3	0,341	1011,6	4,80
29/09/2022	14:33	F214	601099	4190733	23,4	21,6	0,171	1011,3	2,40
29/09/2022	14:35	F215	601102	4190717	23,3	21,7	0,612	1010,5	8,58
29/09/2022	14:37	F216	601102	4190704	22,4	21,3	1,874	1010,4	26,37
29/09/2022	14:39	F217	601104	4190690	21,5	21,0	1,003	1010,5	14,16
29/09/2022	14:43	F218	601147	4190657	23,8	25,2	0,356	1009,8	4,98
29/09/2022	14:46	F219	601165	4190662	23,7	21,1	0,900	1009,3	12,59
29/09/2022	14:50	F220	601182	4190665	21,9	21,5	0,855	1009,4	12,04
29/09/2022	14:52	F221	601196	4190668	23,2	23,9	0,381	1009,3	5,34
29/09/2022	14:57	F222	601209	4190673	23,8	21,2	0,235	1009,3	3,29
29/09/2022	14:59	F223	601222	4190678	23,2	22,6	0,490	1008,7	6,86
29/09/2022	15:01	F224	601238	4190684	23,3	22,1	0,966	1008,3	13,52
29/09/2022	15:04	F225	601249	4190694	23,6	21,9	0,567	1008,2	7,93
29/09/2022	15:08	F226	601267	4190694	23,6	22,1	1,147	1008,1	16,04
29/09/2022	15:11	F227	601279	4190697	22,6	21,3	1,152	1007,9	16,16
29/09/2022	15:15	F228	601295	4190699	22,5	21,5	1,041	1007,2	14,59
29/09/2022	15:19	F229	601310	4190699	23,6	21,4	0,835	1006,8	11,66
29/09/2022	15:23	F230	601326	4190705	23,1	20,8	0,572	1007,0	8,00
29/09/2022	15:25	F231	601341	4190702	22,2	21,3	2,462	1006,9	34,54
29/09/2022	15:27	F232	601355	4190710	22,4	20,4	1,429	1006,8	20,03
29/09/2022	15:33	F233	601372	4190715	22,3	20,4	1,727	1006,7	24,22
30/09/2022	8:30	F234	600930	4190923	21,2	21,2	1,770	1024,4	25,35
30/09/2022	8:34	F235	600938	4190921	21,2	20,9	0,535	1020,3	7,63
30/09/2022	8:37	F236	600935	4190904	20,9	20,7	0,261	1020,3	3,73
30/09/2022	8:39	F237	600931	4190906	20,9	21,5	0,249	1020,2	3,56
30/09/2022	8:42	F238	600929	4190893	20,9	21,4	0,095	1020,3	1,36
30/09/2022	8:45	F239	600935	4190891	20,9	21,0	0,348	1020,3	4,97
30/09/2022	8:47	F240	600935	4190878	20,8	21,1	0,311	1020,3	4,44
30/09/2022	8:49	F241	600937	4190863	20,9	21,5	0,325	1020,3	4,64
30/09/2022	8:51	F242	600939	4190855	20,7	21,7	0,142	1020,4	2,03
30/09/2022	8:54	F243	600948	4190861	20,9	22,1	0,329	1020,2	4,70
30/09/2022	8:57	F244	600959	4190864	21,3	23,0	0,552	1020,3	7,87
30/09/2022	9:01	F245	600959	4190878	20,9	21,6	0,496	1020,3	7,08

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
30/09/2022	9:04	F246	600970	4190870	21,0	22,5	0,515	1019,1	7,34
30/09/2022	9:07	F247	600965	4190859	21,2	22,1	0,142	1020,3	2,03
30/09/2022	9:09	F248	600969	4190852	21,1	22,0	0,377	1020,3	5,38
30/09/2022	9:12	F249	600964	4190848	21,2	21,9	0,239	1020,4	3,41
30/09/2022	9:14	F250	600955	4190852	20,9	23,2	2,277	1020,3	32,51
30/09/2022	9:30	F251	600941	4190845	20,4	21,9	0,072	1020,3	1,03
30/09/2022	9:33	F252	600954	4190848	20,4	23,1	0,224	1020,3	3,20
30/09/2022	9:36	F253	600952	4190840	20,5	23,0	0,062	1020,4	0,89
30/09/2022	9:39	F254	600958	4190838	20,4	21,7	0,482	1020,2	6,89
30/09/2022	9:42	F255	600954	4190830	20,8	21,6	0,348	1020,2	4,97
30/09/2022	9:44	F256	600942	4190835	20,2	22,0	0,214	1020,5	3,06
30/09/2022	9:47	F257	600943	4190823	21,0	23,5	0,285	1021,4	4,07
30/09/2022	9:50	F258	600945	4190813	21,1	23,9	0,192	1021,4	2,74
30/09/2022	9:53	F259	600954	4190814	21,5	22,8	0,574	1020,3	8,18
30/09/2022	9:55	F260	600948	4190805	21,6	22,5	0,244	1021,5	3,48
30/09/2022	9:59	F261	600949	4190795	21,4	22,6	0,311	1021,5	4,44
30/09/2022	10:01	F262	600950	4190786	21,1	24,0	0,206	1021,6	2,94
30/09/2022	10:03	F263	600955	4190777	21,9	23,7	0,235	1021,7	3,35
30/09/2022	10:06	F264	600964	4190775	21,3	26,2	0,446	1022,6	6,37
30/09/2022	10:12	F265	600977	4190761	21,4	24,3	3,665	1021,9	52,33
30/09/2022	10:18	F266	600985	4190758	21,5	23,3	0,136	1021,7	1,94
30/09/2022	10:23	F267	600975	4190751	21,3	25,8	65,223	1022,8	932,36
30/09/2022	10:26	F268	600968	4190755	21,4	26,4	32,379	1022,8	462,70
30/09/2022	10:29	F269	600963	4190760	21,7	25,7	1,284	1022,8	18,33
30/09/2022	10:33	F270	600943	4190783	21,5	23,0	0,509	1021,5	7,26
30/09/2022	10:36	F271	600943	4190790	21,8	23,0	0,081	1021,5	1,15
30/09/2022	10:39	F272	600942	4190802	22,1	22,9	0,138	1021,6	1,97
30/09/2022	10:43	F273	600942	4190817	22,0	23,0	0,244	1021,7	3,48
30/09/2022	10:45	F274	600930	4190816	21,7	22,8	0,466	1021,3	6,64
30/09/2022	10:47	F275	600932	4190823	21,8	22,9	0,425	1021,4	6,06
30/09/2022	10:50	F276	600924	4190827	21,7	22,5	0,094	1021,6	1,34
30/09/2022	10:54	F277	600931	4190834	21,1	22,6	0,429	1021,5	6,13
30/09/2022	10:57	F278	600940	4190830	21,2	23,6	0,392	1021,4	5,60
30/09/2022	11:00	F279	600937	4190842	21,7	23,7	0,333	1021,7	4,75
30/09/2022	11:07	F280	600928	4190848	21,6	24,8	61,281	1021,2	873,75

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
30/09/2022	11:12	F281	600934	4190857	21,6	23,4	3,233	1020,3	46,06
30/09/2022	11:16	F282	600931	4190868	21,5	22,2	0,401	1020,2	5,71
30/09/2022	11:20	F283	600930	4190878	21,2	22,7	0,311	1020,3	4,44
30/09/2022	11:24	F284	600920	4190885	21,2	22,9	1,244	1020,3	17,75
30/09/2022	11:26	F285	600914	4190891	21,7	21,8	0,289	1021,5	4,12
30/09/2022	11:32	F286	600902	4190892	21,4	22,0	0,089	1021,7	1,27
30/09/2022	11:36	F287	600892	4190891	21,7	21,8	0,370	1021,2	5,27
30/09/2022	11:41	F288	600885	4190886	21,3	21,7	0,211	1021,4	3,01
30/09/2022	11:46	F289	600887	4190875	21,3	24,2	0,176	1021,6	2,51
30/09/2022	11:53	F290	600888	4190863	22,0	25,9	1,923	1021,5	27,39
30/09/2022	11:56	F291	600892	4190851	22,5	24,1	0,370	1021,6	5,26
30/09/2022	12:03	F292	600900	4190843	22,1	23,1	0,134	1021,6	1,91
12/10/2022	9:30	F293	600908	4190838	22,0	22,4	0,105	1022,8	1,50
12/10/2022	9:35	F294	600921	4190836	21,4	22,7	0,083	1022,9	1,19
12/10/2022	9:42	F295	600909	4190832	21,9	22,0	0,096	1022,8	1,37
12/10/2022	9:44	F296	600892	4190838	22,1	23,3	0,238	1023,9	3,40
12/10/2022	9:49	F297	600881	4190860	22,8	21,6	0,337	1022,7	4,79
12/10/2022	9:54	F298	600860	4190858	24,3	24,1	0,247	1022,8	3,50
12/10/2022	10:08	F299	600856	4190864	23,3	22,1	0,036	1023,6	0,51
12/10/2022	10:12	F300	600856	4190876	22,8	22,1	0,044	1023,4	0,63
12/10/2022	10:13	F301	600871	4190883	22,2	22,1	0,047	1023,8	0,67
12/10/2022	10:16	F302	600867	4190893	21,0	22,8	0,305	1023,9	4,37
12/10/2022	10:18	F303	600853	4190893	22,3	23,3	0,244	1024,1	3,48
12/10/2022	10:20	F304	600842	4190894	23,5	23,8	0,531	1024,1	7,54
12/10/2022	10:21	F305	600840	4190904	23,6	23,4	0,355	1023,8	5,04
12/10/2022	10:23	F306	600848	4190908	23,5	25,6	0,196	1023,8	2,78
12/10/2022	10:26	F307	600865	4190909	23,3	25,1	0,162	1023,4	2,30
12/10/2022	10:29	F308	600864	4190928	23,8	23,5	0,547	1023,8	7,76
12/10/2022	10:31	F309	600853	4190926	25,5	22,3	0,394	1023,9	5,56
12/10/2022	10:34	F310	600834	4190926	24,3	23,0	0,077	1023,4	1,09
12/10/2022	10:36	F311	600822	4190922	25,3	23,3	0,146	1024,0	2,06
12/10/2022	10:40	F312	600817	4190936	23,5	24,0	0,550	1024,0	7,81
12/10/2022	10:41	F313	600833	4190946	24,2	22,2	0,493	1024,0	6,99
12/10/2022	10:44	F314	600848	4190944	25,2	22,9	0,523	1023,8	7,39
12/10/2022	10:48	F315	600856	4190946	24,9	22,7	0,226	1023,9	3,20

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
12/10/2022	10:49	F316	600866	4190948	25,0	23,0	0,283	1023,9	4,00
12/10/2022	10:50	F317	600868	4190959	24,0	23,9	0,244	1023,4	3,46
12/10/2022	10:53	F318	600854	4190959	23,0	26,4	0,340	1023,9	4,84
12/10/2022	10:55	F319	600841	4190954	25,0	22,7	0,476	1023,9	6,73
12/10/2022	10:58	F320	600831	4190960	24,9	26,0	0,322	1024,0	4,55
12/10/2022	11:00	F321	600830	4190964	25,6	24,6	0,225	1023,4	3,17
12/10/2022	11:04	F322	600826	4190958	25,2	22,9	1,355	1023,9	19,14
12/10/2022	11:06	F323	600809	4190953	24,3	23,4	0,066	1023,9	0,93
12/10/2022	11:08	F324	600851	4190966	24,4	26,9	0,401	1023,7	5,68
12/10/2022	11:11	F325	600849	4190975	25,4	26,6	0,610	1023,9	8,61
12/10/2022	11:13	F326	600872	4190967	25,5	26,1	0,013	1023,9	0,18
12/10/2022	11:16	F327	600885	4190970	26,4	28,0	0,153	1023,8	2,15
12/10/2022	11:17	F328	600905	4190972	25,1	23,0	0,227	1024,0	3,21
12/10/2022	11:20	F329	600902	4190966	25,2	24,9	0,315	1023,8	4,45
12/10/2022	11:25	F330	600858	4190981	25,3	24,0	0,311	1023,8	4,39
12/10/2022	11:26	F331	600857	4190991	26,1	25,5	0,185	1024,0	2,61
12/10/2022	11:29	F332	600841	4190992	26,0	23,7	0,168	1024,0	2,37
12/10/2022	11:35	F333	600876	4190920	26,0	26,9	0,131	1023,9	1,85
12/10/2022	11:37	F334	600882	4190933	25,8	27,2	0,089	1024,0	1,25
12/10/2022	11:38	F335	600888	4190942	24,5	24,0	0,639	1023,8	9,05
12/10/2022	11:40	F336	600890	4190953	25,2	26,9	0,185	1023,9	2,61
12/10/2022	11:42	F337	600881	4190951	25,0	29,9	0,061	1024,0	0,86
12/10/2022	11:44	F338	600880	4190941	25,4	25,3	0,244	1023,9	3,44
12/10/2022	11:46	F339	600903	4190957	24,8	29,2	0,462	1023,8	6,53
12/10/2022	11:48	F340	600910	4190960	24,9	29,7	0,107	1023,5	1,51
12/10/2022	11:51	F341	600910	4190954	24,0	23,1	0,258	1024,0	3,66
12/10/2022	11:52	F342	600922	4190948	24,3	27,1	0,654	1023,7	9,26
12/10/2022	11:54	F343	600919	4190962	26,2	27,7	0,082	1023,8	1,15
12/10/2022	11:55	F344	600934	4190960	24,8	22,9	0,322	1023,8	4,55
12/10/2022	11:57	F345	600933	4190949	23,9	24,4	0,392	1023,9	5,56
12/10/2022	11:59	F346	600932	4190935	25,1	24,5	0,078	1023,8	1,10
12/10/2022	12:01	F347	600926	4190952	24,3	26,4	0,174	1023,9	2,46
12/10/2022	12:52	F348	600961	4191002	26,9	28,1	0,399	1022,6	5,60
12/10/2022	12:54	F349	600961	4190988	24,6	28,3	0,131	1023,0	1,85
12/10/2022	12:57	F350	600963	4190974	24,5	32,0	0,231	1022,8	3,27

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
12/10/2022	12:58	F351	600963	4190959	24,4	30,2	0,325	1022,6	4,60
12/10/2022	13:02	F352	600963	4190950	24,3	32,5	0,039	1023,8	0,55
12/10/2022	13:02	F353	600964	4190936	25,6	31,3	0,131	1022,7	1,85
12/10/2022	13:04	F354	600974	4190937	26,5	28,0	0,269	1023,2	3,78
12/10/2022	13:07	F355	600974	4190947	26,4	31,2	0,745	1022,9	10,47
12/10/2022	13:10	F356	600978	4190954	26,3	32,9	0,152	1022,9	2,14
12/10/2022	13:12	F357	600949	4190940	26,4	29,0	0,144	1023,6	2,03
12/10/2022	13:14	F358	600951	4190955	26,7	31,7	0,278	1022,8	3,90
12/10/2022	13:16	F359	600952	4190968	27,4	30,6	0,082	1022,9	1,15
12/10/2022	13:18	F360	600953	4190980	27,4	30,3	0,145	1023,9	2,03
12/10/2022	13:21	F361	600948	4190997	28,3	26,2	0,082	1023,6	1,15
12/10/2022	13:22	F362	600955	4191003	28,4	31,6	0,350	1023,3	4,89
12/10/2022	13:24	F363	600937	4191000	25,5	23,4	0,222	1023,4	3,13
12/10/2022	13:26	F364	600927	4191003	25,4	23,1	0,161	1023,7	2,27
12/10/2022	13:28	F365	600913	4191001	27,6	34,8	0,163	1022,6	2,28
12/10/2022	13:30	F366	600918	4190994	27,8	27,4	0,267	1022,8	3,73
12/10/2022	13:32	F367	600916	4190983	26,7	39,0	0,090	1022,6	1,26
12/10/2022	13:34	F368	600929	4190982	29,8	32,2	0,394	1022,4	5,47
12/10/2022	13:35	F369	600935	4190982	28,8	30,2	0,087	1022,5	1,21
12/10/2022	13:36	F370	600911	4190970	28,6	31,6	0,277	1022,5	3,86
12/10/2022	13:38	F371	600921	4190972	27,4	32,6	0,394	1022,4	5,52
12/10/2022	13:40	F372	600932	4190971	24,1	23,8	0,203	1022,5	2,87
12/10/2022	13:44	F373	600944	4190984	26,0	30,2	0,359	1022,7	5,05
12/10/2022	13:46	F374	600947	4190975	27,8	30,8	0,161	1022,6	2,25
12/10/2022	13:48	F375	600948	4190961	26,7	34,7	0,274	1022,9	3,85
12/10/2022	13:50	F376	600947	4190943	28,6	30,1	0,264	1022,7	3,68
12/10/2022	13:51	F377	600960	4190927	26,7	30,8	0,556	1022,6	7,80
12/10/2022	13:53	F378	600949	4190927	27,8	24,2	0,508	1022,7	7,10
12/10/2022	13:54	F379	600939	4190929	27,7	31,9	0,311	1022,6	4,35
12/10/2022	13:56	F380	600935	4190945	28,1	28,0	0,222	1022,7	3,10
12/10/2022	13:58	F381	600935	4190956	26,5	25,8	0,148	1022,5	2,08
12/10/2022	13:59	F382	600933	4190973	25,5	24,7	0,308	1022,9	4,34
12/10/2022	14:05	F383	600914	4191014	27,3	32,4	0,235	1022,8	3,29
12/10/2022	14:07	F384	600914	4191023	27,5	33,7	0,285	1022,7	3,99
12/10/2022	14:10	F385	600931	4191021	28,0	36,5	0,149	1022,6	2,08

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
12/10/2022	14:11	F386	600942	4191022	28,5	40,2	0,047	1022,7	0,66
12/10/2022	14:13	F387	600951	4191021	28,4	37,0	0,370	1022,7	5,16
12/10/2022	14:16	F388	600954	4191034	27,0	27,6	0,344	1022,5	4,82
12/10/2022	14:18	F389	600944	4191035	27,1	35,3	0,189	1022,5	2,65
12/10/2022	14:20	F390	600931	4191035	27,3	35,8	0,389	1022,6	5,45
12/10/2022	14:22	F391	600914	4191035	27,6	35,4	0,223	1022,8	3,12
12/10/2022	14:24	F392	600913	4191052	29,1	31,4	0,136	1022,6	1,89
12/10/2022	14:26	F393	600927	4191050	27,8	37,0	0,133	1022,8	1,86
12/10/2022	14:28	F394	600936	4191051	28,1	34,9	0,244	1022,4	3,41
12/10/2022	14:30	F395	600954	4191050	27,0	34,8	0,285	1022,7	4,00
12/10/2022	14:34	F396	600964	4191049	24,5	38,4	0,359	1022,6	5,08
12/10/2022	14:36	F397	600969	4191058	25,2	39,0	0,334	1022,6	4,71
12/10/2022	14:38	F398	600955	4191062	27,7	33,5	0,277	1022,6	3,87
12/10/2022	14:39	F399	600942	4191064	26,3	29,9	0,208	1022,5	2,92
12/10/2022	14:42	F400	600932	4191065	27,1	32,0	0,772	1022,6	10,82
12/10/2022	14:45	F401	600912	4191064	28,6	25,6	0,456	1022,7	6,36
12/10/2022	14:47	F402	600914	4191075	27,1	31,4	0,269	1022,6	3,77
12/10/2022	14:49	F403	600914	4191080	27,2	23,4	0,247	1022,5	3,46
12/10/2022	14:52	F404	600926	4191076	26,2	32,7	0,222	1022,7	3,12
12/10/2022	14:54	F405	600931	4191084	26,5	33,5	0,595	1022,6	8,36
12/10/2022	14:56	F406	600938	4191067	26,6	33,4	0,523	1022,5	7,34
12/10/2022	14:57	F407	600940	4191077	26,8	27,6	0,098	1022,7	1,38
12/10/2022	15:01	F408	600948	4191064	27,5	35,6	0,261	1022,5	3,65
12/10/2022	15:03	F409	600961	4191059	27,4	35,7	0,207	1022,3	2,90
12/10/2022	15:05	F410	600969	4191054	27,2	36,3	0,242	1021,6	3,39
12/10/2022	15:10	F411	600976	4191067	27,5	37,2	0,044	1021,6	0,62
12/10/2022	15:12	F412	600964	4191072	27,6	32,6	0,222	1021,2	3,10
12/10/2022	15:14	F413	600950	4191081	27,5	35,6	0,392	1021,3	5,48
12/10/2022	15:17	F414	600948	4191093	26,2	34,3	0,177	1022,6	2,49
12/10/2022	15:19	F415	600960	4191089	27,0	35,9	0,215	1021,5	3,01
12/10/2022	15:22	F416	600971	4191077	26,6	38,8	0,349	1021,4	4,89
12/10/2022	15:24	F417	600986	4191085	27,1	35,9	0,272	1021,3	3,81
12/10/2022	15:26	F418	600973	4191090	27,6	36,0	0,222	1021,6	3,10
12/10/2022	15:28	F419	600962	4191095	27,8	36,0	0,237	1021,7	3,31
12/10/2022	15:30	F420	600945	4191102	26,3	34,1	0,131	1022,9	1,84

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
12/10/2022	15:32	F421	600937	4191111	25,7	36,2	0,416	1021,7	5,85
12/10/2022	15:38	F422	600948	4191113	25,8	34,2	0,334	1021,5	4,70
12/10/2022	15:41	F423	600961	4191110	26,8	30,1	0,163	1021,4	2,28
12/10/2022	15:44	F424	600974	4191107	25,3	29,2	0,275	1021,4	3,87
12/10/2022	15:46	F425	600985	4191102	25,6	34,7	0,983	1021,6	13,83
12/10/2022	15:48	F426	600998	4191098	25,2	37,6	0,277	1021,4	3,90
12/10/2022	15:56	F427	601002	4191112	25,3	32,5	0,437	1021,4	6,15
12/10/2022	15:59	F428	601008	4191123	26,7	30,2	0,388	1021,4	5,44
12/10/2022	16:00	F429	601011	4191130	26,5	25,6	0,235	1021,3	3,30
12/10/2022	16:02	F430	601016	4191138	25,4	26,3	0,288	1021,4	4,05
12/10/2022	16:04	F431	600987	4191109	24,6	34,1	0,102	1021,4	1,44
12/10/2022	16:07	F432	600979	4191122	25,8	31,0	0,190	1021,6	2,67
14/10/2022	8:45	F433	600895	4190998	21,9	22,9	1,218	1021,3	17,35
14/10/2022	8:47	F434	600886	4190992	22,1	23,3	1,158	1021,2	16,48
14/10/2022	8:50	F435	600877	4190993	22,0	23,2	2,302	1021,3	32,78
14/10/2022	8:53	F436	600874	4191005	22,2	23,1	0,370	1021,3	5,27
14/10/2022	8:57	F437	600891	4191007	22,4	22,9	0,131	1021,4	1,86
14/10/2022	8:59	F438	600904	4191005	22,2	21,5	0,087	1021,7	1,24
14/10/2022	9:00	F439	600903	4191020	21,9	22,6	0,015	1021,7	0,21
14/10/2022	9:03	F440	600887	4191022	22,3	22,5	0,038	1021,7	0,54
14/10/2022	9:05	F441	600873	4191020	21,8	22,3	0,218	1021,4	3,11
14/10/2022	9:06	F442	600868	4191035	22,1	22,7	0,261	1021,7	3,72
14/10/2022	9:09	F443	600871	4191045	21,9	22,4	0,055	1021,4	0,78
14/10/2022	9:11	F444	600858	4191029	21,9	22,2	0,058	1021,4	0,83
14/10/2022	9:13	F445	600849	4191021	21,4	22,0	0,000	1021,5	0,00
14/10/2022	9:16	F446	600856	4191015	21,8	22,0	0,145	1021,7	2,07
14/10/2022	9:17	F447	600869	4191018	22,2	22,3	0,099	1021,3	1,41
14/10/2022	9:19	F448	600879	4191018	22,4	22,1	0,277	1021,7	3,94
14/10/2022	9:21	F449	600881	4191024	22,3	22,3	0,286	1021,6	4,07
14/10/2022	9:25	F450	600864	4191007	22,4	21,9	0,044	1021,5	0,63
14/10/2022	9:27	F451	600849	4190997	22,1	22,3	0,244	1021,5	3,47
14/10/2022	9:28	F452	600836	4190999	22,0	21,5	0,275	1021,3	3,92
14/10/2022	9:33	F453	600822	4191003	22,1	21,7	0,362	1021,5	5,15
14/10/2022	9:35	F454	600814	4191004	22,2	21,9	0,261	1021,6	3,72
14/10/2022	9:37	F455	600808	4190997	22,2	21,6	0,073	1022,8	1,04

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
14/10/2022	9:38	F456	600821	4191010	22,1	21,8	0,311	1021,3	4,43
14/10/2022	9:41	F457	600834	4191007	21,9	22,6	0,222	1021,5	3,16
14/10/2022	9:43	F458	600847	4191005	22,1	21,7	0,223	1021,1	3,17
14/10/2022	9:46	F459	600858	4191009	22,3	21,3	0,189	1021,4	2,69
14/10/2022	9:47	F460	600864	4191001	22,4	22,0	0,245	1021,5	3,48
14/10/2022	9:59	F461	600904	4191037	22,5	22,5	0,436	1021,1	6,20
14/10/2022	10:01	F462	600909	4191054	22,3	21,4	0,277	1021,2	3,94
14/10/2022	10:03	F463	600895	4191053	22,4	22,2	0,596	1021,5	8,48
14/10/2022	10:05	F464	600889	4191058	22,4	21,9	0,349	1021,3	4,96
14/10/2022	10:08	F465	600896	4191067	22,3	21,2	0,244	1021,4	3,47
14/10/2022	10:09	F466	600892	4191080	22,2	21,8	0,282	1021,1	4,01
14/10/2022	10:11	F467	600894	4191088	22,2	21,7	0,455	1021,2	6,47
14/10/2022	10:14	F468	600904	4191081	22,2	22,0	0,194	1021,4	2,76
14/10/2022	10:16	F469	600913	4191079	22,4	21,8	0,364	1021,5	5,18
14/10/2022	10:19	F470	600911	4191085	22,5	21,6	0,088	1021,5	1,25
14/10/2022	10:23	F471	600909	4191066	22,4	21,1	0,245	1020,8	3,48
14/10/2022	10:24	F472	600900	4191072	22,3	21,2	0,288	1021,2	4,10
14/10/2022	10:26	F473	600907	4191053	22,4	21,3	0,186	1021,2	2,64
14/10/2022	10:19	F474	600898	4191056	22,4	21,4	0,070	1021,2	1,00
14/10/2022	10:31	F475	600903	4191045	22,3	22,1	0,702	1021,4	9,99
14/10/2022	10:33	F476	600910	4191043	22,2	22,3	0,161	1021,4	2,29
14/10/2022	11:07	F477	601606	4190847	22,1	19,4	0,801	1003,0	11,20
14/10/2022	11:09	F478	601622	4190835	21,9	20,3	0,934	1003,2	13,07
14/10/2022	11:12	F479	601628	4190826	21,5	20,5	0,456	1004,4	6,40
14/10/2022	11:13	F480	601636	4190813	21,3	20,4	0,618	1004,3	8,67
14/10/2022	11:16	F481	601640	4190804	21,5	21,5	1,234	1004,4	17,31
14/10/2022	11:19	F482	601629	4190786	21,7	21,1	0,222	1005,5	3,12
14/10/2022	11:20	F483	601627	4190764	21,9	19,6	0,711	1005,4	9,97
14/10/2022	11:23	F484	601622	4190746	21,9	20,1	0,499	1005,6	7,00
14/10/2022	11:26	F485	601614	4190744	22,8	21,7	1,332	1005,4	18,62
14/10/2022	11:27	F486	601602	4190747	23,2	21,3	0,765	1005,4	10,68
14/10/2022	11:36	F487	601589	4190755	23,1	21,3	0,436	1005,5	6,09
14/10/2022	11:39	F488	601572	4190754	22,5	21,2	0,349	1005,4	4,88
14/10/2022	11:43	F489	601557	4190745	22,3	21,1	1,581	1005,9	22,15
14/10/2022	11:45	F490	601541	4190742	22,2	21,2	0,392	1006,4	5,50

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
14/10/2022	11:47	F491	601526	4190744	22,3	22,6	1,730	1006,7	24,26
14/10/2022	11:50	F492	601530	4190750	22,3	21,6	1,129	1005,6	15,81
14/10/2022	11:51	F493	601520	4190761	23,0	22,7	0,399	1005,6	5,58
14/10/2022	11:53	F494	601514	4190767	23,5	21,9	0,630	1005,5	8,79
14/10/2022	11:56	F495	601512	4190777	23,1	20,8	0,853	1005,4	11,91
14/10/2022	11:58	F496	601508	4190757	22,1	21,7	0,850	1005,5	11,91
14/10/2022	13:05	F497	601424	4190737	23,3	22,5	1,053	1005,5	14,70
14/10/2022	13:08	F498	601426	4190747	23,2	21,4	0,733	1005,6	10,24
14/10/2022	13:11	F499	601440	4190750	23,6	21,4	0,471	1006,6	6,57
14/10/2022	13:15	F500	601451	4190758	23,8	21,3	0,874	1006,5	12,19
14/10/2022	13:19	F501	601462	4190766	24,3	21,9	0,966	1005,8	13,44
14/10/2022	13:23	F502	601470	4190776	24,7	22,1	1,220	1005,3	16,95
14/10/2022	13:24	F503	601478	4190789	24,2	21,3	0,836	1005,5	11,63
14/10/2022	13:27	F504	601484	4190801	23,9	21,5	1,102	1005,4	15,35
14/10/2022	13:33	F505	601493	4190814	23,6	21,2	0,533	1005,6	7,43
14/10/2022	13:37	F506	601499	4190814	23,4	21,1	0,715	1005,7	9,98
14/10/2022	13:39	F507	601498	4190799	23,4	21,4	0,799	1005,4	11,15
14/10/2022	13:42	F508	601496	4190782	24,1	22,2	1,380	1005,7	19,21
14/10/2022	13:46	F509	601492	4190763	23,8	22,0	1,027	1005,6	14,31
14/10/2022	13:49	F510	601512	4190786	23,0	21,0	0,162	1005,6	2,26
14/10/2022	13:53	F511	601513	4190801	22,0	21,4	0,874	1005,5	12,25
14/10/2022	13:55	F512	601515	4190814	22,2	21,2	0,595	1005,5	8,34
14/10/2022	14:06	F513	601517	4190826	22,3	21,0	0,545	1005,5	7,63
14/10/2022	14:09	F514	601509	4190826	22,6	21,2	0,244	1005,5	3,41
14/10/2022	14:11	F515	601511	4190841	22,4	21,8	0,678	1005,5	9,49
14/10/2022	14:14	F516	601518	4190838	22,3	21,6	2,504	1005,5	35,07
14/10/2022	14:16	F517	601518	4190853	22,4	21,3	0,221	1004,5	3,09
14/10/2022	14:20	F518	601511	4190852	22,4	21,5	0,477	1004,4	6,67
14/10/2022	14:24	F519	601506	4190866	22,3	21,7	0,109	1004,5	1,53
14/10/2022	14:35	F520	601511	4190868	23,4	21,8	0,904	1004,6	12,60
14/10/2022	14:37	F521	601506	4190881	22,9	21,3	0,529	1004,3	7,39
14/10/2022	14:40	F522	601497	4190879	22,9	21,2	2,668	1004,6	37,26
14/10/2022	14:43	F523	601493	4190897	22,9	20,2	0,524	1004,2	7,31
14/10/2022	14:45	F524	601501	4190899	23,0	21,0	0,588	1004,6	8,21
14/10/2022	14:47	F525	601488	4190913	22,6	20,8	0,511	1004,1	7,14

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
14/10/2022	14:53	F526	601483	4190929	23,6	20,4	0,131	1003,3	1,82
14/10/2022	14:57	F527	601474	4190943	22,6	19,6	1,071	1003,3	14,95
14/10/2022	15:00	F528	601467	4190955	22,1	20,9	0,514	1003,0	7,19
14/10/2022	15:03	F529	601461	4190968	22,4	19,9	1,767	1003,2	24,68
14/10/2022	15:05	F530	601456	4190984	21,9	20,7	0,665	1003,4	9,31
14/10/2022	15:10	F531	601452	4190997	22,9	20,4	0,320	1003,1	4,46
14/10/2022	15:13	F532	601449	4191013	22,2	20,0	1,188	1003,1	16,60
14/10/2022	15:17	F533	601447	4191029	21,1	19,8	0,500	1003,1	7,01
14/10/2022	15:22	F534	601446	4191044	21,3	19,9	0,816	1003,1	11,44
14/10/2022	15:25	F535	601445	4191058	21,5	20,2	0,466	1003,0	6,53
14/10/2022	15:29	F536	601440	4191065	21,5	22,4	0,408	1003,2	5,72
21/10/2022	9:32	F537	601216	4190683	21,2	26,1	0,044	990,6	0,61
21/10/2022	9:40	F538	601202	4190680	22,3	24,3	0,092	990,6	1,27
21/10/2022	9:43	F539	601191	4190678	22,9	23,4	0,134	990,8	1,85
21/10/2022	9:44	F540	601176	4190674	23,0	23,5	0,199	991,4	2,74
21/10/2022	9:48	F541	601165	4190671	22,5	22,8	0,162	991,3	2,24
21/10/2022	9:56	F542	601097	4190677	21,9	22,1	0,574	992,1	7,94
21/10/2022	9:56	F543	601096	4190665	20,6	22,1	0,245	992,1	3,41
21/10/2022	9:58	F544	601090	4190657	21,2	22,6	0,174	992,3	2,41
21/10/2022	10:00	F545	601084	4190649	23,4	22,7	0,112	992,3	1,54
21/10/2022	10:02	F546	601087	4190633	22,4	25,2	0,826	992,8	11,42
21/10/2022	10:04	F547	601097	4190638	24,7	26,3	0,050	992,8	0,69
21/10/2022	10:06	F548	601103	4190651	24,5	25,0	0,291	992,3	3,99
21/10/2022	10:08	F549	601111	4190663	24,8	25,5	0,127	992,1	1,74
21/10/2022	10:10	F550	601106	4190668	23,6	24,7	0,281	991,9	3,87
21/10/2022	10:12	F551	601126	4190657	23,6	25,6	0,096	991,9	1,32
21/10/2022	10:16	F552	601136	4190651	23,6	29,1	0,239	991,9	3,29
21/10/2022	10:19	F553	601129	4190649	25,1	29,2	0,262	991,9	3,59
21/10/2022	10:20	F554	601116	4190645	24,8	27,6	0,229	991,9	3,14
21/10/2022	10:22	F555	601108	4190643	24,7	26,6	0,300	992,2	4,11
21/10/2022	10:26	F556	601128	4190676	25,5	26,8	0,456	992,2	6,23
21/10/2022	10:28	F557	601123	4190680	25,3	27,7	1,180	991,9	16,14
21/10/2022	10:39	F558	601114	4190695	24,9	27,7	1,157	991,8	15,84
21/10/2022	10:41	F559	601112	4190711	24,8	27,2	0,124	991,5	1,70
21/10/2022	10:43	F560	601110	4190724	24,5	24,9	0,415	991,9	5,69

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
21/10/2022	10:45	F561	601107	4190742	24,3	24,4	0,250	992,2	3,43
21/10/2022	10:48	F562	601116	4190746	24,6	25,0	0,299	992,5	4,10
21/10/2022	10:54	F563	601102	4190757	24,7	24,0	0,461	992,7	6,32
21/10/2022	10:56	F564	601112	4190759	23,8	25,7	0,715	992,3	9,83
21/10/2022	10:58	F565	601101	4190767	24,6	27,8	0,081	992,9	1,11
21/10/2022	11:00	F566	601101	4190779	24,9	27,8	0,701	992,4	9,61
21/10/2022	11:02	F567	601098	4190788	25,4	26,4	0,138	993,2	1,89
21/10/2022	11:05	F568	601097	4190805	24,3	24,5	0,634	993,2	8,71
21/10/2022	11:52	F569	601167	4190983	25,1	29,5	0,580	990,1	7,92
21/10/2022	11:54	F570	601182	4190985	27,6	28,5	0,452	990,3	6,12
21/10/2022	11:57	F571	601196	4190992	27,0	28,4	0,359	990,3	4,87
21/10/2022	11:59	F572	601211	4191003	26,4	27,7	0,236	989,9	3,21
21/10/2022	12:00	F573	601225	4191011	25,8	26,9	0,442	989,6	6,02
21/10/2022	12:02	F574	601237	4191016	25,4	25,9	0,341	989,5	4,65
21/10/2022	12:05	F575	601249	4191019	24,5	25,9	0,356	989,3	4,87
21/10/2022	12:07	F576	601267	4191017	24,5	25,3	0,444	996,4	6,12
21/10/2022	12:09	F577	601282	4191017	25,4	25,2	0,428	988,2	5,83
21/10/2022	12:11	F578	601294	4191015	24,0	24,9	0,574	987,7	7,85
21/10/2022	12:13	F579	601308	4191009	23,9	24,9	0,492	987,7	6,73
21/10/2022	12:15	F580	601325	4191012	23,1	24,6	0,238	986,9	3,26
21/10/2022	12:17	F581	601336	4191008	22,0	24,5	0,190	986,6	2,61
21/10/2022	12:19	F582	601351	4191004	22,4	24,4	0,076	986,2	1,04
21/10/2022	12:21	F583	601363	4191001	21,4	24,4	0,660	993,4	9,16
21/10/2022	12:23	F584	601379	4190996	22,3	24,5	0,162	985,5	2,22

**ANEXO II – Resultados das medições efetuadas na
plataforma lávica dos Mosteiros**

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
25/10/2022	14:20	PCM	604364	4194660	24,6	27,5	1,097	992,8	15,05
25/10/2022	14:25	M1	604386	4194644	24,1	25,9	0,948	992,3	13,02
25/10/2022	14:31	M2	604379	4194613	23,8	24,3	0,888	992,1	12,21
25/10/2022	14:40	M3	604354	4194583	23,5	24,6	0,620	992,1	8,53
25/10/2022	14:59	M4	604253	4194592	22,6	26,8	1,626	992,9	22,46
25/10/2022	15:08	M5	604240	4194568	21,4	18,8	1,177	992,9	16,33
25/10/2022	15:14	M6	604226	4194537	21,3	18,9	0,961	992,9	13,34
25/10/2022	15:20	M7	604202	4194523	18,7	18,8	0,676	993,0	9,47
25/10/2022	15:26	M8	604203	4194486	20,9	20,1	0,835	993,0	11,60
25/10/2022	15:35	M9	604245	4194416	16,2	17,9	0,255	991,5	3,60
25/10/2022	15:41	M10	604174	4194422	20,0	18,3	0,542	993,0	7,56
25/10/2022	16:00	M11	604160	4194395	20,3	20,5	0,516	993,0	7,19
25/10/2022	16:18	M12	604166	4194363	19,9	18,2	0,441	992,8	6,15
25/10/2022	16:23	M13	604206	4194357	18,5	18,5	0,334	992,7	4,68
25/10/2022	16:28	M14	604192	4194329	21,5	20,5	0,538	992,7	7,46
25/10/2022	17:11	M15	604182	4194301	20,4	18,2	0,496	992,4	6,90
25/10/2022	17:17	M16	604026	4194142	18,9	18,7	0,150	992,3	2,10
25/10/2022	17:20	M17	604002	4194118	18,8	18,4	0,131	991,0	1,83
25/10/2022	17:24	M18	604158	4194276	18,5	21,2	0,850	991,0	11,89
25/10/2022	17:29	M19	604138	4194252	18,6	21,2	1,135	991,8	15,88
25/10/2022	17:35	M20	604120	4194223	18,4	20,3	0,535	991,6	7,49
25/10/2022	17:46	M21	604101	4194196	19,5	20,0	0,740	991,7	10,32
25/10/2022	17:53	M22	604076	4194174	18,9	19,6	0,758	991,2	10,59
25/10/2022	18:01	M23	604050	4194157	18,4	18,4	0,526	991,1	7,36
25/10/2022	18:10	M24	604027	4194141	18,4	18,6	0,224	990,8	3,13
28/10/2022	10:46	M25	604116	4194689	18,5	16,7	0,874	995,9	12,28
28/10/2022	10:50	M26	604099	4194659	18,9	16,7	0,964	996,9	13,54
28/10/2022	10:57	M27	604078	4194627	18,2	18,4	1,144	997,0	16,11
28/10/2022	11:02	M28	604057	4194600	19,2	17,8	0,943	997,4	13,24
28/10/2022	11:06	M29	604035	4194575	18,4	17,0	0,395	997,5	5,56
28/10/2022	11:10	M30	604013	4194547	17,8	16,9	0,264	997,5	3,72
28/10/2022	11:16	M31	603994	4194518	16,3	16,0	0,227	997,5	3,22
28/10/2022	11:21	M32	603977	4194491	17,8	16,3	0,346	997,5	4,88
28/10/2022	11:30	M33	603964	4194464	21,3	17,0	1,337	997,5	18,64
28/10/2022	11:37	M34	603950	4194438	17,9	15,2	0,496	997,5	7,00
28/10/2022	12:44	M35	603897	4194210	21,5	17,8	1,105	997,5	15,39
28/10/2022	13:05	M36	603847	4194260	17,6	15,9	0,149	997,0	2,10
28/10/2022	13:11	M37	603861	4194280	17,5	16,2	0,482	997,0	6,80
28/10/2022	13:14	M38	603881	4194305	21,1	16,7	1,362	997,0	18,99
28/10/2022	13:23	M39	603899	4194324	17,7	15,6	1,312	997,0	18,51
28/10/2022	13:26	M40	603913	4194346	21,3	16,1	1,141	997,0	15,90
28/10/2022	13:31	M41	603931	4194367	21,8	17,3	1,146	996,8	15,94
28/10/2022	13:39	M42	603939	4194400	21,5	18,0	1,838	997,0	25,59
28/10/2022	13:49	M43	603957	4194417	19,5	19,0	0,735	997,1	10,31
29/10/2022	10:37	M44	603836	4194833	18,5	16,2	0,430	998,8	6,06
29/10/2022	10:40	M45	603821	4194805	19,7	16,7	0,950	1000,3	13,35
29/10/2022	10:49	M46	603811	4194781	15,9	15,2	1,022	1000,4	14,56
29/10/2022	10:52	M47	603793	4194765	18,9	14,9	0,044	1000,6	0,62
29/10/2022	10:56	M48	603789	4194735	20,9	18,5	0,485	1000,5	6,79
29/10/2022	11:02	M49	603777	4194703	21,6	15,5	1,315	1000,8	18,37
29/10/2022	11:12	M50	603766	4194672	21,5	14,9	1,139	1000,9	15,92
29/10/2022	11:20	M51	603755	4194647	18,4	15,4	0,539	1001,2	7,62
29/10/2022	11:26	M52	603735	4194610	20,1	16,5	0,746	1001,2	10,48
29/10/2022	11:32	M53	603717	4194588	19,1	15,9	1,016	1001,4	14,33
29/10/2022	11:42	M54	603671	4194574	18,9	17,9	1,874	1001,4	26,44
29/10/2022	11:48	M55	603687	4194541	19,2	17,7	1,080	1002,4	15,24
29/10/2022	11:54	M56	603679	4194509	19,4	17,9	2,205	1002,3	31,09

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
29/10/2022	11:58	M57	603674	4194482	19,6	16,6	0,418	1002,3	5,89
29/10/2022	12:03	M58	603666	4194452	17,7	16,9	0,523	1002,5	7,42
29/10/2022	12:07	M59	603649	4194427	18,7	17,6	0,382	1002,5	5,40
29/10/2022	12:11	M60	603630	4194404	18,9	16,7	0,361	1002,4	5,10
29/10/2022	12:17	M61	603621	4194389	18,9	15,5	0,062	1002,1	0,88
29/10/2022	12:23	M62	603592	4194354	19,3	15,8	0,127	1001,8	1,79
29/10/2022	12:30	M63	603584	4194342	19,6	15,2	0,361	1000,9	5,08
15/05/2023	10:46	M64	604370	4194674	23,1	20,2	2,226	1035,6	32,02
15/05/2023	10:52	M65	604373	4194692	22,6	18,6	2,141	1035,5	30,85
15/05/2023	10:57	M66	604378	4194653	21,1	19,3	1,442	1035,8	20,89
15/05/2023	11:04	M67	604382	4194669	22,5	19,7	0,987	1035,9	14,23
15/05/2023	11:08	M68	604386	4194677	21,9	19,7	1,049	1035,7	15,15
15/05/2023	11:13	M69	604402	4194680	21,4	17,5	1,571	1035,3	22,72
15/05/2023	11:17	M70	604395	4194668	20,4	17,9	1,485	1035,7	21,56
15/05/2023	11:23	M71	604389	4194652	22,6	18,4	1,716	1035,6	24,73
15/05/2023	11:30	M72	604390	4194644	21,1	16,6	0,736	1035,5	10,66
15/05/2023	11:33	M73	604390	4194635	20,3	14,7	0,474	1038,1	6,90
15/05/2023	11:40	M74	604373	4194645	19,5	16,4	0,590	1037,8	8,61
15/05/2023	11:44	M75	604373	4194633	21,1	19,0	2,191	1035,7	31,74
15/05/2023	11:50	M76	604366	4194619	20,0	18,4	1,170	1035,8	17,01
15/05/2023	11:54	M77	604374	4194612	21,5	16,2	0,885	1035,5	12,80
15/05/2023	11:58	M78	604374	4194614	19,9	15,9	1,162	1035,6	16,90
15/05/2023	12:03	M79	604376	4194620	21,3	17,1	1,052	1035,6	15,23
15/05/2023	12:08	M80	604358	4194640	20,8	18,3	0,593	1035,8	8,60
15/05/2023	12:13	M81	604357	4194629	21,6	18,8	0,662	1036,0	9,58
15/05/2023	12:17	M82	604355	4194620	20,4	18,3	0,751	1035,9	10,91
15/05/2023	12:22	M83	604344	4194624	23,5	17,8	0,864	1036,2	12,42
15/05/2023	12:29	M84	604349	4194633	23,4	16,6	0,527	1036,2	7,58
15/05/2023	12:33	M85	604346	4194642	20,2	16,9	1,663	1036,0	24,17
15/05/2023	12:36	M86	604338	4194642	23,0	18,2	1,302	1035,9	18,74
15/05/2023	12:41	M87	604334	4194632	18,6	16,9	1,368	1036,1	19,99
15/05/2023	12:44	M88	604331	4194625	19,3	18,4	0,807	1035,8	11,76
15/05/2023	12:48	M89	604329	4194616	20,3	19,9	0,955	1035,6	13,87
15/05/2023	12:52	M90	604324	4194602	19,8	18,2	2,459	1035,5	35,77
15/05/2023	12:55	M91	604323	4194592	23,2	19,0	2,512	1035,7	36,13
15/05/2023	12:58	M92	604326	4194590	20,0	17,4	1,188	1035,8	17,27
15/05/2023	13:02	M93	604329	4194596	23,4	20,5	1,840	1035,7	26,45
15/05/2023	13:06	M94	604332	4194605	23,0	18,1	1,642	1035,7	23,63
15/05/2023	13:10	M95	604334	4194614	26,3	21,7	1,345	1035,8	19,15
15/05/2023	13:15	M96	604347	4194616	19,6	17,1	1,377	1035,3	20,04
15/05/2023	13:18	M97	604344	4194605	22,0	17,8	0,860	1035,5	12,42
15/05/2023	13:23	M98	604338	4194588	23,2	20,2	2,039	1039,8	29,44
15/05/2023	13:29	M99	604344	4194586	21,5	17,9	0,760	1035,5	10,99
15/05/2023	13:34	M100	604346	4194589	24,5	21,8	0,475	1035,7	6,80
15/05/2023	13:40	M101	604349	4194605	24,3	21,6	1,533	1035,3	21,96
15/05/2023	13:44	M102	604356	4194615	24,8	20,3	1,026	1035,2	14,67
15/05/2023	13:49	M103	604366	4194604	23,8	18,2	1,611	1036,9	23,15
15/05/2023	13:55	M104	604361	4194592	26,5	19,6	2,568	1034,5	36,49
15/05/2023	14:00	M105	604358	4194583	24,9	18,0	2,125	1034,0	30,34
15/05/2023	14:40	M106	604322	4194639	25,6	21,8	1,138	1035,5	16,23
15/05/2023	14:43	M107	604321	4194626	24,3	23,0	2,138	1035,6	30,63
15/05/2023	14:46	M108	604319	4194609	23,3	21,4	1,692	1035,7	24,33
15/05/2023	14:48	M109	604315	4194595	22,1	18,2	1,452	1035,6	20,96
15/05/2023	14:52	M110	604301	4194595	24,7	24,0	2,301	1035,8	32,93
15/05/2023	14:54	M111	604301	4194612	23,3	24,1	1,705	1035,8	24,52
15/05/2023	14:56	M112	604304	4194625	24,4	25,1	1,682	1035,6	24,09
15/05/2023	14:58	M113	604306	4194642	23,6	23,5	2,325	1035,9	33,40

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
15/05/2023	15:00	M114	604296	4194646	23,7	24,4	1,769	1035,7	25,40
15/05/2023	15:03	M115	604296	4194633	24,8	27,4	1,545	1035,8	22,10
15/05/2023	15:06	M116	604293	4194616	23,8	23,3	2,690	1035,7	38,61
15/05/2023	15:09	M117	604289	4194597	25,9	25,5	1,825	1035,9	26,02
15/05/2023	15:12	M118	604281	4194599	23,8	20,7	2,501	1035,4	35,89
15/05/2023	15:15	M119	604280	4194618	26,0	27,2	2,077	1035,8	29,60
15/05/2023	15:17	M120	604283	4194629	26,7	29,2	1,571	1035,7	22,33
15/05/2023	15:19	M121	604286	4194647	24,4	23,8	3,573	1035,9	51,19
22/05/2023	10:38	M122	604265	4194659	20,2	20,1	0,761	1033,6	11,03
22/05/2023	10:42	M123	604261	4194647	19,6	19,1	0,824	1033,7	11,97
22/05/2023	10:47	M124	604256	4194627	20,2	19,3	1,206	1033,8	17,49
22/05/2023	10:50	M125	604254	4194613	20,1	19,4	1,297	1033,9	18,82
22/05/2023	10:54	M126	604247	4194615	21,3	19,3	1,474	1034,5	21,31
22/05/2023	10:59	M127	604248	4194631	20,1	20,7	1,226	1033,8	17,79
22/05/2023	11:01	M128	604252	4194645	20,8	20,7	1,085	1034,4	15,71
22/05/2023	11:04	M129	604255	4194657	20,6	20,8	1,139	1033,8	16,50
22/05/2023	11:06	M130	604248	4194659	20,6	20,6	0,930	1033,6	13,47
22/05/2023	11:08	M131	604244	4194650	20,0	21,0	1,142	1033,6	16,57
22/05/2023	11:11	M132	604240	4194636	20,5	20,9	0,623	1034,0	9,03
22/05/2023	11:15	M133	604237	4194621	19,2	20,5	0,596	1034,4	8,68
22/05/2023	11:22	M134	604234	4194607	20,2	20,3	0,407	1034,5	5,91
22/05/2023	11:30	M135	604247	4194600	22,5	20,5	0,885	1033,8	12,74
22/05/2023	11:35	M136	604248	4194584	19,6	17,7	1,826	1033,8	26,54
22/05/2023	11:38	M137	604245	4194571	21,1	18,1	0,534	1033,9	7,72
22/05/2023	11:42	M138	604237	4194571	22,4	18,5	1,439	1033,8	20,71
22/05/2023	11:47	M139	604237	4194584	22,3	19,4	1,799	1033,8	25,91
22/05/2023	11:50	M140	604242	4194599	23,9	19,5	1,090	1033,9	15,61
22/05/2023	11:54	M141	604237	4194600	23,5	17,0	1,297	1033,9	18,60
22/05/2023	11:58	M142	604232	4194588	22,1	19,0	1,966	1033,9	28,33
22/05/2023	12:01	M143	604225	4194575	22,4	18,4	1,054	1033,4	15,17
22/05/2023	12:17	M144	604240	4194558	22,8	21,6	0,673	1033,4	9,67
22/05/2023	12:20	M145	604236	4194544	22,3	21,7	1,339	1033,7	19,28
22/05/2023	12:24	M146	604229	4194533	22,1	20,6	1,372	1032,9	19,75
22/05/2023	12:28	M147	604223	4194520	20,2	19,2	1,119	1033,8	16,23
22/05/2023	12:32	M148	604212	4194521	21,3	20,5	0,271	1033,4	3,91
22/05/2023	12:34	M149	604216	4194530	24,3	20,9	1,040	1033,4	14,87
22/05/2023	12:38	M150	604198	4194528	23,1	19,9	0,246	1033,7	3,53
22/05/2023	13:00	M151	604101	4194636	22,6	21,5	1,322	1034,0	19,02
22/05/2023	13:03	M152	604105	4194643	24,2	23,9	1,857	1034,0	26,57
22/05/2023	13:06	M153	604111	4194659	23,3	23,8	2,732	1033,9	39,21
22/05/2023	13:08	M154	604115	4194674	25,3	25,3	1,754	1033,7	25,00
22/05/2023	13:10	M155	604120	4194687	22,5	22,7	2,270	1033,9	32,67
22/05/2023	13:13	M156	604110	4194690	23,3	22,7	2,079	1033,8	29,84
22/05/2023	13:16	M157	604102	4194677	21,7	21,9	3,102	1034,1	44,77
22/05/2023	13:18	M158	604098	4194662	21,2	21,1	2,468	1033,4	35,66
22/05/2023	13:21	M159	604090	4194648	23,1	24,1	3,200	1032,3	45,89
22/05/2023	13:23	M160	604080	4194631	25,3	24,7	1,670	1032,7	23,78
24/05/2023	9:32	M161	604251	4194677	19,1	19,8	2,105	1030,0	30,53
24/05/2023	9:35	M162	604256	4194689	19,5	19,9	1,378	1030,1	19,96
24/05/2023	9:38	M163	604259	4194705	19,1	20,4	1,960	1030,1	28,43
24/05/2023	9:40	M164	604251	4194707	20,4	20,3	1,659	1035,8	24,09
24/05/2023	9:42	M165	604245	4194692	20,2	19,6	1,646	1029,9	23,78
24/05/2023	9:45	M166	604243	4194677	20,4	19,5	1,669	1030,9	24,12
24/05/2023	9:47	M167	604228	4194680	19,9	18,4	1,296	1030,0	18,75
24/05/2023	9:49	M168	604228	4194693	17,7	18,8	1,618	1030,0	23,58
24/05/2023	9:51	M169	604231	4194707	19,7	19,0	2,150	1030,0	31,12
24/05/2023	10:21	M170	603818	4194838	20,6	20,8	1,243	1030,1	17,94

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
24/05/2023	10:26	M171	603821	4194837	20,9	20,7	1,323	1030,2	19,07
24/05/2023	10:39	M172	603806	4194876	20,3	18,7	2,245	1031,0	32,46
24/05/2023	10:43	M173	603802	4194862	21,4	18,8	1,232	1031,2	17,75
24/05/2023	10:47	M174	603799	4194852	20,3	19,3	1,861	1031,7	26,93
24/05/2023	10:49	M175	603795	4194795	21,3	19,8	2,124	1030,8	30,60
24/05/2023	10:53	M176	603810	4194821	22,7	22,4	2,969	1030,9	42,58
24/05/2023	11:00	M177	603817	4194810	19,9	22,4	1,648	1030,7	23,85
24/05/2023	11:05	M178	603813	4194801	21,0	22,5	2,203	1030,8	31,77
24/05/2023	11:08	M179	603805	4194787	19,6	20,6	1,190	1030,9	17,25
24/05/2023	11:11	M180	603823	4194783	18,6	19,7	1,321	1031,1	19,21
24/05/2023	11:14	M181	603828	4194795	19,6	20,9	0,455	1031,2	6,60
24/05/2023	11:18	M182	603834	4194811	20,5	20,9	2,455	1031,2	35,48
24/05/2023	11:24	M183	603826	4194820	20,4	21,1	1,022	1031,0	14,77
24/05/2023	11:27	M184	603836	4194829	18,7	18,2	0,616	1031,3	8,96
24/05/2023	11:32	M185	603794	4194768	19,7	19,2	0,213	1030,6	3,08
24/05/2023	11:38	M186	603794	4194752	18,9	20,5	1,206	1031,4	17,53
24/05/2023	11:40	M187	603792	4194743	20,6	22,5	1,278	1031,2	18,46
24/05/2023	11:42	M188	603786	4194725	20,3	22,8	1,636	1031,4	23,66
24/05/2023	11:45	M189	603783	4194713	20,8	21,7	1,768	1031,4	25,53
24/05/2023	11:48	M190	603777	4194699	20,4	21,2	2,006	1031,7	29,01
24/05/2023	11:50	M191	603790	4194696	20,6	21,0	1,744	1031,3	25,20
24/05/2023	11:54	M192	603797	4194712	20,3	21,4	1,223	1031,3	17,69
24/05/2023	11:56	M193	603800	4194730	20,4	21,7	1,422	1031,2	20,56
24/05/2023	11:58	M194	603802	4194740	20,8	21,3	1,765	1031,2	25,48
24/05/2023	12:01	M195	603806	4194751	20,2	19,2	2,459	1031,3	35,58
24/05/2023	12:14	M196	603768	4194690	20,7	19,1	0,793	1031,8	11,46
24/05/2023	12:16	M197	603761	4194675	19,8	18,1	0,376	1031,8	5,45
24/05/2023	12:19	M198	603756	4194665	20,4	17,8	0,207	1031,7	2,99
24/05/2023	12:21	M199	603748	4194650	19,9	19,5	0,402	1031,4	5,82
24/05/2023	12:24	M200	603762	4194643	19,9	19,2	1,777	1031,8	25,75
24/05/2023	12:27	M201	603767	4194658	20,2	20,7	2,230	1031,2	32,26
24/05/2023	12:31	M202	603774	4194671	21,1	21,5	1,610	1031,7	23,23
24/05/2023	12:35	M203	603784	4194683	21,0	21,1	2,274	1031,7	32,82
24/05/2023	13:13	M204	604038	4194578	20,5	23,6	2,456	1030,6	35,47
24/05/2023	13:16	M205	604046	4194591	21,6	22,1	1,523	1030,8	21,92
24/05/2023	13:19	M206	604064	4194604	21,4	23,1	2,191	1030,5	31,55
24/05/2023	13:21	M207	604073	4194617	21,2	23,0	1,456	1030,8	20,98
24/05/2023	13:25	M208	604096	4194630	21,4	22,5	1,992	1030,6	28,68
24/05/2023	13:28	M209	604089	4194616	22,3	22,2	3,310	1030,4	47,51
24/05/2023	13:31	M210	604081	4194603	20,6	21,2	3,116	1030,6	44,99
24/05/2023	13:34	M211	604073	4194590	20,4	20,1	1,615	1030,8	23,34
24/05/2023	13:37	M212	604061	4194580	20,0	19,8	1,619	1030,8	23,43
24/05/2023	13:41	M213	604051	4194568	22,1	24,0	1,399	1030,7	20,10
24/05/2023	13:46	M214	604046	4194560	22,6	25,7	1,177	1030,5	16,88
24/05/2023	13:51	M215	604037	4194549	21,7	25,5	1,433	1030,6	20,61
24/05/2023	13:53	M216	604028	4194537	23,4	25,5	0,752	1030,4	10,75
24/05/2023	13:55	M217	604013	4194541	22,5	24,5	0,908	1030,3	13,02
24/05/2023	13:57	M218	604018	4194552	22,1	25,4	0,996	1030,5	14,31
24/05/2023	14:00	M219	604023	4194561	23,2	29,9	1,777	1030,5	25,43
24/05/2023	14:14	M220	604193	4194519	23,4	23,5	0,694	1032,0	9,94
24/05/2023	14:17	M221	604190	4194507	22,5	29,3	0,518	1029,8	7,43
24/05/2023	14:21	M222	604186	4194493	23,1	25,2	0,438	1029,9	6,27
24/05/2023	14:23	M223	604200	4194485	22,7	22,7	1,321	1029,6	18,92
24/05/2023	14:25	M224	604207	4194493	22,3	22,6	1,177	1029,6	16,88
24/05/2023	14:34	M225	604211	4194515	18,8	18,5	1,045	1029,3	15,16
24/05/2023	14:42	M226	604191	4194472	22,6	23,1	2,005	1029,2	28,71
24/05/2023	14:44	M227	604190	4194456	22,6	26,3	1,058	1029,5	15,16

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
24/05/2023	14:46	M228	604183	4194441	22,7	27,0	1,117	1029,6	16,00
24/05/2023	14:48	M229	604175	4194428	22,1	27,6	1,046	1029,4	15,01
24/05/2023	14:51	M230	604165	4194416	21,4	21,9	0,810	1029,7	11,65
24/05/2023	14:53	M231	604160	4194404	23,5	30,9	0,562	1029,5	8,03
24/05/2023	14:56	M232	604158	4194390	23,3	28,0	1,406	1029,7	20,10
24/05/2023	14:58	M233	604150	4194380	23,4	25,5	2,174	1029,5	31,06
24/05/2023	15:01	M234	604143	4194367	21,9	20,0	0,690	1029,7	9,91
24/05/2023	15:15	M235	604171	4194394	19,9	21,2	1,658	1029,2	23,96
24/05/2023	15:20	M236	604172	4194377	21,5	23,8	2,438	1029,1	35,04
24/05/2023	15:22	M237	604173	4194361	22,9	23,6	2,232	1029,2	31,93
24/05/2023	15:24	M238	604173	4194345	22,4	23,0	1,540	1031,4	22,12
24/05/2023	15:27	M239	604169	4194331	22,5	24,9	1,083	1029,5	15,52
24/05/2023	15:30	M240	604160	4194318	22,1	25,1	1,590	1028,9	22,80
24/05/2023	15:37	M241	604172	4194314	21,8	26,4	1,346	1028,5	19,32
24/05/2023	15:39	M242	604178	4194328	20,0	28,1	1,891	1028,5	27,30
24/05/2023	15:41	M243	604184	4194343	22,1	28,4	1,384	1028,5	19,84
24/05/2023	15:42	M244	604189	4194356	22,2	25,7	2,204	1028,8	31,59
24/05/2023	15:45	M245	604192	4194372	23,2	27,7	1,154	1028,5	16,48
24/05/2023	15:46	M246	604204	4194362	24,3	26,1	1,980	1027,9	28,16
24/05/2023	15:48	M247	604202	4194349	22,1	24,3	2,273	1028,2	32,58
24/05/2023	15:50	M248	604202	4194336	21,3	21,4	2,536	1028,6	36,46
24/05/2023	15:52	M249	604195	4194321	21,1	22,3	1,458	1028,8	20,98
24/05/2023	15:53	M250	604182	4194308	22,2	23,7	1,298	1028,4	18,60
24/05/2023	15:55	M251	604178	4194296	20,7	21,8	0,932	1028,5	13,42
25/05/2023	10:32	M252	603849	4194261	17,6	19,2	1,464	1027,9	21,30
25/05/2023	10:34	M253	603857	4194269	18,7	19,6	1,712	1027,7	24,81
25/05/2023	10:36	M254	603861	4194280	17,8	18,9	1,099	1027,8	15,98
25/05/2023	10:40	M255	603873	4194291	18,5	19,4	1,713	1027,9	24,85
25/05/2023	10:42	M256	603882	4194300	18,7	19,5	1,884	1027,9	27,31
25/05/2023	10:45	M257	603890	4194314	18,4	19,1	1,616	1028,2	23,45
25/05/2023	10:48	M258	603899	4194326	18,8	19,1	2,195	1028,2	31,81
25/05/2023	10:50	M259	603908	4194336	18,1	19,0	2,133	1028,0	30,98
25/05/2023	10:52	M260	603919	4194349	19,0	19,9	1,748	1028,2	25,32
25/05/2023	10:54	M261	603928	4194358	18,8	19,4	1,920	1028,2	27,83
25/05/2023	10:57	M262	603938	4194371	18,3	19,9	2,181	1028,4	31,67
25/05/2023	11:00	M263	603950	4194382	18,3	20,5	1,802	1028,4	26,17
25/05/2023	11:03	M264	603958	4194392	19,7	20,6	1,788	1028,1	25,83
25/05/2023	11:05	M265	603966	4194404	19,4	20,3	0,634	1027,9	9,17
25/05/2023	11:57	M266	603673	4194572	18,8	18,8	2,927	1031,9	42,58
25/05/2023	12:03	M267	603680	4194561	20,0	20,3	10,005	1032,0	144,95
25/05/2023	12:09	M268	603686	4194554	19,7	18,5	1,542	1030,9	22,34
25/05/2023	12:17	M269	603685	4194541	19,4	19,4	6,491	1030,8	94,12
25/05/2023	12:20	M270	603685	4194529	19,7	19,4	7,382	1031,4	106,99
25/05/2023	12:25	M271	603684	4194517	20,9	20,7	9,039	1031,4	130,48
25/05/2023	12:28	M272	603680	4194507	21,7	22,0	6,152	1031,4	88,56
25/05/2023	12:30	M273	603676	4194492	21,1	21,7	4,005	1031,3	57,77
25/05/2023	12:33	M274	603673	4194479	21,7	22,2	2,311	1031,3	33,27
25/05/2023	12:36	M275	603669	4194462	22,5	21,4	1,241	1031,5	17,82
25/05/2023	12:40	M276	603663	4194448	21,0	22,0	0,576	1031,2	8,31
25/05/2023	12:42	M277	603657	4194437	20,1	21,0	0,371	1031,2	5,37
25/05/2023	12:44	M278	603647	4194427	21,8	20,8	0,267	1031,1	3,84
25/05/2023	12:47	M279	603640	4194412	21,1	20,4	0,187	1031,2	2,70
25/05/2023	12:50	M280	603631	4194400	21,4	21,8	0,249	1031,5	3,59
25/05/2023	12:52	M281	603622	4194389	20,7	20,8	0,107	1031,6	1,55
25/05/2023	13:31	M282	603590	4194353	21,5	21,4	0,070	1029,1	1,01
25/05/2023	13:33	M283	603582	4194342	20,6	18,9	0,327	1029,3	4,72
25/05/2023	13:36	M284	603577	4194345	21,1	21,0	0,579	1029,4	8,34

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
25/05/2023	13:39	M285	603581	4194359	22,4	22,5	0,297	1029,5	4,26
25/05/2023	14:00	M286	603748	4194606	21,9	24,2	0,962	1029,7	13,82
25/05/2023	14:03	M287	603740	4194595	22,6	29,5	0,576	1029,5	8,25
25/05/2023	14:06	M288	603733	4194585	21,2	19,3	0,549	1029,6	7,90
25/05/2023	14:08	M289	603720	4194586	21,0	18,6	0,863	1032,5	12,47
25/05/2023	14:12	M290	603721	4194600	21,3	19,7	1,368	1029,9	19,69
25/05/2023	14:15	M291	603725	4194625	22,5	20,3	1,685	1029,6	24,15
25/05/2023	14:47	M292	603974	4194539	22,8	22,1	1,015	1028,7	14,52
25/05/2023	14:49	M293	603970	4194526	23,3	24,6	1,636	1028,5	23,36
25/05/2023	14:52	M294	603955	4194530	22,9	23,1	1,035	1028,8	14,80
25/05/2023	14:55	M295	603965	4194542	21,6	23,8	0,679	1028,7	9,75
25/05/2023	15:07	M296	603961	4194516	21,6	24,5	1,838	1028,7	26,40
25/05/2023	15:10	M297	603955	4194501	22,2	24,6	1,375	1028,6	19,71
25/05/2023	15:12	M298	603948	4194490	21,4	23,2	2,267	1028,7	32,58
25/05/2023	15:14	M299	603942	4194478	20,9	21,4	0,591	1028,6	8,51
25/05/2023	15:17	M300	603932	4194483	20,9	21,6	1,157	1028,2	16,65
25/05/2023	15:19	M301	603932	4194492	21,9	22,6	1,263	1028,5	18,12
25/05/2023	15:22	M302	603938	4194504	22,1	22,9	1,409	1028,4	20,20
25/05/2023	15:24	M303	603944	4194517	24,9	24,5	1,557	1028,7	22,12
25/05/2023	15:36	M304	603968	4194428	20,4	21,8	0,538	1027,6	7,75
25/05/2023	15:38	M305	603973	4194437	23,5	26,9	1,282	1028,0	18,28
25/05/2023	15:40	M306	603981	4194452	23,7	28,2	1,032	1027,6	14,70
25/05/2023	15:42	M307	603966	4194460	23,8	29,3	0,620	1027,9	8,83
25/05/2023	15:45	M308	603957	4194448	22,6	28,9	0,674	1027,7	9,64
25/05/2023	15:48	M309	603951	4194437	20,0	20,1	1,585	1028,1	22,88
25/05/2023	15:54	M310	603984	4194455	20,0	21,4	0,571	1027,5	8,24
25/05/2023	15:56	M311	603990	4194469	22,6	24,6	2,031	1027,6	29,04
25/05/2023	15:58	M312	603995	4194480	24,1	25,9	1,025	1027,6	14,58
25/05/2023	16:04	M313	604005	4194493	21,1	22,2	0,873	1027,7	12,55
25/05/2023	16:06	M314	604010	4194505	24,0	24,2	0,927	1027,6	13,19
25/05/2023	16:08	M315	604017	4194519	22,6	24,0	1,277	1027,5	18,26
25/05/2023	16:09	M316	604022	4194527	21,9	20,1	1,063	1027,6	15,24
25/05/2023	16:19	M317	603954	4194413	21,5	23,2	2,377	1027,2	34,10
25/05/2023	16:47	M318	604038	4194145	24,3	21,1	0,622	1025,8	8,83
25/05/2023	16:51	M319	604051	4194158	24,1	21,3	0,367	1025,7	5,21
25/05/2023	16:54	M320	604060	4194163	22,6	26,0	0,760	1025,8	10,85
25/05/2023	16:56	M321	604073	4194171	25,4	27,5	0,715	1025,8	10,11
25/05/2023	16:57	M322	604083	4194179	24,0	27,7	0,865	1025,8	12,29
25/05/2023	17:00	M323	604093	4194192	23,6	26,6	1,315	1026,1	18,71
25/05/2023	17:01	M324	604102	4194205	25,3	27,0	0,372	1026,1	5,26
25/05/2023	17:03	M325	604110	4194218	23,0	26,1	0,589	1026,3	8,40
25/05/2023	17:05	M326	604116	4194229	23,9	26,5	0,841	1026,2	11,96
25/05/2023	17:07	M327	604129	4194243	24,9	25,3	0,737	1026,1	10,44
25/05/2023	17:09	M328	604138	4194257	24,6	29,5	0,639	1026,1	9,06
25/05/2023	17:11	M329	604146	4194269	22,5	24,7	1,588	1026,8	22,70
25/05/2023	17:13	M330	604158	4194279	24,9	28,7	0,715	1026,2	10,13
25/05/2023	17:15	M331	604168	4194291	25,7	26,1	1,303	1026,2	18,41
25/05/2023	17:18	M332	604157	4194299	25,1	25,8	2,040	1026,7	28,90
25/05/2023	17:20	M333	604149	4194287	24,4	27,7	0,348	1026,6	4,94
25/05/2023	17:22	M334	604138	4194276	25,0	28,7	0,399	1026,4	5,65
25/05/2023	17:25	M335	604130	4194265	25,7	26,5	0,544	1025,9	7,69
25/05/2023	17:27	M336	604121	4194254	25,1	20,0	1,004	1026,3	14,22
25/05/2023	17:29	M337	604114	4194243	25,4	28,3	0,565	1026,2	7,99
25/05/2023	17:30	M338	604104	4194231	25,2	26,0	1,309	1026,1	18,53
25/05/2023	17:32	M339	604094	4194220	24,1	28,4	0,551	1026,1	7,83
25/05/2023	17:34	M340	604085	4194208	22,8	25,5	1,044	1026,0	14,89
25/05/2023	17:36	M341	604079	4194199	24,4	27,6	0,741	1025,9	10,51

Data	Hora	Ponto	UTM (M)	UTM (P)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura do solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (ppm s ⁻¹)	Pressão barométrica (mbar)	Fluxo de CO ₂ (g m ⁻² d ⁻¹)
25/05/2023	17:38	M342	604068	4194185	23,3	25,4	0,288	1025,8	4,10
25/05/2023	17:49	M343	603826	4194272	20,8	20,9	0,922	1026,9	13,26
25/05/2023	17:50	M344	603843	4194279	20,9	21,3	0,780	1026,8	11,21
25/05/2023	17:52	M345	603854	4194289	21,6	21,8	0,952	1026,8	13,65
25/05/2023	17:54	M346	603863	4194298	21,9	22,0	0,919	1026,7	13,16
25/05/2023	17:56	M347	603873	4194312	21,4	21,4	1,085	1027,5	15,58
25/05/2023	17:58	M348	603879	4194323	21,6	22,0	1,184	1027,1	16,98
25/05/2023	18:00	M349	603888	4194334	21,2	22,3	1,840	1027,0	26,42
25/05/2023	18:02	M350	603896	4194348	21,0	22,5	1,948	1027,3	28,00
25/05/2023	18:05	M351	603905	4194360	21,9	24,3	1,699	1027,1	24,34
25/05/2023	18:07	M352	603916	4194371	22,1	25,3	1,821	1027,3	26,07
25/05/2023	18:12	M353	603925	4194379	21,6	22,7	1,484	1027,0	21,28

UNIVERSIDADE DOS AÇORES
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Rua da Mãe de Deus
9500-321 Ponta Delgada
Açores, Portugal